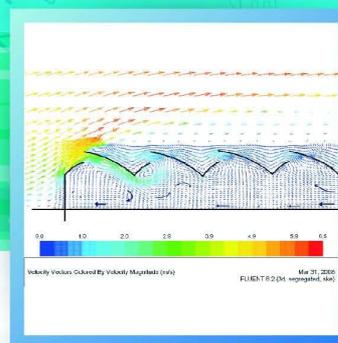
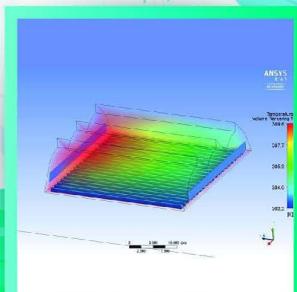
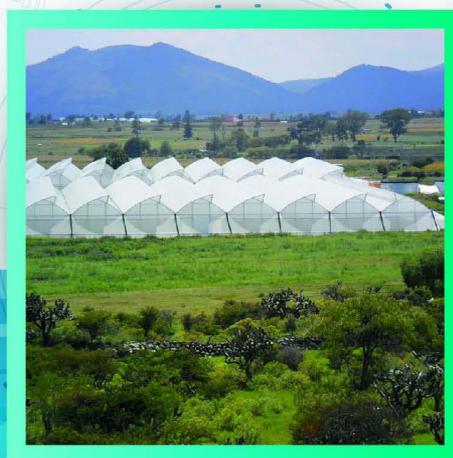


CONSIDERACIONES AGRONÓMICAS PARA EL DISEÑO DE INVERNADEROS TÍPICOS DE MÉXICO

Jorge Flores Velázquez
Waldo Ojeda Bustamante



AVANCES EN
RIEGO Y DRENAJE

IMTA
Coordinación de Riego y Drenaje

Consideraciones agronómicas para el diseño de invernaderos típicos de México

Jorge Flores Velázquez y Waldo Ojeda Bustamante

México 2015

631.583 Ojeda Bustamante, Waldo (ed.)
O73 *Consideraciones agronómicas para el diseño de invernaderos típicos de México* / Waldo Ojeda Bustamante y Jorge Flores Velázquez. Jiutepec, Mor.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ©2015.
207 p.

ISBN 978-607-9368-38-8 (obra impresa)
978-607-9368-39-5 (obra digital)

1. Invernaderos 2. Diseño 3. Sistemas de ventilación 4. Agronomía

Autores:

Waldo Ojeda Bustamante, Jorge Flores Velázquez

Responsable de la edición:

Rebeca Tavira Gerardo

Coordinación Editorial:

Fátima Sánchez Bonilla

Primera edición: 2015.

D.R. © Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Paseo Cuauhnáhuac 8532

62550 Progreso, Jiutepec, Morelos

México

www.imta.gob.mx

ISBN 978-607-9368-38-8 (obra impresa)

978-607-9368-39-5 (obra digital)

Prohibida su reproducción parcial o total, por cualquier medio, mecánico, electrónico, de fotocopias, térmico u otros, sin permiso de los editores.

Impreso en México – Printed in Mexico

PRÓLOGO

El despunte de la agricultura protegida en el mundo ha puesto de manifiesto por un lado las bondades de esta técnica de producción, pero también la necesidad de profundizar en la investigación relacionada con los procesos que suceden de manera inherente al desarrollo del cultivo. Los procesos fisiológicos del cultivo, tales como fotosíntesis, respiración, etc., son procesos estrechamente relacionados con las condiciones medioambientales, las cuales pueden o no ser adecuadas para lograr las mejores cosechas.

México es uno de los países que más ha crecido en superficie para cultivar en invernadero. En los últimos años se mantiene un crecimiento sostenido anual del 12 %, pero entre el 2000 y 2005 el incremento fue del 600 %, al pasar rápidamente de 340 ha a 7 000 ha. Aún cuando no se tiene una cifra oficial de la superficie dedicada la producción de cultivos en agricultura protegida, se ha pasado de las 14 500 ha al final de 2010 hasta cerca de 30 000 ha en 2015.

En México es posible encontrar una extensa variedad de modelos de invernaderos como el cenital, túnel, sierra, etc., así como diferentes dimensiones y tipo de materiales. Una constante que comienza a notarse es el uso de instalaciones de gran tamaño concatenadas entre sí en batería, lo que sugiere un ahorro en el costo de instalación. Sin embargo, una mayor dimensión implica más problemas en el manejo ambiental del invernadero y en consecuencia, mayores problemas agronómicos en los cultivos.

Un aspecto muy importante en un invernadero es el control del clima. En grandes dimensiones el aire hace un recorrido mayor, y si se contempla la presencia de un cultivo y el obstáculo que este supone al flujo del aire, pueden surgir problemas de ventilación. Ante esta situación, se pueden utilizar sistemas mecánicos de ventilación y nebulizadores o pantallas evaporadoras, con la desventaja del gasto extra en el mantenimiento.

Uno de los principales métodos para ventilar en invernaderos es aquel que utiliza las fuerzas de presión y temperatura, es decir la ventilación natural, cuya ventaja principal es el nulo costo de mantenimiento. El funcionamiento del sistema de ventilación es complejo pero debido al incremento en la superficie de invernaderos, el impacto en el ambiente del invernadero y la necesidad de contar con un método para la gestión de la ventilación, se han desarrollado diversos métodos de análisis, tanto experimentales como teóricos.

La dinámica de fluidos computacional o CFD (por sus siglas en inglés, Computational Fluid Dynamics) es una herramienta de análisis de los sistemas de ventilación en invernaderos. El uso del CFD es una técnica que se ha venido puliendo

desde hace 20 años, tiempo en el cual se han hecho avances importantes en el diseño y manejo del invernadero, lo que ha generado confianza en su uso. El presente trabajo pretende mostrar el funcionamiento del sistema de ventilación natural en invernaderos típicos de México usando CFD para contribuir a un establecimiento razonado del invernadero que contemple el aspecto agronómico en su diseño.

Jorge Flores-Velázquez
Waldo Ojeda Bustamante

Consideraciones ambientales para el diseño agronómico de invernaderos típicos de México

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1 LA PRODUCCIÓN DE CULTIVOS EN INVERNADERO EN MÉXICO

CAPÍTULO 2 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE INVERNADEROS

CAPÍTULO 3 EL AMBIENTE EN INVERNADERO

CAPÍTULO 4 HERRAMIENTAS NUMÉRICAS PARA EL DISEÑO AGRONÓMICO DE INVERNADEROS

CAPÍTULO 5 SIMULACIÓN PARA EL DISEÑO AGRONÓMICO DE INVERNADEROS

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

CAPÍTULO 7 REFERENCIAS

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	2
CAPÍTULO 1.....	3
LA PRODUCCIÓN DE CULTIVOS EN INVERNADERO EN MÉXICO.....	3
1.1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.2 IMPORTANCIA DE LOS CULTIVOS EN INVERNADERO EN MÉXICO.....	4
1.2.1 <i>Desarrollo de la horticultura en México.....</i>	<i>7</i>
1.2.2 <i>Superficies productivas.....</i>	<i>7</i>
1.2.3 <i>Esquema actual de la agricultura protegida en México.....</i>	<i>10</i>
1.3 EL INVERNADERO MEXICANO.....	11
1.4 TAMAÑO DE LOS INVERNADEROS Y CRITERIOS A CONSIDERAR EN SU DISEÑO.....	14
CAPÍTULO 2.....	19
CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE INVERNADEROS.....	19
2.1 CONSIDERACIONES FÍSICAS.....	19
2.1.1 <i>Latitud.....</i>	<i>19</i>
2.1.2 <i>Duración del día.....</i>	<i>20</i>
2.1.3 <i>Ángulo de los rayos.....</i>	<i>20</i>
2.1.4 <i>Altitud.....</i>	<i>21</i>
2.1.5 <i>Gradiente vertical de temperatura.....</i>	<i>22</i>
2.1.6 <i>Vientos dominantes.....</i>	<i>22</i>
2.1.7 <i>Orientación.....</i>	<i>24</i>
2.2 CONSIDERACIONES CLIMÁTICAS.....	25
2.2.1 <i>Radiación solar.....</i>	<i>25</i>
2.2.2 <i>Temperatura (T [°C]).....</i>	<i>28</i>
2.2.3 <i>Humedad relativa (HR [%]).....</i>	<i>29</i>
2.2.4 <i>Humedad ambiental.....</i>	<i>31</i>
2.2.5 <i>Contenido de CO₂.....</i>	<i>31</i>
2.2.6 <i>Viento.....</i>	<i>32</i>
2.2.7 <i>Déficit de presión de vapor (DPV [kPa]).....</i>	<i>33</i>
2.3 CONSIDERACIONES AGRONÓMICAS.....	33
2.4 CONSIDERACIONES ESTRUCTURALES.....	35
2.4.1 <i>Cubiertas.....</i>	<i>35</i>
2.4.2 <i>Topología.....</i>	<i>37</i>
2.4.3 <i>Dimensiones.....</i>	<i>41</i>

ÍNDICE DE CONTENIDO

2.4.4 Materiales para el invernadero.....	47
2.4.5 Materiales para estructurar y cubrir el invernadero.....	48
2.4.6 Materiales para la cubierta.....	49
CAPÍTULO 3.....	57
EL AMBIENTE DEL INVERNADERO	57
3.1 CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES PROMEDIO.....	57
3.2 PROBLEMAS CLIMÁTICOS DE LOS INVERNADEROS MEXICANOS.....	58
3.3 TRANSICIÓN DE LA AGRICULTURA MEXICANA.....	62
3.4 MÉTODOS DE CONTROL CLIMÁTICOS.....	63
3.5 MANEJO DE LOS SISTEMAS DE VENTILACIÓN.....	64
3.5.1 Ventilación natural o pasiva.....	66
3.5.2 Ventilación mecánica o forzada.....	67
3.6 PROBLEMÁTICA.....	67
3.6.1 Sequía	68
3.6.2 Lluvias torrenciales	69
3.6.3 Granizadas.....	69
3.6.4 Heladas.....	69
3.6.5 Limitantes del suelo.....	70
3.6.6 Comportamiento del clima dentro del invernadero	71
CAPÍTULO 4.....	77
HERRAMIENTAS NUMÉRICAS PARA EL DISEÑO AGRONÓMICO DE INVERNADEROS77	
4.1 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) PARA EL DISEÑO DE INVERNADEROS.....	77
4.2 CFD (MODELOS NÚMERICOS)	78
4.3 ANÁLISIS DE LA VENTILACIÓN MEDIANTE CFD.....	80
4.4 HERRAMIENTA DE ANÁLISIS EN INVERNADEROS.....	82
4.5 METODOLOGÍA.....	82
4.6 PREPROCESO.....	83
4.6.1 Discretización del invernadero a simular y mallado del mismo	84
4.6.2 Definición de las condiciones de frontera	84
4.6.3 Análisis de los aspectos físicos del problema	85
4.7 SIMULACIÓN DE CULTIVO Y MALLAS EN FLUENT®	87
4.8 PROCESO	92
4.9 POSPROCESO	93

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 5.....	97
SIMULACIÓN PARA EL DISEÑO AGRONÓMICO DE INVERNADEROS.....	97
5.1 INTRODUCCIÓN.....	97
5.2 INVERNADERO CENITAL DE TRES NAVES CON VENTILACIÓN NATURAL (CENITAL Y LATERAL).....	97
5.2.1 Descripción del ambiente del invernadero.....	97
5.3 INVERNADERO CENITAL DE DIEZ NAVES EN BATERÍA.....	102
5.3.1 Invernadero baticenital (ventilación cenital y lateral).....	103
5.4 SIMULACIONES SIN CULTIVO.....	103
5.4.1 Flujos de masa en el interior.....	103
5.4.2 Velocidades de viento interior.....	106
5.4.3 Análisis de las temperaturas en las simulaciones sin cultivo.....	112
5.5 SIMULACIONES CON CULTIVO.....	115
5.5.1 Flujos de masa.....	115
5.5.2 Velocidades de viento interior simulando cultivo.....	117
5.5.3 Análisis de las temperaturas en las simulaciones con cultivo.....	120
5.6 RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE EL TÚNEL DE AGUA Y CFD.....	123
5.7 INVERNADEROS MULTIMODULARES, GEOMETRÍA Y SIMULACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL.....	126
5.7.1 Modelo numérico (proceso).....	129
5.8 SIMULACIÓN DE UN INVERNADERO TIPO CENITAL DE CUATRO MÓDULOS (CLÚSTERS) SEPARADOS M ENTRE ELLOS.....	129
5.9 INVERNADERO TIPO CENITAL DE 20 NAVES EN BATERÍA (BATICENITAL) Y CON UN OBSTÁCULO.....	130
5.10 REPRESENTACIÓN DEL AMBIENTE DEL INVERNADERO SIMULADO.....	131
5.11 CLÚSTER DE CUATRO MÓDULOS.....	131
5.11.1 Caso 1.....	137
5.11.2 Caso 2.....	142
5.11.3 Caso 3.....	145
5.11.4 Caso 4.....	148
5.12 SIMULACIÓN DE UN INVERNADERO MODULAR (20 NAVES) CON OBSTÁCULO (MÓDULO DE CUATRO INVERNADEROS).....	153
5.12.1 Caso 1.....	153
5.12.2 Caso 2.....	155
5.12.3 Caso 3.....	158
CAPÍTULO 6.....	165

ÍNDICE DE CONTENIDO

CONCLUSIONES	165
CAPÍTULO 7.....	169
REFERENCIAS.....	169

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Consumo de tomate de invernadero (%) (ERS-USDA, citado en FOCIR, 2005)	4
Figura 1.2 Variación del valor de producción del tomate mexicano en EUA por tipo (Cook, 2005)	5
Figura 1.3 Incremento temporal en la producción de tomate (FOCIR, 2005).....	6
Figura 1.4 Superficie cosechada y rendimiento de tomate en México 2000-2010	9
Figura 1.5 Producción de tomate rojo por tipo de tecnología 2000-2009 (FIRA-SIACON-SAGARPA, 2011).....	10
Figura 1.6 Invernadero tipo diente de sierra.....	12
Figura 1.7 Invernadero tipo venlo con paredes de vidrio	13
Figura 1.8 Ventanas cenitales móviles del tipo mariposa.....	13
Figura 1.9 Modelo multitúnel con ventilación mariposa.....	13
Figura 2.1 Efecto estacional de la transparencia solar (adaptada de National Academy of Sciences, 1975)	19
Figura 2.2 Variaciones estacionales en la duración de la luz del día en el hemisferio norte (National Academy of Sciences, 1975)	20
Figura 2.3 Rayos oblicuos y verticales (Adaptada de National Academy of Sciences, 1975).....	21
Figura 2.4 Variación estacional de la temperatura en función del gradiente vertical (National Academy of Sciences, 1975).....	22
Figura 2.5 A). Veleta y anemómetro para medir dirección e intensidad del viento. B) Rosa de los vientos.....	23
Figura 2.6 Recorrido estacional del sol con respecto a la orientación del invernadero	24
Figura 2.7 Orientación norte-sur del invernadero a dos aguas	25
Figura 2.8 Radiación y balance térmico promedio anual de la atmósfera calculada para 100 unidades de radiación solar recibida (National Academy of Sciences, 1975)	26
Figura 2.9 Curvatura de un invernadero cenital tipo sierra	36
Figura 2.10 Consideraciones para el establecimiento del invernadero	36
Figura 2.11 Nivelación vertical del invernadero para definir altura del mismo....	38
Figura 2.12 Invernadero multimodular de 50 m de ancho	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.13 Ventilación cenital en la estructura.....	39
Figura 2.14 Cimientos del invernadero para mayor estabilidad.....	39
Figura 2.15 Tipos de invernaderos comúnmente usados. A) Capilla simétrico y B) Asimétrico de dos aguas (FAO, 2004)	40
Figura 2.16 Otro tipos de techados en invernaderos (FAO, 2004).....	40
Figura 2.17 Trazo y nivelación del invernadero multimodular	42
Figura 2.18 Invernadero multimodular de ocho capillas tipo cenital.....	42
Figura 2.19 Preparación del terreno para el invernadero multimodular	43
Figura 2.20 Perforación para la colocación del concreto en la base de la estructura	43
Figura 2.21 Colocación de canaleta para captación de lluvia.....	43
Figura 2.22 Preparación del terreno para la base de la estructura multimodular	44
Figura 2.23 Materiales en construcciones multimodulares.....	44
Figura 2.24 Invernaderos típicos del centro de México (San Luis Potosí).....	45
Figura 2.25 Estructuras alternativas con refuerzos en el interior	45
Figura 2.26 Levantamiento de la estructura vertical en un invernadero de 1 ha	46
Figura 2.27 Almacenamiento de agua para suministro del invernadero	47
Figura 2.28 Construcción básica a base de madera (FAO, 2004).....	48
Figura 2.29 Sistemas alternativos de calefacción por mangueras.....	49
Figura 2.30 Comportamiento de la transmisividad según la pendiente de la cubierta del invernadero (Montero, 2000)	53
Figura 3.1 Temperatura media diaria en los meses de primavera-verano	57
Figura 3.2 Temperatura media diaria en los meses de otoño-invierno	58
Figura 3.3 Precipitación acumulada otoño-invierno en México.....	59
Figura 3.4 Regiones climático debido a la precipitación (primavera-verano).....	60
Figura 3.5 Variación climática espacial (García, 1986)	61
Figura 3.6 Temperaturas y precipitación media mensual de cuatro regiones características del país. (García, 1986). A) Valle de México; B) Mazatlán, Sin.; C) Guaymas, Son.; Mérida, Yuc.....	62
Figura 4.1 Discretización del fluido en 3 dimensiones (Anderson, 1995)	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.2 Opciones para seleccionar el modelo de turbulencia	87
Figura 5.1 Prototipo del invernadero cenital modelado.....	98
Figura 5.2 Relación temperatura (○) contra velocidad del viento (●) en datos simulados. Perfil transversal a 2.5 m, ventilación natural (ventanas cenitales abiertas).....	98
Figura 5.3 Relación temperatura (○) contra velocidad del viento (●) en datos simulados. Perfil longitudinal. A 2.5 m. Ventilación natural (ventanas cenitales abiertas).....	99
Figura 5.4 Campo escalar de temperatura (K) medidos a 2.5 m del suelo, simulando 2.41 m s^{-1} velocidad del viento exterior, 295.7 K de temperatura exterior. Ventilación natural (ventanas cenitales abiertas). A) Vista en planta, B) Vista en isométrico.....	100
Figura 5.5 Campo vectorial de velocidad del viento medida a 2.5 m del suelo, simulando 2.41 m s^{-1} velocidad del viento exterior.....	101
Figura 5.6 Modelo computacional del invernadero cenital con tres capillas y ventilación natural, vectores de velocidad (m s^{-1}) y temperatura (K).....	102
Figura 5.7 Representación esquemática del proceso de creación del modelo computacional y mallado del invernadero tipo cenital de 10 naves.....	103
Figura 5.8 Flujos máxicos para las cinco velocidades de viento exterior, simuladas en cuatro escenarios de apertura de ventanas cenitales, A) abiertas de frente al viento y lateral cerrada; B) de espalda al viento, lateral cerrada; C) de frente al viento y lateral abierta; y D) de espalda al viento y lateral abierta. IN se refiere a la ventana lateral de cara al viento, y OUT a la lateral de espalda al viento	105
Figura 5.9 Flujo de aire en las diferentes aberturas del invernadero, cuando se abren las ventanas laterales (in, out), frontales (Fr) y las cenitales A) de frente; B) de espalda al viento.....	106
Figura 5.10 Velocidades del viento interno promedio normalizado cuando se abren las ventanas cenitales A) de frente al viento; B) de espaldas al viento; C) de frente al viento y laterales abiertas; y D) de espalda al viento y laterales abiertas	108
Figura 5.11 Características del flujo del aire en el interior del invernadero sin cultivo y 5 m s^{-1} de viento fuera 4 escenarios A) Cenitales abiertas de frente B) cenitales abiertas de espalda C) cenitales de frente más lateral y D) cenitales de espaldas más laterales.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 5.12** Vista en planta a 2 m de los vectores de velocidad de viento interior coloreados por magnitud cuando en el exterior se simulan 5 m s^{-1} y en el invernadero se abren las ventanas cenitales de frente al viento 110
- Figura 5.13** Vista en planta a 2 m del suelo, vectores de velocidad del viento, ventanas abiertas a sotavento cuando en el exterior se simulan 5 m s^{-1} ... 111
- Figura 5.14** Perfiles longitudinales del gradiente de temperatura. Cinco velocidades del aire exterior, cuatro escenarios de ventilación. A) Ventanas cenitales abiertas a sotavento; B) ventanas cenitales abiertas a barlovento; C) Cenitales a sotavento + laterales; y D) cenitales a barlovento + laterales. 112
- Figura 5.15** Contorno de temperaturas (K) para los escenarios. A) Cenitales abiertas a barlovento; B) Cenitales abiertas a sotavento, a 2 m de altura, viento exterior 5 m s^{-1} y 400 w m^2 de flujo de calor del suelo..... 114
- Figura 5.16** Flujos máxicos para las cinco velocidades de viento exterior, simuladas en cuatro escenarios de apertura de ventanas cenitales. A) Abiertas de frente al viento y lateral cerrada; B) abiertas de espalda al viento, lateral cerrada; C) abiertas de frente al viento y lateral abierta; y D) abiertas de espalda al viento y laterales abiertas. (IN se refiere a la ventana lateral de cara al viento, y OUT a la lateral de espalda al viento) 116
- Figura 5.17** Velocidad interna promedio del viento cuando se simula cultivo en los cuatro escenarios ensayados. A) Cenitales abiertas a sotavento; B) Cenitales abiertas a barlovento; C) cenitales a sotavento + laterales; y D) cenitales abiertas a barlovento + laterales 118
- Figura 5.18** Vectores de velocidad del viento interior coloreados por magnitud de velocidad cuando en el exterior hay 5 m s^{-1} y se ensayan cuatro escenarios de apertura de ventanas. A) Solo cenitales a sotavento; B) Solo cenitales a barlovento; C) Cenitales a sotavento + laterales; y D) Cenitales a barlovento + laterales 119
- Figura 5.19** Perfil longitudinal de temperaturas medidas a 2 m y en el eje de simetría central, simulando las cinco velocidades del viento exterior y cuatro escenarios ensayados. A) Ventanas cenitales abiertas a barlovento; B) A sotavento; C) Cenitales y frontales abiertas a barlovento; y D) Cenitales a sotavento, frontales a barlovento 120
- Figura 5.20** Perfil vertical de temperaturas (K) en el centro del invernadero (eje simétrico) cuando en el exterior se simula 5 m s^{-1} de velocidad del viento, 4 escenarios de apertura de ventanas A)Cenitales abiertas a barlovento, B) a sotavento, C) cenitales y frontales a barlovento y D) cenitales a sotavento, frontales a barlovento 122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.21 Vista en planta de la distribución espacial de gradientes de temperatura (K) medidos a 2 m del suelo, simulando 5 m s ⁻¹ velocidad del viento exterior, ventanas cenitales abiertas A) A barlovento y B) A sotavento	123
Figura 5.22 Comparativo cualitativo de los vectores de viento entre A) el túnel de agua y B) simulados por CFD, bajo condiciones similares, de la primera nave a barlovento.....	124
Figura 5.23 Compartido cualitativo de los vectores de viento entre A) el túnel de agua y B) simulados por CFD, bajo condiciones similares, de la primera nave a sotavento.....	125
Figura 5.24 Invernadero en batería A) tipo cenital y B) tipo túnel	126
Figura 5.25 Invernaderos multimodulares con la tecnología de clúster	127
Figura 5.26 Geometría real del invernadero por modelar (10 naves) con ventilación lateral y cenital	127
Figura 5.27 Representación de un polígono de invernaderos (clúster) de cuatro módulos con diez naves cada uno	128
Figura 5.28 Mallado del módulo 1, ventanas cenitales y capilla del invernadero	128
Figura 5.29 Modelo computacional por modelar	128
Figura 5.30 Invernadero tipo cenital de 20 naves en batería.....	131
Figura 5.31 Distribución espacial del flujo de aire en la interacción interior/externo del polígono, cuando en el exterior se simulan 4 m s ⁻¹	132
Figura 5.32 Diferencia de presiones estática (Pa) que origina los patrones de ventilación del caso expuesto.....	132
Figura 5.33 Detalle del movimiento del aire (velocidad del viento m s ⁻¹) en la entrada del polígono (nave 1 módulo I)	133
Figura 5.34 Zona de fluctuaciones al final de M1 inicio del M2 (A) y su similar entre el M3 y M4	134
Figura 5.35 Zona de baja velocidad en el Modulo 3 naves 4-5.....	134
Figura 5.36 Distribución espacial de temperaturas (K) en los cuatro módulos y su interacción con el exterior	135
Figura 5.37 Detalles de las zonas calientes escenario cero	135
Figura 5.38 Perfil de temperaturas en el módulo III (caso inicial)	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.39 Modificaciones al sistema de ventilación para mejorar la temperatura en el módulo III	137
Figura 5.40 Características de los vectores de viento coloreados por magnitud de velocidad ($m s^{-1}$)	137
Figura 5.41 Detalle de los vectores de velocidad del viento en la entrada del primer módulo	138
Figura 5.42 Detalle de los vectores del viento en las naves centrales del módulo I	139
Figura 5.43 Detalle de los vectores de viento del módulo III en las naves con deflectores	139
Figura 5.44 Comportamiento térmico (K) de los cuatro módulos como respuesta al sistema de ventilación	140
Figura 5.45 Detalle de los contornos de temperatura (K) al final del módulo 1 y el inicio de módulo II	141
Figura 5.46 Perfil de temperaturas en el módulo III (Caso 1)	141
Figura 5.47 Vectores de velocidad del viento ($m s^{-1}$) coloreados por magnitud	142
Figura 5.48 Detalle de los vectores de viento en las naves con deflectores y ventana enrollable y cenital abierta	143
Figura 5.49 Perfiles de temperatura en los cuatro módulos (K)	143
Figura 5.50 Detalle del módulo III	144
Figura 5.51 Perfil escalar de temperatura (K) en los módulos III y IV	144
Figura 5.52 Vectores de velocidad del viento ($m s^{-1}$) en los cuatro módulos ...	145
Figura 5.53 Detalle de los módulo III y IV que muestran dificultades en el flujo de aire	146
Figura 5.54 Vista en perfil de las temperaturas (K) en los cuatro módulos	146
Figura 5.55 Perfil escalar de temperaturas (K) en los cuatro módulos	147
Figura 5.56 Distribución de presiones resultado del esquema de ventilación seleccionado	148
Figura 5.57 Gestión del sistema de ventanas y dispositivos móviles	149
Figura 5.58 Distribución de presiones estáticas (Pa) en los cuatro módulos ...	149
Figura 5.59 Distribución general de los vectores de viento coloreado por magnitud ($m s^{-1}$)	150

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.60 Detalle del perfil del viento coloreado por magnitud de velocidad ($m s^{-1}$) en los cuatro módulos	150
Figura 5.61 Detalles de los flujos en las adecuaciones. A) Interacción módulo I y II; B) detalle del módulo II; C) Interacción módulo III y IV; y D) detalles del módulo IV	152
Figura 5.62 Distribución de temperaturas (K) resultado de la gestión.....	152
Figura 5.63 Perfil escalar de temperatura (K).....	152
Figura 5.64 Vectores de velocidad del viento ($m s^{-1}$) escenario total	154
Figura 5.65 Perfil de temperaturas (K) escenario total	154
Figura 5.66 Perfil escalar de velocidad del viento interior ($m s^{-1}$) cuando en el exterior se simulan $4 ms^{-1}$	155
Figura 5.67 Perfil escalar de temperatura (K) bajo las condiciones de frontera simuladas	155
Figura 5.68 Perfil de velocidades del viento (20 naves sin obstáculo)	156
Figura 5.69 Características de las temperaturas en los 20 módulos.....	156
Figura 5.70 Perfil longitudinal de velocidad del viento interior ($m s^{-1}$)	157
Figura 5.71 Perfil longitudinal de temperaturas (K).....	157
Figura 5.72 Vectores de velocidad de viento	158
Figura 5.73 Detalles en la entrada y salida de los vectores de viento	159
Figura 5.74 Perfil de temperaturas (K) simulando un efecto mecánico	159
Figura 5.75 Perfil escalar de Velocidad del viento interno ($m s^{-1}$).....	160
Figura 5.76 Incremento longitudinal de temperatura (K)	160
Figura 5.77 Flujos de masa entrada y salida y volumen del invernadero	161

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Costos de invernaderos en México según el tipo	14
Tabla 1.2 Regiones de México caracterizadas por la velocidad del viento (CFE, 2008)	15
Tabla 2.1 Valores de renovación de aire y salto térmico según de tipo de ventilación (Montero <i>et al.</i> , 1992).....	52
Tabla 5.1 Condiciones de inicio e hipótesis asumidas.....	129
Tabla 5.2 Características de las mallas seleccionadas para simular la ventilación en Fluent®	130

INTRODUCCIÓN

Un invernadero es aquella estructura que protege al cultivo de la lluvia y el viento mediante una cubierta transparente, en forma de membrana plástica o de vidrio, que permite el paso de la radiación solar y dificulta la pérdida de calor, en particular la banda del infrarrojo térmico. El grado de modificación ambiental del invernadero depende del nivel tecnológico de los materiales empleados en su construcción y de los equipos complementarios de climatización para calefacción, humidificación, ventilación, enriquecimiento carbónico, iluminación artificial, etc.

La combinación de factores climáticos facilita que las plantas cultivadas en un invernadero se encuentren por más tiempo en su zona de confort ambiental y en consecuencia son más suaves, tiernas y suculentas, en comparación con las cultivadas a campo abierto. Esta modificación climática permite adelantar cosechas, aumentar rendimientos o cultivar permanentemente en una región agrícola. El desarrollo de esta tecnología reporta incremento en superficies con tecnologías asociadas a la agricultura protegida en forma de acolchado, túneles, invernaderos, malla sombra, etc., como respuesta a la demanda de productos frescos en cualquier periodo del año por parte del consumidor.

La modificación de las condiciones ambientales implica también alterar el manejo de un cultivo en invernadero respecto a uno cultivado a campo abierto. El uso de estructuras semicerradas permite modificar un ambiente en el cual se desarrollan los cultivos, lo que implica manejar las condiciones bajo las cuales el cultivo puede alcanzar su máximo potencial productivo. El ambiente es dinámico dentro de la estructura, por lo que el manejo de los cultivos exige un seguimiento temporal preciso. En un invernadero se reduce la radiación incidente por lo que la evapotranspiración del cultivo puede disminuir y, al mantenerse confinado, se mantienen niveles de vapor de agua casi constantes. La transpiración del cultivo es la mejor forma de refrigerar, lo que implica tener un suelo permanentemente húmedo.

En México, el diseño de invernaderos era estrictamente constructivo pero en la actualidad se debe considerar el aspecto agronómico que permita llevar un estricto control ambiental con el menor costo de energía y mano de obra. Dependiendo de las condiciones climáticas del lugar, se han desarrollado diversos tipos de invernaderos con el fin de satisfacer las necesidades de ventilación y calefacción para controlar la temperatura y la humedad relativa. Uno de los invernaderos más representativos en regiones templadas de México se caracteriza por presentar una cubierta plástica que generalmente no dispone de calefacción o tiene una calefacción parcial para periodos cortos. Las técnicas de enfriamiento pasan por la optimización de la ventilación natural a la utilización de sistemas de humidificación, y en casos extremos, a la ventilación forzada.

Desde el punto de vista ambiental, las desventajas que presentan los invernaderos son sus necesidades energéticas en climas fríos, la acumulación de residuos , desechos químicos y plásticos. Por otra parte, un aspecto sumamente positivo de este tipo de sistema es que utiliza más eficientemente los recursos naturales como la radiación solar, el suelo y especialmente el agua. En otras palabras, el requerimiento básico de un invernadero es aprender a controlar los sistemas que lo integran. En este trabajo se documentan los aspectos ambientales que se deben considerar en el diseño de un invernadero.

**La producción de cultivos en
invernadero en México**

1

Capítulo 1

LA PRODUCCIÓN DE CULTIVOS EN INVERNADERO EN MÉXICO

1.1 Introducción

Las condiciones extremas del clima y la necesidad de alimentar a una población en continuo crecimiento fortalecen la búsqueda ininterrumpida de tecnologías dirigidas a solucionar este tipo de contingencias. Uno de los grandes logros de los sistemas de producción agrícola fue obtener cosechas prácticamente en cualquier sitio y en cualquier época del año mediante técnicas agrupadas bajo el concepto de agricultura protegida.

En América la superficie dedicada a los cultivos en invernadero es reducida, y se localiza principalmente en el norte del continente. En el periodo de 1990 a 2003 dicha superficie se incrementó un 600 % para alcanzar unas 1 726 ha, de las cuales 446 ha se localizaban en Canadá, 330 ha en Estados Unidos y 950 ha en México (Cook y Calvin, 2005). En 2005 Canadá fue el principal productor de cultivos en invernadero, con el 42 % del total de estos tres países. Las condiciones medioambientales en México permitieron un crecimiento exponencial en superficie, de manera que en 2015 se estimaron 30 000 ha de cultivos bajo invernadero, la mayoría dedicada al cultivo del tomate.

A pesar de las condiciones favorables, la agricultura protegida en México presenta otros problemas relacionados con la falta de capital de inversión, inexperiencia en el manejo, falta de infraestructura y confiabilidad de proveedores de insumos, que es además uno de los factores que ha generado inconsistencia en la calidad de los productos de construcción, resultado de la importación de tecnologías extranjeras muchas veces no validadas en México.

Con la importación de materiales y equipos se han adquirido también problemas de manejo y se ha hecho necesario formar cuadros técnicos apropiados para cada tecnología. Por otra parte, debido a que no se toman en cuenta las condiciones ambientales locales en el establecimiento de los invernaderos, se puede encontrar el mismo tipo de construcción tanto en una región tropical como en una región de clima frío.

El rápido crecimiento de la industria de invernaderos en México, principalmente enfocada a hortalizas pero no restrictiva para una amplia gama de cultivos potenciales, ha originado un gran impacto en la economía de producción. México presenta la ventaja de poseer una extensa superficie que se puede cultivar mediante esta tecnología, pero antes se debe vencer el obstáculo de la

inexperiencia y comenzar a generar la tecnología adecuada para el mejor aprovechamiento de los recursos y condiciones climáticas del país.

1.2 Importancia de los cultivos en invernadero en México

El sector de las hortalizas tiene una singular importancia en la agricultura nacional e internacional. Se estima que tan solo dos cultivos contribuyen con el 50 % de la producción en el mundo, la papa y el tomate; de estos dos, resalta el valor no solo comercial sino también alimentario del tomate.

El tomate rojo o jitomate es una de las especies hortícolas más importantes tanto económica como socialmente en México por su valor de producción. El tomate es el principal producto hortícola de exportación; se considera que representa un poco más del 37 % del valor total de las exportaciones de legumbres y hortalizas y el 16 % del valor total de las exportaciones agropecuarias, solo superadas por el ganado vacuno (ASERCA, 1995). El cultivo del tomate es la mayor aportación vegetal de México para el mundo. Su aceptación en las diversas culturas se evidencia por ser el segundo producto hortícola en el consumo mundial, y por generar una gran cantidad de divisas y empleos para el país.

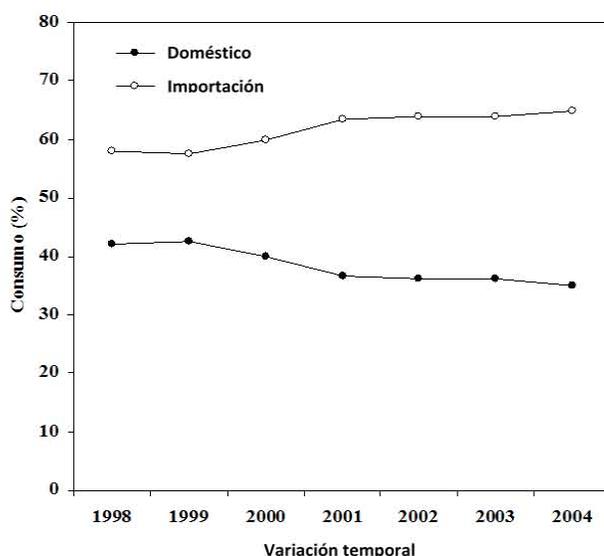


Figura 1.1 Consumo de tomate de invernadero (%) (ERS-USDA, citado en FOCIR, 2005)

La tasa de crecimiento de la producción de hortalizas en invernadero a nivel mundial fue de 15 % en 2004 (FOCIR, 2005) debido principalmente a la preferencia de los consumidores por productos más frescos, succulentos y sobre

todo, libres de sustancias inorgánicas, que es posible producir bajo condiciones protegidas. México conserva un incremento en las exportaciones del producto aunque sigue siendo un consumidor importante (**Figura 1.1**). El rápido desarrollo de la industria del tomate en invernadero ha ocasionado un gran impacto en la dinámica de producción nacional, lo que mantiene una perspectiva de crecimiento importante.

En Estados Unidos el consumo de hortalizas de invernadero aumenta constantemente, y en el caso del tomate, el incremento durante el 2005 fue del 37 % (Cook y Calvin). Este país se ha convertido en el principal importador de las hortalizas mexicanas. En el 2002 solo el 18 % de tomates consumidos en EUA eran producidos en invernadero, por lo que queda un amplio margen (82 %) en el mercado por complementar (Cook y Calvin, 2005). Lamentablemente existe poca información comercial al respecto, aunque datos estimados de las exportaciones mexicanas a Estados Unidos indican un incremento sostenido en el valor de producción del tomate en las principales variedades, entre las que destaca el incremento del valor de producción del tomate uva, y la estabilización del valor de producción del tomate bola (**Figura 1.2**).

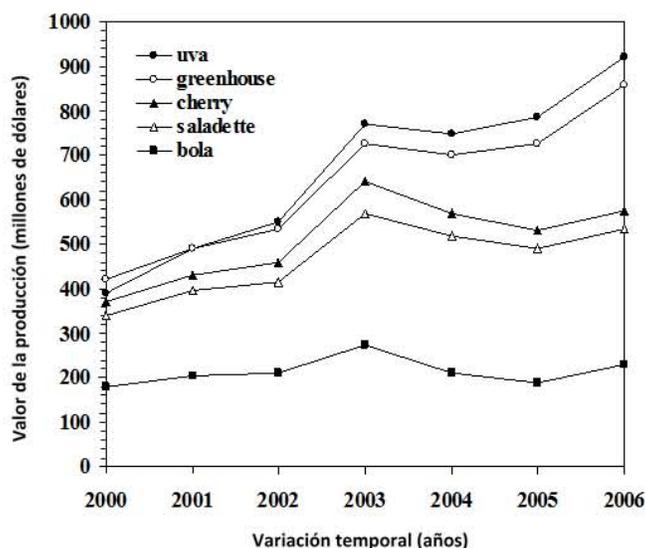


Figura 1.2 Variación del valor de producción del tomate mexicano en EUA por tipo (Cook, 2005)

Para aprovechar esta oportunidad se requiere mantener una visión continua de innovación en el proceso, tal como lo exige el mercado con el cambio en la preferencia del consumidor por un tipo de tomate en particular. Así, se observa que

ha habido una evolución temporal del tomate bola producido a campo abierto, comparado con el producido en invernadero, pasando por el racimo y *cherry* (Cook y Calvin, 2005). Este comportamiento ha mantenido un ritmo sostenido, de tal suerte que de 1998 a 2004 el consumo del tomate de invernadero se incrementó 7 veces en los Estados Unidos (**Figura 1.3**).

La superficie dedicada a la horticultura protegida en el año 2012 fue de aproximadamente 21 500 hectáreas, de las que el área ocupada por invernaderos de plástico o vidrio se estima en apenas 12 500 ha (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA], 2012). De estas, 7 800 ha se destinan a la producción de jitomate. El área reservada a la agricultura protegida ha aumentado 12 % entre los años 2001 y 2012, es decir, aproximadamente 1 100 hectáreas por año. Aunque las áreas de producción protegida de jitomate, pimiento y pepino han aumentado en los últimos años, las extensiones de tierra de cultivo a campo abierto han disminuido.

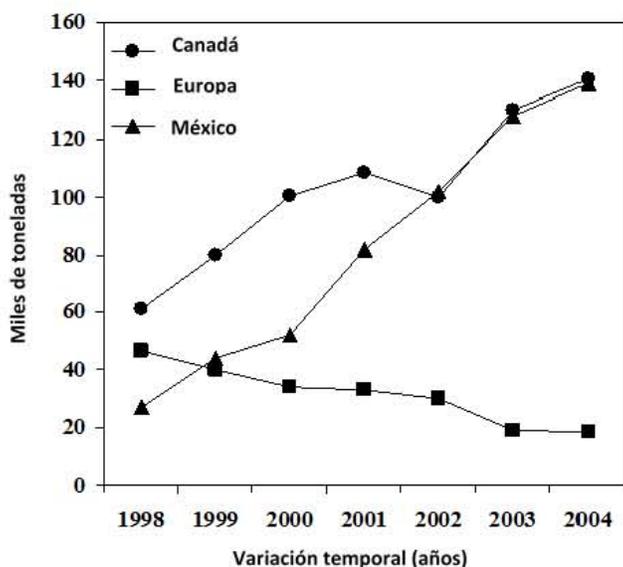


Figura 1.3 Incremento temporal en la producción de tomate (FOCIR, 2005)

Con la finalidad de consolidar el desarrollo de invernaderos en varios estados se han fundado asociaciones públicas y privadas para establecer agroparques. El estado de Querétaro tiene uno, Aguascalientes ha realizado un estudio profundo en colaboración con la Universidad de Wageningen, Holanda, para construir otro, y varios estados están evaluando la viabilidad de construirlos.

1.2.1 Desarrollo de la horticultura en México

El sector hortícola mexicano está logrando posicionarse como un sector robusto en el marco internacional. Entre los aspectos más notables de este despunte se pueden mencionar:

- Se desarrolla un enfoque en la calidad y la exportación de hortalizas, flores, esquejes y plantas en macetas para los Estados Unidos y la Unión Europea.
- La tendencia en las inversiones favorecen un nivel de tecnología media y en casos de alto valor de los cultivos se tiende a la alta tecnología para el cultivo de hortalizas.
- Un interés en identificar la necesidad de adaptar y transferir conocimientos en horticultura moderna, especialmente en el sector oficial a la innovación de tecnologías. La transferencia de conocimiento ha planteado la conveniencia para desarrollar iniciativas para establecer centros de capacitación en varios estados. También organizaciones gubernamentales como SAGARPA, FOCIR, FIRA, IMTA y varias universidades mexicanas se involucran en este proceso.
- Surgen iniciativas para la organización del sector, como la AMHPAC (Asociación Mexicana de Horticultura Protegida, A.C.), que engloba las empresas constructoras de invernaderos, aunque aun falta la participación de los usuarios finales y pequeñas empresas locales.
- Los productores mexicanos se están organizando para formar grupos, cadenas orientadas a la exportación, soluciones en logística (transporte marítimo, refrigeración) y de gestión de calidad.
- El diseño de redes de tuberías de gas natural abre nuevas áreas con potencial para la producción hortícola de alta tecnología.

1.2.2 Superficies productivas

La industria de invernaderos constituye una de las oportunidades de inversión más rentables. La tasa de crecimiento de producción de hortalizas en invernadero a nivel mundial fue de 15 % en el año 2004 (Fondo de Capitalización e Inversión del Sector Rural, FOCIR, 2005). Este crecimiento se explica por el cambio en las preferencias de los consumidores que están buscando productos con calidad, inocuidad y conveniencia, características que la producción bajo condiciones controladas puede ofrecer en forma constante y consistente.

En 2005, México ocupó el cuarto lugar a nivel mundial como país exportador de tomate rojo. Su posicionamiento ha variado desde 1998 entre el tercero y el sexto lugar, dependiendo de la producción de los otros países exportadores. Sin

embargo, durante este periodo México no presentó un crecimiento significativo en las exportaciones, lo que hizo caer la tendencia al presentarse un estancamiento en su producción.

México es el principal exportador mundial de tomate rojo y el principal abastecedor externo del mercado estadounidense. Por su parte, Estados Unidos es el principal país importador (17.5 % de las importaciones totales mundiales) y, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2011), el dinamismo de su demanda es notable (promedio 2000 a 2008). Así, mientras que en 1990 se importaba el 20.5 % del total del consumo doméstico, según el reporte de 2010 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés), en 2009 las importaciones se incrementaron a 43.6 %.

Durante 2008, las divisas que se obtuvieron por concepto de exportación de tomate en fresco o refrigerado fueron un poco más de US \$ 1 203 millones, con el envío del 99 % del total al mercado estadounidense (Secretaría de Economía, 2009). De acuerdo con la SAGARPA (2008), el tomate, junto con las legumbres, frutas y hortalizas frescas, representó alrededor del 25 % del valor total de las exportaciones agrícolas. El estado de Jalisco ocupó el cuarto lugar en cuanto al valor de la producción de jitomate, después de Sinaloa, Baja California y Baja California Sur.

El promedio de la superficie cosechada de tomate rojo en el país fue de 66 373 ha entre 2000 y 2009 (en invernaderos y a campo abierto), lo cual representa el 0.34 % de la superficie promedio sembrada a nivel nacional de cultivos anuales y perennes en dicho periodo. Durante 2009 se cosecharon 52 384 ha de tomate. Así, la superficie cosechada decreció a una tasa media anual de 3.9 % entre 2000 y 2009. Por otra parte, el volumen de producción se ha reducido a una tasa media anual de 0.2 % menor que la reportada en la superficie cosechada debido a que el rendimiento del cultivo ha mostrado un avance significativo en este lapso (**Figura 1.4**).

Durante 2009 el rendimiento promedio nacional fue de 22 toneladas por ha cosechada en temporal. En contraste, el rendimiento nacional en condiciones de riego se ubicó en 42.8 ton/ha. Así, es posible afirmar que uno de los factores determinantes para obtener un mayor rendimiento, en un entorno de reducción de la superficie cosechada, ha sido la producción en condiciones de riego. Dicho factor se encuentra estrechamente relacionado con la adopción de la agricultura protegida, ya sea utilizando tecnologías básicas como la malla sombra o invernaderos altamente tecnificados (USDA, 2005).

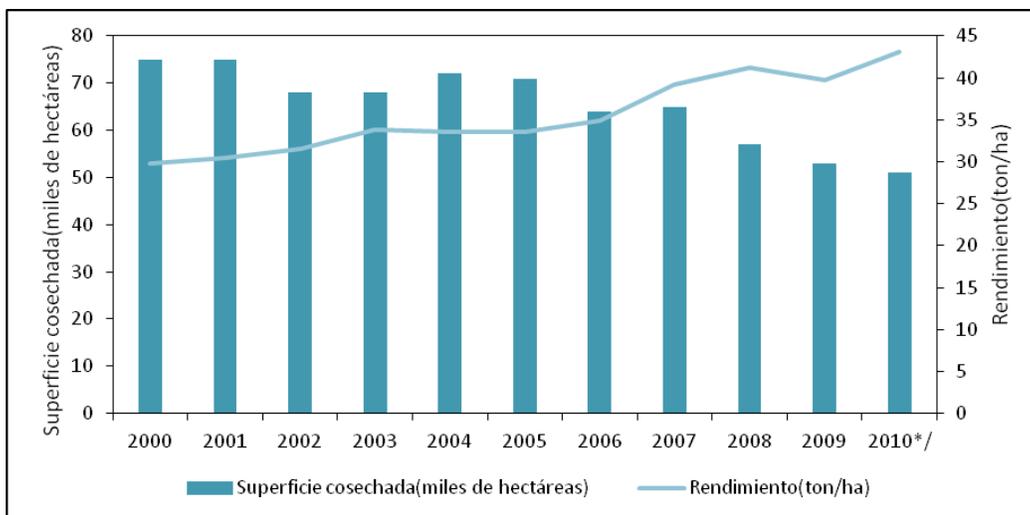


Figura 1.4 Superficie cosechada y rendimiento de tomate en México 2000-2010¹

Las cifras oficiales indican que la superficie utilizada para producir tomate bajo condiciones de agricultura protegida (invernadero y malla sombra) se ha incrementado sustancialmente en los últimos años (**Figura 1.5**). En consecuencia, la producción de tomate, utilizando paquetes tecnológicos, pasó de 25 926 ton en 2000 a 398 482 ton en 2009.

Los productores en Sinaloa y Baja California cuentan con los mayores avances tecnológicos. En el estado de Jalisco ha comenzado a incrementarse la superficie que se utiliza para cultivar tomate, tanto a cielo abierto como en invernadero. Dicho fenómeno se atribuye al éxito que se ha logrado con la exportación de la producción hacia EUA, que se presenta especialmente en el periodo octubre-diciembre (USDA, 2009).

En cuanto a la competitividad, Sinaloa es el principal estado productor. A través de la innovación tecnológica hizo posible la introducción en el ciclo 1992 a 1993 del tomate rojo con larga vida de anaquel. Aunque los costos de producción con esta tecnología fueron significativamente mayores que con la tecnología tradicional, el incremento en los rendimientos compensa la diferencia (Schwentesi y Gómez, 1998).

¹ Avance de siembras y cosechas al 28 de febrero de 2011 (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura ([FIRA], 2011)

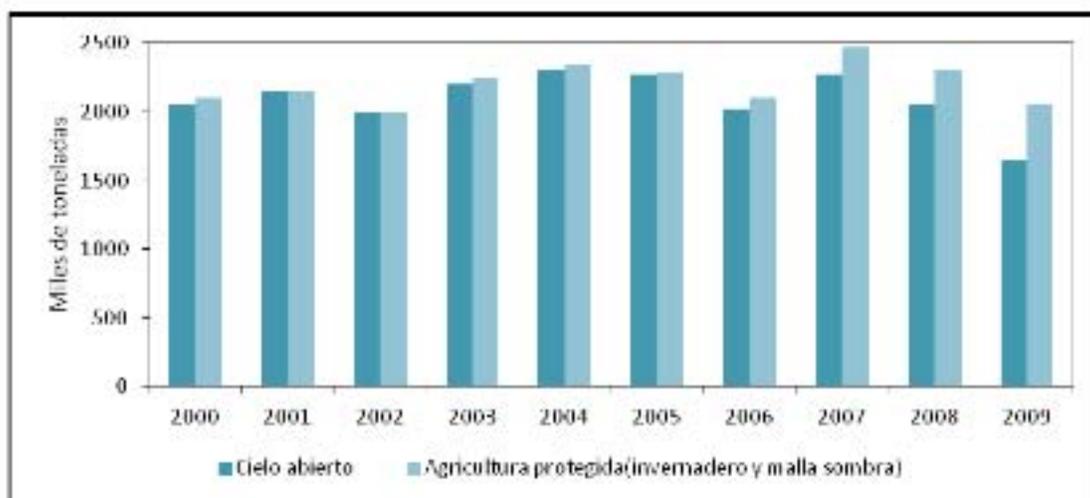


Figura 1.5 Producción de tomate rojo por tipo de tecnología 2000-2009 (C-RA-S ACÓN-SAGARPA 2011)

De acuerdo con Cook y Calvin (2005), a pesar de haber adoptado tardíamente la tecnología para producir tomate en invernadero en comparación con EUA y Canadá, México cuenta con tecnología que favorece la producción. Además, el país posee un amplio periodo de condiciones climáticas en varias regiones agrícolas, lo que permite que sea un proveedor constante de esta hortaliza en el mercado estadounidense.

Así, en las regiones con clima templado seco y buenas condiciones de radiación solar, la temporada de producción se puede extender durante todo el año, lo que potencialmente representa utilidades para los productores (Padilla-Bernal et al., 2010). No obstante, los productores mexicanos de tomate enfrentan retos como capital de inversión, ausencia de infraestructura, falta de proveedores especializados de insumos, así como la calidad inconsistente de la producción (USDA, 2005). Las exportaciones de empresas minoristas de México a Centroamérica se están volviendo cada vez más importantes, lo que hace aún más necesario cumplir las normas de calidad e inocuidad.

1.2.3 Esquema actual de la agricultura protegida en México

En México, la horticultura protegida en los últimos años ha estado en constante crecimiento y desarrollo. SAGARPA (2013) reporta que en México existe en 19 985 unidades de cultivo protegido, 66 % corresponden a invernaderos, 11 % a micro túneles, 10 % a casa sombra, 5 % a micro túneles, 5 % techo sombra y 3 % a pabellón (SIAT, 2013).

Entre las ventajas de este sistema de producción se encuentran la generación de 8 empleos directos por hectárea y la producción de cultivos inocuos, además de un incremento en algunos cultivos de hasta 5 veces la producción con relación a campo abierto; por ejemplo, los rendimientos promedio del tomate a campo abierto oscilan en las 70 ton, muy reducido comparado con las 350 ton ha⁻¹ cosechadas en agricultura protegida. Otras ventajas son la producción todo el año, se aprovechan las ventanas de mercado para obtener precios competitivos, el ahorro promedio de 50 % de agua, en tomate el ahorro es hasta del 77 %, pues en campo abierto se utilizan 89 litros por kilo producido y en hidroponía 20. Por otro lado, es posible aprovechar suelos con problemas de degradación o suelos químicos (SAGARPA, 2012).

Desde el año 2001, la SAGARPA ha otorgado diversos apoyos para la agricultura protegida. En 2009, el gobierno federal puso en marcha la Estrategia Nacional de Agricultura Protegida, reconociendo los beneficios y la rentabilidad de esta actividad en el sector agrícola. Para el año 2012 en México existían alrededor de 20 mil hectáreas en la modalidad de agricultura protegida, de las cuales aproximadamente 12 mil eran de invernadero y las otras 8 mil de malla sombra y macrotúnel.

El 58 % de la superficie con agricultura protegida se concentra en cuatro estados: Sinaloa (22 %), Baja California (14 %), Baja California Sur (12 %) y Jalisco (10 %). Los principales cultivos que se producen bajo agricultura protegida son jitomate o tomate rojo (70 %), pimiento morrón (16 %), pepino (10 %) y otros como melón y lechuga. En los últimos años se ha intensificado la diversificación de cultivos como papaya, fresa, chile habanero, flores, plantas aromáticas (SAGARPA, 2012).

1.3 El invernadero mexicano

La diversidad de invernaderos que se han instalado en México dificulta tener un prototipo al que se pueda llamar "invernadero mexicano", en gran medida debido a la diversidad de climas en los que la agricultura protegida se desarrolla. Entre los modelos que se encuentran en México están los tipos diente de sierra, mariposa, túnel, vertitúnel, y el más común, el cenital.

Tipo diente de sierra

El modelo diente de sierra (**Figura 1.6**) es una variación del invernadero tipo cenital, con la particularidad de que la rasgadura de la ventana se realiza a la altura de la banda y no en el centro, que es el típico cenital. La posición de la ventana se prefiere para velocidades de viento que oscilan entre los 3 m s⁻¹ o menores. El

diente de sierra puede ser localizado en ambientes templados, con bajas velocidades de viento y baja humedad relativa. La adaptación del ambiente al interior del mismo ocurre principalmente cuando la dirección del viento se mantiene constante y las ventanas se construyen de frente a los vientos dominantes. Dependiendo de la latitud donde se instale, es importante mediar la dirección de los vientos con la inclinación de la tierra que proporciona la cantidad de luz solar.



Figura 1.6 Invernadero tipo diente de sierra

Tipo venlo en capilla o de dos aguas

La cubierta de vidrio del invernadero tipo venlo en capilla o de dos aguas (**Figura 1.7**) favorece la entrada de radiación solar, pues este modelo fue diseñado considerando la posición geográfica y las precipitaciones de nieve de los Países Bajos. A pesar de que este invernadero fue diseñado para ser usado en condiciones específicas de baja radiación, es posible encontrarlo en las zonas centrales del bajío y en el Estado de México.



Figura 1.7 Invernadero tipo venlo con paredes de vidrio

Debido a su estructura rígida y reducida inversión térmica, el invernadero tipo venlo es adecuado cuando el cultivo es de alto valor y en consecuencia, soporta los gastos de automatización y control ambiental, principalmente las bajas temperaturas. En condiciones de alta insolación, un modelo que favorece el intercambio de aire es aquel donde se coloca la ventana cenital incorporada como ventanas móviles (**Figura 1.8**). Estudios numéricos indican que para mayor efectividad, es necesario gestionar la apertura de ventanas en función del tamaño del invernadero y del efecto que se pretenda, ya sea evacuar o ingresar aire caliente.

En regiones tropicales, donde la humedad es el factor a gestionar es factible encontrar invernaderos con ventanas del tamaño del techo de la capilla (**Figura 1.9**). En general, este modelo se usa en invernaderos de una sola capilla que pueden ser alargados, pero el costo energético para abrir y cerrar esta ventana en ocasiones resulta incosteable.



Figura 1.8 Ventanas cenitales móviles del tipo mariposa



Figura 1.9 Modelo multitúnel con ventilación mariposa

Otro caso es el invernadero tipo francés que es similar al canadiense y puede incorporar una doble capa en el techo para permitir una barrera aislante térmica, tanto para la conservación como para la disipación del calor. La doble capa reduce la radiación solar y puede ocasionar que el cultivo presente problemas en el proceso de producción, tales como el desbalance iónico y la fijación de clorofila.

1.4 Tamaño de los invernaderos y criterios a considerar en su diseño

Aunque el uso de un invernadero supone una tecnología eficiente en el uso de los recursos, es imprescindible elegir la estructura y el diseño adecuado considerando los factores del medio natural como temperatura, clima y humedad, así como las necesidades del cultivo, para aumentar su producción y mejorar la calidad, lo cual en gran medida influye en las dimensiones del mismo. Los invernaderos requieren un sistema para regular la ventilación, la humedad y la temperatura interior. Precisan, asimismo, de una mayor especialización en el manejo de las plantaciones, debido a que las plagas y enfermedades encuentran mejores condiciones para su desarrollo gracias a la humedad y la temperatura.

Cada región requiere un invernadero diferente que sea adecuado a las condiciones climáticas del lugar. La idea de mejorar el diseño de las ventanas de un invernadero resulta de observar los problemas que se presentan en los cultivos debido a la falta de ventilación, principalmente en el centro del invernadero. De ahí la importancia de la apertura en el centro de un invernadero para inducir una ventilación cenital, como se conoce actualmente en el mercado. Una estructura con ventanas cenitales puede ser eficiente en invernaderos construidos en diversas dimensiones y ubicados en una gran variedad de climas (Flores-Velázquez, 2010). En la **Tabla 1.1** se presentan los costos de los invernaderos reportados por la Asociación Mexicana de Constructores de Invernaderos (AMCI, 2010):

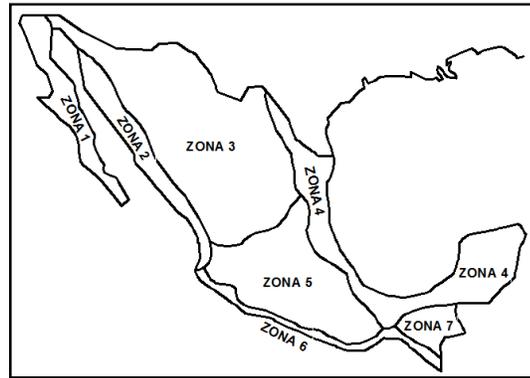
Tabla 1.1 Costos de invernaderos en México según el tipo

Tipo de invernadero	Rango de precios (\$/m ²)
Macrotúnel	35-65
Malla sombra	80-110
Invernadero para climas tropicales	210-250
Invernadero para clima templado	280-350
Invernadero para cualquier clima	380-490

Una de las variables críticas a considerar en el diseño de los invernaderos es la velocidad de los vientos. La norma mexicana NMX-E-255-CNCP-2008 “Invernaderos-diseño y construcción-especificaciones” hace referencia a la siguiente tabla de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2008):

Tabla 1.2 Regiones de México caracterizadas por la velocidad del viento (CFE, 2008)

Zona	Velocidad máxima
1	90 km hr ⁻¹
2	125 km hr ⁻¹
3	115 km hr ⁻¹
4	160 km hr ⁻¹
5	80 km hr ⁻¹
6	180 km hr ⁻¹
7	80 km hr ⁻¹



La ventilación natural en los invernaderos predomina porque la instalación de sistemas mecánicos genera consumo de energía. Implementar la ventilación artificial es viable para cultivos rentables específicos, para investigación científica o cuando se desee tener un modelo de invernadero altamente tecnificado (Flores-Velázquez, 2010). El desarrollo del diseño óptimo de invernaderos avanza lentamente en México. La mayor parte de los modelos en el mercado son modelos importados debido a la falta de crecimiento de las empresas nacionales. El diseño de invernaderos en las empresas nacionales no se ha desarrollado porque se comercializan invernaderos existentes y no se ha buscado la manera de diseñarlos de acuerdo con las condiciones locales.

El factor primordial para elegir un tipo de invernadero son las condiciones del clima. Se recomienda seleccionar un tipo de estructura que mejore el ambiente interior en función de las condiciones externas para que los cultivos se desarrollen satisfactoriamente. Debido al éxito logrado en otras latitudes, una gran variedad de estructuras diseñadas para la producción de cultivos llegaron a México. Estas estructuras indujeron un cambio en el invernadero tipo túnel usado desde los años setenta. El principal problema del invernadero tipo túnel fue que se instaló por igual en zonas secas y en zonas húmedas. En el interior de este tipo de invernadero se concentran el calor y la humedad, además de que el aire no circula adecuadamente.

En general se han instalado todo tipo de invernaderos, con el común denominador de que si no cuenta con sistemas de ventilación, aparecen problemas de temperatura alta en días soleados, gran cantidad de humedad y poca fluctuación del movimiento del aire. Esta situación se presenta en el 90 % de los invernaderos del país. Las características de los invernaderos actuales están relacionadas con su funcionalidad en la adaptación del ambiente regional, su resistencia ante factores como el viento y las cargas del cultivo, y que sea económico en su operación y versátil para diferentes cultivos y posiciones.

**Consideraciones para el diseño y
construcción de invernaderos**

2

Capítulo 2

CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE INVERNADEROS

2.1 Consideraciones físicas

2.1.1 Latitud

La posición geográfica del lugar donde se establece el nuevo invernadero es uno de los primeros factores que se deben considerar. Conocer el recorrido de la tierra respecto al sol durante el año aporta datos para la decidir la orientación del invernadero, el tipo (sierra, cenital, túnel, etc.), la cubierta y las fechas idóneas de siembra. Dependiendo de la latitud será la radiación que llegue al invernadero. Mientras más perpendiculares sean los rayos a la superficie terrestre mayor será la intensidad de la radiación solar. Esta característica de perpendicularidad depende de la latitud del lugar, de la época del año y de la hora del día, y debe considerarse al momento de diseñar el invernadero.

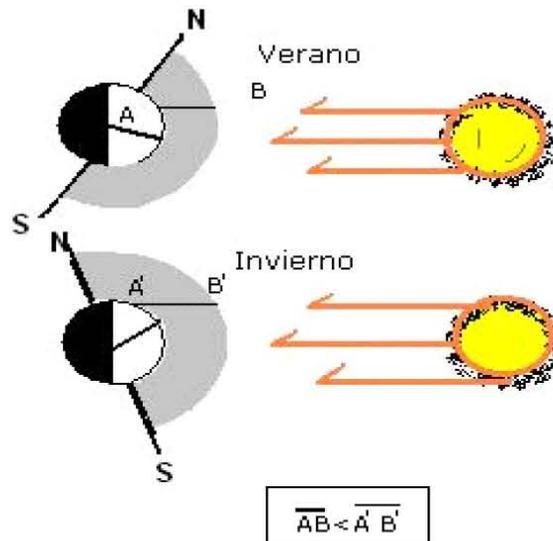


Figura 2.1 Efecto estacional de la transparencia solar (adaptada de National Academy of Sciences, 1975)

Los rayos solares deben atravesar la capa de atmósfera, donde los rayos se reflejan y dispersan, sobre todo en las latitudes intermedias y altas, y no tanto en las tropicales. Este efecto varía según las estaciones: en invierno es mayor en el hemisferio norte cuando el eje terrestre se aleja del sol y hace que los rayos solares sean menos intensos en el horizonte (**Figura 2.1**).

2.1.2 Duración del día

La duración de luz al día afecta la cantidad de insolación recibida. Mientras más largo sea el periodo de luz solar, mayor será la insolación potencial. En el ecuador, el día y la noche son iguales. En las regiones polares el periodo de luz del día alcanza un máximo de 24 horas en verano y un mínimo de cero horas en invierno (**Figura 2.2**).

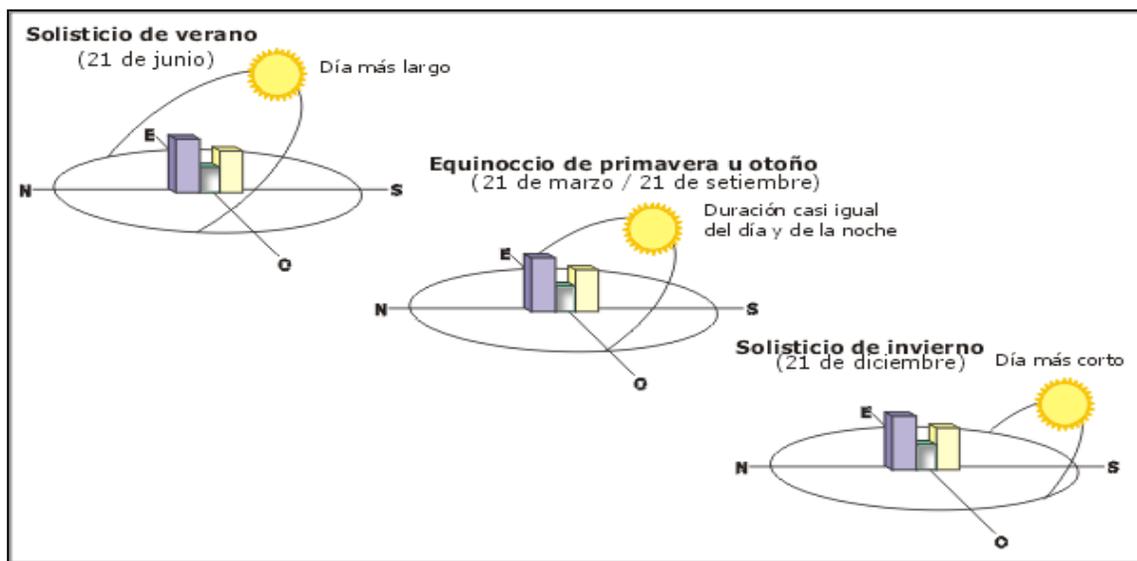


Figura 2.2 Variaciones estacionales en la duración de la luz del día en el hemisferio norte (National Academy of Sciences, 1975)

2.1.3 Ángulo de los rayos

Posición geográfica y nubosidad son algunas de las circunstancias que modifican el ángulo con que los rayos solares caen sobre la superficie terrestre, y varía considerablemente a medida que la rotación de la tierra se mueve de un lado a otro del ecuador. Una superficie relativamente plana y perpendicular a un rayo solar vertical recibe la mayor cantidad de insolación. Por consiguiente, las áreas donde

los rayos solares son oblicuos reciben menos insolación, ya que estos deben atravesar una capa más espesa de la atmósfera y se dispersan sobre una superficie mayor (**Figura 2.3**). Este mismo principio se aplica al desplazamiento diario de los rayos solares; al mediodía se produce la mayor intensidad de insolación, durante la mañana y la tarde, cuando el sol se encuentra en un ángulo bajo, la intensidad de la insolación es menor.

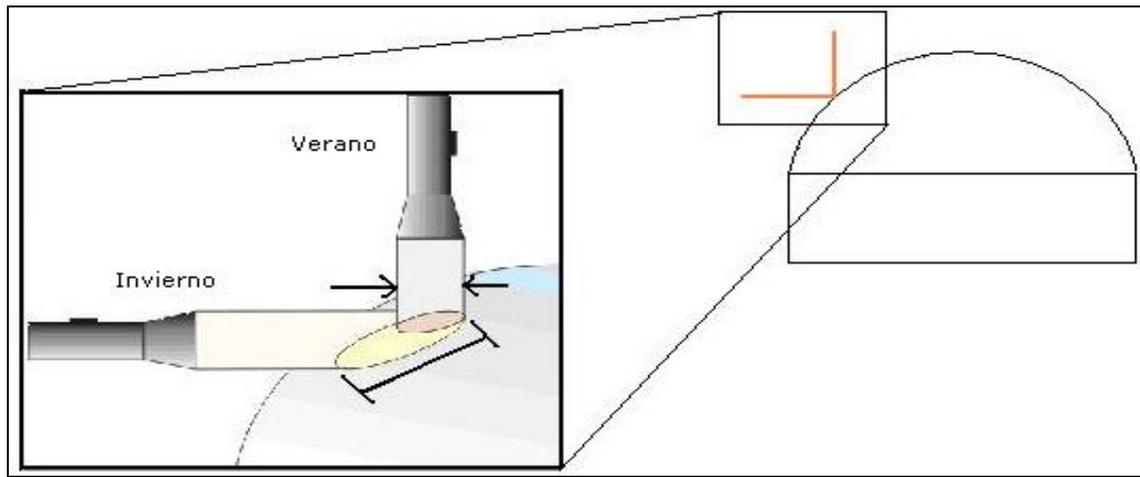


Figura 2.3 Rayos oblicuos y verticales (Adaptada de National Academy of Sciences, 1975)

2.1.4 Altitud

La presión en un cierto punto corresponde a la fuerza (peso) que la columna atmosférica sobre ese lugar ejerce por unidad de área, debido a la atracción gravitacional de la Tierra. La presión atmosférica promedio a nivel del mar es ligeramente superior a 1 000 hPa, lo que corresponde a una fuerza cercana a 10 toneladas por metro cuadrado (1 kg/cm^2). Como la atmósfera es compresible, el efecto de la fuerza gravitacional hace que su densidad (masa por unidad de volumen) disminuya con la altura, lo que a su vez explica que la disminución de la presión con la altura no sea lineal.

A pesar de ser invisible, el aire tiene peso. La presión atmosférica es causada por moléculas de aire (por ejemplo, oxígeno o nitrógeno) que chocan entre sí y con otros objetos y rebotan, y depende del número de moléculas atmosféricas en un determinado volumen y la velocidad a la que se desplazan. Cuando el aire está confinado dentro de ciertos límites, como en el caso de un invernadero, el calentamiento aumenta su presión y el enfriamiento la disminuye. Cuando se

confina en un espacio más pequeño, su presión aumenta pero disminuye cuando se expande en un espacio mayor. Esto en gran medida debería definir el tamaño del invernadero, o en su defecto el sistema auxiliar para remover el aire contenido, calentarlo, o enfriarlo.

En cualquier ubicación, ya sea en la superficie terrestre o en la atmósfera, la presión atmosférica depende del peso del aire de la capa superior. Por ejemplo, una columna de aire a nivel del mar ejerce una presión de 1.013 milibares (mb), pero a una altitud de 5.5 km la presión atmosférica será de aproximadamente la mitad o 0.506 mb (Lockwood, 1974). A mayor altitud desciende con rapidez, y es proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura. En la parte inferior de la atmósfera la temperatura es prácticamente constante o aumenta ligeramente con la altitud, especialmente en las regiones tropicales. Un invernadero en una zona tropical involucra un estricto control ambiental y de manejo del cultivo.

2.1.5 Gradiente vertical de temperatura

El gradiente vertical de temperatura se define como la cantidad con que la temperatura del aire cambia respecto de la altura. El gradiente vertical de temperatura de la atmósfera es aproximadamente de 6 a 7 °C por km (en la troposfera) pero varía mucho según el lugar y la hora del día. Una disminución de temperatura con la altura se define como un gradiente vertical negativo y un aumento de temperatura con la altura como uno positivo (**Figura 2.4**).

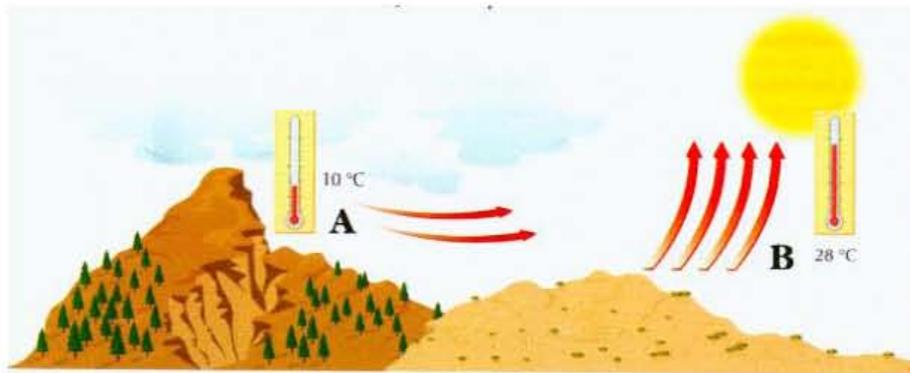


Figura 2.4 Variación estacional de la temperatura en función del gradiente vertical (National Academy of Sciences, 1975)

2.1.6 Vientos dominantes

Dos aspectos básicos definen la orientación del invernadero: la radiación y la dirección de los vientos dominantes. El término *viento* se aplica a la corriente de aire que se desplaza en sentido horizontal, mientras que los movimientos de aire

en sentido vertical se conocen como *corrientes de convección*. El movimiento del aire ocurre por diferencias de presión atmosférica y diferencias de temperatura.

Las variaciones en la distribución de presión y temperatura son ocasionadas por la distribución desigual del calentamiento solar, junto con las diferentes propiedades térmicas de las superficies terrestres y oceánicas. Cuando las temperaturas de regiones adyacentes difieren, el aire más caliente tiende a ascender y a soplar sobre el aire más frío y, por tanto, resulta más pesado. Los vientos generados de esta forma manifiestan perturbaciones debido a la rotación de la Tierra.

Cerca del ecuador hay una zona de bajas presiones, entre los 10° de latitud S y los 10° de latitud N, donde el aire puede ser más caliente. A unos 30° del ecuador en ambos hemisferios hay otra zona de alta presión, vientos suaves y variables. Los vientos se denominan según la dirección desde la que soplan, los vientos de las latitudes medias se califican como dominantes del oeste y se ven modificados por las perturbaciones ciclónicas y anticiclónicas que provocan cambios diarios de las direcciones. La **Figura 2.5A** muestra los aparatos generalmente usados para medir dirección y rapidez del viento.

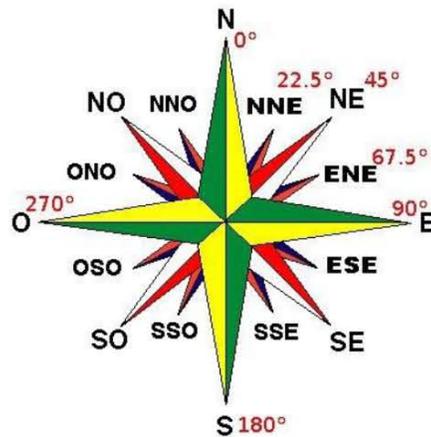


Figura 2.5 A). Veleta y anemómetro para medir dirección e intensidad del viento. B) Rosa de los vientos

Así pues, la dirección del viento define el punto del horizonte de donde viene o sopla el viento al pasar por un punto de observación. Los cuatro puntos principales corresponden a los cardinales: norte (N), sur (S), este (E) y oeste (W). Se consideran hasta 32 entre estos y los intermedios, aunque los primordiales y más usados son los observados en la **Figura 2.5B** con su equivalencia en grados azimut.

Si bien es cierto que el viento es un parámetro involucrado en varios procesos tales como la transpiración y la evaporación, dentro de un invernadero, al tomar valores reducidos y más aún en las direcciones, determinarlo permite hacer adecuaciones que lleven a obtener resultados confiables. Aunque estas características se observan en el exterior del invernadero, tienen implicaciones directas en el desarrollo del cultivo pues facilitan el intercambio de aire. Además de nivelar los valores de CO₂, introducir aire seco y sacar aire húmedo permite que se mantengan los mejores niveles de temperatura, humedad y por lo tanto déficit de presión de vapor.

2.1.7 Orientación

La orientación es un factor que además de influir en el intercambio de aire también contribuye en la transmisividad y la uniformidad de la radiación dentro del invernadero. Por ejemplo, un invernadero a dos aguas con orientación este-oeste recibe globalmente mayor cantidad de radiación en los meses de otoño e invierno que aquel que se orienta norte-sur (Hernández *et al.*, 2001). La **Figura 2.6** indica cómo sería un invernadero orientado norte-sur con el recorrido del sol con respecto al invernadero. En un invernadero con una orientación 48 ° con respecto del norte existe una diferencia en la captación de luz matutina con respecto a la de la tarde, y más aún, de la época otoñal o en el invierno.

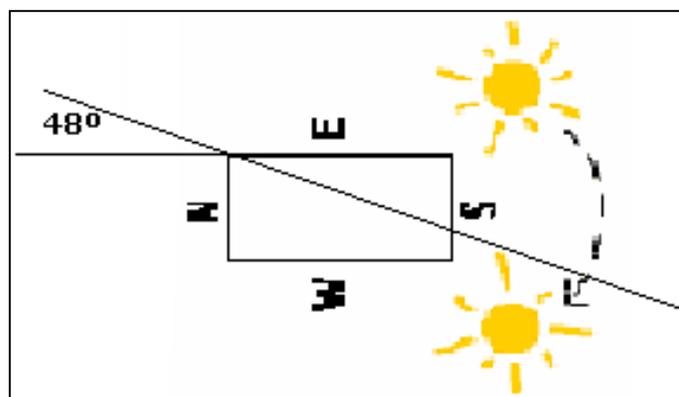


Figura 2.6 Recorrido estacional del sol con respecto a la orientación del invernadero

En el lado sur de un invernadero a dos aguas orientado este-oeste la cantidad de radiación diaria recibida es mayor que la recibida en el lado norte, mientras que en uno orientado norte-sur, como el que se muestra en la **Figura 2.7**, no hay diferencias entre la radiación recibida en el lado este y el lado oeste debido al movimiento relativo de la tierra respecto del sol que sale por el este y se oculta por el oeste. Un invernadero orientado este-oeste presenta menor uniformidad de radiación que los orientados norte-sur. La orientación del invernadero se vuelve importante cuando este se ubica en un lugar con marcada estacionalidad, en cuyo

caso la cantidad de radiación que llega en los meses de otoño e invierno, cuando la elevación solar es menor, será numéricamente diferente a lo registrado en primavera.

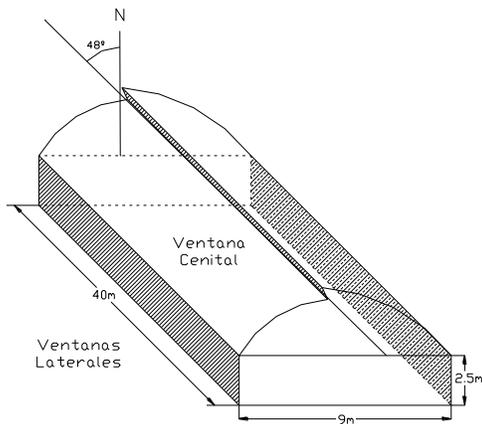


Figura 2.7 Orientación norte-sur del invernadero a dos aguas

2.2 Consideraciones climáticas

2.2.1 Radiación solar

A excepción de una pequeña cantidad de calor originada en el centro de la tierra toda la energía que llega a la superficie proviene del sol (Rossenberg *et al.*, 1983). Sin embargo, del total de la energía emitida por el sol solo una pequeña parte es aprovechada por las plantas (1 %). Más aún, existen diferentes factores que provocan cambios en la manera de absorberse, por lo que determinar la cantidad de radiación aprovechada por los cultivos resulta un proceso complejo.

La transmisión de calor por radiación se caracteriza porque la energía se transporta de una superficie a otra en forma de ondas electromagnéticas, que se propagan en línea recta a la velocidad de la luz y no requieren de un medio físico para transmitirse. En toda superficie existen continuamente electrones que cambian de diferentes niveles, por lo que la energía radiante se emite en un abanico de frecuencias llamado espectro de la radiación. Cuando el origen de la radiación es el calor, la energía se emite en función solo de la temperatura y se denomina radiación térmica. No todas las superficies emiten o absorben la misma cantidad de energía radiante cuando se calientan a la misma temperatura. Un cuerpo que

absorba o emita a una temperatura determinada la máxima cantidad de energía se denomina superficie negra o simplemente cuerpo negro.

De la totalidad de radiación solar solo una pequeña parte, llamada radiación fotosintéticamente activa (PAR), es utilizada por las plantas para fotosintetizar y producir biomasa. Otros componentes de la radiación global son la radiación infrarroja, que aporta gran cantidad de energía necesaria para calentar objetos, y en menor cantidad la radiación ultravioleta, cuyo impacto es visible si se presenta un gran deterioro de los materiales plásticos de recubrimiento del invernadero.

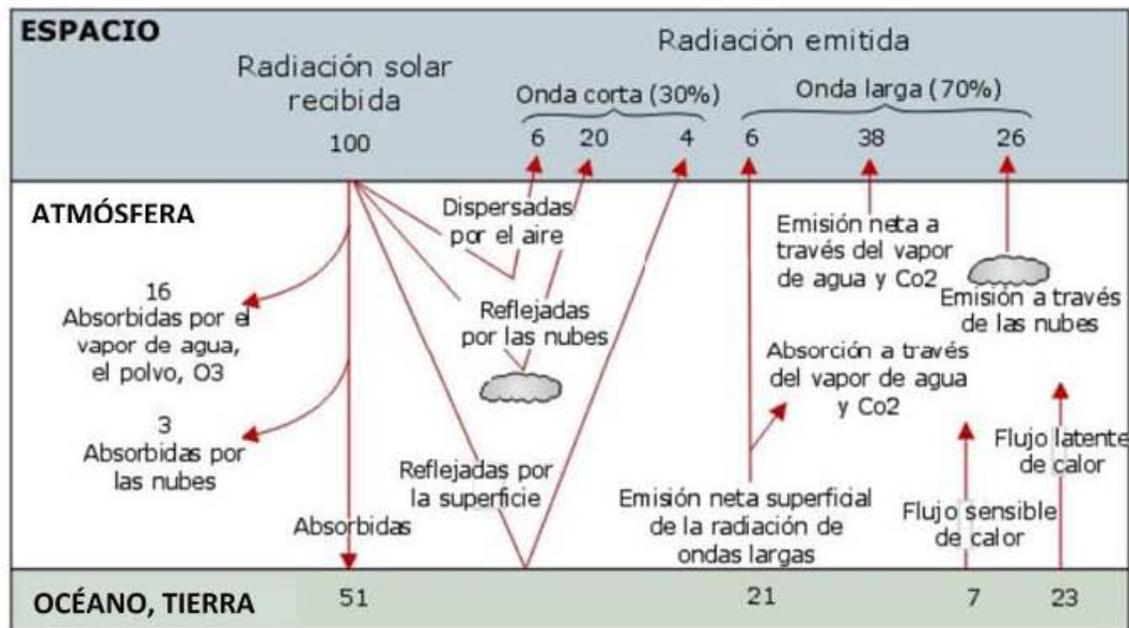


Figura 2.8 Radiación y balance térmico promedio anual de la atmósfera calculada para 100 unidades de radiación solar recibida (National Academy of Sciences, 1975)

El balance de radiación representa el hecho de que la energía recibida por la tierra es la misma que se emite, razón por la cual se mantiene un balance térmico. La **Figura 2.8** muestra el balance de radiación térmico de la atmósfera. De cada 100 unidades de energía que ingresan en la atmósfera, 51 son absorbidas por la tierra, 19 por la atmósfera y 30 reflejadas nuevamente al espacio. Las 70 unidades que absorbe el sistema tierra-atmósfera (51+19 unidades) son irradiadas nuevamente al espacio como una radiación de onda larga.

En los estudios de balance de energía es necesario saber la magnitud de la radiación neta, que representa la cantidad de energía radiante retenida en la superficie terrestre y que aporta las bases para procesos como la transferencia de calor latente y sensible, así como la fotosíntesis, la respiración, el almacenamiento

de calor por la cubierta vegetal, la formación de materia orgánica, etc. En el invernadero existen varios intercambios de energía, principalmente de calor sensible. El balance puede realizarse mediante la **Ecuación 2.1** (Rosenberg, 1983):

$$Rn = S + A + LE + P + M \quad (2.1)$$

donde Rn es la energía radiante neta disponible, cuando todos los flujos de radiación han sido considerados, S identifica el flujo de calor que entra o sale del suelo, A se refiere al flujo de calor sensible entre la superficie y el aire, LE es el flujo de calor latente que llega o sale de la superficie a través de la vaporización o condensación del agua, P es la energía fijada en las plantas por medio de la fotosíntesis y M relaciona la energía involucrada en procesos misceláneos como respiración y calor almacenado en la cobertura de los cultivos.

La radiación térmica y la radiación neta se pueden determinar por medición directa con piranómetros, pero como estos escasean, ha sido necesario establecer métodos empíricos como las cartas de radiación. Cuando la ganancia de calor excede la pérdida, la radiación neta es positiva; se hace negativa en caso contrario. Generalmente la radiación es positiva en el día y negativa en la noche. La radiación neta es aquella que es recibida en la superficie terrestre y que no es reflejada o vuelta a emitir hacia la atmósfera (Romo y Arteaga, 1983). Puede expresarse para un instante o para un periodo dado y en ambos casos representa la diferencia entre el ingreso y el egreso de radiación, es decir, la carga radiante efectiva sobre una superficie (**Ecuación 2.2**):

$$Rn = Rg \downarrow + R_L \downarrow - Rg \uparrow - R_L \uparrow \quad (2.2)$$

donde Rn es la radiación neta, $Rg \downarrow$ es la radiación solar incidente (onda corta), $R_L \downarrow$ es la radiación atmosférica incidente (onda larga), $Rg \uparrow$ es la radiación solar reflejada (onda corta) y $R_L \uparrow$ es la radiación terrestre emitida (onda larga).

La radiación solar incidente o radiación global ($Rg \downarrow$) se compone de la suma de la radiación directa (R_{dir}) y la radiación solar difusa (R_{dif}), como se expresa en la **Ecuación 2.3**:

$$Rg \downarrow = R_{dir} + R_{dif} \quad (2.3)$$

La radiación efectiva emitida ($Rb \uparrow$) resulta de la diferencia entre la radiación atmosférica ($R_L \downarrow$) y la radiación terrestre emitida ($R_L \uparrow$):

$$Rb \uparrow = R_L \uparrow - R_L \downarrow \quad (2.4)$$

$$-R_b \uparrow = -R_L \uparrow + R_L \downarrow \quad (2.5)$$

De estas ecuaciones se deriva:

$$R_n = R_g \downarrow - R_g \uparrow - R_b \uparrow \quad (2.6)$$

Misma que puede expresarse de la siguiente manera:

$$R_n = R_g(1 - \alpha) - R_b \quad (2.7)$$

donde R_n es la radiación neta, α es el albedo de la superficie, R_g es la radiación global y R_b es el balance de radiación de onda larga.

El albedo (α) es la fracción de la radiación solar de onda corta que es reflejada del suelo y de la superficie del cultivo de la atmósfera. Esta fracción depende del ángulo con que inciden los rayos del sol sobre un plano horizontal de la superficie terrestre. Dicho ángulo se denomina altitud solar y varía con el día del año, la hora, la latitud, y depende de factores como la vegetación, la textura y la humedad del suelo.

La radiación solar es absorbida en parte por el suelo, la planta y los objetos dentro del invernadero. Se convierte en energía térmica y se irradia como radiación térmica o se disipa por convección, conducción y transpiración. La cantidad de radiación que llega al interior del invernadero es menor que en el exterior debido a la reflexión y absorción del material de cubierta. Este efecto depende del coeficiente de transmisividad, que varía a lo largo del año dependiendo del ángulo de incidencia de los rayos solares y de la acumulación de polvo en la cubierta de los invernaderos.

La orientación del invernadero y el tipo de cubierta juegan un papel primordial en la captación de radiación solar. Por ejemplo en Chapingo Mex., en diciembre y enero la radiación exterior media diaria medida en plano horizontal no sobrepasó los $12.1 \text{ W m}^{-2} \text{ día}$, frente a los $19.6 \text{ W m}^{-2} \text{ día}$ registrados en abril; sin embargo, dentro del invernadero estas diferencias son mas marcadas y llegan a reducir hasta $4 \text{ W m}^{-2} \text{ día}$ debido al ángulo con que los rayos solares inciden, que es menor en los meses de invierno. La disminución del ángulo de incidencia supone un aumento del componente de reflexión que es particularmente importante en los invernaderos con cubierta plana.

2.2.2 Temperatura (T [°C])

La temperatura ambiental es el parámetro climático más utilizado en el monitoreo ambiental de un invernadero (Hannan, 1990), tal vez por la facilidad de su medición con respecto a otros factores climáticos como la radiación solar o la

humedad ambiental. La temperatura del aire en un invernadero resulta del balance de energía. Así, en un invernadero cerrado sin calefacción la temperatura del aire siempre supera la temperatura exterior durante el día, acusando un desfase en su evolución respecto a la radiación solar (Seeman, 1974). Asimismo, la temperatura del aire dependerá de la orientación y el tamaño del invernadero, el tipo de material de cerramiento y de la geometría de la cubierta. En general, el problema de las altas temperaturas puede evitarse con la ventilación cenital, si la estructura del invernadero permite su adaptación.

La evolución de la temperatura del aire en un invernadero describe una curva sinusoidal, en función del tiempo, y su evolución durante el día va desfasada respecto a la radiación solar; también presenta injerencias, al igual que el aire libre, derivadas de la transpiración (Rossenberg, 1974). La temperatura es un factor determinante en el desarrollo fenológico de los cultivos, de manera que cada especie vegetal tiene definido un rango óptimo, que oscila entre 10 y 26 °C. El objetivo del manejo en un invernadero es mantener este rango usando un sistema de control climático que permita optimizar las necesidades energéticas.

La planta responde de manera negativa a temperaturas fuera de su rango óptimo, lo que afecta el desarrollo anatómico y morfológico de algunos de sus órganos, así como algunos procesos de asimilación y transporte necesarios para un mejor rendimiento. Si la temperatura está por abajo del límite, el riesgo de enfermedades fungosas crece, se presenta el cierre de estomas y abortos florales. En cambio, si la temperatura excede el límite máximo, se incrementa la transpiración y con ello el riesgo de deshidratación, lo que genera otros problemas fisiológicos como el cuajado deficiente de frutos.

2.2.3 Humedad relativa (HR [%])

Este parámetro climático está estrechamente vinculado con la temperatura, e incide en la actividad metabólica de los cultivos. El contenido de vapor en el aire determina si las plantas están o no en actividad durante varios momentos del día. La transpiración de las plantas participa en la transferencia de los elementos nutritivos absorbidos por las raíces, regula la temperatura de las hojas y los frutos. En ambientes cerrados, una vez que el cultivo ha logrado una cobertura foliar sobre el suelo, el volumen de agua traspirado es prácticamente el mismo evapotranspirado y por lo tanto, es el volumen de agua que hay que reponer a la planta para que lleve a cabo sus actividades metabólicas.

La intensidad de la transpiración depende de las diferencias de presión de vapor entre la atmósfera de las cámaras subestomáticas de los tejidos vegetales y el aire. En condiciones de humedad relativa muy alta o muy baja se reduce la transpiración pues se favorece el cierre de estomas y se reduce la absorción de CO₂. Valores de humedad relativa muy altos indican un déficit de presión, por lo

que los intercambios gaseosos son reducidos (Monteith, 1973), y la transpiración se reduce, lo que puede ocasionar alteraciones fisiológicas como podredumbre apical de los frutos y en consecuencia, un crecimiento muy lento.

Si la humedad relativa es baja los estomas se cierran, y al no haber intercambio gaseoso, la fotosíntesis se reduce. La planta deja de transpirar, por lo tanto no regula su temperatura y no participa del estado higrométrico de la atmósfera. Durante la fase vegetativa, el tomate requiere valores de HR en el rango de 70 a 80 %; valores más altos propician el desarrollo de enfermedades. El exceso de humedad puede producir que se caigan las flores y se compromete la dehiscencia de las anteras en la mayoría de las especies. La falta de HR reduce el periodo de receptividad de los estomas y daña la germinación del polen ocasionando bajas tasas de fecundación.

El desarrollo de numerosos patógenos se ve favorecido por valores de HR altos, con un rango de temperaturas variable. Por ejemplo, los organismos que necesitan de un medio líquido para propagarse, como las esporas, se verán en condiciones óptimas con las condensaciones de humedad sobre el follaje. De igual manera, con valores de HR bajos se generan condiciones favorables para la presencia y propagación de ácaros.

La humedad relativa (HR [%]), definida como la tensión actual de vapor sobre la tensión a saturación de la misma masa de aire y expresada en porcentaje (Monteith, 1973), es la característica obtenida por los higrógrafos. Algebraicamente se expresa como en la **Ecuación 2.8**:

$$HR = \frac{e_a}{e_s} 100 \quad (2.8)$$

donde Hr es la humedad relativa diaria (%), e_a es la presión parcial de vapor de agua (kPa) y e_s es la presión de vapor del líquido a saturación a temperatura constante (kPa). Para su cálculo se usa:

$$e_a = 610.7 e^{\frac{17.4T_d}{239+T_d}} \quad (2.9)$$

donde T_d es la temperatura del punto de rocío (°C)

$$e_s = 610.7 e^{\frac{12.4T_o}{T_o+239}} \quad (2.10)$$

donde e es la base de los logaritmos neperianos = 2.7183 y T_o es la temperatura promedio (°C).

Para calcular el valor promedio se toma la temperatura del aire como la media entre la máxima y la mínima diaria expresada como:

$$T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (2.11)$$

Si no se tienen los valores máximos y mínimos de la temperatura, la presión parcial de vapor de agua se puede calcular con la humedad relativa diaria y la presión de vapor a saturación, como se muestra en la **Ecuación 2.12**:

$$e_a = \frac{HR}{100}(e_s) \quad (2.12)$$

2.2.4 Humedad ambiental

Una variable ambiental relacionada con el estrés de los cultivos es la humedad del aire. El aire seco tiene mayor capacidad para absorber y transportar vapor de agua que el aire húmedo a la misma temperatura, por lo que el aire seco promueve la transpiración de los cultivos. En condiciones de humedad relativa muy alta o muy baja se reduce la transpiración pues se promueve el cierre de estomas y en consecuencia se reduce la absorción de CO₂.

La transpiración del cultivo adiciona vapor de agua al ambiente; en ambientes cerrados como en un invernadero se pueden generar incrementos drásticos en la humedad del aire en horas de alta insolación. Cada especie presenta diferentes reacciones a la humedad relativa; por ejemplo, el tomate responde mejor a ambientes de humedad relativa de 50-80 % dependiendo de la temperatura ambiental.

2.2.5 Contenido de CO₂

El anhídrido carbónico de la atmósfera es el material indispensable en la función calorífica de las plantas. El enriquecimiento de la atmósfera del invernadero con CO₂ es relevante porque esta atmósfera está limitada en cuanto al movimiento, sobre todo en cultivo de hortalizas.

La concentración normal de CO₂ en la atmósfera es de 370 μmol mol⁻¹ (Lorenzo, 2001) pero en el invernadero este índice puede disminuir a niveles tan bajos como 150 ppm. El suplemento de CO₂ a concentraciones superiores a los 400 μmol mol⁻¹ es aplicado en tasas bajas de ventilación. En invernaderos con ventilación natural la concentración de CO₂ es muy variable durante el día; alcanza

valores máximos al final de la noche y el mínimo en las horas de máxima radiación, que en el caso de Chapingo ocurren al medio día.

En un invernadero cerrado por la noche, antes de iniciar la ventilación con la abertura de las ventanas por la mañana, los valores de las concentraciones pueden llegar a estar entre 250-270 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ (Lorenzo, 1990). Al mismo tiempo que reducen la asimilación neta de carbono, estas concentraciones incrementan la conductancia estomática y pueden originar un desequilibrio hídrico en el cultivo y reducir drásticamente la fotosíntesis.

En las regiones frías se necesita mantener una temperatura adecuada al cultivo, lo que obliga a mantener el invernadero cerrado, por lo que las condiciones límites de CO_2 pueden presentarse a cualquier hora del día. Esto implica una marcada reducción de CO_2 aprovechable por los vegetales y que afecta a la fotosíntesis. Esta situación no es solo producto de la ventilación; variables como la especie cultivada, la radiación solar, la temperatura y la humedad también determinan los niveles de CO_2 . Por ejemplo, el óptimo de asimilación ocurre entre los 18 y 23 °C de temperatura (Infoagro, 2004).

La tasa de absorción de CO_2 es proporcional a la cantidad de luz recibida y depende de la concentración de CO_2 disponible en la atmósfera de la planta. El periodo más importante para la absorción de anhídrido carbónico ocurre al medio día, cuando se presentan las mejores condiciones de insolación.

2.2.6 Viento

El viento en el invernadero permite transferir vapor atmosférico y remueve el vapor alrededor de las hojas, evitando la saturación del ambiente y el cierre estomático. La velocidad del viento es otra variable importante en la transferencia de vapor atmosférico, pues ayuda a remover el vapor saturado alrededor de las hojas; también uniformiza el CO_2 y la temperatura.

En condiciones de ventilación limitada, el vapor de agua se acumularía en el interior del invernadero y se crearía una capa espesa de aire alrededor de las hojas con la consiguiente reducción de la tasa de transpiración del cultivo. Cuando no hay ventilación forzada, la ventilación natural o pasiva juega un papel importante para mantener el cultivo en las mejores condiciones ambientales.

Si la ventilación es limitada se presenta un gradiente térmico provocado por el ascenso del aire caliente. Con el fin de uniformizar la temperatura se recurre al uso de ventanas cenitales y laterales, y a ventiladores que crean el movimiento de la masa de aire dentro del invernadero. Para asegurar una distribución relativamente uniforme, la capacidad total del ventilador debe ser equivalente al movimiento de un cuarto del volumen del invernadero por minuto (Jensen, 2004).

De esta manera, las necesidades de ventilación de un cultivo dependen no solo del tipo de invernadero sino también de la especie y etapa fenológica del cultivo y de las condiciones ambientales externas.

2.2.7 Déficit de presión de vapor (DPV [kPa])

El déficit de presión de vapor (DPV) es un valor que expresa el flujo de vapor en un invernadero y permite conocer la tendencia del flujo hacia condensación o transpiración. Los valores altos de DPV propician la transpiración del cultivo a expensas de la humedad del sustrato y de los tejidos vegetales, mientras que los valores bajos indican cercanía al punto de rocío, lo que genera condiciones de condensación dañina en ambientes cerrados como los invernaderos.

Los valores de DPV integran tanto la humedad relativa como la temperatura, proporcionan un estimado del grado de saturación del vapor del aire y la tendencia ambiental para promover la transpiración o condensación, y permiten conocer el estado de las condiciones ambientales en el desarrollo óptimo de los cultivos. La diferencia entre las presiones de vapor a saturación (e_s) y actual (e_a) se conoce como déficit de presión de vapor (DPV, con unidades de presión, usualmente kPa) (Monteith, 1973):

$$DPV = e_s - e_a \quad (2.13)$$

Cada especie responde a rangos óptimos del DPV para su desarrollo. El DPV es útil no sólo para conocer la demanda evaporativa del ambiente sino también para identificar condiciones ambientales propicias para el desarrollo de enfermedades. Por ejemplo, Prenger y Ling (2001) mencionan una regla práctica de sobrevivencia de hongos patógenos cuando los valores de DPV se encuentran por abajo de 0.43 kPa, y con una actividad más dañina para valores de DPV por debajo de 0.20 kPa. El valor correspondiente de la HR para un DPV de 0.20 kPa aumenta con la temperatura. Los valores óptimos del DPV para evitar el cierre de estomas se encuentra en el rango de 0.5-1.5 kPa.

2.3 Consideraciones agronómicas

En cultivos de invernadero el medio de cultivo es el espacio donde se alojan las raíces. En cultivos protegidos este espacio puede ser sólido, líquido o una mezcla de ambos. Además del soporte que se le proporciona a la planta, el medio de cultivo define principalmente la frecuencia de riego. Los riegos son requeridos por las plantas cultivadas y son más frecuentes en un invernadero que al aire libre, pero

con caudales más reducidos porque en el interior del invernadero existe menor evaporación y los cultivos deben mantenerse bajo el mínimo estrés hídrico.

La armazón del invernadero debe ser ligera para no restar luminosidad a las plantas cultivadas en el interior. Las estructuras muy voluminosas y pesadas proyectan grandes sombras que retrasan el crecimiento del cultivo y su fructificación. Además, el uso de estructuras ligeras abarata los costos de construcción. Uno de los factores más importantes en el diseño del invernadero es su resistencia. Se debe mantener el equilibrio entre la resistencia del invernadero y los costos de construcción. La resistencia se ve favorecida cuando se elige adecuadamente el emplazamiento y la orientación respecto a los vientos dominantes, así como la protección con cortavientos.

Las dimensiones y la forma del invernadero dependen en gran medida de la climatología de la zona. Mientras mayores sean las dimensiones del invernadero, los factores climáticos serán más difíciles de controlar, por lo que se recomienda construir varios módulos de invernaderos pequeños (1 000 a 2 000 m²) en lugar de uno solo de gran tamaño.

La superficie cubierta dependerá siempre de la climatología de la zona. Los invernaderos muy grandes no son recomendables en zonas de poco viento, pues su ventilación es reducida y da lugar a frecuentes enfermedades en las plantas. La altura debe permitir el desarrollo normal del cultivo, que normalmente va de los 2 a los 3 metros en el caso de pepinos, tomates y otros. Las dimensiones del invernadero también condicionan su estabilidad térmica, particularmente por la relación entre el volumen de aire y la superficie cubierta por el invernadero (m³m⁻²). Para climas mediterráneos se considera una relación entre 2.7-3 m³ m⁻², por lo que la altura media del invernadero debería ser de 3m (entre cumbrera y laterales).

Aunque durante los meses de invierno la iluminación es débil, los invernaderos con inclinación de techo desigual suelen registrar una iluminación interior superior a la de aquellos contruidos con vertientes simétricas. Por ejemplo, un invernadero cuya vertiente norte tiene una pendiente de 55° y una pendiente de 25° en la vertiente sur deja pasar entre 10 y 12 % más luz que uno con vertientes simétricas, cuyos planos de inclinación forman un ángulo de 35° con la horizontal. Por otra parte, con el desarrollo actual de plásticos con características específicas es posible manipular la intensidad de la luz.

El ángulo de inclinación de los techos, así como su forma, deben ser elegidos de acuerdo con la climatología de la zona, es decir, dependiendo del tipo y cantidad de precipitaciones se debe elegir la forma (plana, semicircular, en forma de cesta, elíptica, etc.) y la pendiente de la techumbre. A mayor pendiente el agua se evacúa con mayor facilidad pero se ofrece menor resistencia al viento. Si la orientación del invernadero se define atendiendo la intensidad de los vientos, hay que orientarlos con la fachada más angosta en oposición a la dirección de dichos vientos. Si bien la mayor iluminación se obtiene orientando el invernadero en la dirección este-oeste,

debe considerarse la presencia y orientación de los vientos predominantes. Durante el invierno la máxima iluminación se obtiene ubicando el invernadero orientado al norte. También debe considerarse la dirección de las siembras dentro del invernadero.

En los aspectos de higrometría y ventilación, la humedad requerida por las plantas depende de la especie y la variedad e incluso de la fase vegetativa de cada una de ellas. La mejor manera de controlar la humedad del aire es por medio de ventilación estática o con ventanas instaladas en los flancos del invernadero o en las cumbreras (ventilación cenital). Con este último tipo, las condensaciones de agua en las paredes del invernadero desaparecen rápidamente, lo que permite evitar enfermedades y favorece la fructificación de los cultivos. En invernaderos de grandes dimensiones como los de tipo Parral o Almería es altamente recomendable incorporar ventilación cenital además de la lateral.

2.4 Consideraciones estructurales

2.4.1 Cubiertas

En un invernadero la cubierta es uno de los elementos críticos desde el punto de vista agronómico. Trabajos realizados con objeto de estudiar la degradación de la transparencia del plástico indican que la cubierta aumenta la radiación absorbida hasta $215.2 \text{ W h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, lo que se traduce en una disminución de la radiación que incide sobre el cultivo, repercutiendo en una disminución considerable de la producción.

La radiación solar que incide sobre la pantalla de plástico que cubre el invernadero puede ser transmitida, reflejada o absorbida, la proporción de luz que se transmite se conoce como transmisividad y está directamente afectada por el tipo de material plástico y el tipo de radiación. La calidad de la luz, por lo tanto, se verá afectada por el tipo de material que atraviesa. En caso de radiación directa, la transmisividad dependerá también del ángulo de incidencia (**Figura 2.9**) que forman los rayos solares con la línea perpendicular de la superficie del plástico (Hernández *et al.*, 2001).



Figura 2.9 Curvatura de un invernadero cenital tipo sierra

Al momento de diseñar un invernadero es importante tener en cuenta los siguientes puntos:

- Las dimensiones del invernadero
- La composición química y las propiedades de la película de cubierta
- El sistema de sujeción del plástico
- El tensado de la película sobre la estructura
- La ventilación como parte de la estructura



Figura 2.10 Consideraciones para el establecimiento del invernadero

El diseño correcto de la estructura puede ayudar a resolver algunos problemas como:

- Cuando la temperatura invernal disminuya por debajo del mínimo biológico se requiere usar calefacción, en cuyo caso es necesario diseñar el tipo de sistema que mejor se adapte (**Figura 2.10**)
- Por el contrario, si el problema son las altas temperaturas, la ventilación puede ser insuficiente, por lo que será necesario definir el tipo de sistema y considerarlo al diseñar la estructura (**Figura 2.13**)
- La presencia nocturna de altos niveles de humedad
- La presencia de vientos fuertes define la altura y tipo de cimientos del invernadero (**Figuras 2.11 y 2.14**)
- La disponibilidad del agua para riego y/o en su caso las alternativas para su cosecha o almacenamiento, principalmente en los periodos de alta demanda hídrica de los cultivos
- La disminución de la concentración de anhídrido carbónico durante el día en los invernaderos cerrados

Al eliminar la infiltración de aire, se puede reducir el problema del descenso de la temperatura nocturna. La ventilación puede soportar el problema de las temperaturas excesivas diurnas. La forma del invernadero, los componentes, etc., pueden ser estudiados de manera que resistan bien el viento (**Figura 2.11**). Los canales de recogida de agua pueden captar el agua de lluvia y conducirla a un embalse para disminuir los problemas de la escasez de agua (**Figura 2.12**).

2.4.2 Topología

En un cultivo protegido, la geometría y el material de cubierta modifican la cantidad y las características de la radiación que incide sobre el cultivo. El porcentaje de disminución puede ser superior al 30% de la cantidad de luz recibida diariamente y se reduce por la propia estructura del invernadero, la humedad relativa, la concentración de CO₂, el agua y la nutrición mineral (De Koning, 1989; Warren-Wilson *et al.*, 1992).



Figura 2.11 Nivelación vertical del invernadero para definir altura del mismo

La transmisión de radiación a través de una cubierta en un momento dado depende del ángulo de incidencia de la radiación sobre la superficie de la cubierta, de la propagación de los componentes (directa-difusa) (Harnett *et al.*, 1979; Sherry y Goldberry, 1980) y de las características propias del material de cubierta. Considerando las características que se pretenden manipular dentro de un invernadero, los requisitos pueden resumirse y clasificarse en función de los materiales que se utilizan en todo tipo de construcción (FAO, 2004):

- Los invernaderos multimodulares ventilados solo a través de los frontales y de los laterales no deben exceder la anchura que permita una ventilación eficaz, la cual varía dependiendo del lugar, pero se sugieren anchos de 40 a 60 m para que la ventilación sea eficaz (**Figura 2.12**).
- Deben usarse los canalones para recoger el agua de lluvia. El canal puede formar parte de los elementos resistentes de la construcción.
- En los invernaderos con cubierta plástica, la ventilación lateral y la ventilación del techo aumentan la eficacia ventiladora.
- La altura puede limitarse o puede estar condicionada a la incidencia del viento. Aun cuando un invernadero se diseña para resistir velocidades del viento que superen los 100 km hr^{-1} , se recomienda reducir la altura de la estructura cuando la velocidad del viento sea mayor.
- Por otra parte, si las paredes verticales son suficientemente altas, se puede utilizar maquinaria dentro del invernadero, con lo que la superficie de ventilación se ve aumentada.



Figura 2.12 Invernadero multimodular de 50 m de ancho



Figura 2.13 Ventilación cenital en la estructura



Figura 2.14 Cimientos del invernadero para mayor estabilidad

Independiente de la altura del invernadero y del número de capillas, un factor estructural básico serán los cimientos sobre los que descansa la estructura (**Figura 2.14**). Las características de flexibilidad de la estructura requieren que los cimientos se unan usando tornillos de diversos calibres.

Las estructuras propuestas han sido techos planos simétricos a dos aguas (**Figura 2.15 A**) y arco redondeado con paredes verticales (**Figura 2.15 B**).

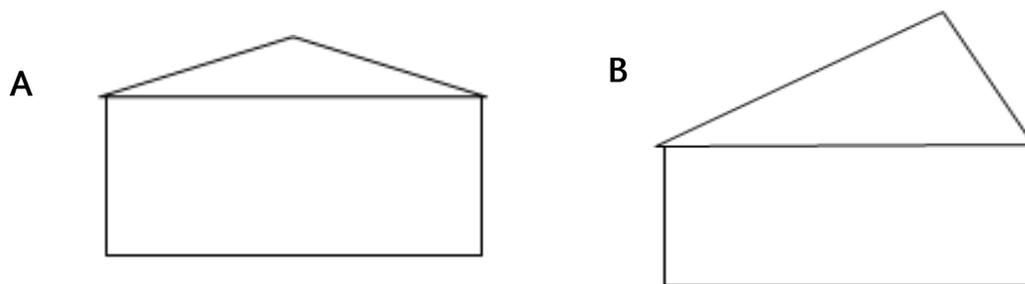


Figura 2.15 Tipos de invernaderos comúnmente usados. A) Capilla simétrico y B) Asimétrico de dos aguas (FAO, 2004)

Aunque es más fácil tensar la película de plástico sobre los techos en forma curva que sobre las superficies planas, también hay techos con arco redondeado (**Figuras 2.16 C y D**), arco en punta con paredes laterales en pendiente (**Figura 2.16 E**) y arco en punta con paredes verticales laterales (**Figura 2.16 F**).

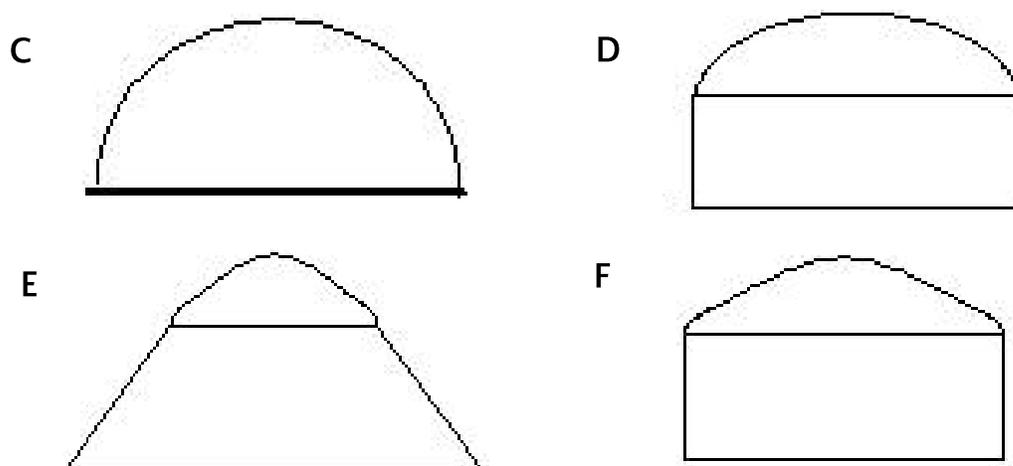


Figura 2.16 Otro tipos de techados en invernaderos (FAO, 2004)

Cuanto mayor sea la perpendicularidad del rayo solar incidente mayor será la radiación transmitida y por lo tanto su transmisividad. Al crecer el ángulo de incidencia disminuirá la transmisividad (Hernández *et al.*, 2001). La transmisividad de la cubierta es un parámetro sujeto a variación continua debido a:

- La variación de la posición solar que modifica el ángulo de incidencia de la radiación sobre la cubierta a lo largo del día y de la estación anual. Se

recomienda adecuar la geometría de la cubierta para mejorar el ángulo de incidencia de la radiación.

- La acumulación progresiva de polvo y suciedad que se intensifica en días secos o de precipitación escasa.
- La evolución de las características del material de la cubierta a lo largo del tiempo. Las condiciones climáticas influyen en el progreso del deterioro de estos materiales; las cubiertas de plástico envejecen más rápidamente.

Las estimaciones de pérdidas en la producción se asocian a la disminución de la radiación potencial y van del 0.5 al 3.1 % por cada 1 % de reducción de insolación (Verhaegh, 1981; Cockshull, 1988). En un cultivo de tomate se observó que las pérdidas del 1 % de luz corresponden a pérdidas del 1 % de producción. Los resultados evidencian la necesidad de maximizar la transmisión de luz en los invernaderos. Se ha reportado que el tipo y estado de la cubierta es el factor que más influye en la reducción de la producción. En el caso de México, la cubierta de plástico es la más usada.

2.4.3 Dimensiones

Las formaciones de los módulos en batería se han venido adecuando a las circunstancias particulares de cada lugar. Hasta hace poco se preferían los invernaderos simples con ventanas a lo largo de las paredes laterales, caracterizados por una ventilación suficiente, sin embargo, en la actualidad se prefieren las estructuras multimodulares. En este último caso, se recomienda prestar especial atención a la ventilación para que sea suficiente solo con las ventanas laterales. Los invernaderos multimodulares presentan limitaciones en el ancho, por lo que las dimensiones deben ser previstas desde el trazado y nivelado (**Figura 2.17**).



Figura 2.17 Trazo y nivelación del invernadero multimodular

El principal factor que limita la anchura de los módulos individuales es la eficacia de la ventilación. Para asegurar que la ventilación a través de los laterales y frontales es suficiente en un invernadero multimodular, cada módulo individual debe tener entre 5 y 8 m de ancho; la combinación de 3 o 6 módulos da una anchura total inferior a los 60 m. También se recomienda dejar un espacio entre invernaderos (**Figura 2.18**). Aunque se están realizando estudios sobre el clima y la producción de cultivos en invernaderos con pendiente, los resultados hasta ahora indican que más del 95 % de las estructuras se cimentan sobre terrenos planos, y en este caso se deben considerar las vías de acceso para tránsito de insumos y salida de cosechas (**Figura 2.19**).



Figura 2.18 Invernadero multimodular de ocho capillas tipo cenital



Figura 2.19 Preparación del terreno para el invernadero multimodular

Debido a que los pilares de las caras laterales trabajan a compresión necesitan cimentación profunda (**Figura 2.20**); los pilares interiores pueden descansar en cimentaciones ligeras (**Figura 2.21**). Los canales están sujetos a la base superior de los pilares, a lo largo de sus ejes longitudinales, y los pilares están interconectados lateralmente por medio de cables o barras de acero (**Figura 2.21**).



Figura 2.20 Perforación para la colocación del concreto en la base de la estructura



Figura 2.21 Colocación de canaleta para captación de lluvia



Figura 2.22 Preparación del terreno para la base de la estructura multimodular

Un invernadero es una estructura flexible, por lo tanto un elemento base de la construcción es su estabilidad, que se consigue sujetando cables o barras de tensión. Cada estructura dentro del invernadero se debe conectar con otra y dar soporte al invernadero mismo así como a los canales que recogen la lluvia con la cimentación del invernadero contiguo (**Figura 2.23**).

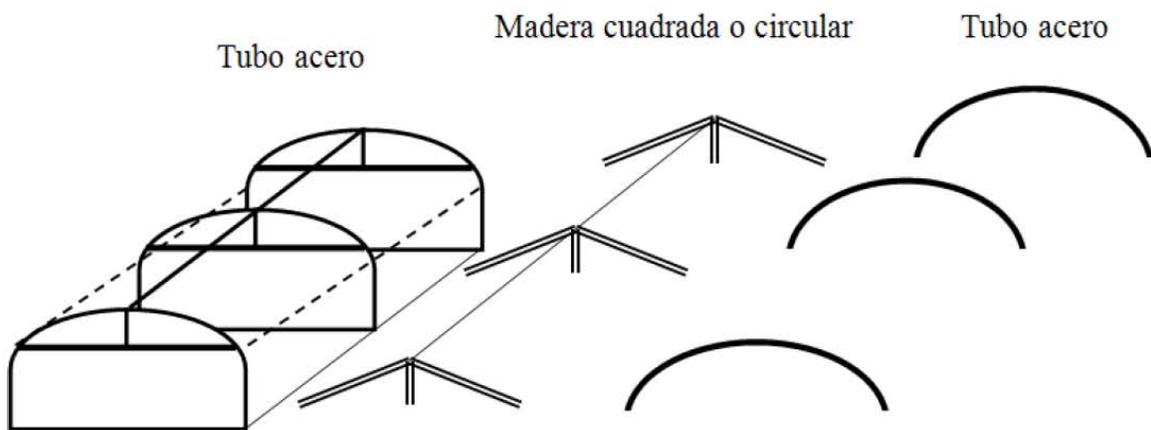


Figura 2.23 Materiales en construcciones multimodulares



Figura 2.24 Invernaderos típicos del centro de México (San Luis Potosí)

Los canales y las barras o cables únicamente soportan esfuerzos de tensión, por lo que la construcción básica queda muy simplificada, es relativamente económica y soporta la fuerza del viento. Los elementos de construcción quedan reducidos en comparación con los usados en otras estructuras y la transmisividad de la luz es mejor (**Figura 2.25**).



Figura 2.25 Estructuras alternativas con refuerzos en el interior

Algunos aspectos que se deben considerar en la construcción de un invernadero son:

- En los laterales se construye el mecanismo de ventilación dejando espacio entre dos invernaderos consecutivos. Este espacio cumple una doble función: ventilar y tensar la construcción.
- Los canales se utilizan para recoger el agua de lluvia y sirven también para sujetar la película plástica. Esta característica es importante en regiones de escasa precipitación donde se cosecha la lluvia.
- La construcción del techo independiente puede realizarse con tubos de acero o con madera (**Figura 2.26**) dependiendo de los requerimientos del constructor y del agricultor. En general la forma redondeada o arqueada es mejor para tensar la película plástica que la forma plana.
- Los elementos del techo deben ser capaces de resistir la acción eólica. La película doble con cámara de aire inflada ofrece la mayor resistencia a la fuerza del viento. La presión entre los dos plásticos debe ser entre 40 y 60 pascales.



Figura 2.26 Levantamiento de la estructura vertical en un invernadero de 1 ha



Figura 2.27 Almacenamiento de agua para suministro del invernadero

2.4.4 Materiales para el invernadero

La construcción del invernadero comprende la estructura que ha de soportar el material de cubierta. Se suelen utilizar materiales de acero en diversos calibres dependiendo de las dimensiones del invernadero, pero también pueden usarse materiales existentes en la región, como la madera. La condición es que el material empleado asegure la permanencia y el soporte de los accesorios que conforman el invernadero.

El material de cubierta condicionará el clima que se genere en el interior del invernadero. El material ideal será aquel que presente una gran transmisividad de la radiación solar, opacidad a la radiación térmica y características físicas que lo hagan resistente a la ruptura. Entre los materiales más utilizados destacan los polietilenos de baja densidad (PEBD) con diferentes aditivos que los hacen más resistentes a las radiaciones ultravioleta y les confieren propiedades térmicas (polietilenos térmicos). Otro plástico ampliamente empleado para la fabricación de materiales de cubierta es el etilvinilacetato (EVA). La combinación del PEBD y el EVA ha generado los plásticos multicapas, materiales populares actualmente. En general todos estos materiales son plásticos flexibles que duran de 1 a 3 años, según sus propiedades.

2.4.5 Materiales para estructurar y cubrir el invernadero

2.4.5.1 Estructura de madera

Los modelos en forma de capilla simétrica a dos aguas hechos con madera tratada son de utilidad en diversas regiones. La madera debe estar tratada pero con productos que no sean fitotóxicos (**Figura 2.2**). La madera se trata a presión con productos químicos especiales, como sulfato de cobre o bórax; una vez seca, se deja en la solución química dos o tres días. Los pilares también pueden ser tratados de manera superficial.



Figura 2.28 Construcción básica a base de madera (FAO, 2004)

Una opción para fijar el plástico es unir las barras de madera alternativamente una por encima y otra por debajo del plástico; otra es usar piezas especiales de sujeción. También se pueden usar pilares de madera y acero para el techo.

2.4.5.2 Construcción en acero

Si el invernadero es de acero resulta más fácil construir el techo en forma redondeada o en arco apuntado. Debe evitarse en lo posible el contacto de la película con los elementos estructurales que se calientan con la radiación solar. Se recomienda pintar las tuberías de blanco o cubrirlas con material aislante.



Figura 2.29 Sistemas alternativos de calefacción por mangueras

2.4.6 Materiales para la cubierta

La evolución en la construcción de invernaderos ha derivado en el uso de materiales ligeros, de manera que en la actualidad la mayoría se cubre con película de polietileno. Las películas hechas a partir de otras resinas como el cloruro de polivinilo o el poliéster son excepcionales. Los materiales rígidos como el vidrio o los plásticos en doble pared o en plancha celular se usan sobre todo en latitudes más frías, pero resultan costosos considerando que duran entre 7 y 10 años y que necesitan estructuras muy fuertes, así como sistemas de sujeción muy sofisticados. Pese a estas características, van introduciéndose poco a poco en la horticultura actual debido a sus aptitudes para el control climático.

2.4.6.1 Películas de polietileno

Es el material generalmente utilizado como cubierta de invernaderos. Mediante el uso de aditivos añadidos a la resina básica del polietileno se pueden modificar algunas propiedades en función de algún requerimiento específico, tal como antigoteo, anti reflejante, antitrips, etc., también se puede aumentar la duración de la película, modificando su transparencia a la radiación visible, al infrarrojo de onda corta y a la radiación solar, y cambiando sus cualidades de absorción y reflexión del infrarrojo largo lo que facilita el manejo térmico del invernadero.

2.4.6.2 Polietileno de baja densidad (PEBD)

Existen dos calidades diferentes de polietileno de baja densidad, el radicular y el lineal (FAO, 2004). El polietileno radicular se obtiene por polimerización a alta presión y a alta temperatura, mientras que en el polietileno lineal la presión y la temperatura son inferiores. Las películas de polietileno lineal tienen mejor resistencia mecánica pero son más elásticas (elongación reversible) por lo que la producción de películas de gran anchura es difícil.

Debido a sus características es difícil utilizar como cubierta la película de polietileno lineal en su estado puro, pero se puede usar una mezcla que contenga del 20 al 30 % de polietileno lineal. En el caso de túneles pequeños el polietileno lineal de 80 a 120 micras produce mejor resultado debido a su resistencia mecánica superior a la del polietileno radicular de 120 a 150 micras de espesor. La vida útil de la lámina no solo depende de las sustancias estabilizadoras (absorbedor del ultravioleta) sino también de la calidad de la resina, caracterizada por el índice de fluidez o índice de fusión (NI). Si se añaden estabilizadores de buena calidad, especialmente absorbentes del ultravioleta, la vida útil de las películas puede ser muy larga.

El uso de distintos estabilizadores en el polietileno para obtener películas de larga duración reduce la transparencia a la radiación solar, pero estas películas absorben mejor el infrarrojo largo, logran que las temperaturas nocturnas sean más altas y mejoran los resultados agronómicos. Con el objetivo de obtener películas de alta transparencia y larga duración, se ha experimentado una nueva generación de estabilizadores (HALS), pero desgraciadamente reaccionan con algunos fungicidas que contienen sulfuros.

2.4.6.3 Polietilenos con acetato de vinilo (PEAV)

La resina básica de polietileno es enriquecida con acetato de vinilo, (AV) cuya propiedad es aumentar la absorción del infrarrojo largo sin reducir su transparencia al ultravioleta, a la radiación visible y al infrarrojo corto solar. Como contrapartida esta transparencia inicial superior a la radiación solar que tiene el PEAV, va desapareciendo poco a poco debido a que retiene el polvo con mayor facilidad que las otras películas de polietileno, especialmente en regiones con reducida precipitación.

Conforme aumenta el contenido de acetato de vinilo en la película, aumenta la cantidad de infrarrojo largo absorbido. El infrarrojo largo no puede absorberse totalmente porque hay un límite superior en el contenido del acetato de vinilo (AV). Si se excede puede ocurrir la degradación de las propiedades mecánicas de la película debido al descenso progresivo del punto de reblandecimiento, producto del

tensado del plástico cuando se coloca en el invernadero. Para evitar problemas de deslizamiento por estos motivos, se recomienda un contenido de AV de 18 %.

El AV tiene una absorción específica del infrarrojo largo que difiere de la absorción por otras sustancias añadidas a la resina básica e influye de una manera diferencial en el balance térmico del invernadero. Los absorbentes de UV tienden a aumentar la vida del PEAV pero la duración puede disminuir si el contenido en AV de la resina es muy alto. Si el PEAV es muy rico en AV ha de ser menos resistente a la carga anti UV.

2.4.6.4 Polietileno infrarrojo (PEIR o PE modificado)

Es la resina básica PE enriquecida con silicato de aluminio o de magnesio. Con la excepción del AV añadido resulta complicado encontrar otro material que combine la alta opacidad al infrarrojo largo, transmisión de la radiación solar y buenas propiedades mecánicas. La producción de plástico tiende a limitar los niveles de concentración de la carga IR para no reducir la duración y la transparencia de la lámina.

2.4.6.5 Polietilenos térmicos (PEAV con aditivos)

Si se toman separadamente las cargas de AV o de IR, ninguna de ellas ofrece una solución satisfactoria al problema de creación de película de larga vida de polietileno, que absorban totalmente el IR largo. Se ha creado una nueva generación de películas de PE que, de acuerdo con sus inventores, debe tener las ventajas combinadas de los PEAV y los PEIR y evitar sus inconvenientes. Algunas de las películas llamadas térmicas absorben más radiación IR que estos.

2.4.6.6 Películas que no son de polietileno

En el mercado existen otras películas que se usan comercialmente, como el PVC o cloruro de polivinilo (el más antiguo), el fluoruro de polivinilo o PVF o PF, el tereftalato de polietileno y una amplia gama de poliésteres. También existe una gama de nuevos materiales como el poliuretano y los poliestirenos, caracterizados por su base química original, su resistencia mecánica, su alta transmisión de radiación solar, su duración mejorada o su baja transmisión dentro del rango del infrarrojo largo. Algunos de estos materiales van ganando terreno en ambientes controlados. Puesto que estos materiales difieren muy poco en la transmisión de la radiación solar, su interés práctico se determina por su duración, su absorción o reflexión del infrarrojo largo y sus propiedades mecánicas.

Dos materiales muy diferentes a los polietilenos clásicos que llevan tiempo en el mercado pero que recientemente han ganado importancia son el fluoruro de polivinilo (tedlar) y un poliéster comercializado como terpano, que es un tereftalato de polietileno. Estos materiales presentan la ventaja de tener unas características fotométricas excelentes. El polietileno no tiene naturaleza flexible y se utiliza para manufacturar tuberías rígidas. Para tener cloruro de polivinilo plastificado es preciso añadir aditivos plastificadores que permitan producir una película por prensado con rodillos, con una anchura limitada a 2 m o por extrusión e inflado, con una anchura máxima de 6.5 m.

2.4.6.7 Textiles

A partir de los trabajos realizados para medir la transmitancia en la banda espectral de 2 y 50 micras del infrarrojo, y de 0.2 y 0.7 micras del espectro visible y ultravioleta se deduce que las cubiertas agrotexiles transmiten la radiación solar a un alto nivel (especialmente el polipropileno y algunas PA), entre el 80 y el 90 %, y bloquean efectivamente el infrarrojo, de manera que producen un buen efecto invernadero (20 a 30 % de transmisión). Los valores aproximados de renovación de aire y salto térmico que se producen en el invernadero de acuerdo con el tipo y relación entre ventanas y superficie de cubierta se muestran en la **Tabla 2.1**:

Tabla 2.1 Valores de renovación de aire y salto térmico según de tipo de ventilación (Montero et al., 1992)

Tipo de ventilación	Tasa de renovación horaria	Salto térmico °C
Cenital 5 %	15-25	11-8
Cenital 10 %	35-50	7-5
Lateral 5 %	15-25	11-8
Lateral 10 %	30-50	7.5-5
Lateral 10 % + Cenital 5 %	50-70	5-4

Al comparar los rendimientos de producto hortícola cosechado en distinta época los estudios experimentales han mostrado bajas en la producción invernal cuando se usan techumbres planas (típico de Almería) respecto a techumbres de vertientes desiguales (p. ej. 18° y 8°). Este efecto disminuye al comienzo de la primavera, cuando el efecto marginal de las radiaciones es menor. Por ejemplo, un invernadero de polietileno en Barcelona, España con orientación este-oeste muestra un comportamiento distinto en fechas diferentes, como se muestra en la **Figura 2.30**:

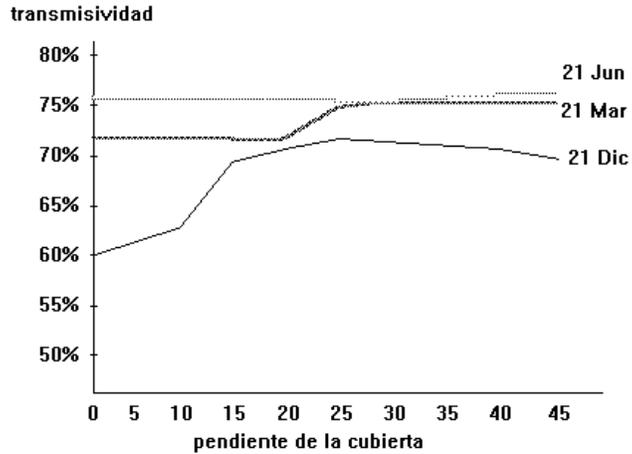


Figura 2.30 Comportamiento de la transmisividad según la pendiente de la cubierta del invernadero (Montero, 2000)

La pendiente de la techumbre queda determinada por la máxima transmisividad invernal, que en este caso se alcanza con 25° de inclinación y con orientación este-oeste. Cuando no se cuenta con medios de control de clima puede adoptarse el uso de cubiertas dobles, con lo que se logra subir la temperatura entre 2 y 3°C. El problema de esta alternativa es que la radiación disminuye entre un 61 y un 51 %, pero su ventaja es que el techo doble reduce el goteo y ahorra calefacción (35-35 %).

El ambiente del invernadero

3

Capítulo 3

EL AMBIENTE DEL INVERNADERO

3.1 Características ambientales promedio

México cuenta con características específicas que definen la variación climática espacial y temporal; el trópico de cáncer divide por la mitad al país, dos penínsulas, dos golfos, zonas costeras e intercontinentales, orografía, y una serie de accidentes geográficos que originan una diversidad de climas. Los dos factores que definen los climas promedio del país son su localización geográfica (latitud) y su orografía (altitud). Estas características originan que en una gran parte del país se presenten condiciones climáticas tropicales, con temporales bien definidos, y en general promedio de temperaturas elevadas (**Figura 3.1**). La temperatura media diaria en el ciclo primavera-verano se mantiene por arriba de los 24 °C, a excepción de las zonas intercontinentales que pueden ser mas bajas.

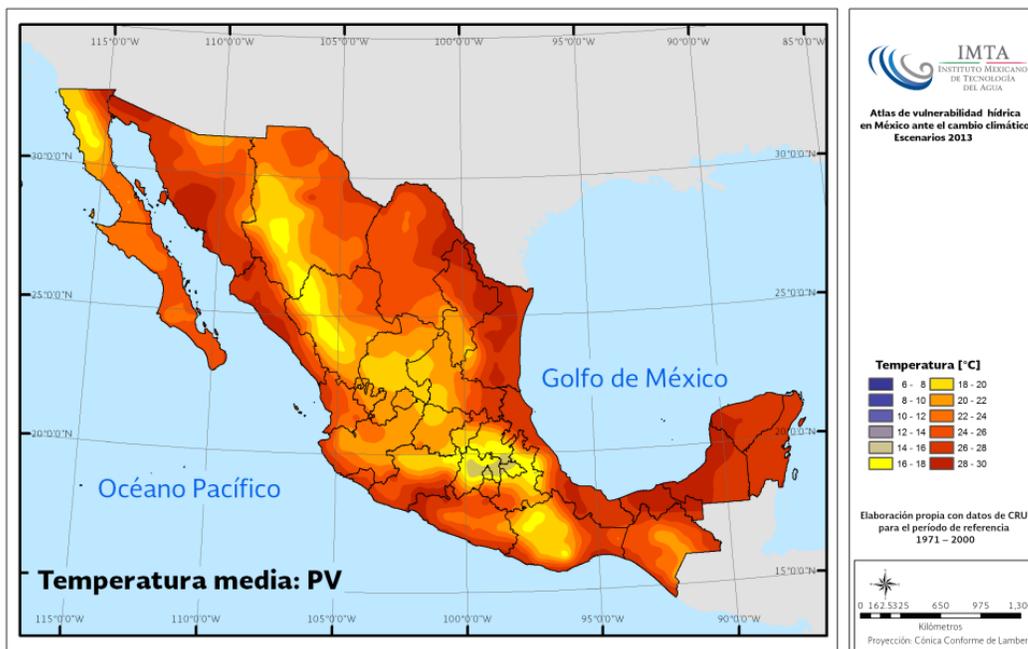


Figura 3.1 Temperatura media diaria en los meses de primavera-verano

Por otro lado, en las regiones del centro-sur, las variaciones orográficas favorecen la formación de regiones climáticas muy específicas (**Figura 3.2**). Solo en la parte norte del país se observan temperaturas fuera de rango de la producción de las especies hortícolas, pero son puntuales y en periodos específicos del año. Considerando la producción de cultivos en invernadero, estos mapas permiten identificar la estacionalidad de la producción agrícola, y en su caso definir el tipo de invernadero a construir atendiendo las necesidades agronómicas. El clima promedio indica precipitaciones en verano que disminuyen de este a oeste, por lo que el litoral del Pacífico es, en general, menos húmedo. A principios de la estación otoñal las tempestades de origen ciclónico aportan un complemento de humedad.

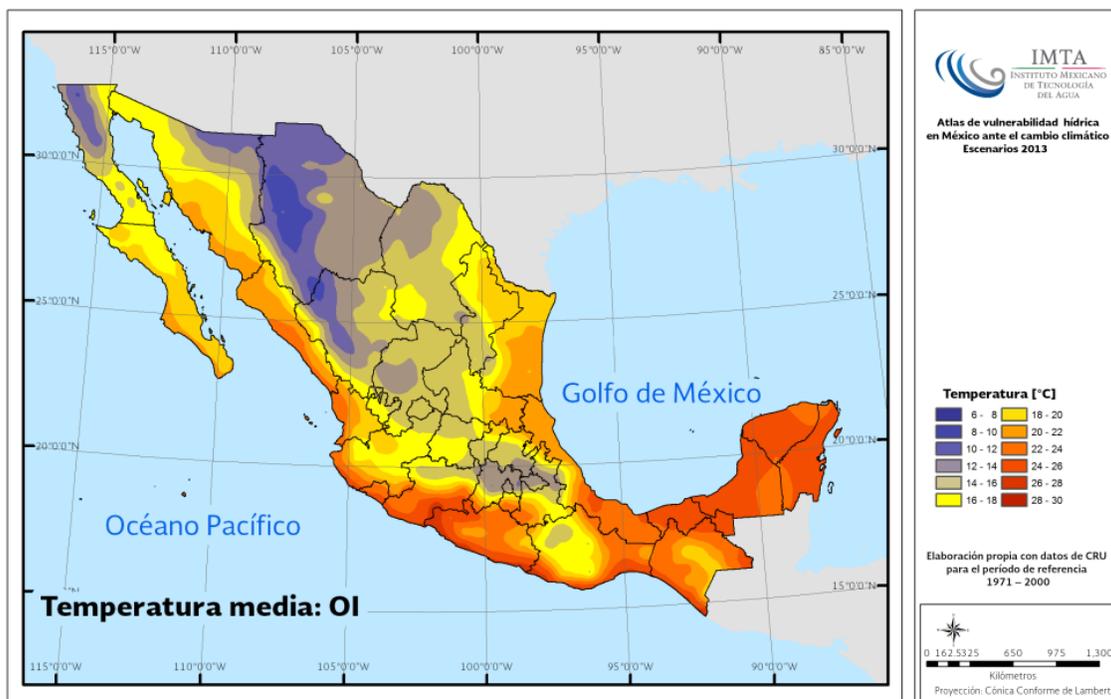


Figura 3.2 Temperatura media diaria en los meses de otoño-invierno

3.2 Problemas climáticos de los invernaderos mexicanos

Por la situación geográfica del país, el clima de México es principalmente tropical, con temperaturas que varían según la altitud. Uno de los aspectos básicos para el control climático está relacionado con el diseño del invernadero. Si la región es de clima cálido predominante, se debe hacer un manejo adecuado de las altas

temperaturas o, en su defecto, contar con alternativas de refrigeración mecánica durante los periodos clave de la producción. En un ambiente semicerrado es más fácil saturar la atmósfera de humedad, por lo que se debe considerar también la precipitación. Según las regiones orográficas se puede hablar de un México húmedo, que comprende el este y sur y donde las lluvias pueden superar los 800 mm, y un México seco, extendido por el centro, norte y oeste (**Figura 3.3**).

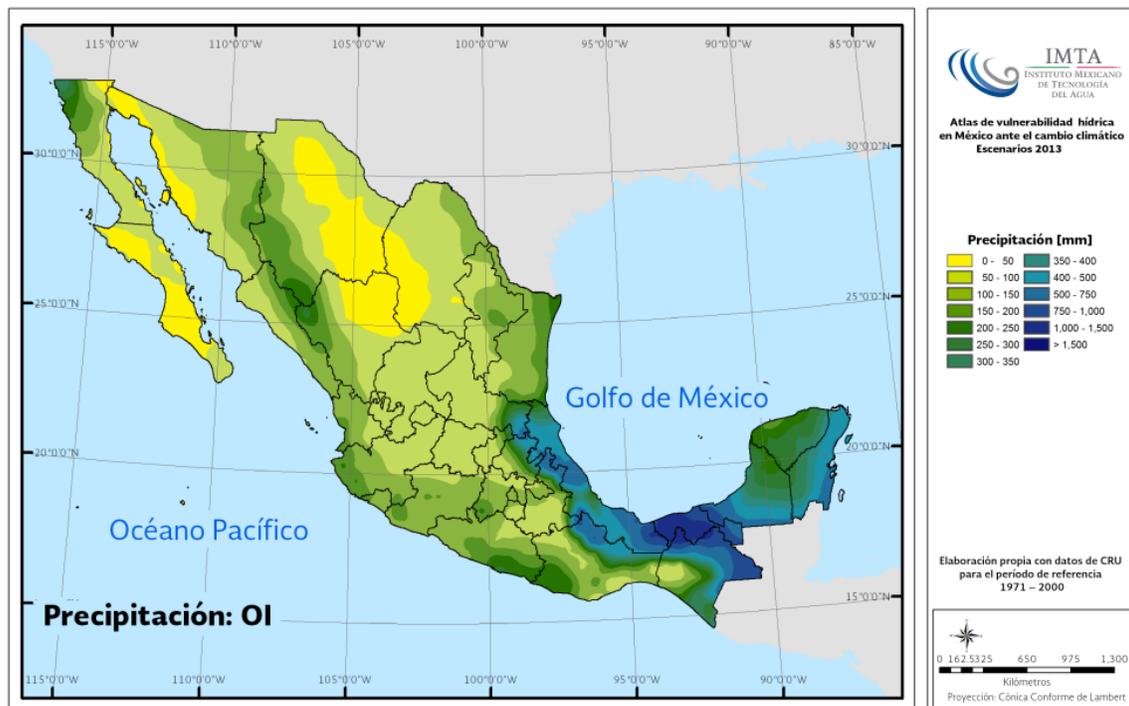


Figura 3.3 Precipitación acumulada otoño-invierno en México

Las precipitaciones pueden ser convectivas, orográficas o continentales, por lo que en el diseño se debe considerar la altitud y la posición orográfica que tendrá el invernadero, por ejemplo, si se ubicará en costas o es intercontinental (**Figura 3.4**). Otro elemento diferenciador es la altitud, que determina la división en tierras calientes, templadas y frías. Una zona templada aparece entre los 800 y 1 700 m. Las tierras frías comienzan a partir de los 1 700 m y de ahí pueden clasificarse otro tipo de ecosistemas que aparecen a 3 250 m, a 4 000 m, y la faja montañosa de bosques de coníferas y praderas.

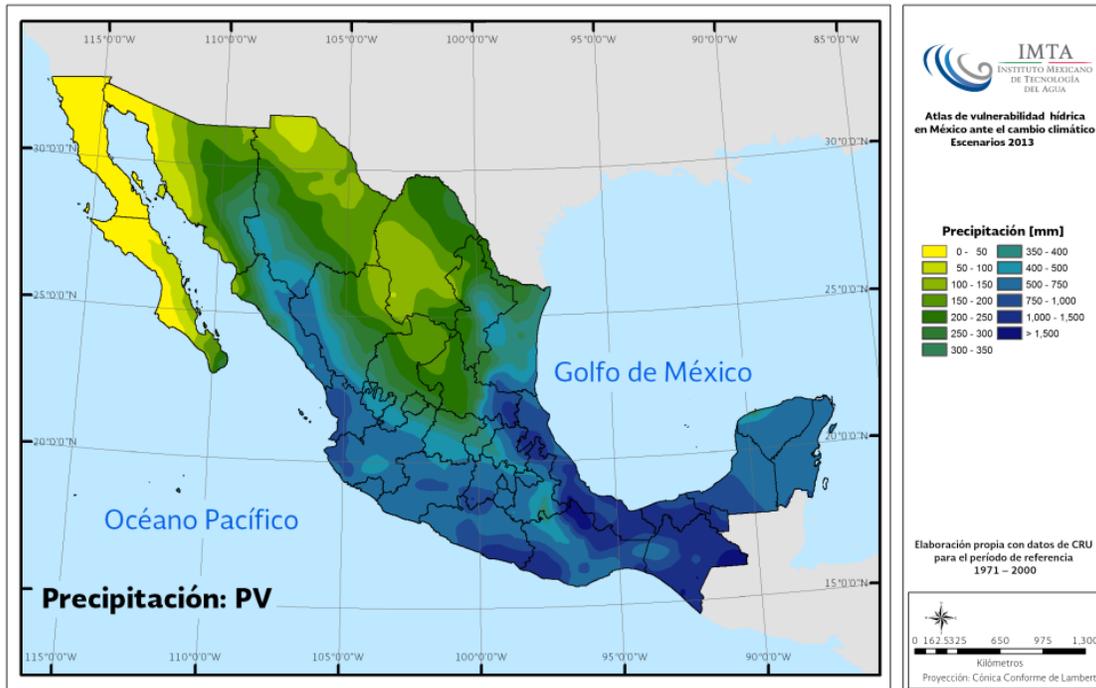


Figura 3.4 Regiones climático debido a la precipitación (primavera-verano)

En general el clima está influenciado por la circulación atmosférica de la zona intertropical. En invierno, la sequedad domina casi todo México, aunque sin grandes descensos térmicos, salvo en las alturas. Atendiendo a lo expuesto, pueden distinguirse hasta cuatro climas en el territorio mexicano (**Figura 3.2**): 1) cálido-húmedo o tropical-lluvioso, 2) desértico o seco, 3) templado-cálido o templado-lluvioso, y 4) de altura o polar (Centro de Información y Documentación Empresarial sobre Iberoamérica; CIDEIBER, 1998).

Los climas cálido-húmedos se caracterizan por sus elevadas medias anuales y por precipitaciones superiores a los 750 mm. Estos climas aparecen en las regiones llanas a menos de 1 000 m y al sur del trópico de Cáncer. Además, presentan tres matices. Los climas desérticos o secos son los que reciben menos de 750 mm de lluvia anual, y presentan a su vez dos subtipos:

- Los climas templado-cálidos o templado-lluviosos son, básicamente climas en regiones altas. Desde el punto de vista de la temperatura son similares, con una media anual que rebasa los 10 °C y con mínimas superiores a 0 °C para el mes más frío y temperaturas en julio superiores a los 18 °C.

- Los climas de montaña se inician a partir de los 2 400 m, un promedio anual de 10 °C y lluvias abundantes todo el año. Este subtipo se encuentra en las regiones altas de la Sierra Madre Occidental y del Sistema Tarasco-Nahua. A partir de los 3 500 m aparecen los climas polares.

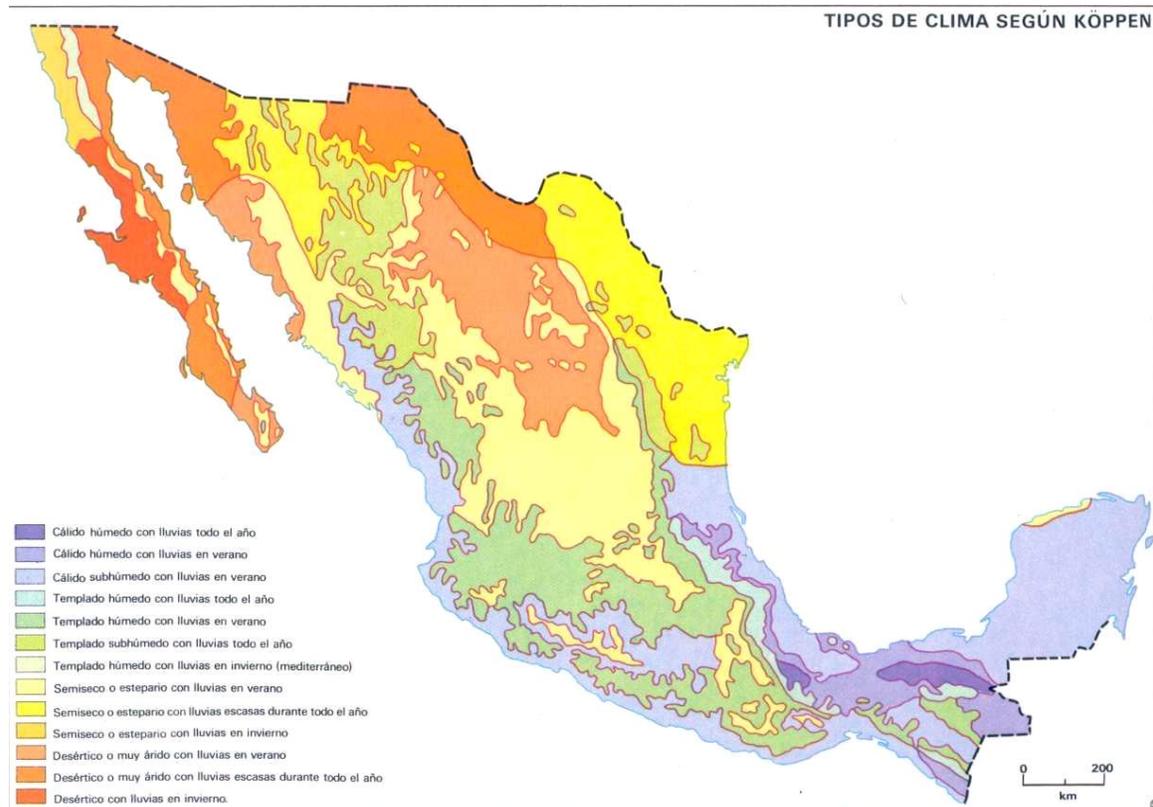


Figura 3.5 Variación climática espacial (García, 1986)

La **Figura 3.6** muestra esquemáticamente la variación de temperaturas máximas y mínimas promedio y la precipitación promedio de cuatro regiones características del país. En ellas puede observarse que un invernadero construido en el valle de México con el objeto de captar la mayor cantidad de luz en el invierno y evitar el problema de las bajas temperaturas, tiene poca relación con el que debe construirse en los valles de Mazatlán, Sinaloa, donde el principal problema será de ventilación en las épocas cálidas del año.

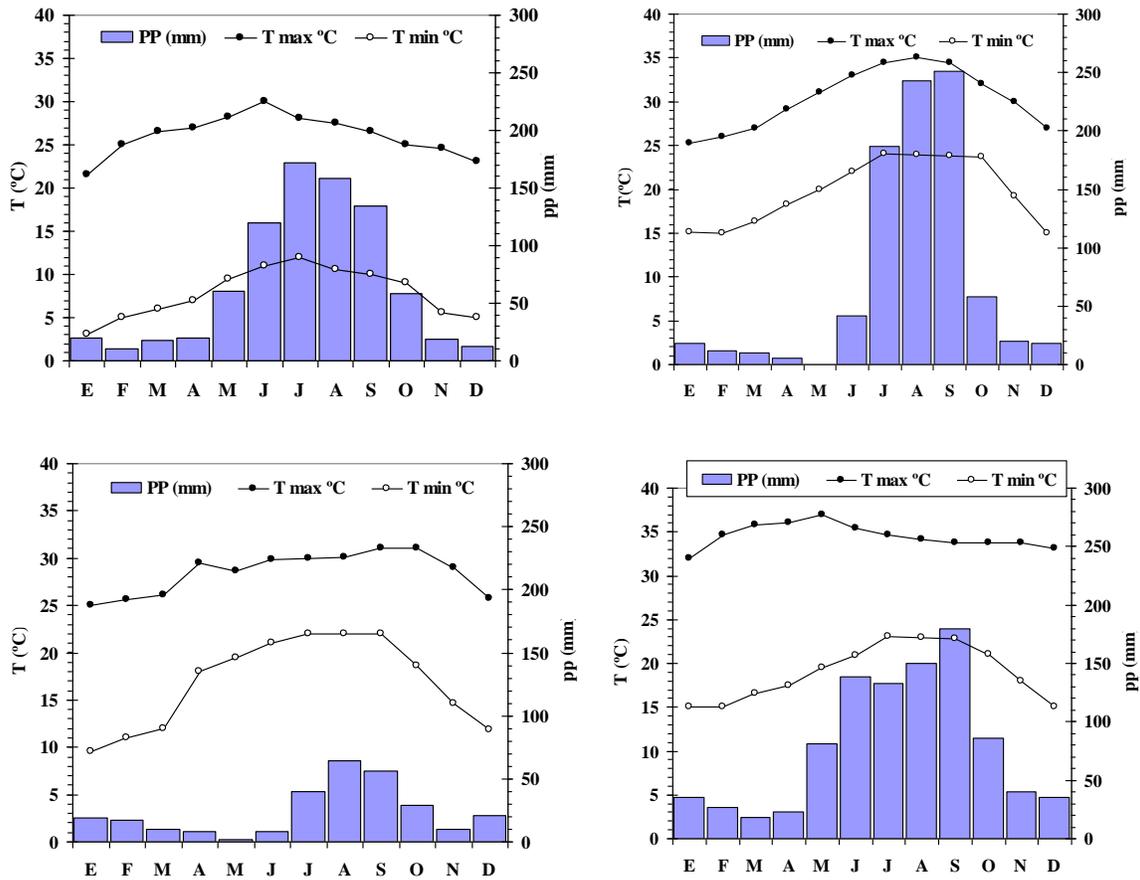


Figura 3.6 Temperaturas y precipitación media mensual de cuatro regiones características del país. (García, 1986). A) Valle de México; B) Mazatlán, Sin.; C) Guaymas, Son.; Mérida, Yuc.

Conocer las variables climáticas locales permitirá la adaptación de otras tecnologías, lo que se traduce en diseños de invernaderos que permitan aprovechar el clima local y con ello el ahorro en los costos de producción.

3.3 Transición de la agricultura mexicana

La producción agrícola en México pasa por un periodo de bajo crecimiento, debido a una diversidad de factores naturales, económicos sociales y desde luego políticos. Destaca el hecho de que la superficie susceptible de cultivar esta llegando a su límite. Entre las limitantes para el desarrollo de la agricultura se pueden mencionar:

1. Limitantes del suelo

El 64 % del territorio nacional se descarta debido a que es montañoso (pendientes mayores a 25°) o con suelos adelgazados por la erosión (Sánchez, 2003). Los suelos planos de la península de Yucatán son delgados y calcáreos. Una buena parte de los suelos tropicales presenta acidez, mientras que muchos de los suelos que pudieran irrigarse en las zonas áridas son salinos.

2. Limitantes del agua

En el 50 % del territorio la precipitación es insuficiente o mal distribuida estacionalmente, lo que coincide con las pocas regiones donde los terrenos son planos. La irregularidad en el suministro del agua hace inefectivo el uso de insumos como fertilizantes o semillas mejoradas.

3. Heladas

En la mayor parte del centro y norte del país existe un régimen de heladas tempranas y a veces tardías que limitan el calendario agrícola y en general los rendimientos.

4. Limitantes de eficiencia de riego

A pesar de las posibilidades de riego, México enfrenta problemas en cuanto a la eficiencia, debido a que se reportan pérdidas del 40 al 75 % del agua por evaporación y conducción (Sánchez, 2003) así como la salinización de las tierras de regadío debido al uso de agua proveniente de acuíferos salinos, mal drenaje en el suelo o por intrusión salina a acuíferos costeros.

La producción por tanto exigió buscar alternativas de producción que minimizarán riesgos y favoreciera el incremento del rendimiento, lo que ha dado como resultado la agricultura semiprotegida, los acolchados, los micro y macro túneles, hasta llegar al invernadero.

En climas más benignos los invernaderos no tienen que ser tan equipados en el aspecto climático como los holandeses. El clima se puede controlar de manera natural mediante implementos técnicamente eficientes pero mucho más económicos, lo que hace esta actividad más rentable y sobre todo, accesible a la población agrícola.

3.4 Métodos de control climáticos

El uso de cubiertas protectoras ha sido un gran avance en el proceso de producción agrícola porque representa ventajas sustantivas respecto de otros sistemas

agrícolas. Gracias a estas cubiertas se puede controlar la temperatura, la cantidad de luz y hacer un control químico y biológico efectivo para proteger el cultivo. Así, la producción en invernadero tiene rendimientos más altos que los tradicionales.

Uno de los principales problemas que enfrenta la agricultura en invernaderos, sobre todo en regiones de clima cálido, es suavizar los problemas derivados del incremento de las temperaturas en periodos marcados del año, mismos que ocasionan serias restricciones de interés económico ya que reducen la calidad y cantidad de la cosecha (Kittas *et al.*, 2005). Hay tres formas de control del clima:

- Sistemas de sombreo
- Reducción de temperatura mediante sistemas humidificadores
- Ventilación natural o mecánica

Ventilar de manera natural es el método de refrigeración más usado por su bajo costo de instalación y mantenimiento. Sin embargo, debido a las áreas reducidas de ventanas y a la necesidad de colocarles mallas anti-insectos de baja porosidad, en muchas ocasiones la ventilación natural no es suficiente para extraer el exceso de energía. En la actualidad se dispone de un conjunto de datos comparativos del comportamiento de las ventanas enrollables y abatibles, de la tasa de ventilación a barlovento y a sotavento, y del efecto de la porosidad de las mallas anti-insectos en la tasa de ventilación.

La ventilación es esencial en el diseño de un invernadero, ya que permite mantener un ambiente favorable al evacuar el exceso de calor producido en los momentos de alta insolación (Bailey, 1995; Montero *et al.*, 2001). Un buen diseño de los sistemas de ventilación puede mejorar tanto el control climático como el uso de la energía (Mistriotis *et al.*, 1997), lo que influye de un modo determinante en el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Bot, 1993; Kittas *et al.*, 1995). Los procesos que involucra el movimiento del aire complejizan su análisis, por lo que se han considerado nuevas opciones para su estudio, como el uso de los métodos numéricos (Kacira *et al.*, 2004).

3.5 Manejo de los sistemas de ventilación

La ventilación mediante la entrada de aire del exterior corresponde a una mezcla de dos corrientes de aire húmedo con intercambio de calor. El aire exterior se encuentra a una determinada temperatura y humedad absoluta. En el interior del invernadero la temperatura es más elevada debido al aporte energético de la radiación solar, y la humedad del aire se incrementa a causa de la transpiración del cultivo y la evaporación del agua contenida en el suelo.

En el proceso de ventilación se intercambia este aire con el aire exterior, que además de ser más fresco, suele ser más seco que el aire interior. El intercambio de aire incide directamente sobre el clima de cultivo. No solamente cambia el balance de energía y por lo tanto la temperatura del aire, sino que también se afecta el contenido de vapor de agua y de anhídrido carbónico. Equipar los invernaderos con sistemas de ventilación de operación manual y sensores ambientales simples en México ha permitido aumentar el rendimiento del cultivo de tomate hasta en 20 kg m^{-2} . Una mejor administración del cultivo (fertilización, riego, poda, etc.) y el uso de sistemas de control automático de clima y riego permiten obtener rendimientos de hasta 40 kg m^{-2} . Algunos productores holandeses obtienen hasta 78 kg m^{-2} (Leidlo, 1996).

El sistema de ventilación evita la subida de temperatura si el aire entrante se mezcla homogéneamente con el aire interno y se consigue un buen movimiento del aire interior que favorezca el intercambio de calor y masa entre las plantas y el aire del invernadero (Bailey, 2000). De lo contrario, puede producirse un déficit en la concentración de CO_2 (Hand, 1984; Lorenzo, 1994). La entrada de aire externo es la principal fuente de CO_2 de los cultivos bajo invernadero que no cuentan con enriquecimiento carbónico, que es el caso de la mayoría de los invernaderos situados en zonas cálidas.

En los meses fríos, la falta de ventilación y un mal diseño del invernadero en cuanto a orientación y pendiente del techo puede provocar exceso de humedad, lo que favorece la condensación en la cara interior de las cubiertas y el goteo sobre el cultivo, así como la disminución de la transmisión de radiación solar (Jaffrin y Makhlonf, 1990). En este caso pueden generarse pérdida de producción, pero además el incremento de humedad favorece el desarrollo de enfermedades criptogámicas (Mistriotis *et al.*, 1997) y puede originar deficiencias minerales debido a restricciones en la transpiración (Stanghellini y van Meurs, 1992; Holder y Cockshull, 1990).

En México, debido a las características de construcción y manejo de los sistemas de producción, se pueden encontrar casos en que las condiciones ambientales del invernadero no favorece al desarrollo de cultivos (Flores, 2005), principalmente en las épocas de alta insolación. Por ello, debe cuidarse el manejo de la ventilación natural para extraer el exceso de energía durante los días soleados de verano (Boulard *et al.*, 1999; Baille *et al.*, 2001). Debido al menor costo de instalación, operación y mantenimiento, la ventilación natural por efecto térmico o convectivo está más extendida que la ventilación mecánica o forzada. Aunque sus fundamentos han sido ampliamente analizados (Bruce, 1978; Bot, 1983; De Jong, 1990; Bailey, 1995), todavía no es posible predecir cuál va a ser la tasa de ventilación de un invernadero determinado, ni cuál será el movimiento de aire en su interior.

En este fenómeno de estudio interviene un buen número de factores entre los que pueden destacarse la característica fluctuante del viento, la resistencia que ofrecen 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. Las diferencias de presión causantes de la ventilación natural se deben a dos fuerzas principales (ASHRAE, 1993; De Jong, 1990; Bot, 1983; Oca, 1996):

- Fuerzas del viento originadas por la velocidad del viento exterior
- Fuerzas térmicas también denominadas gravitacionales ("flotabilidad") originadas por la diferencia de temperatura existente entre el interior y el exterior del invernadero

En la mayoría de los casos la influencia del efecto térmico es poca comparada con el efecto eólico. Para los tipos de invernaderos industriales (túneles y capillas de vidrio) diversos autores señalan el valor de velocidad del viento de 1.5 m s^{-1} como límite a partir del cual el efecto térmico prácticamente no tiene ninguna influencia (Papadakis *et al.*, 1996; Boulard *et al.*, 1996; Mistriotis *et al.*, 1997).

3.5.1 Ventilación natural o pasiva

La ventilación es denominada natural cuando solamente las fuerzas exteriores naturales (viento y diferencia de temperatura interior-exterior) actúan sobre el intercambio del aire entre el interior y el exterior. El flujo de aire a través de una ventana tiene como fuerza motriz la diferencia de presión que se establece entre sus dos lados. Esta diferencia de presión se origina en dos procesos diferentes (González y Baille, 2000):

1. Por la influencia del viento, que genera una distribución de la presión sobre la superficie del invernadero.
2. Por la influencia de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior, que genera diferencias de densidad y, por consiguiente, de presión.

En términos de ventilación, una ventana cenital resulta hasta ocho veces más efectiva que otra situada lateralmente de igual superficie (Montero, 2006).

La ventilación de los invernaderos también depende de la estructura del propio invernadero. Un mal diseño puede crear problemas de estratificación, de manera que el flujo del aire proveniente del exterior, que se mueve a través del dosel vegetal, se carga de humedad por la transpiración y gana energía mostrando una estratificación diferente al flujo de aire que está por encima del dosel vegetal. Otros aspectos a considerar en la ventilación de los invernaderos son la distancia

existente entre las ventanas laterales, las cenitales y la altura del cultivo, ya que la vegetación entutorada dificulta la renovación del aire en el interior formando una pantalla que limita el movimiento del aire.

3.5.2 Ventilación mecánica o forzada

Los primeros estudios sobre el uso de ventilación forzada en invernadero datan de 1950 y 1960, como los de Stickler (1967). En 1970 se hicieron más estudios sobre ventilación mecánica; destacan los trabajos de Morris (1971) y sobre todo los de Wolfe *et al.* (1972). Matallana y Montero (1989) concluyeron que el uso de los ventiladores permite un control más preciso de la temperatura del invernadero que el que puede lograrse con la ventilación pasiva. Kittas *et al.* (2001) demostraron que la ventilación forzada producía un campo vertical de temperatura y humedad del aire mucho más homogéneo que la ventilación natural. El uso de las ventanas cenitales ligeramente abiertas permite paliar la aparición de estos gradientes longitudinales de temperatura y humedad, especialmente en invernaderos de gran tamaño (Baeza *et al.*, 2006).

Para invernaderos de plástico, la regla práctica es usar un caudal máximo de ventiladores de 2.1 a 3 m³ por minuto por cada m² de superficie del invernadero (Boodley, 1998). En módulo consecutivo, lo deseable es no tener la salida de aire de un invernadero enfrentada con la entrada de otro. En invernaderos muy largos se aconseja colocar entradas de aire en ambos extremos del invernadero y los ventiladores en la parte media-alta del invernadero.

Cuando el cultivo se desarrolla mucho se produce un flujo horizontal de aire de los ventiladores, ya que la altura del cultivo provoca un movimiento irregular del aire y reduce la uniformidad de la velocidad. Esto puede provocar daños en los frutos y hojas de las plantas situadas cerca de los ventiladores (Fernández y Bailey, 1993). El uso de ventiladores permite un control más preciso de la temperatura del invernadero que el que puede lograrse con la ventilación pasiva. Debido a que la instalación de mallas antiinsectos hace que la ventilación natural sea insuficiente en la mayoría de los casos, están proliferando las instalaciones de ventilación forzada en la actualidad.

3.6 Problemática

Las investigaciones enfocadas al desarrollo de modelos climáticos reflejan el conocimiento científico de forma cuantitativa, y pueden usarse para diseñar herramientas de ingeniería para invernaderos. El desarrollo de modelos del clima permite predecir el comportamiento de los diferentes componentes que integran

el agrosistema invernadero y sus interacciones. Estos modelos permiten controlar mejor las condiciones de crecimiento dentro del invernadero, determinadas por factores como radiación, temperatura, humedad, concentración de CO₂ y velocidad del viento (Challa, 1990). Estos factores guardan una estrecha relación con las condiciones climáticas específicas de cada región y son afectados por la cubierta del invernadero.

Además, este tipo de herramientas se utiliza en el diseño de invernaderos así como en el análisis y diseño de nuevos algoritmos y métodos de control (Bakker *et al.*, 1995). Hay una gran necesidad de modelos de invernaderos, especialmente en países como México, donde este tipo de tecnología de producción es relativamente nueva. México está rezagado en la productividad por m² de invernadero, principalmente por la diferencia tecnológica y el conocimiento desarrollado en otros países en el área de ingeniería de invernaderos (diseño, equipamiento, etc.). Es necesario desarrollar métodos propios, conocimientos y habilidades técnicas en el área de invernaderos.

Armendáriz-Erives (2007) señala que los avances en la actividad agrícola han contribuido a la degradación del ambiente y que en los próximos 30 años las necesidades de alimentos se duplicarán. El desafío del hombre será satisfacer las demandas de una mayor población con menos tierra agrícola y menos agua. Sánchez-Salazar y Martínez-Galicia (2006) consideran que uno de los efectos del cambio climático será el ascenso de la temperatura. Esto se reflejará en el aumento de la evaporación y de la evapotranspiración, así como en la reducción de la precipitación y de los escurrimientos, lo que incidirá, a mediano plazo, en el incremento de la desertificación y en la redistribución del recurso hídrico. Las variaciones en la distribución del agua y la temperatura tendrán efectos diferenciados sobre el uso del suelo y la distribución de los seres vivos (cultivos, ganado o asociaciones vegetales naturales).

De acuerdo con la evaluación del Programa Integral de Agricultura Sostenible y Reconversión Productiva en Zonas de Siniestralidad Recurrente (PIASRE) en México los estados con mayor exposición al peligro por fenómenos climáticos, y por consiguiente susceptibles a sus efectos sobre la producción agropecuaria, incluyendo la agricultura protegida, se verán afectados por los siguientes factores.

3.6.1 Sequía

Con información de 2 434 estaciones meteorológicas, la estimación de los indicadores de déficit de humedad, índice de aridez e índice de amenaza de sequía, permite calcular el nivel de amenaza de sequía agrícola por estado. Los estados

con un nivel alto y muy alto son Baja California, Baja California Sur y Coahuila; los de grado medio son Chihuahua, Nuevo León, Sinaloa, Tamaulipas y Yucatán.

Además, considerando el balance hídrico del suelo, con la información de las estaciones y la metodología de Thornthwaite y Matter (1955), se obtuvo la representación espacial de las regiones, con cuando menos una humedad de suelo mayor a 30 % de su capacidad de campo (CC) y de manera continua en periodos de 60, 90 y 120 días. Lo anterior corresponde al requerimiento mínimo de agua para realizar actividades agropecuarias en temporal, que no son viables en Baja California, Baja California Sur y Coahuila ni en la mayor parte de Chihuahua, Sonora, Nuevo León y San Luis Potosí. Esto justificaría tomar acciones en materia de agricultura protegida.

3.6.2 Lluvias torrenciales

La ubicación de México dentro de una zona intertropical lo hace susceptible a los embates de huracanes. Gracias a los huracanes y a las obras hidráulicas disponibles se pueden captar 150 mil millones de m³ de agua (37 % de la media anual). La falta de infraestructura para captar mayores escurrimientos no permite aprovechar los beneficios de la precipitación, ni enfrentar periodos de lluvias mayores al promedio. Otro fenómeno que provoca precipitaciones de importancia, sobre todo en la región noroeste de la república mexicana, es el desplazamiento de frentes fríos provenientes de las zonas polares que forman las tormentas de invierno. Los estados más afectados son los de la península de Baja California, Sonora y Sinaloa, lo que limita las acciones dentro de la agricultura protegida.

3.6.3 Granizadas

Las granizadas se asocian a lluvias torrenciales y provocan daños a los cultivos debido a su ocurrencia en épocas atípicas de alta susceptibilidad para estos. De 1979 a 1988 Guanajuato fue el más afectado en términos de superficie agrícola y con mayor frecuencia del fenómeno. Chihuahua, con 51 % de la superficie dañada, presentó mayores daños económicos y una frecuencia más baja del fenómeno climático.

3.6.4 Heladas

La ocurrencia de heladas ha impactado en la agricultura de Chihuahua, Puebla, México y Tlaxcala. En estos estados hay más de 100 días al año con heladas que justifican el desarrollo de medidas de ejecución y prevención en la agricultura

protegida. De acuerdo con la cartografía de días con heladas, elaborada a partir de los registros diarios de temperatura mínima del Servicio Meteorológico Nacional, este tipo de eventos se presenta en más de la mitad del territorio nacional en los meses de enero a diciembre, y alrededor de un 35 % en febrero, marzo y noviembre; ocurren en menor proporción en octubre y abril, meses con mayor riesgo para la agricultura.

Los estados con mayor riesgo de pérdidas agrícolas por heladas tempranas (octubre) son Chihuahua, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, el sureste de Coahuila y el sur de Nuevo León, así como el Distrito Federal, Tlaxcala, México, Hidalgo y Puebla. Por otra parte, el mayor riesgo de pérdidas agrícolas por heladas tardías (abril) ocurre en parte de Zacatecas, Durango, Chihuahua, Baja California y Sonora. Por la mayor frecuencia de fenómenos climáticos los estados prioritarios para tomar acciones en materia de agricultura protegida son Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Sonora. El resto de estados, sobre todo los de heladas tempranas o tardías, justifican acciones por las pérdidas agrícolas que implican. Sin embargo, debe considerarse que los invernaderos en climas extremos pierden competitividad debido al costo de la energía para su operación eficiente.

3.6.5 Limitantes del suelo

Existen diferentes riesgos para México debido a la diversidad climática del país, por lo que no es posible establecer una estrategia estándar en la agricultura protegida. Es necesario consolidar acciones que partan de una estrategia de regionalización agroclimática que permita definir lineamientos para zonas templadas, regiones áridas extremas, para climas tropicales y subtropicales, en los cuales se incluyan el trópico húmedo y el seco.

Debido a la marcada sensibilidad de los cultivos frente a las variaciones ambientales donde se desarrollan, el control del clima del invernadero se puede considerar uno de los principales problemas que quedan por resolver para el mejor desarrollo de las plantas. Esto puede lograrse en gran medida mediante una correcta gestión del sistema de ventilación diseñado para tal fin. Tomando en cuenta los costos energéticos, económicos y ambientales, resulta ideal poder controlar el clima mediante un sistema de ventilación natural, basado en las dimensiones, formas y posición de la apertura de ventanas.

Los principales invernaderos mexicanos presentan características propias en cuanto a dimensiones y condiciones ambientales, por eso entender la dependencia del movimiento del aire al interior de invernadero en función de las dimensiones del invernadero, de la posición y combinación de las ventanas, y de las condiciones

ambientales exteriores (temperatura, velocidad del viento, radiación), son temas que interesan pues aportan información relacionada con los sistemas de ventilación y la manera de mejorarlos.

3.6.6 Comportamiento del clima dentro del invernadero

La rentabilidad de los cultivos depende de las buenas condiciones ambientales que permitan obtener cosechas abundantes. Los invernaderos proporcionan protección a las plantas contra las condiciones desfavorables del clima. En el invernadero la radiación solar, la temperatura, la humedad relativa y el CO₂ constituyen las variables que definen el microclima y forman un sistema de dependencias complejo (Castilla, 2007).

3.6.6.1 Radiación solar

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

En los países con clima cálido e inviernos benignos, el principal problema del uso del invernadero se presenta en el verano, cuando la insolación alta provoca elevaciones excesivas en la temperatura que afectan el desarrollo de los cultivos (Rico-García, 2008). La radiación solar influye en el desarrollo de las plantas porque es un factor imprescindible en el proceso de fotosíntesis; su medición se establece con el término de Radiación Fotosintética Activa (PAR). Periodos de elevada intensidad luminosa acompañada de altas temperaturas producen un activo crecimiento vegetativo (Fidaro *et al.*, 2010). Cuanto mayor sea la luminosidad dentro del invernadero, mayores deben ser las temperaturas y la cantidad de CO₂ para que la PAR sea máxima (Iglesias y Muñoz, 2007).

3.6.6.2 Temperatura y humedad relativa

La temperatura dentro del invernadero constituye la variable de mayor peso, ya que interviene de manera directa en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Aunque cada cultivo tiene un rango de temperatura óptimo para su desarrollo, suele estar entre 10 y 25 °C. Este rango se establece de acuerdo con los siguientes parámetros (Nisen *et al.*, 1988):

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

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

Al igual que la temperatura, la humedad relativa tiene un efecto en los cultivos. Si la humedad relativa es excesiva las plantas reducen su transpiración y disminuyen su crecimiento. Por otro lado, si la humedad relativa es demasiado baja provoca un exceso en la transpiración en las hojas de las plantas que conlleva a la deshidratación (Seginer, 2002). La humedad relativa es una medida del contenido de humedad del aire y es un indicador de la evaporación, transpiración y probabilidad de lluvias convectivas.

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

3.6.6.3 Dióxido de carbono (CO₂)

El CO₂ en la atmósfera constituye la materia prima para que se lleve a cabo el proceso de fotosíntesis en los vegetales. Su tasa de contenido normal en la atmósfera es de 300 ppm aunque tasas de entre 1 000 y 2 000 ppm en condiciones de invernadero tienen una influencia directa sobre la tasa fotosintética y sobre la producción y rendimiento de los cultivos. Concentraciones de 3 000 ppm resultan tóxicas para algunos cultivos (Casanova, 2008). El CO₂ es una variable

que se relaciona con la temperatura de manera inversamente proporcional, ya que hay mayor insolación, mayor temperatura y tasa fotosintética, lo cual origina un descenso en la concentración de CO₂ atmosférico.

**Herramientas numéricas para el
diseño agronómico de invernaderos**

4

Capítulo 4

HERRAMIENTAS NUMÉRICAS PARA EL DISEÑO AGRONÓMICO DE INVERNADEROS

4.1 Dinámica de fluidos computacional (CFD) para el diseño de invernaderos

El análisis computacional de la dinámica del fluido abre una posibilidad más en el análisis del ambiente, mismo que puede ser gestionado mediante el sistema de ventilación, relacionado con el movimiento del aire y sus repercusiones en el interior del invernadero. Muchas interrogantes sobre el manejo del sistema de ventilación para mantener suficiente circulación del aire y niveles aceptables de calor y transferencia de masa entre las plantas y el aire pueden ser resueltas usando esta herramienta (Ould *et al.*, 2006).

Con las metodologías tradicionales de balance de energía o gas trazador se dieron respuestas parciales al estudio del clima del invernadero. Por ejemplo, la estimación de la tasa de ventilación proporciona un valor global del intercambio de aire medio de todas las ventanas, pero no específica qué ventanas son las que tienen mayor importancia, ni cómo se genera el movimiento de aire en el invernadero.

Ha sido necesario investigar el ambiente del invernadero para abordar a detalle el diseño de cada uno de los elementos que están implicados en la formación del clima del invernadero, poniendo en relieve la dificultad que conlleva el análisis del movimiento del aire en el interior del invernadero. Esto es ahora posible gracias al empleo de métodos numéricos desarrollados para aplicaciones en el campo de la mecánica de fluidos (Computational Fluid Dynamics, o CFD en forma abreviada). Esta técnica basa su estudio en métodos y algoritmos numéricos para analizar y proponer soluciones a problemas relacionados al flujo de fluidos.

La simulación CFD también sirve para detectar los errores de diseño. Por ejemplo, se ha observado que el aire que entra por la primera ventana sale por la segunda sin llegar a mezclarse con el aire en la zona que ocuparían las plantas. Este problema puede resolverse o aminorarse si se aumenta la pendiente del techo, de modo que el chorro de aire entrante se dirija hacia la zona de cultivo. Según las simulaciones de Baeza recogidas en el trabajo de Brugger *et al.* (2005), la tasa de ventilación crece al aumentar la pendiente del invernadero. De la aplicación del CFD se desprende que el diseño de la primera nave es de especial importancia. Los trabajos de Short (2001) muestran el interés de mejorar la forma aerodinámica de la pared lateral del invernadero, de manera que el viento en lugar de impactar

contra esta pared, se adapte a la forma del invernadero y sea conducido hacia una ventana de entrada.

4.2 CFD (Modelos numéricos)

Las ecuaciones de Navier-Stokes son un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido. Estas ecuaciones gobiernan la atmósfera terrestre, las corrientes oceánicas y el flujo alrededor de vehículos o proyectiles y, en general, cualquier fenómeno donde intervienen fluidos.

Estas ecuaciones se obtienen aplicando los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen fluido. Haciendo esto se obtiene la llamada *formulación integral* de las ecuaciones. Para llegar a su formulación diferencial se manipulan aplicando diferentes teoremas matemáticos, llegando así a la llamada *formulación diferencial*, que generalmente es más útil para la resolución de los problemas que se plantean en la mecánica de fluidos.

Tres fundamentos físicos soportan las ecuaciones de Navier-Stokes: masa, momento y conservación de energía. Su deducción es típicamente explicada a través de un balance de masa y energía sobre un volumen de control. La **Ecuación 4.1** es una forma generalizada de expresarla (Anderson, 1995).

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S\phi \quad (4.1)$$

Los cuatro términos que componen esta ecuación son inestabilidad, convección, difusión y término fuente (o sumidero). La variable ϕ es una forma de variable dependiente que puede ser masa, velocidad, factor químico o temperatura, y describe las características del flujo en una localización puntual en un tiempo específico. En un espacio tridimensional sería $\phi = \phi(x, y, z, t)$ (**Figura 4.1**).

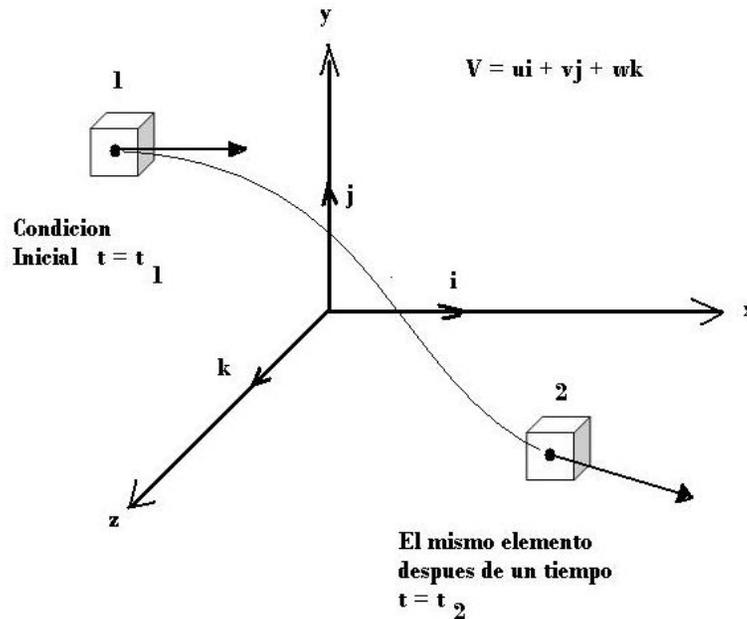


Figura 4.1 Discretización del fluido en 3 dimensiones (Anderson, 1995)

Las ecuaciones de Navier-Stokes pueden describirse en términos integrales pero solo la deducción diferencial permite una aplicación práctica por medio de ecuaciones en derivadas parciales no lineales, que para efectos de este análisis adoptan la siguiente forma:

Ecuación de continuidad

Para $\phi = 1$

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.2)$$

Ecuación de momento

Para $\phi = u_i$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (4.3)$$

Ecuación de energía

Si $\phi = h$ (entalpía)

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial P}{\partial T} + u_i \frac{\partial P}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (4.4)$$

donde u_i es el componente de la velocidad en la dirección $-i$ (m s^{-1}), x_i indica el flujo en la dirección $-i$, ρ es la densidad del fluido (kg m^{-3}), P es la presión (Pa), g_i es cualquier campo de aceleración. En este caso la aceleración de la gravedad en la dirección i (m s^{-2}), h representa la entalpía del fluido (J kg^{-1}), k es el coeficiente de conductividad del aire ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$), T es la temperatura absoluta del fluido (K), y μ es la viscosidad molecular del fluido ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$).

No se dispone de una solución general para este conjunto de ecuaciones, y salvo ciertos tipos de flujo y situaciones muy concretas, no es posible hallar una solución analítica, por lo que en muchas ocasiones se ha de recurrir al análisis numérico para determinar una solución.

4.3 Análisis de la ventilación mediante CFD

La eficacia de la ventilación puede relacionarse con la distribución espacial del aire frío dentro del invernadero que mantiene las condiciones climáticas particulares para los cultivos. Este es el motivo por el cual durante la última década entender la ventilación natural de los invernaderos ha sido un tema de investigación recurrente, pues se considera el principal método de control climático en climas cálidos.

Los primeros trabajos numéricos mediante la técnica del CFD para el análisis de la ventilación en invernaderos fueron conducidos por Okushima *et al.* (1989), quien pudo comparar los resultados de este método numérico con los resultados experimentales obtenidos en un túnel de viento por Sase *et al.* en 1984. Aunque encontraron poca correlación entre los resultados, aportaron información novedosa respecto a los patrones de flujo dentro del invernadero.

La técnica del CFD fue utilizada en el mediterráneo, donde se realizó un estudio de ventilación en un invernadero típico de la región con nuevos resultados (Boulard y Baille, 1995) que fueron comparados con los datos experimentales obtenidos en un invernadero mediante el uso de anemómetros sónicos en las ventanas. Los resultados fueron concordantes, por lo cual la expansión de esta técnica de análisis resulta confiable.

Mistrotis *et al.* (1997) usaron la dinámica de fluidos computacional para hacer las simulaciones en un invernadero tipo mediterráneo, con una estructura

mallada en dos dimensiones. Concluyó que esta metodología es una poderosa herramienta de análisis para evaluar la eficiencia del sistema de ventilación. Kacira *et al.* (1998) evaluó la ventilación en un invernadero multicapilla diente de sierra tomando en cuenta varias condiciones ambientales en el exterior. Otro método de estudio de la ventilación es mediante el balance de masa. Al-Helal (1998) condujo un modelo CFD para estudiar la ventilación en climas áridos y los comparó con el balance de masa, obteniendo concordancia en los resultados.

Muñoz *et al.*, (1999) estudiaron la ventilación del invernadero de techo arqueado y naves adosadas y analizaron el efecto de las mallas contra insectos en la tasa de ventilación. Otros autores como Bailey *et al.* (2003) y Pérez-Parra *et al.* (2004) analizaron el invernadero tipo parral así como el invernadero tipo parral multicapilla realizado por Baeza (2007), y consolidaron esta técnica en el análisis de la ventilación en invernaderos.

La evolución en el uso de los métodos numéricos ha ido diversificando las líneas de investigación y ampliando las posibilidades. Inicialmente fue un método de validación cuantitativa y cualitativa entre el CFD y los resultados experimentales en el fenómeno de ventilación natural, pero después se hicieron trabajos que analizaban el efecto de las velocidades y direcciones del viento exterior, apertura de ventanas y sus combinaciones, sobre las tasas de ventilación (Kacira *et al.*, 1998; Lee y Short, 1999; Campen y Bot, 2003).

También se ha investigado el uso de los módulos en el Fluent® que permiten simular medios porosos dentro del invernadero. Estos medios son necesarios tanto en el uso de mallas antiinsectos como en las ventanas (Fatnassi *et al.* (2003, 2006); Valera *et al.* (2004) como una primera aproximación de la existencia del cultivo. Estudios que no consideran las relaciones energéticas y los intercambios entre el cultivo y el ambiente del invernadero son los de Lee y Short (2000) y el de Hexaire *et al.* (2000), pero también hay trabajos en los que sí se analizan, como los de Boular y Wang (2002), Roy y Boular (2005), Molinza-Aiz (2006) y más recientemente Kacira, quien revalida los datos obtenidos por Hexaire (1999) y que marcan un continuo avance en el proceso de investigación de la ventilación en invernaderos mediante el CFD.

El uso de los modelos aplicados a la agricultura ha motivado que diversas áreas estén desarrollando nuevas y mejores técnicas de análisis. El usuario ahora puede ampliar los módulos del programa para incursionar en nuevos temas, como aspectos fitosanitarios, mediante el estudio del grado de afectación de los cultivos por efecto de esporas y agentes bióticos que sin duda están siendo arrastrados por el viento (Roy *et al.*, 2006) o el análisis del impacto ambiental de los pesticidas (Kittas *et al.*, 2006) que han sido aplicados en el invernadero, pero que se dispersan libremente por efecto del viento.

4.4 Herramienta de análisis en invernaderos

La dinámica de fluidos computacional ha sido extensamente utilizada en estudios de flujo de aire en instalaciones cerradas, tales como granjas pecuarias e invernaderos (Sven y Davies, 2002; Norton *et al.*, 2007; Short, 1996; Lee y Short, 2000; Sun *et al.*, 2002). La modelación numérica permite un seguimiento cuantitativo más exacto de las variables climáticas (velocidad, presión, temperatura, etc.) en el interior del invernadero bajo diferentes condiciones ambientales virtuales de ventilación. Con este seguimiento pueden reducirse los inconvenientes de tiempo, espacio y costos que implican la experimentación de los fenómenos físicos (Norton *et al.*, 2007).

El análisis mediante la dinámica de fluidos computacional se ha constituido como una herramienta en ingeniería que permite simular detalladamente un sistema en el que haya flujos, transferencia de calor y materia, con base en la resolución numérica de las ecuaciones fundamentales de conservación de materia, energía y cantidad de movimiento en un dominio discretizado convertido en una malla de puntos (2 o 3 dimensiones) de una geometría total. Estas ecuaciones se aplican a cada uno de estos volúmenes finitos y se obtienen los valores de las variables características del sistema (presión, temperatura, turbulencia, etc.) respecto del tiempo, para luego extrapolar los resultados mediante la integración al volumen total.

En general, el proceso de cálculo identifica tres etapas: definición del problema (preproceso), solución numérica del problema y análisis de los resultados (postproceso). Aunque la etapa uno y dos pueden interaccionar para un diseño más fino de la representación gráfica del sistema por analizar.

4.5 Metodología

Durante el proceso previo se define la geometría (límites físicos) del problema. El volumen ocupado por el líquido se divide en las células discretas (el acoplamiento). El acoplamiento puede ser uniforme o no uniforme. Se define cómo se modelará la comprobación, por ejemplo, las ecuaciones de movimiento + las de entalpía + las de conservación de la especie, y se definen las condiciones de límite. Esto implica especificar el comportamiento de las características del fluido en los límites del problema. También se definen las condiciones iniciales para los problemas transitorios, se comienza la simulación y las ecuaciones se solucionan de manera iterativa, como de estado estacionario o transitorio. Finalmente se usa un postprocesador para el análisis y la visualización de la solución.

La estabilidad de la discretización elegida se establece generalmente de manera numérica más que analíticamente, como con problemas lineares simples. Se debe cuidar que la discretización maneje soluciones discontinuas. Las ecuaciones de Euler y Navier-Stokes alimentan ecuaciones que admiten choques y superficies de contacto.

Inicialmente, el CFD requiere que se defina el dominio o zona de 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, que es el acercamiento clásico o estándar usado en códigos comerciales de software y de investigación. Las ecuaciones que gobiernan se solucionan en volúmenes discretos del control. Este acercamiento integral es un método intrínsecamente conservador, es decir, las cantidades tales como densidad siguen siendo físicamente significativas.

4.6 Preproceso

El preproceso del CFD posee las características matemáticas suficientes para modelar adecuadamente, y que es la fase más importante del proceso de construcción del modelo. El principal reto que enfrenta el modelador en el preproceso incluye la creación e importación de la geometría, el desarrollo de la malla, las propiedades físicas del caso y la implementación de técnicas de solución y los parámetros involucrados (Norton *et al.*, 2007).

Para la simulación es necesario considerar los fenómenos físicos, químicos y metodológicos con el fin de obtener los mejores resultados del proceso en el menor tiempo posible. En esta etapa el usuario debe plantearse la conveniencia de modelar en dos o tres dimensiones, incluir o no los efectos de temperatura y efectos de inercia del flujo del aire, el mejor modelo de turbulencia que se ajuste al proceso que se quiere simular, etc.

Si no se cuenta con los elementos de análisis (aspectos físicos del problema y aspectos matemáticos de los algoritmos) se pueden seleccionar de manera aleatoria o probabilística, pero esto generaría errores que pueden derivar en una

representación no ideal del problema y más aún, en la dificultad en la interpretación de los resultados al no contar con elementos de juicio para decidir si los resultados corresponden a una buena solución del fenómeno simulado.

4.6.1 Discretización del invernadero a simular y mallado del mismo

Este es el primer paso en la construcción y análisis de un modelo de flujo. Incluye la construcción del modelo dentro de un diseño asistido por computadora (CAD) de paquetes, la creación y aplicación de un adecuado cómputo de malla, y su entrada en la frontera de flujo de fluidos y de las condiciones materiales de propiedades.

Las posibilidades se centran en herramientas de reprocesamiento como GAMBIT, TGrid y G/Turbo de serie. Las Geometrías CAD son fácilmente importados y adaptados para CFD soluciones en GAMBIT permiten un rápido acoplamiento a Fluent®. GAMBIT ofrece sólidas opciones de modelado que permiten crear geometrías de sencilla construcción, así como la geometría de traducción de alta calidad.

Una amplia gama de herramientas de la geometría incluye operadores booleanos que proporcionan una manera sencilla de obtener geometría CAD de un sólido en un dominio fluido. El estado de la técnica y conjunto de herramientas de limpieza y acondicionamiento prepara el modelo para mezclar el funcionamiento de un fluido tanto en el exterior como en el interior de un sólido. Otra ventaja del preprocesador GAMBIT es construir y calcular en una curvatura la proximidad basada en tamaño función que produce una simulación correcta y fluida en CFD dependiendo del tipo de malla en todo el modelo, junto con la necesidad de colocar una capa límite. Variaciones paramétricas son también inherentes al proceso.

4.6.2 Definición de las condiciones de frontera

El CFD es una herramienta matemática que permite agilizar el proceso de cálculo, pero también es cierto que un aspecto importante de esta metodología es el conocimiento del proceso que se está simulando, es decir, concebir el dominio computacional y estar en posibilidad de contestar interrogantes tales como ¿cuáles son las variables que intervienen en el proceso?, ¿dónde están ocurriendo los principales intercambios?, ¿de qué magnitud son? ¿Cómo afecta esto el comportamiento del modelo?

La discretización del modelo implica además caracterizar diferentes elementos. Así, las características de frontera que encierran el modelo y los valores

de arranque o su inicialización dependerán de lo que se pretende evaluar. Es necesario conocer sus dimensiones para hacer la simulación lo más apegada a un hecho real.

4.6.3 Análisis de los aspectos físicos del problema

Dentro de los parámetros para desarrollar simulaciones en Fluent®, un aspecto importante consiste en desarrollar modelos físicos y numéricos con el objeto de entender y predecir el comportamiento de flujos de fluidos en general y flujos turbulentos en particular. La simulación del flujo fluido usando técnicas de Dinámica de Fluido Computacional (CFD) es una buena alternativa para su exploración siempre y cuando el conocimiento del fenómeno permita seleccionar los parámetros de cálculo adecuados. Con la potencia de cálculo disponible hoy en día, es posible simular flujos con altos números de Reynolds y en geometría compleja.

Dentro de los procesos de flujo existe gran similitud matemática entre los flujos laminar y turbulento, sin embargo obtener una solución a las ecuaciones de flujo en régimen turbulento aun esta fuera del alcance del análisis matemático y cálculo numérico actual. Se recurre a un estudio estadístico de turbulencia mediante el cual se trabaja con propiedades promedio. Una posibilidad de promediar los valores de flujos es considerar que en un punto del campo de las variables vienen dadas como una suma de un valor promedio y una fluctuación turbulenta. La presión y la velocidad pueden representarse como lo muestra la

Ecuación 4.5:

$$p(x,t) = \bar{p}(x,t) + p'(x,t) \quad \text{y} \quad (4.5)$$

$$v(x,t) = \bar{v}(x,t) + v'(x,t)$$

El valor promedio temporal de una variable se obtiene de la forma: $\bar{p}(x,t) = \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} p(x,t) dt$, por lo tanto la **Ecuación 4.5** puede representarse como la **Ecuación 4.6:**

$$\bar{p}(x,t) = \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} p(x,t) dt, \quad (4.6)$$

y

$$\bar{v}(x,t) = \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} v(x,t) dt$$

Aplicando las ecuaciones de Navier-Stokes y haciendo sus respectivas deducciones, para el flujo de un fluido newtoniano e incompresible adoptan la forma:

$$\nabla \cdot \bar{v} = 0 \quad \text{y} \quad \rho \frac{D\bar{v}}{Dt} = -\nabla \cdot \bar{p} + \nabla \cdot (2\mu \bar{D}\bar{T}_T) + f_v \quad (4.7)$$

Las incógnitas de estas ecuaciones son el campo de velocidades $v(x,t)$ y de presión $P(x,t)$ en el tiempo t . La ecuación de continuidad difiere al substituir el campo de velocidades por el campo de velocidades promedio, pero también presenta un nuevo término, denominado tensiones turbulentas de Reynolds (Re). Estas tensiones cuantifican la influencia de la fluctuación turbulenta en el campo del flujo promedio.

Para poder resolver las ecuaciones de (Navier-Stokes) promediadas es necesario conocer cómo se relacionan estas tensiones turbulentas con las variables de flujo. La relación matemática entre \bar{T}_T , \bar{v} y \bar{p} se conoce como modelo de turbulencia. La resolución de las ecuaciones de Navier Stokes bajo estas características puede analizarse mediante los siguientes modelos (**Figura 4.2**):

- DNS (Direct Numerical Simulation). Sin aproximaciones, similar a realizar un experimento real. Aplicable mayoritariamente a geometrías simples, bajas velocidades (con número Re pequeños) y sistemas básicos de complejidad.
- LES (Large Eddy Simulation). Puede simular correctamente las propiedades medias de los flujos turbulentos separados, de los flujos lejos de paredes, y en general de todos aquellos en los que la generación de energía cerca de la pared no es un efecto dominante. Esto ha dado paso a su utilización en casos complejos. Desgraciadamente, estas simulaciones realistas, ya sean directas o LES, necesitan grandes medios de cálculo. También se ha aplicado a geometrías con un grado de complejidad pequeño y $Re < 2\,000$.
- RANS (Reynolds average Navier Stokes). Aplicable a simulaciones en geometrías complejas con Re mayores, con la ventaja de considerar el aspecto térmico y presentar el modelo de radiación. Usado principalmente en modelos estacionarios y una amplia aplicación en el campo de la ingeniería.

Hoy en día los experimentos de referencia en turbulencia homogénea son numéricos y la mayor parte de lo que se sabe sobre la física de los flujos de pared es también consecuencia de experimentos de este tipo. La simulación de grandes escalas (LES) es un método intermedio entre la simulación directa y el RANS, en el que una parte de la física del flujo se simula y otra se modela.

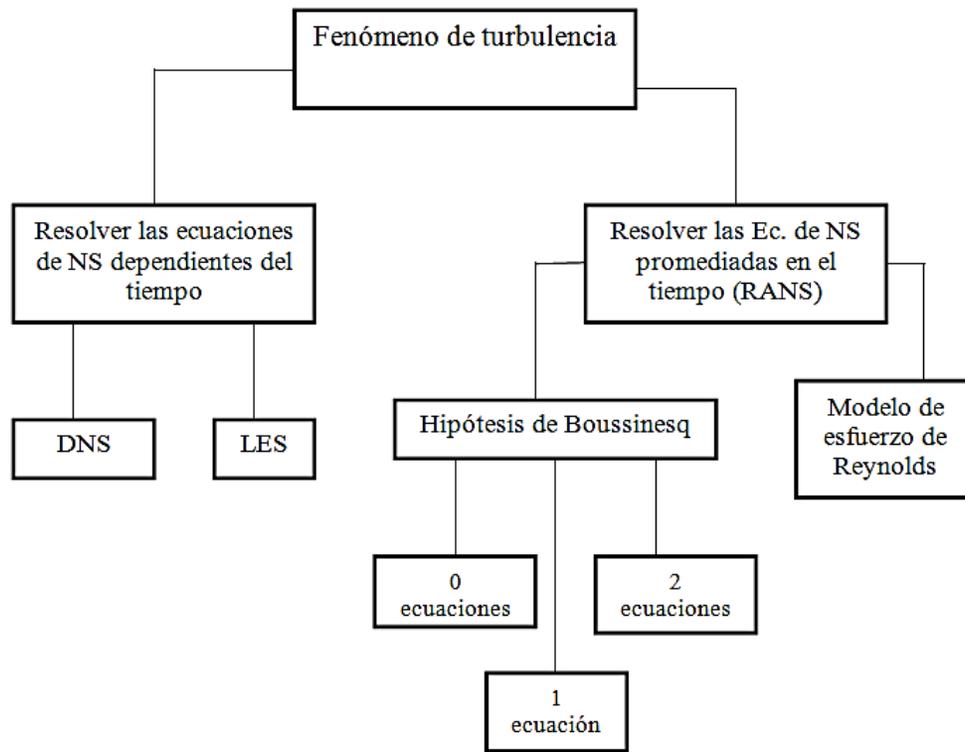


Figura 4.2 Opciones para seleccionar el modelo de turbulencia

4.7 Simulación de cultivo y mallas en Fluent®

Las ecuaciones de Navier-Stokes constituyen la ley fundamental que describe la dinámica de los fluidos viscosos más comunes; es una ecuación vectorial construida aplicando las leyes de Newton para determinar el movimiento de un fluido (ecuación de momento), conservación de la masa (continuidad) y de energía. Cuando se trata con fluidos incompresibles, estas variables permiten describir su movimiento a partir de ciertas condiciones iniciales y de contorno preestablecidas.

La descripción matemática de un fluido incompresible bajo estas circunstancias es posible mediante el campo de velocidades $u(x,t) = (u_1(x,t), u_2(x,t), u_3(x,t))$ que proporciona la velocidad que tendría una partícula en cada punto $x = (x_1, x_2, x_3)$ del espacio tridimensional en el tiempo t , y la presión $p = p(x,t)$ en el seno del fluido.

No obstante, esta ecuación no es literalmente aplicable si lo que se quiere describir es la dinámica de un fluido que circula a través de un medio poroso, constituido por una matriz porosa de compleja geometría y espesor milimétrico (diámetro del hilo). La irregularidad en el tamaño y forma de los poros de esa matriz porosa, es uno de los principales impedimentos para un confiable análisis, ya que las leyes clásicas de la mecánica de fluidos no son aplicables, al menos no directamente. Esta membrana porosa, al reducir el área de flujo, ofrece mayor resistencia al paso del fluido, ocasionada por una mayor área de fricción y rozamiento y por lo tanto se presentan caídas de presión considerables dependiendo de la cantidad y tamaño de poros, lo que ocasiona velocidades de flujo muy bajas.

Los cultivos en invernadero en climas tropicales y semitropicales son afectados por los excesos de calor que se generan en largos periodos del año para lo cual ha sido necesario diseñar sistemas de ventilación, entre los que destacan los sistemas de sombreado, los transpirativos, y los sistemas mecánicos y naturales de ventilación; con excepción de la ventilación natural, el resto de las metodologías considera una inversión adicional en los costos producción, lo que deja al sistema de ventilación natural como primera opción como método de control climático; por esto se pretende que el sistema sea eficiente.

Si el objetivo es aislar el invernadero de las condiciones exteriores para no depender de ellas, lo ideal sería que estuviera totalmente cerrado, pero la necesidad de ventilar no permite esta condición. Una de las opciones que se ha extendido es usar mallas protectoras que impidan el libre paso de agentes indeseables al cultivo (principalmente insectos), con lo cual se ha resuelto parte del problema. Sin embargo se plantea así una nueva problemática en el análisis de la ventilación en invernadero que es hallar una metodología confiable que permita describir las interacciones que se están llevando en la interfase matriz porosa-fluido.

Las características de flujo en un material permeable pueden ser descritas en términos de permeabilidad y porosidad (Miguel *et al.*, 1997). Si se considera un volumen específico, la porosidad está representada por el espacio por el cual fluye el fluido en relación con el espacio total contenido en ese volumen, en un conducto cerrado la porosidad es 0 y cuando no existen restricciones, la porosidad será de 1. En cuanto a la permeabilidad se refiere a la habilidad que cada material tiene de

permitir el flujo a través de sí misma, análogamente cuando un conducto está totalmente abierto la permeabilidad tiende a infinito.

Uno de los primeros trabajos que han conducido a modelar el flujo es el de Hsu y Cheng (1990) y posteriormente retomado por Miguel *et al.* (1997), quienes mencionan como punto de partida que para el análisis de transferencia de masa a través de un material permeable en una dimensión se puede usar la **Ecuación 4.8**:

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\rho}{\varepsilon^2} u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\mu}{K} u - \rho \frac{Y}{\sqrt{K}} u |u| + \frac{\mu}{\varepsilon} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4.8)$$

con $u = \varepsilon u_i$, donde u es la velocidad superficial del fluido (m s^{-1}), u_i es la velocidad a través del material (m s^{-1}), ε es la porosidad ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), ρ es la densidad del fluido (kg m^{-3}), P es la presión (Pa), μ es la viscosidad dinámica ($\text{Kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), Y es el factor de inercia (adimensional), x es la dirección del flujo (m) y K es la permeabilidad del medio (m^2).

Esta es una ecuación general y de manera explícita indica cómo está relacionada la velocidad del fluido con el gradiente de presión por la fuerza a la resistencia viscosa $\frac{\rho}{\varepsilon^2} u \frac{\partial u}{\partial x}$. El efecto de inercia debido al poro $\rho \frac{Y}{\sqrt{K}} u |u|$ que representan el flujo de alta presión inercial perdida, la fuerza de resistencia viscosa debido a la transferencia de momento en la interfase matriz - fluido $\frac{\mu}{K} u$ y la resistencia por viscosidad del flujo del fluido $\frac{\mu}{\varepsilon} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ (Miguel *et al.*, 1997).

La ecuación de movimiento de un fluido a través de una malla porosa puede derivarse de la ecuación 4.8, suponiendo ciertas condiciones; por ejemplo, que el flujo es muy grande, similar a un conducto abierto por donde el fluido puede pasar libremente, de acuerdo a la teoría cinética de los gases (Lebon y Clot, 1986), $K \rightarrow \alpha$ y por lo tanto la ecuación se reduce y se convierte en la original ecuación de Navier-Stokes. Por otro lado, para un flujo estable y no viscoso, mediante la integración a lo largo de un conducto, adopta la forma de la ecuación de energía propuesta por Bernoulli.

De esta manera, considerando las fuerzas de flujo a través de un material poroso, donde los números de Reynolds fluctúan entre 100 y 150 (Miguel *et al.*, 1997) se considera que el flujo es incompresible y por lo tanto:

$$0 = \frac{\partial u}{\partial x}$$

Siguiendo a Lebon y Clot (1986) si el volumen de la matriz sólida es más grande que el volumen ocupado por el fluido puede ocurrir que:

$$0 = \frac{\mu}{\varepsilon} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

Entonces el cuarto término de la derecha de la ecuación general puede ser descartado y en consecuencia, cuando el flujo es estacionario, dicha ecuación se convierte en:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu}{K} u + \rho \frac{C_F}{\sqrt{K}} u |u| \quad (4.9)$$

donde μ es la viscosidad dinámica del fluido [$\text{Kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$], K es la permeabilidad intrínseca del medio (m^2), C_F es el coeficiente adimensional, llamado también factor inercial (Y) o coeficiente de pérdida de carga no lineal, ρ es la densidad del aire [$\text{K}_{\text{masa}} \text{M}^{-3}$], u es la velocidad del aire [M s^{-1}], y ∂x puede ser considerado el espesor (e_s) del material poroso [m].

La **Ecuación 4.9**, conocida como ecuación de Forchheimer, es el modelo utilizado cuando existe flujo en materiales altamente porosos. Nótese que cuando existen velocidades muy pequeñas de flujo ($\text{Re} < 1$) el término cuadrático en la velocidad puede ser descartado y se observa la ley de Darcy (**Ecuación 4.10**) usada en infiltración del agua en el suelo, y describe la permeabilidad de un material poroso.

$$\frac{\partial p}{\partial x} \frac{K}{\mu} = u \quad (4.10)$$

Por otro lado cuando las velocidades corresponden a flujo estacionario, es decir $\text{Re} > 2100$, sucede que puede desprejarse la viscosidad dinámica, y se reduce a la ecuación de Bernoulli (**Ecuación 4.11**):

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{2} \rho \frac{Y}{\sqrt{K}} u^2 \quad (4.11)$$

La **Ecuación 4.9** permite el análisis de la ventilación en invernaderos cuando son colocadas mallas anti-insectos (medios porosos) en la interfase entre el exterior y el interior del invernadero, lo que provoca una alteración en el flujo, con la consecuente caída de presión que ocasiona una disminución considerable en las

velocidades del aire que penetra al invernadero y la dificultad para remover el aire caliente que por diversos factores se ha generado.

Tomando en cuenta las características del fluido y de la membrana porosa, es posible bajo ciertas asunciones para su aplicación, una adaptación matemática más concreta de las ecuaciones, que permita mayor precisión del proceso que se pretenda modelar. En este sentido Fluent® para la caracterización del flujo en una malla anti-insectos, supone un medio poroso y por lo tanto los principios expuestos gobiernan el movimiento del aire por la malla.

La condición *Porous Jump* permite modelar una delgada membrana permeable con características conocidas de velocidad y caída de presión. El modelo planteado para este evento por Fluent® está definida por una combinación de la ley de Darcy y un término adicional por reducción de inercia.

Los valores de entrada que utiliza Fluent® para describir este movimiento están descritos en la **Ecuación 4.12** que es similar a la ecuación de Forchheimer descrita en la **Ecuación 4.9**.

$$\Delta p = -\left(\frac{\mu}{\alpha} V + C_2 \frac{1}{2} \rho V^2\right) \Delta m \quad (4.12)$$

Experimentalmente es posible medir el flujo de aire a diferentes velocidades (v) y reportando los gradientes de presión [Grad. (p)]. Mediante la técnica de regresión las ecuaciones 4.12 y 4.9 normalizadas pueden ser transformadas como sigue:

$$\Delta p = A V^2 + B V \quad (4.13)$$

Los términos A y B de la **Ecuación 4.13** son los coeficientes de la regresión. En un material permeable (malla) con un espesor que debe ser manejado en metros, los coeficientes pueden calcularse en función de la **Ecuación 4.13** como:

$$A = \frac{Y}{\sqrt{K}} \rho e_s \quad \text{y} \quad B = e_s \frac{\mu}{K}$$

Combinando las ecuaciones **4.12** y **4.13** se puede calcular la permeabilidad (α [m²]) mediante la **Ecuación 4.14** con la determinación previa del parámetro Y con la **Ecuación 4.15**:

$$\alpha = e_s \frac{\mu}{B} = K \quad (4.14)$$

$$Y = \frac{A\sqrt{K}}{\rho e_s} \quad (4.15)$$

Finalmente, el coeficiente de pérdida inercial (C_2 [m^{-1}]) para simular la resistencia del cultivo puede calcularse con la **Ecuación 4.16**:

$$C_2 = \frac{2Y}{\sqrt{K}} \quad (4.16)$$

4.8 Proceso

En la parte física, el proceso de cálculo en los códigos CFD está estructurado mediante algoritmos numéricos que permiten abordar los problemas en la simulación del movimiento del fluido cuyo comportamiento se desea conocer. En cuanto a la parte numérica, y con el objetivo de brindar un manejo más accesible desde el ordenador, la mayoría de los paquetes comerciales de CFD presentan una interfaz que permite interactuar con el usuario y mediante la cual se manipulan los procesos.

El CFD permite simular el comportamiento de un fluido mediante la resolución de las ecuaciones de balance de masa, cantidad de momento y energía, sin embargo, debido a la complejidad de parámetros involucrados en la solución de estas ecuaciones deben usarse métodos numéricos. El proceso es la parte matemática en la cual se establecen las condiciones de contorno y de entrada y los criterios de convergencia y los parámetros que han de permitir una similitud adecuada con lo que será el proceso físico.

Existen tres métodos para el análisis numérico: elementos finitos, diferencias finitas y volúmenes finitos. Este último es el utilizado por el simulador para obtener una solución en el proceso por analizar. Las bases del proceso de cálculo pueden resumirse de la siguiente manera (Baeza, 2007):

- Aproximaciones de las variables de flujo desconocidas mediante funciones simples
- Discretización mediante la sustitución de las aproximaciones en las ecuaciones que gobiernan el flujo y subsecuentes manipulaciones matemáticas
- Solución de las ecuaciones algebraicas

El método de los volúmenes finitos fue desarrollado a partir del método de diferencias finitas. Se usa en la resolución de problemas de la dinámica de fluidos computacional, cuyos algoritmos numéricos están estructurados de manera que parte de la integración convencional de las ecuaciones que gobiernan el flujo, Navier-Stokes en este caso, se apliquen a lo largo de todos los volúmenes de control generados en el dominio computacional.

La discretización implica sustituir diversas aproximaciones de tipo diferencias finitas (Baeza, 2007) por los términos de la ecuación integrada que representan procesos de flujo como la convección, la difusión y el término fuente. Lo anterior hace que las ecuaciones integrales generadas en un sistema de ecuaciones algebraicas sean más fáciles de manejar y de solucionar. Se aplica un método iterativo y con base en los parámetros establecidos se llega a la solución de estas ecuaciones.

4.9 Posproceso

De manera similar al preproceso, en el que se requiere conocer físicamente el fenómeno por simular en el proceso de construcción del modelo matemático, la parte del postproceso insiste en esta característica. También se exige al usuario una mayor capacidad de análisis en el momento de revisar las salidas, no solo para interpretar los datos, sino para inferir un proceso de cálculo adecuado y por lo tanto llegar a una solución confiable.

Cabe destacar que, al igual que el mallado y la construcción gráfica del modelo, en el campo de las salidas también se han concretado grandes avances en la presentación de resultados, de tal suerte que en la actualidad si el equipo de cómputo está equipado, es posible obtener imágenes que muestren los flujos realmente importantes. Estas imágenes también pueden ser exportadas, impresas, y manipuladas para mostrar superficies de control en aquellas zonas donde el usuario tenga mayor interés desde vectores que simulan direcciones en dos y tres dimensiones.

Otro aspecto importante es la manipulación de los datos numéricos. Desde el mismo modelador los datos pueden ser manipulados para obtener gráficos. Los datos también se pueden exportar a diversos formatos (ASCII, ABACUS, ANSYS, etc.), lo que constituye un importante paso en el proceso de manejo y tratamiento de los datos, pues es posible reorganizarlos de manera que se puedan observar los movimientos en las principales zonas de interés con mayor detalle, además de la presentación de gráficos que faciliten lo que se pretenda explicar. Así mismo, actualmente es posible obtener animaciones que muestran la dinámica del flujo, ya

Consideraciones ambientales para el diseño agronómico de invernaderos	4. Herramientas numéricas para el diseño agronómico de invernaderos
---	---

sea en dos o tres dimensiones, lo que facilita imaginar lo que está ocurriendo en el interior del invernadero. Solo resta tener presente bajo qué condiciones físicas fue conducida la simulación.

**Simulación para el diseño
agronómico de invernaderos**

5

Capítulo 5

SIMULACIÓN PARA EL DISEÑO AGRONÓMICO DE INVERNADEROS

5.1 Introducción

Se presenta un análisis numérico del ambiente de los principales modelos de invernaderos establecidos en México mediante la técnica del CFD (dinámica de fluidos computacional). El objetivo es mostrar las condiciones térmicas como factor crítico en la producción de cultivos. Los casos simulados fueron cinco:

- Invernadero cenital de tres naves con ventilación natural
- Invernadero cenital de diez naves (baticenital)
- 110 x 90 m (ancho x largo) cubierta plástica con ventilación cenital
- Invernadero multimodular (clúster)
- Invernadero de 20 naves con obstáculo

5.2 Invernadero cenital de tres naves con ventilación natural (cenital y lateral)

El invernadero tipo cenital se adopta para el cultivo de la mayoría de las especies hortícolas y sus dimensiones oscilan entre los 1 000 y 2 500 m². La **Figura 5.1** muestra un ejemplo de esta estructura; es un modelo computacional construido para simular el ambiente del invernadero y con ello aportar información para su diseño atendiendo los requerimientos de los cultivos.

5.2.1 Descripción del ambiente del invernadero

La **Figura 5.2** muestra el perfil transversal de la velocidad del viento dentro del invernadero respecto a la temperatura. A medida que la velocidad del viento se incrementa sobre el perfil, la temperatura disminuye, mientras que al disminuir la velocidad del viento, la temperatura aumenta. El comportamiento inverso proporcional describe la relación que existe entre estos dos factores dentro del invernadero. El perfil que se muestra corresponde al perfil trasversal al centro del invernadero, ubicados a una altura de 2.5 m sobre el suelo. Este perfil muestra que la temperatura es uniforme con un salto térmico de 1 K.

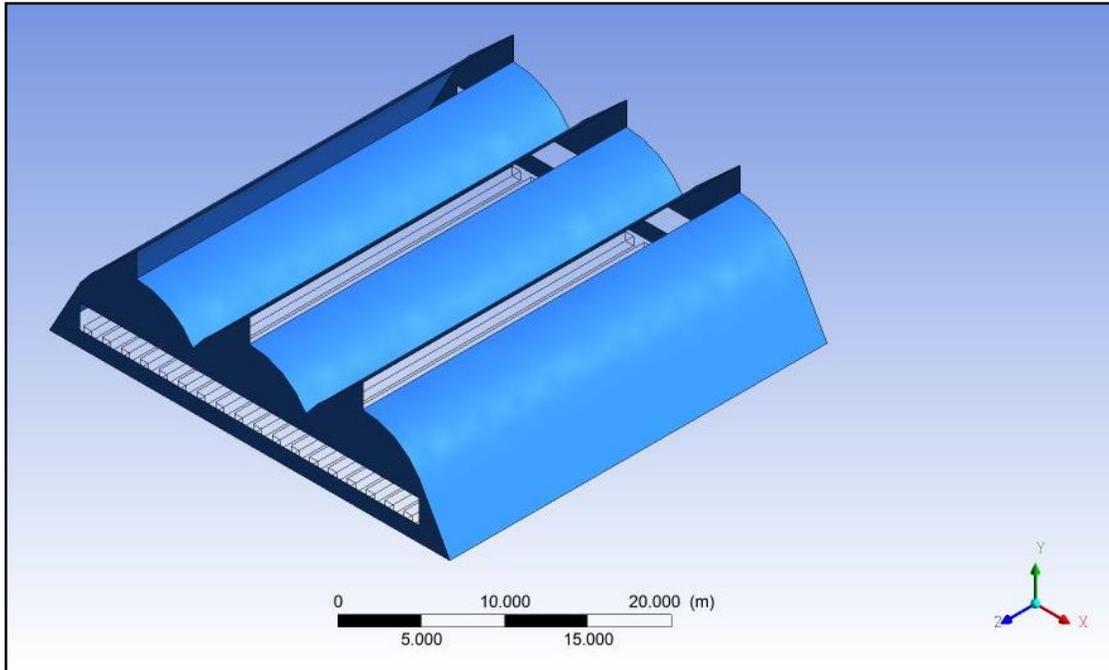


Figura 5.1 Prototipo del invernadero cenital modelado

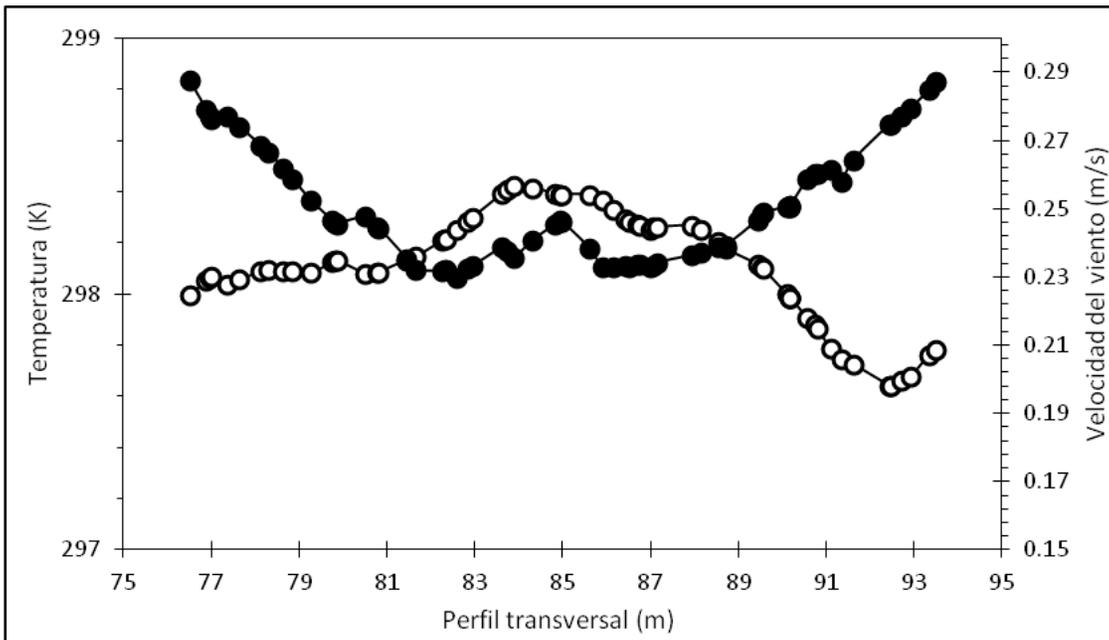


Figura 5.2 Relación temperatura (○) contra velocidad del viento (●) en datos simulados. Perfil transversal a 2.5 m, ventilación natural (ventanas cenitales abiertas)

Para el perfil longitudinal el comportamiento es representativo del invernadero en general. A medida que el aire fresco entra y se dirige a la salida del invernadero, la temperatura asciende linealmente con la longitud. Esto obedece a la dificultad que encuentra el aire para fluir entre el cultivo. A medida que la velocidad del viento crece, la temperatura disminuye (**Figura 5.3**).

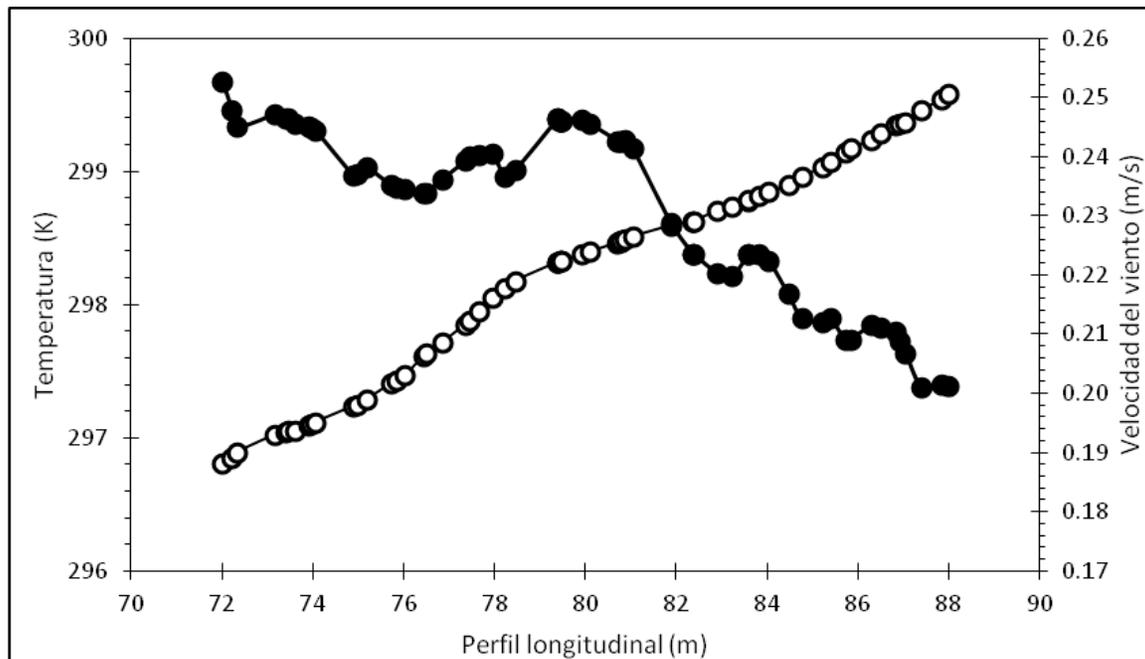


Figura 5.3 Relación temperatura (○) contra velocidad del viento (●) en datos simulados. Perfil longitudinal. A 2.5 m. Ventilación natural (ventanas cenitales abiertas)

Los flujos de aire dentro del invernadero generan variaciones de temperatura (K) en relación con la temperatura exterior (gradiente) sobre un plano a 2.5 m sobre el suelo (**Figura 5.4**). Se pueden observar las zonas en el interior del invernadero de menor temperatura, especialmente en la zona cercana a la pared plástica y la ventana lateral donde el viento proveniente de sotavento, entra al interior del invernadero y disminuye la temperatura. Sin embargo, a partir de la ventana, pasando los 8 metros, las temperaturas comienzan a ser más altas y se incrementan considerablemente en la región cercana a la ventana lateral de salida. La baja tasa de renovación de aire en esta región provoca que el gradiente de temperatura se incremente y en consecuencia se observan mayores temperaturas en esta área del invernadero.

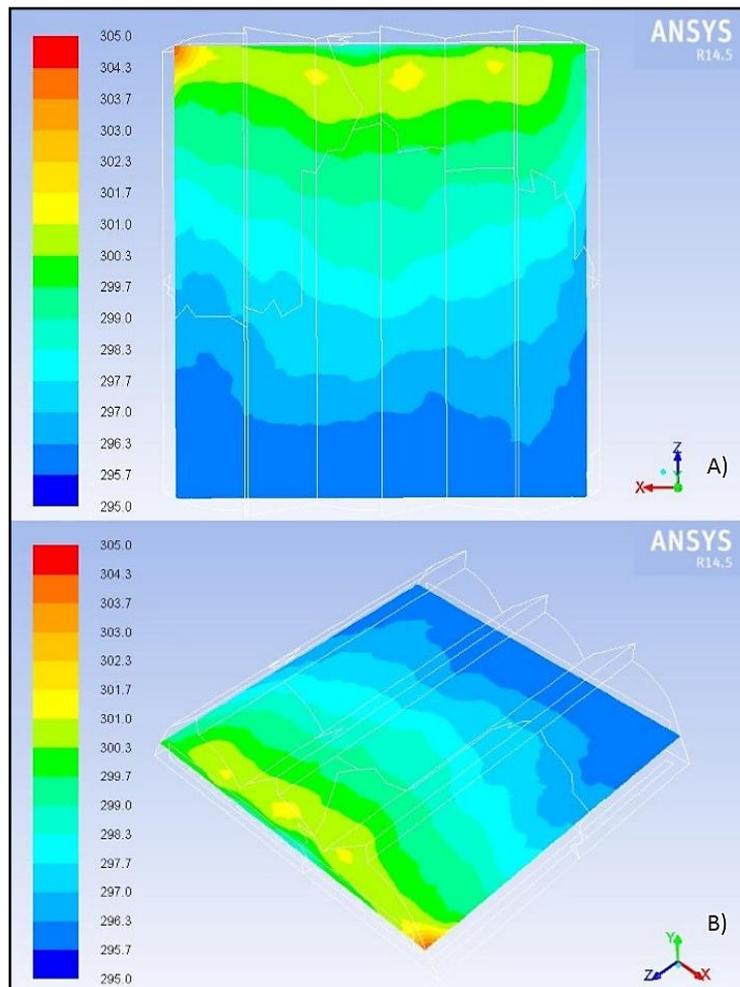


Figura 5.4 Campo escalar de temperatura (K) medidos a 2.5 m del suelo, simulando 2.41 m s^{-1} velocidad del viento exterior, 295.7 K de temperatura exterior. Ventilación natural (ventanas cenitales abiertas). A) Vista en planta, B) Vista en isométrico

En cuanto al análisis de velocidad del viento, en la **Figura 5.4** se observa cómo las velocidades más altas del viento proveniente de sotavento se extienden a lo largo de las paredes plásticas laterales del invernadero. De forma correspondiente, la temperatura es menor en estas zonas, con lo que se corrobora el efecto regulador y de disminución que provoca las altas tasas de renovación de aire y la velocidad del viento sobre los gradientes de temperatura. De manera análoga, se puede observar la disminución de la velocidad del viento mientras se extiende longitudinalmente en el invernadero. Cerca de la ventana lateral opuesta. Las velocidades se reducen más del 95 % en comparación con las velocidades en el exterior.

La **Figura 5.5** muestra cómo la velocidad del aire en el interior se reduce hasta 16 % en comparación con la velocidad exterior, lo que en condiciones de viento débil (menor a 2 m s^{-1}) se traduce en temperaturas altas para el cultivo. El comportamiento general del viento tiende a disminuir debido a la presencia de un cultivo. Los vectores indican que la velocidad del viento se reduce pero se homogeniza en la zona del cultivo; las velocidades van de 0 a 0.4 m s^{-1} a pesar de que la apertura de la ventana lateral permite mayores flujos.

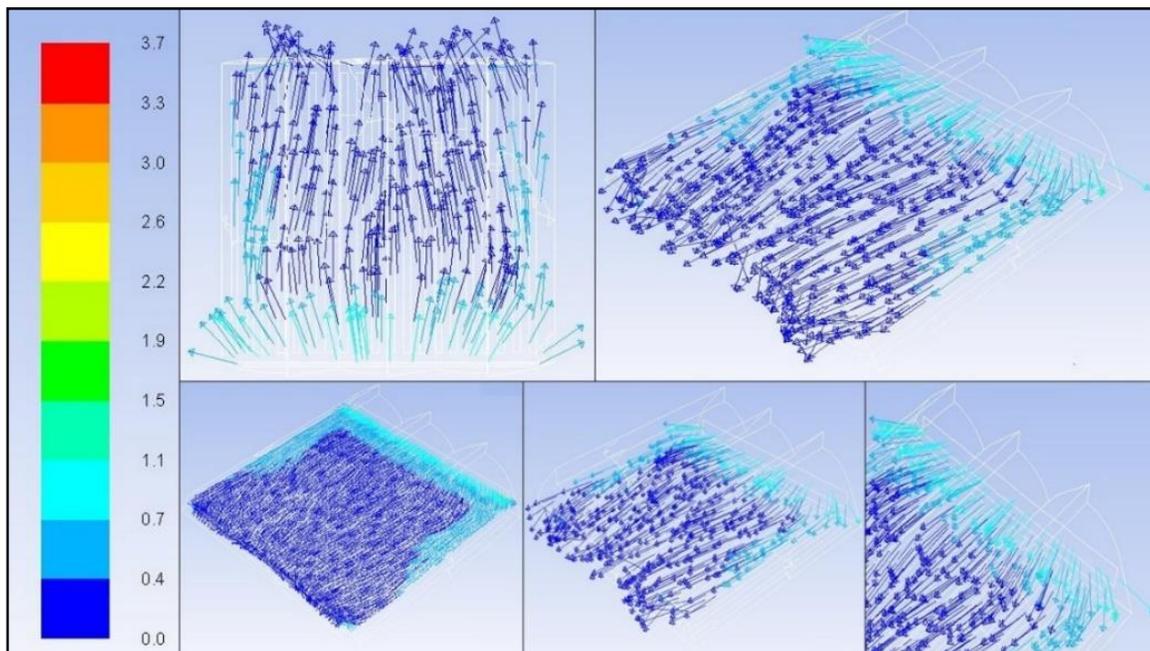


Figura 5.5 Campo vectorial de velocidad del viento medida a 2.5 m del suelo, simulando 2.41 m s^{-1} velocidad del viento exterior

La **Figura 5.6** muestra una imagen tridimensional que combina la velocidad y dirección de los vientos y su efecto en la temperatura del interior del invernadero.

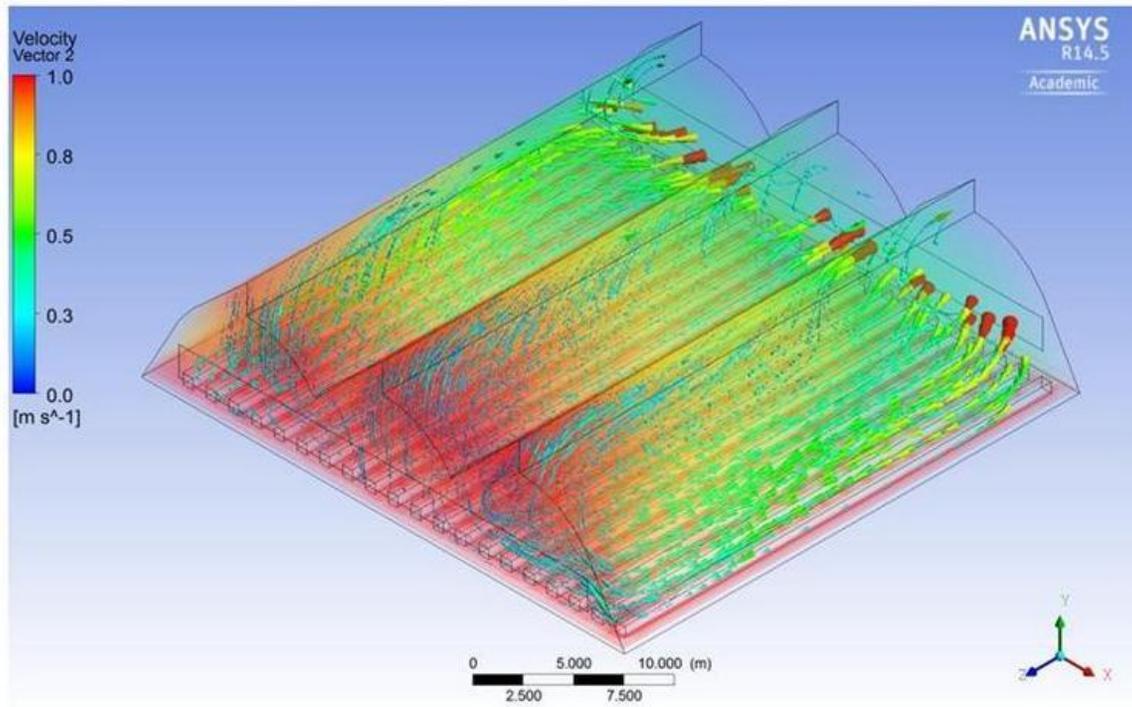


Figura 5.6 Modelo computacional del invernadero cenital con tres capillas y ventilación natural, vectores de velocidad (m s^{-1}) y temperatura (K)

5.3 Invernadero cenital de diez naves en batería

Cuando el invernadero se construye en batería compartiendo una pared, generalmente para abatir costos, el resultado es una estructura conocida como baticenital, cuyas dimensiones y formas se muestran en la **Figura 5.7**. El modelo está construido con ventanas cenitales orientadas a sotavento y barlovento, con el fin de evaluar la mejor tasa de ventilación mediante la gestión en la apertura de ventanas cenitales, y su combinación con la frontal. El invernadero cuenta con 4.5 m de altura de banda y 2.4 m de capilla (6.9 m altura total), la ventana cenital abre 1.3 m y en ella se ha colocado una malla antiinsectos.

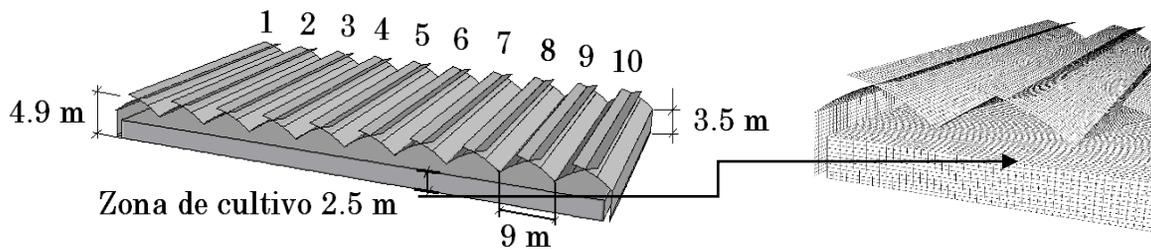


Figura 5.7 Representación esquemática del proceso de creación del modelo computacional y mallado del invernadero tipo cenital de 10 naves

5.3.1 Invernadero baticenital (ventilación cenital y lateral)

Este invernadero es uno de los más versátiles; ha sido usado principalmente en regiones templadas del país pero dependiendo el tamaño, funciona bien en regiones semi-cálidas. Debido a su funcionamiento su uso se ha extendido en la actualidad, principalmente por las ventajas que representa la versatilidad de su manejo en diferentes ambientes climáticos. En el análisis que sigue, se llama ventana lateral a la que está construida paralela a la ventana cenital del invernadero; el viento exterior es simulado perpendicular a esta ventana, con un flujo de izquierda a derecha. Las ventanas frontales son perpendiculares a la ventana cenital y el viento exterior fluye paralelo a estas ventanas.

5.4 Simulaciones sin cultivo

5.4.1 Flujos de masa en el interior

La **Figura 5.8** muestra los valores de flujo de masa en cada una de las ventanas cenitales del invernadero. Los valores negativos indican la entrada de aire (masa) y positivos significa que el aire está saliendo. En la **Figura 5.8** se distinguen cuatro casos:

- **Figura 5.8 A:** ventanas cenitales abiertas de cara al viento y ventanas laterales cerradas
- **Figura 5.8 B:** ventanas cenitales de espalda al viento y laterales cerradas
- **Figura 5.8 C:** cenitales de cara al viento y laterales abiertas
- **Figura 5.8 D:** cenitales de espalda al viento y laterales abiertas

En el caso de la **Figura 5.8 A**, el flujo es mayor en las primeras ventanas respecto a la dirección del viento. Por ejemplo, cuando la velocidad del viento exterior es de 5 ms^{-1} (**Figura 5.8 A**), la entrada de aire por la ventana cenital 1 es de 200 kgs^{-1} , de los cuales un poco más de la mitad (130 kg s^{-1}) salen por la ventana 2 sin haberse mezclado con el aire del interior y por lo tanto sin ser aprovechados en el proceso de refrigeración del invernadero.

La **Figura 5.8 A** muestra que el que las ventanas sean de entrada o salida es independiente de la velocidad del viento exterior. El viento externo hace variar la intensidad del intercambio de aire, pero no el papel relativo de una ventana frente a las otras. Un comportamiento similar en el movimiento del aire se ha observado en la ventilación del invernadero parral (Baeza, 2007). El aire sale por las ventanas subsecuentes hasta la séptima nave, donde no se observa entrada y salida de aire. Al final del invernadero se observa una entrada relativamente débil de aire que contribuye con un flujo opuesto hacia la salida de las primeras naves. Este tipo de comportamiento en el que las primeras naves se diferencian del resto ha sido documentado en invernaderos de grandes dimensiones por Reichrath y Davies (2002).

Cuando se abre la ventana cenital de espaldas al viento (**Figura 5.8 B**) existe una mayor homogeneidad del flujo en cuanto a la cantidad de aire que circula por las ventanas cenitales del invernadero, aunque presenta el problema de una reducción considerable en cuanto a la cantidad de aire intercambiado. Comparando las **Figuras 5.8 A** y **5.8 B** puede verse que el caudal intercambiado por la primera ventana de cara al viento es aproximadamente el doble que el de la ventana de espaldas al viento. Pérez-Parra (2002) midió con la técnica del gas trazador una tasa de ventilación prácticamente doble con las ventanas a barlovento que a sotavento, lo cual apoya la validez de las simulaciones.

En la **Figura 5.8. B** la primera ventana actúa como la principal salida de aire, ya que al contacto con el techo de la primera nave el aire exterior se acelera y crea una zona de presión negativa que succiona el aire del invernadero. A partir de la segunda ventana, el resto de las ventanas actúan de entrada de aire y crean un movimiento interior de sentido contrario a la velocidad del viento externo.

Las **Figuras 5.8 C** y **5.8 D** muestran que las ventanas laterales tienen mayor efecto en el intercambio de aire que las ventanas cenitales, independientemente de que las cenitales estén de cara o de espaldas al viento exterior. En ambos casos la primera ventana lateral es con gran diferencia la principal entrada de aire (hasta 500 kg m^{-2} para un viento exterior de 5 ms^{-1}). El aire entrante encuentra su salida por las ventanas cenitales y, sobre todo, por la lateral en la pared opuesta a la entrada después de recorrer el invernadero. La ventilación lateral resuelve uno de

los mayores problemas que enfrenta la ventilación cenital, que es que la mayor parte de aire que entra por la primera ventana prácticamente sale por la segunda.

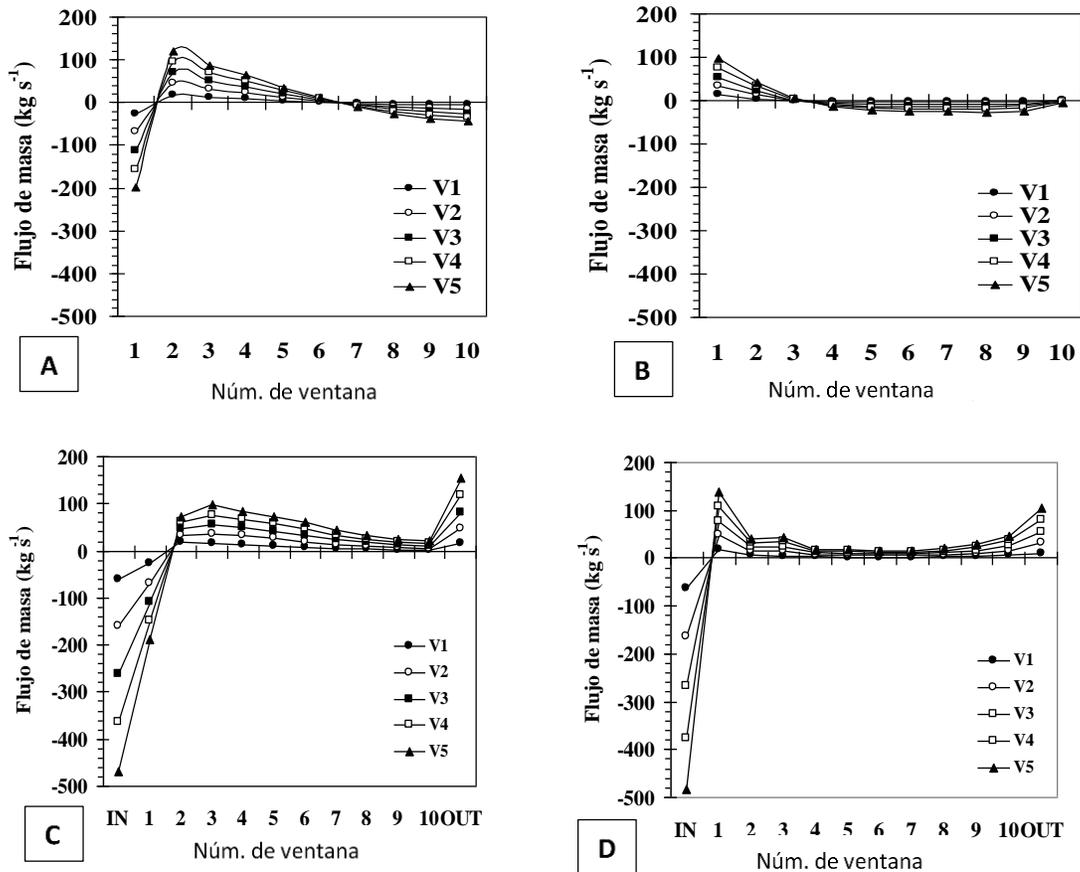


Figura 5.8 Flujos máxicos para las cinco velocidades de viento exterior, simuladas en cuatro escenarios de apertura de ventanas cenitales, A) abiertas de frente al viento y lateral cerrada; B) de espalda al viento, lateral cerrada; C) de frente al viento y lateral abierta; y D) de espalda al viento y lateral abierta. IN se refiere a la ventana lateral de cara al viento, y OUT a la lateral de espalda al viento

Si además de las paredes laterales y cenitales se abren las ventanas en los frontales paralelas al viento exterior se obtienen las **Figuras 5.9 A** y **5.9 B**. Las ventanas paralelas al viento exterior tienen poco efecto en el aire intercambiado por las ventanas laterales y del techo, como puede verse si se comparan las **Figuras 5.9 A** y **5.9 B** con las **Figuras 5.8 C** y **5.8 D**.

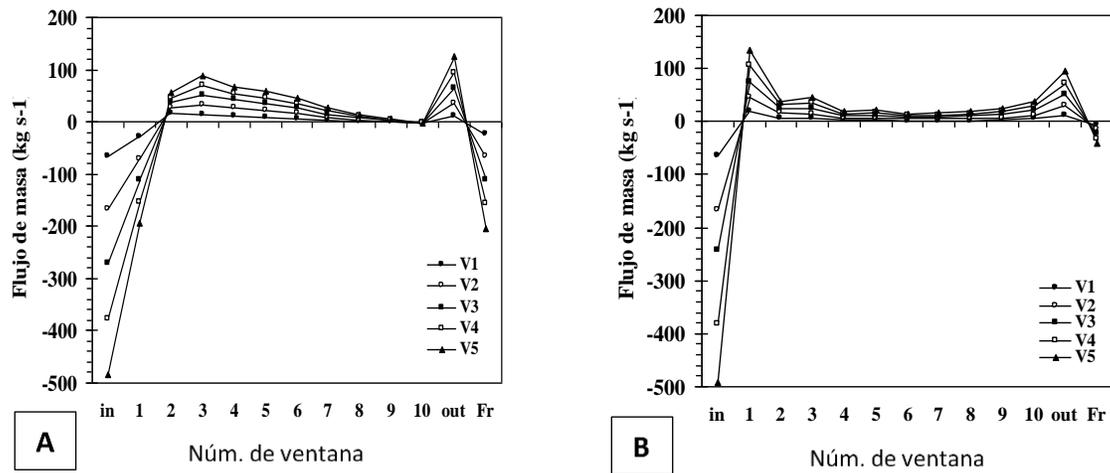


Figura 5.9 Flujo de aire en las diferentes aberturas del invernadero, cuando se abren las ventanas laterales (in, out), frontales (Fr) y las cenitales A) de frente; B) de espalda al viento

Otras investigaciones con vientos paralelos a las ventanas, por ejemplo, Boulard *et al.* (1996) mostraron que el aire sale por los primeros metros de la ventana y entra por los siguientes metros. Este mismo comportamiento se ha observado en el estudio del invernadero casa sombra. La ventana frontal ayuda a homogeneizar el clima interior, pero juega un papel secundario frente a las ventanas laterales y cenitales.

5.4.2 Velocidades de viento interior

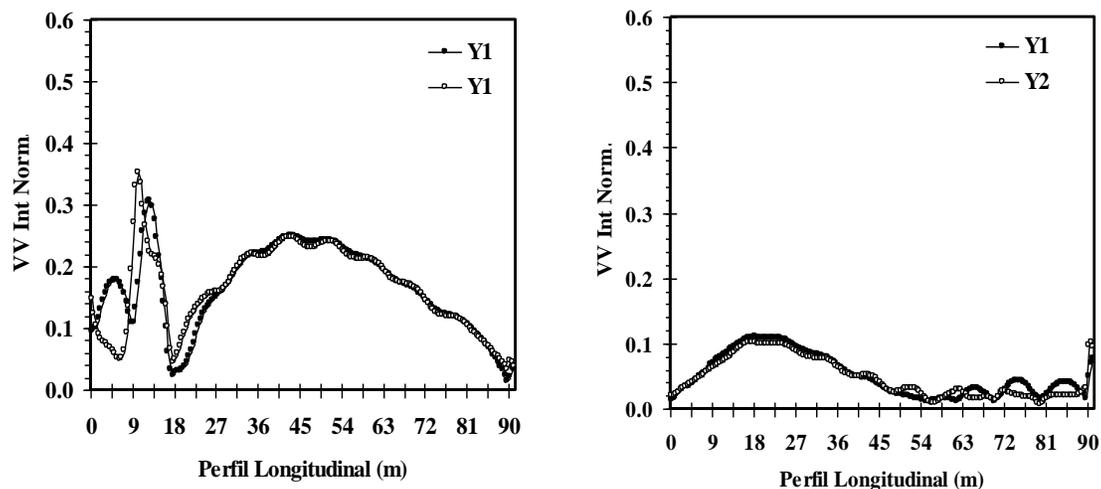
En cuanto al comportamiento de las velocidades en el interior del invernadero, en la **Figura 5.10** se muestran los valores promedio normalizados ($VV_{\text{Interior}}/VV_{\text{Exterior}}$) en el interior del invernadero siguiendo una línea ubicada a 1 y a 2 m de altura del suelo. Los promedios proceden de las simulaciones hechas con velocidades de viento exterior de 1 a 5 m s⁻¹. No se ha observado un comportamiento diferente en el flujo interior del invernadero para las distintas velocidades exteriores ensayadas. Por ello, la velocidad normalizada engloba bien los distintos resultados de las simulaciones.

Cuando se abren las ventanas cenitales de cara al viento (**Figura 5.10 A**) la velocidad se incrementa a 9 m del lateral entre las nave 1 y 2. Después hay una caída brusca de velocidad y a continuación una subida paulatina. Cuando las ventanas cenitales se abren de espalda al viento (**Figura 5.10 B**) en general las velocidades son más bajas, sobre todo al final del invernadero. Las zonas de baja

velocidad de viento suelen ser zonas proclives a acumular aire caliente, como se describirá más adelante. La mayor velocidad se observa en las primeras cuatro naves. Como se comentó anteriormente, las ventanas cenitales en las primeras naves permiten que salga el aire que entra por las últimas naves (**Figura 5.10 B**). Frente a la ventilación a barlovento (**Figura 5.10 A**) la ventilación a sotavento aumenta la homogeneidad de la velocidad del aire dentro del invernadero.

Cuando la ventilación cenital se complementa con la apertura de la ventilación lateral, el perfil de la velocidad normalizada cambia en gran manera (**Figuras 5.10 C y 5.10 D**). Las ventanas laterales mejoran particularmente la intensidad y homogeneidad de la velocidad interior en el caso de las cenitales orientadas de espalda al viento (**Figura 5.10 D**). Aparentemente, esta combinación de ventanas produce el mejor comportamiento bajo las condiciones de viento exterior simuladas.

Una situación similar ha sido observada por Baeza *et al.* (2009) en un invernadero tipo parral (Almería), al observar que la ventilación lateral aumenta al doble la tasa de ventilación de las ventanas del techo en un invernadero de grandes dimensiones (20 naves) y hasta 7 veces si el invernadero es pequeño (3 naves). Algunos de los rasgos descritos en las **Figuras 5.10 A, 5.10 B, 5.10 C y 5.10 D** se pueden explicar mejor con la ayuda de la **Figura 5.11**, que muestra el campo de velocidades en una sección longitudinal del invernadero.



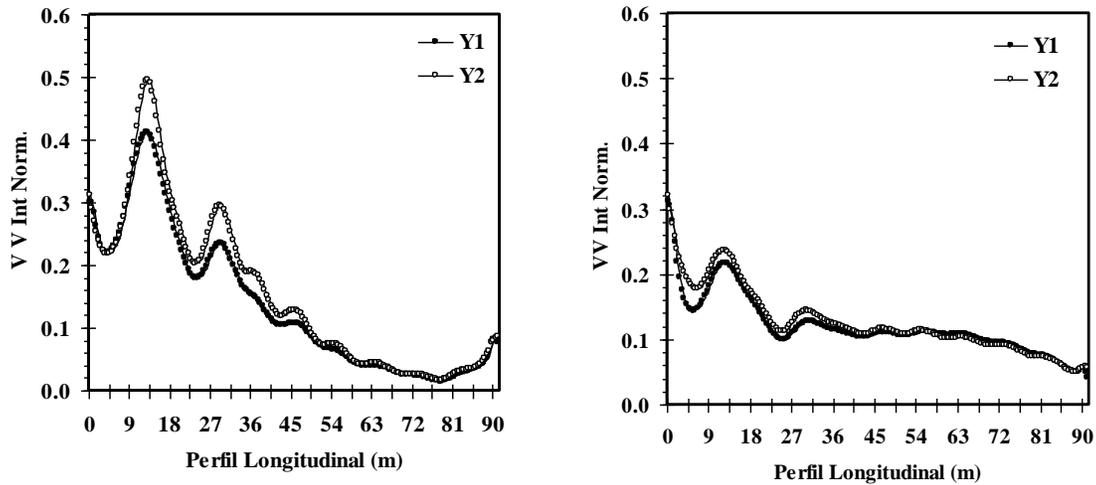
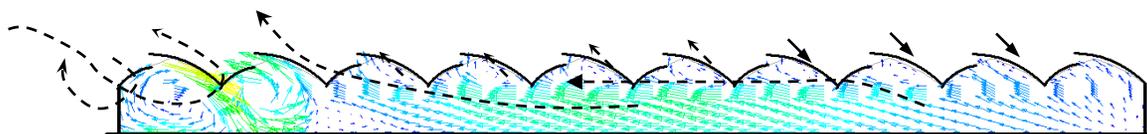
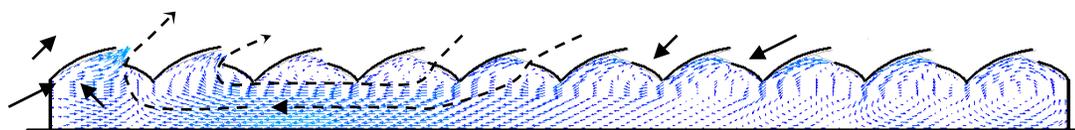


Figura 5.10 Velocidades del viento interno promedio normalizado cuando se abren las ventanas cenitales A) de frente al viento; B) de espaldas al viento; C) de frente al viento y laterales abiertas; y D) de espalda al viento y laterales abiertas

En la **Figura 5.11** una coloración más celeste indica velocidades menores, mientras que el color rojo se usa para velocidad mayor. La **Figura 5.11 A** muestra la entrada principal de aire a través de la primera ventana y su salida por la segunda ventana, sin apenas recorrer la longitud del invernadero. La caída de la velocidad del aire entre las naves 2 y 3 mostrada en la **Figura 5.11 A** se explica por el hecho de que en esa zona confluyen dos flujos de sentido contrario, uno de izquierda a derecha del aire entrante en la primera nave y otro de derecha a izquierda del aire interior del invernadero.



A) Cenitales abiertas de frente al viento



B) Cenitales abiertas de espalda al viento

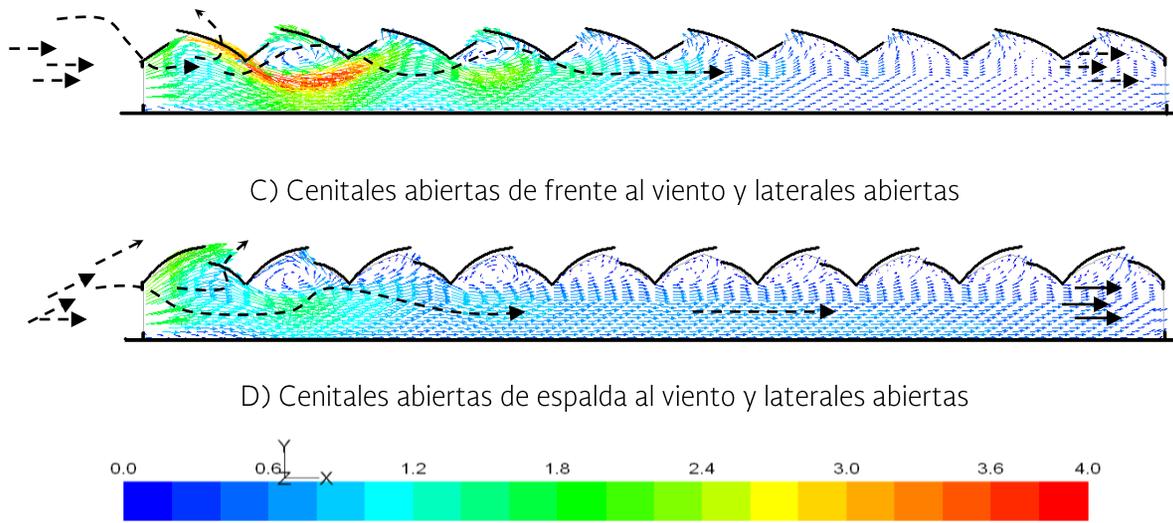


Figura 5.11 Características del flujo del aire en el interior del invernadero sin cultivo y 5 m s^{-1} de viento fuera 4 escenarios A) Cenitales abiertas de frente B) cenitales abiertas de espalda C) cenitales de frente más lateral y D) cenitales de espaldas más laterales

En la **Figura 5.11 B** también se puede ver la succión del aire en las primeras naves y el débil papel de las últimas en el intercambio de aire. Tanto en el caso de las ventanas cenitales de cara como en el de las de espaldas al viento se comprueba que la ventana de la nave 1 es la que juega el papel principal en el intercambio de aire. Esta observación coincide con los resultados de Baeza (2007) en el invernadero tipo parral. Cualquier mejora en la ventilación del invernadero baticenital debe considerar en primer lugar el flujo de aire en las primeras naves.

La ventilación lateral domina la ventilación cenital incluso en invernaderos de 90 m de ancho (**Figuras 5.11 C y D**). Coincidiendo con estas observaciones, Kacira *et al.* (2004) documentaron la mayor importancia relativa de la ventilación lateral frente a la cenital en invernaderos tipo Venlo. En las **Figuras 5.11 C y D** puede verse que el aire se mueve a poca velocidad en la zona de las ventanas del techo, en cambio, en la zona que ocuparía el cultivo, el aire se mueve recorriendo el invernadero desde el lateral de entrada al de salida. Un aspecto negativo que puede observarse en la **Figura 5.11 D** es que parte del aire que entra por el lateral sale por la primera ventana del techo sin mezclarse con el aire del invernadero. Este es un factor a mejorar en el diseño de nuevos sistemas de ventilación o en la gestión de apertura y cierre de ventanas.

Los resultados mostrados en la **Figura 5.11** corresponden a una sección de la parte central del invernadero donde se ha hecho la simetría. No obstante, esa

distribución característica de velocidades puede ser variable a medida que se acerca a la ventana frontal (paralela al viento) del invernadero. Gráficamente es posible observar en la **Figura 5.12** que en la parte central el aire se distribuye de acuerdo a lo mostrado en el perfil vertical (**Figura 5.11**).

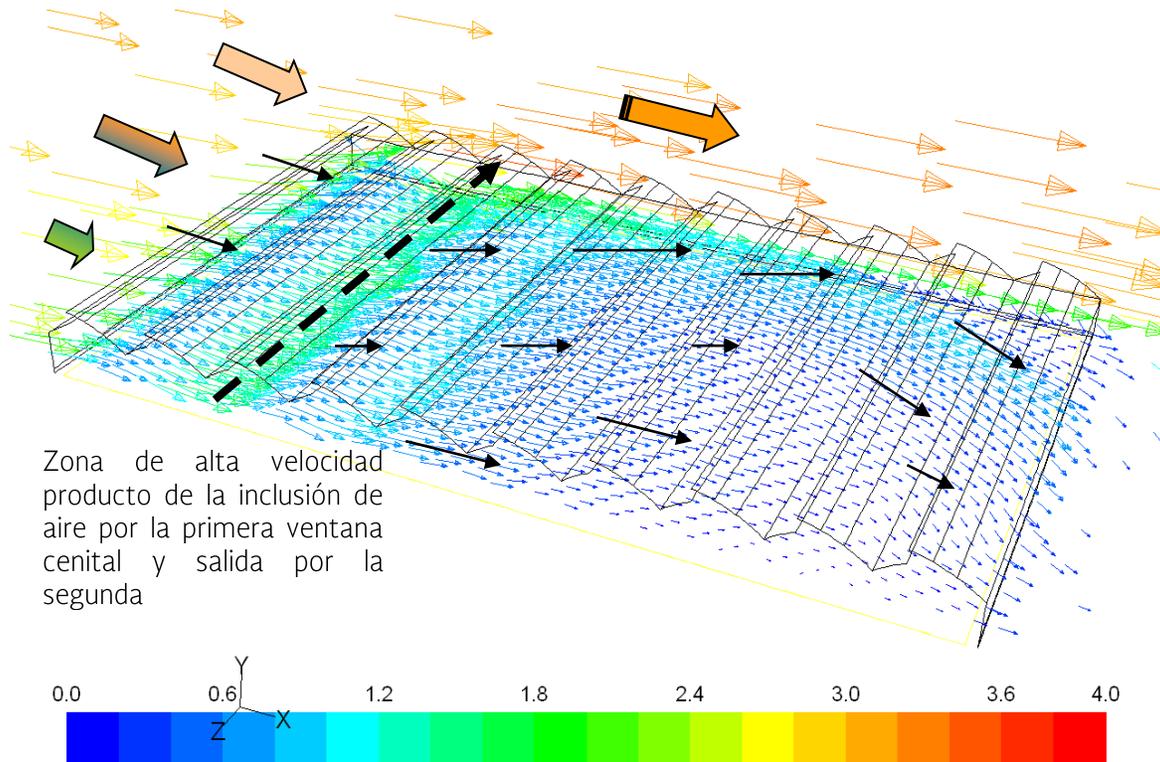


Figura 5.12 Vista en planta a 2 m de los vectores de velocidad de viento interior coloreados por magnitud cuando en el exterior se simulan 5 m s^{-1} y en el invernadero se abren las ventanas cenitales de frente al viento

La ausencia de cultivo en el invernadero promueve una mayor velocidad del aire pero también una distribución más heterogénea en el interior a partir del aire que entra por las ventanas cenitales en las naves subsecuentes a la nave de entrada y salida máxima de aire (naves 1 y 2). Las características del flujo en el interior del invernadero cuando se simula vacío, sugieren una mayor necesidad en el manejo del sistema de ventilación, debido a las repercusiones de gradientes térmicos, humedad y CO_2 que una distribución heterogénea del viento puede ocasionar.

Las **Figuras 5.12** y **5.13** resaltan las bondades de los métodos numéricos en el análisis vectorial de los flujos del aire dentro del invernadero al mostrar un

panorama detallado del evento. Con la incursión del CFD en geometrías tridimensionales se amplía el conocimiento inherente al efecto de las condiciones exteriores, principalmente dirección y velocidad del viento en función de la posición de las ventanas. Como se ha observado, la entrada de aire por las ventanas cenitales es fundamental, pero se modifica dependiendo de la cercanía con la orilla del invernadero. El aire se acelera y no puede entrar por la ventana cenital, lo que modifica el rumbo tanto del aire contiguo como el del que está dentro del invernadero, como se observa la vista en planta de las figuras mencionadas.

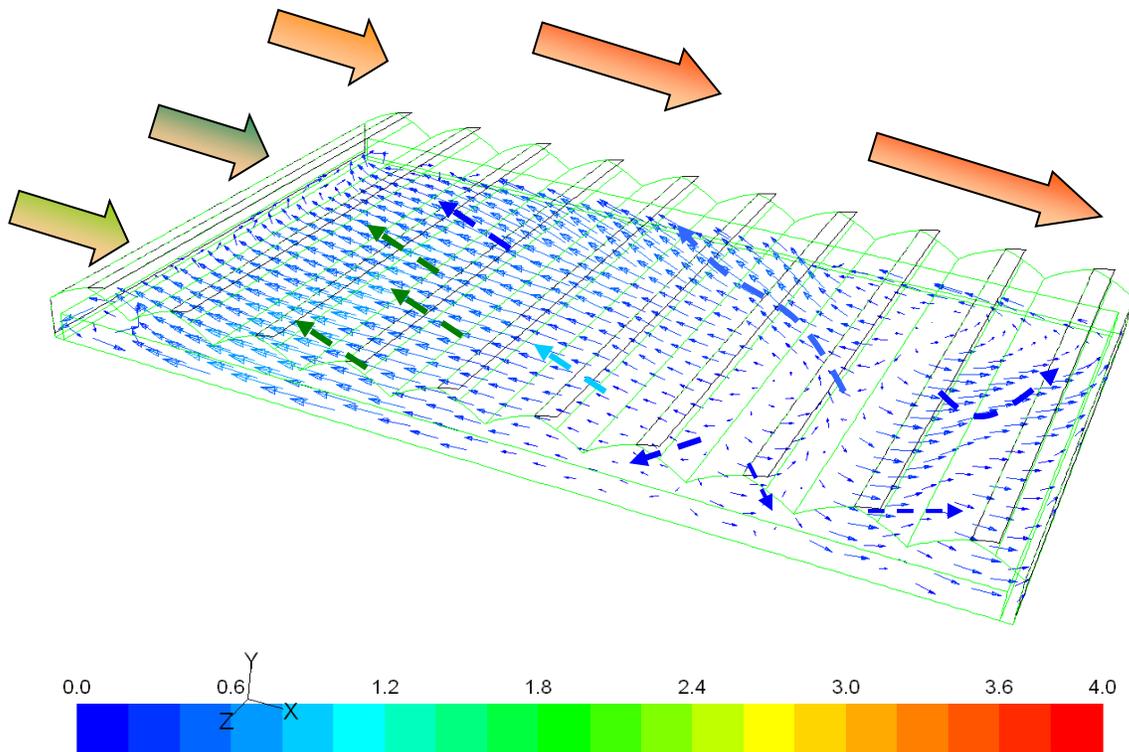


Figura 5.13 Vista en planta a 2 m del suelo, vectores de velocidad del viento, ventanas abiertas a sotavento cuando en el exterior se simulan 5 m s^{-1}

La **Figura 5.13** permite observar las características espaciales de la velocidad y de la dirección del viento para el invernadero con ventanas de espalda al viento. Se observa una zona de alta velocidad en las primeras cinco naves, seguida de una zona de cambio de flujos, y en las naves 9 y 10, una zona que pudiera ser mejor ventilada si la velocidad no fuera tan reducida ($< 0.2 \text{ m s}^{-1}$).

5.4.3 Análisis de las temperaturas en las simulaciones sin cultivo

Normalmente una mayor velocidad del viento implica un mejor intercambio de aire, valores de temperatura más bajos, y lo ideal sería que fueran más homogéneos. La **Figura 5.14** muestra los gradientes de temperatura que se presentan en los diferentes escenarios de apertura de ventanas.

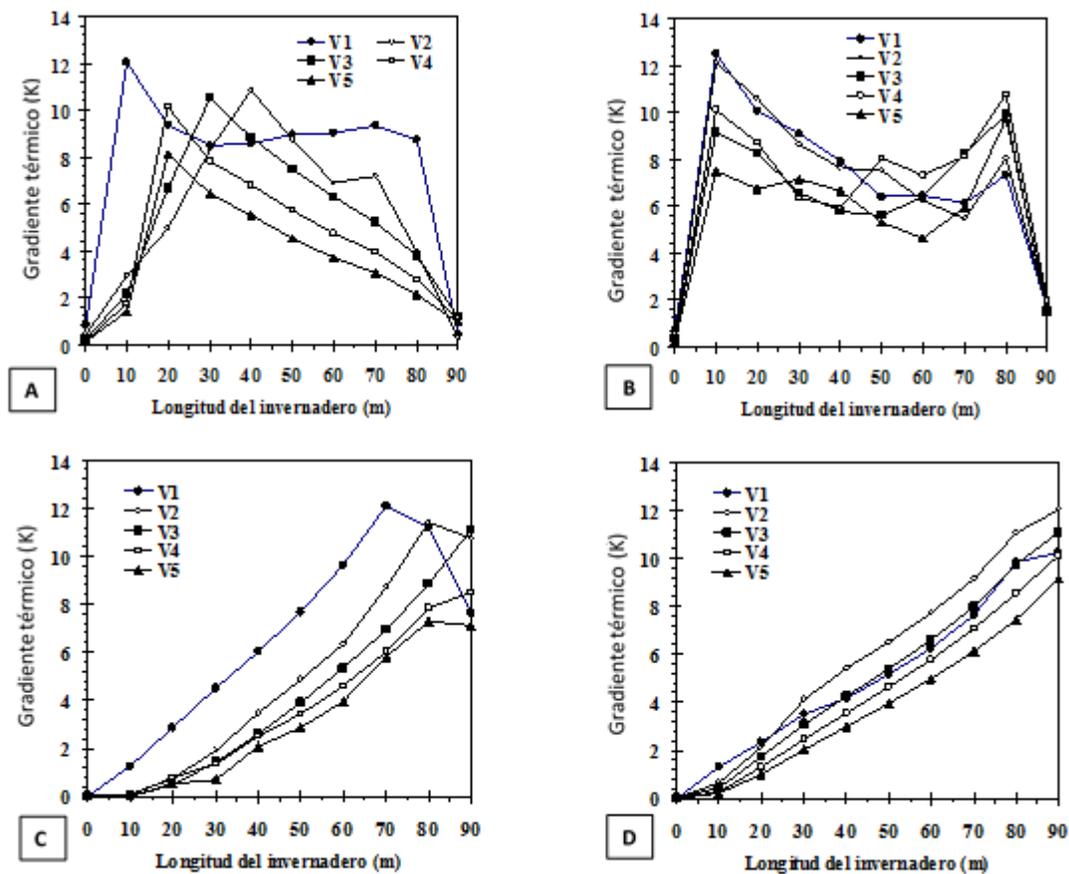


Figura 5.14 Perfiles longitudinales del gradiente de temperatura. Cinco velocidades del aire exterior, cuatro escenarios de ventilación. A) Ventanas cenitales abiertas a sotavento; B) ventanas cenitales abiertas a barlovento; C) Cenitales a sotavento + laterales; y D) cenitales a barlovento + laterales

La distribución de temperaturas dentro del invernadero debido al efecto de la apertura de ventanas presenta dos aspectos relevantes. El primero es la relación inversa de la temperatura con el viento exterior: a mayor velocidad de viento, mayor intercambio de aire y menor temperatura interior (Pérez-Parra, 2002). El

segundo es la concordancia entre la velocidad del aire en el interior con la disminución de las temperaturas (compárense las **Figuras 5.10** y **5.11** con las **Figuras 5.12** y **5.13**). Por un lado, las zonas de entrada de aire son las de menor temperatura, y por otro, las zonas de menor velocidad de aire suelen tener temperaturas más altas, sobre todo cuando las ventanas laterales están abiertas (**Figura 5.14 C y D**).

Observando los perfiles longitudinales de la **Figura 5.14** se presenta la importancia de que el movimiento de aire en el invernadero sea homogéneo, ya que si bien es cierto que se puede aumentar la tasa de ventilación mediante diferentes combinaciones de apertura de ventanas, una mayor tasa de ventilación no necesariamente logra una distribución homogénea de temperaturas dentro del invernadero.

Los escenarios de ventilación solo con las ventanas cenitales abiertas (sotavento y barlovento, **Figura 5.14 A y B**) presentan perfiles de temperaturas mayores que cuando también se abren las ventanas laterales en la mayor parte de la longitud del invernadero. Por el contrario, la ventilación cenital sin la lateral produce una distribución térmica más homogénea, sobre todo cuando se abren las ventanas cenitales de espalda a la dirección del viento (**Figura 5.14 B**), fenómeno atribuible principalmente a una evacuación más distribuida del aire (**Figura 5.8 B**).

La imagen tridimensional del campo de temperaturas muestra que en la mayoría de las zonas la ventilación a barlovento reduce más la temperatura que la ventilación a sotavento (**Figura 5.15**). Si bien la velocidad del aire en el invernadero es menos homogénea a barlovento, en cuanto al régimen térmico parece mejor abrir las ventanas cenitales de cara al viento. Esta conclusión es válida para los invernaderos grandes de hasta 90 m de ancho.

Al abrir las ventanas laterales además de las cenitales, se debe considerar la disminución de gradientes, sobre todo en la primera mitad del invernadero, debido a la gran cantidad de aire que se capta por la ventana lateral. Este gradiente se incrementa de manera significativa hacia el final del invernadero, por lo que sigue habiendo un problema de estratificación longitudinal de la temperatura. Es curioso comprobar que, en las naves finales, la ventilación lateral más la cenital incluso empeora la temperatura del invernadero con solo ventanas cenitales. Como se ha comentado, la ventilación lateral crea un flujo dominante que recorre horizontalmente el invernadero de lado a lado, y conforme avanza, aumenta linealmente la temperatura. En este caso, las ventanas cenitales juegan un papel secundario y no logran reducir el gradiente térmico.

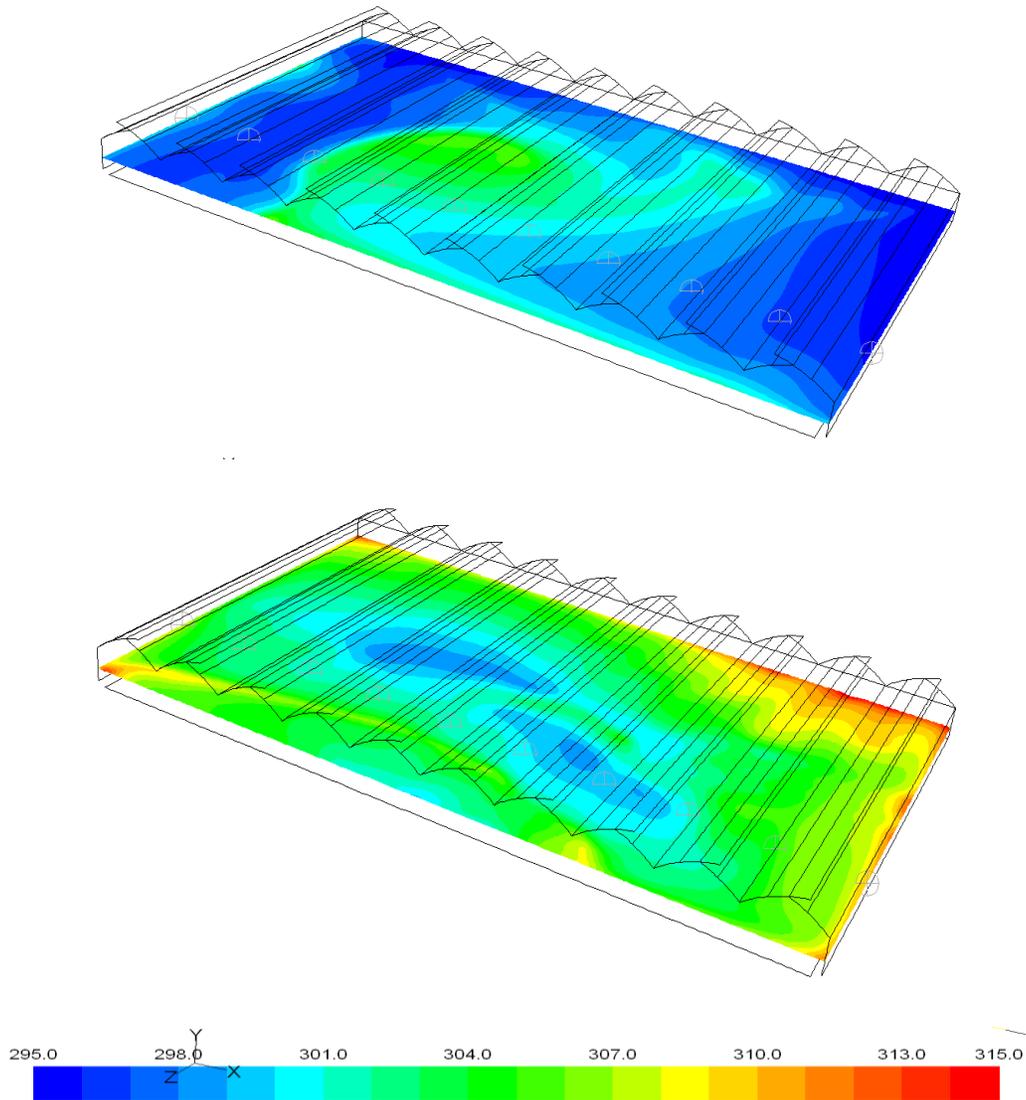


Figura 5.15 Contorno de temperaturas (K) para los escenarios. A) Cenitales abiertas a barlovento; B) Cenitales abiertas a sotavento, a 2 m de altura, viento exterior 5 m s^{-1} y 400 w m^2 de flujo de calor del suelo

El invernadero baticenital de grandes dimensiones no ventila lo suficiente en días soleados cuando no tiene cultivo o está recién plantado, y por tanto con bajas tasas de transpiración. Se deben estudiar alternativas al modelo en uso en la horticultura mexicana. Se puede plantear reducir la anchura del invernadero a valores cercanos a los 50 m, o bien alternar en el cierre/apertura de ventanas cenitales para evitar que el aire que entra por la primera nave salga por la segunda, como se observa en la **Figura 5.11 A**.

5.5 Simulaciones con cultivo

5.5.1 Flujos de masa

Los patrones en el flujo del aire presentan gran similitud con los del invernadero vacío (sin cultivo), no obstante se observa la reducción en el flujo de aire al interactuar con el obstáculo que supone la existencia de un cultivo, sobre todo cuando las ventanas cenitales se abren a sotavento al viento. La **Figura 5.16** muestra las cantidades (kg s^{-1}) de masa de aire que fluye por las diferentes aperturas del invernadero. El flujo de aire cuando solo se abren las ventanas cenitales a barlovento al viento se muestra en la **Figura 5.16 A** y la **Figura 5.16 B** cuando se abren a sotavento al viento.

Cuando las ventanas se abren de frente al viento (**Figura 5.16 A**), debido a la reducida área de la ventana cenital, la cantidad de aire que no puede entrar por la primera capilla al chocar con las paredes se desvía y se aleja de las paredes del invernadero, pero este aire exterior vuelve a bajar después de la sexta nave y aquí las ventanas cenitales vuelven a ser de entrada de aire. Estas magnitudes se observan ligeramente menores cuando se simula el cultivo (**Figura 5.8 A** frente a **Figura 5.16 A**) y prácticamente invariables por el cultivo cuando la ventana cenital se abre en dirección a sotavento (**Figura 5.8 B** frente a **Figura 5.16 B**).

Cuando se combina la ventilación cenital con la apertura de la ventana lateral se comprueba la importancia de la ventana lateral de entrada, como en el caso del invernadero sin cultivo. En cambio, es notable la reducción del flujo de aire en la ventana lateral de salida (**Figura 5.8 C** y **D** vs. **Figura 5.16 C** y **D**) pero en general, los patrones de flujo en las ventanas cenitales cambian, de tal suerte que a diferencia de las simulaciones hechas sin cultivo, ahora se observa salida de aire en las primeras ventanas y, a partir de la octava nave, el aire vuelve a entrar (**Figura 5.16 C**) y permanece en equilibrio, cuando se abren las ventanas cenitales a sotavento (**Figura 5.16 D**).

De los resultados encontrados, producto de los diferentes escenarios de simulación (apertura de ventanas, con y sin cultivo, velocidades de aire exterior), se deduce que la gestión de la apertura de ventanas cenitales y laterales logra mejores intercambios de aire. También se observa que cuando las ventanas laterales de entrada y salida están cerradas, el cultivo afecta muy poco los caudales de aire de entrada y salida de las ventanas cenitales, aunque el cultivo sí afecta al movimiento del aire en el interior del invernadero, ya que la mayoría del aire circula por encima del cultivo, como se verá más adelante en la **Figura 6.18**.

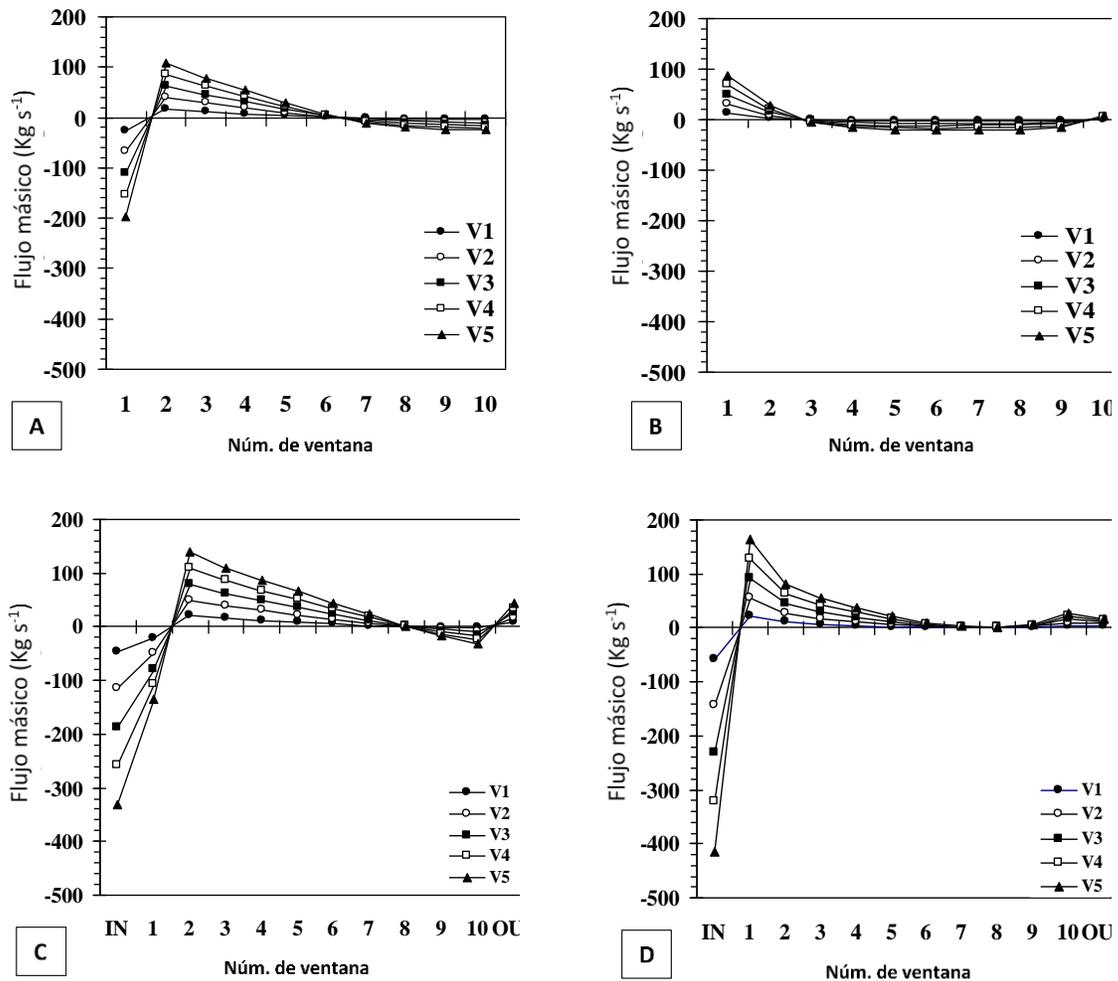


Figura 5.16 Flujos másicos para las cinco velocidades de viento exterior, simuladas en cuatro escenarios de apertura de ventanas cenitales. A) Abiertas de frente al viento y lateral cerrada; B) abiertas de espalda al viento, lateral cerrada; C) abiertas de frente al viento y lateral abierta; y D) abiertas de espalda al viento y laterales abiertas. (IN se refiere a la ventana lateral de cara al viento, y OUT a la lateral de espalda al viento)

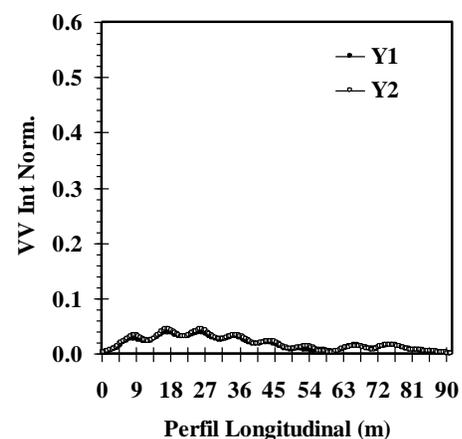
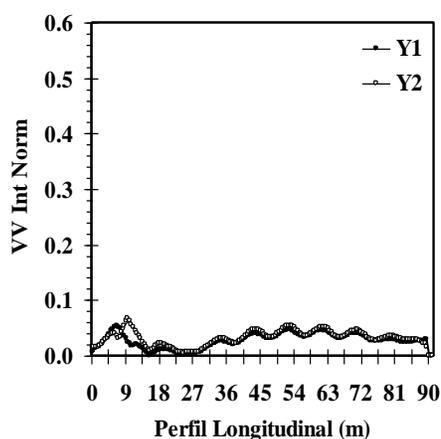
Los patrones de flujo observados con las ventanas cenitales y laterales abiertas se conservan si además se abren las ventanas frontales. Debido a la menor importancia relativa de la ventana frontal en comparación con las otras, en lo que sigue no se comentarán los resultados de las simulaciones con ventanas frontales.

5.5.2 Velocidades de viento interior simulando cultivo

Cuando se simula el cultivo, lo primero que resalta es la drástica reducción de velocidad interior (90 %), con respecto al exterior (**Figura 5.17**) así como la similitud en las velocidades a 1 y 2 m del suelo en prácticamente todos los casos simulados. A pesar de que la apertura de la ventana lateral permite mayores flujos, la reducción de velocidades más marcada es la resistencia del cultivo en el proceso de ventilación.

Si bien es cierto que la apertura de ventanas laterales incrementa los flujos, en la zona del cultivo (1 y 2 m de altura) resulta clara la lentitud con que se mueve el aire. Comparativamente, solo cuando se abren las ventanas laterales se observa una aceleración en las velocidades, sobre todo en las primeras tres naves, para después estancarse en una zona de calma. Cuando se combina la ventana cenital abierta de frente al viento y laterales, en la sexta nave se registran velocidades muy cercanas al cero (**Figura 5.17 C**), al igual que en las naves 2 y 3, cuando solo la cenital está abierta (**Figura 5.17 A**).

Los resultados gráficos de las velocidades del viento indican que en un invernadero baticenital la ventana lateral es de capital importancia, dependiendo del número de naves, pues las velocidades se reducen bastante después de la cuarta nave. La mayor parte del aire que entra por la primera ventana sale por la segunda sin haberse mezclado con el resto del aire (**Figura 5.18**). Una combinación viable sería cerrar las ventanas 2 y 3, y a partir de la cuarta o quinta nave abrirlas de frente al viento.



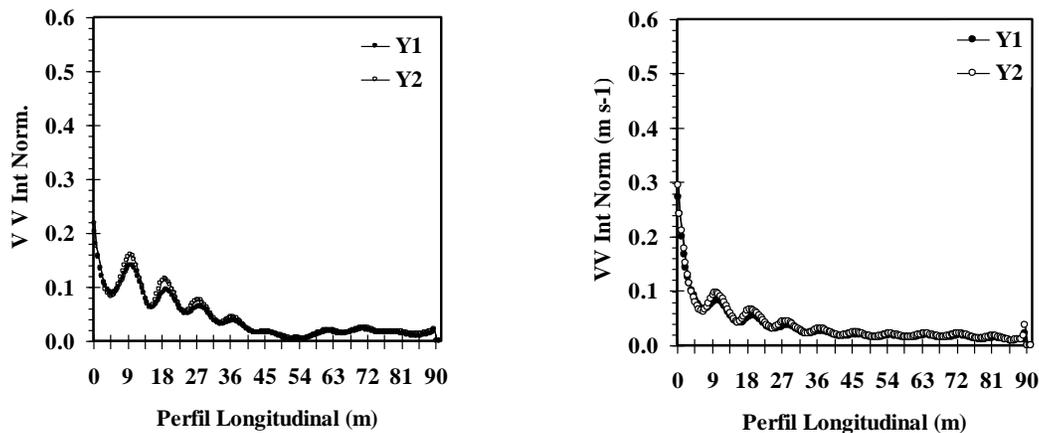


Figura 5.17 Velocidad interna promedio del viento cuando se simula cultivo en los cuatro escenarios ensayados. A) Cenitales abiertas a sotavento; B) Cenitales abiertas a barlovento; C) cenitales a sotavento + laterales; y D) cenitales abiertas a barlovento + laterales

La **Figura 5.18** muestra el campo de velocidades en una sección del invernadero para las cuatro configuraciones ensayadas. Hay similitudes y diferencias entre la **Figura 5.18** (invernadero con cultivo) y la **Figura 5.11** (invernadero con cultivo recién trasplantado o sin cultivo). En la **Figura 5.18** también se puede observar el predominio de la ventilación lateral sobre la cenital, así como la entrada de aire a través de la primera ventana cenital a barlovento y la salida de gran parte de ese aire por la segunda ventana (**Figura 5.18 A**).

La mayor diferencia de menor velocidad se presenta en la zona cultivada sobre todo en la segunda parte del invernadero. La reducción de velocidad es mayor si se comparan las configuraciones con laterales abiertos (**Figura 5.18 C y D** frente a **Figura 5.11 C y D**). El medio poroso del cultivo frena el desplazamiento interior del aire. En consecuencia, cuando hay cultivo el desplazamiento del aire es mayor que cuando el invernadero está vacío.

De acuerdo con los resultados numéricos es posible observar que abrir simplemente las ventanas no significa ventilar. Por una parte es importante captar la mayor cantidad de aire, pero también se necesita un área de ventanas para expulsarlo y con ello favorecer una mayor tasa de ventilación. Por otra parte, es conveniente redirigir el aire entrante hacia la zona de cultivo, evitando así el fenómeno de entrada y salida de aire en naves próximas como la 1 y la 2.

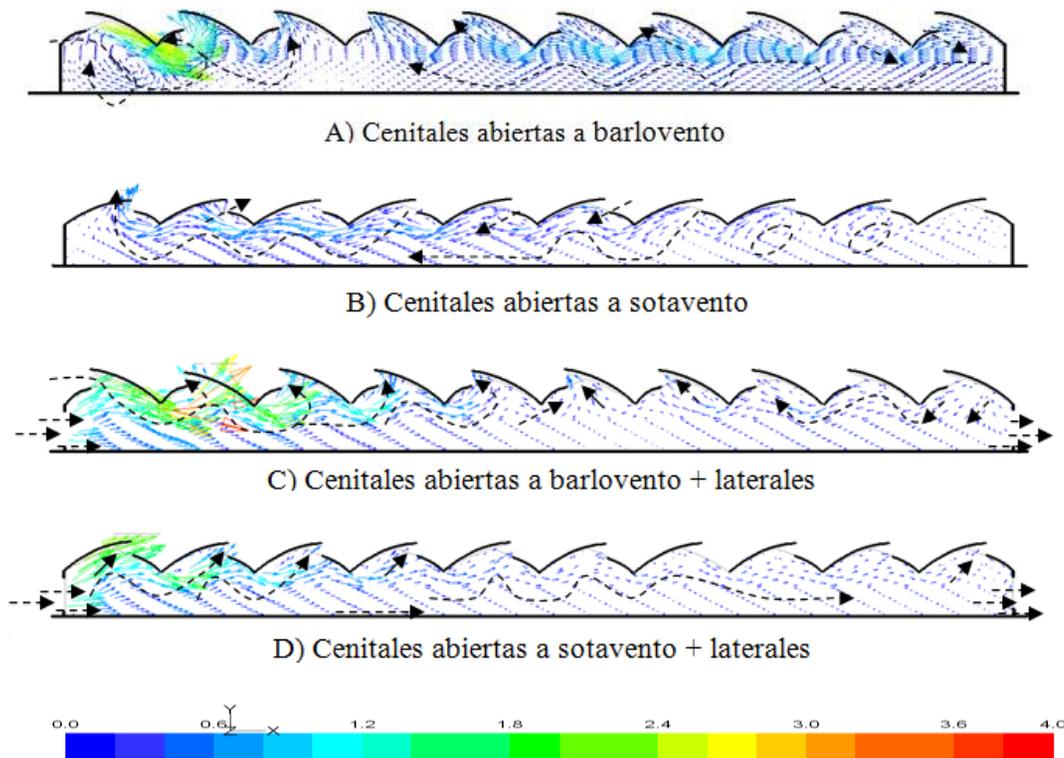


Figura 5.18 Vectores de velocidad del viento interior coloreados por magnitud de velocidad cuando en el exterior hay 5 m s^{-1} y se ensayan cuatro escenarios de apertura de ventanas. A) Solo cenitales a sotavento; B) Solo cenitales a barlovento; C) Cenitales a sotavento + laterales; y D) Cenitales a barlovento + laterales

Una vez analizados diferentes escenarios del sistema de ventilación natural para este tipo de invernadero, es importante resaltar la bondad en el uso de los métodos numéricos. Con ellos es posible detectar, por un lado, las características espaciales de los flujos dentro del invernadero, pero además permiten identificar los puntos críticos en la distribución del aire, como las dimensiones del invernadero, los flujos de masa en función de la relación superficie cultivada/área de ventilación, la influencia de la velocidad externa del viento. Estos elementos forman la base fenomenológica para aportar modelos estructurales y de manejo que logren, mediante la gestión del sistema de ventilación, el clima interior óptimo con menos *inputs*.

5.5.3 Análisis de las temperaturas en las simulaciones con cultivo

La presencia de un cultivo desarrollado dentro del invernadero puede ser analizada desde diferentes perspectivas, ya que participa en varios procesos, incrementando o disminuyendo niveles de CO₂ (respiración), H₂O (transpiración), etc. Desde el punto de vista de la ventilación, para estas simulaciones el cultivo funciona como un medio poroso donde el movimiento del aire y su correspondiente transporte de masa se ve disminuido. En este sentido, aun cuando las velocidades del viento en el invernadero son menores por la resistencia al movimiento del aire que produce el cultivo, se observan gradientes térmicos menores que cuando hay cultivo, lo que sucede por la menor cantidad de calor que se desprende del suelo (200 W m⁻²) contra 400 W m⁻² que se simulan cuando no hay cultivo.

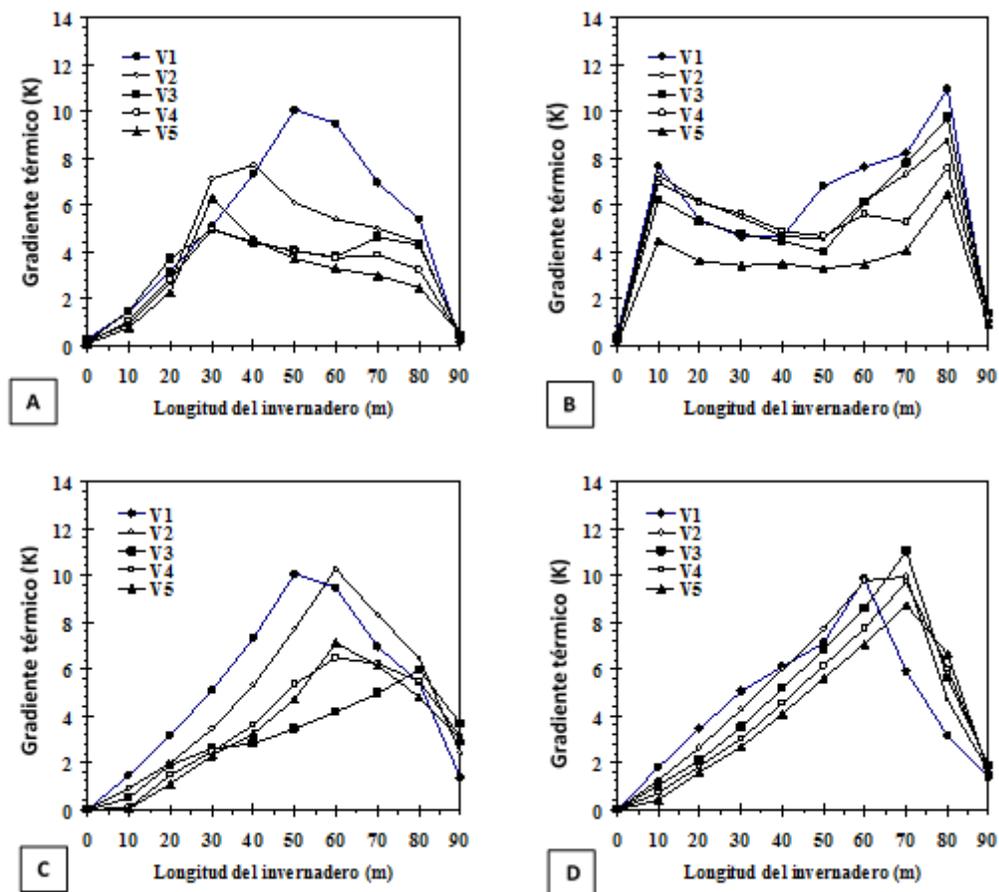


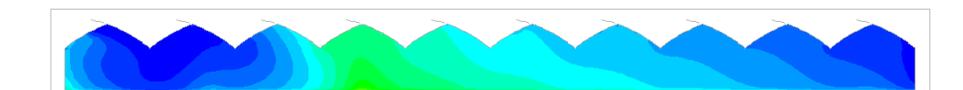
Figura 5.19 Perfil longitudinal de temperaturas medidas a 2 m y en el eje de simetría central, simulando las cinco velocidades del viento exterior y cuatro escenarios ensayados. A) Ventanas cenitales abiertas a barlovento; B) A sotavento; C) Cenitales y frontales abiertas a barlovento; y D) Cenitales a sotavento, frontales a barlovento

En la **Figura 5.19** se observa, en el sentido de encontrar gradientes más bajos cuando se simula el cultivo, aun cuando las velocidades del aire dentro del invernadero son menores. Otro aspecto a resaltar es el de la gran similitud entre los gradientes de temperatura, sobre todo en las primeras naves del invernadero, con el invernadero vacío, lo cual tiene sentido físico ya que los patrones de velocidad del viento son semejantes, aun cuando las velocidades son más bajas cuando hay cultivo, pero existe una menor cantidad de flujo de energía del suelo hacia el ambiente, lo que implica menores gradientes de temperatura ambiental.

A partir de los escenarios de apertura de ventanas ensayados se puede observar que la ventilación cenital es básica en un invernadero. Cuando hay un cultivo con altas tasas de transpiración, se pueden mantener niveles homogéneos de temperatura en la zona alta del cultivo (2 m) usando solamente la ventilación, cuando afuera la velocidad del viento es de 3-5 m s⁻¹. En cambio, con vientos débiles la ventilación cenital produce saltos térmicos excesivos, del orden de 10 °C en las zonas centrales del invernadero (**Figura 5.19 A y B**). Por otro lado, la combinación de la ventilación lateral con la cenital es una opción recomendable para estructuras más cortas, ya que como se observa en las **Figura 5.19 C y D**, los gradientes térmicos tienden a incrementarse a medida que el aire entrante se aleja de la ventana lateral.

La **Figura 5.20** ilustra el campo de temperaturas en una sección vertical del invernadero para una velocidad del viento exterior de 5 m s⁻¹. Las zonas de mayor temperatura están en la superficie del suelo, ya que el suelo constituye la única fuente de calor en el modelo de simulación numérica. Conforme a lo señalado al comentar la **Figura 5.19**, para esta velocidad del viento todas las combinaciones de ventanas producen saltos térmicos relativamente reducidos, lo que prueba que el invernadero baticenital de 90 m de anchura es una buena estructura en condiciones de vientos moderados pero no lo es tanto con vientos débiles.

Se comprobó que las ventanas cenitales a barlovento reducen más la temperatura (**Figura 5.20 A**), aunque la uniformidad térmica es menor (**Figura 5.20 B**). Además puede verse que la ventilación lateral produce una reducción térmica muy notable independientemente de la orientación de las ventanas del techo (**Figura 5.20 C y D**), aunque crean un gradiente longitudinal de temperatura que hace recomendable acortar la anchura del invernadero si el viento exterior es inferior al mostrado en la **Figura 5.20**.



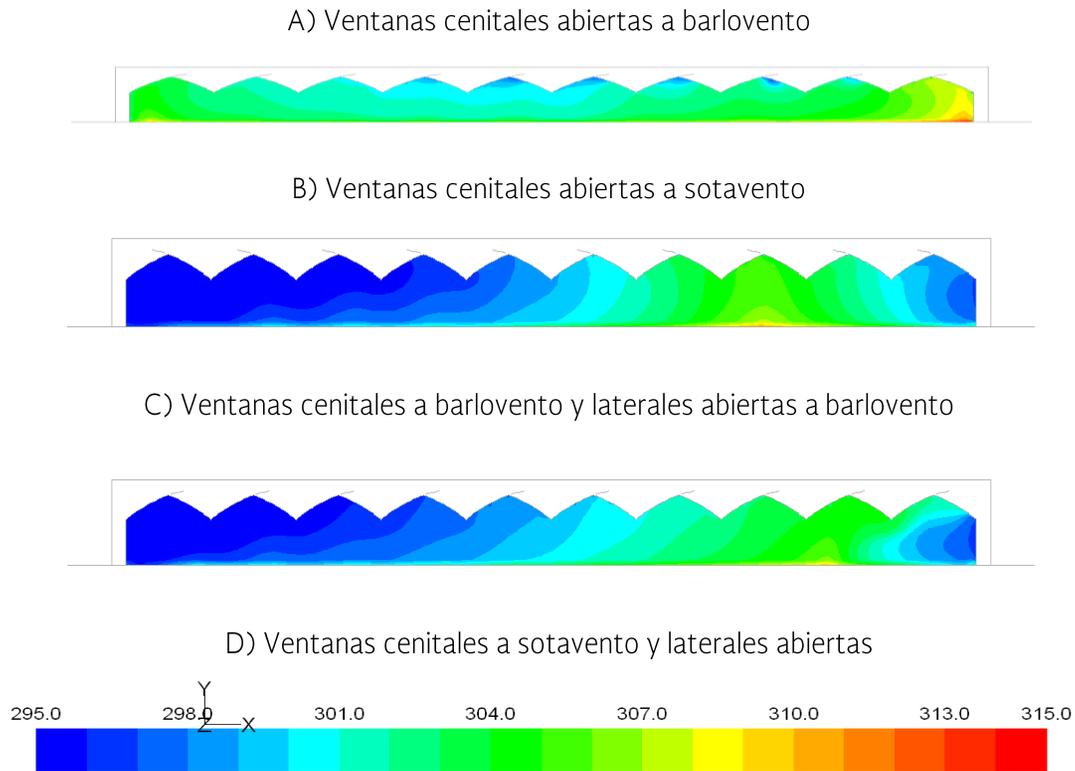


Figura 5.20 Perfil vertical de temperaturas (K) en el centro del invernadero (eje simétrico) cuando en el exterior se simula 5 m s^{-1} de velocidad del viento, 4 escenarios de apertura de ventanas A) Cenitales abiertas a barlovento, B) a sotavento, C) cenitales y frontales a barlovento y D) cenitales a sotavento, frontales a barlovento

Los resultados de la combinación de apertura de ventanas, en cuanto a gradientes de temperatura se refiere, indican que el invernadero que mejor puede funcionar, bajo las condiciones de velocidad del viento y temperaturas ensayadas, sería con 5 naves de anchura. Si la velocidad del viento fuera de $4\text{-}5 \text{ m s}^{-1}$, abrir sólo las ventanas cenitales sería suficiente; si las velocidades del viento fueran menores a 4 m s^{-1} , una mejor opción sería abrir las ventanas laterales y cenitales a barlovento, además de las cenitales. En invernaderos de cinco naves la ventilación lateral domina sobre la cenital, y hace que no sea relevante orientar las ventanas del techo a una dirección o a otra.

La **Figura 5.21** muestra en una perspectiva tridimensional, una vista en planta del campo de temperatura a 2 m de altura de dos de las configuraciones estudiadas. En cualquiera de los escenarios de apertura de ventanas en invernadero vacío o con cultivo con las condiciones ambientales simuladas, existen zonas puntuales de calor que necesitan ser eliminadas. En esta figura, así como en la

Figura 5.15, se presenta su ubicación con el fin de evaluar la posibilidad de plantear hipótesis para su control o eliminación mediante la creación de ventanas adicionales en esas zonas.

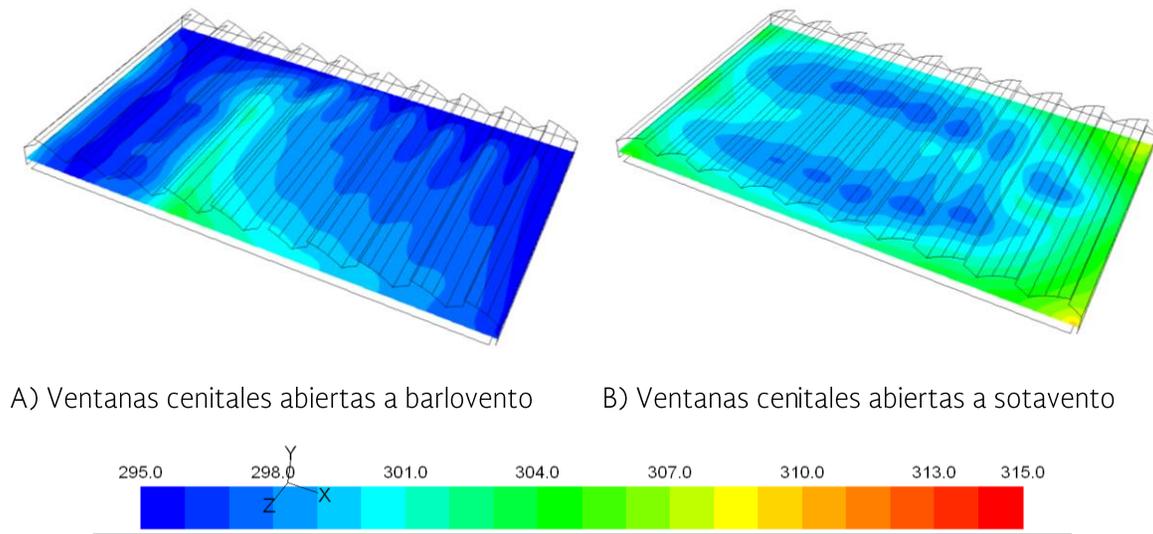


Figura 5.21 Vista en planta de la distribución espacial de gradientes de temperatura (K) medidos a 2 m del suelo, simulando 5 m s^{-1} velocidad del viento exterior, ventanas cenitales abiertas A) A barlovento y B) A sotavento

5.6 Resultados comparativos entre el túnel de agua y CFD

Con el fin de verificar los patrones de flujo que suceden dentro del invernadero y las variaciones que ocurren por efecto estructural, se usará el túnel de agua que permite verificar cualitativamente los patrones de flujo que experimenta un fluido en el invernadero, lo que permite verificar comparativamente el sistema de ventilación. Debido a que en las primeras naves se observa el mayor movimiento de flujo, se presenta un comparativo de estas naves como resultado de esta validación. La **Figura 5.22** presenta un comparativo entre A) los vectores de velocidad en el túnel de agua, y B) resultados de la simulación en CFD cuando en el exterior se simulan 5 m s^{-1} . El patrón en la distribución de la velocidad muestra que la primera ventana cenital es la que permite una mayor entrada de aire, aunque este flujo no tiene un efecto más allá de la tercera nave, pues sale en gran parte por la segunda nave. Sin embargo, como se observa en la **Figura 5.22 A**, parte de ese flujo regresa hacia la pared, lo que genera un flujo recursivo.

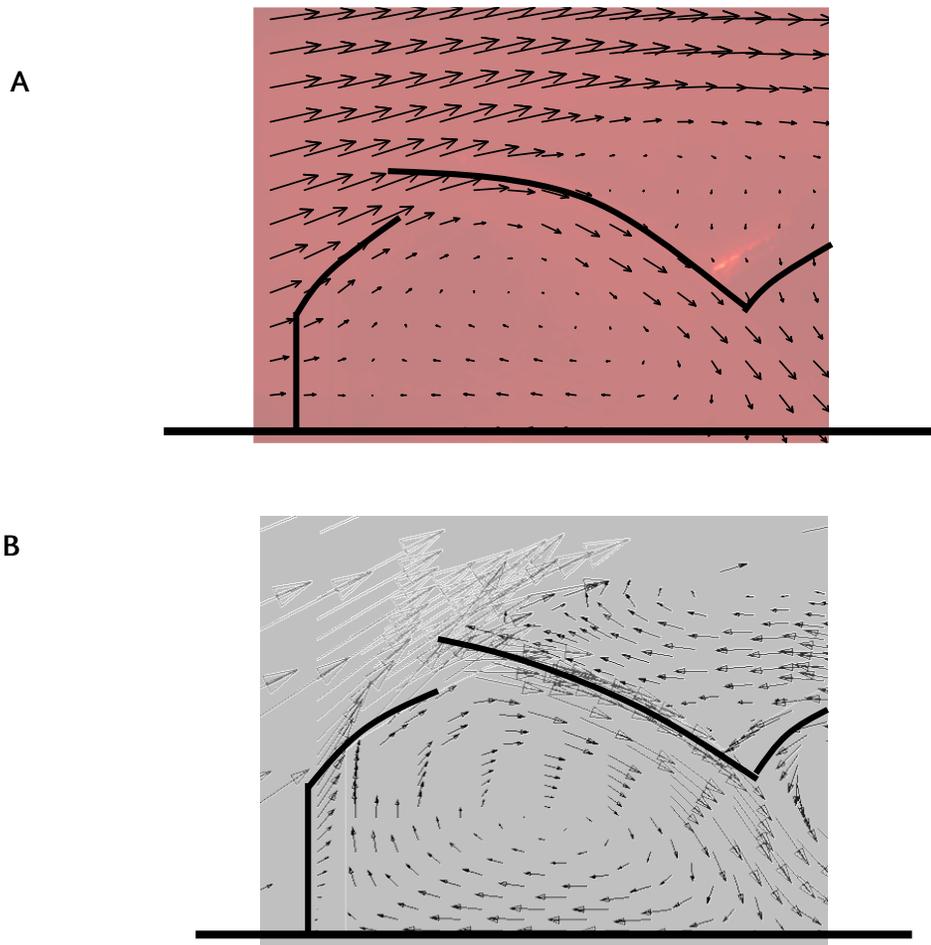


Figura 5.22 Comparativo cualitativo de los vectores de viento entre A) el túnel de agua y B) simulados por CFD, bajo condiciones similares, de la primera nave a barlovento

Cuando las ventanas se abren a sotavento (**Figura 5.23**), a pesar de que el flujo de aire por la ventana cenital disminuye bastante, comparativamente se puede observar similitud entre los flujos en la primera nave cuando se usa el modelo a escala (**Figura 5.23 A**) y los resultados de la simulación mediante CFD (**Figura 5.23 B**) cuando en el exterior se simulan 5 m s^{-1} , tal como se hizo fluir en el túnel de agua.

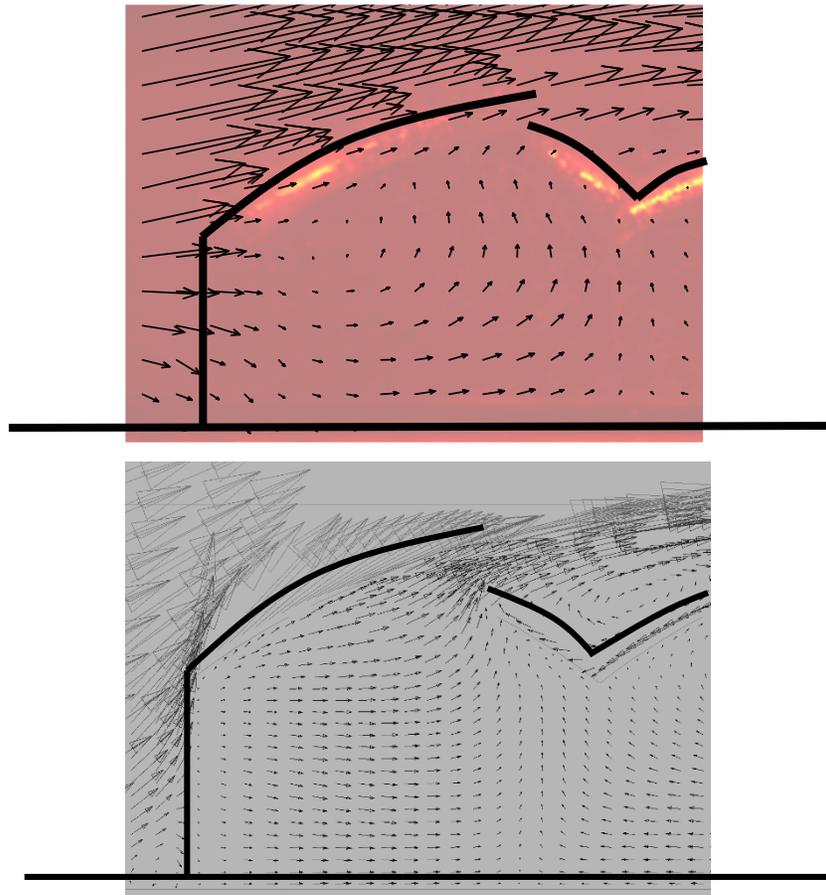


Figura 5.23 Compartido cualitativo de los vectores de viento entre A) el túnel de agua y B) simulados por CFD, bajo condiciones similares, de la primera nave a sotavento

Los resultados comparativos entre el túnel de agua y las simulaciones realizadas mediante CFD presentan similitud en las zonas donde mayormente se llevan a cabo los flujos. En la zona media del invernadero, debido a una reducción en las velocidades del viento, mediante el túnel de agua es difícil apreciar con claridad los movimientos. Aun cuando en el túnel de viento existen condiciones difíciles de reproducir, de acuerdo con los resultados cualitativos obtenidos, se observan características similares en los flujos en las primeras naves para los escenarios ensayados, lo que aporta confianza en los métodos para describir el movimiento del aire dentro del invernadero.

Las simulaciones realizadas mediante métodos numéricos (CFD) en tres dimensiones permiten tener una visión global de la distribución espacial del viento dentro del invernadero para poder inferir sus características climáticas. El uso del túnel de agua permite obtener perfiles del comportamiento del fluido que simula el

sistema de ventilación, por lo que su uso en la validación de los resultados contribuye a dar certidumbre respecto del sistema de ventilación.

5.7 Invernaderos multimodulares, geometría y simulación del modelo computacional

Los invernaderos multimodulares son sistemas de producción establecidos y grandes superficies producto de la unión de varios invernaderos en batería que, según la forma y tipo de ventana, reciben el nombre de baticenit, batitúnel, etc. (**Figura 5.24**).



Figura 5.24 Invernadero en batería A) tipo cenital y B) tipo túnel

Estos invernaderos también pueden combinarse en varios módulos separados entre sí, lo que actualmente se conoce como clúster de producción o polígonos (**Figura 5.25**). Como se concatenan varios módulos, podría pensarse que es difícil ventilarlos de manera natural, pero un factor que determina la efectividad o no del sistema de ventilación es la cercanía entre ellos.

Siguiendo la metodología descrita anteriormente, a partir de un invernadero real se generó una geometría en la que se respetan las dimensiones y características del sistema de ventilación, tales como posición y dimensión de las ventanas, laterales y cenitales (**Figura 5.26**).



Figura 5.25 Invernaderos multimodulares con la tecnología de clúster

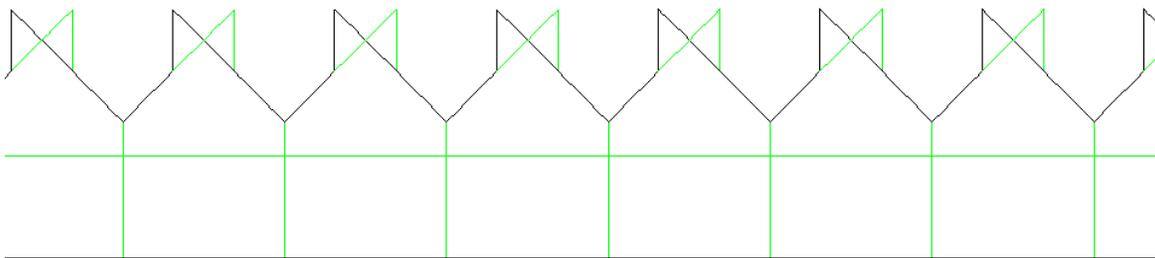


Figura 5.26 Geometría real del invernadero por modelar (10 naves) con ventilación lateral y cenital

Con el fin de aportar información relacionada con el sistema de ventilación en invernaderos modulares para mostrar las bondades de usar el sistema de clúster se colocaron cuatro módulos de diez naves cada uno, como se observa en la **Figura 5.27**. Después de establecer la geometría, se presenta el mallado de la misma, proceso que consiste en subdividir la geometría en un número finito de elementos en los cuales se aplican y resuelven las ecuaciones de transporte y momento descritas. Un aspecto a destacar es que, en aquellas posiciones donde se supone que ocurren los mayores cambios, se precisa una malla más fina, por ejemplo, en la zona de cultivo y las ventanas cenitales hay elementos más pequeños (**Figura 5.28**).



Figura 5.27 Representación de un polígono de invernaderos (clúster) de cuatro módulos con diez naves cada uno

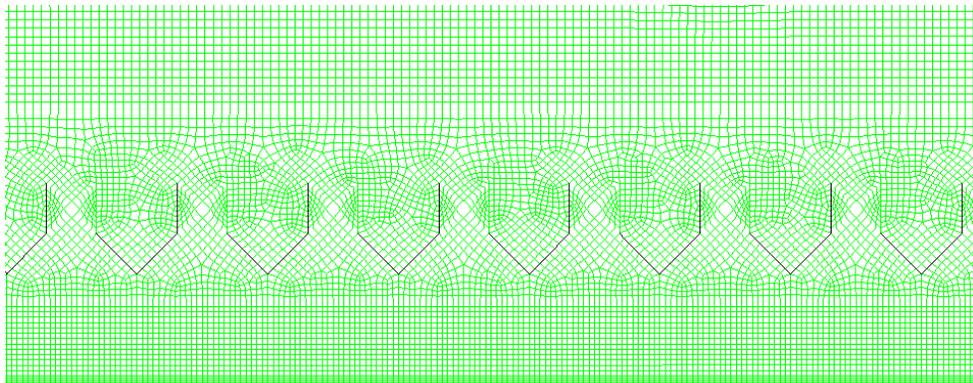


Figura 5.28 Mallado del módulo 1, ventanas cenitales y capilla del invernadero

Debido a que el ambiente del invernadero depende de las condiciones medioambientales exteriores, dicho polígono se inserta en un dominio computacional (**Figura 5.29**) en donde se colocan las condiciones de inicio o frontera a partir de las cuales se modela el interior del invernadero. Uno de los principales problemas al usar el CFD es que se requiere mucho tiempo para que una simulación pueda converger, debido al elevado número de celdas que resultan de un proceso de mallado. Se recomienda hacer el mallado tomando en cuenta la capacidad del ordenador en el cual se va a simular.

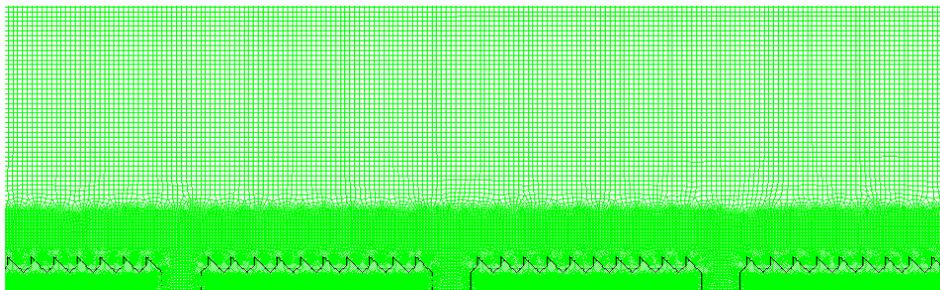


Figura 5.29 Modelo computacional por modelar

5.7.1 Modelo numérico (proceso)

El movimiento del fluido está basado en procesos físicos que se formulan en términos matemáticos, como una serie de ecuaciones en derivadas parciales para representar las leyes que gobiernan el flujo, particularmente si se considera un flujo de un fluido (aire) dentro del dominio $\Omega \in \mathbb{R}^n$ durante un intervalo $[0, t]$. La dinámica del flujo en cada punto x y en un instante específico t está determinado por las variables de estado, densidad de masa $\rho(x, t)$, el campo de velocidad $u(x, t)$ y su energía $e(x, t)$. Estas características están incluidas en las ecuaciones de Navier-Stokes, el sistema de ecuaciones a resolver mediante CFD. En este caso se ha utilizado la versión 6.3.26 del software comercial de Fluent® para el desarrollo de las simulaciones. Una vez importada la geometría, se adjudican valores a las características de frontera. Luego se establecen las hipótesis correspondientes para conseguir la solución (**Tabla 5.1**).

Tabla 5.1 Condiciones de inicio e hipótesis asumidas

Características de frontera	
Velocidad del viento	Constante 4 m s^{-1}
Tratamiento de medios porosos	Malla: Porous jump
Fuente de calor	Cultivo: Porous zone
	Constante desde el suelo, hipótesis de Boussinesq y activado el efecto de flotación en el modelo de turbulencia

5.8 Simulación de un invernadero tipo cenital de cuatro módulos (clústers) separados 8 m entre ellos

El invernadero tipo cenital es posiblemente el tipo que más se adapta a la climatología del país (Flores-Velázquez, 2010). El primer escenario de simulación es un clúster de cuatro módulos, cada uno con diez naves de tipo cenital; cuenta con ventilación lateral y cenital cubierta de malla porosa. De acuerdo con el análisis realizado por Cabrera *et al.* (2006) la malla que mejor evita el paso de la Bemisia tabaci es la de 23.8×11.9 con un diámetro de 0.24 m. La malla que mejor funciona ante una *Frankliniella occidentalis* es una de 27.2×13.6 con un diámetro del hilo de 0.19. Para el análisis de ventilación optamos por un rango en la reducción del flujo que oscila entre el 40 y 60 % (Cabrera *et al.*, 2006) motivo por el cual se

Consideraciones ambientales para el diseño agronómico de invernaderos típicos de México	5. Simulación para el diseño agronómico de invernaderos
---	---

optó por colocar malla en las ventanas cuyas características se exponen en la **Tabla 5.2**.

Tabla 5.2 Características de las mallas seleccionadas para simular la ventilación en Fluent®

Malla	Dimensiones (hilos cm-1)	Colocación en la estructura	Reducción (%)	Porosidad (ε)
Malla 1	19.8 x 10.2	Banda y techo	46	0.32

Como la mayoría de los organismos vivos, las plantas poseen sus propios mecanismos de regulación y de autoequilibrio mediante la respiración y la transpiración. En estos procesos que ocurren por las hojas la planta adapta el medio para mantener un ambiente adecuado para crecer y desarrollarse. Sin embargo, cuando el cultivo está recién plantado depende completamente de las condiciones externas y la capacidad del sistema de ventilación para adaptar dicho ambiente.

En este trabajo se plantea analizar el funcionamiento del sistema de ventilación cuando el cultivo está recién trasplantado, es decir, se simula un invernadero vacío. Diseñado con ventanas laterales, frontales y cenitales que pueden abrir hacia ambos lados, este tipo de invernadero es uno de los que más posibilidades ofrecen para el control del clima mediante la gestión de la ventilación natural que consiste en la adecuada combinación de apertura de ventanas. Debido a la amplia posibilidad de combinar la apertura de ventanas, es un invernadero que puede aportar resultados adecuados para una diversa gama de climas. Su construcción robusta y aislada del exterior, permiten también un funcionamiento seguro y un máximo control del clima interior.

5.9 Invernadero tipo cenital de 20 naves en batería (baticenital) y con un obstáculo

El modelo numérico fue construido con 20 capillas y un módulo de 4 capillas, en la dirección del viento antes de impactar el invernadero multimodular. Con el fin de simular configuraciones, está dotado de ventanas cenitales capaces de abrirse hacia ambos lados, y el mismo techo puede ser removido numéricamente hablando.

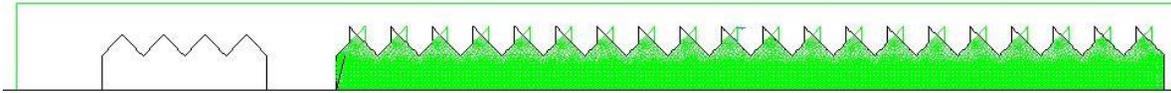


Figura 5.30 Invernadero tipo cenital de 20 naves en batería

5.10 Representación del ambiente del invernadero simulado

Una situación muy común en la horticultura mexicana es la construcción de un módulo con varias naves o la construcción de varios módulos apenas separados entre sí. A continuación se muestra el comportamiento del sistema de ventilación natural en la construcción de un polígono (clúster) de cuatro módulos de invernaderos de 10 naves cada una (4.8 m cada nave). Se analiza el sistema de ventilación natural, constituido por las ventanas laterales y cenitales.

5.11 Clúster de cuatro módulos

Se muestra el movimiento del aire y la forma de ventilar que aporta el sistema de ventilación natural, que consiste en la totalidad de ventanas cenitales (cuatro módulos) abiertas de frente al viento y ambas frontales, es decir de entrada y de salida de cada uno de los módulos. La **Figura 5.31** muestra las direcciones y velocidades del viento (los colores muestran la magnitud [m s^{-1}]) que se genera en los 4 módulos.

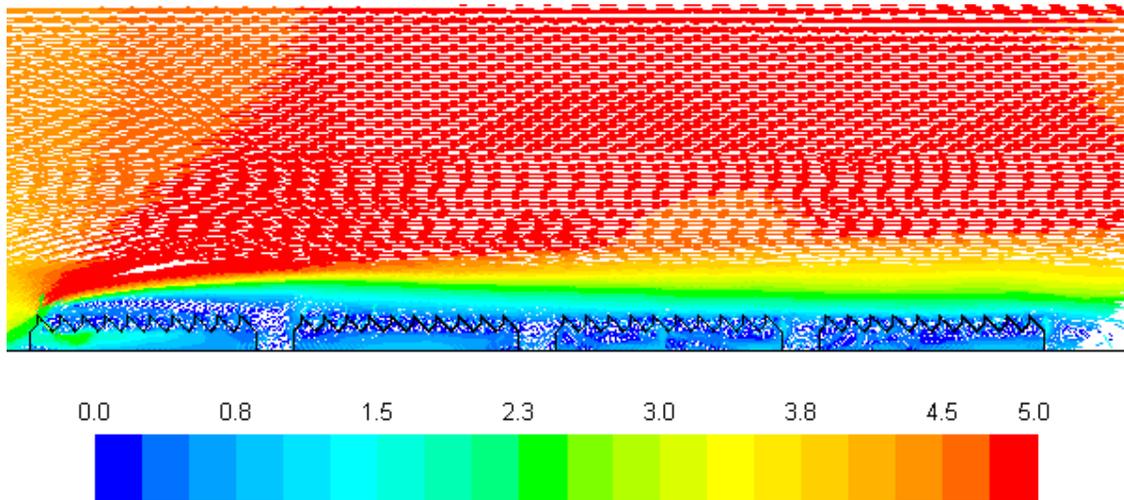


Figura 5.31 Distribución espacial del flujo de aire en la interacción interior/exterior del polígono, cuando en el exterior se simulan 4 m s^{-1}

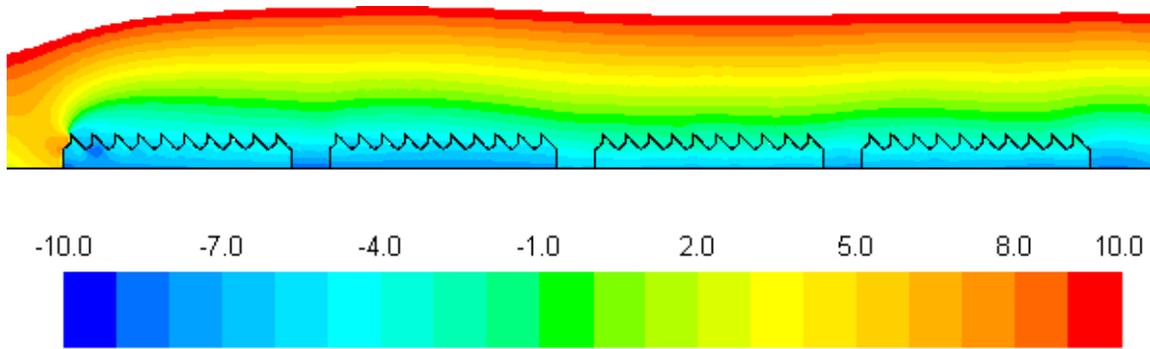


Figura 5.32 Diferencia de presiones estática (Pa) que origina los patrones de ventilación del caso expuesto

El choque del aire contra el primer módulo provoca una aceleración que determina los patrones expuestos. En la **Figura 5.32** 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 influye en la entrada del aire, tal como se muestra en la **Figura 5.33**. 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.

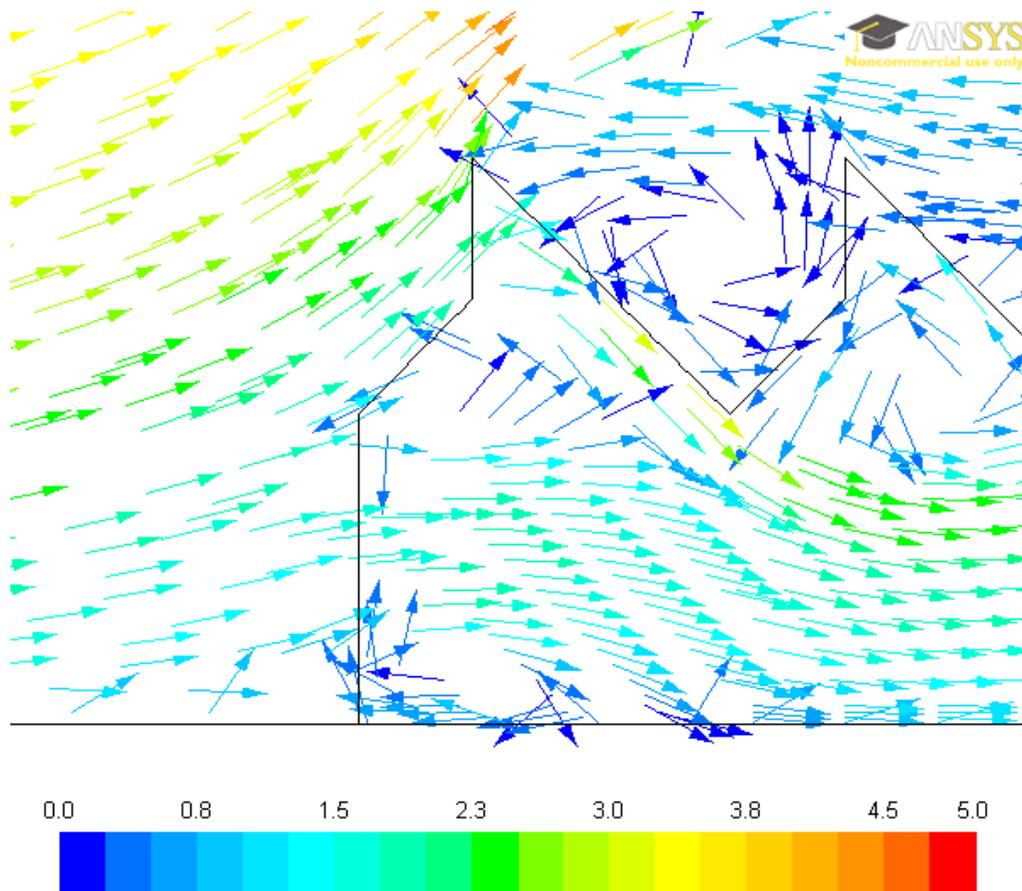


Figura 5.33 Detalle del movimiento del aire (velocidad del viento m s^{-1}) en la entrada del polígono (nave 1 módulo I)

Un aspecto importante es la separación adecuada entre los módulos, ya que generalmente en esta zona se tiene mayor dificultad para remover el aire, debido al choque de fuerzas que ocurre en esta zona. Como se muestra en la **Figura 5.34** en ambos casos se aprecia una zona de turbulencia que impide el libre flujo del aire. Pero no solo en las interacciones entre los módulos pueden encontrarse problemas debido al choque de flujos, sino también dentro de ellos, como en el caso del módulo III, donde el encuentro de fuerzas ocasiona una zona de baja velocidad.

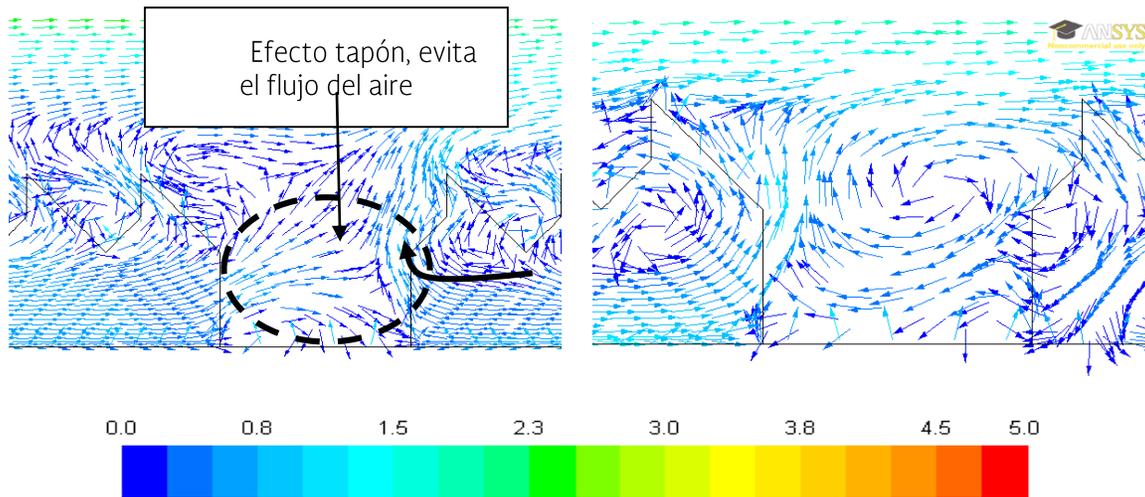


Figura 5.34 Zona de fluctuaciones al final de M1 inicio del M2 (A) y su similar entre el M3 y M4

La **Figura 5.35** 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.

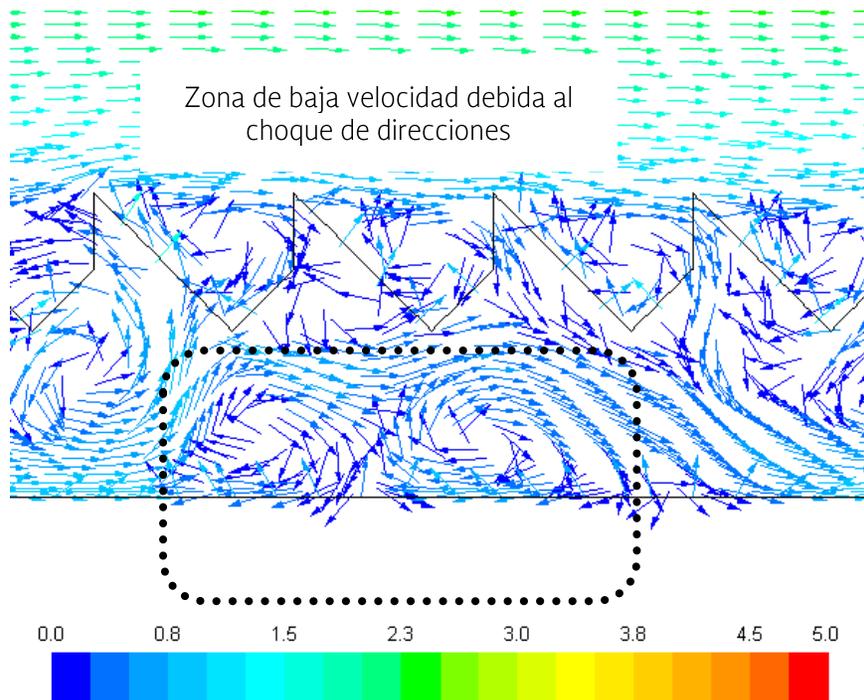


Figura 5.35 Zona de baja velocidad en el Modulo 3 naves 4-5

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 5.36**. Se ha establecido 300 K como condición de frontera, que es la temperatura exterior. 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.

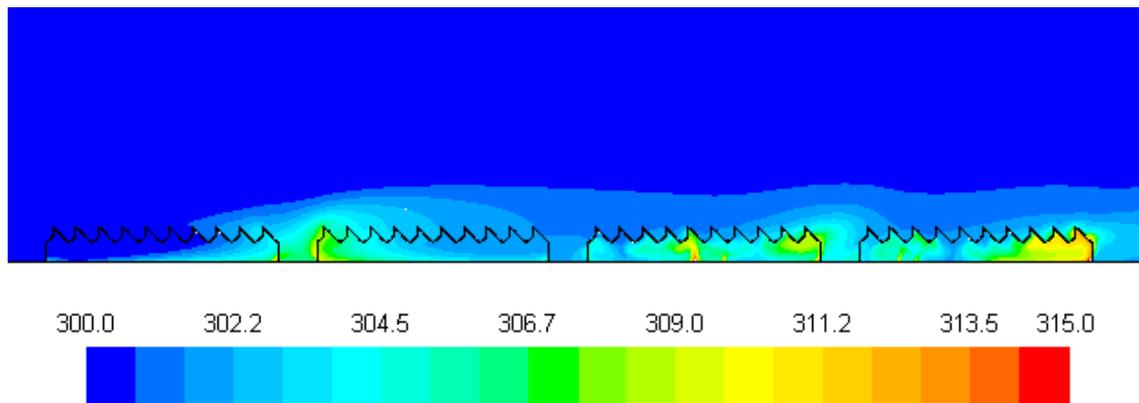


Figura 5.36 Distribución espacial de temperaturas (K) en los cuatro módulos y su interacción con el exterior

En las condiciones de frontera y apertura de ventanas se aprecian algunos puntos críticos desde el punto de vista térmico, como en el caso de la interacción salida/entrada de los módulos I y II, la zona central del módulo III y la salida del módulo IV mostrada en la **Figura 5.37** en el mismo orden en que se menciona.

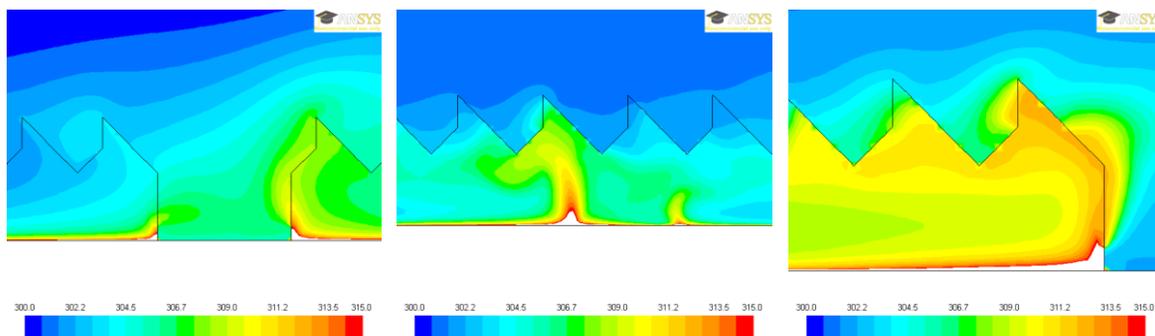


Figura 5.37 Detalles de las zonas calientes escenario cero

Los detalles de las zonas calientes muestran gradientes que superan los 15 K respecto a la temperatura ambiental, lo que sugiere que el sistema de ventilación no es el más adecuado. Mejorar este aspecto no implica un costo adicional, sino que basta con identificar las ventanas que deben cerrarse o abrirse para generar las condiciones descritas. Se ha insistido en la importancia del sistema de ventilación pero también debe tomarse en cuenta 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 debe manejarse para obtener los mejores resultados.

Uno de los grandes problemas actuales es el ahorro en los insumos, principalmente en el uso de energías fósiles. Con los escenarios presentados en la **Figura 5.38** se podría considerar que es necesario colocar ventiladores o algún otro sistema de enfriamiento que puede repercutir en el ambiente o ser costoso, pero a veces basta con modificar la apertura de ventanas. A continuación se hacen algunas modificaciones en la apertura de ventanas y se muestran 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. En el primer caso expuesto se colocaron una serie de barreras (deflectores) en el módulo III con el fin de evitar esa zona de choque y el consecuente incremento de temperatura (**Figura 5.38**).

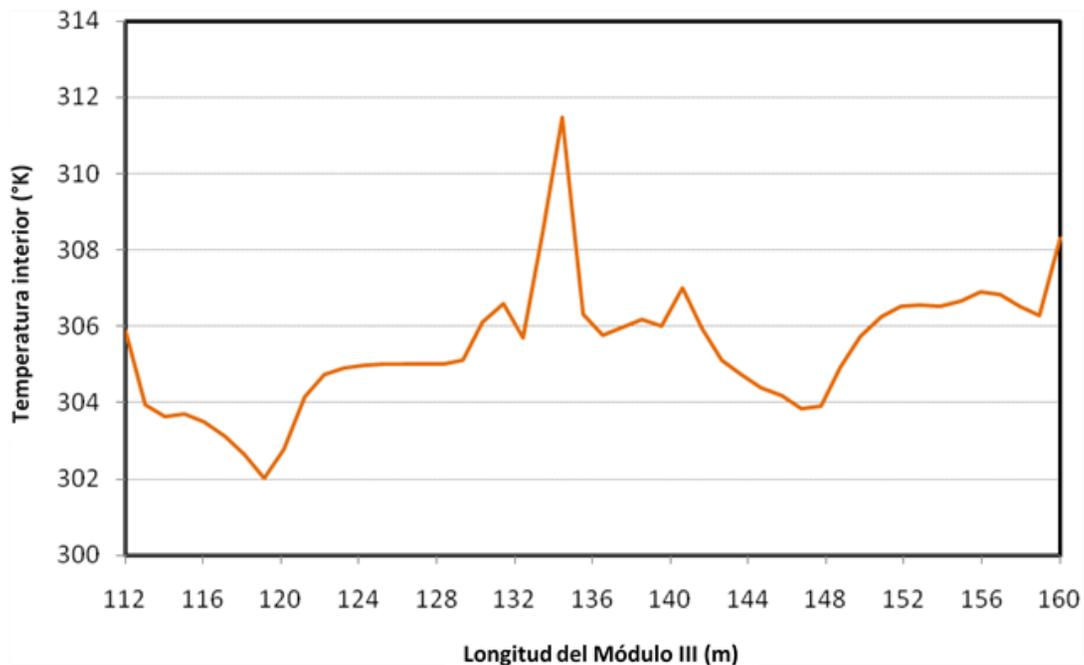


Figura 5.38 Perfil de temperaturas en el módulo III (caso inicial)

5.11.1 Caso 1

En este caso se dejaron las ventanas cenitales abiertas a barlovento (de frente al viento) y las laterales abiertas. Para moderar la temperatura y evitar las altas velocidades del viento en el cultivo se colocaron deflectores en la entrada del módulo I y en las naves 3, 4, 5 y 6 del módulo III como se indica en la **Figura 5.39**.



Figura 5.39 Modificaciones al sistema de ventilación para mejorar la temperatura en el módulo III

El análisis del clima interior de un invernadero resulta muy complejo debido a la relación entre la mayoría de los factores medioambientales y que en conjunto determinan el clima. Esa relación inherente provoca que pequeños cambios en uno de los factores modifique otros más. La **Figura 5.40** muestra las variaciones de velocidad y dirección del viento que se derivan de las modificaciones realizadas al sistema de ventilación con el uso de deflectores para evitar la bolsa de calor localizada en la nave 3 del polígono de invernaderos.

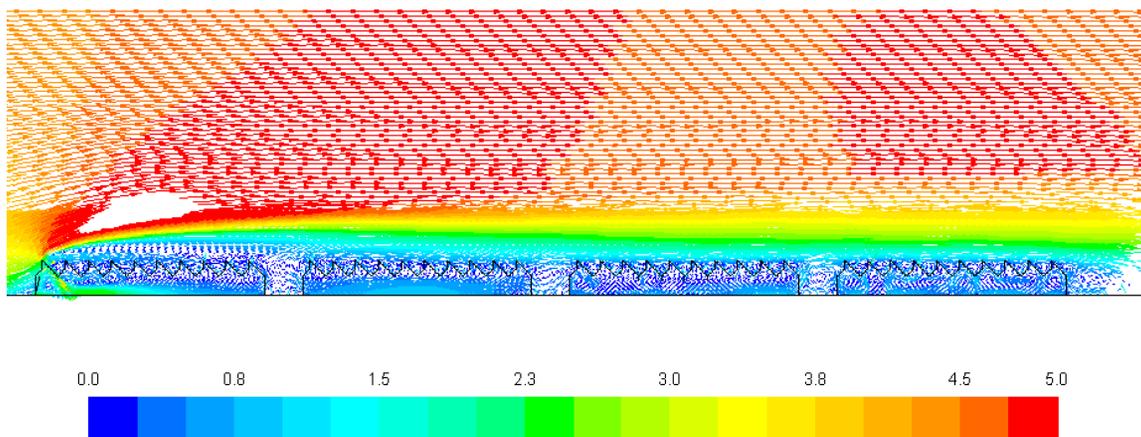


Figura 5.40 Características de los vectores de viento coloreados por magnitud de velocidad (m s^{-1})

Se colocó un deflector que lleva el aire hacia la ventana cenital con el fin de proporcionar mayor velocidad de entrada que permita mover una mayor carga térmica (**Figura 5.41**).

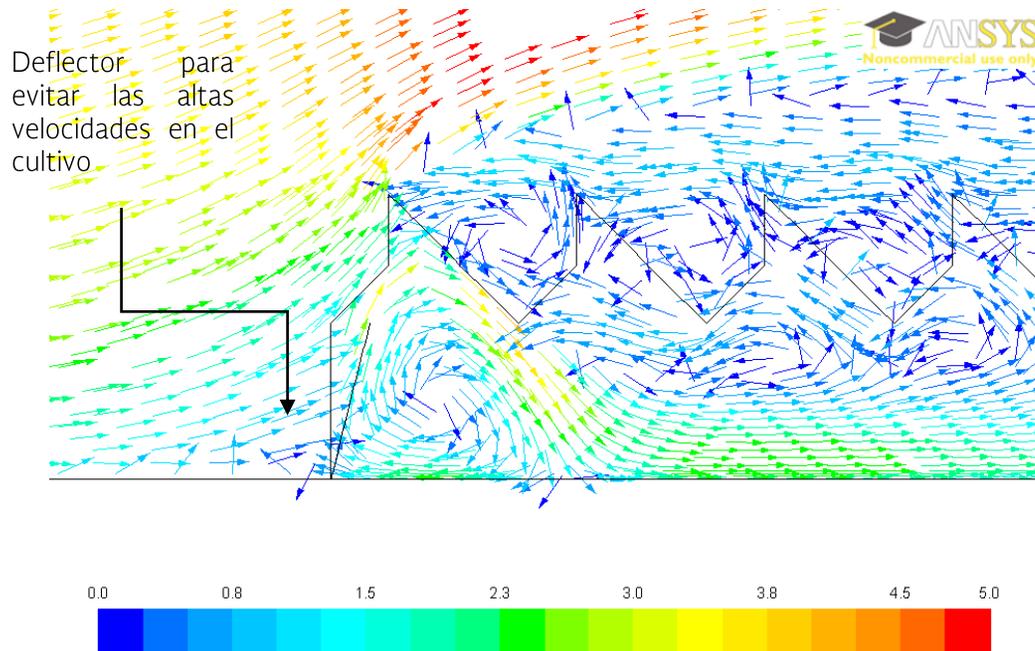


Figura 5.41 Detalle de los vectores de velocidad del viento en la entrada del primer módulo

Como regla general (ASAE, 1997) se establece que en un cultivo la velocidad del viento no debe ser mayor a 1 ms^{-1} , debido a los problemas con la transpiración del cultivo, que relaciona al viento con la capacidad de apertura de los estomas. Con esta desviación se reduce el impacto directo del aire en las primeras líneas de cultivo y se favorece una mayor uniformidad, como lo muestra la **Figura 5.42**.

En cuanto al uso de los deflectores en las naves centrales del módulo III, la **Figura 5.43** muestra una mejor distribución de los vientos a lo largo del módulo, específicamente en la zona central de este módulo. Se han eliminado las zonas de fluctuaciones debido al choque del aire.

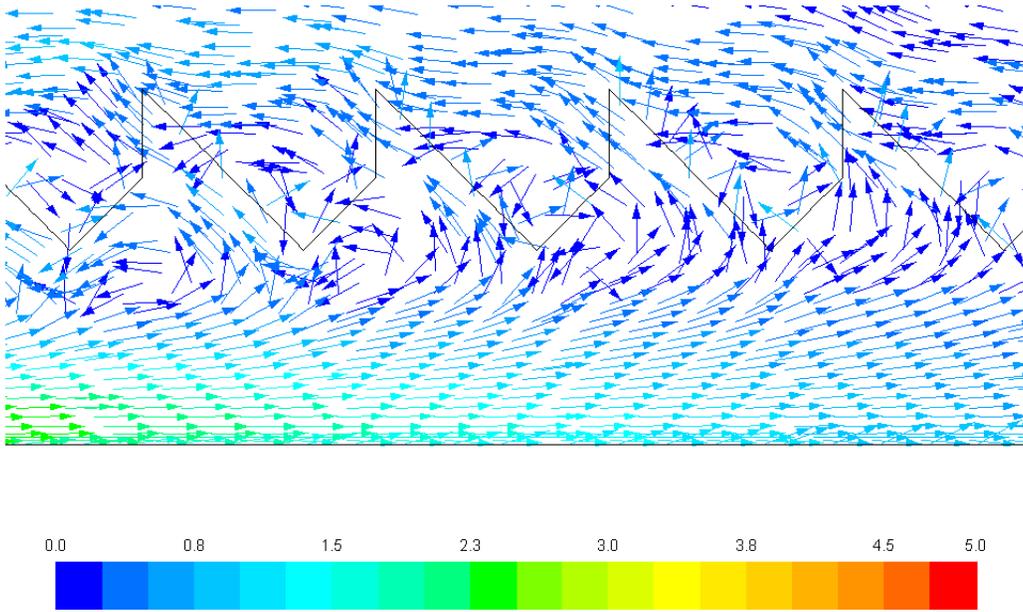


Figura 5.42 Detalle de los vectores del viento en las naves centrales del módulo I

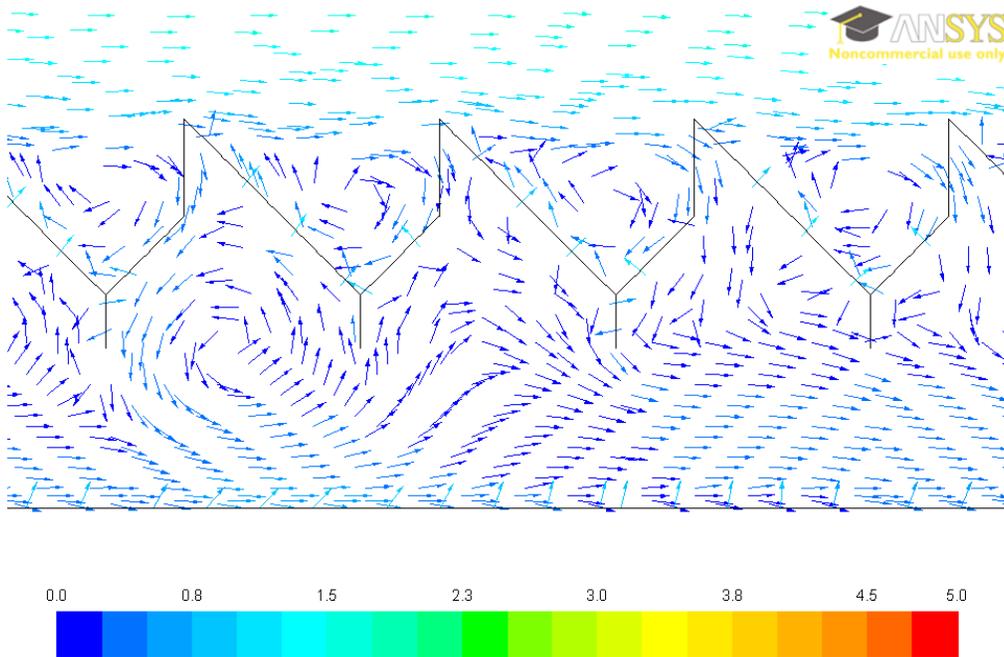


Figura 5.43 Detalle de los vectores de viento del módulo III en las naves con deflectores

En la **Figura 5.44** se muestra el comportamiento térmico de acuerdo con las direcciones y velocidades del viento. La escala indica en azul las temperaturas ambientales y en rojo los mayores gradientes. Se observa una bolsa de calor al final del primer módulo e inicio del segundo, que aunque es más crítica hacia afuera, impacta los primeros invernaderos del módulo II. Una situación similar es la que se observa hacia el final del módulo III, en la que el aire fluye difícilmente provocando gradientes térmicos superiores a los 10 K.

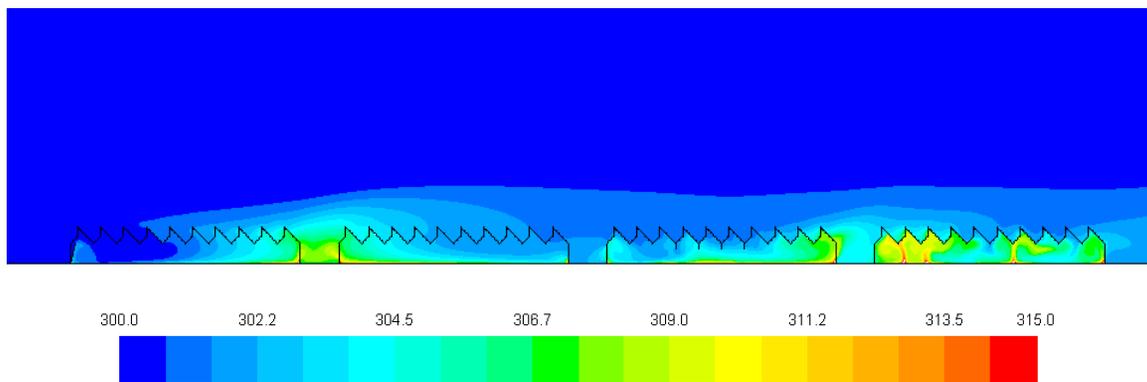


Figura 5.44 Comportamiento térmico (K) de los cuatro módulos como respuesta al sistema de ventilación

La **Figura 5.45** muestra un detalle de las naves centrales del módulo III donde se han colocado deflectores de 1 m de largo, lo que permite una mejor distribución y por tanto, una mejora térmica. Uno de los puntos críticos era el centro del tercer módulo (**Figura 5.38**), ya que con excepción de las primeras tres naves, el resto del módulo mantiene temperaturas no favorables para los cultivos. Esta diferencia en la distribución de temperaturas implica un manejo complejo del cultivo, pues al ser tan marcadas, el consumo transpirativo será diferente igual que el desbalance nutritivo y esto puede afectar seriamente el desarrollo de la cosecha.

Finalmente, en la **Figura 5.46** se observa el abatimiento de las altas temperaturas que se mostraban en el caso inicial (**Figura 5.39**). El gradiente térmico se ha suavizado y las máximas variaciones son de 6 K, las más altas temperaturas al final del módulo.

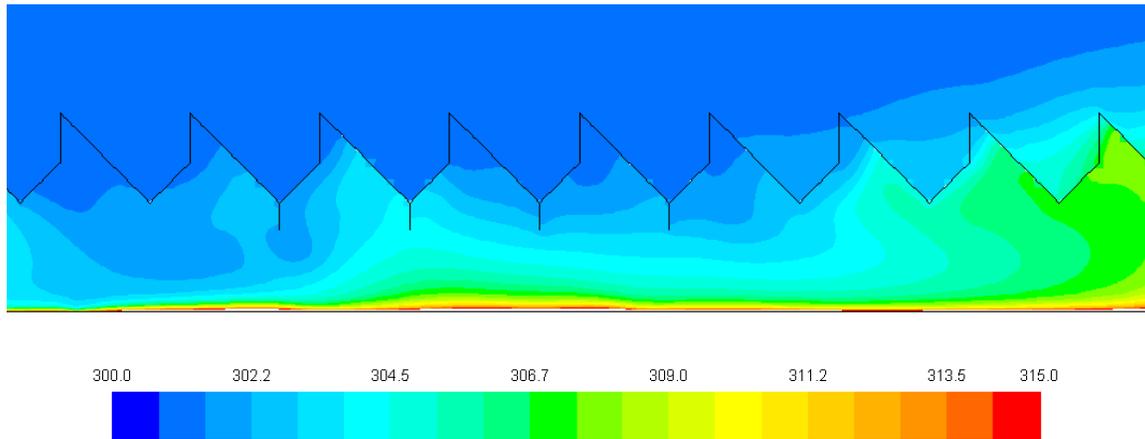


Figura 5.45 Detalle de los contornos de temperatura (K) al final del módulo 1 y el inicio de módulo II

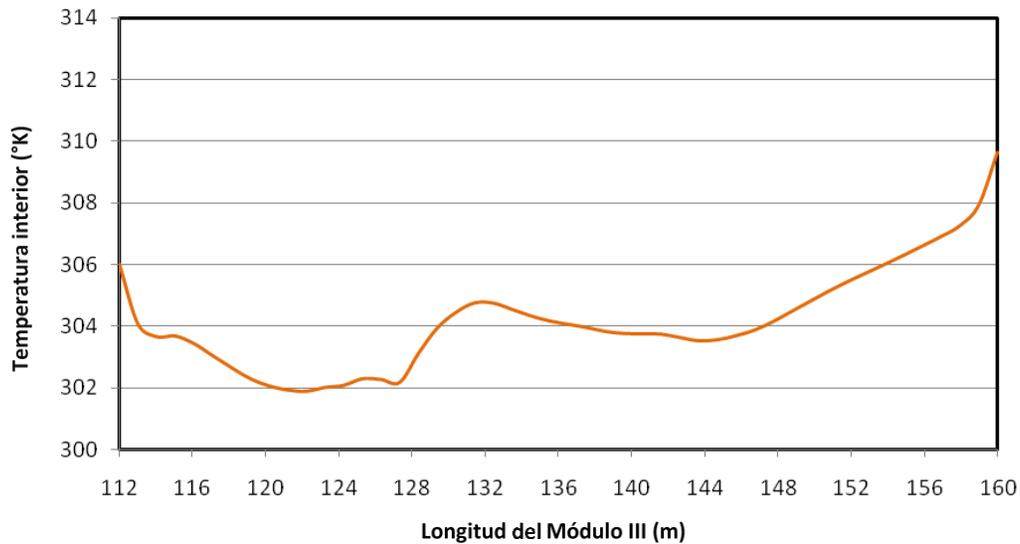


Figura 5.46 Perfil de temperaturas en el módulo III (Caso 1)

Como se observa, mediante la gestión en la apertura de ventanas es posible modificar el patrón de ventilación mediante un cambio en el sentido y posición de las ventanas. Aunque el escenario simulado aún presenta problemas para aportar una situación de confort a los cultivos, sobre todo en el último módulo, se demuestra que se puede representar la gestión que pretende mejorar esta condición de forma computacional (numérica).

5.11.2 Caso 2

En este caso se dejan todas las ventanas cenitales abiertas a barlovento y se intercambia la cubierta de plástico por una cubierta porosa en el módulo III y IV para intentar resolver el problema de las temperaturas altas (**Figura 5.40**). Se ponen deflectores en las naves 4 a 7 del módulo IV, pero además se abre una ventana enrollable de las naves 4 a 7 de los módulos III y IV. Con todas las ventanas abiertas de frente al viento, y debido a la bolsa de calor que se observa al final del módulo III y parte central de la IV, se cambia la parte baja del techo de plástico por malla de la misma porosidad de las cenitales. Se colocan deflectores entre las naves 4 a 7. La **Figura 5.47** muestra un panorama general de las velocidades del viento; se observa una mejora tanto en la distribución como en las velocidades del viento en algunas partes del módulo III y IV, como lo muestra la **Figura 5.48**.

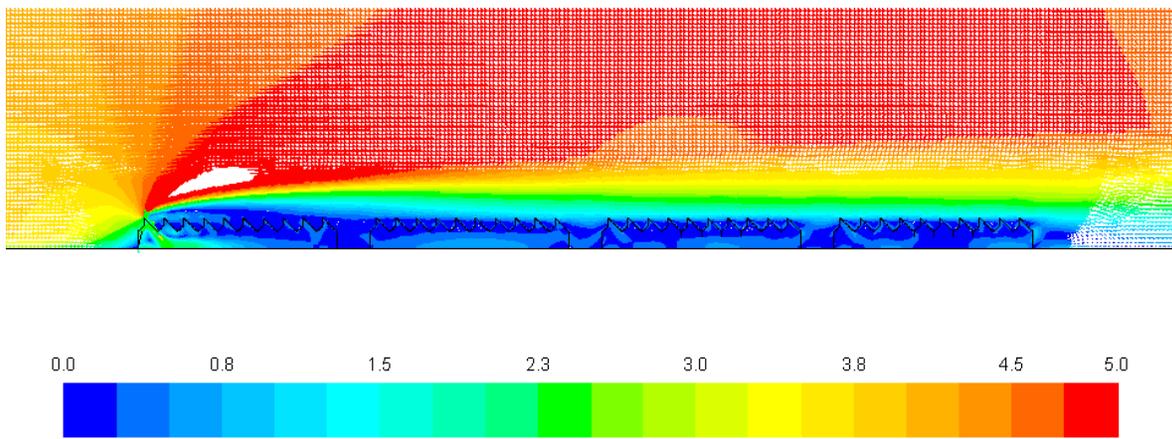


Figura 5.47 Vectores de velocidad del viento (m s^{-1}) coloreados por magnitud

Los deflectores permiten conducir el viento por la parte baja del invernadero (**Figura 5.48**), lo que aunado a la ventana enrollable al inicio de la cumbre en las naves centrales favorece el intercambio de aire. Una mayor área de intercambio de aire que favorezca la distribución de este en el interior del invernadero evita una sobre elevación de la temperatura, lo cual se muestra de manera gráfica en la **Figura 5.49**, específicamente en los módulos III y IV, donde se hicieron las gestiones para una mejor ventilación. El módulo III (**Figura 5.50**) presenta una mejor distribución de temperaturas en comparación con el sistema de ventilación original.

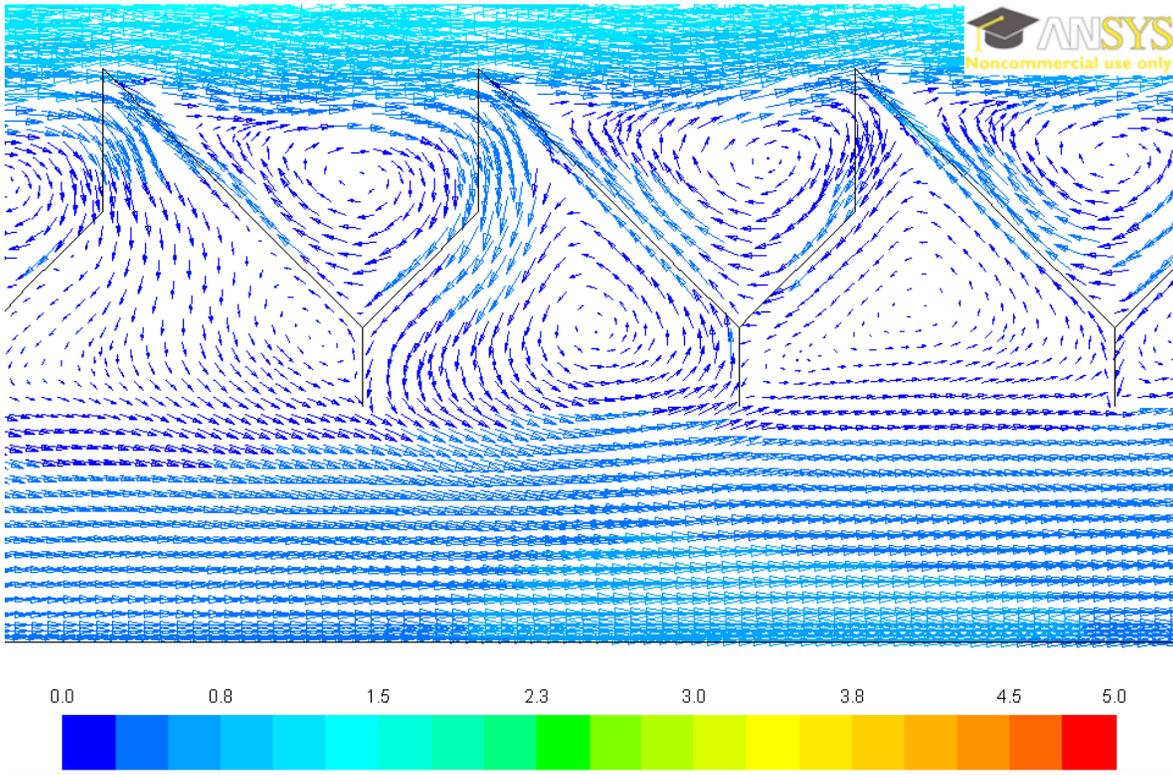


Figura 5.48 Detalle de los vectores de viento en las naves con deflectores y ventana enrollable y cenital abierta

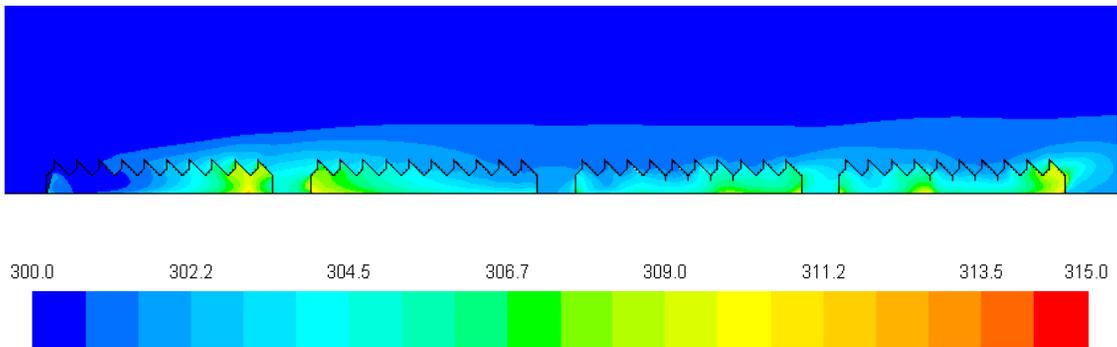


Figura 5.49 Perfiles de temperatura en los cuatro módulos (K)

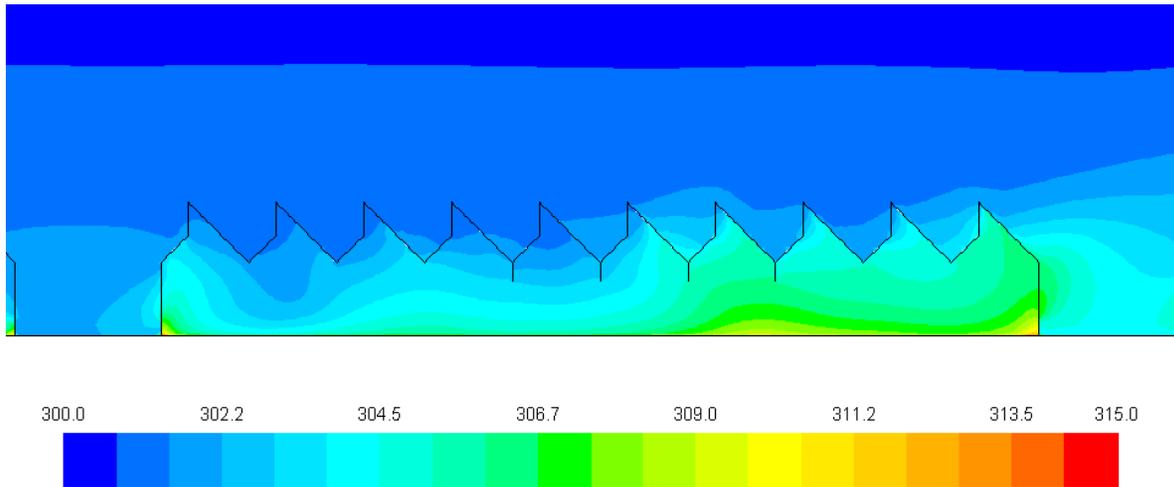


Figura 5.50 Detalle del módulo III

Los valores escalares de temperatura (K) de los módulos III y IV pueden verse en la **Figura 5.51**, donde se muestra un abatimiento del gradiente de temperatura que oscila entre los 5 K en ambos módulos. La diferencia básica es que en el módulo III el aire entra con una temperatura de 304 K y en el IV, a 306 K, por lo que se plantea la hipótesis de que además del sistema de ventilación natural es factible buscar alternativas como la disposición de la apertura de ventanas o el uso de deflectores para ventilar mejor entre los módulos.

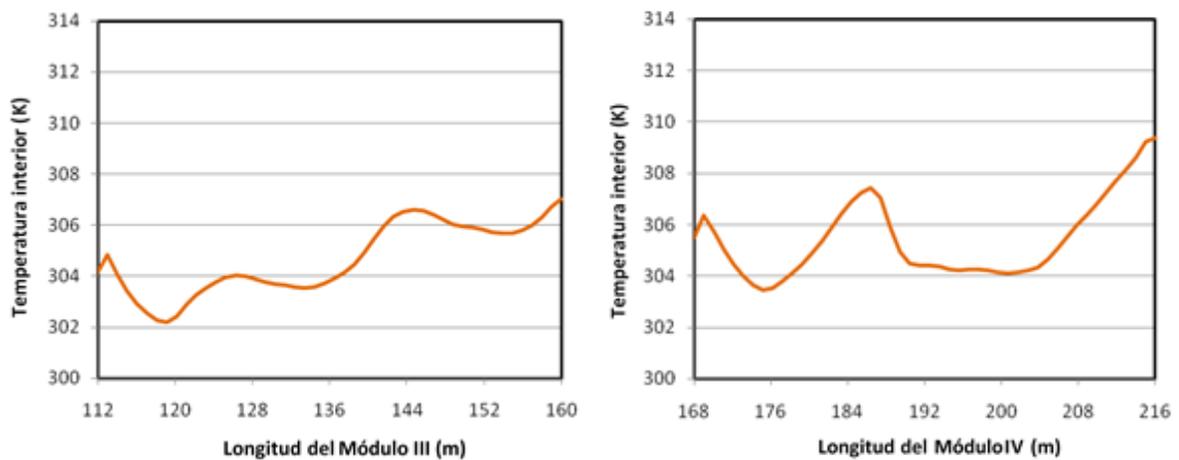


Figura 5.51 Perfil escalar de temperatura (K) en los módulos III y IV

5.11.3 Caso 3

Este caso mantiene las mismas condiciones en los módulos I y II; en los módulos III y IV se intercambia la cubierta de plástico por malla antiinsectos (16.2*10.2) en la parte que da de frente al viento. Algunos investigadores (Montero *et al.*, 2006) han encontrado una relación entre el área de ventilación y el área cultivada que favorece el intercambio de aire. Otra de las posibilidades cuando se tiene un alto gradiente térmico es intercambiar la cubierta de plástico por una cubierta porosa. Los resultados se muestran a continuación.

En la **Figura 5.52** se puede observar que aun cuando las velocidades del viento por encima de los módulos III y IV son cercanas a los 3 m s^{-1} , dentro del invernadero siguen siendo bajas, pero además, definitivamente es el primer módulo el que está condicionando la ventilación del resto de ellos.

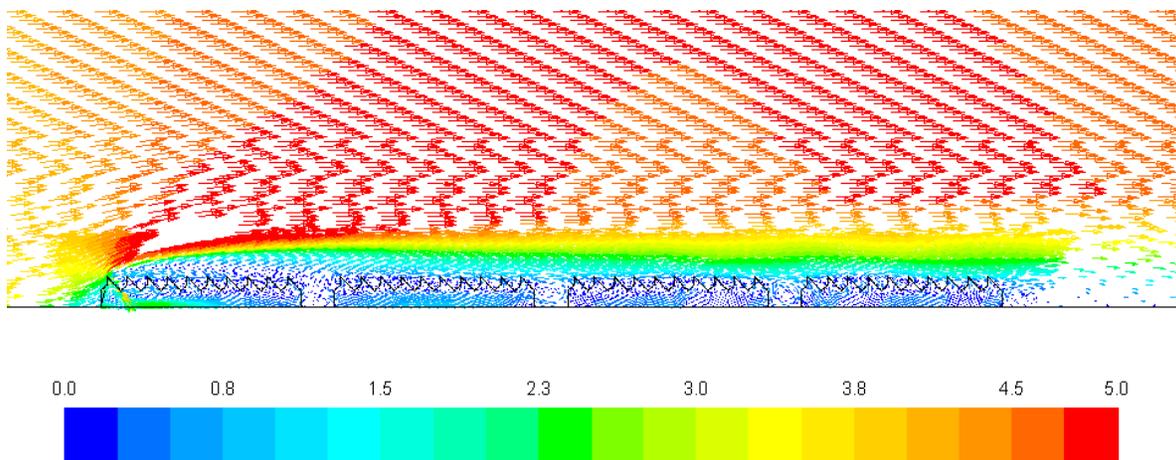


Figura 5.52 Vectores de velocidad del viento (m s^{-1}) en los cuatro módulos

En general, con la colocación de una malla porosa en lugar de una cubierta plástica el intercambio de aire se favorece. No obstante, los patrones de ventilación en el exterior del invernadero también influyen y llegan a impedir el flujo libre del aire. Como se observa en la **Figura 5.53**, la interacción entre los módulos y los vientos en la parte alta del invernadero son factores que también influyen en la ventilación.

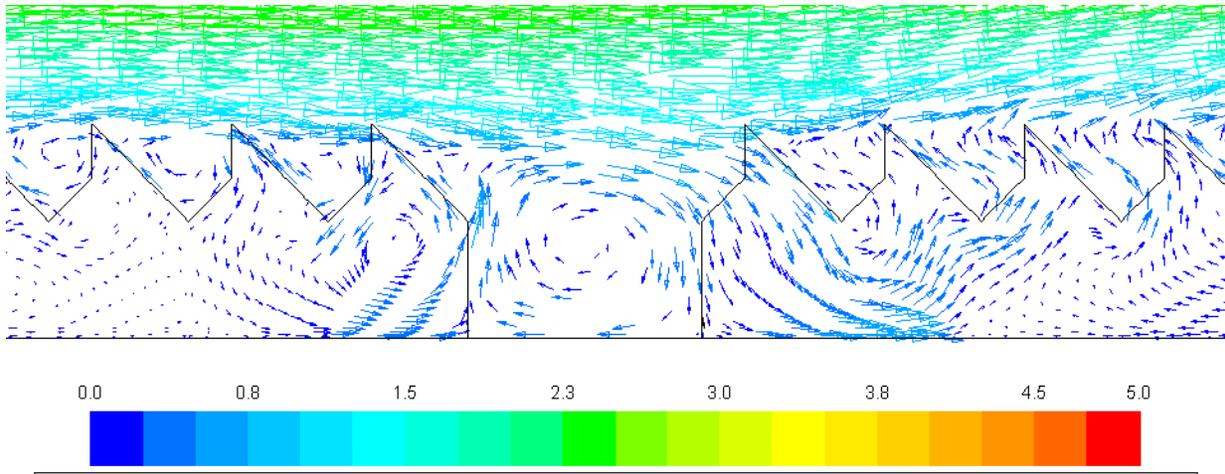


Figura 5.53 Detalle de los módulo III y IV que muestran dificultades en el flujo de aire

A pesar de los inconvenientes expuestos anteriormente, la mayoría de los módulos presenta una distribución térmica relativamente uniforme (**Figura 5.54**), ya que en ninguno de los módulos se superan los 8 K de diferencia (**Figura 5.55**).

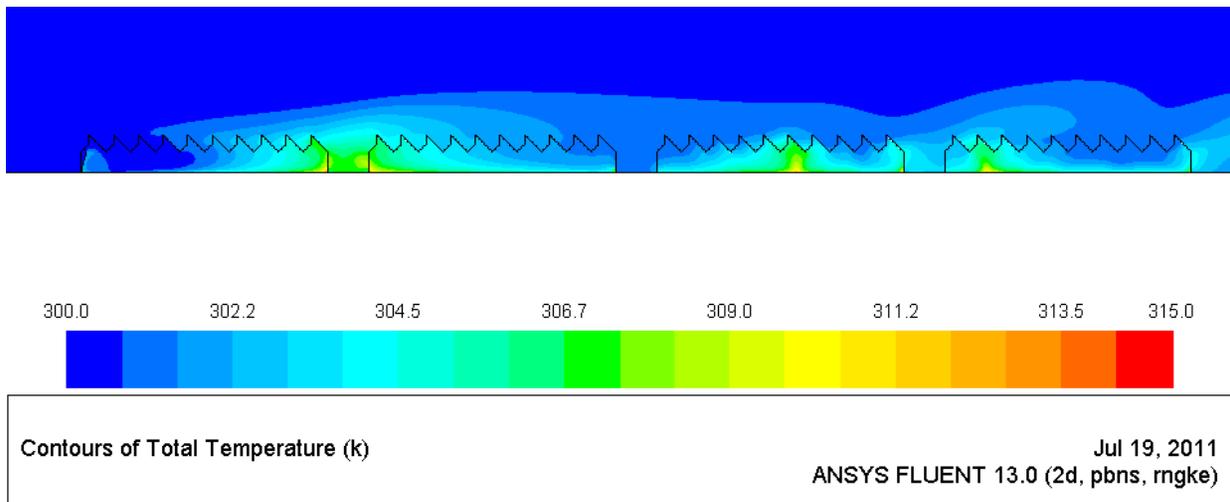


Figura 5.54 Vista en perfil de las temperaturas (K) en los cuatro módulos

Con el esquema de ventilación planteado hay bolsas de calor puntuales con altas temperaturas debido a una dificultad para remover el aire en esa zona (**Figura 5.55**), lo que indica una afectación del aire en las zonas periféricas a los módulos. Por ejemplo, la salida del aire en el módulo I tiene una temperatura de 308 K, y es este aire el que entra al módulo II; sin embargo, a medida que se va mezclando con el aire que viene del lado opuesto, la temperatura disminuye. El caso contrario ocurre al final del módulo III, de donde el aire sale con una temperatura de 302 K, pero en el centro del módulo III hay una bolsa de calor por el choque del aire que converge en este punto.

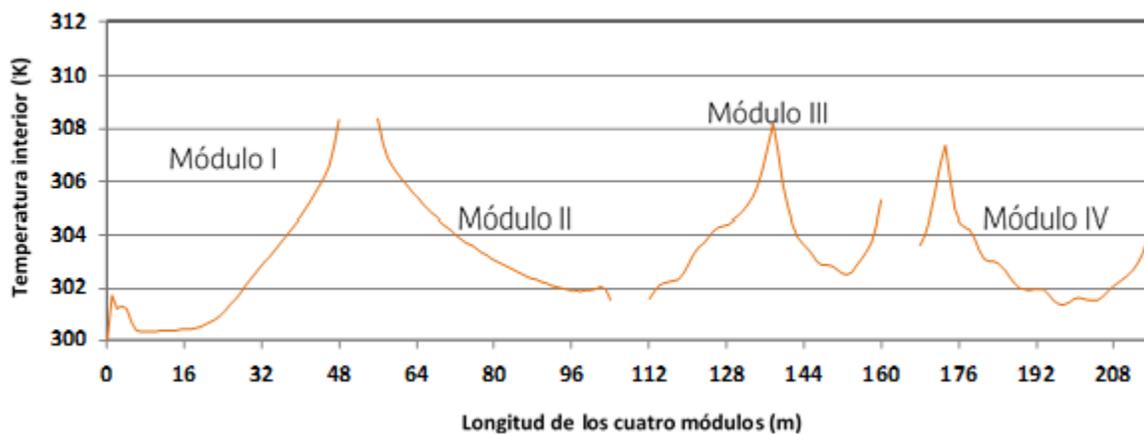


Figura 5.55 Perfil escalar de temperaturas (K) en los cuatro módulos

A partir de estas simulaciones se puede plantear las hipótesis de que el sistema de ventilación natural depende en gran medida de la velocidad del viento exterior, de la separación entre los módulos, del choque del aire contra el primer invernadero y de la distribución de presiones a lo largo de dichos módulos. La **Figura 5.56** muestra que el módulo III genera menor diferencia de presiones, y por lo tanto presenta una mayor dificultad en el intercambio de aire, aun cuando haya un área mayor de intercambio.

Para que haya flujo de aire deben existir las condiciones mínimas necesarias de presión y temperatura, entonces el esquema de ventilación seleccionado puede mejorar la tasa de ventilación. Sin embargo, no siempre existen las condiciones adecuadas para el sistema de ventilación, entonces es necesario ayudar a que fluya el viento. Muchas veces los mismos invernaderos adjuntos pueden convertirse en obstáculos que dificultan el mejor funcionamiento del sistema de ventilación.

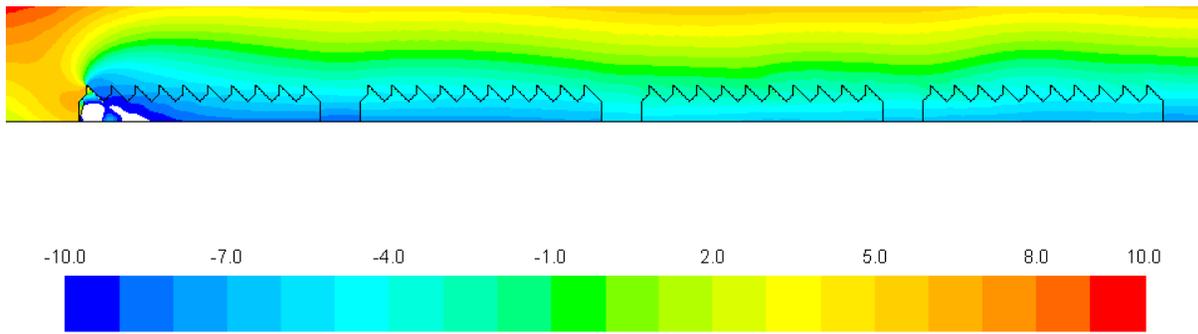


Figura 5.56 Distribución de presiones resultado del esquema de ventilación seleccionado

5.11.4 Caso 4

En este escenario los cuatro módulos han sido modificados atendiendo a patrones de viento observados en los casos anteriores. Por ejemplo, debido a que el primer contacto del viento con los invernaderos en gran medida determina el patrón de supresiones que favorece el intercambio del aire, en este nuevo esquema, en el módulo I se mantienen abiertas la ventana lateral y la ventana cenital de la primera nave con el fin de captar la mayor cantidad de aire. Posteriormente se cierran las ventanas cenitales de las naves 2 a 5 con el fin de que ese aire fluya hacia el final del invernadero, y se invierte la orientación de la ventana cenital de la última nave (**Figura 5.57**).

El espacio entre los módulos I y II provoca una zona de turbulencia que dificulta el movimiento del aire en esta zona. La hipótesis de mejora planteada en el presente esquema consiste en colocar una pantalla de plástico a la mitad de ambos módulos (4 m), con lo cual se pretende evitar que el aire caliente y húmedo que sale del módulo I sea el que entre al módulo II (**Figura 5.57**).

El aire que no puede entrar por el primer módulo se eleva y desciende hasta el final del segundo módulo, y el aire entra por el final de este y se invierte el sentido del flujo en el interior del invernadero, por lo que se realizan algunas adecuaciones. Como se muestra en la **Figura 5.57**, se coloca una ventana de mariposa en la nave 7 porque es una zona de entrada y salida de aire. Para favorecer que el aire se mezcle se cierran las ventanas de las naves 3 y 4. El resto de las ventanas cenitales y laterales queda sin cambio.

En el módulo III se dejan las ventanas cenitales abiertas de frente al viento y se coloca un deflector en la interacción de las naves centrales (4 a 6), pero además

se invierte la apertura de la ventana cenital de la nave 10 para hacer que succione el aire entrante. Finalmente, en el módulo IV, además de invertir también la ventana cenital de la nave 10, se coloca una ventana de mariposa, es decir, se abren las ventanas cenitales hacia ambas direcciones de las naves 4, 5 y 7. El resto de las ventanas permanece sin variaciones (**Figura 5.57**).

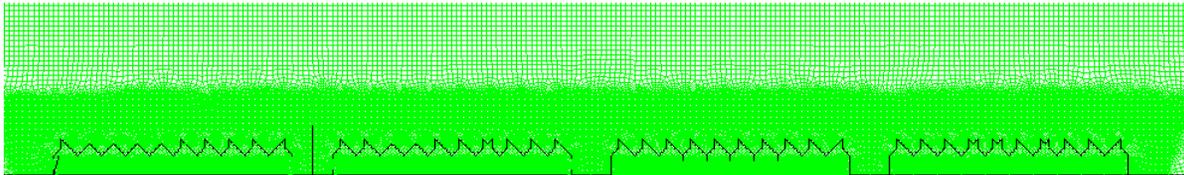


Figura 5.57 Gestión del sistema de ventanas y dispositivos móviles

La **Figura 5.58** muestra una mejor distribución de presiones a lo largo del polígono. La diferencia de presiones es uno de los principales motores del movimiento del aire; en esta figura se observa una distribución más uniforme.

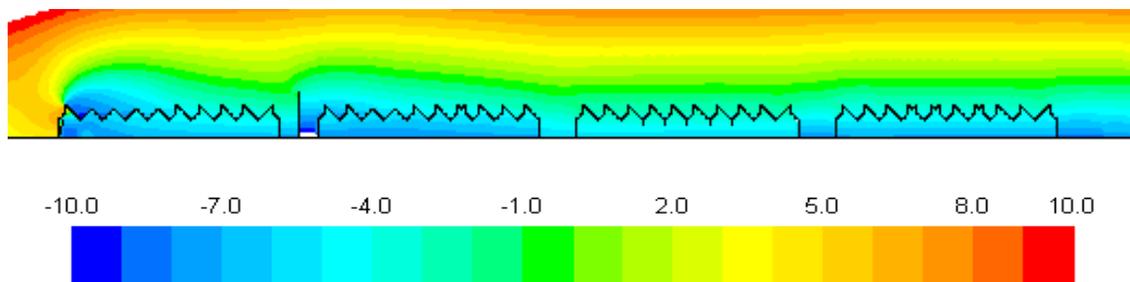


Figura 5.58 Distribución de presiones estáticas (Pa) en los cuatro módulos

Como resultado de las distintas variaciones en cuanto al cierre y apertura de ventanas, el polígono recibe entradas y salidas irregulares de aire. En la **Figura 5.59** se puede notar que en los módulos I y II el viento se distribuye de manera más uniforme que en los módulos III y IV. Hay que resaltar que el funcionamiento general del sistema de ventilación está intrínsecamente relacionado y que independientemente de dónde se hagan las adecuaciones, estas repercuten en el resto del polígono.

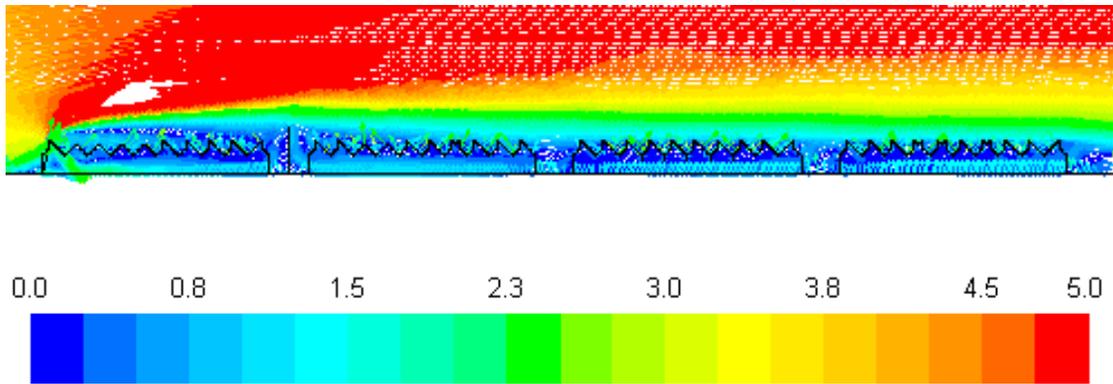


Figura 5.59 Distribución general de los vectores de viento coloreado por magnitud (m s^{-1})

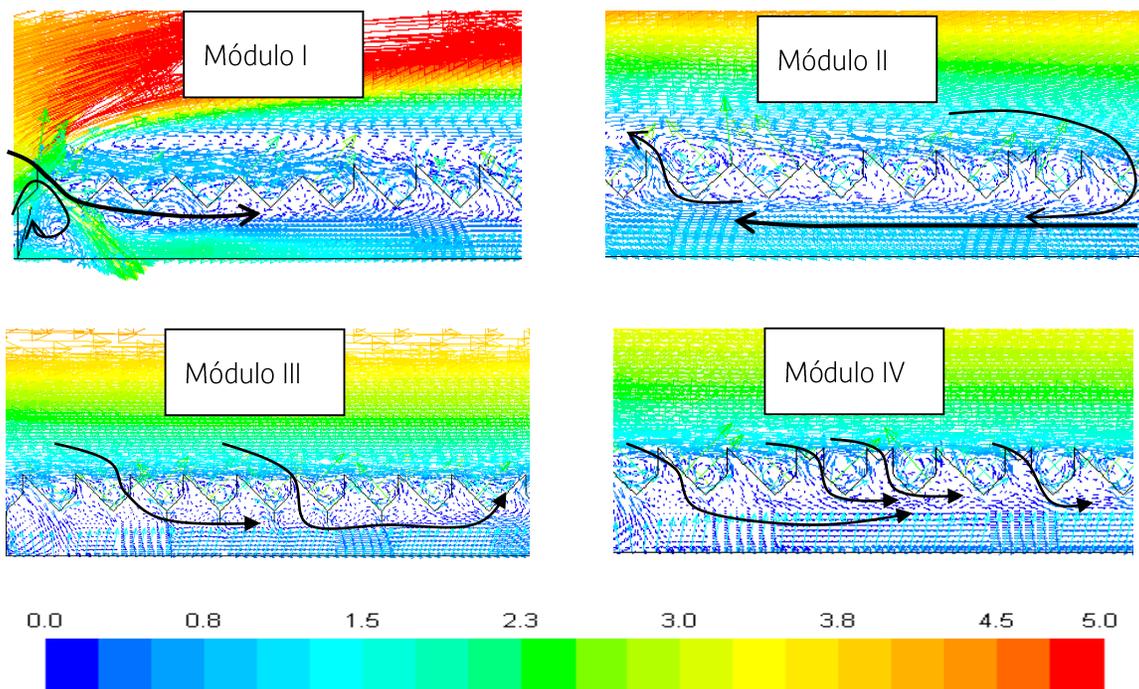


Figura 5.60 Detalle del perfil del viento coloreado por magnitud de velocidad (m s^{-1}) en los cuatro módulos

La **Figura 5.60** muestra a mayor detalle el patrón de flujo de aire en el interior y exterior de los módulos. El cierre de las ventanas en los módulos I y II aumenta el flujo a algunas naves más. Los deflectores en el módulo III permiten bajar los flujos

hasta la zona de cultivo, pero además los arrastran un poco más al mezclarlo con el aire que viene de la ventana lateral. Un caso similar sucede cuando se abren las ventanas cenitales en ambas direcciones, es decir, se aporta mayor flujo. A excepción del módulo II, los demás módulos mantienen un flujo de izquierda a derecha.

La separación (8 m) entre los módulos sigue siendo un factor crítico en el sistema de ventilación. El uso de una pantalla plástica a la mitad presenta cierta mejoría al evitar el choque de las velocidades del viento entre el final del módulo I y el inicio del II (**Figura 5.61 A**). Un caso similar ocurre entre los módulos III y IV (**Figura 5.61 C**) donde la inversión de la ventana cenital de la última nave del módulo III hace las veces de succión y ayuda la salida del aire caliente y húmedo, lo cual favorece que sea leve y no choque con el que sale del último módulo.

Las modificaciones hechas en el techo (ventanas cenitales) en los módulos II y IV (figura **5.61 B** y **561 C**) repercuten en una mejora al favorecer que el aire tienda a fluir. En el módulo II, a partir de la nave 7, donde se abren las ventanas cenitales en ambas direcciones, hay mayor cantidad de aire debido a que es una zona de cambio de direcciones, luego como se cierran las naves 3 y 4 el aire puede continuar hasta la ventana lateral. Un caso similar ocurre en el módulo IV, donde la gestión de las ventanas favorece el intercambio.

Análogamente, las temperaturas tienden a suavizarse a lo largo del polígono. Como se muestra en la **Figura 5.62**, las partes críticas son las interacciones entre las temperaturas. Sin embargo, esto ocurre fuera del invernadero, lo cual puede aprovecharse en algún momento para captar este calor y reutilizarlo, por ejemplo para temporizar el agua para riego.

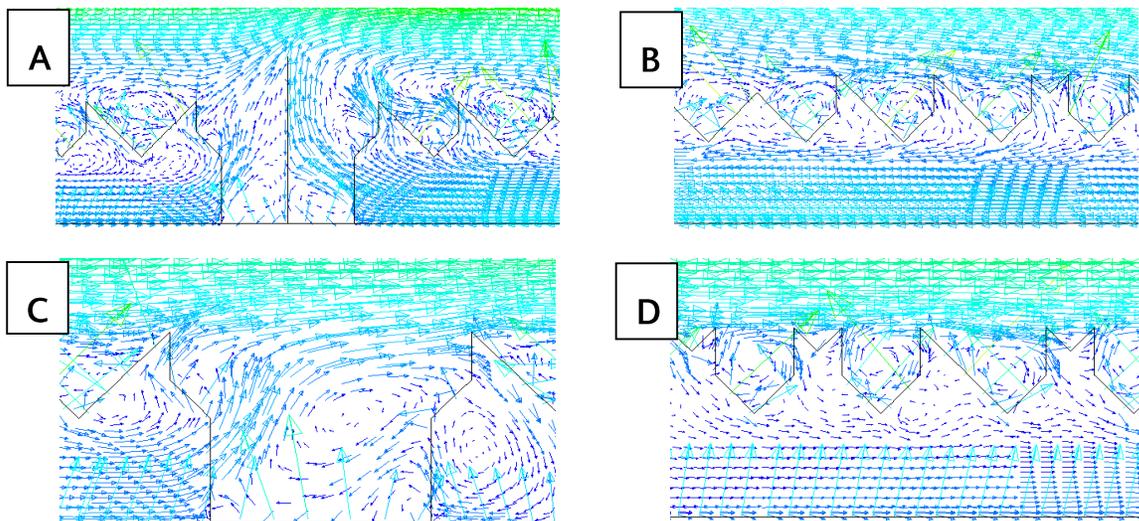




Figura 5.61 Detalles de los flujos en las adecuaciones. A) Interacción módulo I y II; B) detalle del módulo II; C) Interacción módulo III y IV; y D) detalles del módulo IV

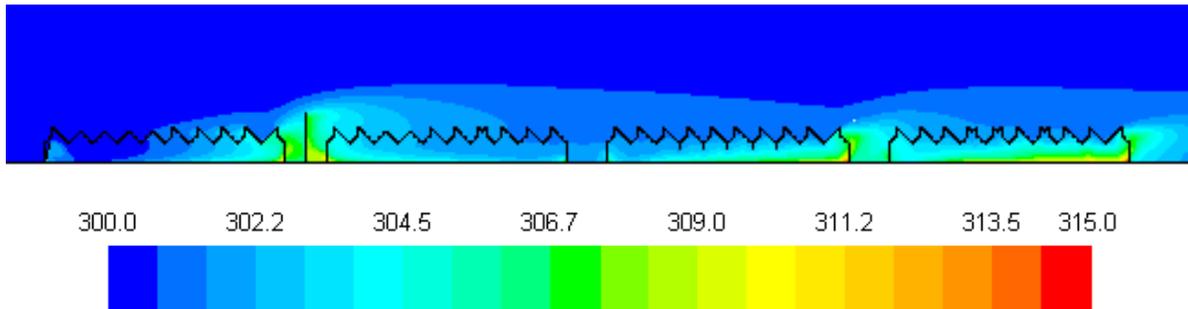


Figura 5.62 Distribución de temperaturas (K) resultado de la gestión

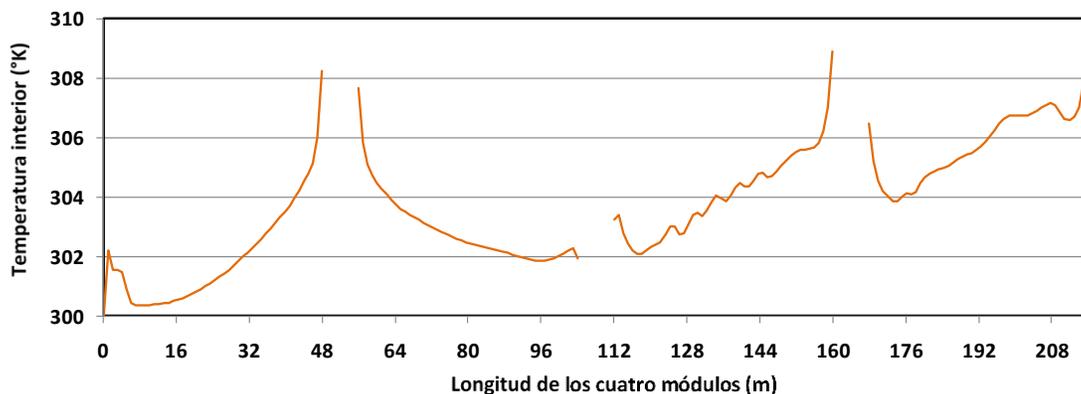


Figura 5.63 Perfil escalar de temperatura (K)

En la **Figura 5.63** se muestran de manera escalar los perfiles de temperatura en los cuatro módulos, medida a 2 m del suelo (la parte alta del cultivo). Resalta que todas las naves se influyen entre ellas, pero sobre todo por la parte última de cada módulo, ya que es con la temperatura del aire saliente con la que el siguiente módulo inicia su proceso de enfriamiento; es decir, la temperatura ambiente de entrada del siguiente modulo es prácticamente la de salida del módulo anterior. Sin embargo, se observan mejoras en la distribución, sobre todo de las últimas naves

que mantienen gradientes de 6 y 4 K respectivamente, lo cual en un invernadero es muy bueno.

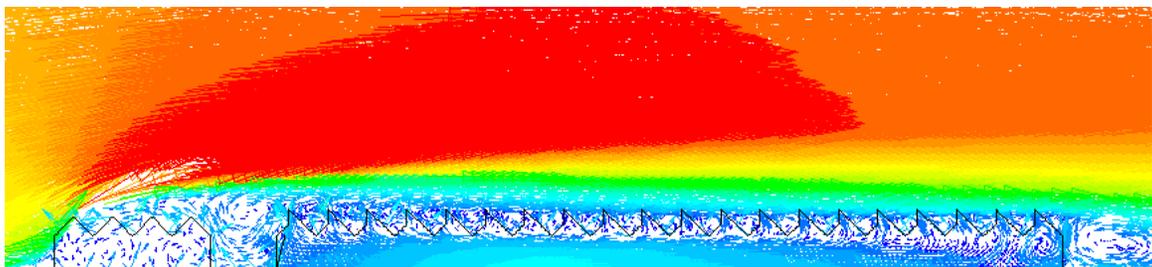
5.12 Simulación de un invernadero modular (20 naves) con obstáculo (módulo de cuatro invernaderos)

En este apartado se analiza el funcionamiento de un solo módulo de 20 naves con las mismas dimensiones y características de las naves del ensayo anterior. Mediante el uso de este modelo se evalúan las características ambientales que se generan para comprobar qué tipo de clúster funciona mejor.

5.12.1 Caso 1

El primer caso se construye y modela un invernadero de 20 naves (4.8 m cada nave) y se coloca un obstáculo a la izquierda de este, que es en un módulo de cuatro invernaderos. El sistema de ventilación consiste de ventanas cenitales y frontales abiertas a barlovento. La **Figura 5.64** muestra el fenómeno ya conocido mediante el cual el espacio entre dos módulos interfiere con el libre flujo del aire y que también se observa al final del módulo creando una especie de tapón.

A pesar de la interferencia, el funcionamiento del sistema de ventilación no es malo, es decir, con el uso de un deflector en la ventana lateral de entrada se evita el contacto directo con el cultivo (efecto orilla) y al mismo tiempo se le imprime mayor energía del aire que se mezcla con el entrante por la ventana cenital. El resto de las ventanas permite entrada y salida de aire, por lo que en la zona de cultivo se observan velocidades de viento de 1 m s^{-1} , que es el límite recomendado por la ASAE, pero que desde el punto de vista de la ventilación es fundamental en la tasa de renovación del aire.



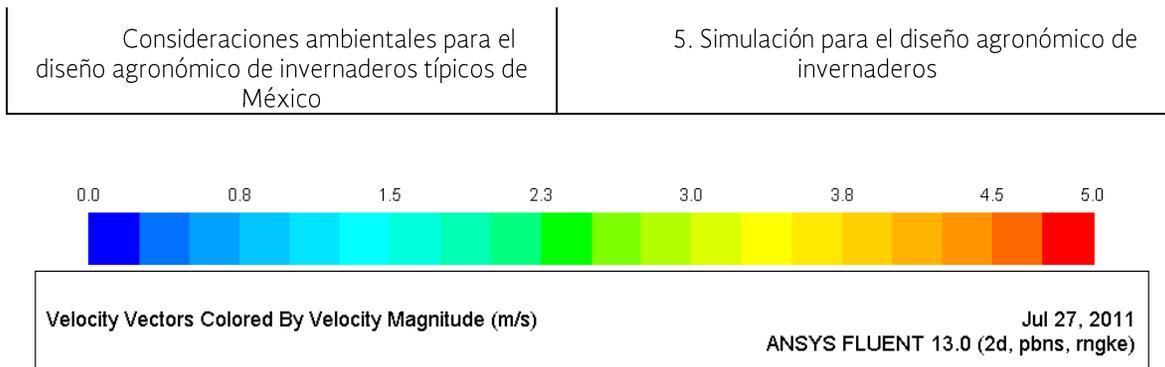


Figura 5.64 Vectores de velocidad del viento (m s⁻¹) escenario total

Con velocidades del viento mayores a 5 m s⁻¹, el sobrecalentamiento solo ocurre en la parte baja inmediata de la ventana de entrada, debido al deflector (**Figura 5.65**), pero que sin duda trae más beneficios en el resto del módulo. En esta misma figura se observa una disminución gradual de las temperaturas hacia el final del módulo.

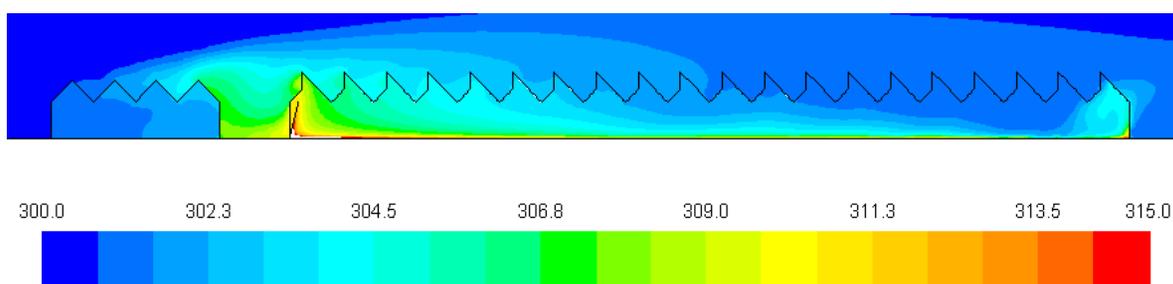


Figura 5.65 Perfil de temperaturas (K) escenario total

La **Figura 5.65** ejemplifica la disminución de las temperaturas hacia la segunda parte del módulo. El aire que entra en las primeras ventanas sufre una caída de presión debido a la disminución del área de paso y a la presencia de las mallas antiinsectos. Sin embargo, una vez superada esta zona, el aire que entra por las siguientes ventanas cenitales alimenta de energía estas corrientes hasta la parte central del invernadero, donde ocurren dos fenómenos. El primero es que en las ventanas cenitales el movimiento del aire ya no es de entrada sino de salida, y en segundo lugar, como consecuencia, disminuyen las velocidades debido a la distancia de recorrido.

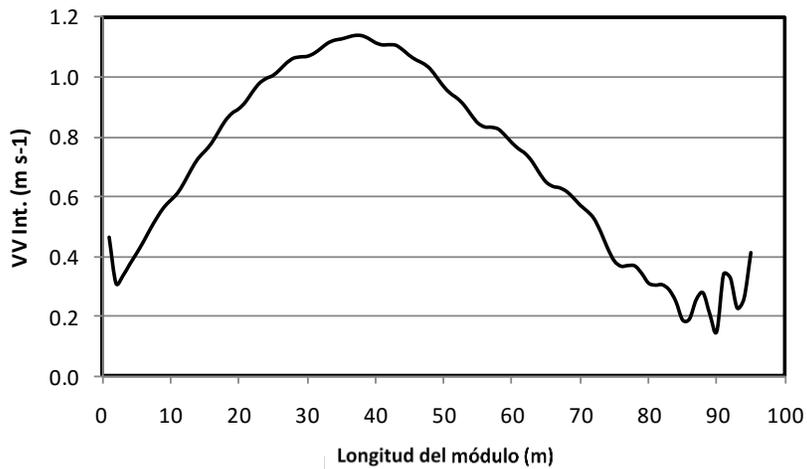


Figura 5.66 Perfil escalar de velocidad del viento interior (m s^{-1}) cuando en el exterior se simulan 4 m s^{-1}

Teóricamente el aire de la parte final del invernadero es el que se está evacuando y sustituyendo rápidamente por un aire menos caliente, por eso hay una mejor temperatura hacia el final del módulo (**Figura 5.67**).

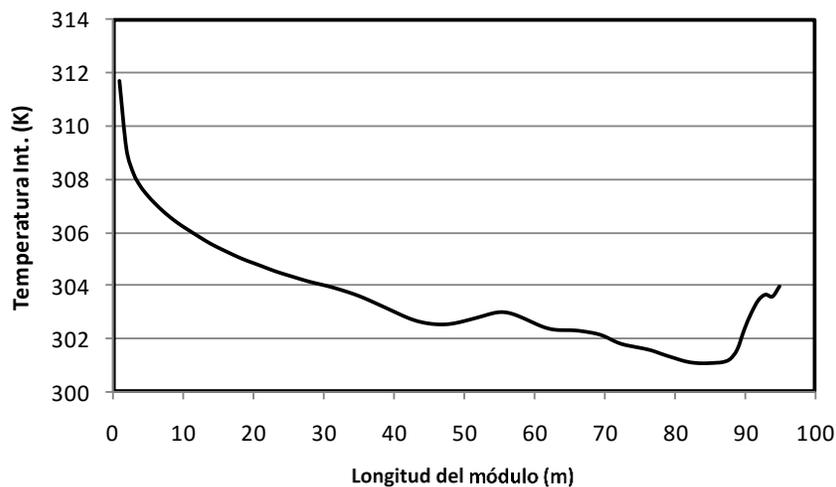


Figura 5.67 Perfil escalar de temperatura (K) bajo las condiciones de frontera simuladas

5.12.2 Caso 2

Debido al inconveniente que representa el obstáculo de un módulo contiguo, en este escenario se elimina el modulo a la izquierda del módulo y se mantienen las características del caso anterior, es decir, cenitales abiertas a barlovento mas

laterales abiertas y simulando una velocidad del viento exterior de 4 ms^{-1} . Con estas adecuaciones las velocidades en la entrada se incrementan y ese mismo efecto permite que el aire se mueva en la parte crítica del Caso 1. En consecuencia, hay un excelente intercambio de aire en la mayor parte del módulo, con excepción de centro del módulo, donde una diferencia en el sentido de los flujos origina una zona de choque y un flujo difícil del aire (**Figura 5.68**).

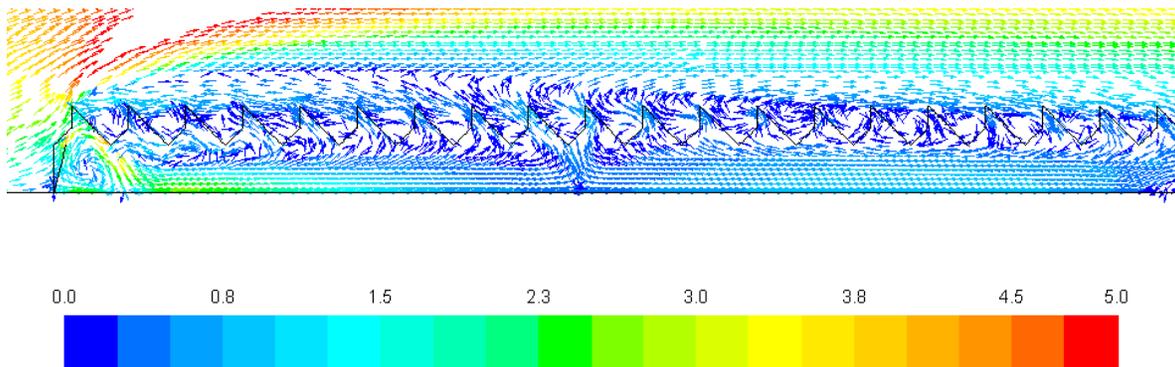


Figura 5.68 Perfil de velocidades del viento (20 naves sin obstáculo)

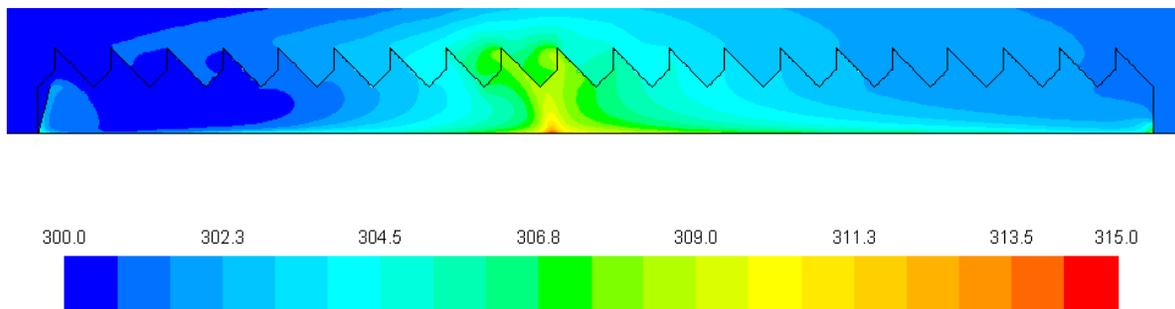


Figura 5.69 Características de las temperaturas en los 20 módulos

Las áreas problemáticas son fácilmente localizadas gracias al método utilizado. Así, la **Figura 5.69** muestra puntualmente la bolsa de calor que se origina debido a una zona de turbulencia y también se puede observar un módulo relativamente refrigerado con un sistema pasivo de ventilación con un gradiente adecuado para la longitud del módulo.

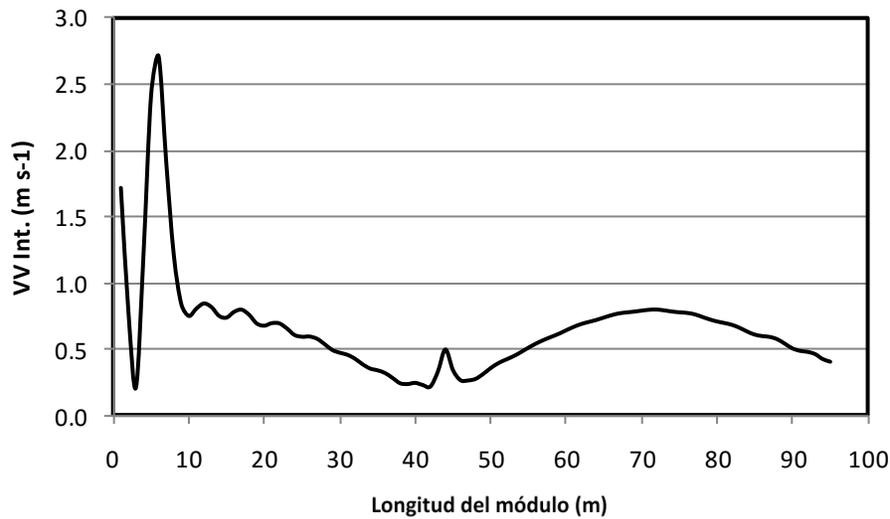


Figura 5.70 Perfil longitudinal de velocidad del viento interior (m s^{-1})

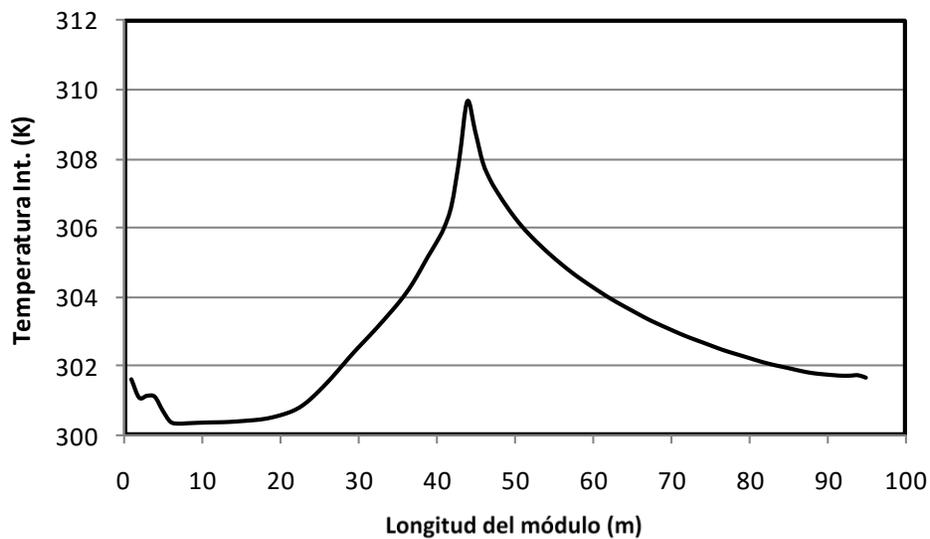


Figura 5.71 Perfil longitudinal de temperaturas (K)

Escalarmente existen diferencias en las velocidades. Al inicio hay un incremento sustantivo en la velocidad del viento, pero se estabiliza a medida que avanza en la longitud del módulo (**Figura 5.70**). En la **Figura 5.71** se observa claramente que la zona caliente se encuentra a 45 m de la entrada, es decir a la mitad del módulo, un evento muy específico que debe tomarse en cuenta. Ante esta situación pueden abrirse las ventanas enrollables, dejar un pasillo en el interior

del invernadero, o colocar alguna estructura auxiliar para refrigerar, entre otras varias opciones.

5.12.3 Caso 3

Cuando las condiciones ambientales son insuficientes para ventilar, la ventilación mecánica es una opción que debe evaluarse en cuanto a viabilidad. El funcionamiento de un sistema mecánico consiste en hacer fluir el aire en una dirección mediante una ventana de entrada y una de salida que hace las veces de succión usando un motor. Este principio puede simularse con el siguiente escenario, se abre la ventana al inicio del módulo con el fin de captar la mayor cantidad de aire, y la ventana al final del módulo puede funcionar como un extractor. Las demás naves permanecen cerradas. Hay un flujo convenientemente uniforme y distribuido a lo largo del módulo que permite una evacuación del aire. Aunque la velocidad se mantiene más baja también es más uniforme, como se muestra en la **Figura 5.72**.

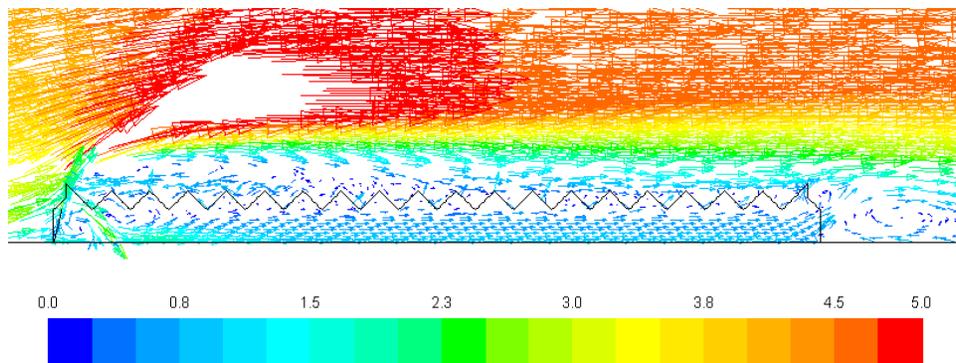


Figura 5.72 Vectores de velocidad de viento

Con el cierre de las ventanas cenitales se obliga al aire a fluir, y se fomenta una mayor entrada y salida de este flujo (**Figura 5.73**). Este efecto es similar a un sistema mecánico de ventilación, con lo cual se elimina la bolsa de calor localizada en el centro del módulo del caso anterior.

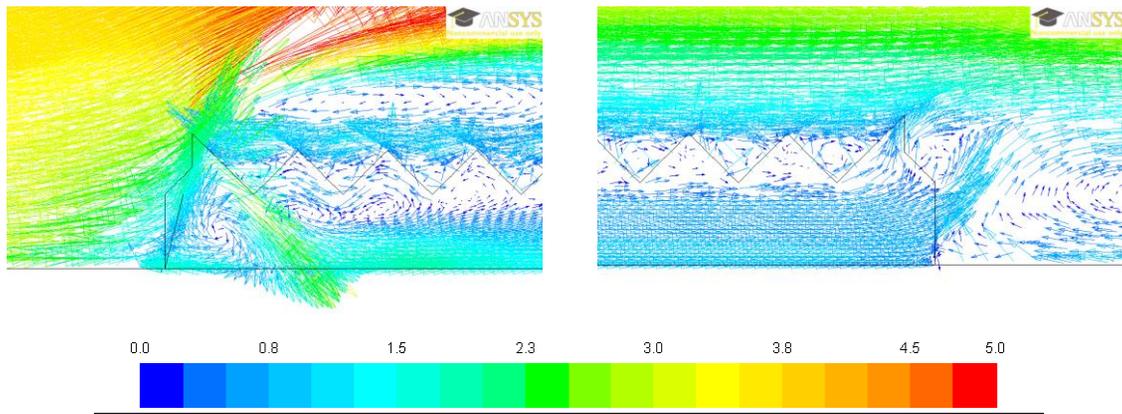


Figura 5.73 Detalles en la entrada y salida de los vectores de viento

Desde luego, al final del recorrido el aire ha acumulado cierta cantidad de calor que puede representar una zona de no confort para los cultivos (**Figura 5.74**), pero buena parte del invernadero mantiene buenas temperaturas.

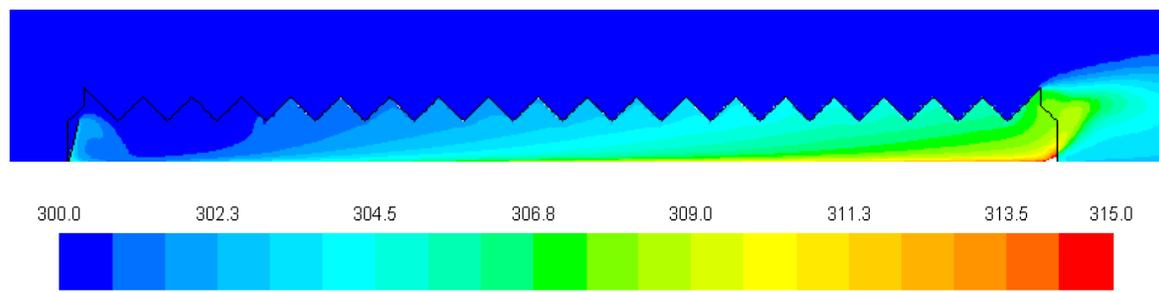


Figura 5.74 Perfil de temperaturas (K) simulando un efecto mecánico

La **Figura 5.75** muestra una velocidad del viento estable en la longitud del invernadero, lo que debe ser útil para dimensionar los módulos de invernaderos. Esta forma puede uniformizar las velocidades del viento, y de acuerdo con la **Figura 5.75** puede definirse el gradiente térmico que se está dispuesto a tener, o en su defecto, la cantidad de grados que hay que mantener. De esta manera se puede planear el costo energético de mantener una temperatura específica.

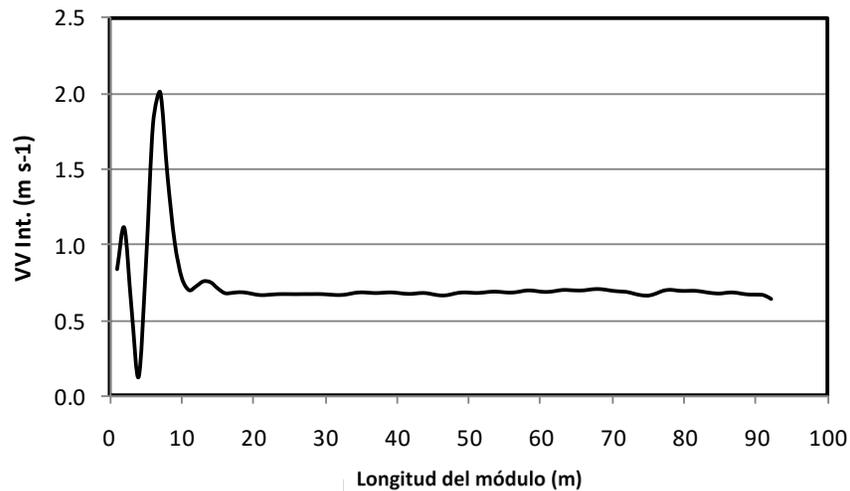


Figura 5.75 Perfil escalar de Velocidad del viento interno ($m s^{-1}$)

También se observa un incremento lineal de temperatura respecto a la longitud del módulo (**Figura 5.76**), lo cual puede ser útil en el manejo agronómico del cultivo, pues con este esquema rápidamente se puede identificar su evolución.

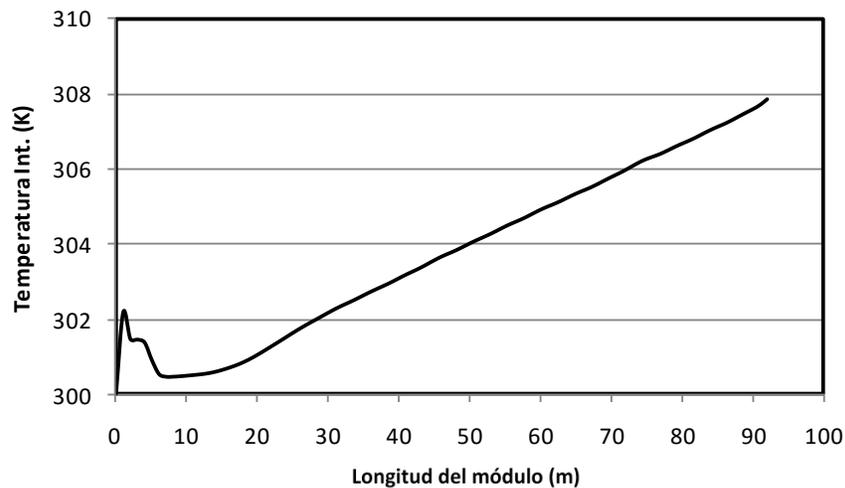


Figura 5.76 Incremento longitudinal de temperatura (K)

Existen recomendaciones en cuanto a la tasa de ventilación, y hay trabajos que insisten en la necesidad de instalar un porcentaje de la superficie del invernadero como área de ventilación. Con los casos aquí simulados es posible observar detalles del movimiento del aire, y con ello discutir respecto a si una tasa de ventilación adecuada es suficiente para evaluar la eficiencia del sistema.

Por ejemplo, para este escenario hay un área de entrada (ventana lateral izquierda + ventana cenital de la nave 1) y otra de salida (ventana lateral derecha + cenital de la nave 20). De acuerdo con las simulaciones, los caudales fueron de $2.67 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de entrada y $2.67 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de salida. El balance se cumple, y esto nos da un caudal de $9\,612 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$. Si el volumen del invernadero es de 495 m^3 , entonces se tiene una tasa de renovación (N) de 19 vol hr^{-1} , que según lo recomendado por ASAE es bajo.

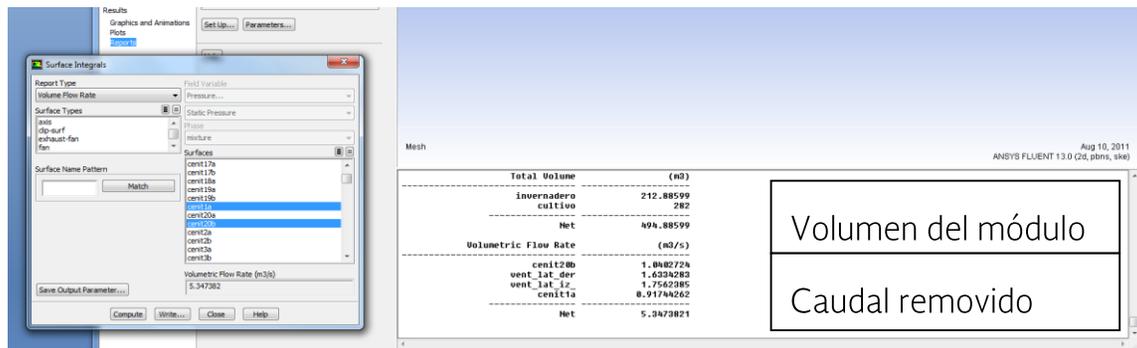


Figura 5.77 Flujos de masa entrada y salida y volumen del invernadero

Cuando se habla de movimiento de aire, se está también hablando de sus características. Con el aire se mueve el contenido de humedad, calor o entalpía, dióxido de carbono, etc. Poder conocer cómo es el flujo de aire tanto en cantidad como en dirección aporta beneficios colaterales y sin duda un mayor conocimiento del tema.

Consideraciones ambientales para el
diseño agronómico de invernaderos típicos de
México

5. Simulación para el diseño agronómico de
invernaderos

Conclusiones

6

Capítulo 6

CONCLUSIONES

Mediante el análisis del sistema de ventilación en estructuras poligonales, se han mostrado los principales patrones de flujo que se generan cuando se encuentran cuatro módulos de diez invernaderos espaciados 8 m entre ellos. Se espera que este análisis ayude a su mejor diseño. Se observó que 8 m de espaciamiento ocasiona un problema de flujo del aire y condiciona su movimiento, además de que el aire que sale del anterior invernadero generalmente caliente, es el que principalmente va a entrar a refrigerar el siguiente invernadero.

Estructuralmente es posible dotar a los invernaderos de adecuaciones específicas desde el diseño con el fin de gestionar el sistema de ventilación de acuerdo a las necesidades. Por ejemplo, la orientación de las ventanas cenitales, el uso de deflectores en las ventanas laterales y entre naves puede ayudar a mejorar el sistema de ventilación.

Si se mejoran las condiciones climáticas con el sistema de ventilación natural, se evita el uso de energías para enfriar o calentar el invernadero. Si se capta la mayor cantidad de energía solar durante el día y puede almacenarse en el suelo, muy posiblemente será suficiente para mantener las condiciones ambientales durante la noche.

Las barreras naturales o artificiales que se encuentran en algún lado del invernadero influyen en la circulación del aire hacia el interior del invernadero, por lo que la construcción de un invernadero modular y multimodular debe tomar en cuenta esta característica antes de su establecimiento.

De acuerdo con los diferentes modelos simulados, es posible que bajo las condiciones de viento y dimensiones establecidas, un módulo de 20 naves tenga un mejor funcionamiento térmico que dos de 10, debido a la marcada influencia que tiene uno sobre el otro; lo que a su vez implicaría una gestión más fácil.

Existen investigaciones (Medrano *et al.*, 2010) que indican que la tasa de absorción de elementos iónicos y minerales por las plantas está fuertemente relacionada con sus necesidades, que a su vez dependen de su tasa de crecimiento. El crecimiento de la planta es un factor que se determina en función del confort ambiental. Por tanto cualquier factor climático que influya sobre la transpiración también influirá en el suministro de nutrientes por la raíz.

Otro tema relacionado con el uso de clústers de producción es el despunte de la economía de un sector socialmente establecido. Como menciona Guantes (2010), la agricultura engloba a más del 40 % de la población pero su aportación económica apenas rebasa el 10 %. La propuesta de un polígono está pensado para abatir los costos de producción porque hace más eficiente la logística de

producción y comercialización, y además afecta directamente al ambiente mediante el menor uso de recursos y energías fósiles.

La horticultura del futuro deberá ser sostenible y su producción rentable. Mediante el establecimiento de clústers o polígonos industriales, también llamados *agroparks* o parques agrarios, los cuales pueden reducir el consumo de recursos al concentrar varios giros con un fin común. El uso de agroparques (polígonos de invernaderos) en la producción agrícola supone serias ventajas ambientales.

En el diseño de polígonos es importante considerar el efecto de un invernadero en la ventilación de los otros invernaderos del grupo, ya que, como se expuso, en polígonos de más de 2 módulos existe una influencia del sistema de ventilaciones entre ellos al actuar como un apantalla uno del otro. La mayoría de las investigaciones sobre ventilación están aplicadas a invernaderos solos, o a un solo módulo libre de obstáculos.

Del análisis de los casos mostrados, se muestra que módulos de 10 naves tienden a sobrecalentarse, por lo que se recomiendan módulos de 5 naves o longitudes entre 40 y 50 m. La cercanía entre módulos dificulta enormemente la circulación del aire en módulos contiguos, por lo que se recomienda ampliarla. Esto puede no ser económicamente viable, por lo que en otras latitudes se estudian posibilidades para el aprovechamiento del área, tal como la colocación de paneles solares, cosechas de condensación, entre otras.

En climas de inviernos y veranos suaves, como en la mayor parte del territorio mexicano, el mejor invernadero debe ser una estructura sencilla, que adapte las condiciones medioambientales locales, para favorecer la misma transmisión de luz y tasa de ventilación. Como consecuencia, se busca tener explotaciones hortícolas mediante técnicas locales, lo cual será suficiente para alcanzar un balance costo-beneficio similar a los invernaderos de tipo industrial dotados de equipos de control climático.

El uso de herramientas numéricas para el análisis del ambiente del invernadero, derivado de los sistemas de ventilación de una estructura puede ser considerado como una opción tecnológica para gestionar las condiciones en el invernadero y así aumentar la producción de cultivos hortícolas.

Referencias



Capítulo 7

REFERENCIAS

- Al Helal, I. M. (1998) *A computational fluid dynamics study of natural ventilation in arid region greenhouses*. Tesis de doctorado. Ohio State University.
- Anderson, M. (1995) *Indigenous soil conservation in the highlands of Northern Thailand*. Tesis de maestría. Wageningen Agricultural University.
- Armendáriz Erives, S. (2007) Desafíos y riesgos agrícolas ante el calentamiento global. En: *Oportunidades y retos de la Ingeniería Agrícola ante la globalización y el cambio Climático*. México: UACH-URUZA. pp. 73-79.
- Apoys y Servicios a la Comercialización Agropecuaria (1995) El jitomate mexicano. Un complemento del mercado estadounidense. *Claridades Agropecuarias*. 25, pp. 3-21.
- ASHRAE FUNDAMENTALS (1993) *ASHRAE Handbook*. Edición SI. ASHRAE.
- AMCI (Asociación Mexicana de Constructores de Invernaderos) y SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) (2010) *Rangos de precios sugeridos para 5 tipos de invernaderos*, [pdf] Disponible en: <http://www.firco.gob.mx/proyectos/proap/Documents/Presentacion_Rangos_Precios_PROAP_2010.pdf>.
- Baeza, J. E. (2007) *Optimización del diseño de los sistemas de ventilación en invernadero tipo parral*. Tesis. Universidad de Almería.
- Baeza, E. J., Pérez-Parra, J. J., Montero, J. I. y López, J. C. (2006) CFD Study of the Natural Ventilation Performance of a Parral Type Greenhouse with Different Numbers of Spans and Roof Vent Configurations. *Acta Horticulturae*, 719, pp. 333-340.
- Baeza, E. J., Perez Parra, J., Montero, J. I., Bailey, B., López, J. C. y Gazquez, J. C. (2009) Analysis of the role of sidewall vents on buoyancy-driven natural ventilation in parral-type greenhouses with and without insect screens using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 104 (1), pp. 86-96.
- Bailey, B. J. (1995) Greenhouse climate control-new challenges. *Acta Horticulturae*, 399, pp. 13-24.
- Bailey, B. J. 2000. Constraints, limitations and achievements in greenhouse natural ventilation. *Acta Horticulturae*, 534, pp. 21-30.

- Bailey, B. J., Montero, J. I., Pérez Parra, J. J., Robertson, A. P., Baeza, E. y Kamaruddin, R. (2003) Air flow resistance of greenhouse ventilators with and without insect screens. *Biosystems Engineering*, 86(2), pp. 217-229.
- Baille, A., Kittas, C. y Katsoulas, N. (2001) Influence of withering on greenhouse microclimate and crop energy partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107, pp. 293-306.
- Bakker, J. G., Bot, H., Challa y de Braak, N. V. (1995) *Greenhouse Climate Control: An Integrated Approach*. Netherlands: Wageningen Press.
- Bartzanas, T. y Kittas, C. (2000) Numerical simulation (CFD) of greenhouse heating. En: *1st Southeastern Europe Fluent Users Group Meeting*. Tesalónica, Grecia, 20 Octubre 2000.
- Boodley, W.J. (1998) *The commercial greenhouse*. 2da ed. Washington, USA.
- Bot, G. P. A. (1983) *Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model*. Tesis de doctorado. Agricultural University of Wageningen.
- Boulard, T. y Baille, A. (1995) Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 65, pp. 145-157.
- Boulard, T., Meneses, J. F., Mermier, M. y Papadakis, G. (1996) The mechanism involved in the natural ventilation of greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology*, 79, pp. 61-77.
- Boulard, T., haxaire, R., Lamrani, M. A., Roy, J.C. Jaffrin, A. 1999. Characterization and modelling at the air fluxes induced by natural ventilation in a greenhouses. *Agric. Engng. Res.* 74, 135-144.
- Boulard, T., y Wang, S. (2002) Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel. *Computers and electronics in agriculture*, 34, pp. 173-190.
- Bruce, J. M. (1978) Natural convection through openings and its application to cattle building ventilation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 23, pp. 151-167.
- Brugger, M., Montero, J., Baeza, B. y Pérez Parra, J. (2005) Computational fluid dynamics modelling to improbé to design of the spanish parral style greenhouse. *Acta horticulturae*, 691, pp. 425-432.
- Campen, J. B. and Bot, G. P. A. (2003) Determination of greenhouse-specific aspects of ventilation using three-dimensional computational fluid dynamics. *Biosystem Engeeniering*, 84(1), pp. 69-77.

- Casanova, V. V. (2008) *Modelación de dióxido de carbono (CO₂) en invernaderos ventilados naturalmente*. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma De Querétaro.
- Castilla Prados, N. (2007) *Invernaderos de plástico. Tecnología Y Manejo*. 2ª Ed. Mundi-Prensa.
- CIDEIBER (Centro de Información y Documentación Empresarial sobre Iberoamérica) (1998) Perfil geográfico y político - El clima.htm (27-11-2007). México D.F.
- Challa, H. (1990) Crop growth models for greenhouse climate control. En: Rabbinge, R., Goudriaan, J., Van Keulen, H., Penning de Vries, F. W. T. y Van Laar, H.H. eds. *Theoretical production ecology: Reflections and perspectives*. Wageningen: Wageningen Press. pp. 125–145.
- Cockshull, K. E. (1988) The integration of plant physiology with physical changes in greenhouse climate. *Acta Horticulturae*, 229, pp. 113-124.
- Gallagher, J. N. y Biscoe, P. V. (1978) Radiation absorption, growth and yield of cereals. *Journal of Agricultural Science*, 91(1), pp. 47-60.
- CFE, IEE (2008) *Manual de diseños de obras civiles, diseño por viento*. México: CFE.
- Cook, R. y Calvin, L. (2005) *Greenhouse tomatoes change the dynamics of the North American fresh tomato industry*. [pdf]. Disponible en: <http://www.ers.usda.gov/media/307225/err2_1_.pdf>.
- Critten, D. L. y Bailey, B. J. (2002) A review of greenhouse engineering developments during the 1990's. *Agricultural and Forest Meteorology*, 112, pp. 1-22.
- De Jong, (1990) *Natural ventilation of large multi-span greenhouse*. Tesis. Agricultural University of Wageningen.
- De Koning, A. N. M. (1989) Development and growth of a commercially grown tomato crop. *Acta Horticulturae*, 260, pp. 267-273.
- Fatnassi, H., Boulard, T. y Bouirden, L. (2003) Simulation of climatic conditions in full scale greenhouse fitted with insect-proof screens. *Agricultural and Forest Meteorology*, 118, pp. 97-111.
- Fatnassi, H., Boulard, T., Poncet, C. y Chave, M. (2006) Optimization of a greenhouse insect screening with computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 93(3), pp. 301-312.
- FAO (Food and Agriculture Organization) (2004) Estadísticas de Agricultura. www.fao.org/faostat.

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (2011) FAOSTAT.
- Fernández, J. E. y Bailey, B. J. (1993) Predicting greenhouse ventilation rates. *Acta Horticulturae*, 328, pp. 107-111.
- Fidaros, D., Baxevanou, C., Bartzanas, T. y C. Kittas, T. (2010) Numerical simulation of thermal behavior of a ventilated arc greenhouse during a solar day. *Renewable Energy*, 35, pp. 1380-1386.
- FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura) (2011) *Oportunidad de inversión en la producción de tomate rojo en México*. Morelia: Talleres FIRA.
- Flores, V. J. (2005) *Aspectos relacionados con la producción de tomate en invernadero, calendario de riego, caracterización climática y modelo de temperatura*. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados.
- Flores Velázquez, J. (2010) *Análisis de la ventilación en los principales invernaderos mejicanos mediante CFD*. Tesis de doctorado. Universidad de Almería.
- FOCIR (2005). La producción de tomate en invernadero: una gran oportunidad de negocio. Boletín Quincenal de Inteligencia Agroindustrial. 2 Vol 1. [https://www.academia.edu/13264899/Bolet](https://www.academia.edu/13264899/Bolet%C3%ADn_Quincenal_de_Inteligencia_Agroindustrial) (27 nov 2007).
- García, E. (1986). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía. México: UNAM.
- González Real, M. M. y Baille, A., (2000) Simulating the physiological behavior of a greenhouse rose crop in response to climate manipulations by means of a model including physical and physiological feedbacks. En: *Proceedings of the ISHS Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates*. Cartagena, España, 7–11 marzo 2000.
- Hannan, J. J. (1990) The influence of greenhouse on internal climate with special referent to Mediterranean regions. *Acta Horticulturae*. 287, pp. 23-34.
- Hand, D. W. (1984) Crop responses to winter and summer CO₂ enrichment, *Acta Horticulturae*, 162, pp. 45–63.
- Harnett, R. E., Sims, T.V. y Bowman, G. E. (1979) Comparison of glass house types and their orientation. *Expl. Hort.* 3L 59b6.
- Hauke, G. (2003) Primeras jornadas sobre investigación en turbulencia. Área de Mecánica de Fluidos, Centro Politécnico Superior, Universidad de Zaragoza, Barcelona, 2003.

- Haxaire, R. (1999) *Characterization and modelling of the air flows within a greenhouse*. Tesis de doctorado. Polytech Nice Sophia.
- Haxaire, R., Boulard, T. y Mermier, M. (2000) Greenhouse natural ventilation by wind forces. *Acta Horticulturae*, 534, pp. 31–40.
- Hernández, J., Escobar, I. y Castilla, N. (2001) La radiación solar en los invernaderos mediterráneos. *Horticultura* 157, pp. 1-9.
- Holder, R., Cockshull, K. E. (1990) Effects of humidity on the growth and yield of glasshouse tomatoes. *Journal of Horticultural Science*, 65(1), pp.31-39.
- Hsu, C. y Cheng, P. (1990) Thermal dispersion in a porous medium. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 33, pp.1587-1597.
- Iglesias, N. Y. y Muñoz, A. (2007) Comparación de la transmisión de la radiación fotosintéticamente activa (par) en invernaderos del norte de la Patagonia. *Horticultura Argentina*, 26(60), pp. 10-16.
- Infoagro (2004) *El cultivo del trigo*. [en línea] Disponible en: <www.infoagro.com/herbaceos/cereales/trigo2.asp>. [Consultado Septiembre 2005].
- Jaffrin, A. y Makhlonf, S. (1990) Mechanism of light transmission through wet polymer films. *Acta Horticulturae*, 281, pp. 11-24.
- Jensen, M. H. (2004) Agricultura en ambientes controlados en desiertos y trópicos. *Memorias del Curso Internacional de Invernaderos*. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.
- Kacira, M., Short, T. H. y Stowell, R. R. (1998) A CFD evaluation of naturally ventilated, multi-span, sawtooth greenhouse. *Transactions of the ASAE*, 41 (3), pp. 321-338.
- Kacira, M., Sase, S., Kacira, O., Okushima, L., Ishii, M., Kowata, H. y Moriyama, H. (2004) Status of Greenhouse productions in Turkey: Focusing on vegetable and floriculture production. *Journal of Agricultural Meteorology*, 60(2), pp. 115-122.
- Kacira, M., Sase, S. y Okushima, L. (2004) Effects of side vents and span numbers on wind-induced natural ventilation of a gothic multi-span greenhouse. *Journal of Agricultural Meteorology*, 38(4), pp. 227-233.
- Kittas, C. y Bartzanas, T. (2006) Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations. *Building and environment*, 42(10), pp. 3774-3784.

- Kittas, C., Boulard, T., Mermier, M. y Papadakis, G. (1995) Wind induced air exchange rates in a greenhouse tunnel with continuous side openings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 65, pp. 37-49.
- Kittas, C., Katsoulas, N. y Baille, A. (2001) Influence of greenhouse ventilation regime on microclimate and energy partitioning of a rose canopy during summer conditions. *Journal of Agricultural Engineering Research* 79(3), pp. 349-360.
- Kittas C., Karamanci, M. y Katsoulas, N. (2005) Air temperature in a forced ventilation greenhouse with rose crop. *Energy and Building*, 37, pp. 807-812.
- Lauder, B. E. y Spalding, D. B. (1972) *Mathematical Models of Turbulence*. Nueva York: Academic Press.
- Lee, I.B. and Short, T.H. 2000. Two-dimensional numerical simulation of natural ventilation in a multi-span greenhouse. *Transactions of ASAE*, 43 (3), 745-753.
- Lebon, G. y Clout, A. (1986) A thermodynamical modelling of fluid flows through porous media. application to natural convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 29, pp. 381-390.
- Liu, F. y Wen, J. X. (2002) The effect of turbulence- modelling on the CFD simulation of buoyant diffusion flames. *Fire Safety Journal*, pp. 37, pp. 125.
- Lorenzo, P. (2001) *Enriquecimiento Carbónico. Incorporación de Tecnología al Invernadero Mediterráneo*. Cajamar.
- Lorenzo, P. (1994) Intercepción de luz, bioproductividad e intercambio gaseoso durante la ontogenia de un cultivo invernadero de *Cucumis sativus* en Almería. Tesis de doctorado. Universidad de Barcelona.
- Lorenzo, P., Maroto, C. y Castilla, N. (1990) CO₂ in plastic greenhouse in Almería (Spain). *Acta Horticulturae*, 268, pp. 165-169.
- Loockwood, J. G. (1974) *World Climatology. An Environmental Approach*. Londres: Edward Arnold Publishers.
- Martines, E. y Lira, L. (2008) Dew Point Calculation at Different Pressures. *Metrology Symposium*. SM2008-M117-1098-1.
- Matallana, A. y Montero, J. I. (1989) *Invernaderos: Diseño, construcción y ambientación*. Madrid: Mundi-Prensa.

- Miguel, A. F., Van de Braak, N. J. y Bot, G. P. (1997) Analysis of the airflow characteristic of greenhouse screening materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 67(2), pp. 105-112.
- Mistriotis, A., Bot, G. P. A., Picuno, P. y Scarascia Mugnozza, G. (1997) Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 85, pp. 217-228.
- Molina Aiz, F. D., Valera, D. L., Álvarez, A. J. y Madueño, A. (2006) A wind tunnel study of airflow through horticultural crops: determination of the drag coefficient. *Biosystems Engineering* 93, pp. 447-457.
- Montero, J. I., Hunt, G. R., Kamarudddin, R., Anton, A. y Bailey, B. J. (2001) Effect of ventilator configuration on wind driven ventilation in a crop protection structure for the tropics. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80, pp. 99-107.
- Monteith, J. L. (1973) *Principles of Environmental Physics*. London: Edward Arnold.
- Muñoz, P., Montero, J. I., Anton, A. y Giuffrida, F. (1999) Effect of insect-proof screens and roof openings on greenhouse ventilation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 73, pp. 171-178.
- National Academy of Sciences (1975) *Understanding Climatic Change*.
- Nisen, A., Grafiadellis, M., Jiménez, R., La Malfa, G., Martínez García, P. F., Monteiro, A., Verlodt, H., de Villele, O., von Zabeltitz, C. H., Denis, I. Cl. y Baudoin, W. O. (1988) *Cultures protégées en climat méditerranéen*. FAO. N° 90. Roma.
- Norton, T., Sun, D., Grant, J., Fallon, R. y Dodd, V. (2007) Application of computational fluid dynamics (CFD) in the modeling and design of ventilation systems in the agricultural industry: a review. *Bioresource Technology*, 98(12), pp. 2386-2414.
- Oca, J. (1996) *Estudi de la ventilació natural per efecte tèrmic en hivernacles, mitjançant tècniques de visualització de fluids en models a escala*. Tesis de doctorado. Universitat de Lleida.
- Ojeda Bustamante, W., Sifuentes, E., Slack, D. C. y Carrillo, M. (2004) Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree concept: application to a potato crop. *Irrigation and Drainage*, 53, pp. 251-261.
- Okushima, L., Sase, S. y Nara, M. (1989) A support system for natural ventilation design of greenhouse based on computational aerodynamics. *Acta horticulturae*, 284, pp. 129-136.

- Ould Khaoua S. A., Bournet, P. E., Migeon, C., Boulard, T. y Chasseriaux, G. (2006) Analysis of greenhouse ventilation efficiency based on computational fluid dynamics. *Biosystem Engineering*, 95, pp. 83-98.
- Padilla-Bernal, L.E., Rumayor-Rodriguez, A., Perez-Veyna, O. y Reyes-Rivas, E. (2010) Competitiveness of Zacatecas protected agriculture: The Fresh Tomato Industry. *International food and Agribusiness Management Review*, 13 (1).
- Papadakis, G., Mermier M., Meneses, J. F. y 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, pp. 219-228.
- Pérez Parra, J. J. (2002) Ventilación natural de invernaderos tipo parral. Tesis de doctorado. Universidad de Córdoba.
- Pérez Parra, J. J., Baeza, E., Montero, J. I. y Bailey, B. J. (2004) Natural ventilation of parral greenhouses. *Biosystems Engineering* 87(3), pp. 89-100.
- Prenger, J. y Ling, P. (2001) Greenhouse condensation control: understanding and using vapor pressure deficit (VPD). Fact Sheet (series) AEX-804. Ohio State University Extension. Columbus.
- Reichrat, S., Davies, T. W. (2002) Using CFD to model the internal climate of greenhouses: past, present and future. *Agronomy*, 22, pp. 3-19.
- Reynolds, C. W. (1987) Flocks, herds, and schools: a distributed behavioral model, in computer graphics. En: *ACM Siggraph Computer Graphics*, 21(4), pp. 25-34.
- Rico García, E. (2008) *Modelación climática en invernaderos: ventilación natural*. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma De Querétaro.
- Romo, G. J. R. y Arteaga, R. R. (1983) *Meteorología agrícola*. Chapingo: Universidad autónoma Chapingo.
- Rossenber, N. J., Blas, B. I. y Verma, S. B. (1983) *Microclimate. The Biological Environment*. 2da ed. John Wiley & Sons.
- Roy, R. N., Finck, A., Blair, G. J. y Tandon, H. S. L. (2006) Plant nutrition for food security. A guide for integrated nutrient management. *Fertilizer and Plant Nutrition*, Boletín 16. Roma: FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations).
- Roy, J. C. y Boulard, T. (2005) CFD prediction of the natural ventilation in a tunnel-type greenhouse: influence of wind direction and sensibility to turbulence models. *Acta Horticulturae*. 691, pp. 457-464.

- Sánchez, C. F. (2003) La agricultura protegida en México. *II curso Internacional de Invernaderos*, 26-30 mayo 2003, UACH, Chapingo, México.
- Sánchez Salazar, M. y Martínez Galicia, M. (2006) *La vulnerabilidad de la industria y los sistemas energéticos ante el cambio climático global*. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) (2008) *Inventario de invernaderos del estado de Puebla*. [pdf] Disponible en: <<http://www.oeidrus-puebla.gob.mx/RID.pdf>>. [Consultado el 12 mayo de 2015].
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) (2012). *Anuario estadístico de la producción agrícola de los Estados Unidos Mexicanos*. México.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) (2013) *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola de los Estados Unidos Mexicanos 2009*. México.
- SE (Secretaría de Economía) (2009) *Sistema de información Arancelaria Vía Internet*. [en línea] Disponible en: <<http://www.economia-snci.gob.mx:8080/siaviWeb/fraccionAction.do?tigie=07020099&paper=null>> [Consultado el 30 septiembre 2015].
- Seeman, J., Chirkov, I., Lomas, J. y Prima, B. (1974) *Agrometeorology*. Berlin: Springer-Verlog.
- Schwentesius, R. R. y Gómez, C. M. (1998) *Competitividad de las hortalizas mexicanas en el mercado norteamericano. Tendencias recientes en el marco del TLC*. En: Schwentesius, R., Gómez C. M. y Gary, W. eds. *TLC y agricultura ¿Funciona el experimento?* México: CIESTAAM (Centro de Investigaciones Económicas Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial). pp: 167-203.
- Sherry, W. J. y Goldsberry, K. L. (1980) Carnation production responses to solar radiation transmitted through plastic greenhouse covers. *American Society for Horticultural Science*, 105(4), pp. 579-582.
- Seginer, I. (2002) The Penman-Monteith Evapotranspiration Equation As An Element In Greenhouse Ventilation Design. *Biosystems Engineering*, 82(4), pp. 423-439.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) (2013) Boletín semanal del SIAP, 2. México: SAGARPA.

- Sesa, S., Takakura, T. y Nara, M. (1984) Wind tunnel testing on airflow and temperature distribution of a naturally ventilated greenhouse. *Acta Horticulturae*, 148, pp. 329-336.
- Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z. y Zhu, J. (1995) A New $k-\epsilon$ eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24(3), pp. 227-238.
- Short, T. H. (1996) Selecting the greenhouse structure your crop need. *GrowerTalks*, Summer Issue, pp. 8-9.
- Short, T. H., Lee, I. y Stowell, R. R. (2001) Naturally ventilated greenhouse designs for optimum cooling. *Acta Horticulturae*, 559, pp. 177-182.
- Stanghellini, C. y van Meurs, W. T. M. (1992) Environmental control of greenhouse crop transpiration. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 51, pp. 297-311.
- Stickler, G. B. y Pugh, D. G. (1967) Hereditary progressive arthropthalmopathy II. Additional observations on vertebral abnormalities: A hearing defect, and a report of a similar case. *Mayo Clinic Proceedings*, 42, pp. 495-500.
- Speziale, C. G., (1998) Turbulence modeling for time dependent RANS and VLES: a review. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 36(2), pp. 173-184.
- Sun, H., Stotwel, R., Keener, H., Edwell, D. y Michel, F. (2002) Two-dimensional computational fluid dynamics modelling of air velocity and ammonia distribution in a high rise hog building. *Transactions of the ASABE*, 45, pp. 1559-1568.
- Reichrath S. y Davies, T. W. (2002) Using CFD to model the internal climate of greenhouses: past, present and future. *Agronomy*, 22(1), pp. 3-19.
- Thornthwaite, C. W. y Mather, J. R. (1955) The Water Balance. *Drexel Institute of Technology. Publications in Climatology*, 8(1), pp. 1-86.
- USDA (United States Department of Agriculture) (2005) *Greenhouse Tomatoes Change the Dynamics of the North American Fresh Tomato Industry*. [pdf] Disponible en: <http://www.ers.usda.gov/media/307225/err2_1_.pdf>.
- USDA (United States Department of Agriculture) (2010) *Vegetables and Melons Yearbook for 2009*. [En línea] Disponible en: <<http://usda.mannlib.cornell.edu/MannUsda/viewDocumentInfo.do?documentID=1212>>.
- Valera, D. L., Molina F. D. y Álvarez, A. J. (2004) Eficacia de las mallas de protección comerciales utilizadas en invernaderos. En: CIDAPA (Comité Iberoamericano

para el Desarrollo y la Aplicación de los Plásticos en la Agricultura), *VI congreso iberoamericano para el desarrollo y aplicación de plásticos en agricultura*. Colombia, 2004.

Verhaegh, A. P. (1981) The influence of insolation techniques on crop production and profitability in the Dutch glasshouse industry. *Acta Horticulturae*, 115, pp. 453-465.

Vicente, W., Salinas, M., Rodriguez, A. y Jiménez, R. (2004) Evaluación de Modelos de Turbulencia En Flujos con Combustión Premezclada. *Información Tecnológica*, 15(2), pp. 29-

