



UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN INVERNADERO CONSTRUIDO EN LADERA, APLICANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Trabajo final de graduación sometido a la consideración de la

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Como parte de los requisitos para aspirar al título y grado de

LICENCIATURA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA

ADRIANA ROJAS RISHOR

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Julio del 2015

HOJA DE TRIBUNAL

Este proyecto de graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado y título de Licenciatura en Ingeniería Agrícola

_____Presidente

Ing. Ricardo Radulovich Ramírez, Ph.D

_____Director del proyecto

Ing. Carlos Benavides León, M.Sc.

_____Miembro lector

Ing. Marta Montero Calderón, Dra.

_____Miembro lector

Ing. Geovanni Carmona Villalobos

_____Lector asesor

Ing. Juan Gabriel Monge Gapper, M.Sc.

AGRADECIMIENTOS

A don Egidio, propietario del invernadero estudiado, por su ayuda y apoyo total en el proyecto.

Por el apoyo incondicional de mi director Carlos Benavides.

A Ricardo Radulovich por su apoyo en todo el desarrollo del proyecto.

Al profesor Roger Bonilla por su asesoramiento en el análisis estadístico realizado y su disposición a colaborar. Sus consejos fueron claves para este proyecto.

A profesores y compañeros que me apoyaron en este proyecto: Alejandra Barquero, Tonny Carrillo, Oscar Quesada, Francisco Marín, Matías Chaves, Juan Pablo Rojas, Christian Solís, Raúl Barrios, Kattia Solís, Juan Gabriel Monge Gapper por su ayuda invaluable y a Geovanni Carmona por su apoyo incondicional y sus sabios consejos.

A mi alma máter por el préstamo del equipo.

Al profesor y amigo Jorge Flores Velázquez, por permitirme tener una estancia en México y aumentar mi conocimiento en el tema de CFD. Mi agradecimiento profundo.

A mis amigos incondicionales que sin duda formaron parte de este gran proyecto.

A mi familia por el apoyo y ayuda total.

A *mi madre* por apoyarme siempre, escucharme, vivir cada día este proyecto conmigo y darme lo mejor.

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS	vi
INDICE DE CUADROS	viii
RESUMEN	ix
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2. APLICACIÓN DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL EN INVERNADEROS	6
2.1. Formulación de los principios físicos	6
2.1.1. Conservación de la energía	8
2.1.2. Conservación de la masa	9
2.1.3. Conservación de momento	9
2.2. Cálculo de estado físico del continuo	11
2.2.1. Condiciones de ventilación	11
2.2.2. Modelos de turbulencia	12
2.2.3. Hipótesis de Boussinesq	20
2.2.4. Variaciones de la temperatura	21
2.2.5. Efecto de la radiación	24
2.2.6. Difusión y transporte de humedad	25
2.2.7. Transporte de especies	27
2.2.8. Mallas antiáfidas como frontera permeable	28
2.2.9. El cultivo como frontera activa	31
2.3. Etapas de modelado por dinámica de fluidos computacional	34
2.3.1. Ensamble de ecuaciones de conservación: preprocesamiento	36
2.3.2. Solución de variables de estado: proceso	39
2.3.3. Cálculo de variables derivadas: posproceso	40
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	41
3.1. Invernadero muestra	42
3.2. Registro de variables del entorno	46
3.3. Registro de variables del recinto	46
3.3.1. Análisis de temperatura y humedad relativa dentro del invernadero	48
3.4. Conformación del volumen de control	50
3.4.1. Dominio de trabajo	52
3.4.2. Discretización del dominio	53
3.4.3. Caracterización del fluido	54
3.4.4. Modelo de turbulencia	55
3.4.5. Modelo de transporte de especies	55

3.5. Materiales y condiciones de frontera	55
3.5.1. Definición de zonas de celdas	56
3.5.2. Condiciones de frontera	58
3.5.3. Métodos de solución	63
3.5.4. Validación del modelo	64
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	66
4.1. Definición de condiciones ambientales externas para los casos de estudio	66
4.1.1. Caso I: Temperatura más alta de la hora con más frecuencia de valores máximos del intervalo diurno	66
4.1.2. Caso II: Temperatura más baja de la hora con más frecuencia de valores mínimos del intervalo nocturno	68
4.1.3. Caso III y IV: Días aleatorios	69
4.2. Análisis de temperatura y humedad relativa en el recinto	70
4.2.1. Análisis de Varianza	71
4.2.2. Variación de la temperatura y humedad relativa con la pendiente y en sentido transversal (entre ejes y entre bloques)	73
4.2.3. Contrastes ortogonales en el sentido de la pendiente para la temperatura y humedad relativa	79
4.2.4. Comportamiento de la temperatura y humedad relativa los días de estudio respecto a los requerimientos de los cultivos	81
4.3. Distribución de temperatura y humedad relativa según modelos numéricos	88
4.3.1. Estudio de mallas	89
4.3.2. Validación de los casos en estudio	90
4.3.3. Distribución espacial de temperatura, fracción de masa de vapor de agua y vectores de viento de los casos validados	99
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	111
CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES	114
REFERENCIAS	117
ANEXO A	123
ANEXO B	126

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1. Cambio de un elemento del fluido en el tiempo</i>	6
<i>Figura 2.2. Discretización de variables</i>	34
<i>Figura 2.3. Formulación general de un modelo matemático utilizando CFD</i>	36
<i>Figura 3.1. Ubicación geográfica del invernadero en estudio</i>	42
<i>Figura 3.2. Pendiente del terreno y vista lateral del invernadero</i>	43
<i>Figura 3.3. Vista en planta del conjunto de invernaderos</i>	44
<i>Figura 3.4. Dimensiones y materiales constructivos del invernadero</i>	45
<i>Figura 3.5. Vista panorámica del invernadero</i>	45
<i>Figura 3.6. Sensores a 1,65 m del nivel del suelo</i>	47
<i>Figura 3.7. Distribución de los sensores en el invernadero</i>	48
<i>Figura 3.8. Proceso para la determinación de temperaturas extremas en base de datos</i>	49
<i>Figura 3.9. Diagrama de flujo del modelado del invernadero con CFD</i>	51
<i>Figura 3.10. Geometría del dominio, invernadero y el cultivo</i>	53
<i>Figura 3.11. Clasificación de materiales en el programa Fluent</i>	56
<i>Figura 3.12. Clasificación de zonas de celdas en el programa Fluent</i>	57
<i>Figura 3.13. Caracterización de fronteras en el modelo</i>	59
<i>Figura 3.14. Malla antiáfida observada en el microscopio óptico en el laboratorio de la Unidad de Recursos Forestales del Instituto de Investigaciones en Ingeniería, UCR</i>	60
<i>Figura 4.1. Análisis de frecuencia de las horas con las temperaturas más altas en el intervalo diurno</i>	67
<i>Figura 4.2. Valores de temperatura a las 12:30 horas del intervalo diurno</i>	67
<i>Figura 4.3. Análisis de frecuencia de las horas con las temperaturas más bajas en el intervalo nocturno</i>	68
<i>Figura 4.4. Valores de temperatura a las 4:45 horas del intervalo nocturno</i>	69
<i>Figura 4.5. Distribución de la temperatura en sentido de la pendiente (ejes) en los casos estudiados a las 12:30 horas</i>	73
<i>Figura 4.6. Distribución de la humedad relativa en sentido de la pendiente (ejes) en los estudiados a las 12:30 horas</i>	74
<i>Figura 4.7. Distribución de la temperatura en sentido de la pendiente (ejes) en los casos estudiados a las 4:45 horas</i>	75
<i>Figura 4.8. Distribución de la humedad relativa en sentido de la pendiente (ejes) en los casos estudiados a las 4:45 horas</i>	76
<i>Figura 4.9. Distribución de la temperatura en la sección transversal a la pendiente en los estudiados a las 12:30 horas</i>	76
<i>Figura 4.10. Distribución de la humedad relativa en la sección transversal a la pendiente en los estudiados a las 12:30 horas</i>	77
<i>Figura 4.11. Distribución de la temperatura en la sección transversal a la pendiente en los casos estudiados a las 4:45 horas</i>	78
<i>Figura 4.12. Distribución de la humedad relativa en la sección transversal a la pendiente en los casos estudiados a las 4:45 horas</i>	78

<i>Figura 4.13. Distribución la temperatura en los ejes del día 23 de octubre y su relación con los ámbitos óptimos del chile y tomate</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4.14. Distribución la temperatura en los ejes del día 7 de noviembre y su relación con los ámbitos óptimos del chile y tomate</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4.15. Distribución la temperatura en los ejes del día 6 de octubre y su relación con los ámbitos óptimos del chile y tomate</i>	<i>84</i>
<i>Figura 4.16. Distribución la temperatura en los ejes del día 6 de diciembre y su relación con los ámbitos óptimos del chile y tomate</i>	<i>84</i>
<i>Figura 4.17. Distribución la humedad relativa en los ejes del día 23 de octubre y su relación con los ámbitos óptimos del chile y tomate.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 4.18. Distribución la humedad relativa en los ejes del día 7 de noviembre y su relación con los ámbitos óptimos del chile y tomate.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 4.19. Distribución la humedad relativa en los ejes del día 6 de octubre y su relación con los ámbitos óptimos del chile y tomate</i>	<i>86</i>
<i>Figura 4.20. Distribución la humedad relativa en los ejes del día 6 de diciembre y su relación con los ámbitos óptimos del chile y tomate.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 4.21. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por ejes para el caso I.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 4.22. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por bloques para el caso I.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 4.23. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por ejes para el caso II.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 4.24. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por bloques para el caso II.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 4.25. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por ejes para el caso IIIB.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 4.26. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por bloques para el caso IIIB..</i>	<i>96</i>
<i>Figura 4.27. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por ejes para el caso IVB.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 4.28. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por bloques para el caso IVB..</i>	<i>98</i>
<i>Figura 4.29. Distribución de la temperatura simulada a) en ejes y b) en bloques para el caso II.</i>	<i>100</i>
<i>Figura 4.30. Distribución de la fracción de masa de vapor de agua simulada a) en ejes y b) En bloques para el caso II.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 4.31. Distribución de la velocidad y dirección del viento dentro del invernadero para el caso II.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 4.32. Distribución de la temperatura simulada a) ejes y b) bloques para el caso IIIB.</i>	<i>103</i>
<i>Figura 4.33. Distribución de la masa de fracción de agua simulada a) ejes y b) bloques para el caso IIIB.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 4.34. Distribución de la velocidad y dirección del viento dentro del invernadero para el caso IIB.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 4.35. Distribución de la temperatura simulada en los a) ejes y b) bloques para el caso IVB</i>	<i>108</i>
<i>Figura 4.36. Distribución de la velocidad y dirección del viento dentro del invernadero para el caso IVB.....</i>	<i>109</i>

INDICE DE CUADROS

<i>Cuadro 2.1. Trabajos de simulación de la ventilación de invernaderos con CFD.....</i>	<i>17</i>
<i>Cuadro 3.1. Resumen de las especificaciones de cada sensor de la estación meteorológica Davis Vantage Pro</i>	<i>46</i>
<i>Cuadro 3.2. Grupos de los ejes para los contrastes ortogonales</i>	<i>50</i>
<i>Cuadro 3.3. Caracterización de las mallas.....</i>	<i>54</i>
<i>Cuadro 3.4. Propiedades de materiales utilizados en el modelo.....</i>	<i>56</i>
<i>Cuadro 3.5. Características medidas a la malla antiáfida del invernadero.....</i>	<i>61</i>
<i>Cuadro 3.6. Características de la malla antiáfida integradas al modelo.....</i>	<i>61</i>
<i>Cuadro 3.7. Métodos de solución seleccionados para el modelo</i>	<i>63</i>
<i>Cuadro 4.1. Resumen de las condiciones climáticas de los casos seleccionado para el estudio</i>	<i>70</i>
<i>Cuadro 4.2. Análisis de varianza de la temperatura y la humedad relativa entre ejes y bloques por el método de Tukey para el caso I.....</i>	<i>71</i>
<i>Cuadro 4.3. Análisis de varianza de la temperatura y la humedad relativa entre ejes y bloques por el método de Tukey para el caso IVA.....</i>	<i>72</i>
<i>Cuadro 4.4. Significancia de los contrastes ortogonales de los valores de temperatura.....</i>	<i>79</i>
<i>Cuadro 4.5. Significancia de los contrastes ortogonales de los valores de humedad relativa.....</i>	<i>80</i>
<i>Cuadro 4.6. Estudio de las tres mallas analizadas</i>	<i>90</i>
<i>Cuadro 4.7. Validación de la temperatura y humedad relativa para el caso I.....</i>	<i>91</i>
<i>Cuadro 4.8. Validación de la temperatura y humedad para el caso II.....</i>	<i>93</i>
<i>Cuadro 4.9. Validación de la temperatura y humedad relativa para el caso IIIB.....</i>	<i>95</i>
<i>Cuadro 4.10. Validación de la temperatura y humedad relativa para el caso IVB.....</i>	<i>97</i>

RESUMEN

Se realizó un estudio del comportamiento de la temperatura y humedad relativa en un invernadero construido en ladera, tanto en el sentido de la pendiente como en la sección transversal. El invernadero se ubica en la zona de Viento Fresco de Las Brisas de Zarceros y cuenta con una pendiente del 60 %.

La temperatura y humedad relativa dentro del invernadero se midieron con 17 sensores colocados uniformemente en todo el recinto, registrando valores cada 5 minutos durante 3 meses. El invernadero se encontraba cultivado con tomate en etapa de formación del fruto (dos meses de sembrado) y chile con menos de una semana de sembrado.

A su vez, se instaló una estación meteorológica cercana al invernadero para registrar las condiciones climáticas ambientales como lo son, la temperatura, humedad relativa, radiación, magnitud y dirección del viento, todos cada 15 minutos. Se analizaron estadísticamente los datos de las condiciones climáticas externas para obtener días críticos de temperatura altas y bajas durante el registro de datos. Para evaluar si el ambiente es homogéneo en todo el volumen, se realizó un análisis de varianza de la temperatura y humedad relativa para conocer si existen diferencias significativas en el sentido de la pendiente y en la sección transversal a 6 casos puntuales de los cuales 3 se encuentran dentro del intervalo diurno (desde las 6:00 a 17:45 horas) y los otros 3 dentro del intervalo nocturno (desde las 18:00 a 5:45 horas) y se aplicó un modelo numérico para la simulación de la distribución espacial de la temperatura y la humedad relativa del invernadero utilizando dinámica de fluidos computacional. Los 6 casos analizados fueron utilizados para la validación del modelo. Entre los datos de entrada se encuentran, características de la

malla antiáfida usadas en las ventanas, temperaturas de frontera y características térmicas de los materiales que pueden influir en el intercambio de calor y difusión de especies en el aire interno del invernadero.

Con los resultados estadísticos se concluyó que la uniformidad de la temperatura y la humedad relativa en general, no presentan estratificaciones claras, esto por el efecto de las corrientes de viento y en general, los cambios ambientales como la radiación, tienden a romper las estratificaciones de la temperatura y humedad relativa.

Se destacó que la variación máxima de temperatura en sentido de la pendiente fue de 3,14 °C y 0,63 °C en sentido transversal. En el caso de la humedad relativa se presentó un gradiente más alto de 11,25 % en el sentido de la pendiente y 6,04 % en el sentido transversal.

El modelo obtuvo mejor precisión en los casos del intervalo nocturno y no fue preciso en el diurno. Se obtuvieron menores porcentajes en los errores cuadráticos medios en el caso de la temperatura que de la humedad relativa.

El modelado de invernaderos en pendientes, es un campo de investigación muy amplio que abarca desde el comportamiento del clima interno del invernadero, intercambio de gases, tasas de ventilación y efectos en la productividad del cultivo, así como los métodos numéricos que pueden llegar a plantear modelos muy complejos. Se pretende con este trabajo integrar esta herramienta como base para las investigaciones en las respuestas térmicas en invernaderos de Costa Rica para generar procesos de diseño.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Los invernaderos son estructuras que permiten adaptar el ambiente y las condiciones en que mejor se desarrolla un cultivo, favoreciendo el rendimiento del mismo y eliminando el concepto de producción por estacionalidad. “Estas estructuras protegen al cultivo de fenómenos climáticos y biológicos que lo afecten negativamente, pero sobre todo permite controlar todo el ambiente que le rodea, tratando de conseguir el mejor clima para el cultivo” (Baptista, Bailey, Meneses y Navas, 2010, pp.286).

La producción en invernaderos tuvo origen en regiones frías, en latitudes subtropicales, con el objetivo de mantener la producción de un cultivo durante todo el año. La utilización de este tipo de instalaciones, se ha incrementado en los últimos años alrededor del mundo.

Si no se tienen las condiciones apropiadas de operación los invernaderos en zonas tropicales, pueden trabajar en ámbitos de temperaturas elevadas y en algunas ocasiones con una excesiva humedad relativa. Los invernaderos son difíciles de controlar en términos de energía, por el constante cambio de las condiciones ambientales. Dependiendo de la región, la temperatura interna puede ser menor o mayor que la temperatura crítica a la cual la planta se desarrolla y produce con eficiencia, lo mismo sucede con la humedad relativa. Es por ello como lo citan Hellickson y Walker (1983), que existen técnicas de control de variables climáticas con equipo específico, como pantallas termo reflectoras, sombras, cobertores con aberturas o mallas, que permiten regular las condiciones climáticas requeridas. Sin embargo una buena operación inicia con un diseño que permita regular el invernadero aprovechando las condiciones naturales la mayor parte del tiempo.

Para diseñar y construir correctamente un invernadero debe considerarse el movimiento del aire, su distribución, las variables termodinámicas que lo componen y cómo éstas interactúan con el cultivo. Las variables climáticas a considerar para el buen control del ambiente de un invernadero son la radiación solar, la velocidad y dirección del viento, la temperatura y la humedad relativa.

Según Albright (2002), modificar el ambiente de un invernadero puede no ser muy rentable si éstos no son simples y si requieren una entrada de energía muy elevada para mantener las condiciones climáticas deseadas. Es por ello, que se trata de implementar modificaciones en el micro clima, adaptándolo a condiciones del clima externo como la orientación de la estructura y posición de ventanas que conlleve a un control para obtener el clima deseado.

En Costa Rica, según estudios del Programa Nacional de Ambientes Protegidos, (2010), existen 681 unidades que en total cubren un área de 688,23 has. De esta cantidad, la mayoría son artesanales, los cuales, no tienen control de los factores que modifican el ambiente dentro de la estructura, afectando de manera directa la productividad. Las estructuras restantes son de alta tecnología importada. Las empresas internacionales constructoras de invernaderos con alta tecnología generalmente solicitan la nivelación del terreno a un máximo de 1 % a 2 % de pendiente.

Gran cantidad de los terrenos utilizados para la producción agrícola en Costa Rica tienen pendientes elevadas y al pretender realizar un proyecto bajo ambientes controlados, se debe de remover un volumen de tierra muy extenso. Tal aspecto puede convertirse en una de las tareas más costosas cuando se va a emprender un proyecto de construcción de una estructura de este tipo.

La idea de un diseño de una estructura agrícola en pendiente, es evitar un gasto innecesario en el movimiento de tierra. Para realizar este objetivo es necesario determinar el comportamiento termodinámico bajo condiciones de ventilación natural, para definir qué mejoras pueden implementarse para obtener las condiciones que el cultivo requiere.

Para obtener una predicción del clima de un invernadero, se han utilizado modelos matemáticos, que permiten integrar todas las variables que componen este sistema ambiental y biológico. Estos modelos permiten evaluar estrategias del manejo de un invernadero sin necesidad de realizar experimentos costosos.

Los modelos estáticos utilizan variables medidas en un tiempo dado sin integrarlas como dependientes del tiempo, mientras que los modelos dinámicos si dependen del tiempo, por lo que envuelven más parámetros y se vuelven más complejos, sin embargo son más efectivos en términos de precisión.

Los modelos que predicen el clima dentro del invernadero utilizan variables de un lugar específico como humedad, radiación y temperatura externa por lo que son adaptados a un tipo de cultivo, región y condiciones climáticas.

Un modelo térmico matemático debe ser validado por valores experimentales, con el fin de tener la libertad de modificar el modelo, proyectar nuevos escenarios y tener seguridad de que los resultados son confiables. “La validación de un modelo permite garantizar que los resultados del modelo coinciden con el objetivo para el cual fue construido”(Baptista et al., 2010, pp. 289).

Debido a la gran complejidad con la que están implicados los subsistemas biológico y climático dentro de un invernadero, el uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD) se ha incrementado como herramienta para el análisis de comportamientos y

escenarios donde un fluido es el actor principal. Los trabajos con CFD en invernaderos, se empezaron desde 1989 y han venido mejorando, tanto su técnica como su validación. El estudio de la tasa de ventilación es el campo donde más se ha investigado en el ámbito.

Se ha realizado una investigación bibliográfica sobre la simulación del flujo de masa, comportamiento térmico, el control y manejo del micro clima que se desarrolla en la instalación bajo ambientes protegidos construidos en pendiente. A nivel nacional, se revisó la base de datos de la Revista Agronomía Costarricense, sin obtener un solo artículo relacionado con el tema.

Dada la falta de literatura acerca del control ambiental en invernaderos construidos en ladera en Costa Rica, en esta investigación se consideró como objetivo general, evaluar la respuesta térmica de un invernadero en pendiente, en términos de las necesidades del cultivo para desarrollar recomendaciones de diseño y operación. Además de realizar un modelo utilizando dinámica de fluidos computacional para analizar el comportamiento espacial de la temperatura y humedad relativa dentro del invernadero y validarlo. Por lo que este proyecto es el inicio de un campo de investigación de la utilización de CFD en invernaderos a nivel nacional, permitiendo desarrollar información que acompañe el diseño y construcción de invernaderos en pendiente.

Esto ha llevado a proponer esta investigación, cuyos objetivos específicos se pueden sintetizar en los siguientes aspectos:

Analizar las condiciones ambientales externas como temperatura, humedad relativa, radiación, dirección y velocidad del viento, utilizando una Estación Meteorológica en un periodo de al menos 12 meses.

- Registrar y analizar las condiciones ambientales externas climáticas e internas del invernadero en un período muestra adecuado al estudio
- Realizar un análisis estadístico de las mediciones del clima interno del invernadero, para conocer las diferencias climáticas entre varios planos de la instalación.
- Conformar un modelo computacional del comportamiento climático del interior del invernadero utilizando el balance de energía y el balance de masa.

El documento tiene como secuencia de contenidos la introducción, la aplicación de la dinámica de fluidos computacional en invernaderos, la metodología realizada y los resultados de la investigación.

CAPÍTULO 2. APLICACIÓN DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL EN INVERNADEROS

2.1. Formulación de los principios físicos

Según Flores (2010), la dinámica de fluidos computacional (CFD) es ahora un área de investigación que aporta conocimiento nuevo del comportamiento del aire y las variables termodinámicas en la producción de cultivos en invernaderos.

Las ecuaciones de Navier-Stokes son las ecuaciones en derivadas parciales no lineales, que describen el movimiento de un fluido en término de tiempo y espacio y se obtienen aplicando los principios básicos de la conservación de las leyes de la mecánica y la termodinámica a un volumen donde exista un fluido (figura 2.1).

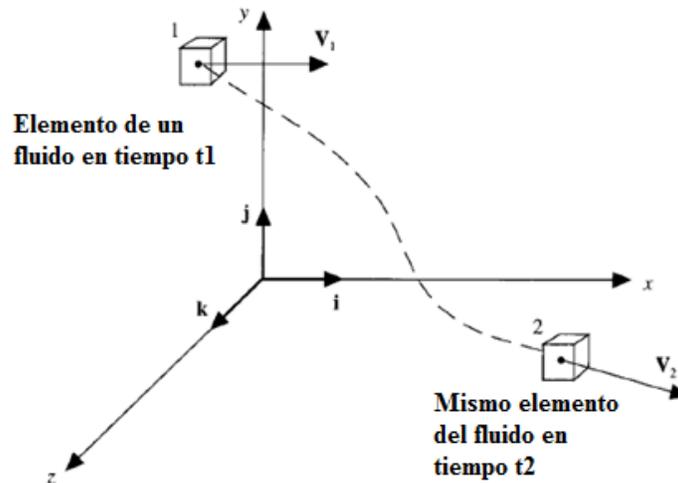


Figura 2.1. Cambio de un elemento del fluido en el tiempo. Tomado de “Computational fluid dynamics. The basics with applications” por J. Anderson, 1995, pp. 60–130. New York: McGraw-Hill.

La dinámica de fluidos computacional se basa en tres principios físicos que son: continuidad, momento y energía. Estos principios son aplicados a un modelo del flujo.

“Cada modelo del flujo produce un estado matemático diferente en las ecuaciones, ya sea conservativo o no conservativo”(Anderson, 1995, pp.40).

La ecuación 1, representa de forma generalizada la ecuación de transporte integrando los principios de Navier-Stokes a través de un balance de masa y energía

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{temporal} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \vec{v} \phi)}_{convectivo} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi)}_{difusivo} + \underbrace{\sum}_{fuente} \quad (1)$$

donde ϕ es una variable dependiente que define alguna propiedad del fluido sobre un volumen de control ($\phi(x, y, z, t)$); ∇ es el operador diferencial multidimensional $i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$; ρ densidad del fluido; \vec{v} vector de velocidad en coordenadas rectangulares;

Γ es el coeficiente de transporte o factor de difusividad, que representa la facilidad del movimiento molecular y; S es el término fuente.

La ecuación se compone de cuatro términos; la *temporal* representa la variación local con el tiempo de una variable en el volumen de control. El término *convectivo* representa el cambio de la variable de un punto a otro debido a la velocidad del flujo. El término *difusivo* “Representa el efecto de las colisiones moleculares debido al efecto macroscópico de la agitación termo molecular en un fluido incompresible” (Costarelli, 2011, pp. 3). El fluido supone un movimiento isotrópico. En el término difusivo se integra el efecto de difusividad térmica (velocidad de cambio de temperatura de un material), denotada como α con dimensiones $m^2 s^{-1}$ y que se define como

$$\alpha = k / \rho C_p \quad (2)$$

donde k representa la conductividad térmica del fluido ($\text{J m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$), C_p es el calor específico del material ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$) y ρ es la densidad del fluido (kg m^{-3}). Por último, el término fuente representa la variación de la cantidad de materia de la variable transportada, tanto fuentes internas como externas.

2.1.1. Conservación de la energía

El principio físico de la ecuación de energía es que “la energía se conserva”. La relación anterior es la primera ley de la termodinámica y se puede denotar como

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Tasa de cambio} \\ \text{de la energía} \\ \text{dentro del} \\ \text{elemento del} \\ \text{fluido} \\ \hline \text{A} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \text{Flujo de calor} \\ \text{hacia dentro del} \\ \text{elemento.} \\ \hline \text{B} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{Tasa de trabajo} \\ \text{hecho en el} \\ \text{elemento} \\ \hline \text{C} \\ \hline \end{array}$$

La tasa de cambio de energía en el elemento del fluido, consiste en la suma de la energía interna y la energía cinética por unidad de masa del elemento. Comenta Anderson (1995), que la suma de las energías de las moléculas que se transmite en cualquier movimiento traslacional, rotacional, vibratorio y electrónico de las moléculas y átomos del interior del elemento es la energía interna total. La energía cinética es la energía necesaria para mover un cuerpo a una velocidad específica de un punto a otro.

La conservación de energía está integrada por la transferencia de calor por conducción (Ley de Fourier), convección (Ley de Enfriamiento de Newton) y radiación (Stefan-Boltzman).

2.1.2. Conservación de la masa

La conservación de la masa se representa de la siguiente forma

$$\boxed{\begin{array}{l} \text{Flujo de masa} \\ \text{neta que sale} \\ \text{del volumen de} \\ \text{control} \\ \text{A} \end{array}} = \boxed{\begin{array}{l} \text{Tasa de cambio} \\ \text{de la masa en el} \\ \text{volumen de} \\ \text{control} \\ \text{B} \end{array}}$$

“La tasa neta de flujo másico fuera del elemento es igual a la tasa de decrecimiento de la masa dentro del elemento” (Anderson, 1995, pp. 60). La ley de conservación de masa es de naturaleza puramente cinemática sin contemplar las características del fluido.

2.1.3. Conservación de momento

El principio físico de la ecuación de momento es

$$F = ma \quad (3)$$

donde F es fuerza resultante aplicada a un fluido (N); m es la masa del fluido (kg); a : es la aceleración del fluido (m s^{-2}).

Comenta Anderson (1995), que las fuerzas resultantes que actúan en el elemento provienen de dos fuentes a saber: 1) del cuerpo en sí, como gravitacional, eléctrica y magnética y 2) las fuentes que actúan en la superficie y del elemento del fluido como la distribución de la presión y la distribución de los esfuerzos cortante y normal debido a la viscosidad del fluido. De manera que ambas fuentes son impulsadas por el fluido externo

empujando hacia la superficie. Estos esfuerzos están involucrados en la deformación del fluido.

Según Flores (2010), la deducción diferencial de las ecuaciones de Navier-Stokes es la que permite por medio de ecuaciones en derivadas parciales no lineales una aplicación práctica, adoptadas en las ecuaciones 4, 5 y 6 para un fluido viscoso e incompresible. La deducción de todas las ecuaciones se pueden encontrar en Anderson (1995).

Ecuación de continuidad:

Siendo ρ constante

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

Ecuación de momento:

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \rho g_i \quad (5)$$

Ecuación de energía:

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial P}{\partial T} + u_i \frac{\partial P}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

Donde u_i es la componente de velocidad en la dirección i (m s^{-1}); x_i indica la dirección i ; ρ es la densidad del aire (kg m^{-3}); P es la presión del aire (Pa); g_i es cualquier aceleración del campo en la dirección i (m s^{-2} , en este caso sólo la aceleración gravitacional, g); h es la entalpía (J kg^{-1}); k es el coeficiente de conductividad del aire ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$); T es la

temperatura absoluta del aire (K); μ es la viscosidad molecular del aire ($\text{kg s}^{-1}\text{m}^{-1}$) y; τ_{ij} es el tensor de Reynolds en la dirección de i a j (N).

2.2. Cálculo de estado físico del continuo

Se ha integrado al estudio del clima utilizando CFD, variables que pueden modificar la transferencia de calor en invernaderos como modelos de radiación, además de mallas antiáfidas, pantallas térmicas, equipos que ejercen convección forzada, deshumidificadores y nebulizadores. “La mayoría de las investigaciones sobre invernaderos usando CFD se han realizado en Japón, Holanda, Inglaterra, España y EE.UU., donde las industrias de invernadero están bien establecidas” (Romero, Choi y Lopez, 2010, pp.6).

En la última década se ha trabajado en el estudio de las tasas de ventilación considerando la geometría del invernadero y la optimización de las ventanas. CFD ha sido una herramienta muy utilizada para el estudio de las variables climáticas en un microclima por muchos autores como se detalla a continuación.

2.2.1. Condiciones de ventilación

Comentan Khaoua, Bournet, Migeon, Boulard y Chassériaux (2006), que la ventilación de un invernadero puede proporcionar las condiciones ambientales óptimas para la planta cuando existen temperaturas excesivas cerca de ella durante periodos de fuerte radiación solar, manteniendo la humedad relativa y la concentración del dióxido de carbono en niveles no perjudiciales para el cultivo.

La Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas, ANSIS/ASAE (2003), recomienda para el verano, una tasa de ventilación de $0,04 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por unidad de área de piso

dependiendo de la localización y clima y para el invierno entre el 10 % al 50 % de los requerimientos de ventilación en verano.

Boulard, Wang y Haxaire (2000), definen que los parámetros que afectan las tasas de ventilación en un invernadero son la ventilación impulsada por la flotabilidad, la velocidad y dirección del viento exterior, la combinación de aberturas laterales y superiores, la cantidad de naves, la longitud del invernadero, la estructura del invernadero, la utilización de mallas anti insectos, pantallas de sombreado y demás equipos para el control del clima.

Khaoua et al. (2006), estudiaron los perfiles de la velocidad del aire y la temperatura en un modelo 2D a la altura de la planta. Los resultados indican que la eficiencia de la tasa de ventilación puede mejorar con la orientación hacia barlovento de las cenitales. Comentan que la maximización de las tasas de ventilación no es siempre la mejor decisión y debe de tomarse en cuenta las diferencias de temperatura a nivel de 1 metro del nivel del suelo y la heterogeneidad en cada hilera y entre hileras.

Todos estos parámetros se han trabajado en mucho estudios de ventilación utilizando CFD por muchos autores como (Campen y Bot, 2003; Dayan, Strassberg y Dayan, 2001; Flores, Mejía, Montero y Rojano, 2011; Kacira, Sase y Okushima, 2004a; Romero et al., 2010).

2.2.2. Modelos de turbulencia

Para la mayoría de las situaciones de ventilación existen fluctuaciones en el fluido por las magnitudes en las componentes de la velocidad (por efecto de la temperatura, del viento o ambos). “Las mediciones y visualizaciones experimentales han demostrado el carácter turbulento del flujo de aire dentro y fuera del invernadero. Por lo tanto, el fenómeno de turbulencia debe ser tomado en cuenta” (Rico, 2008, pp.36).

Para la cuantificación en procesos con flujo turbulento, se recurre a un estudio estadístico de turbulencia, basado en los valores medios de las variables del flujo con sus fluctuaciones, llamado tensor de Reynolds.

“Para resolver las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes, se debe conocer la relación entre las seis tensiones turbulentas con las variables de flujo. A la relación se le conoce como modelo de turbulencia” (Flores, 2010, pp.39). Comenta Flores (2010), que la elección del modelo de turbulencia va a depender de consideraciones tales como la física del flujo a estudiar, la práctica establecida y conocida de algún modelo para un tipo de problema específico, el nivel de precisión requerido, los recursos computacionales disponibles y la cantidad de tiempo disponible para las simulaciones. Según Norton et al. (2007), existen muchos modelos de turbulencia, sin embargo ninguno de ellos se encuentra completo, cada uno tiene sus ventajas y desventajas. Además de que no es posible cuantificar en su totalidad el movimiento del aire debido a que se ignoran las propiedades estocásticas del flujo turbulento, pero su ejecución de la predicción puede ser muy confiable dependiendo de las condiciones del flujo y la geometría. Comenta que los modelos que han tenido mejor desempeño para el control de ventilación en invernaderos son: modelos de esfuerzo de cierre de Reynolds (RMS), simulación de remolinos largos (LES) y modelos de viscosidad de remolino.

Modelos de esfuerzo de cierre de Reynolds (RMS): son un tipo de modelo de RANS, los cuales se utilizan en modelos estacionarios. Trabajan con geometrías complejas y con número de Reynolds más grandes que LES. “El RMS unifica las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas de Reynolds resolviendo las ecuaciones de transporte para los seis tensores de Reynolds en tres dimensiones” (Fluent, 2009). Según Norton et al. (2007), el modelo RMS necesita gran cantidad de tiempo computacional y memoria para resolver el régimen del flujo, además de las dificultades para lograr un buen comportamiento de convergencia.

LES simula de forma más realista sistemas en los que la transferencia de energía cerca de la pared no es un efecto dominante. Se utiliza en casos complejos pero necesita grandes medios de cálculo. Trabaja con geometrías de complejidad pequeña y en ámbitos de número de Reynolds menores a 2000. “Los grandes remolinos turbulentos son altamente anisotrópico y dependen tanto de los gradientes medios de velocidad como de la geometría del dominio de flujo” (Norton et al., 2007, pp. 2402).

“La hipótesis del modelo de viscosidad de remolino (relación de Boussinesq) define que un incremento en la turbulencia puede estar representado por un incremento en la efectividad de la viscosidad del fluido y que los tensores de Reynolds son proporcionales al gradiente del promedio de las velocidades vía esta viscosidad” (Norton et al., 2007, pp. 2392).

Según Boulard y Wang (2002), la hipótesis anterior es la base de muchos modelos de turbulencia, como el modelo κ - ϵ que describe el modelo de viscosidad de remolino a través de la producción y destrucción de turbulencia. “En el modelo κ - ϵ , en el cálculo de los tensores se emplea dos ecuaciones adicionales, para la energía cinética turbulenta k y para

la tasa de disipación de flujo ε asumiendo isotropía” (Baeza, 2007, pp.39). En el programa Fluent (Ansys Fluent Inc.), están integrados tres modelos κ - ε : estándar, realización y modelo de grupo re-normalizado (RNG).

Según Rico (2008), la mayoría de los modelos de turbulencia como el modelo standard k - ε y el modelo de grupo re-normalizado (RNG), modelan la turbulencia incrementando la viscosidad del flujo.

Comenta Flores (2010), que el modelo RNG deriva de las ecuaciones instantáneas de Navier-Stokes y utiliza una técnica estadística llamada Teoría de los Grupos de Renormalización y su forma es similar a la del modelo estándar. Sin embargo, incluye modificaciones como un término adicional en la ecuación de ε , el cual mejora la precisión en el cálculo de los tensores turbulentos. Además integra el cálculo del número de turbulencia de Prandtl, en vez de considerarlo como un valor constante.

“El modelo que usualmente se utiliza es el κ - ε estándar para modelaciones de invernaderos en CFD” (Norton et al., 2007, pp.2402). Según Stangroom (2004), el modelo κ - ε , es el más usado y ha sido validado para muchas variaciones de flujo. Además, tiene un costo computacional relativamente bajo y disminuye la divergencia en los resultados que otros modelos mucho más complejos. Según Baeza (2007), es un modelo robusto, económico en términos de tiempo de cálculo y de una precisión bastante razonable, convirtiéndolo en uno de los modelos más empleados en problemas con flujos turbulentos.

Comenta Nebbali, Roy y Boulard (2012), el modelo de realización κ - ε , contiene una formulación diferente de la ecuación para la tasa de disipación del flujo, tratando de solventar algunas deficiencias de los modelos estándar y RNG utilizando una nueva

fórmula para la viscosidad turbulenta que es determinada con una variable denominada C_μ la cual, en el modelo estándar y en el RNG, el valor de C_μ es constante. Además, “el modelo realizable integra una nueva ecuación para la tasa de disipación (ε), que ha sido derivada de una ecuación exacta de la fluctuación de la vorticidad cuadrática media” (Baeza, 2007, pp.44).

Roy y Boulard (2005), realizaron una predicción de la ventilación natural de un invernadero tipo túnel, analizando la influencia de la dirección del viento y la sensibilidad del modelo de turbulencia. En su estudio utilizaron tres modelos de turbulencia: el modelo estándar κ - ε , el modelo RNG y el modelo de realización κ - ε . De sus resultados destacaron que el modelo estándar κ - ε en cuanto a la distribución de la velocidad, lidera una subestimación con respecto a los otros modelos, sin embargo los resultados son similares.

“El modelo estándar κ - ε está equilibrado entre un costo computacional y la simulación del flujo turbulento” (Teitel, Ziskind, Liran, Dubovsky y Letan, 2008, pp.352). En particular su aplicación fue discutida y validada numérica y experimentalmente en sistema de tamaño real por los autores Baeza (2007); Drori, Dubovsky y Ziskind (2005); Drori y Ziskind (2004) y Teitel et al. (2008). Además, comentan Haxaire, Boulard y Mermier (2000), en su estudio del comportamiento del viento en un invernadero con ventilación natural, que utilizar el modelo estándar κ - ε , permite conocer una descripción realista de la turbulencia con una eficiencia computacional.

Según Kacira (2004), el modelo de realización κ - ε tiene mejores rendimientos para los flujos con rotación, capas límite bajo gradientes de presión altos, o separación y recirculación de flujo, pero es un modelo relativamente nuevo.

En el cuadro 2.1, se observan algunos de los trabajos de modelado con CFD de la ventilación de invernaderos desde los más antiguos hasta los más nuevos y sus métodos para la simulación, así como los resultados según Norton et al. (2007). Se observa que la mayoría optó por utilizar el modelo estándar κ - ϵ y sus resultados fueron en su mayoría representativos a la realidad.

Cuadro 2.1. Trabajos de simulación de la ventilación de invernaderos con CFD

Autores	Ap*	D*	MT*	V*	R*	Comentarios
Okushima	Campo	3D	Std.	Pobre	1	Primer uso del std. K- ϵ en flujos de ventilación natural

et al. (1989)	del Flujo		K-ε				
Mistriotis et al. (1997a)	Campo del Flujo	2D	RNG K-ε	Excelente	3	Primero en usar una técnica numérica de gas trazador. Buen análisis de varios modelos de turbulencia	
Mistriotis et al. (1997b)	Campo del Flujo	2D	RNG K-ε	Razonable	3	Plantas representadas como un piso de calor. Varios modelos empíricos se usaron para determinar la partición del calor sensible	
Bartzanas et al. (2002)	Diseño	3D	Std. K-ε	Razonable	4	Efecto de arrastre del dosel del cultivo fue computarizado usando un medio poroso.	
Boulard and Wang (2002)	Campo del Flujo	3D	Std. K-ε	Razonable	5	Se usó modelo de transpiración del cultivo y modelos de efecto de arrastre	
Campen and Bot (2003)	Campo del Flujo	3D	Std. K-ε	Razonable	5	Se usó un invernadero vacío para observar los efectos del viento en la tasa ventilación	
Fatnassi et al. (2006)	Design	3D	Std. K-ε	Bueno	5	Se usó el modelo de Boulard y Wang (2002) en el diseño de un invernadero	

Nota: *Ap: aplicación. D: dimensión. MT: modelo de turbulencia. V: validación. R: Realista (Puntaje del 1-5, con 5 más real). Tomado de "Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: a review" por T. Norton, D-W. SunSun, J. Grant, R. Fallon y V. Dodd, 2007.. *Bioresource Technology*, 98, pp 2401.

El modelo κ - ϵ estándar utiliza las siguientes ecuaciones de transporte según (Fluent, 2009).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (8)$$

Donde G_k ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-3}$) representa la generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad, calculándose de la siguiente forma

$$G_k = -\rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (9)$$

G_b representa la generación de energía cinética turbulenta debido a la flotabilidad, calculándose de la siguiente forma

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (10)$$

μ_t representa la viscosidad turbulenta y se calcula de la siguiente manera

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

$\overline{u_i u_j}$ representa un esfuerzo de Reynolds, y u_j es la componente de velocidad fluctuante en la dirección j (ms^{-1}), β es el coeficiente de expansión térmica (K^{-1}), y Pr_t es el número de Prandtl de turbulencia adimensional.

$C_{1\varepsilon} = 1,44$, $C_{2\varepsilon} = 1,92$, $C_\mu = 0,09$, $C_{3\varepsilon} = \tanh\left(\left|\frac{v}{u}\right|\right)$, $\sigma_k = 1,0$ y $\sigma_\varepsilon = 1,3$. Son coeficientes del modelo.

Se puede expresar la ecuación de transporte turbulento como

$$\text{Energía neta} = \text{producción} + \text{redistribución} - \text{disipación}$$

Integrando términos difusivos y convectivos.

Dentro del modelo de turbulencia, se incorpora el efecto de flotabilidad mediante la aproximación Boussinesq.

2.2.3. Hipótesis de Boussinesq

La hipótesis de Boussinesq considera que las variaciones en la densidad de un fluido son insignificantes excepto en el término de fuerza externa debido a la gravedad (fuerza de flotación). Según Boulard et al. (2000), la hipótesis de Boussinesq asume que la viscosidad turbulenta es un escalar isotrópico, lo cual no es estrictamente cierto. La viscosidad turbulenta es calculada en función de κ - ϵ .

La relación de Boussinesq considera aire seco como fluido, mientras que en realidad siempre hay una mezcla de aire seco y aire húmedo. La ecuación de la densidad para la fuerza de flotación es

$$\rho = \rho_{referencia} [1 - \beta(T - T_{referencia})] \quad (12)$$

donde ρ es la densidad para la fuerza de flotación (kg m^{-3}); β es el coeficiente térmico de expansión (K^{-1}); $\rho_{referencia}$ es la densidad operativa (kg m^{-3}); $T_{referencia}$ es la temperatura del aire (K).

La $\rho_{referencia}$ y $T_{referencia}$ ambos son valores de referencia constantes.

Las condiciones que tiene esta aproximación son las siguientes (Norton et al., 2007):

- 1) Los diferenciales de la densidad se requieren sólo para el término de flotación de las ecuaciones de momento.
- 2) Existe una relación lineal entre temperatura y densidad, con todas las otras propiedades del fluido como constantes.
- 3) La diferencia de temperatura dentro del campo de flujo es menor que 30 °C.

2.2.4. Variaciones de la temperatura

Según Bournet y Boulard (2010), las fuerzas responsables del movimiento del aire son el efecto chimenea asociada a gradientes de densidad y las fuerzas de convección asociadas al viento. La condición menos favorable sucede cuando el efecto chimenea es la principal fuerza y cuando el invernadero está totalmente cerrado porque el movimiento del aire está controlado por efectos térmicos. Las fuerzas debido a los límites de estructura y materiales resultan gradientes de presión inducidos también, por la distribución heterogénea de la temperatura y humedad. Diferencias en la distribución del clima disminuye la calidad y al producción de un cultivo, también causadas por enfermedades o plagas.

CFD permite realizar escenarios para analizar efectos de las variables estudiadas y buscar la mejor solución en un modelo virtual en términos de energía y sustentabilidad. Kacira et al. (2004), utilizaron CFD para la optimización de la configuración tradicional de la ventana cenital por dos ventanas en dirección contraria para una mejor renovación de aire, especialmente en la zona del cultivo incrementado el 11 % la tasa de ventilación.

Limtrakarn et al. (2012), realizaron un nuevo diseño de un invernadero en arco aumentando la tasa de ventilación del 39 % más que el modelo convencional, el nuevo modelo bajó 4 °C máximo la temperatura en el día.

Rico (2008), realizó un estudio de la ventilación por efecto de la temperatura. Sus resultados concluyeron que existe una alta tasa de renovación del aire pero cercano a las ventilas, sin renovación en la zona de crecimiento del cultivo. Además cita que entre más grande el gradiente térmico entre la temperatura interna y externa, más grande es el efecto de estancamiento.

En términos térmicos, el invernadero es un acumulador de calor que varía de acuerdo a las propiedades de sus fronteras. El flujo de calor atraviesa la cubierta de invernadero en términos de pérdida o ganancia de calor cuando la temperatura del aire del invernadero, supera la temperatura ambiente exterior o viceversa. "La velocidad de flujo a la que atraviesa el aire depende de diferentes parámetros tales como la conductividad térmica y las propiedades de transmisión de radiación de los materiales de cubierta, las temperaturas del exterior, interior, la cubierta y el movimiento de aire en el interior y fuera del invernadero" (Ghany y Kozai, 2006).

Tong, Christopher y Li (2009), realizó un modelo de acuerdo a las condiciones climáticas externas utilizando CFD para predecir la distribución de la temperatura debido al tiempo de radiación solar. Los resultados indicaron en un día despejado o nublado, el mayor portador de energía en forma de calor es el suelo del invernadero.

Baezaa, Pérez, López y Gázquez (2011) compararon la distribución tridimensional de la temperatura para diferentes escenarios de ventilación utilizando CFD. Concluyeron que es necesario estudiar todos los escenarios posibles y poder garantizar un equilibrio

entre las aberturas y los valores absolutos de temperatura. Los casos donde las ventanas laterales estaban abiertas, producían mejores resultados que los casos donde solo las cenitales eran abiertas.

Iglesias, Montero, Muñoz y Antón (2009) realizaron un estudio del clima interno de un invernadero y el empleo de doble cubierta de techo como alternativa para aumentar la temperatura nocturna. De los resultados de las simulaciones se destaca que es posible mejorar la temperatura nocturna sin ayuda de calefacción artificial, aumentando su cesión de calor mediante la elección adecuada de materiales de acolchado. Se observó un aumento de la temperatura del aire, mediante el empleo de techo de doble cubierta en relación al techo simple. La temperatura del plástico interior o de la cortina térmica fue también superior a la del plástico simple, con lo que el riesgo de condensación disminuye. Durante la noche el suelo es la fuente de calor ya que es la zona de mayor temperatura, mientras que el techo, sobre todo el plástico exterior, es el sumidero de energía debido a su alto poder de emisión de radiación térmica.

Boulard, Fatnassi, Majdoubi y Bouirden (2008), concluyeron en su estudio, que la transmisión por convección y radiación son las formas de transferencia de calor dominantes. Las mediciones muestran que la diferencia entre el aire interno del invernadero y el externo está fuertemente vinculada con la radiación solar y segundo con la velocidad del viento.

Chow y Hold (2010), comentan que las condiciones de contorno térmicas y las cargas de calor afectan los límites de los valores absolutos de temperatura, pero no afectan la distribución de temperatura.

2.2.5. Efecto de la radiación

Muchos autores han estudiado la conversión de la energía solar dentro de invernaderos, evaluando sus conversiones de calor. El factor de transmisión de radiación solar absorbida por la evapotranspiración (calor latente) fue reportada en un ámbito de 0,22 a 0,5 por Boulard y Baille (1987); Kittas, Bartzanas y Jaffrin (2003); Kittas, Karamanis y Katsoulas (2005). El factor que estima el calor sensible que contribuye al incremento de la temperatura del aire se ha reportado entre 0,1 y 0,7 por Ghany y Kozai (2006); Boulard y Baille (1987) y Kittas et al. (2003), (2005). El flujo de calor del suelo fue medido mediante un plato de flujo de calor, para un invernadero cerrado en un suelo enarenado por Flores (2010). Considerando que 750 W m^{-2} entraba al invernadero y que de acuerdo a Boulard, Wang y Haxaire (2000) y Medrano et al. (2005), el cultivo utiliza entre $350\text{-}400 \text{ W m}^{-2}$, se obtuvieron valores de 159 W m^{-2} en el flujo de valor entregado por el suelo. La radiación reflejada fue de 20 %. El suelo almacena el resto para calentar en la noche.

Según Bournet y Boulard (2010), la transferencia radiactiva sin contemplar el efecto del cultivo es uno de los retos que se pondrá más atención los próximos años, debido a que es determinante en la transpiración y la fotosíntesis.

Fidaros, Baxevanou, Bartzanas y Kittas (2010), realizaron un modelo térmico contemplando las propiedades ópticas de la planta en la banda de radiación fotosintéticamente activa (PAR) utilizando el modelo de radiación conocida como ordenadas discretas. Los resultados concluyeron que la distribución PAR es independiente de la temperatura externa y presenta un comportamiento homogéneo asegurando potente radiación PAR durante al menos 8 horas al día.

Boulard y Wang (2002), trabajaron un modelo para conocer la heterogeneidad de la transpiración de lechuga en Francia en un túnel de viento. Utilizaron un modelo de radiación solar y la planta fue considerada como un medio poroso con una fuente de calor latente y sensible.

“El modelo de radiación de ordenadas discretas resuelve la ecuación de transferencia radiativa (RTE) para un finito número de ángulos sólidos discretos , cada uno asociado con un vector de dirección \vec{s} fijo en el sistema cartesiano mundial (x,y,z). La finura de la discretización angular es controlado por el usuario, análoga a elegir el número de rayos para el modelo de radiación de transferencia discreta.”(ANSYS Inc, 2010)

De la Torre, Soto, López, Torres y Rico (2011), en su análisis de los estudios de la utilización de dinámica de fluidos computacional en invernaderos, el efecto solar y radiación térmica es comúnmente tomado en cuenta integrándolo en una pared específica del modelo o como flujo de calor en una frontera del invernadero. Sin embargo si se quisiera conocer la distribución de la radiación dentro del invernadero se puede trabajar como un submodelo y tener datos específicos de radiación como una variable más a modelar.

2.2.6. Difusión y transporte de humedad

La humedad relativa es uno de los mayores factores que afectan el clima interno y por tanto el rendimiento del cultivo. Boulard y Wang (2002), comentan que la humedad relativa se relaciona con el vapor de agua absorbida por el aire, el vapor de agua debido a la evapotranspiración, cambios de aire a través de las aberturas, la condensación y la

evaporación misma del aire en el ambiente. Constituye además un factor decisivo para el manejo de plagas.

Durante la fase de crecimiento inicial la humedad relativa recomendada es ligeramente superior al 80 %, durante los periodos de crecimiento, floración y fructificación, se recomienda mantenerla dentro del ámbito de 60 – 80 %. Según Bournet (2014), los altos niveles de humedad relativa pueden conducir a la pérdida de calidad de los cultivos debido a enfermedades fúngicas, necrosis foliar, deficiencia de calcio y la generación de hojas suaves y delgadas. Por estas razones se recomienda tener un control de humedad.

Bournet (2014), realizó un estudio de los alcances que ha tenido el modelado de la humedad relativa con CFD. Según su investigación los artículos que incluyen la humedad como variable son muy pocos y representan solo el 19 % de los artículos publicados de las citas de CFD en invernaderos hasta el 2014. El estudio de deshumidificación o condensación representa el 25 % del total de ese porcentaje.

Roy y Boulard (2005), realizaron un modelo integrando el cultivo de tomate como un medio poroso para estudiar el comportamiento del aire en el invernadero. Concluyeron que el efecto de la dirección del viento a una inclinación de 0°, 45° y a 90° con respecto a la longitud axial del invernadero afecta directamente la distribución de la velocidad, temperatura y humedad relativa. La humedad relativa es 20 % mayor para la incidencia de 0° que en el de 90° y menos del 5 % de diferencia entre 45° y 90°.

La mayoría de los estudios del contenido de humedad con CFD se basan en el uso de modelos 2D, ignorando así las características en 3D de la distribución del clima en invernaderos según De la Torre et al. (2011) y Kim et al. (2008). Según Kim et al. (2008),

los modelos 2D pueden ser suficientes para modelar la ventilación y temperatura pero no para humedad debido a: 1) la falta de homogeneidad en la distribución de la humedad puede conducir a un mal control en la fase productiva y posiblemente conlleve a la aparición de enfermedades. 2) Los movimientos de gotas en la nebulización son dinámicos y muy complejos y la adición de deshumidificadores pueden hacer que la distribución de la humedad sea heterogénea.

Kim et al. (2008), realizó un modelo en 3D para identificar la distribución heterogénea de la humedad relativa en una instalación equipada para el control de humedad. Equipos y sistemas como los deshumidificadores y el enfriamiento reduce la diferencia de humedad entre el centro y las áreas de menor humedad relativa en el invernadero.

Comenta Bournet (2014), que el estudio de la humedad relativa sigue en proceso y CFD representa una eficiente herramienta para evaluar soluciones alternativas con equipamiento como sistemas de enfriamiento, almohadillas evaporativas o nebulizadores.

2.2.7. Transporte de especies

En el modelo se utiliza en particular la resolución de las ecuaciones de transporte de especies tanto para el vapor de agua como aire. El modelo calcula por medio de la ecuación de transporte, cualquier tipo de compuesto o especie que posee algún porcentaje que se incluya en el aire del ambiente.

Según Fluent (2011), cuando se utiliza el modelo de transporte de especies, el modelo predice la fracción de masa local de cada especie, a través de la solución de una ecuación de convección-difusión para la especie.

Según Jan, Janssens y De Paepe (2008), el aire simulado como fluido incompresible, las ecuaciones de energía y transporte de especies se simplifican como

$$\rho C_p \left(\frac{\partial}{\partial t} (T) + \vec{v} \cdot \nabla (T) \right) = \nabla \cdot (k \nabla (T) - (c_{vap} T + L_{vap}) \vec{g}) \quad (13)$$

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} (\omega) + \vec{v} \cdot \nabla (\omega) \right) = \nabla \cdot (\rho D \nabla (\omega)) \quad (14)$$

donde ρ es la densidad (kg m^{-3}); C_p es el calor específico del aire ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$); k es la conductividad térmica ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$); C_{vap} es el calor específico de vaporización ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$); L_{vap} es el calor latente de vaporización (J kg^{-1}); \vec{g} es la difusividad del vapor de agua (se define como la velocidad de difusión del agua de un lugar a otro) ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$) y; D es el coeficiente de difusión de vapor de agua en el aire seco (se define como la capacidad de un fluido para transportar el vapor de agua) ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}$). Las variables transportadas son temperatura, T (K) y masa de vapor de agua en el aire ω (kg).

2.2.8. Mallas antiáfidas como frontera permeable

Las mallas antiáfidas son utilizadas para un mejor control de áfidos los cuales, pueden incorporarse dentro del sistema biológico, provocando enfermedades y transmitiendo virus. Este tipo de malla evita de manera considerable los cambios de aire por las caídas de

presión que causa, variando así la temperatura y humedad del clima interno con respecto al ambiente externo. El efecto de la malla va a depender de su porosidad y de su grosor. Las mallas antiáfidas se identifican de acuerdo al número de perforaciones por pulgada lineal.

Según Bartzanas, Boulard y Kittas (2002), las mallas en general reducen aproximadamente un 33 % de la tasa de ventilación. La diferencia de los tamaños de la malla tiene un efecto significativo según el estudio de Harmanto, Tantau, y Salokhe (2006). La malla 40 reduce del 50 % a 35 % de la tasa de ventilación, la malla 78 y 50 causan a su vez, un gradiente de temperatura desde 1 a 3 °C. Con la malla 78 se obtuvo diferencias en la humedad relativa dos veces mayor que en la malla 40. Así mismo hubo un incremento del 50 % de humedad relativa en la malla 50 con respecto a la malla 78.

Comentan Fatnassi, Boulard, Poncet y Chave (2006), que la temperatura y la humedad relativa aumentan debido la malla anti insectos y que su efecto puede ser controlado, mejorando por ejemplo la orientación de las cenitales y el uso adicional de ventanas laterales. Explica que la utilización de CFD puede liderar en el proceso de diseño de invernaderos y estrategias en el control del clima.

Romero et al. (2010), realizaron un estudio del efecto de la tasa de ventilación en un invernadero en México con varios escenarios y diferentes mallas efectuando modelaciones con CFD. Comentan que las mallas antiáfidas se han modelado anteriormente como saltos porosos debido a la caída en la presión del aire que fluye a través de ellas. En este estudio, la caída en la presión se calcula utilizando variables como permeabilidad de la cara, coeficiente de presión y grosor de la malla porosa. Las variables se obtienen de forma experimental a partir de curvas de velocidad versus pérdida de presión utilizando un túnel de viento. Sus resultados concluyeron que el aumento del tamaño de la malla anti insectos

en las paredes laterales no cambia significativamente la tasa de intercambio de aire. “Por tanto, los estudios paramétricos computacionales sobre estructuras de invernadero pueden contribuir a identificar factores del diseño relevantes que afectan el enfriamiento del invernadero bajo condiciones climáticas locales específicas” (Romero et al., 2010, pp.3).

“En análisis con CFD las mallas anti-insectos son comúnmente representadas como medio poroso” (Teitel, 2001, pp.14). Muchos investigadores han realizado gran cantidad de estudios del efecto de mallas anti insectos en el micro clima interno de invernaderos como Baeza (2007); Bartzanas et al. (2002); Bartzanas, Kittas, Tadj y Draoui (2008); Fatnassi et al. (2006); Flores (2010); Romero et al. (2010); Teitel (2001).

Las mallas son modeladas como medios porosos, debido a que cerca de ella, la velocidad del aire pierde presión. Comenta Rico (2008) que la ley de Darcy define que la velocidad de flujo en un medio poroso es proporcional a pérdida de presión por efectos de viscosidad pero es violada en flujos de alta velocidad, los cuales son frecuentemente encontrados en el ambiente natural. Una modificación a esta ley se provee con la ecuación de Darcy-Forcheimer, la cual relaciona la fuerza de arrastre a través del medio poroso con una combinación lineal de la velocidad del flujo. Según Romero et al. (2010) , la pérdida de presión en un medio poroso se escribe como

$$\Delta p = - \left(C_1 \mu v + \frac{1}{2} C_2 \rho v^2 \right) \Delta J \quad (15)$$

donde Δp es la caída de presión ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$); μ es la viscosidad dinámica del flujo ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); C_1 es $1/K$, es la resistencia viscosa en términos de la permeabilidad K (m^{-2}); C_2 es el factor de resistencia inercial (m^{-1}); ρ es la densidad del fluido (kg m^{-3}); ΔJ es el grosor del medio poroso (m) y; v es la velocidad del fluido (m s^{-1}).

El submodelo en Fluent para condiciones de frontera de medios porosos se define como brinco poroso. Cuando existen velocidades muy pequeñas ($Re < 1$) el término cuadrático de la velocidad se descarta. “Por otro lado, cuando las velocidades corresponden a flujo estacionario ($Re < 2100$), sucede por tanto que puede despreciarse la viscosidad dinámica, reduciéndose la ecuación 9 a la ecuación de Bernoulli” (Flores, 2010, pp. 36)

2.2.9. El cultivo como frontera activa

La evapotranspiración y la densidad foliar de un cultivo, forman parte fundamental en el balance de masa de un invernadero, por tanto según Norton et al. (2007), el cultivo se integra al modelo como una resistencia al flujo del aire debido a su condición como medio poroso, provocando efectos en la tasa de ventilación.

“Fuentes y sumideros de calor, contaminantes y el vapor de agua son frecuentes en un ambiente controlado y el nivel de detalle en el que están siendo modelados ha estado siendo estudiados estos últimos años” (Norton et al., 2007, pp.2409). Existen rutinas definidas por el usuario (UDF) que son integradas a la matriz de ecuaciones. Comentan Boulard y Wang (2002) y Fatnassi et al. (2006), que las UDF han sido utilizadas en invernaderos comúnmente para calcular el efecto de la radiación solar y la transpiración del cultivo como función de las condiciones locales.

Roy, Vidal, Fargues y Boulard (2008), estudiaron la humedad y la temperatura con CFD en la superficie de las hojas a niveles bajos de luz. La transpiración del cultivo y el flujo del aire cercano de la superficie fueron incorporados a la respuesta estomática, además un parámetro único en el modelo debido al flujo de radiación. Los resultados numéricos concluyeron la dependencia en el valor de la resistencia estomática de la temperatura y la

humedad relativa. El estudio revela la importancia de integrar estos parámetros en un modelo de masa y transferencia de calor para simulación con CFD en la superficie de la hoja y transferirlo a todo el cultivo.

Boulard y Wang (2002), desarrollaron un modelo para simular el cultivo utilizando un medio poroso basado en la adición de un término fuente (en la ecuación de transporte) de momento debido al coeficiente de arrastre del cultivo, para la ecuación estándar de flujo de fluido. “Esta resistencia como medio poroso es usada en los modelos de invernaderos con CFD mediante un término fuente de momento determinado por la ecuación de Darcy-Forcheimer” (Campen, Kempkes y Bot, 2009). Bartzanas et al. (2008); Haxaire, Boulard y Mermier (2000), utilizaron el modelo de Boulard y Wang y estimaron la permeabilidad y el coeficiente de pérdida de presión no lineal de acuerdo al índice de área foliar. Romero et al. (2010), realizaron un estudio similar para el cual las propiedades usuario-entrada para el modelo fueron permeabilidad, coeficiente de resistencia inercial y porosidad, obteniendo los valores de cada uno mediante experimentos en un túnel de viento. Campen et al. (2009) integró la transpiración del cultivo como una fuente de vapor de agua dentro del medio poroso.

Majdoubi, Boulard, Fatnassi y Bouirden (2009), concluyeron que las filas del cultivo orientadas de forma perpendicular al movimiento del aire reducen la tasa del flujo del aire que atraviesa el cultivo en un 50 %.

Sapounas, Nikita y Martzopoulos (2008), para estudiar el efecto de un sistema de enfriamiento evaporativo (el cual es utilizado para disminuir la temperatura del aire), simularon un cultivo de tomate como un medio poroso considerando la flotabilidad del aire desarrollando un modelo de la caída de presión de flujo del aire debido al cultivo. Se

utilizaron el área de la hoja, la etapa y crecimiento del cultivo de acuerdo al modelo de turbulencia RANS. Los resultados fueron validados por mediciones de temperatura y humedad relativa a 1,2 metros en el cultivo y muestran la efectividad del sistema de enfriamiento evaporativo para el clima interno y el desarrollo del cultivo.

Flores, Lorenzo, Mejía y Montero (2014), concluyeron que la presencia del cultivo reduce la cantidad de flujo de energía en el suelo hacia el ambiente debido a la transpiración. Un invernadero es capaz de mantener niveles homogéneos de temperatura en la zona de cultivo (1 a 2 m), con velocidades de viento exterior de 3 a 5 m/s. Con velocidades de viento menores a 3 m/s la ventilación cenital produce saltos térmicos del orden de 10 °C en las zonas centrales del invernadero. Recomiendan la combinación de la ventilación lateral con la cenital para estructuras más cortas ya que existe una tendencia a incrementar los gradientes térmicos a medida que el aire que entra se aleja de la ventana frontal.

“Cada estudio proporciona nuevos elementos en el movimiento del aire, en las interacciones con el ambiente (posición, tamaño de las ventanas, etc.) y uno de los más importantes es la presencia y el efecto del cultivo” (Flores, 2010).

El modelado de microclimas, ha evolucionado con la participación de subrutinas o modelos que consideran el sistema biológico. Según Norton et al. (2007), estas subrutinas permiten el modelado de la transpiración de las plantas, la producción o consumo de CO₂ y programación de condiciones de frontera.

Una rutina para este tipo de modelado, comenta Norton et al. (2007), es primero el simular el ambiente interno basado en la energía solar neta como fuente de calor y segundo, la repartición de la energía solar en los flujos convectivos y flujos de calor latentes en

función de las condiciones locales, las cuales dependen de la calefacción e intercambios de vapor de agua entre la matriz del medio poroso (área del cultivo) y el aire dentro del invernadero.

Según De la Torre et al. (2011), el uso de modelos porosos para simular caídas de presión en mallas anti insecto o en cultivos, son muy populares y deben ser validadas experimentalmente. Comenta que nuevas tecnologías, como un velocímetro de imagen de partícula han trabajado bien en las predicciones y las soluciones deben ir aumentando la precisión de la simulación con la respuesta del sistemas biológico.

2.3. Etapas de modelado por dinámica de fluidos computacional

Según Sánchez (2004), los elementos principales en la dinámica de fluidos computacional son:

1. Discretización del flujo continuo a un flujo de aproximación discreta (figura 2.2), es decir, que las variables de campo (densidad, velocidad, presión) se aproximan por un número finito de valores en puntos llamados nodos.

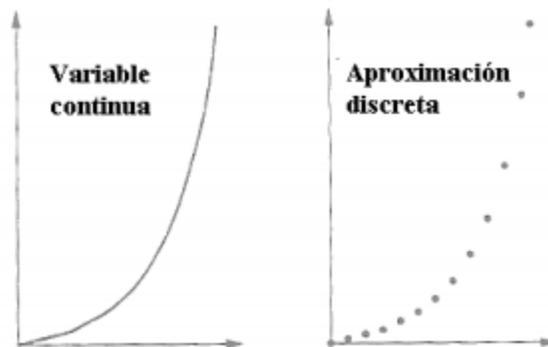


Figura 2.2. Discretización de variables. Tomado de “Dinámica de fluidos computacional”

por J. Sanchez, 2004, *Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier Stokes en flujo con capa límite desprendida. Aplicaciones en instalaciones deportivas con gradas cubiertas*, pp. 65.

2. Las ecuaciones de movimiento se discretizan en función de los valores en los nodos

Ecuaciones integrales (continuas) ⇒ Ecuaciones algebraicas (discretas)

3. El sistema de ecuaciones algebraicas se resuelven de forma iterativa hasta obtener los valores de las variables en cada nodo.

Para la generación de un modelo en CFD, se deben tener bien definidas las condiciones en las cuales se quiere simular el fluido y las características del mismo. De esa forma, se toman decisiones entre la gama de métodos que pueden desarrollar una misma función pero con un camino diferente en toda la construcción del modelo. La generación de cualquier modelo se puede dividir en tres grandes pasos: el preproceso, el proceso y postproceso como se observa en la figura 2.3.

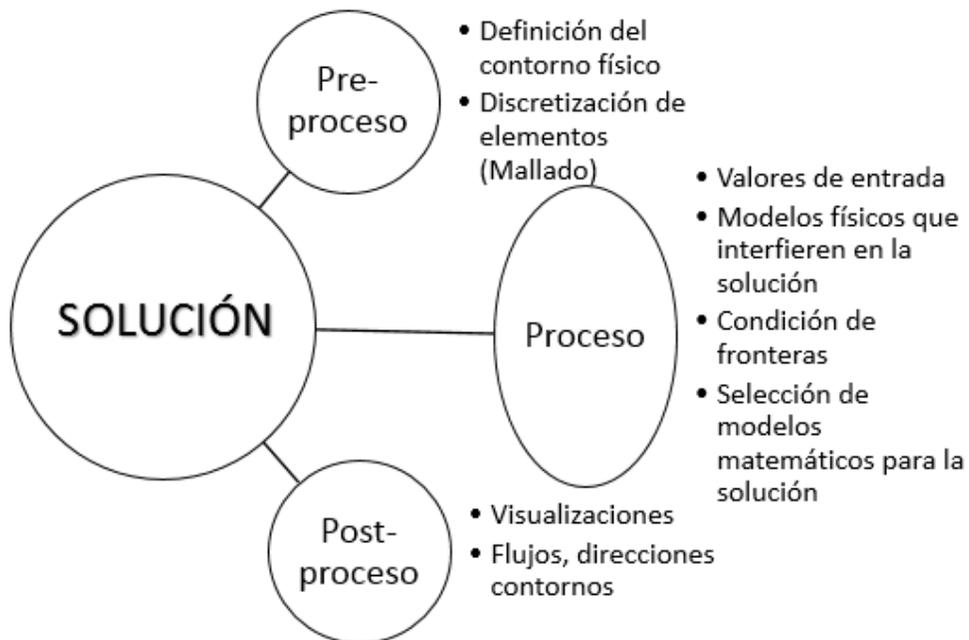


Figura 2.3. Formulación general de un modelo matemático utilizando CFD.

2.3.1. Ensamble de ecuaciones de conservación: preprocesamiento

El procedimiento comienza con la identificación de la geometría que se requiere estudiar (límites físicos). Seguidamente se da la discretización, donde el volumen ocupado por el fluido se divide en las células discretas.

El dominio es un volumen donde se considera que el fluido disminuye perturbaciones para la entrada y salida a la estructura o geometría en estudio, evitando interferencias en el modelo de turbulencia y evitando recirculación del aire una vez fuera de la geometría que se quiere analizar. Según Norton et al. (2007), el dominio computacional de un modelo en un edificio ventilado debería consistir en

1. La región interna y externa del edificio.
2. Las regiones externa e interna divididas en subdominios. Las regiones son resueltas independientemente, con las soluciones interpoladas e interconectadas con las regiones vecinas.
3. El ambiente interno del edificio, el cual es volumen de interés.

Explica Bournet, Ould-Khaoua y Boulard (2007), que para estudios en invernaderos normalmente la longitud del frente del dominio, que corresponde a la entrada del invernadero, debe ser tres veces la longitud del invernadero y siete veces en la parte trasera y la altura del dominio debe ser cinco veces la altura del invernadero. Según Flores (2010),

a base de estudios del flujo en túneles de viento recomienda cinco veces la longitud del invernadero hacia atrás y hacia los lados al menos tres veces la longitud. Hacia arriba al menos 10 veces la altura. Según Bournet y Boulard (2010) si el dominio computacional es muy pequeño con respecto a la estructura en estudio, puede ocasionar una entrada forzada al flujo induciendo resultados no reales. Las dimensiones del dominio se definen por medio de estudios experimentales y comparación de resultados.

Una vez seleccionado el dominio, se debe elegir el método para la generación de la malla del volumen del fluido. Según Sánchez (2004), se pueden clasificar en diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos. Existen dos tipos de mallado, mallado estructural (cada punto está direccionado en puntos cartesianos) y no estructural (no existe orden lógico). Las celdas en mallas estructurales en su mayoría son hexaedros en 3D y no estructural es una combinación de tetraedros y hexaedros.

Un estudio de Molina et al. (2010), realizaron la comparación de volúmenes finitos y elementos finitos en la simulación de la ventilación en invernaderos en 12 casos con tres tipos de invernaderos. Destacan que el método de elementos finitos consume dos veces más el tiempo computacional y diez veces más de almacenamiento de memoria que el método de volúmenes finitos, por tanto la mayoría de los estudios en invernaderos utilizan el método de volúmenes finitos. Este método según Sánchez (2004), emplea directamente las ecuaciones de conservación en su forma integral. La principal ventaja de este método es que la discretización espacial se lleva a cabo directamente en el espacio físico del problema y no como ocurre en las diferencias finitas. “Este método discretiza las ecuaciones en cada uno de los poliedros del dominio, en los que previamente se realiza una discretización espacial”. (Sánchez, 2004, pp.69),

En las ecuaciones de Euler, que son las ecuaciones utilizadas para la discretización del flujo (las ecuaciones de Euler trabajan con coordenadas fijas y analizan la velocidad de la partícula al pasar por un punto de una cadena continua de partículas del fluido) es necesario incorporar una ecuación de la entropía, esto para fortalecer las soluciones.

A mayor cantidad de elementos en la malla, mayor será su precisión pero también mayor tiempo de cálculo. El diseño del mallado debe ser de forma tal que los resultados no tengan dependencia con la calidad de la malla. La precisión va a depender también de parámetros que miden la calidad de la malla.

El programa computacional Ansys, permite medir la calidad de la malla mediante varios parámetros, entre los que se encuentra la calidad ortogonal, la relación de esbeltez, y el grado de asimetría.

La *calidad ortogonal* se calcula para las celdas, utilizando el vector normal de la cara, un vector que sale desde el centroide de la celda al centroide de cada una de las celdas adyacentes y el centroide de cada una de las celdas. Las peores celdas tendrán una calidad ortogonal cerca de 0, y las mejores cerca de 1.

La *relación de esbeltez* es una medida de la proporción entre su dimensión mayor y su dimensión menor. En general es preferible evitar cambios repentinos y grandes en las relaciones de aspecto de celdas en las zonas donde el campo de flujo presentan gran cambios o gradientes fuertes.

La *asimetría* se define como la diferencia entre la forma de la celda y la forma de una celda equilátera de volumen equivalente. Se recomienda que la mallas de óptimos cuadriláteros tengan ángulos de cerca de 90 grados, mientras que para las mallas triangulares deben preferiblemente tener ángulos cerca de 60 grados y menos de 90 grados.

Una regla general es que la asimetría máxima (unidimensional) para una malla triangular / tetraédrica en la mayoría de los flujos debe mantenerse por debajo 0,95; de lo contrario puede haber dificultades para llegar a convergencia.

2.3.2. Solución de variables de estado: proceso

Para definir el modelo, se especifica el comportamiento del fluido con las características del mismo, en las condiciones de límite y se definen las ecuaciones de transporte para el problema (masa, movimiento y energía). Se empieza la simulación y las ecuaciones son solucionadas de manera iterativa hasta converger.

El proceso es la parte matemática, que se realiza de acuerdo a las condiciones iniciales del sistema, los criterios de convergencia y los parámetros impuestos.

Comenta Flores (2010), que la discretización implica la sustitución de diversas aproximaciones de tipo diferencias finitas, por los términos de la ecuación integrada que representan procesos de flujo, con lo cual se aplica un método iterativo y con base a los parámetros establecidos se llega a la solución de estas ecuaciones. Las ecuaciones de Navier-Stokes, se aplican a lo largo de todos los volúmenes de control del dominio.

Para tener una solución en la simulación se debe considerar convergencia, consistencia y estabilidad. Como lo expone Flores (2010), estos tres conceptos constituyen un parámetro de comparación de los resultados. La convergencia se da cuando la solución del problema se acerca a la exacta, de acuerdo a los parámetros iniciales indicados. Una simulación consistente, significa que la matriz numérica es equivalente a las ecuaciones originales que gobiernan el flujo, sobre todo cuando la solución va convergiendo. La

estabilidad va enfocada hacia las variaciones de los errores de acuerdo a la cantidad de iteraciones necesarias para llegar a la solución. Por lo que entre más iteraciones se den y variabilidad de errores, más posibilidad habrá de arrastrarlos y que al final se llegue a una solución no real.

Los modelos físicos definen las ecuaciones de transporte y los procesos que en el modelo interfieren. En el caso específico de invernaderos, se trabajan modelo de turbulencia, modelo de transporte de especies (para la simulación de humedad) y modelo de radiación (en casos donde se mide la radiación interna en el invernadero). Como subrutinas está la zona porosa y la integración de un término fuente de masa en la zona de cultivo.

2.3.3. Cálculo de variables derivadas: posproceso

Una vez logrado los resultados, se debe emplear los conocimientos y criterios para analizarlos y para interpretarlos, de manera que la solución sea confiable. “El programa Fluent (Ansys Fluent Inc.) integra muchas formas de observar los resultados como vectores, contornos, gráficos en cualquier punto del espacio, tasas de ventilación, Gráficos de superficies 2D y 3D, seguimiento de partículas, observación de la malla, etc. Es posible también posible la exportación de datos a diversos formatos (ASCII, ABACUS, ANSYS, etc.)” (Flores, 2010, pp. 39). Así también se pueden realizar videos en dos o tres dimensiones, de manera que permite conocer cómo se comporta el flujo en el interior del dominio, de acuerdo a las condiciones físicas con la que fue creada la simulación y lo que se requiere analizar.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

El invernadero utilizado para la investigación se encuentra ubicado en el cantón de Zarcero en la provincia de Alajuela. Zarcero se caracteriza por sus fuertes viento, debido a los alisios predominantes del noroeste. También se caracteriza por tener bajas temperaturas y neblina que suele cubrir las zonas más altas.

Se realizaron mediciones de variables climáticas del entorno durante seis meses y del recinto durante tres meses. Se realizó un análisis estadístico de frecuencias de los días y horas de temperaturas más altas y más bajas para definir los casos a estudiar, donde se analizó la variabilidad de la temperatura y la humedad relativa tanto en el sentido de la pendiente (entre ejes) como en el sentido transversal (entre bloques). Se realizaron análisis de varianza entre bloques y ejes y contrastes ortogonales entre agrupaciones de ejes.

Los seis casos propuestos, fueron utilizados para el modelado numérico y su validación se realizó con la obtención del error medio cuadrático relativo en ejes y bloques. El proceso la evaluación descrita se presenta a continuación.

3.1. Invernadero muestra

El invernadero en estudio, se ubica en Viento Fresco de Las Brisas de Zarceros, a $10^{\circ} 14, 47 68'$ Norte y $84^{\circ} 22, 84 86'$ Oeste (figura 3.1) a una altitud de 1875 msnm. Tiene una pendiente del 60 % (figura 3.2) calculada con mediciones realizadas con una estación total Sokkia Set 650x con una precisión de distancia $2\pm 2\text{ppm}\times D$ mm.

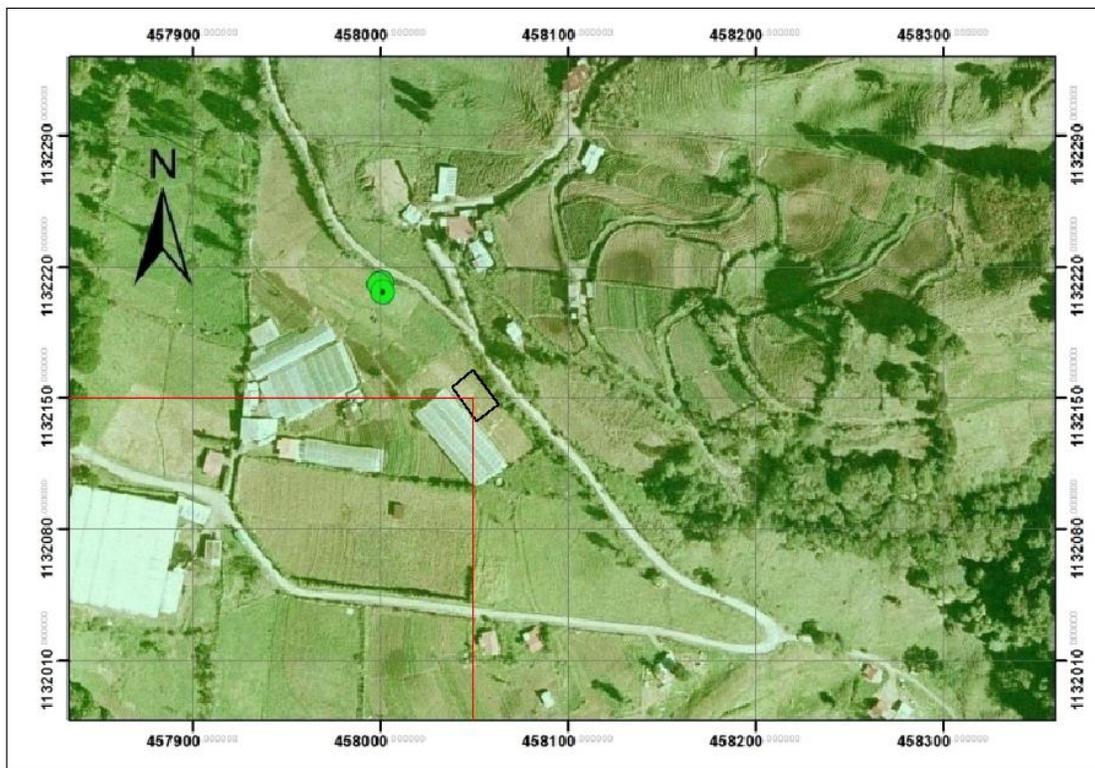


Figura 3.1. Ubicación geográfica del invernadero en estudio.



Figura 3.2. Pendiente del terreno y vista lateral del invernadero.

El invernadero está adosado a otro de similar geometría en su lado derecho, como se observa en el croquis de la figura 3.3. En su lado izquierdo existe producción a campo abierto, mientras que en su lado inferior se encuentra otro invernadero que por los desniveles del terreno no interfiere con la ventilación del que se está estudiando. En su lado superior, está ubicada una barrera viva que divide la propiedad con una calle secundaria.

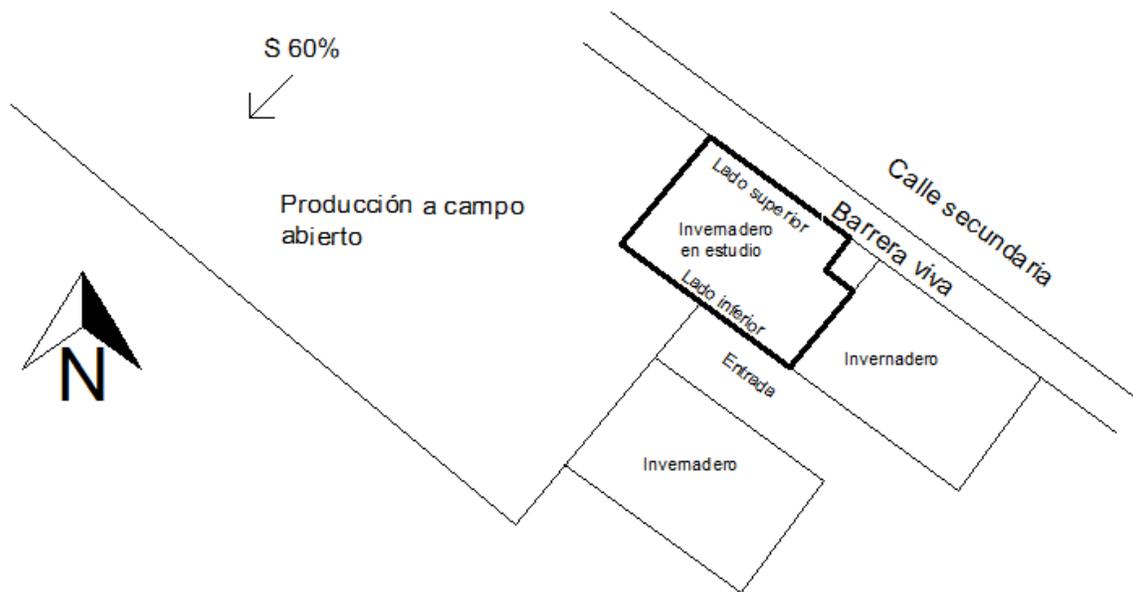


Figura 3.3. Vista en planta del conjunto de invernaderos.

Las dimensiones del invernadero, según se aprecian en la figura 3.4 son 33 m de largo, 27 m de ancho y 2,30 m de alto, el mismo fue construido de forma artesanal. Se estructura, de la parte inferior a la parte superior con marcos longitudinales cada 5,4 m y un último marco de 26,5 m de largo. Cada marco longitudinal forma ventanas cenitales (figura 3.5) de 15 cm x 33 m y la última superior de 15 cm x 25,6 m. Tiene una ventana lateral derecha en la parte superior de la división con el invernadero adosado de 55 cm x 21,6 m. Los lados inferior y superior están formados por ventanas cubiertas con una malla antiáfida de dimensiones 2,30 m de alto por 33 m de largo ambas. Las paredes laterales de 27 m, están construidas con plástico polietileno de baja densidad, al igual que la cubierta.

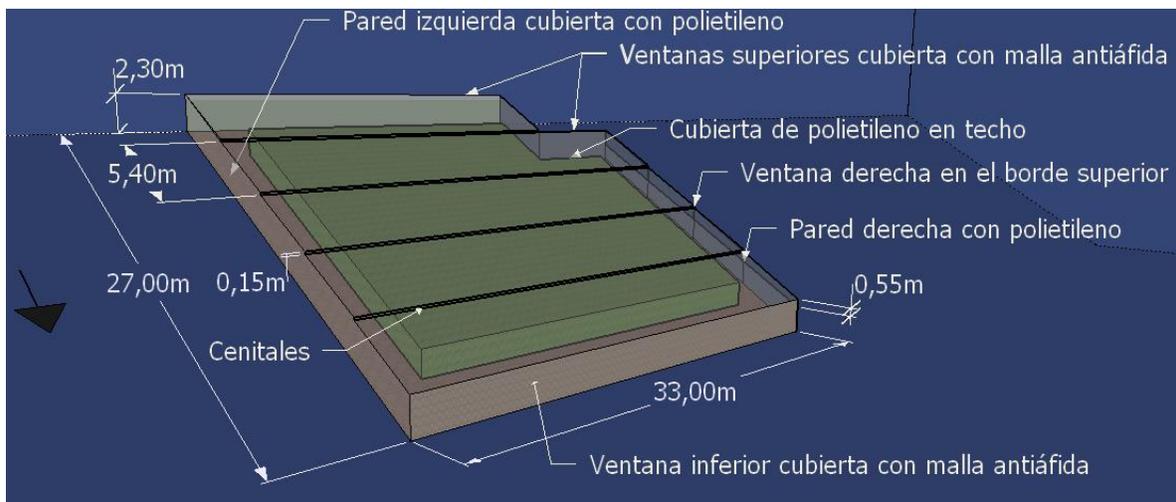


Figura 3.4. Dimensiones y materiales constructivos del invernadero.



Figura 3.5. Vista panorámica del invernadero.

El invernadero estaba sembrado con un 55,5 % de tomate variedad DRD-8108 y 44,5 % con chile de variedad nathalie. La distancia entre hileras de ambos cultivos es de 1,5 m, sembrados en terrazas directamente en el suelo.

3.2. Registro de variables del entorno

Para la medición de las variables climáticas, se instaló una estación meteorológica Davis Vantage Pro a 50 m Noroeste de la ubicación del invernadero. Las variables medidas fueron radiación solar, humedad relativa, temperatura, magnitud y dirección del viento. Los sensores de radiación solar, humedad relativa y temperatura se posicionaron a 1,5 m sobre el nivel del suelo. El sensor de velocidad del viento y la veleta, fueron ubicados aproximadamente a 7 m sobre el nivel del piso. Las mediciones de la estación meteorológica fueron obtenidas cada 15 minutos. La precisión y ámbitos de trabajo de los sensores se describen en el cuadro 3.1. El paquete de cómputo utilizado para la obtención del registro de datos fue WeatherLink© para Vantage Pro2™.

Cuadro 3.1. Resumen de las especificaciones de cada sensor de la estación meteorológica Davis Vantage Pro

Sensor	Ámbito de trabajo	Precisión
Temperatura	-40 a 65 °C	±0,5 °C
Humedad	1 a 100 %	±3 % y ±4 % sobre 90 %
Radiación	0 a 1800 W m ⁻²	±5 %
Velocidad del viento	1 a 80 ms ⁻¹	±5 ms ⁻¹
Veleta	16 puntos del compás	±5

3.3. Registro de variables del recinto

La temperatura y humedad relativa dentro de la estructura fueron medidas desde el 2 de octubre del 2014 al 8 de diciembre del 2014 y las condiciones del clima externo descritas se realizaron desde el 2 de octubre del 2014 al 9 de marzo del 2015. El presente estudio se realizó con las fechas registradas del recinto. Las condiciones internas se registraban cada 5 minutos. En el invernadero se utilizaron 17 sensores HOBO Onset (U10-003) colocados a 1,65 m del piso (ver figura 3.6). La distribución de los sensores, fue realizada de manera que se obtuvieran mediciones de todo el espacio del invernadero. La figura 3.7 representa las ubicaciones de cada sensor.

Los sensores tienen una precisión de $\pm 0,4$ °C para la temperatura y $\pm 3,5$ % para la humedad relativa. El ámbito de medición de temperatura es de 20 °C hasta 70 °C y para la humedad relativa de 25 % a 95 %. EL paquete de cómputo utilizado para la obtención de los registros fue el programa HOBOWare versión 3.7.3.

Las mediciones empezaron con el tomate en etapa de formación del fruto (dos meses de sembrado) y el chile con menos de una semana de sembrado.



Figura 3.6. Sensores a 1,65 m del nivel del suelo.

3.3.1. Análisis de temperatura y humedad relativa dentro del invernadero

Para el análisis del comportamiento de la temperatura y humedad relativa interna, la información de los sensores se agrupó por ejes y bloques mostrados en la figura 3.7 en dos intervalos: diurno desde las 6:00 horas a las 17:45 horas y nocturno de las 18:00 horas a las 5:45 horas desde el 2 de octubre al 8 de diciembre del 2014. De manera que la comparación entre ejes, analizara las diferencias con respecto a la pendiente y entre bloques en sección transversal a la pendiente.

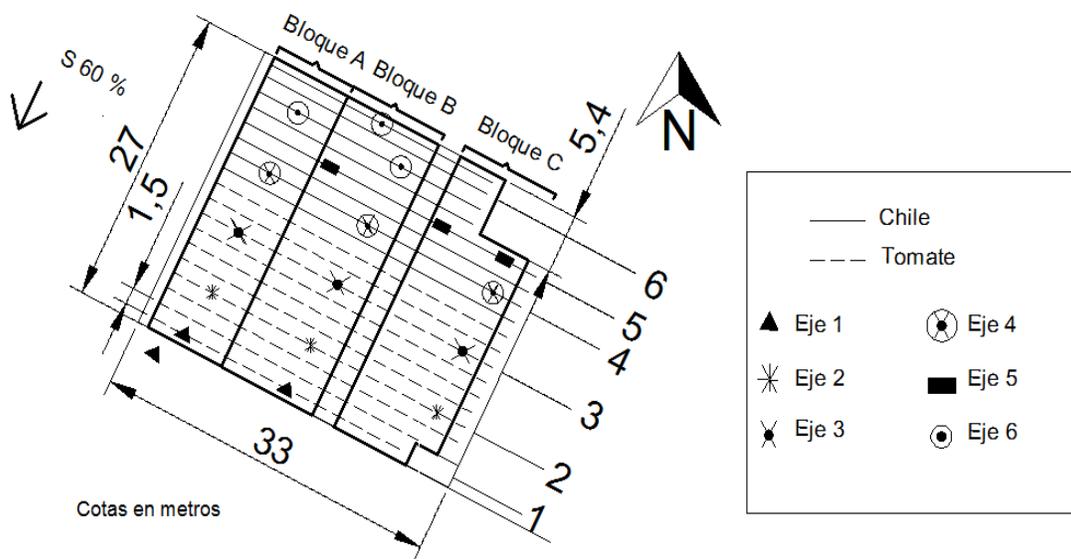


Figura 3.7. Distribución de los sensores en el invernadero

Para el análisis espacial de la temperatura y humedad relativa entre ejes y entre bloques y para conocer el efecto de la pendiente en dichas variables, se consideraron 6 casos:

I- La temperatura más alta en función de la fecha y hora con más frecuencia de valores máximos en el intervalo diurno.

II- La temperatura más baja en función de la fecha y hora con más frecuencias de valores mínimos en el intervalo nocturno.

III y IV corresponden a dos días tomados al azar donde para cada día se tomaron las horas de los primeros dos casos. Por lo que cada caso se divide en IIIA, IIIB, IV A y IVB.

Para el caso 1 y 2 las variables fueron definidas de la forma descrita en la figura 3.8.

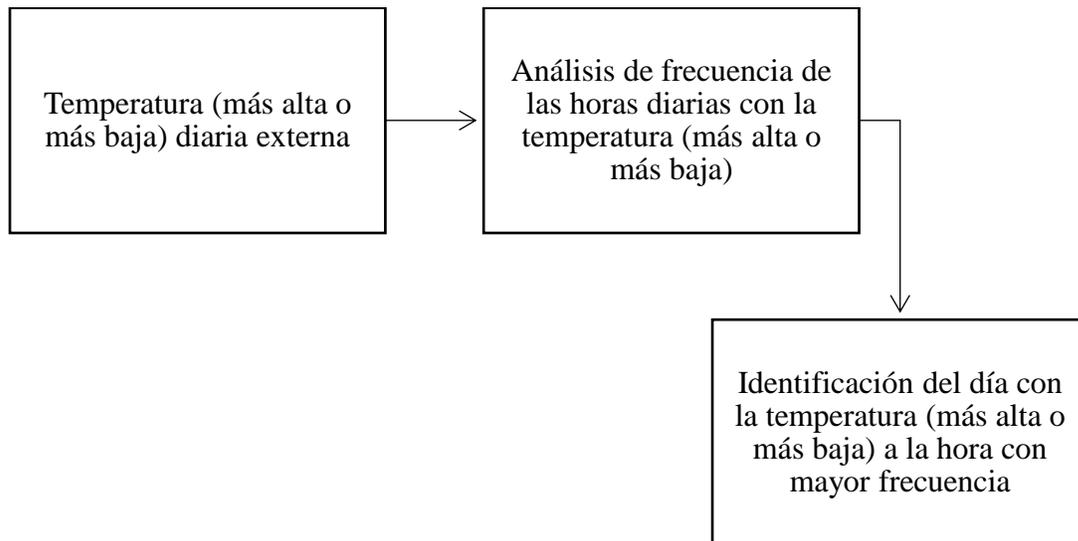


Figura 3.8. Proceso para la determinación de temperaturas extremas en base de datos

Para los seis casos se analizó si las diferencias significativas fueron estadísticamente en la temperatura y humedad relativa con respecto a la pendiente (entre ejes) y transversal a la pendiente (entre bloques) por medio de un análisis de varianza (ANOVA), con el método de Tukey y con un grado de confianza de $\alpha=0,05$.

Se realizó un análisis post-hoc llamado contraste ortogonal, que permite cuantificar si existe efecto y covarianza entre agrupaciones. Se realizó una comparación entre agrupaciones de ejes y sus hipótesis estadísticas respectivas se presentan en el cuadro 3.2

Cuadro 3.2. Grupos de los ejes para los contrastes ortogonales

Contraste	Grupo de ejes	Hipótesis estadística
1	1-2-3 comparado con 4-5-6	$H_0: \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = \mu_4 + \mu_5 + \mu_6$
2	1-2 comparado con 5-6	$H_0: \mu_1 + \mu_2 = \mu_5 + \mu_6$
3	1 comparado con 6	$H_0: \mu_1 = \mu_6$

3.4. Conformación del volumen de control

Se realizó un modelado aplicando dinámica de fluidos computacional en 3D en estado estacionario, utilizando el programa de cómputo Fluent del programa comercial ANSYS Workbench © 14.5.

Un invernadero al ser un espacio cuyas características ambientales depende del clima externo, el cual se encuentra en constante cambio, es muy difícil que llegue a un estado estacionario. Sin embargo, para poder realizar un modelado preciso en estado transitorio, se debe tener valores de las variables climáticas y de las condiciones de frontera que definen el dominio, invernadero y cultivo en forma continua para registrar los cambios. Por ejemplo, el flujo de calor o temperatura del suelo, evapotranspiración del cultivo según su etapa de desarrollo y temperaturas de las fronteras. Al no contarse con instrumentación para generar dicha base de datos, se decidió trabajar en estado estacionario cuyas condiciones si se conocen en un determinado tiempo.

En las figura 3.9, se presenta el diagrama de flujo diseñado para el modelado del invernadero utilizando el programa mencionado.

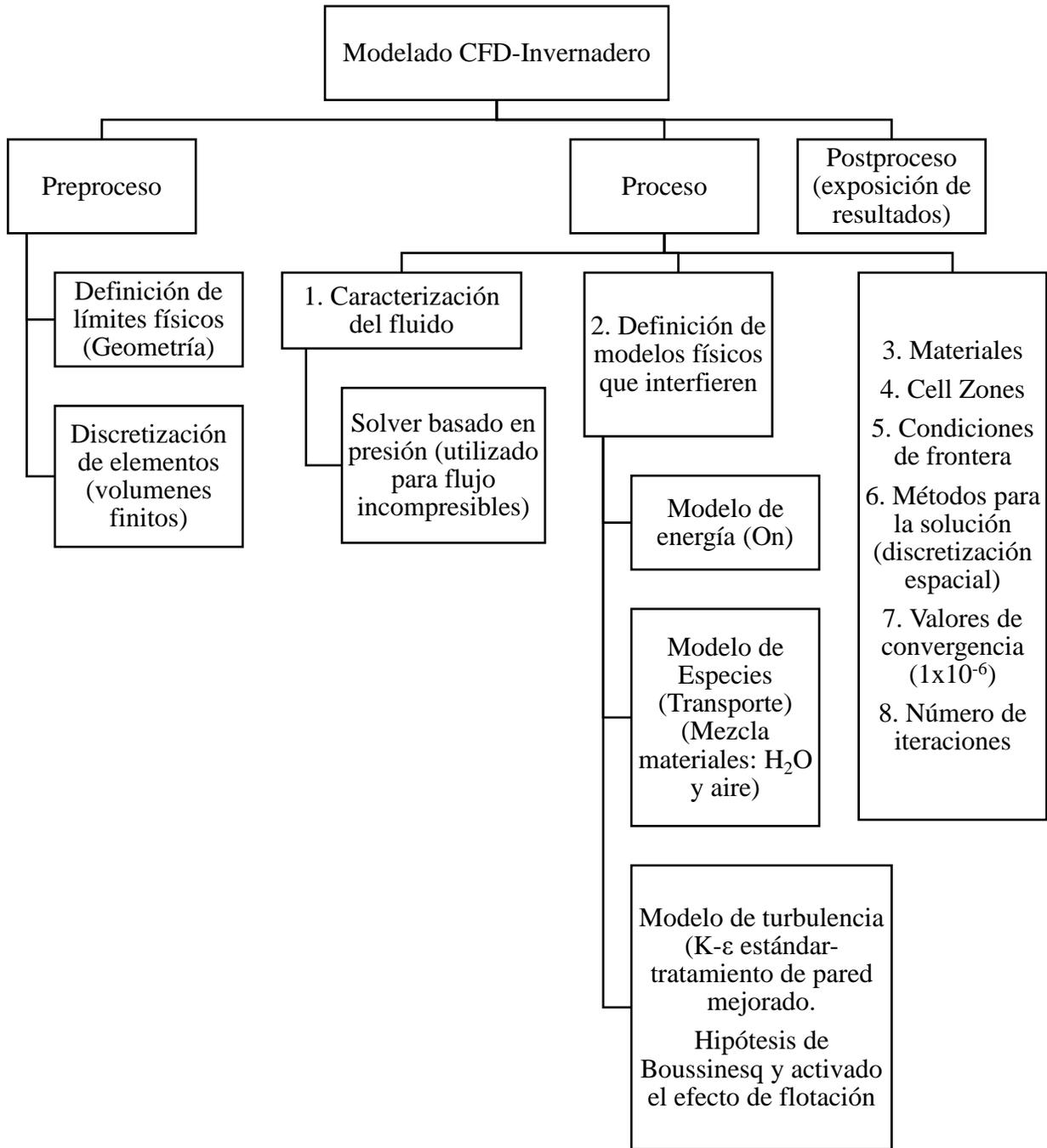


Figura 3.9.Diagrama de flujo diseñado para el modelado del invernadero con CFD.

3.4.1. Dominio de trabajo

De acuerdo a los valores descritos por Bournet et al. (2007) y por Flores (2010) y se definió el dominio con las siguientes dimensiones con respecto a la longitud del invernadero : hacia el lado superior cinco veces (165 m), hacia los lados laterales tres veces (99 m) y hacia el lado inferior siete veces (231m) y hacia arriba 10 veces la altura (230 m). Al dominio se le incluyó una cuña con pendiente del 60% para considerar la pendiente donde se sitúa el invernadero.

El cultivo se representó como un cubo con dimensiones 1,50 m de altura, 31 m de largo y 25 m de ancho, dejando un metro de distancia entre los bordes del invernadero debido a los pasillos existentes. Ya que el tomate es el cultivo predominante en el invernadero y es el más influyente en términos de porosidad y en la evapotranspiración por la etapa de crecimiento con respecto al chile y para fines de simplicidad del modelo, se utilizó las características del tomate como medio poroso y la altura de la planta en todo el volumen de cultivo. La figura 3.10 presenta la geometría total: dominio, invernadero y cultivo.

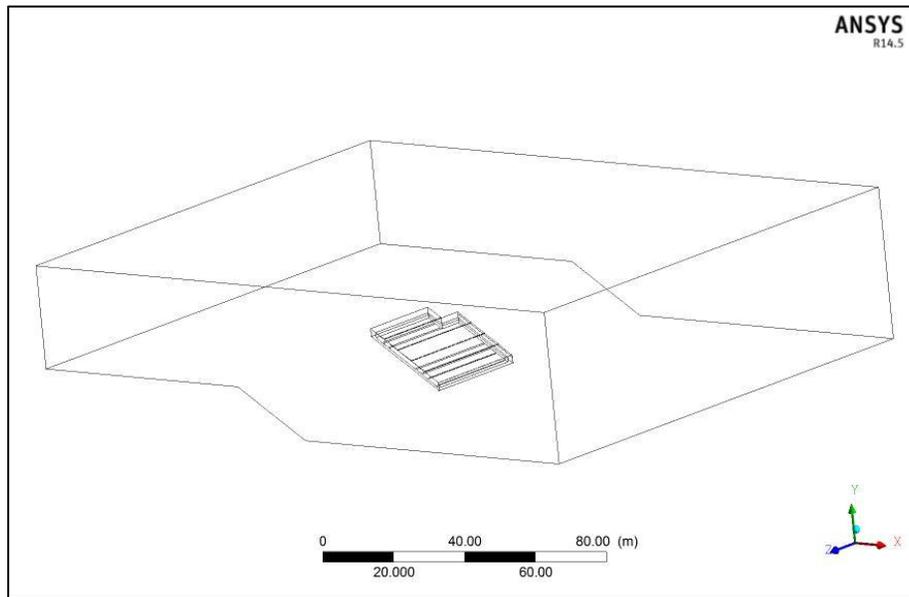


Figura 3.10. Geometría del dominio, invernadero y el cultivo.

3.4.2. Discretización del dominio

Para conocer el efecto de la densidad de la malla en los resultados se evaluaron tres mallas y se comparó los resultados para obtener la malla más acorde a los valores reales. En el cuadro 3.3 se presenta la cantidad de nodos y elementos de cada malla, además de los valores de la calidad ortogonal y calidad del elemento respectivamente, que para una buena calidad ortogonal debe ser cercana o igual a 1. La calidad del elemento también significa que entre más cercano a 1, la mayoría de las formas son hexaédricas y que la mayoría de los lados son de medida similar. Se plantearon de forma que su tamaño fuera significativamente diferente por lo que la malla 1 es el 10 % aproximadamente de los nodos y elementos de la malla 2 y a su vez la malla 3 es 50 % mayor que la malla 2 en términos de cantidad de nodos y elementos.

Cuadro 3.3. Caracterización de las mallas

Malla	Malla1	Malla 2	Malla 3
Nodos	274 211	2 119 642,00	4 145 136
Elementos	259 125	2 058 630	4 049 669
Promedio Calidad Ortogonal	0,9981±2,324	0,9994±0,010	0,9995±8,556
Promedio Calidad del elemento	0,9978±2,367	0,9989±0,013	0,9982±1,735

3.4.3. Caracterización del fluido

Primero se definieron las características del fluido a simular, para precisar seguidamente los modelos físicos que se contemplaron en la simulación. El aire se definió como un flujo isotrópico, incompresible y newtoniano.

De acuerdo al modelo definido el método de solución de las ecuaciones de conservación utilizado fue basado en presión, definido por las diferencias de densidad despreciables que se presentan en un invernadero, por lo que se integra como un valor constante (menos en el efecto de flotación), por el método de Boussinesq. De acuerdo con Fluent (2011), en método de solución basado en presión, la conservación de masa del campo de velocidad es lograda a través de una ecuación de presión, la cual es derivada de la ecuación de continuidad y momento de forma que el campo de velocidad es corregido por presión, satisfaciendo continuidad.

Los modelos físicos involucrados fueron definidos de acuerdo a la capacidad computacional que se tuvo en el momento del modelado y su uso por autores que han investigado de temas similares. Dichos modelos se presentan a continuación.

3.4.4. Modelo de turbulencia

El modelo de turbulencia utilizado para todas las modelaciones fue el κ - ϵ -estándar cuyo fundamento principal se basa en las ecuaciones (7) y (8) del capítulo 2.

El efecto de pared, se representa con fórmulas semi empíricas las cuales controlan las fluctuaciones entre la turbulencia natural del flujo y los vórtices que se crean en el momento de choque de partículas con las paredes. El tratamiento de pared mejorado (enhanced wall treatment) fue utilizado para la simulación.

3.4.5. Modelo de transporte de especies

La transferencia de masa de especies como la masa de vapor de agua en el aire está dada por gradientes de difusión y transportada por convección. El modelo de especies se basa en la Ley de Fick y para este estudio la simplificación de la ecuación de transporte está dada por la ecuación 14 del capítulo 2. Las especies incorporadas en el submodelo fueron aire y vapor de agua. Los demás componentes del aire fueron descartados para disminuir la capacidad computacional y tiempo de simulación.

3.5. Materiales y condiciones de frontera

En la figura 3.11 se presentan los materiales que se utilizaron para el modelo. Los ítems fluido y sólido, son incorporados por el programa, mientras que la mezcla se introduce cuando se activa el modelo de especies. El programa contiene las propiedades térmicas de cada fluido. Como material sólido, se incorporó el polietileno y el suelo, con las características del cuadro 3.4.

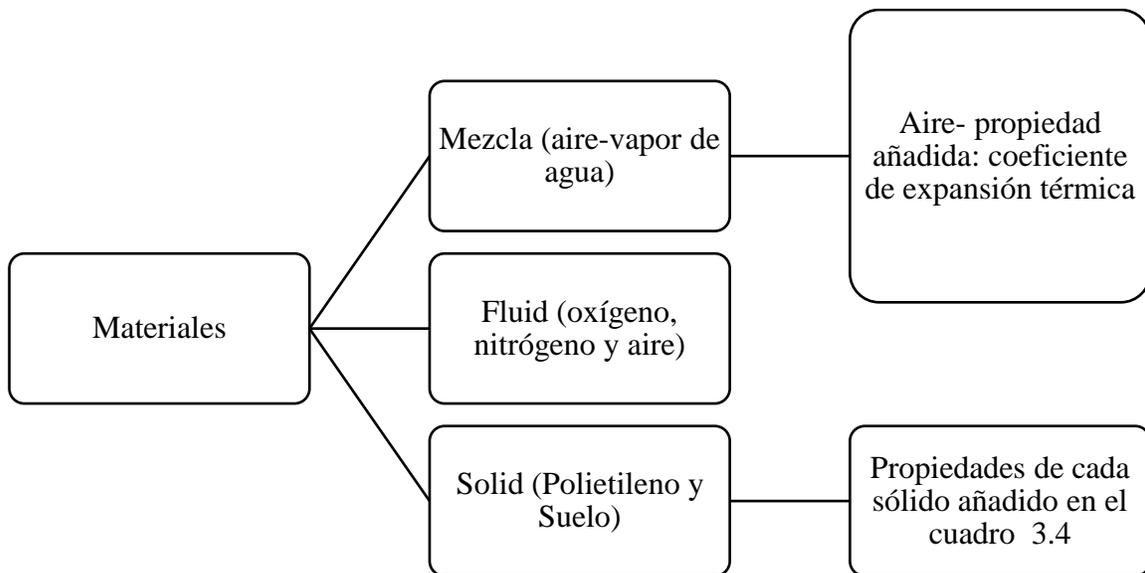


Figura 3.11. Clasificación de materiales en el programa Fluent.

Cuadro 3.4. Propiedades de materiales utilizados en el modelo

Propiedad	Aire (T=295K)	Suelo	Polietileno
Densidad (kg/m³)	1,225	1400	920
Calor específico (J/kg°K)	1006,43	1738	1900
Conductividad térmica (W/m²°K)	0,0242	1,5	0,3
Coefficiente de expansión térmica (1/°K)	0,003389		

Tomado de Estudio del clima en los principales modelos de invernaderos en México (Malla Sombra, Multitunnel y Baticenital), mediante la técnica del CFD (Computational Fluid Dynamics) por Flores, 2010, *Tesis doctoral, Universidad de Almería*, pp. 48.

3.5.1. Definición de zonas de celdas

Para la definición de zona de celdas, se encuentran las tres geometrías descritas anteriormente: cultivo-invernadero-dominio. La figura 3.12 presenta los tres volúmenes en

los cuales se condiciona las características del volumen para indicar el transporte del fluido en el interior.

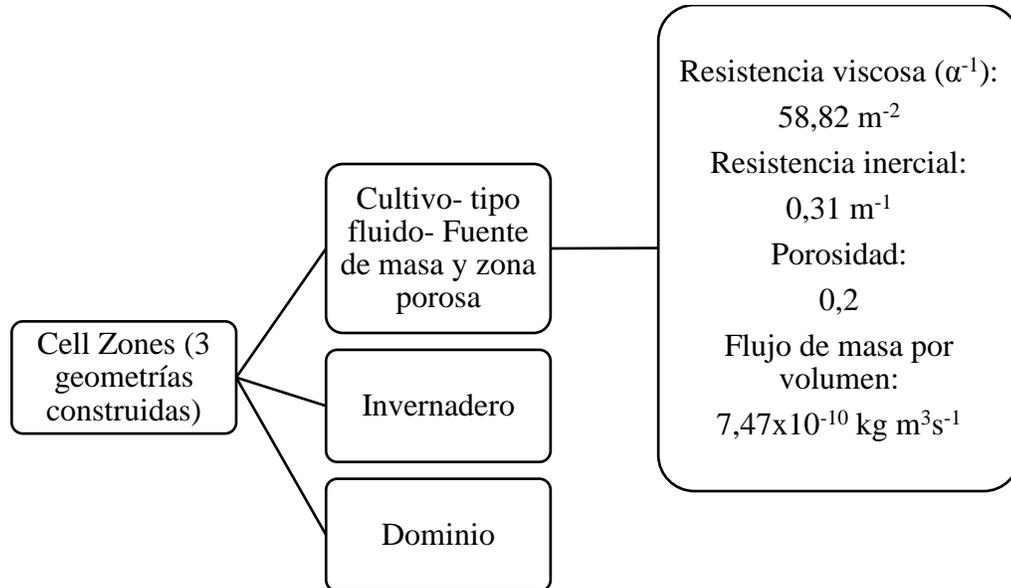


Figura 3.12. Clasificación de zonas de celdas en el programa Fluent.

La zona del cultivo como una zona porosa se describe con tres parámetros que son permeabilidad (α), coeficiente de resistencia inercial (C_2) y porosidad (γ). Para fines del proyecto se utilizaron los valores encontrados por Haxaire, Boulard y Mermier (2000) y utilizados por Romero et al. (2010), en un túnel de viento con cuatro plantas de tomate. Sus valores fueron $\alpha = 0,017 \text{ m}^2$, $C_2=0,31 \text{ m}^{-1}$ y $\gamma=20 \%$.

En la zona del cultivo, se incorporó la evapotranspiración como una fuente de masa en términos de flujo másico por volumen, calculada de la siguiente forma

$$\frac{\frac{kg}{s}}{m^3} = \frac{EVP \left(\frac{m^3}{s} \text{ por planta} \right) * \text{número de plantas} * \rho_{aire}}{\text{Volumen del cultivo}} \quad (16)$$

donde EVT es la tasa de evapotranspiración para el tomate en etapa de desarrollo: 0,92 L por planta día.⁻¹ según Flores, Ojeda, López, Rojano y Salazar (2006); la cantidad de planta en total son 270; el volumen del cultivo es 1162,5 m³ y; $\rho_{\text{aire}} = 1,225 \text{ kg m}^{-3}$.

3.5.2. Condiciones de frontera

Las condiciones de fronteras, representa el apartado donde se incorporan las características específicas de cada pared del modelo. La figura 3.13, resume las características de cada pared según su posición. Las condiciones de frontera del dominio cambian de acuerdo al caso correspondiente a evaluar, ya que deben estar acorde con la dirección y magnitud del viento predominante.

Los valores de entrada fijos para los seis casos modelados son:

- Características de la zona porosa en el cultivo
- Características de las fronteras de las mallas antiáfidas
- Se integró el mismo valor de temperatura en todas las paredes de polietileno en cada caso respectivo
- El porcentaje de transmitancia térmica del plástico, utilizado para el cálculo del flujo de calor del suelo.

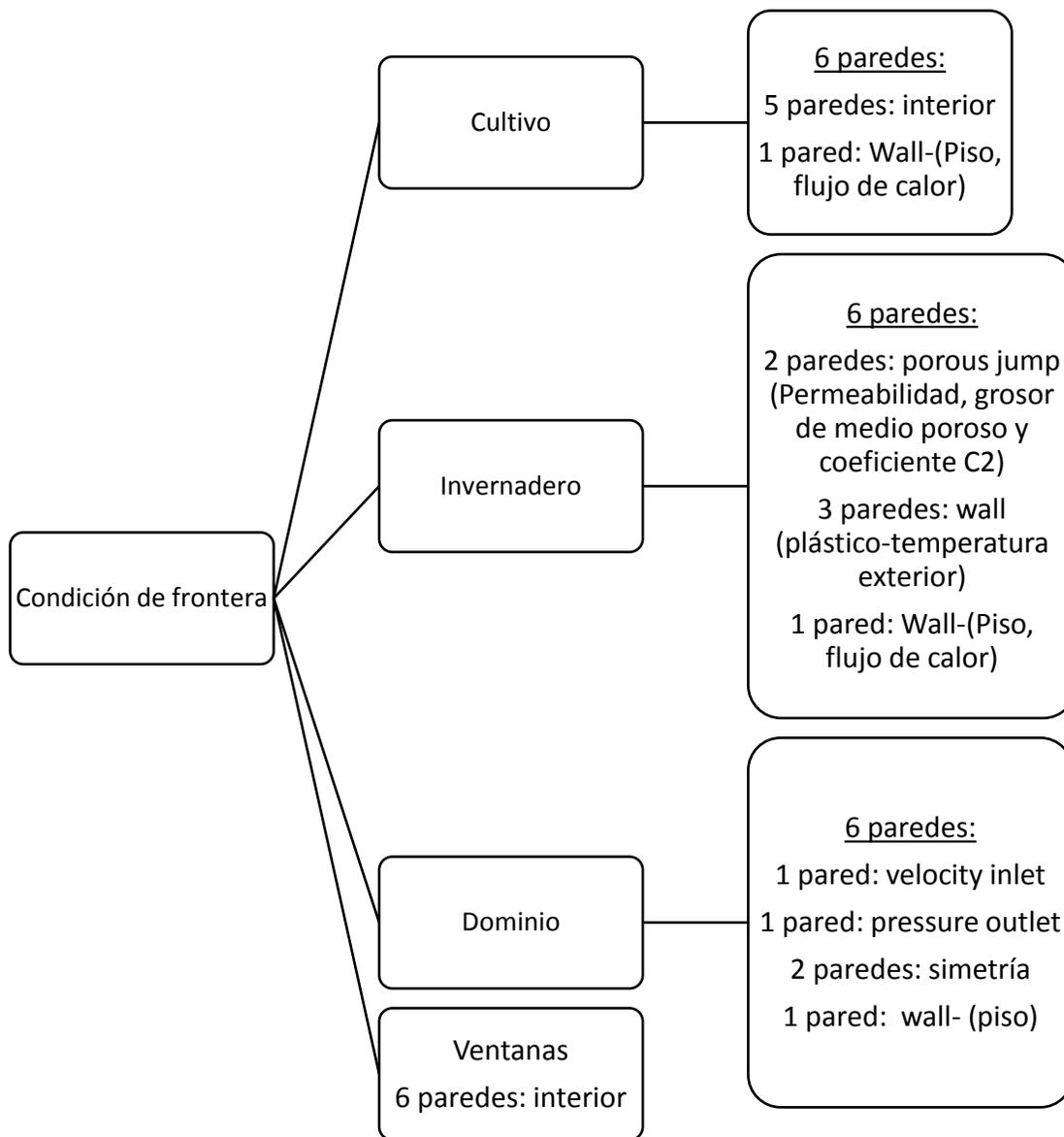


Figura 3.13. Caracterización de fronteras en el modelo.

Un medio poroso es simulado mediante un término fuente de momento y es determinado mediante la ecuación de Darcy-Forcheimer. “El efecto físico de una malla

porosa de bajo espesor sobre el flujo incompresible es una caída de presión a través de ella, lo que produce una caída de momentum” (Saldaña, 2012).

Para la medición de las dimensiones de la malla antiáfida, se utilizó un microscopio óptico en el laboratorio de la Unidad de Recursos Forestales del Instituto de Investigaciones en Ingeniería el 10 de enero del 2015. Se midieron las dimensiones del orificio, la porosidad y el número de orificios por pulgada lineal (figura 3.14). Con esta información las características de la malla utilizada (permeabilidad y coeficiente de brinco, C_2) fueron definidas y referenciadas a los trabajos de Molina-Aiz et al. (2010) y Flores (2010), utilizando la malla más semejante a las dimensiones de la que se encuentra en el invernadero. El cuadro 3.5 muestra las dimensiones medidas de la malla y el cuadro 3.6 se encuentran las características adaptadas al modelo de la malla-50 analizada en los trabajos descritos anteriormente.

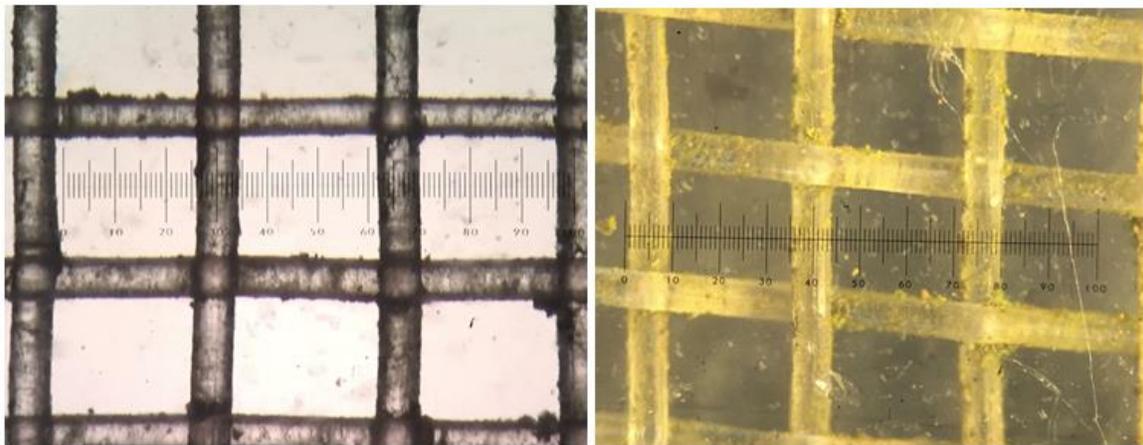


Figura 3.14. Malla antiáfida observada en el microscopio óptico en el laboratorio de la Unidad de Recursos Forestales del Instituto de Investigaciones en Ingeniería, UCR.

Cuadro 3.5. Características medidas a la malla antiáfida del invernadero en el laboratorio de la Unidad de Recursos Forestales del Instituto de Investigaciones en Ingeniería

Característica	Valor
Grosor hilo (mm)	0,200
Grosor malla (mm)	0,438
Mesh	50

Cuadro 3.6. Características de la malla antiáfida integradas al modelo

Característica	Valor
Permeabilidad	2,86E-09
C2	11131,45
Grosor	0,2

Los valores de entrada que caracterizan cada caso de análisis son: temperatura externa, humedad relativa externa (en términos de fracción de masa de vapor de agua), dirección y velocidad del viento y radiación externa (en término de flujo de calor integrado al suelo tanto del invernadero como al dominio).

Para calcular el flujo de calor H_{sc} ($W m^{-2}$) se utilizó la ecuación 16 referenciada por Flores (2010)

$$H_{sc} = RI_{\alpha} - Q_{suelo} - R_{\alpha} \quad (17)$$

donde

RI_{α} : es la fracción de radiación que interseca en la cubierta del invernadero ($W m^{-2}$), la cual se calculó de la siguiente forma

$$RI_{\alpha} = RI * \gamma \quad (18)$$

RI: es la radiación incidente en el exterior ($W m^{-2}$) y γ es el porcentaje de transmisión de radiación del plástico.

Q_{suelo} : es el flujo de calor absorbido por el suelo. Según Flores (2010), un 20 % de la radiación que ingresa en el invernadero es absorbida por el suelo, por lo que se calcula como

$$Q_{suelo} = 0,20 * RI_{\alpha} \quad (19)$$

R_{α} : representa la fracción de radiación reflejada, estimada de la siguiente manera

$$R_{\alpha} = RI_{\alpha} * \alpha \quad (20)$$

donde

α es el albedo que depende del tipo de suelo. Según Solano y Villalobos (2000) la zona de Zarcerro tiene como tipo de suelo predominante los andisoles. Comenta Henríquez, Cabalceta, Bertsch y Alvarado (s.f.), que en las posiciones intermedias del relieve de los andisoles presentan texturas franco-limosas o francas. Hanks (1996) presenta un cuadro con valores de albedo según el tipo de suelo. El albedo seleccionado fue un franco-limoso antes de cultivar de 0,23.

Se realizó la medición del porcentaje de transmisión del plástico en el Laboratorio de Fotónica de la Escuela de Ingeniería Eléctrica el 14 de noviembre de 2014, utilizando el espectro radiómetro ILT900-LED con una precisión espectral de 0,5 nm, una precisión radiométrica $\pm 3\%$ VIS y $\pm 5\%$ y una fuente de luz marca FOSTEC. Se midió la radiación

espectral desde el ámbito de luz visible hasta cerca del infrarrojo con respecto al porcentaje de transmisión en ambas caras de una muestra del plástico en estado original y una muestra del plástico en el estado actual. El porcentaje final de transmisión se obtuvo del promedio de los valores picos de las gráficas de porcentaje de transmisión vs longitud de onda medidos en el laboratorio. El porcentaje de transmisión promedio del plástico en condiciones reales es de 19,5 %.

3.5.3. Métodos de solución

Son los métodos de discretización de los volúmenes, sus caras y la forma de interpolación de datos y soluciones. El cuadro 3.7, muestra los métodos seleccionados para cada variable.

Cuadro 3.7. Métodos de solución seleccionados para el modelo

Gradiente	Celda basada en mínimos cuadrados
Presión	Estándar
Momento	Segundo orden-Upwind
Energía cinética turbulenta	Segundo orden-Upwind
Tasa de disipación turbulenta	Segundo orden-Upwind
H2O	Segundo orden-Upwind
Energía	Segundo orden-Upwind

El método de solución tiene dos tipos de sistemas de solución de las ecuaciones de velocidad y presión: acoplado (que soluciona las ecuaciones al mismo tiempo) y segregado (soluciona las ecuaciones por separado). El seleccionado para el modelado es segregado, dado el tiempo y capacidad computacional que se manejó. Existen 3 métodos de acople

segregado (SIMPLE, SIMPLE C, PISO), los cuales son algoritmos que eventualmente convergen a la misma solución pero a una velocidad y estabilidad diferente.

El sistema a utilizar llamado SIMPLE, según Craft (2008) trabaja de la siguiente forma

1. Comienza con valores iniciales
2. Resuelve las ecuaciones de momento para conseguir los componentes de la velocidad.
3. Calcula coeficientes y términos fuente por la ecuación de corrección de presión.
4. Calcula las correcciones de velocidad
5. Actualiza presión y componentes de la velocidad
6. Repite desde el 2 hasta que la solución ha convergido.

3.5.4. Validación del modelo

La validación se realizó comparando la información de temperatura y humedad relativa de los 17 sensores en los 6 casos estudiados, con series de datos simulados en cada eje y exportados desde el programa. Cada valor medido de las variables fue promediado con los cinco valores anteriores y los cinco valores posteriores al valor respectivo en cada caso, esto para tener un promedio de una serie de datos y no depender de un solo dato medido en un momento dado.

Según Kobayashi y Salam (2000), para determinar el rendimiento de un modelo se recomienda utilizar la raíz del error medio cuadrático relativo (RERMC) con la siguiente ecuación

$$\text{RERMC} = \frac{100}{\bar{y}_{dato}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{mod,i} - y_{real,i})^2} \quad (21)$$

donde \bar{y}_{dato} es el promedio de los datos medidos; n es cantidad de mediciones; $y_{mod,i}$ es el valor del dato simulado; $y_{real,i}$ es el valor del dato medido.

Según Baptista et al. (2010), para un modelado del clima interno de invernadero, el valor aproximado del error aceptable es de un 10%.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la primera parte de este capítulo se presenta los análisis estadísticos para definir los casos que se utilizarán para el estudio y modelado del comportamiento de la temperatura y la humedad relativa en el invernadero.

A la vez se presentan los resultados del análisis de varianza entre ejes y bloques y los contrastes ortogonales entre agrupaciones de ejes.

En una segunda parte se presenta los resultados del modelado del comportamiento de la temperatura y humedad relativa en el invernadero por medio de CFD y su validación.

4.1. Definición de condiciones ambientales externas para los casos de estudio

4.1.1. Caso I: Temperatura más alta de la hora con más frecuencia de valores máximos del intervalo diurno

El caso I es representado por el 23 de octubre a las 12:30 horas y fue escogido debido a que de acuerdo al análisis de frecuencia es el día con la temperatura más alta de la hora con mayor frecuencia de valores máximos en el intervalo diurno.

De acuerdo al análisis de frecuencia realizado con las horas de los valores máximos diarios de temperatura del intervalo diurno, se encontró que las horas de mayor frecuencia de temperaturas máximas son a las 12:30 horas y 17:45 horas con 7 datos cada hora como se observa en la figura 4.1. En el caso de las 17:45 horas las temperaturas máximas se dieron en el mes de diciembre, donde generalmente las condiciones son temperaturas bajas por lo que la hora utilizada para definir el caso I fue a las 12:30 horas, la cual es más representativa para todos los meses de registro.

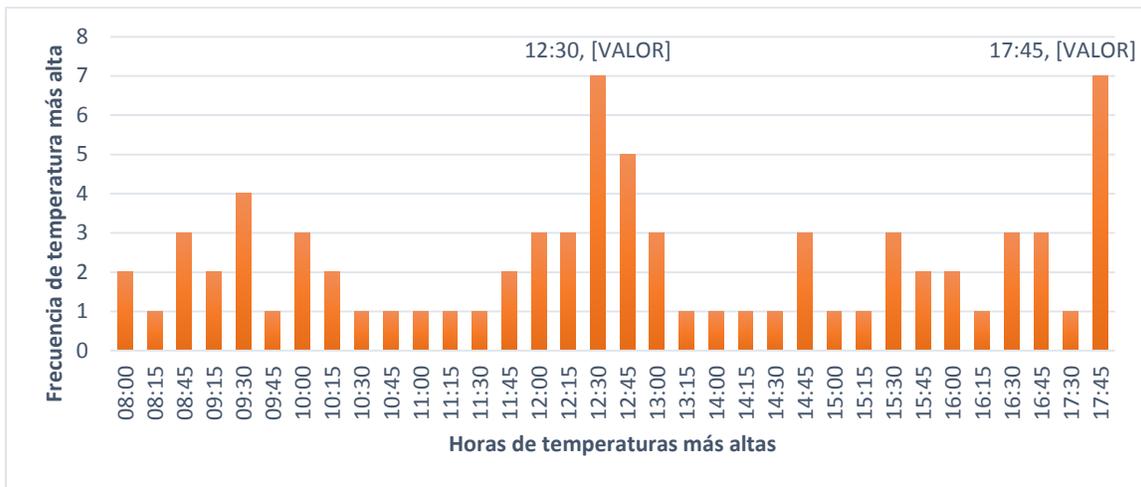


Figura 4.1. Análisis de frecuencia de las horas con las temperaturas más altas en el intervalo diurno

La figura 4.2 contiene los valores de temperatura a las 12:30 horas de todo el intervalo de datos registrados, resaltando que el día 23 de octubre a las 12:30 horas se obtuvo la temperatura más alta con un valor de 20,3° C. El 25 de octubre y el 30 de octubre registran un valor cercano, con 19,8° C y 20,2° C respectivamente.

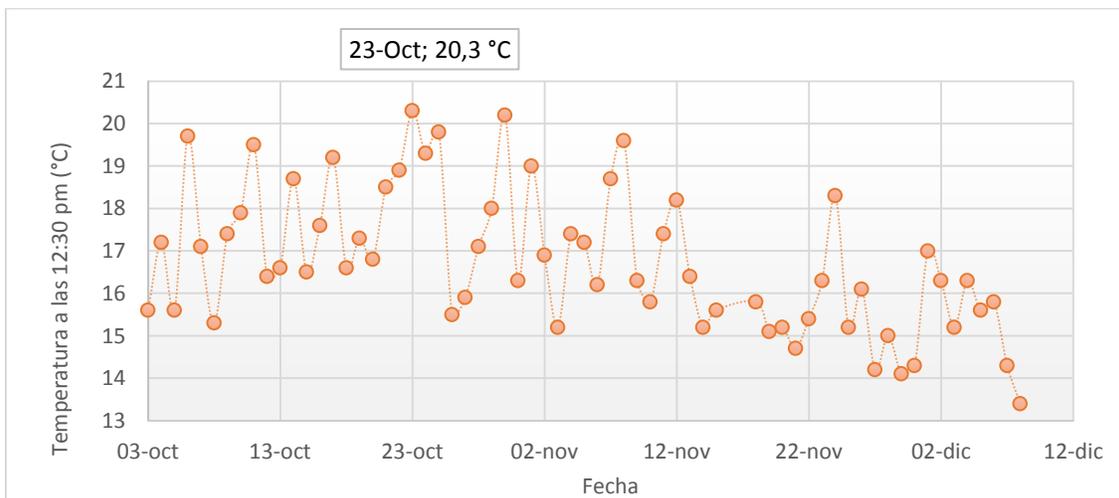


Figura 4.2. Valores de temperatura a las 12:30 horas del intervalo diurno

4.1.2. Caso II: Temperatura más baja de la hora con más frecuencia de valores mínimos del intervalo nocturno

El caso II es representado por el 7 de noviembre a las 4:45 horas y fue escogido debido a que de acuerdo al análisis de frecuencia es el día con la temperatura más baja de la hora con mayor frecuencia de valores mínimos en el intervalo nocturno.

La figura 4.3, muestra el análisis de frecuencia con las horas correspondientes a los valores mínimos de temperatura diarios del intervalo nocturno, destacando que a las 4:45 horas se obtuvo 8 veces, lo cual la define como la hora con más datos mínimos registrados.

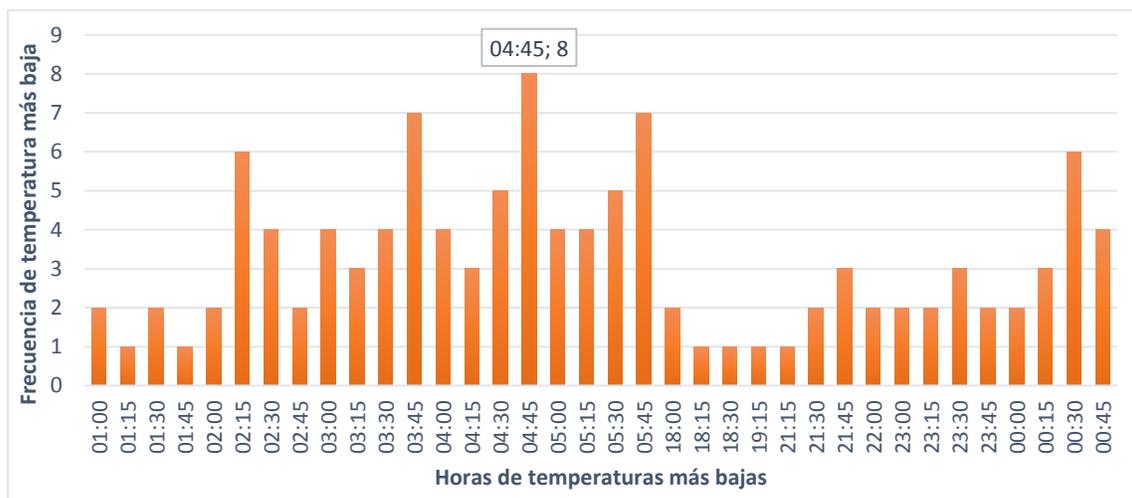


Figura 4.3. Análisis de frecuencia de las horas con las temperaturas más bajas en el intervalo nocturno

Las temperaturas del intervalo nocturno de todos los días registrados correspondientes a las 4:45 horas se observan en la figura 4.4. El 7 de noviembre, registra la temperatura más baja a esa hora con 12° C.

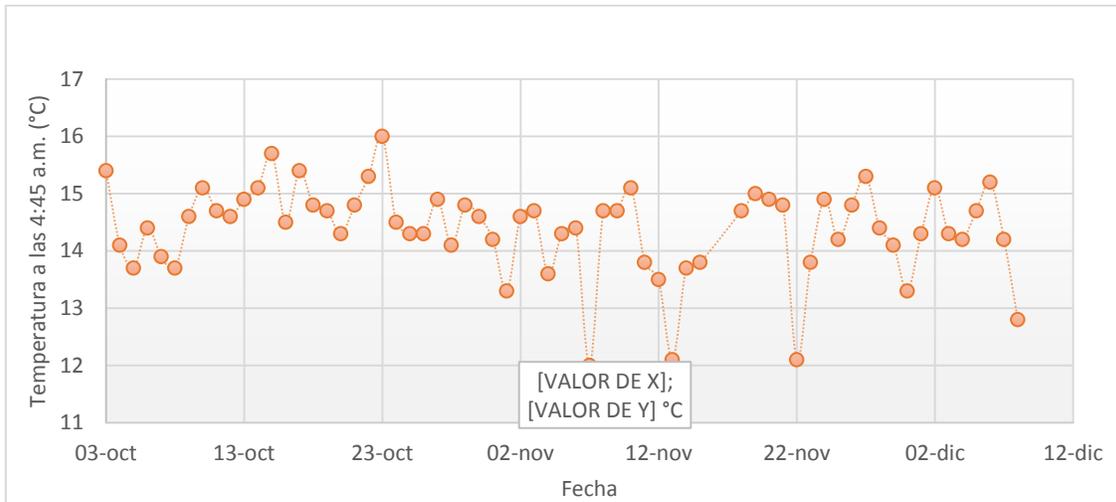


Figura 4.4. Valores de temperatura a las 4:45 horas del intervalo nocturno

4.1.3. Casos III y IV: Días aleatorios

Para poder tener una visión más amplia del comportamiento del clima tanto de las condiciones externas como del invernadero, se escogieron dos fechas al azar, de forma que en el análisis se abarcara al menos un día de cada mes registrado. Los días escogidos fueron el 6 de octubre y el 6 de diciembre. Para cada día se evaluaron las dos horas encontradas para el caso I y II, a las 12:30 horas y a las 4:45 horas respectivamente. Por lo que el caso IIIA es el 6 de octubre a las 12:30 horas y el caso IIIB es el mismo día a las 4:45 horas. El caso IVA lo representa el 6 de diciembre a las 12:30 horas y el caso IVB lo representa el mismo día a las 4:45 horas.

En el cuadro 4.1, se observan las variables climáticas de los 6 casos en estudio registradas por la estación meteorológica.

Cuadro 4.1. Resumen de las condiciones climáticas de los casos seleccionados para el estudio.

Caso	Fecha	Hora	Tempe- ratura (° C)	Humedad Relativa (%)	Radiación (W m ⁻²)	Viento	
						Velocidad (m/s)	Dirección predominante
I	23- oct	12:30	20,3	85	411	2,2	SO
II	07- nov	04:45	12	97	7	0,4	SO
IIIA	06- oct	12:30	19,7	87	836	1,8	SE
IIIB	06- oct	04:45	14,4	95	0	0,9	O
IVA	06- dic	12:30	15,8	95	371,2	0,9	SE
IVB	06- dic	04:45	15,2	96	5,2	0,9	NO

4.2. Análisis de temperatura y humedad relativa en el recinto

Para conocer si existen variaciones de temperatura y humedad relativa espaciales en el invernadero, para cada caso definido anteriormente, se practicó un análisis de varianza con el método de Tukey y contrastes ortogonales los cuales se presenta a continuación.

A su vez, se presentan los valores de la temperatura y humedad relativa durante los días de estudio analizados en sentido de la pendiente (entre ejes) y en el sentido transversal (entre bloques).

4.2.1. Análisis de Varianza

El análisis de varianza de la temperatura y humedad relativa para el caso I, de acuerdo a los ejes y bloques, se presenta en el cuadro 4.2. Se observa que no existen diferencias significativas tanto para la temperatura como para la humedad relativa ni en ejes ni bloques. Los resultados de análisis de varianza de los casos I, II, IIIA, IIIB y IVB no presentaron diferencias estadísticamente significativas y los resultados se presentan en las figuras A1 a la figura A4 del Anexo A.

Cuadro 4.2. Análisis de varianza de la temperatura y la humedad relativa entre ejes y bloques por el método de Tukey para el caso I.

Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)			
<u>Eje</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>	<u>Eje</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>
1	30,59	2	1,01 A	1	50,06	1	5,74 A
2	30,71	3	0,82 A	2	49,55	3	3,31 A
3	31,53	3	0,82 A	3	49,72	2	4,06 A
4	32,48	3	0,82 A	4	42,13	2	4,06 A
5	32,55	3	0,82 A	5	43,53	3	3,31 A
6	31,80	3	0,82 A	6	47,36	3	3,31 A

Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)			
<u>Bloque</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>	<u>Bloque</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>
A	31,69	5	0,67 A	A	44,97	4	2,89 A
B	31,68	7	0,57 A	B	47,02	6	2,36 A
C	31,64	5	0,67 A	C	48,27	4	2,89 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En el cuadro 4.3 se muestran los resultados del análisis de varianza para el caso IV A. Se destaca que solo para este caso, para las medias de temperatura entre ejes existen diferencias significativas entre el eje 1 con el eje 5 y el eje 1 con el eje 6. Los valores de las

medias de humedad relativa entre ejes y bloques para ningún caso, presentan diferencias estadísticamente significativas.

De los resultados expuestos se concluye que no siempre se tiene un gradiente térmico estadísticamente representativo en sentido de la pendiente en el invernadero construido en ladera y en ninguno de los casos analizados se obtuvo gradientes estadísticamente representativos de humedad relativa en sentido de la pendiente. En sentido transversal a la pendiente, en ningún caso se obtuvo gradientes estadísticamente representativos para temperatura o para humedad relativa.

Cuadro 4.3. Análisis de varianza de la temperatura y la humedad relativa entre ejes y bloques por el método de Tukey para el caso IVA.

Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)			
<u>Eje</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>	<u>Eje</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>
1	22,04	2	0,55 A	1	68,56	2	4,41 A
2	23,11	3	0,45 A B	2	66,88	3	3,60 A
3	23,72	3	0,45 A B	3	65,85	2	4,41 A
4	24,12	3	0,45 A B	4	59,74	3	3,60 A
5	25,18	3	0,45 B	5	58,98	3	3,60 A
6	24,88	3	0,45 B	6	60,07	3	3,60 A

Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)			
<u>Bloque</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>	<u>Bloque</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>
A	23,88	5	0,58 A	A	59,35	4	3,24 A
B	24,01	7	0,49 A	B	63,37	7	2,45 A
C	23,92	5	0,58 A	C	64,97	5	2,90 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.2.2. Variación de la temperatura y humedad relativa con la pendiente y en sentido transversal (entre ejes y entre bloques)

La distribución de la temperatura y la humedad relativa en los ejes se observa en la figura 4.5 para los casos estudiados en el intervalo diurno (Caso I, IIIA y IVA).

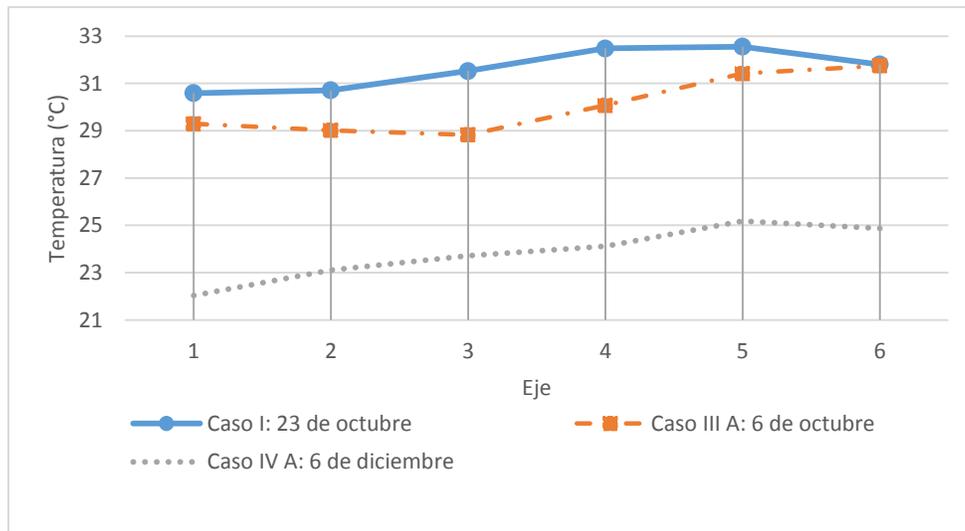


Figura 4.5. Distribución de la temperatura en sentido de la pendiente (ejes) en los casos estudiados a las 12:30 horas.

Para todos los casos existe una tendencia de aumento de temperatura en dirección a la pendiente y resaltan mayores gradientes de temperatura en ejes consecutivos entre el 3,4 y 5 con un valor de 1 °C a 2 °C. Para el caso I la mayor diferencia fue de 1,96 °C entre el eje 1 y el eje 5, para el caso IIIA, se obtuvo un gradiente de 2,92 °C entre el eje 3 al eje 6 y en el caso de IVA un gradiente de 3,14 °C se dio entre el eje 1 y 5.

Para el caso de la distribución de la humedad relativa por ejes en la figura 4.6, se observa que para los ejes 4 y 5 donde existió mayor temperatura, hubo también menor humedad relativa como es de esperar. En el caso I la mayor diferencia de humedad relativa

fue de 7,93 % entre el eje 1 y el eje 4, para el caso IIIA, se obtuvo entre el eje 2 y el eje 5 con 6,55 % y entre el eje 1 y el eje 5 con 9,58 % en el caso IVA.

De las figuras 4.5, 4.6 y los cuadros 4.2 y 4.3, se concluye que durante el día, con las mayores temperaturas, si bien no existen diferencias estadísticamente representativas si hay diferencias y tendencias en las magnitudes físicas. El efecto de estas diferencias físicas debe ser evaluado fisiológicamente ya que se pudo observar una alta presencia de mosca blanca y virus asociado.

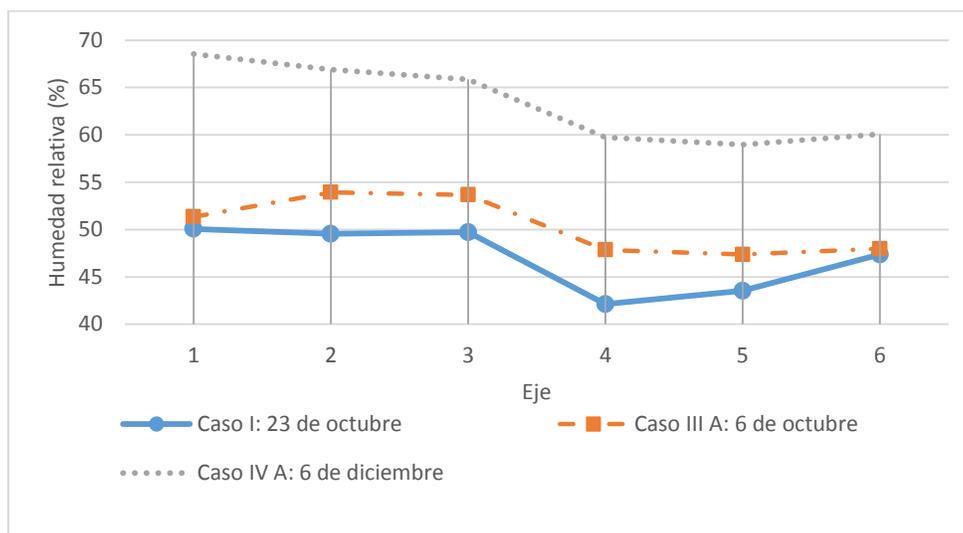


Figura 4.6. Distribución de la humedad relativa en sentido de la pendiente (ejes) en los casos estudiados a las 12:30 horas.

La figura 4.7, presenta la distribución de la temperatura en los ejes en los casos de estudio a las 4:45 horas se observa, existe una mayor homogeneidad de temperatura que en los casos presentados del intervalo diurno. En el caso II, se obtuvo una diferencia entre el eje 2 y el 1 de 0,11 °C. En el caso IIIB el eje 3 obtuvo una diferencia de 0,61 °C con

respecto al eje 4 y en el caso IVB se obtuvo la diferencia entre el eje 1 y 5 con un valor de 0,18 °C.

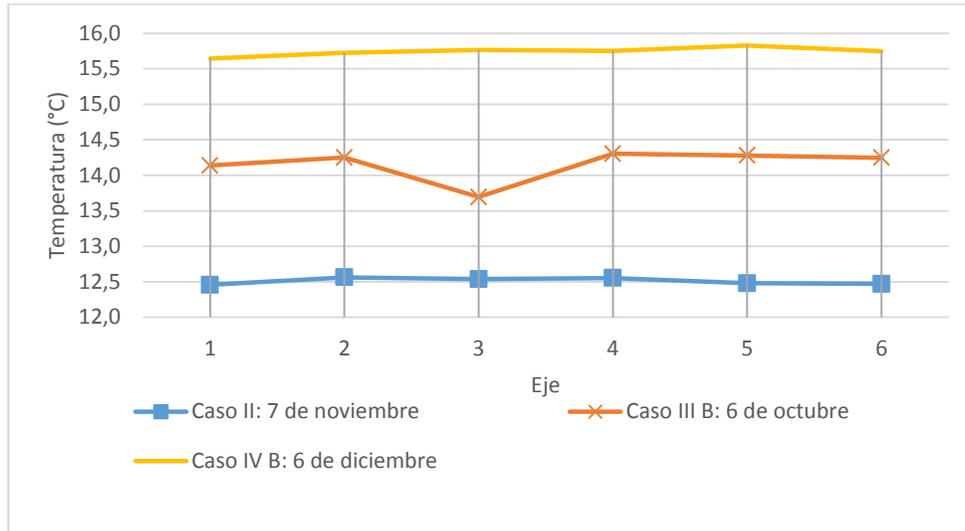


Figura 4.7. Distribución de la temperatura en sentido de la pendiente (ejes) en los casos estudiados a las 4:45 horas.

En el caso de la humedad relativa, la figura 4.8, presenta la distribución en ejes a las 4:45 horas. Existe una tendencia en el caso II y IVB, de una disminución abrupta en el eje 3 por lo que para ambos casos la mayor diferencia se obtuvo del eje 2 al 3 con 11,25 % y 8,45 % respectivamente. Para el IIIB, se obtuvo un gradiente más alto entre el eje 2 y el eje 6 de 3,36 %.

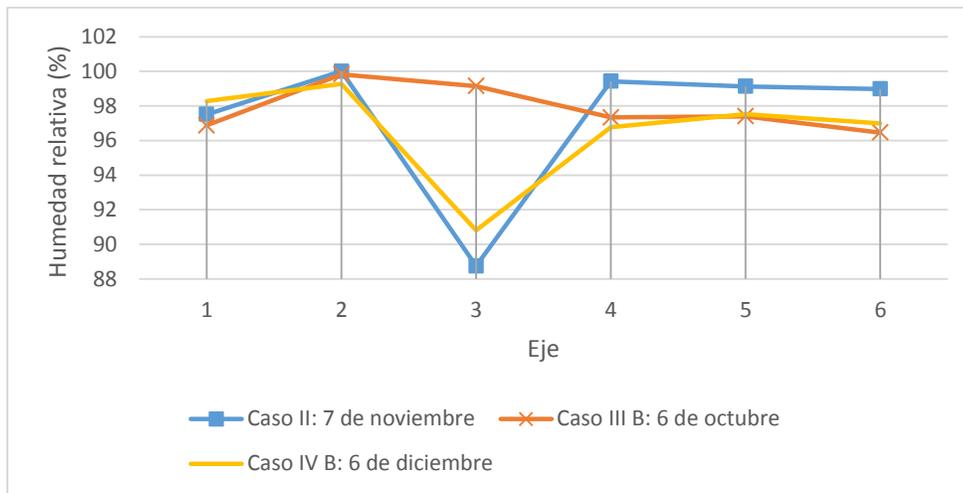


Figura 4.8. Distribución de la humedad relativa en sentido de la pendiente (ejes) en los casos estudiados a las 4:45 horas.

Para el caso de los bloques, la figura 4.9 presenta la distribución de la temperatura en la sección transversal a la pendiente de los casos a las 12:30 horas, donde se observa que el bloque B obtiene valores mayores con diferencias mínimas entre los otros bloques. El caso I obtuvo el gradiente más alto de A al C con $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$, el caso IIIA obtuvo $0,63\text{ }^{\circ}\text{C}$ de B a C y en el caso IVA se presentó de A al B con $0,13\text{ }^{\circ}\text{C}$.

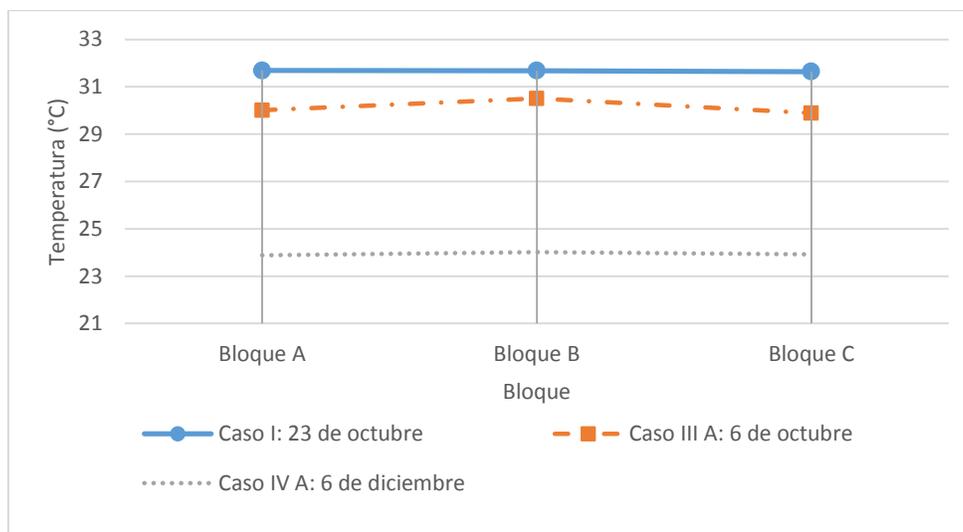


Figura 4.9. Distribución de la temperatura en la sección transversal a la pendiente (bloques) en los casos estudiados a las 12:30 horas.

Con respecto a la humedad relativa casos I, IIIA y IVA, la figura 4.10 representa un comportamiento ascendente desde el bloque A al bloque C. La diferencia entre dichos bloques para el caso I fue de 3,3 %, para el caso IIIA fue de 3,79 % y para el caso IVA fue de 5,62 %.

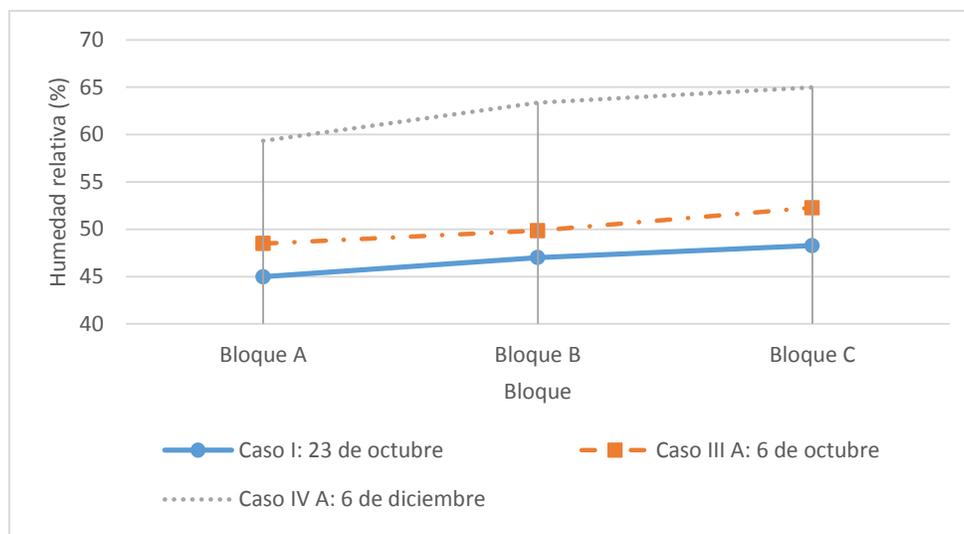


Figura 4.10. Distribución de la humedad relativa en la sección transversal a la pendiente (bloques) en los casos estudiados a las 12:30 horas.

La temperatura en la sección transversal a la pendiente para los casos de las 4:45 horas se presentan en la figura 4.11. En términos generales no existe tendencia entre casos y presentan valores muy homogéneos en los tres bloques. El caso II presenta su máxima diferencia del bloque A al B con 0,15 °C, en el caso IIIB se obtiene un gradiente de 0,37 °C del bloque A al C al igual que el caso IVB con un valor de 0,04 °C.

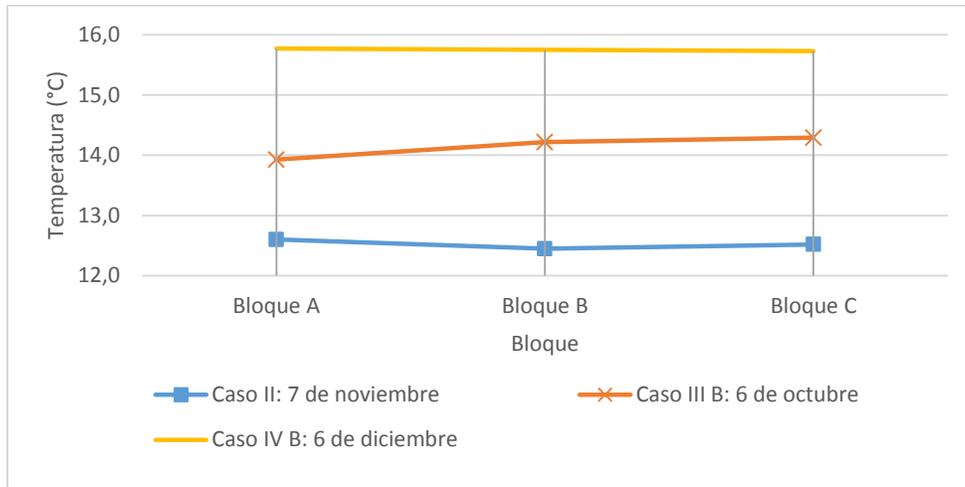


Figura 4.11. Distribución de la temperatura en la sección transversal a la pendiente (bloques) en los casos estudiados a las 4:45 horas.

Con respecto a la humedad relativa, en la figura 4.12, se presenta un incremento del bloque A al B y seguidamente una caída al bloque C para todos los casos. En el caso II y IVB se obtuvo un gradiente mayor del bloque B al C del 6,04 % y 4,03 % respectivamente y en el caso IIIB entre el bloque A y B con un valor de 0,98 %.

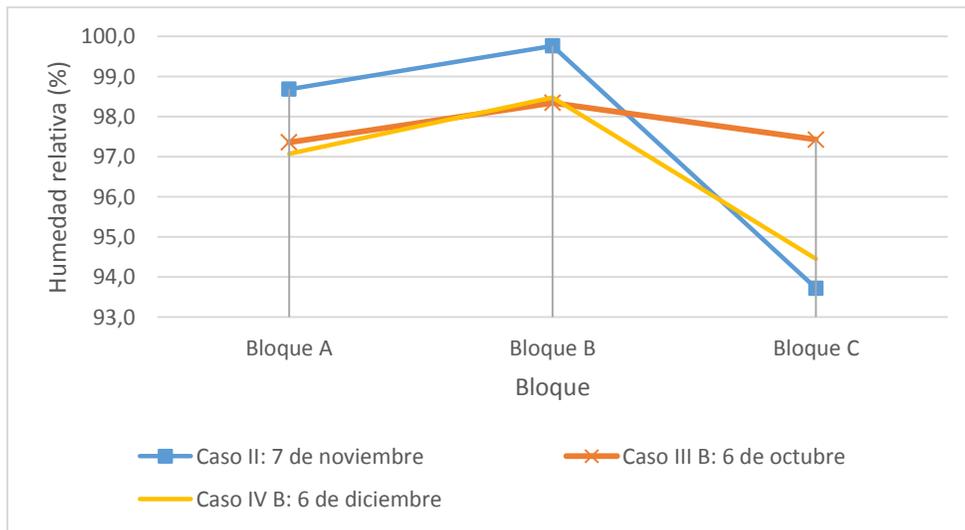


Figura 4.12. Distribución de la humedad relativa en la sección transversal a la pendiente (bloques) en los casos estudiados a las 4:45 horas.

4.2.3. Contrastes ortogonales en el sentido de la pendiente para la temperatura y humedad relativa

Los contrastes ortogonales se realizaron con el propósito de conocer el efecto de la pendiente sobre la temperatura y humedad relativa mediante un análisis estadístico agrupando ejes. Si los contrastes no son ortogonales ($p < 0,05$), implica que existe covarianza entre ellos y están relacionadas en un cierto grado.

Los resultados de los contrastes ortogonales se observan en el cuadro 4.4 para la temperatura, los cuales reflejan que el caso IIIA y IVA obtuvieron una significancia menor a 0,05 de forma que para el caso IIIA el contraste 1 (agrupando los ejes 1,2 y 3 y comparándolos con los ejes 4,5,y 6) obtuvo la mayor diferencia entre grupos, seguidamente por el contraste 2 (agrupando los ejes 1,2 y comparándolos con los ejes ,5,y 6) y de último el contraste 3 (comparando el eje 1 con el eje 6). Para el caso IVA se obtuvo un valor de significancia mayor en el contraste 2, seguido por el contraste 1 y finalmente el contraste 3.

Cuadro 4.4. Significancia de los contrastes ortogonales de los valores de temperatura

Agrupación de ejes	1-2-3 / 4-5-6	1-2 / 5-6	1 / 6
Contraste	(1)	(2)	(3)
Caso I	0,0824	0,1076	0,3704
Caso II	0,7833	0,6896	0,9441
Caso IIIA	0,0067(p<0,05)	0,007 (p<0,05)	0,045 (p<0,05)
Caso IIIB	0,2476	0,7794	0,7708
Caso IVA	0,0007 (p<0,05)	0,0003 (p<0,05)	0,0021 (p<0,05)
Caso IVB	0,2864	0,1777	0,3585

Para el caso de la humedad relativa en el cuadro 4.5, existe covarianza en el caso IV A en el contraste 1 y no así en contraste 2 y 3.

Cuadro 4.5. Significancia de los contrastes ortogonales de los valores de humedad relativa

Agrupación de ejes	1-2-3 / 4-5-6	1-2 / 5-6	1 / 6
Contraste	(1)	(2)	(3)
Caso I	0,1395	0,3141	0,694
Caso II	0,2859	0,9424	0,8291
Caso IIIA	0,1199	0,2156	0,5903
Caso IIIB	0,089	0,1552	0,783
Caso IVA	0,04 (p<0,05)	0,0576	0,1672
Caso IVB	0,5855	0,4823	0,6848

De acuerdo al análisis ortogonal entre ejes, se observa que la mayoría de los casos presentan independencia entre los valores de la temperatura media de las agrupaciones descritas anteriormente. Los casos que no son ortogonales presentan una covarianza más alta entre mayor cantidad de ejes agrupados, como lo es el contraste 1 y no así por ejes relacionados individualmente como lo es el contraste 3. Esta tendencia se refleja también, en los resultados de la distribución de la temperatura y humedad relativa donde existen mayores gradientes de temperatura entre los eje 3, 4 y 5 durante el día sobre todo en el intervalo diurno.

Así mismo, para ambas variables existe una tendencia de ascendencia en la temperatura conforme aumenta la altura esto por la diferencia de densidades y por la diferencia de altura entre ejes y a su vez, una disminución de la humedad relativa. En

bloques se observa un ligero comportamiento ascendente de la humedad relativa en el intervalo diurno y una caída en el bloque C en el intervalo nocturno. En el caso de la temperatura para ambos intervalos se observa una uniformidad espacial.

Según Lopez (2012), las mayores diferencias que se registraron en su estudio para un invernadero en plano fueron de 2,3 °C de temperatura y 5,3 % de humedad relativa. En comparación con los resultados obtenidos en esta investigación, las mayores diferencias fueron 3,14 °C y 11,25 % entre extremos del invernadero. El análisis de 6 casos más donde se evaluó la estratificación de la temperatura y humedad relativa escrito en el informe final del proyecto de investigación: "Evaluación del comportamiento de los parámetros térmicos y estructurales que rigen el diseño de invernaderos para su adaptación a las condiciones agroclimáticas en el país", se encontraron resultados similares al presente estudio.

4.2.4. Comportamiento de la temperatura y humedad relativa los días de estudio respecto a los requerimientos de los cultivos

Los intervalos óptimos de temperatura y humedad relativa según Tesi (2001), para un desarrollo recomendable en el día, para el chile las humedades relativas se encuentran entre 65 % y 70 % y para el tomate entre 55 % y 60 %. Para el día, en el caso del chile el ámbito sugerido de temperatura para el chile es de 22° C a 28° C y para la noche es de 16° C a 18° C, mientras que para el tomate es de 22° C a 26° C durante el día y entre 13° C a 16° C durante la noche.

Las figuras 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16 muestran la distribución de la temperatura a lo largo de los días 23 de octubre, 7 de noviembre, 6 de octubre y 6 de diciembre respectivamente en el sentido de la pendiente (ejes). Se observa que los ejes 5 y 6 destacan por ser los ejes con mayores temperaturas y el eje 2 y 1 con los menores valores. Las mayores temperaturas entre ejes se dieron en el intervalo diurno principalmente entre las 9:00 y las 13:00 horas.

Para todos los casos de estudio definidos durante el día la temperatura para el chile y el tomate estuvieron fuera del ámbito recomendado entre las 09:00 horas y las 13:00 horas aproximadamente (exceptuando algunas horas en el día 6 de diciembre). Este periodo de 3 horas consecutivas fuera del intervalo óptimo, sobre todo si se da en forma repetida todos los días, podría ocasionar daños en el sistema vegetativo de los cultivos, mayor incidencia de plagas y efectos negativos en el rendimiento.

Durante la noche las condiciones del invernadero en todos los casos se mantuvieron en el intervalo óptimo del tomate. Para el 7 de noviembre se encontró muy cerca del valor mínimo (figura 4.14) y el 6 de diciembre muy cerca del valor máximo (figura 4.16). Para el caso del chile se evidencia que el cultivo en los días de registro, no se encontró dentro del ámbito óptimo pero muy cerca de su valor mínimo.

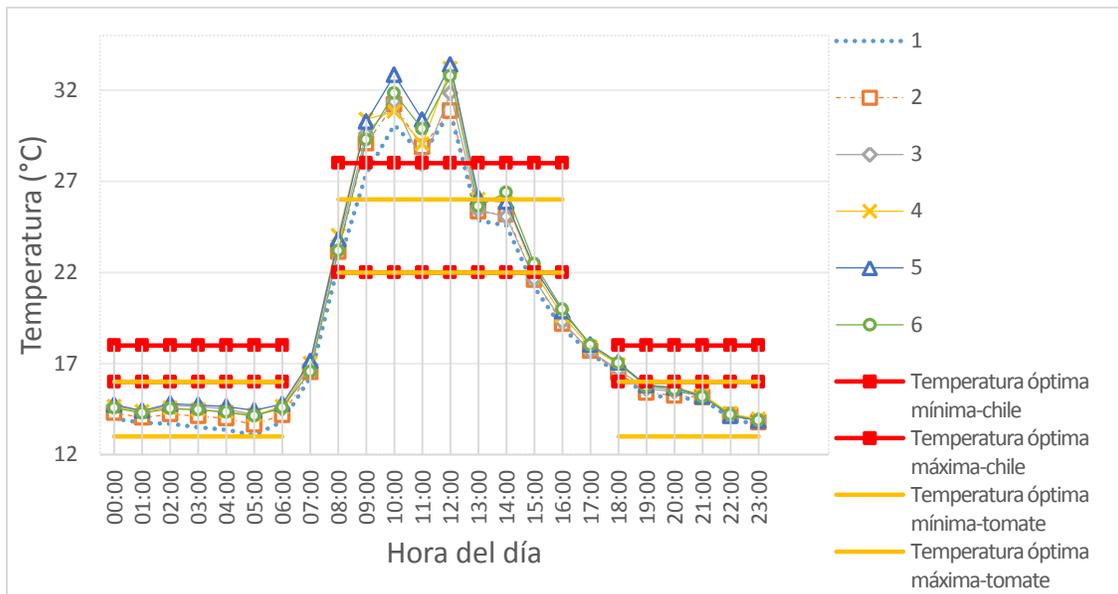


Figura 4.13. Distribución la temperatura en los ejes del día 23 de octubre y su relación con los ámbitos óptimos del chile y tomate.

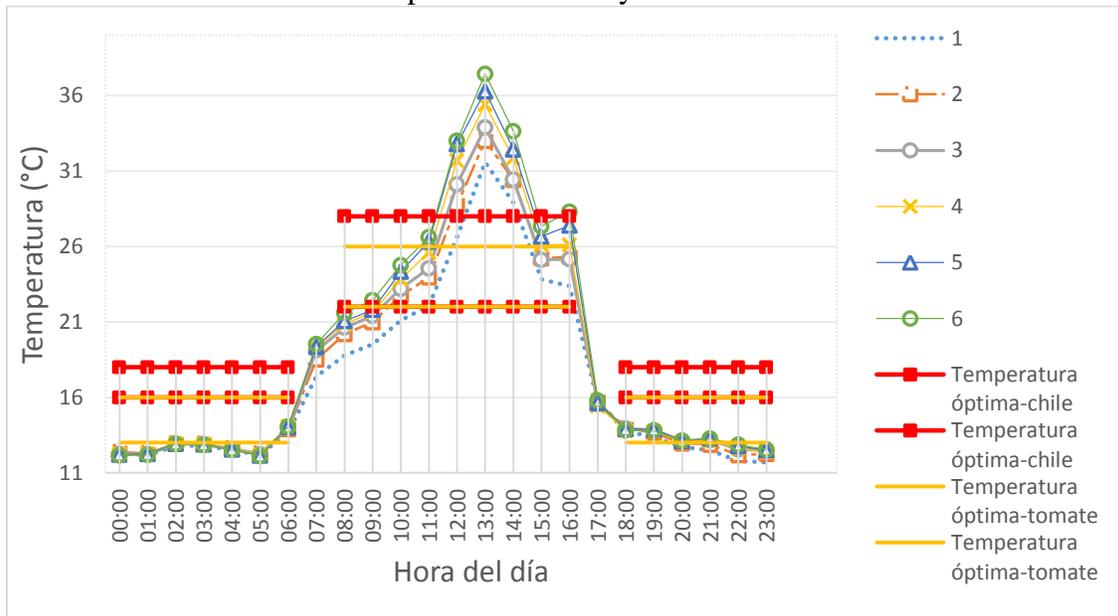


Figura 4.14. Distribución la temperatura en los ejes del día 7 de noviembre y su relación con los ámbitos óptimos del chile y tomate.

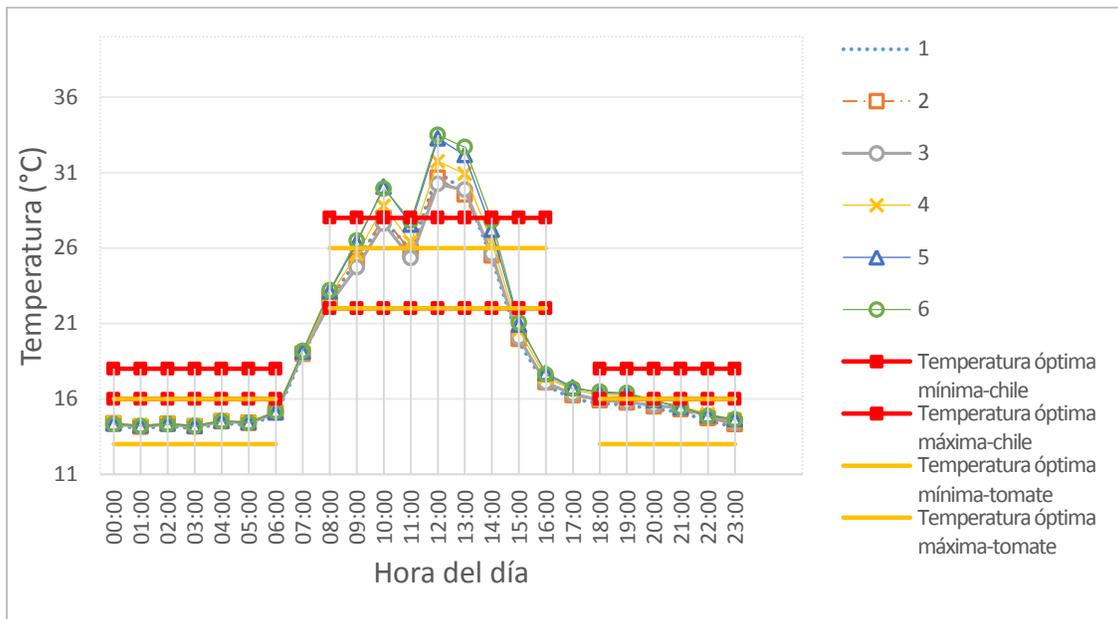


Figura 4.15. Distribución la temperatura en los ejes del día 6 de octubre y su relación con los ámbitos óptimos del chile y tomate

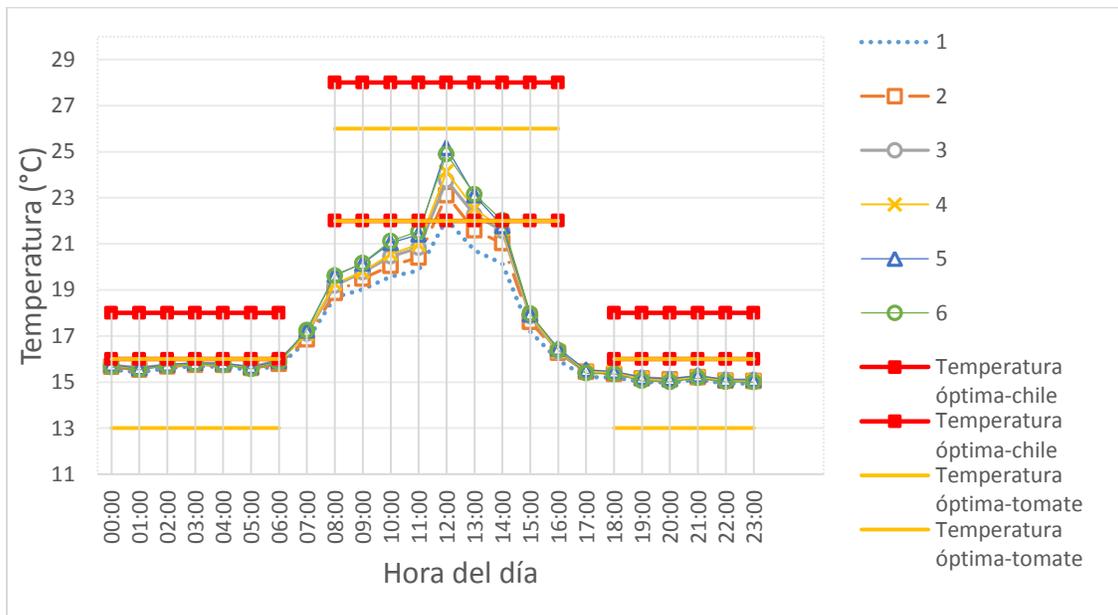


Figura 4.16. Distribución la temperatura en los ejes del día 6 de diciembre y su relación con los ámbitos óptimos del chile y tomate.

Con respecto al comportamiento de la humedad relativa se presentan en las figuras 4.17, 4.18, 4.19 y 4.20 de los días 23 de octubre, 7 de noviembre, 6 de octubre y 6 de diciembre respectivamente en el sentido de la pendiente (ejes), donde los ejes 1 y 2 obtuvieron los valores más altos, mientras que el 5 y el 6 obtuvieron los valores más bajos. Las mayores diferencias entre ejes se dieron durante el intervalo diurno.

Se observa que con respecto a los intervalos óptimos del tomate y chile, los cultivos en todos los casos permanecieron en los intervalos óptimo solamente entre una y dos horas antes del mediodía y entre una y dos horas por la tarde. En el caso del 6 de diciembre el cultivo estuvo fuera del ámbito óptimo del tomate en todas las 24 horas.

Durante la noche las humedades relativas son considerablemente más altas que los intervalos recomendados para el chile y tomate.



Figura 4.17. Distribución la humedad relativa en los ejes del día 23 de octubre y su relación con los ámbitos óptimos del chile y tomate.

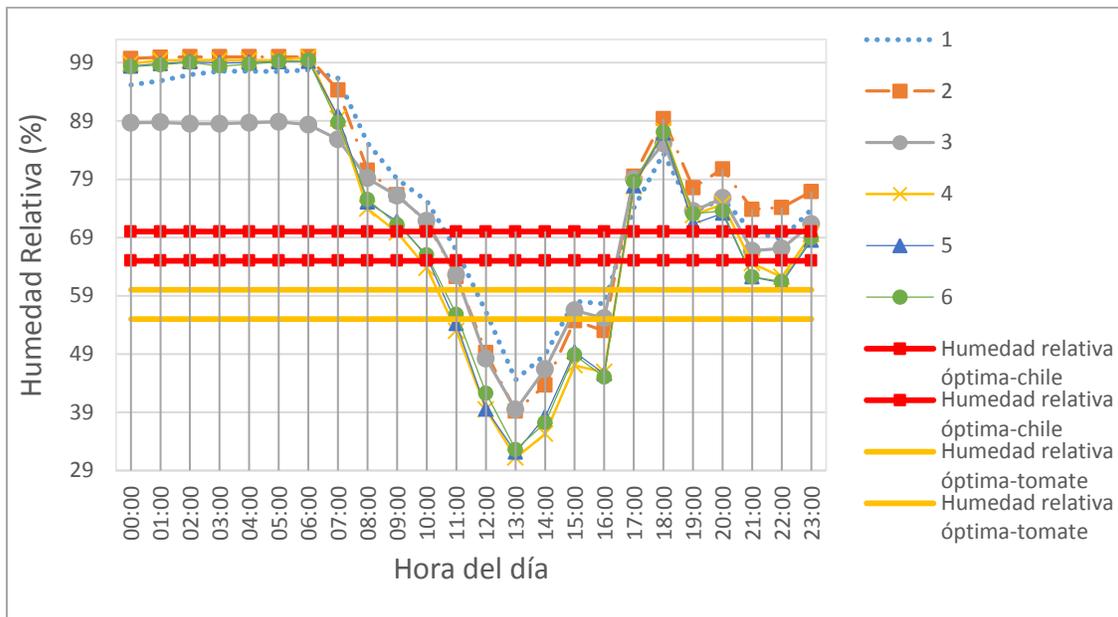


Figura 4.18. Distribución la humedad relativa en los ejes del día 7 de noviembre su relación con los ámbitos óptimos del chile y tomate.

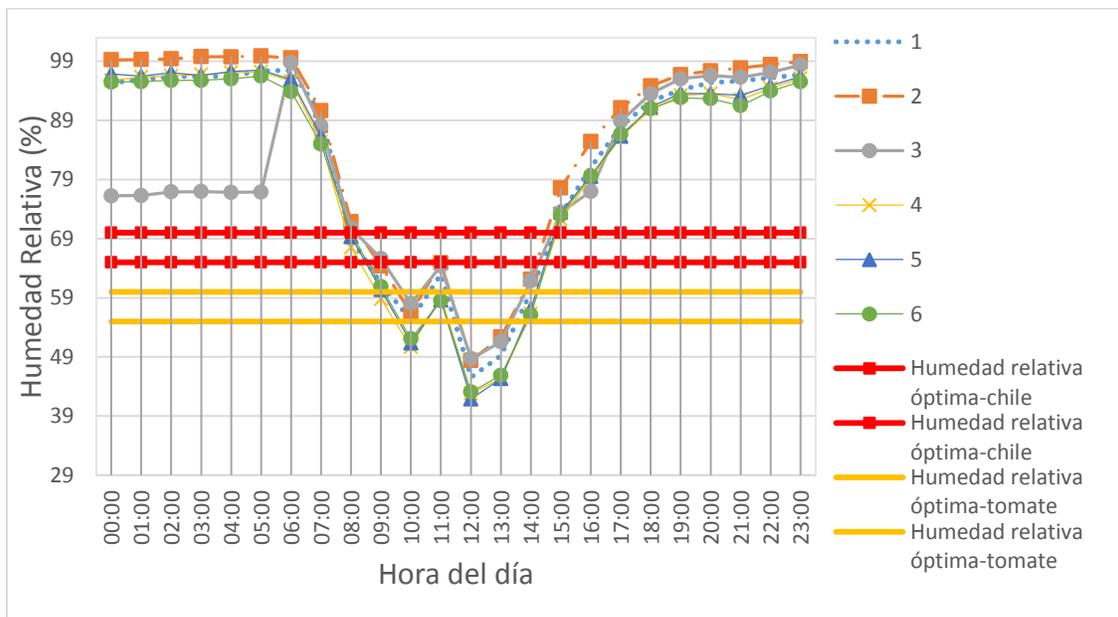


Figura 4.19. Distribución la humedad relativa en los ejes del día 6 de octubre y su relación con los ámbitos óptimos del chile y tomate.

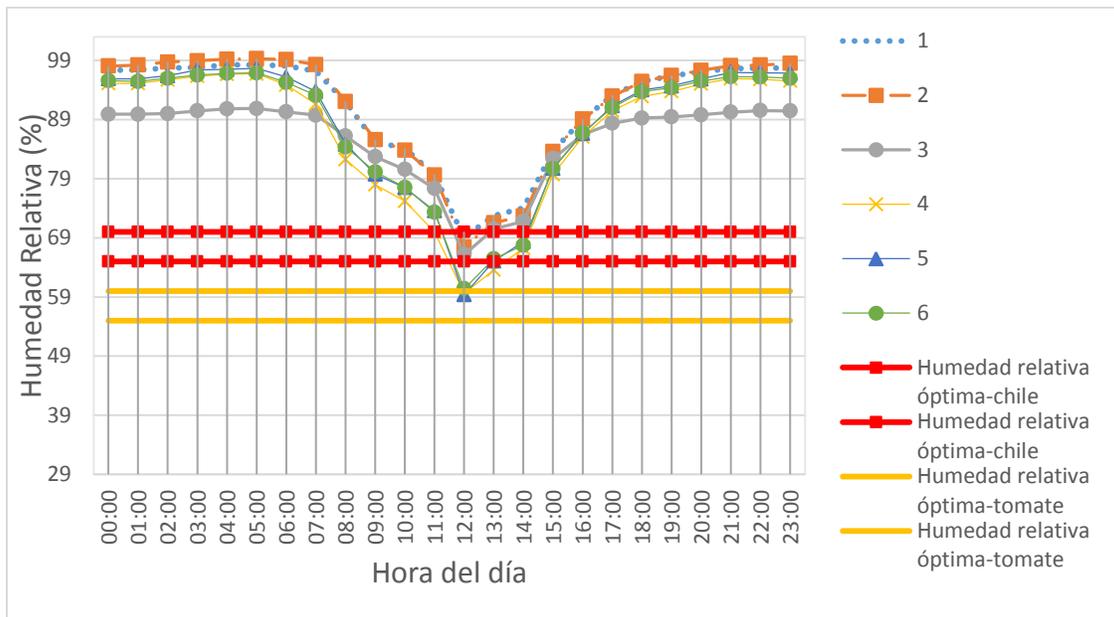


Figura 4.20. Distribución la humedad relativa en los ejes del día 6 de diciembre y su relación con los ámbitos óptimos del chile y tomate.

De acuerdo a los resultados de la distribución de la temperatura y humedad relativa a lo largo de los días analizados, se observa que los tiempos fuera del ámbito son muy altos y estos pueden afectar el rendimiento de los cultivos, con la consecuencia directa de una disminución en la rentabilidad de la actividad agrícola.

Según Leal y Costa (2011) y Serrano (1994) , los procesos esenciales como la fotosíntesis, respiración y otros procesos de las plantas dependen de la temperatura lo que afecta en el crecimiento y reproducción de la plantas.

Comentan que, durante temperaturas altas, las células sufren un colapso debido a la sequía que sufren, por lo que los estomas se cierran automáticamente limitando la pérdida de más agua. Al cerrar los estomas, la captura de CO₂ se reduce causando una limitación del proceso de fotosíntesis. Antes de que se dé una temperatura alta, la planta detiene su

desarrollo vegetativo. En temperaturas bajas, en las células vegetales las proteínas se precipitan y se deshidratan.

En el caso de la humedad relativa, las diferencias de presión de vapor entre la hoja y el aire pueden aumentar las pérdidas por evaporación, dando lugar a marchitez. La falta de humedad disminuye las diferencias de presión y la transpiración es intensa. Bajas humedades relativas asociadas a las altas temperaturas pueden causar quemaduras en las puntas de las hojas. La humedad relativa alta estimula el desarrollo de la mayoría de los gérmenes y organismos patógenos.

Estos aspectos justifican la necesidad de generar herramientas que permitan diseñar correctamente ambientes protegidos en función del clima y definir si es necesario recurrir a sistemas mecánicos para corregir las deficiencias que no se logre controlar por medio del diseño con sistemas naturales.

4.3. Distribución de temperatura y humedad relativa según modelos numéricos

En esta sección se presentan el estudio de mallas realizado para conocer la variabilidad en los resultados y tiempo de procesamientos con respecto al tamaño y calidad de la malla para asegurar un equilibrio entre dichas variables. Además, se presentan los resultados del modelado de la temperatura y humedad relativa de los casos en estudio previamente seleccionados y su validación con los valores medidos tanto en el sentido de la pendiente (ejes) como en la sección transversal (bloques).

4.3.1. Estudio de mallas

Para el estudio de mallas, se utilizó el caso de análisis el 6 de diciembre a las 4:45 horas. Las modelaciones se realizaron únicamente, modificando el tamaño de la malla. Se obtuvieron los valores simulados en los ejes y para la validación se calculó el porcentaje de error del promedio de los valores de temperatura de los ejes simulados con respecto al promedio de los valores de temperatura de los ejes medidos.

Las tres mallas se realizaron de manera que fueran significativamente diferentes en tamaño y no así en calidad (sobre todo la calidad ortogonal y la calidad del elemento).

En el cuadro 4.6, se aprecian los resultados de las modelaciones con las 3 mallas analizadas. Con la malla 1, se realizó la simulación en un tiempo de proceso de 10 horas y su resultado final divergió, por lo que se utilizaron los últimos resultados de temperatura de la simulación, con los cuales se calculó la temperatura promedio entre ejes y se obtuvo un porcentaje de error de 3,46 % con respecto a la temperatura promedio. Muy similar en cuanto al error, con la malla 3 se estabilizó las ecuaciones en un tiempo de 96 horas. Con la malla 2 se estabilizaron las ecuaciones en 72 horas y con un porcentaje de error de 0,29 % con respecto a los valores medidos, por lo que fue la seleccionada para la utilización de la misma en todas las modelaciones de los casos en estudio.

Cuadro 4.6. Estudio de las tres mallas analizadas

Malla	Tiempo de proceso	% de error con el promedio de la temperatura medida en los ejes
M1	10 horas	3,46
M2	72 horas	0,29
M3	96 horas	3,50

4.3.2. Validación de los casos en estudio

Los resultados de las modelaciones se definieron de acuerdo a la estabilidad de las ecuaciones integradas. La duración de la estabilidad se obtuvo entre 8 000 y 10 000 iteraciones.

Para el caso I, los resultados de la validación de la humedad relativa y la temperatura se observan en el cuadro 4.7, donde de acuerdo al (RERMC) ninguna agrupación obtuvo un error menor o igual al 10 % aceptable recomendado para un modelado del clima interno de un invernadero. Así mismo, la temperatura obtuvo valores de RERMC entre 22 % y 29 %, mientras que en la humedad relativa se obtuvieron valores entre 37 % y 70 %. Valores mayores del 10 % en los RERMC se obtuvieron en las simulaciones de los casos III A y IVA, cuyos resultados se encuentran en el Anexo B en los cuadros B1 y B2.

Cuadro 4.7. Validación de la temperatura y humedad relativa para el caso I

Agrupación	RERMC -Temperatura (%)	RERMC -Humedad relativa (%)
Eje 1	22,64	37,68
Eje 2	22,78	48,56
Eje 3	26,59	42,28
Eje 4	29,08	70,68
Eje 5	29,54	65,36
Eje 6	26,70	48,58
Bloque A	26,83	57,16
Bloque B	26,05	72,49
Bloque C	25,44	43,66

En la figura 4.21 y 4.22, se encuentran los resultados de la comparación de temperatura y humedad relativa medida y simulada por ejes y bloques respectivamente. Puede observarse que tampoco se simuló la tendencia en el comportamiento de la temperatura o humedad relativa en el sentido de la pendiente. Resultados similares se aprecian en los casos III A y IVA, cuyos resultados se encuentran en el Anexo B en las figuras de la B1 a B4.

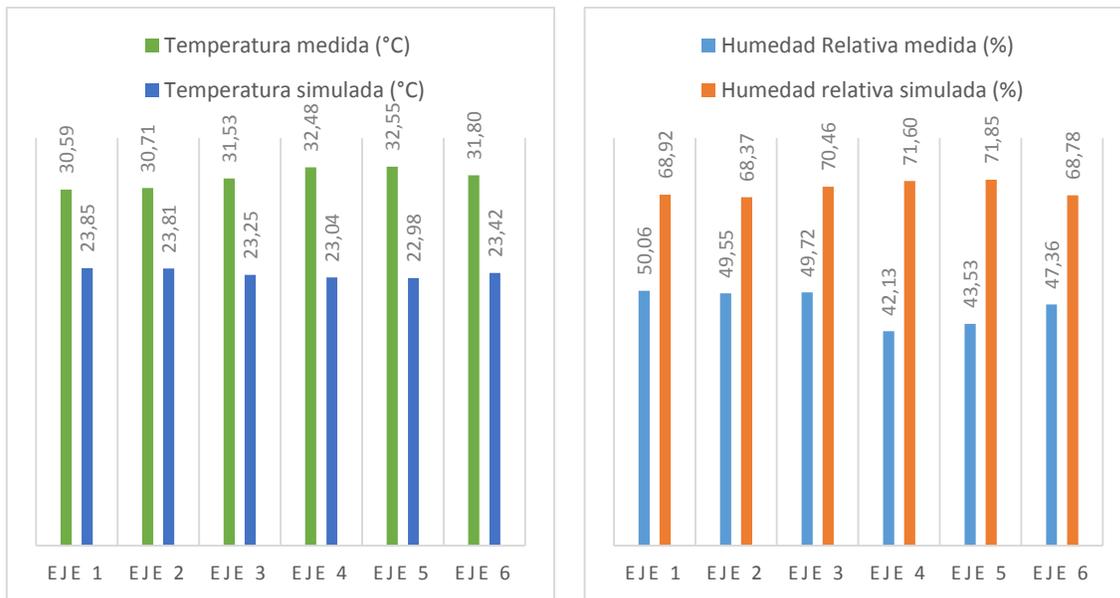


Figura 4.21. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por ejes para el caso I.

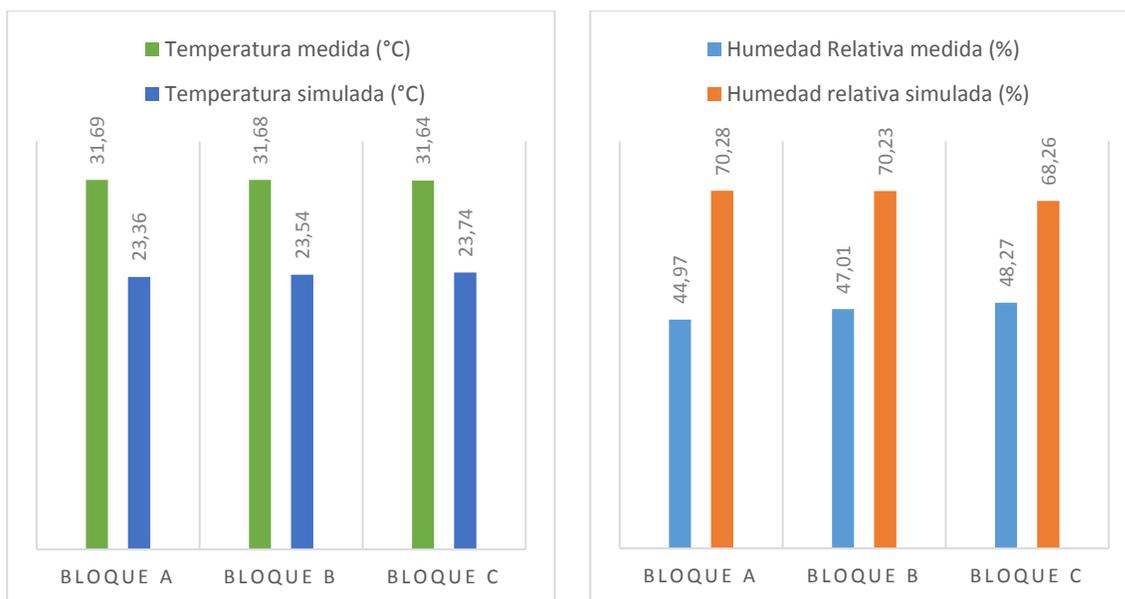


Figura 4.22. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por bloques para el caso I.

Para el caso II, en el cuadro 4.8 se presenta los valores del RERMC de la temperatura y humedad relativa y se observa que en el caso de la temperatura los valores

del RERMC se encuentran entre 1,72 % y 2,57 %, mientras que para la humedad relativa se encuentran entre 2,39 % y 14,57 %, solamente el eje 3 y el bloque B obtuvieron valores mayores del 10 %, por lo que este caso presenta una mejor respuesta en el modelado del invernadero.

Cuadro 4.8. Validación de la temperatura y humedad relativa para el caso II.

Agrupación	RERMC – Temperatura (%)	RERMC- Humedad relativa (%)
Eje 1	2,02	2,39
Eje 2	2,60	4,68
Eje 3	2,21	14,57
Eje 4	1,94	4,63
Eje 5	1,90	4,25
Eje 6	2,43	3,48
Bloque A	2,57	3,69
Bloque B	1,72	4,65
Bloque C	2,26	10,04

Las figuras 4.23 y 4.24 representan la temperatura y humedad relativa en ejes y bloques respectivamente. Se observa que a pesar de obtener valores bajos de RERMC en ambos casos, no existe similitud en la tendencia del comportamiento de ambas variables con respecto a lo registrado.

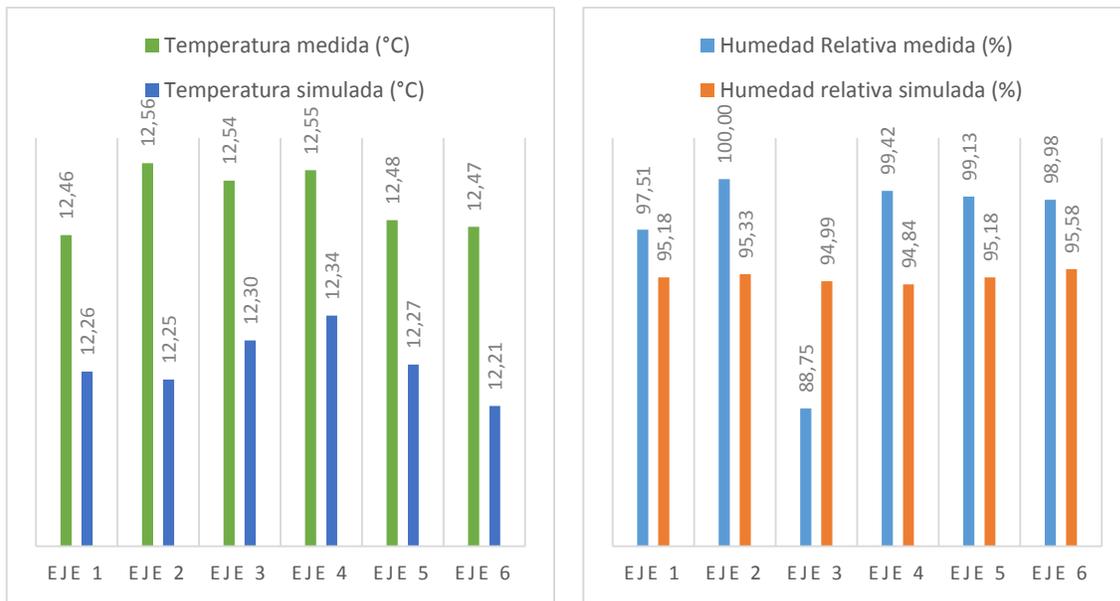


Figura 4.23. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por ejes para el caso II.

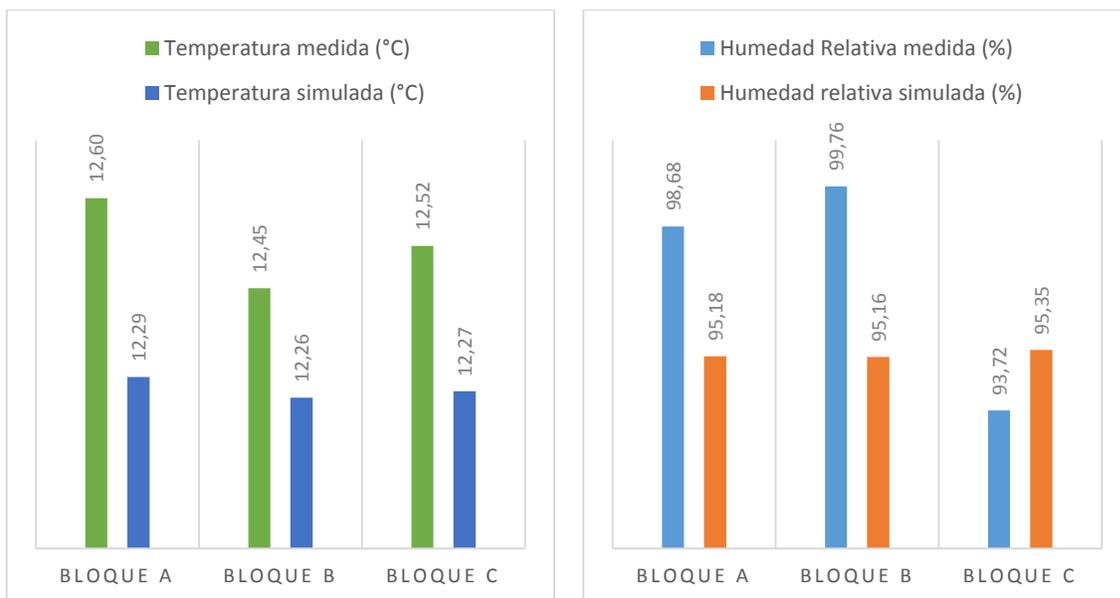


Figura 4.24. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por bloques para el caso II.

En el cuadro 4.9 se presentan los RERMC para el caso IIIB. Los errores medios cuadráticos en los valores de los ejes y los bloques presentan valores menores al 10 %, por

lo que para este caso puede decirse que el modelo representa con precisión aceptable la respuesta real del invernadero. La comparación entre ejes y bloques se presenta en la figura 4.25 y 4.26, donde se observa que los valores simulados de ambas variables cambian en el tercer decimal. En cuanto a la tendencia de la distribución, no existe similitud tanto para bloques como para ejes con respecto al comportamiento registrado.

Cuadro 4.9. Validación de la temperatura y humedad relativa para el caso IIIB

Agrupación	RERMC -Temperatura (%)	RERMC -Humedad relativa (%)
Eje 1	1,91	2,04
Eje 2	1,10	8,55
Eje 3	7,73	4,28
Eje 4	1,08	3,63
Eje 5	0,96	5,33
Eje 6	1,74	3,26
Bloque A	5,89	6,04
Bloque B	1,25	9,20
Bloque C	1,16	5,39

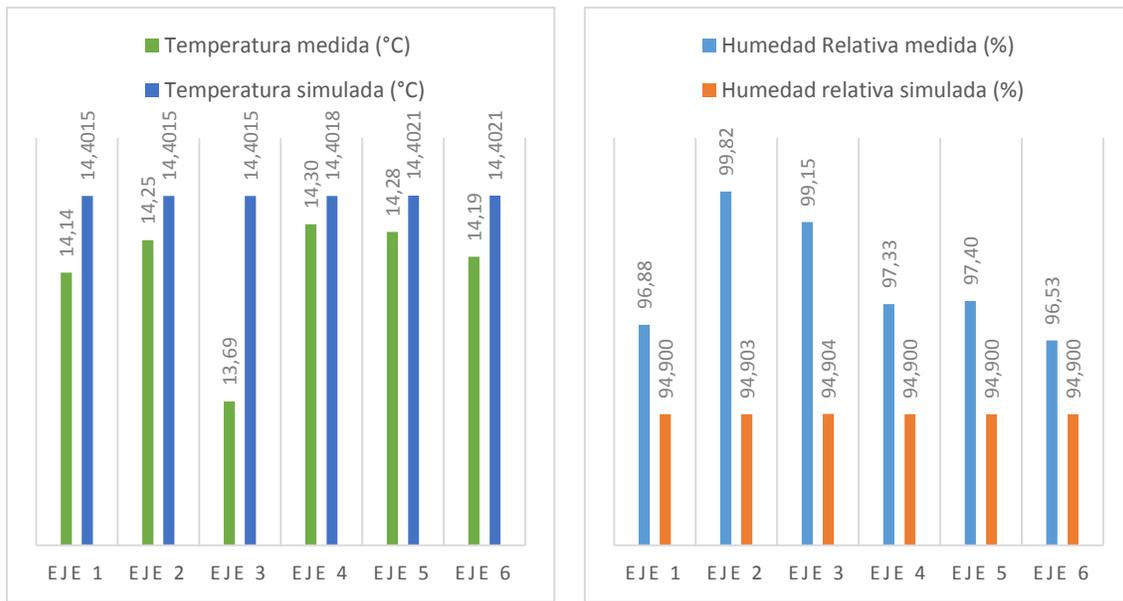


Figura 4.25. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por ejes para el caso III B.

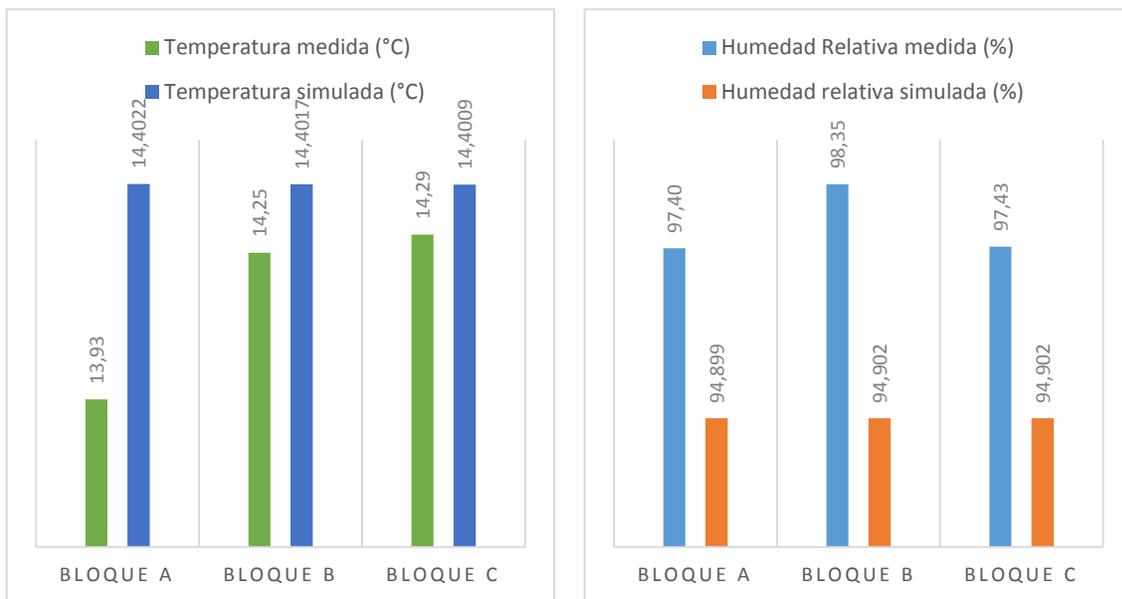


Figura 4.26. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por bloques para el caso III B.

En el cuadro 4.10 se presentan los valores de RERMC para el caso IV B los cuales fueron menores del 10 % en el caso de la temperatura, tanto para ejes como para bloques.

Para la humedad relativa se obtuvieron valores mayores del 10 % en el RRMSE, por lo que el modelo en términos de temperatura representa la respuesta real del invernadero pero no así en los valores de humedad relativa.

La figura 4.26 y 4.27 muestra las distribuciones de la temperatura y humedad relativa en ejes y en bloques. Los resultados reflejan una tendencia a un comportamiento ascendente de la temperatura en los ejes, pero en la humedad relativa y en los bloques para ambas variable no existe similitud en la distribución con respecto a los valores registrados

Cuadro 4.10. Validación de la temperatura y humedad relativa para el caso IVB.

Agrupación	RRMSE-Temperatura (%)	RRMSE-Humedad relativa (%)
Eje 1	0,25	58,10
Eje 2	0,41	58,63
Eje 3	1,46	45,27
Eje 4	0,65	57,86
Eje 5	0,53	58,24
Eje 6	0,68	57,95
Bloque A	0,75	51,89
Bloque B	0,78	58,39
Bloque C	1,59	57,19

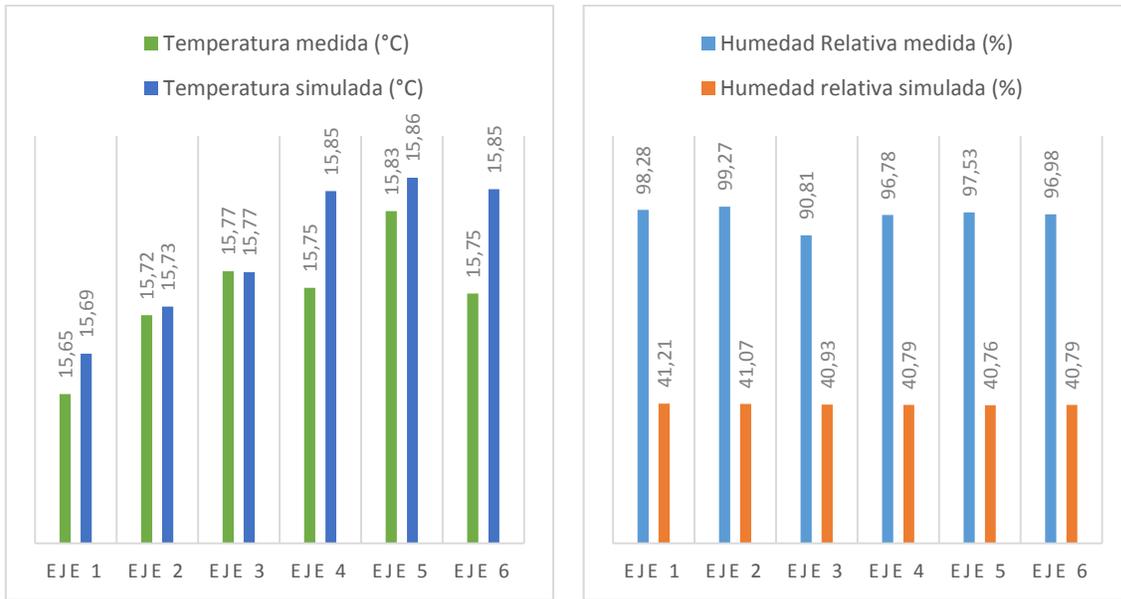


Figura 4.27. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por ejes para el caso IVB.

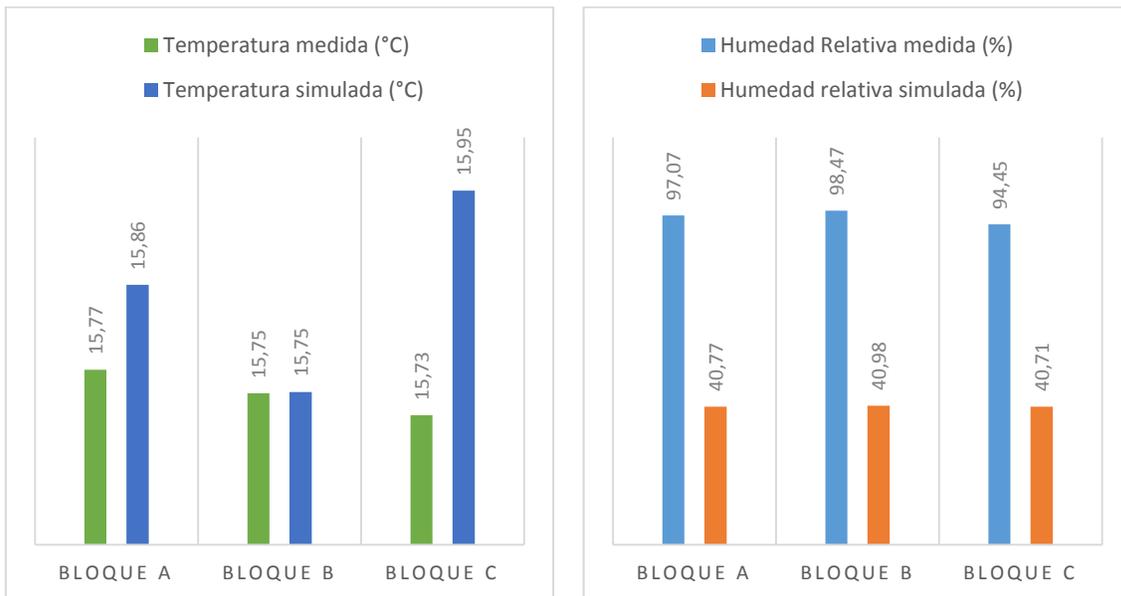
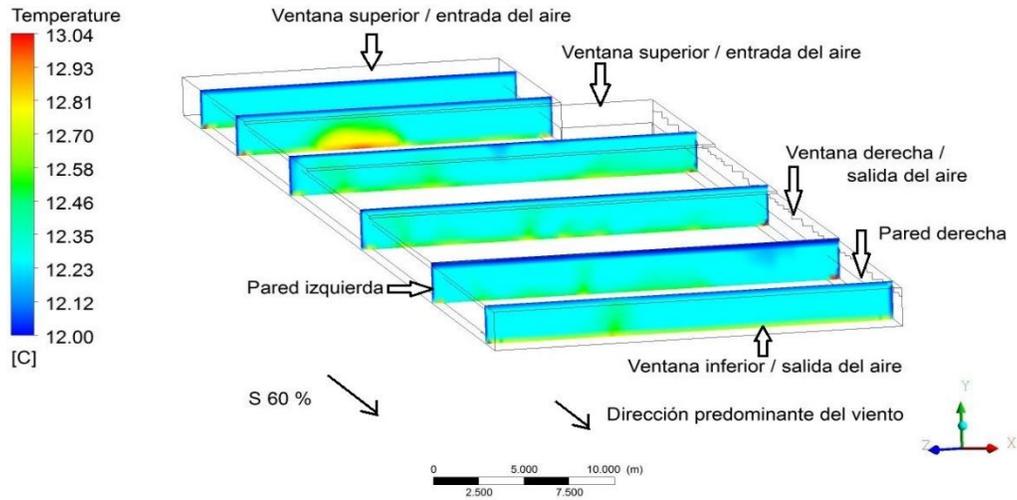


Figura 4.28. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por bloques para el caso IVB.

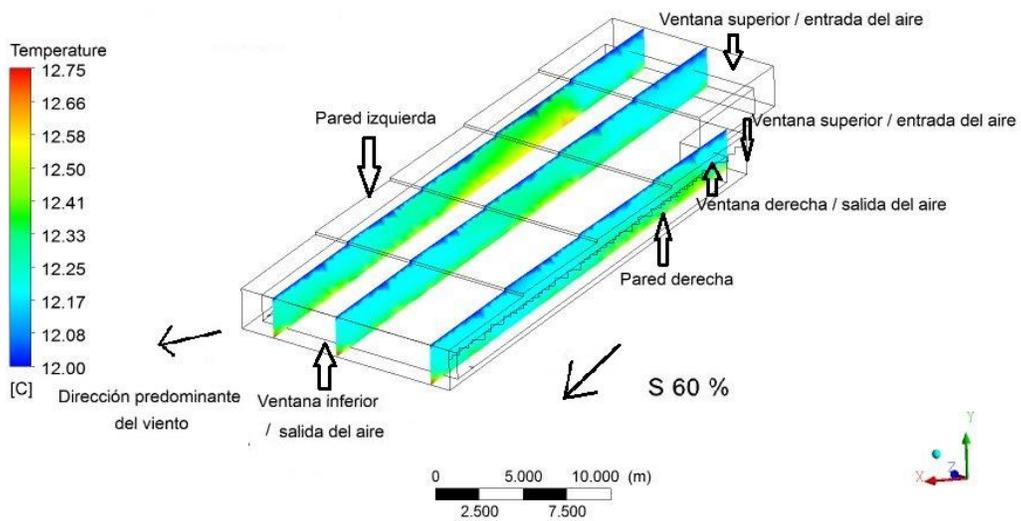
4.3.3. Distribución espacial de temperatura, fracción de masa de vapor de agua y vectores de viento de los casos validados

Caso II

Para el caso II representado por la figura 4.29a, pese a obtener mayor temperatura en el eje 5, se observa que la variación es menos de un grado en los ejes por lo que es un gradiente menor al real. La temperatura se presentó muy uniforme tanto en ejes como en bloques (4.29b). En cuanto a la fracción de masas de vapor de agua, representado por la figura 4.30a y 4.30b, las diferencias se observan en el noveno decimal y no se generaron gradientes.

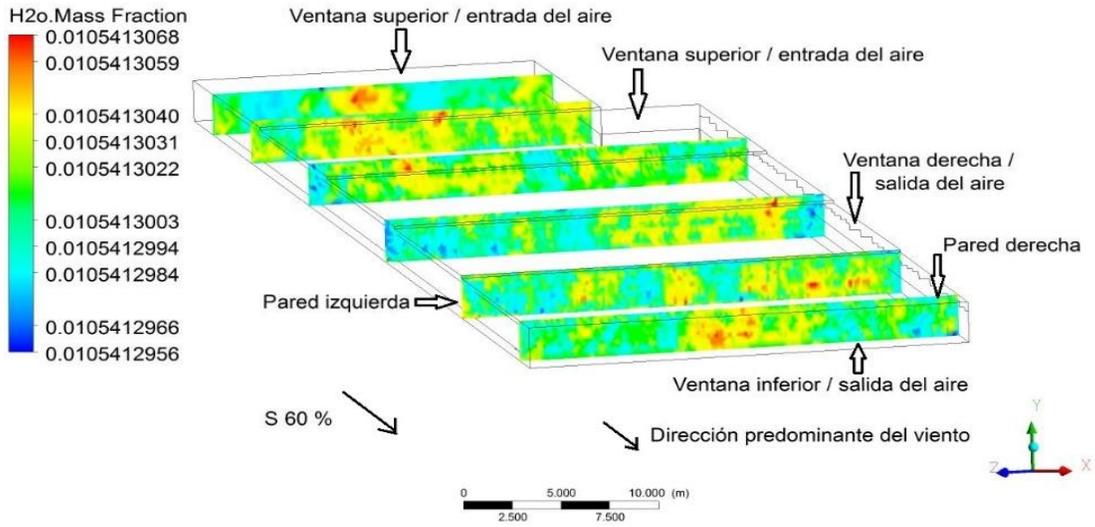


a) En ejes

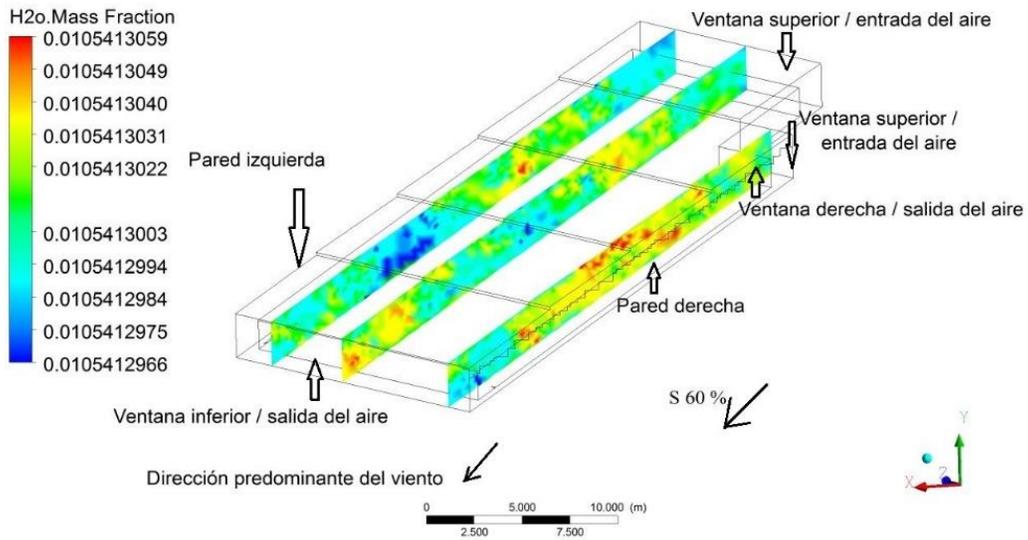


b) En bloques

Figura 4.29. Distribución de la temperatura simulada a) en ejes y b) en bloques para el caso II.



a) En ejes



b) En bloques

Figura 4.30. Distribución de la fracción de masa de vapor de agua simulada a) en ejes y b) en bloques para el caso II.

La simulación del flujo del aire para el caso II se observa en la figura 4.31. La velocidad predominante promedio se obtuvo hacia el suroeste con $0,4 \text{ ms}^{-1}$ y por tanto la entrada del aire se dio por la parte superior del invernadero. La simulación con el modelo de turbulencia, indica una acumulación de torbellinos en el centro del recinto y además la salida del aire se observa mayormente en la ventana derecha junto con la ventana inferior.

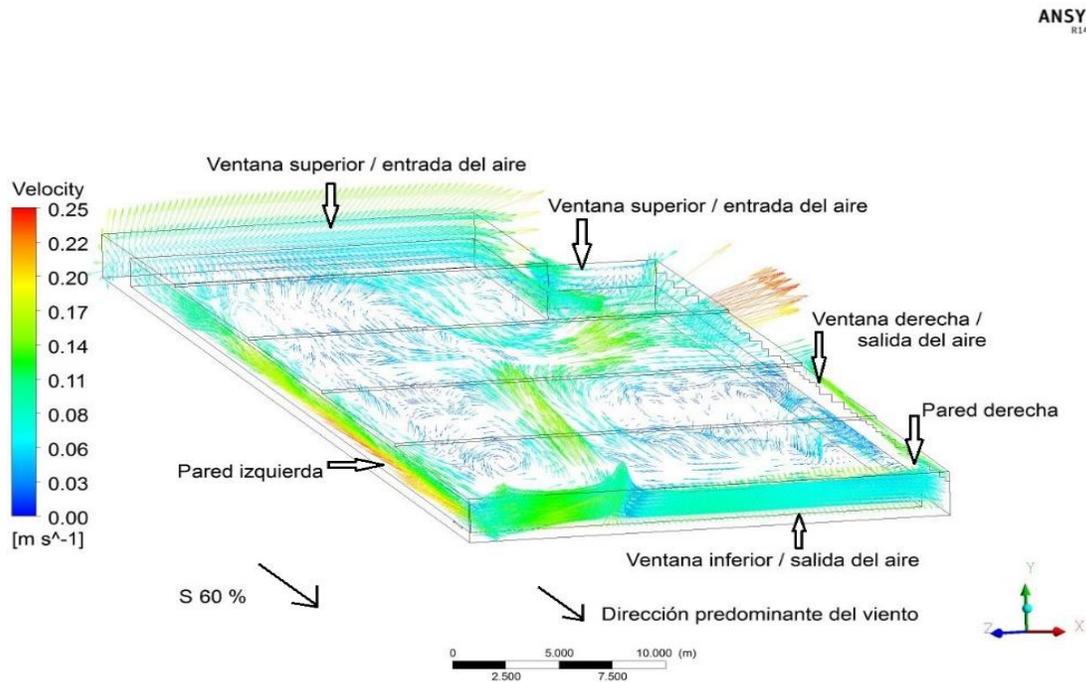


Figura 4.31. Distribución de la velocidad y dirección del viento dentro del invernadero para el caso II.

Caso IIIB

En la figura 4.32 se muestra la distribución espacial de la temperatura en ejes (4.32a) y bloques (4.32b) para el caso IIIB, donde al ser la dirección predominante del viento oeste, el aire es más frío cercano a la ventana derecha. El efecto simulado de las variaciones de la temperatura entre ejes y bloques son imperceptibles pues varían en el tercer y cuarto decimal y no es acorde con lo medido según se vio en el cuadro 4.9.

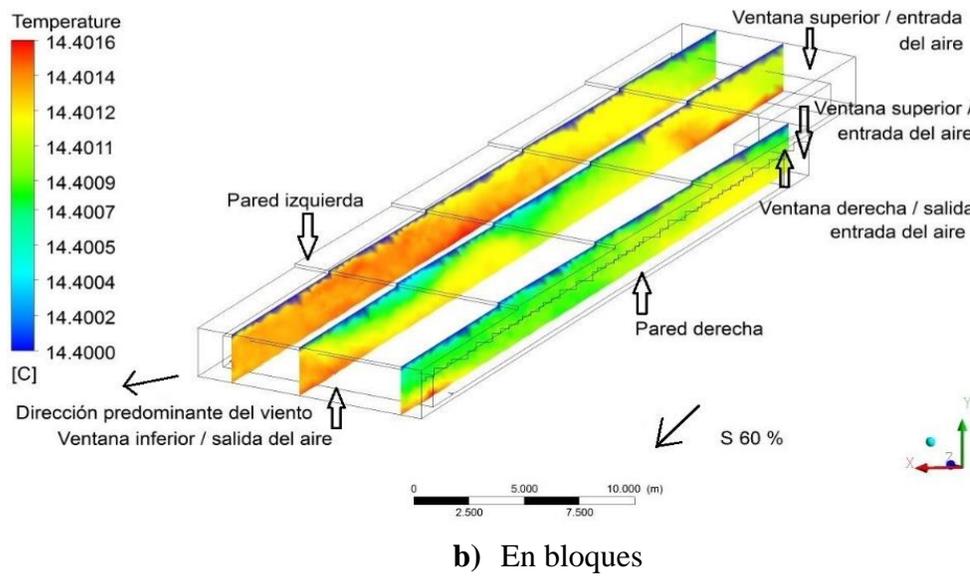
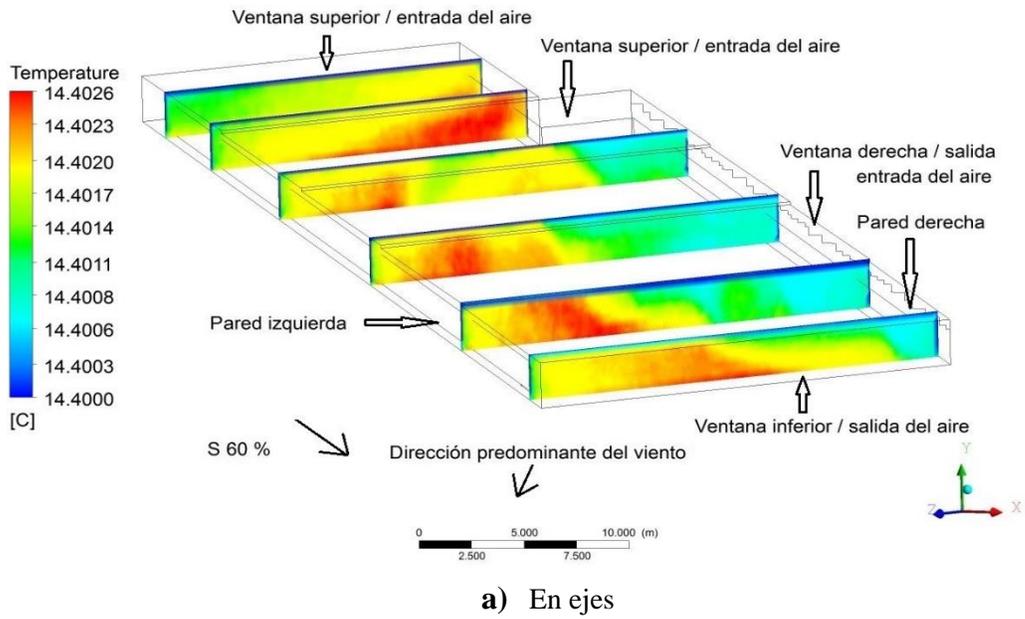


Figura 4.32. Distribución de la temperatura simulada a) ejes y b) bloques para el caso IIIB.

En el caso de la masa de fracción de agua, representada en la figura 4.33, en ejes (4.33a) y bloques (4.33b) se observa que los valores tanto para la masa de fracción de agua y la temperatura varía a partir del sexto decimal por lo que es despreciable la variabilidad espacial de fracción de masa de agua simulada.

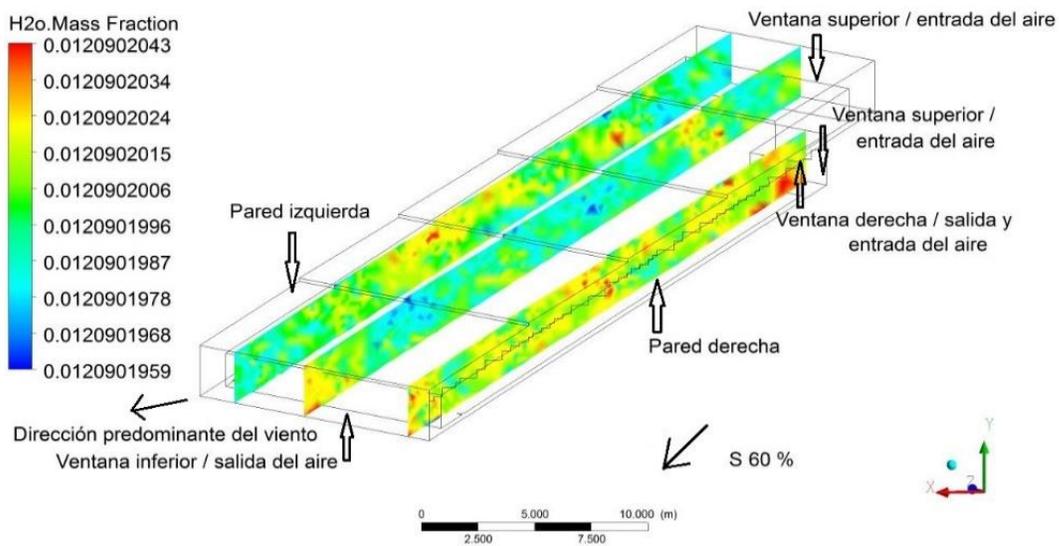
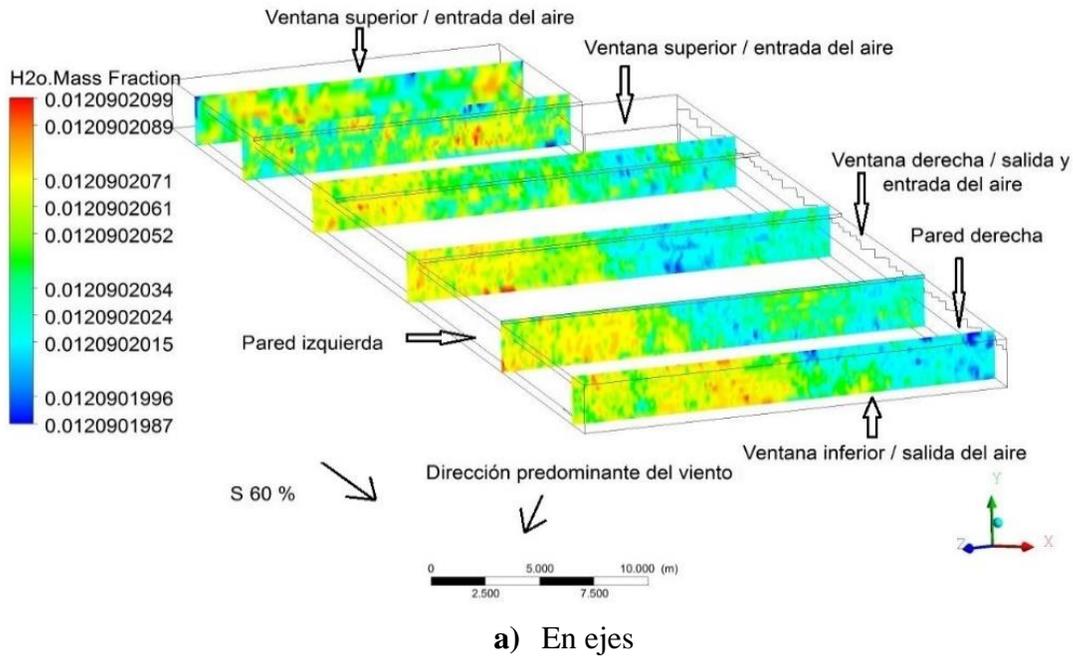


Figura 4.33. Distribución de la masa de fracción de agua simulada a) ejes y b) bloques para el caso IIIB.

La figura 4.34, presenta la distribución de los vectores del viento en el invernadero simulando el caso IIIB con el modelo de turbulencia K-e estándar. El valor de entrada del viento fue de $0,9 \text{ ms}^{-1}$ y una dirección predominante oeste, se observa que entra por la ventana superior con malla y la ventana derecha y crean un conjunto de torbellinos dentro del invernadero con una única salida del viento por la ventana inferior con malla. Las ventanas cenitales no parecen que cumplen su función con eficiencia. Parte del flujo del viento entrante por la ventana superior con malla se mueve por el borde izquierdo con menos turbulencia que la que entra por la ventana derecha. Los flujos que forman torbellinos generan valores más bajos de velocidad de viento que el flujo que pasa por el borde izquierdo del invernadero, esto debido a la presencia y porosidad del cultivo.

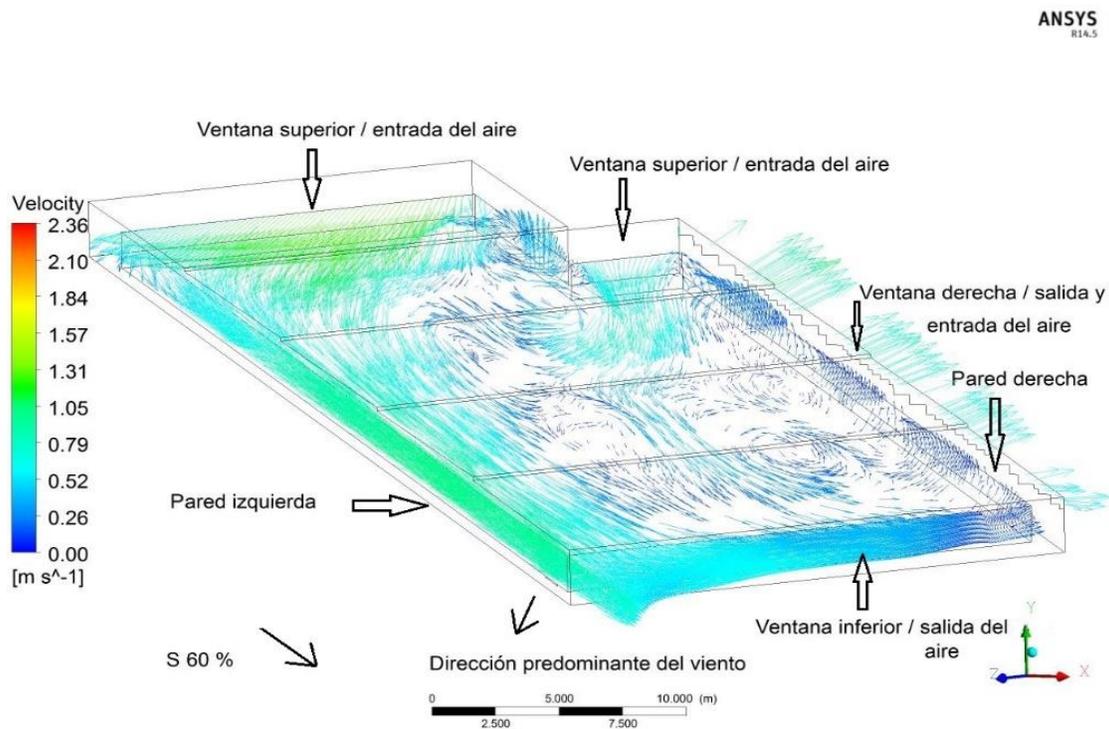
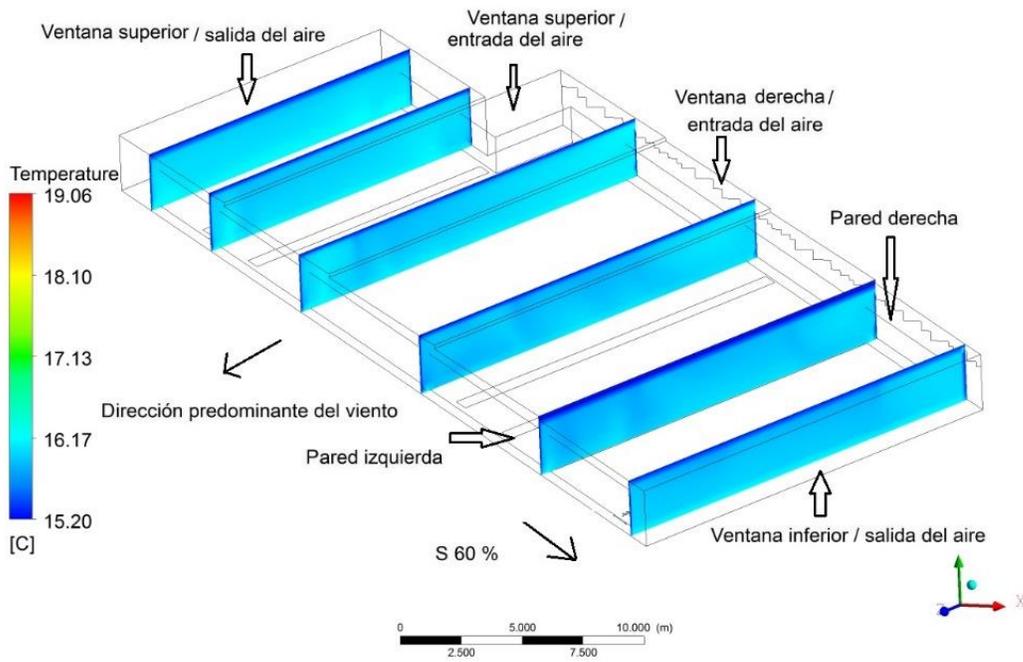


Figura 4.34. Distribución de la velocidad y dirección del viento dentro del invernadero para el caso IIIB.

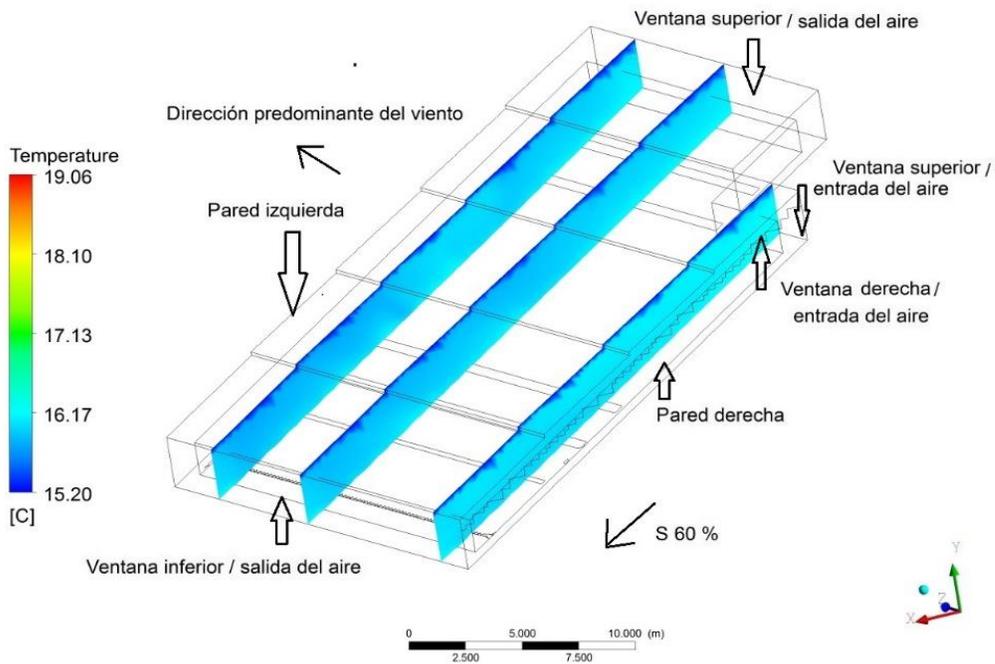
Caso IVB

En la figura 4.35, se representa la distribución de la temperatura en el invernadero en ejes (4.35a) y bloques (4.35b) para el caso IVB donde se obtuvo una uniformidad en todos los planos.

La figura 4.36 presenta la distribución de la velocidad y dirección del viento en el invernadero cuya magnitud de entrada fue de $0,9\text{ms}^{-1}$ con una dirección noroeste entrando por la ventana derecha y sube por los ejes 5 y 6 pasando por el borde izquierdo formando un torbellino en el centro del invernadero. Sus salidas son las ventanas inferior y superior con malla. Las cenitales según lo simulado no presentan movimiento cercano en sus alrededores.



a)



b)

Figura 4.35. Distribución de la temperatura simulada en los a) ejes y b) bloques para el caso IVB.

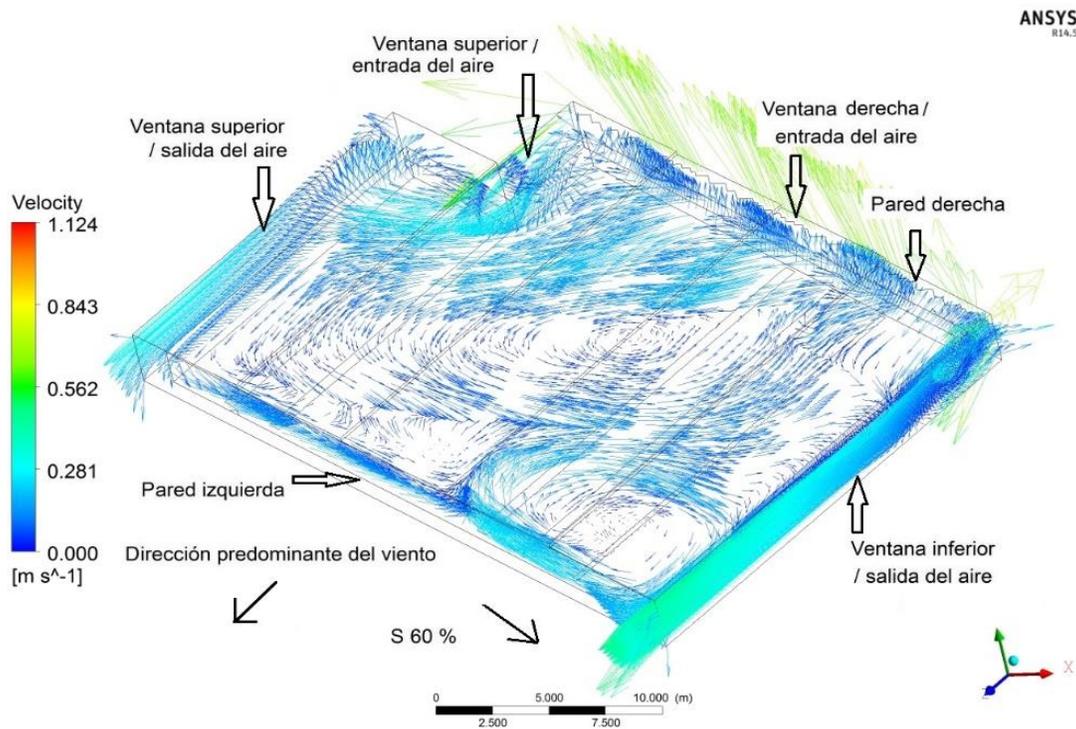


Figura 4.36. Distribución de la velocidad y dirección del viento dentro del invernadero para el caso IVB.

Según los resultados de la aplicación del modelo, los casos de temperaturas bajas fueron representativas. En el intervalo nocturno la radiación solar no tiene efecto y las plantas cierran sus estomas por lo que no hay aporte de vapor de agua debido a la transpiración.

En la noche se obtuvieron los resultados más representativos a la realidad, por no requerir modelos de radiación y evapotranspiración, como si lo requiere simulaciones de casos durante el día.

De acuerdo a los resultados simulados, las cenitales no cumplen su función en el intercambio de aire, esto debido a que su abertura no permite el paso del flujo de manera eficiente.

En términos de temperatura, las diferencias en los valores simulados, son mínimos en el sentido de la pendiente y en la sección transversal, con una uniformidad a lo largo del invernadero.

En el caso de la humedad relativa, los valores de los casos II y IIIB fueron precisos pero para aumentar la precisión y mejorar la exactitud del modelado, el valor de la evapotranspiración debe integrarse como una variable, es decir, en un submodelo donde se pueda calcular e integrar como una variable más ya que depende de la horas del día y de la etapa de crecimiento del cultivo, esto puede realizarse con una función definida por el usuario (UDF). Los resultados del modelo computacional de la distribución de humedad relativa indican que las variaciones corresponden a pequeñas inestabilidades numéricas que son reflejo del método de solución, no de la verdadera distribución de humedad. Según los resultados el transporte de la humedad se da principalmente por convección, no tanto por difusión.

Los resultados de las simulaciones cuyos casos no fueron representativos con el modelo (caso I, IIIA y IVA y la humedad relativa del IIIB) se presentan en el Anexo B, en las figuras del B5 al B14.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados de esta investigación se pudo evaluar la respuesta térmica de un invernadero en pendiente, cumpliendo satisfactoriamente el objetivo del estudio.

Respecto al comportamiento de la temperatura y humedad relativa en el invernadero:

- Para el intervalo diurno y nocturno no se encontró una estratificación constante de la temperatura y humedad relativa en sentido de la pendiente durante el periodo de análisis.
- El efecto de las corrientes de viento y el efecto direccional de la radiación tienden a romper estados cuasiestáticos como las estratificaciones de la temperatura y humedad relativa
- El gradiente más alto de temperatura interna del invernadero se presentó en un orden de $3,14\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el sentido de la pendiente y $0,63\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el sentido de la sección transversal.
- En el caso de la humedad relativa se presentó un gradiente máximo de $11,25\%$ en el sentido de la pendiente y $6,04\%$ en el sentido de la sección transversal. En el intervalo nocturno el gradiente mayor de humedad relativa fue de $10,68\%$.
- El gradiente más alto entre ejes consecutivos se presentó en el centro del invernadero (entre los ejes 3 y 4) de $1,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ para la temperatura obtenido en el intervalo diurno.

- Pese a tener los gradientes más altos de temperatura y humedad relativa entre el punto más bajo y más alto del invernadero, en la mayoría de los casos, las zonas con mayores diferencias significativas a nivel estadístico se presentaron en el centro del invernadero.
- Los días analizados, en su mayoría, durante el intervalo diurno se encuentran tres horas consecutivas fuera del ámbito óptimo de temperatura del chile y tomate y durante todo el intervalo nocturno se encuentran fuera del ámbito óptimo de humedad relativa para ambos cultivos.

Respecto a la dinámica de fluidos computacional y la simulación realizada:

- En el modelado con CFD, el estudio de mallas para este caso particular reflejaba que la cantidad de nodos y elementos es de alrededor 2 millones, para balancear el tiempo de proceso (72 horas) y precisión (error absoluto de 0,29). La influencia de la malla, es un amplio campo de investigación donde se analiza la configuración mínima para que el cálculo no cambie de manera significativa.
- El modelo utilizando dinámica de fluidos computacional diseñado para la simulación de las condiciones ambientales dentro del invernadero, no fue representativo en los casos simulados durante el día (caso I, IIIA y IVA) y sí lo fue en los casos analizados durante la noche (caso II, IIIB y IVB), exceptuando la simulación de humedad relativa en los casos II y IVB. Así mismo, la estratificación de la temperatura y la humedad relativa en el sentido de la pendiente y la sección transversal no fue representativa.

- La variación promedio de la serie de datos, entre la temperatura simulada y medida del intervalo diurno fue de 6,93 °C con una desviación estándar de 1,19 °C y un RERMC promedio de 26,29 %. Con respecto a la humedad relativa la variación promedio fue de 22,24 % con una desviación estándar de 2,57 % y un RERMC promedio de 48,26 %. A nivel mundial, la simulación de humedad relativa y la evapotranspiración son campos que aún se estudian para mejorar su precisión.
- La variación promedio de la serie de datos, entre la temperatura simulada y medida del intervalo nocturno fue de 0,19 °C con una desviación estándar de 0,11 °C y un RERMC promedio de 1,86. Con respecto a la humedad relativa la variación promedio fue de 22,60 % con una desviación estándar de 28,78 % y un RERMC promedio de 22,35.
- La herramienta de la dinámica de fluidos computacional, con una validación contundente permite obtener resultados de escenarios realizando modificaciones físicas al invernadero para evaluar la adaptación del clima a las necesidades del cultivo maximizando el potencial de la ventilación natural.

CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES

Con el fin de mejorar la precisión del modelo realizado con CFD se presentan las siguientes recomendaciones:

- Registrar temperaturas de las paredes cubiertas de polietileno para conocer mejor los gradientes entre paredes, puesto que existen diferencias en la exposición a la radiación debido a los ángulos de incidencia.
- Medir el flujo de calor del suelo y determinar las características térmicas necesarias como el calor específico, densidad y conductividad térmica del suelo.
- Incluir al dominio el modelado de objetos aledaños al invernadero sobre todo por las interferencias que generan una disminución de la velocidad, como el caso de un cercado vegetal. Determinar las características de la malla antiáfida (permeabilidad, porosidad y coeficiente de brinco) que pueden ser medidas mediante un túnel de viento, así como las características de los cultivos a modelar (resistencia viscosa, resistencia inercial y porosidad).
- En el caso de la humedad relativa, para obtener mejores resultados, se sugiere integrar una rutina matemática (UDF) donde se prediga la evapotranspiración real en el momento de la simulación que concuerde con la respectiva etapa de crecimiento del cultivo.
- Comparar diferentes cálculos numéricos y submodelos que pueden ser variantes para una mejor precisión como el caso del modelo de turbulencia. La precisión con la que se debe trabajar, va a depender de la sensibilidad del cultivo

con respecto a las variables que se simulan, herramientas computacionales, equipos y sus precisiones para medición de variables climáticas.

- Simular en estado transitorio y de esta forma, poder comparar resultados con los modelos estacionarios.
- Integrar modelos de radiación como el de ordinarias para mejorar la precisión del modelado del intercambio del calor de aire y especies en la estructura. El conocimiento del comportamiento de la radiación dentro del invernadero permite conocer con exactitud los diferentes escenarios durante las horas del día.
- Con la misma información base registrada en este estudio de temperatura y humedad relativa en el invernadero y en el ambiente externo, se pueden realizar estudios para conocer la funcionalidad del invernadero, permitiendo conocer los tiempo donde el invernadero se encuentre dentro o fuera de los ámbitos recomendados para la temperatura y humedad relativa. Con este análisis se podría definir la necesidad de realizar modificaciones físicas en el invernadero. El análisis se recomienda realizarlo para la época de invierno y verano, de esta forma poder tener un panorama general del comportamiento.
- La aplicación de CFD requiere el esfuerzo y la participación a nivel interdisciplinario y en forma conjunta de la Universidad de Costa Rica y la facultad de Ingeniería para un mejor desarrollo de metodologías, programas computacionales adecuados y las validaciones respectivas.

- Según los análisis realizados se puede obtener una mejor adaptación del clima interno. Si el invernadero trabaja en los escenarios con las condiciones encontradas en los casos estudiados en esta investigación reiteradamente, se recomienda los siguientes aspectos:
 - Mayor apertura de las ventanas cenitales para una renovación de aire eficiente
 - Ampliar la ventana en el costado sureste lo cual se debe separar el invernadero adosado.
 - Abrir una ventana en el costado noroeste y colocar cortinas que permitan cerrar las ventanas de manera que en periodos muy fríos se reduzca la pérdida de energía.
 - Colocación de pantallas térmicas aluminizadas por ambas caras ya que de esta manera las irradian hacia el exterior en momentos en que la temperatura se encuentre más alta del ámbito superior e irradian hacia el interior en la noche para la disminuir la pérdida de energía

REFERENCIAS

- Abdel-Ghany, A. M. y Kozai, T. (2006). On the determination of the overall heat transmission coefficient and soil heat flux for a fog cooled, naturally ventilated greenhouse: Analysis of radiation and convection heat transfer. *Energy Conversion and Management*, 47, 2612–2628. doi:10.1016/j.enconman.2005.10.024
- Albright, L. D. (2002). Controlling Greenhouse Environments. *Acta Horticulturae*, 578, 47–54.
- Anderson, J. (1995). Computational fluid dynamics. The basics with applications (pp. 60–130). New York: McGraw-Hill.
- ANSI/ASAE (2003). Heating, Ventilating and Cooling Greenhouses. EP 406.4 Jan 2003 (R2008). St. Joseph, Michigan: ASAE.
- ANSYS Inc. (2010). Introduction to ANSYS FLUENT. Accedido el 20 de marzo del 2014, de http://imechanica.org/files/fluent_13.0_lecture06-turbulence.pdf
- Baeza, E. (2007). *Optimización del diseño de los sistemas de ventilación en invernadero tipo parral* (Tesis doctoral) Universidad de Almería.
- Baeza, E. ., Pérez, J. J., López, J. C. y Gázquez, J. C. (2011). Validation of CFD Simulations for Three Dimensional Temperature Distributions of a Naturally Ventilated Multispan Greenhouse Obtained by Wind Tunnel Measurements. *Acta Horticulturae*, 893, 571–580.
- Baptista, F. J., Bailey, B. J., Meneses, J. F. y Navas, L. M. (2010). Greenhouses climate modelling . Tests , adaptation and validation of a dynamic climate model, 8(2), 285–298.
- Bartzanas, T., Boulard, T. y Kittas, C. (2002). Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a tunnel greenhouse equipped with insect-proof screen in the openings. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34, 207–221.
- Bartzanas, T., Kittas, C., Tadj, N. y Draoui, B. (2008). Numerical and Experimental Analysis of Convective Heat Transfer in a Heated Greenhouse. *Acta Horticulturae*, 801, 847–854.
- Boulard, T. y Baille, A. (1987). Analysis of Thermal Performance of a Greenhouse as a Solar Collector. *Energy in Agriculture*, 6, 17–26.

- Boulard, T., Fatnassi, H., Majdoubi, H. y Bouriden, L. (2008). Airflow and microclimate patterns in a one-hectare canary type greenhouse: An experimental and CFD assisted study. In *Acta Horticulturae* (Vol. 801 PART 2, pp. 837–845). doi:10.1016/j.agrformet.2009.01.002
- 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, 173–190.
- Boulard, T., Wang, S. y Haxaire, R. (2000). Mean and turbulent air flows and microclimatic patterns in an empty greenhouse tunnel. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100, 169–181.
- Bournet, P. y Boulard, T. (2010). Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. *Computers and Electronics in Agriculture*. doi:10.1016/j.compag.2010.08.007
- Bournet, P. E. (2014). Assessing Greenhouse Climate Using CFD: a Focus on Air Humidity Issues. *Acta Horticulturae*, 1037, 971–986.
- Bournet, P. E., Ould Khaoua, S. A. y Boulard, T. (2007). Numerical prediction of the effect of vent arrangements on the ventilation and energy transfer in a multi-span glasshouse using a bi-band radiation model. *Biosystems Engineering*, 98, 224–234.
- Campen, J. B., y Bot, G. P. A. (2003). Determination of greenhouse-specific aspects of ventilation using three-dimensional computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 84(1), 69–77. doi:10.1016/S1537-5110(02)00221-0
- Campen, J. B., Kempkes, F. L. K. y Bot, G. P. A. (2009). Mechanically controlled moisture removal from greenhouses. *Biosystems Engineering*, 102, 424–432.
- Chow, K. y Holdø, A. E. (2010). On the influence of boundary conditions and thermal radiation on predictive accuracy in numerical simulations of indoor ventilation. *Building and Environment*. doi:10.1016/j.buildenv.2009.06.021
- Costarelli, S. (2011). *Resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes utilizando CUDA*. Universidad Nacional del Litoral.
- Craft, T. J. (2008). Pressure-Velocity Coupling. In *Advanced Modelling y Simulation: CFD*. Manchester: University of Manchester.
- Dayan, J., Strassberg, Y. y Dayan, E. (2001). Simulation and control of ventilation rates in greenhouses. *Acta Horticulturae*, 566, 67–74.

- De la Torre, G., Soto, G., López, I., Torres, I. y Rico, E. (2011). Computational fluid dynamics in greenhouses: A review. *African Journal of Biotechnology*. doi:10.5897/AJB10.2488
- Drori, U., Dubovsky, V. y Ziskind, G. (2005). Experimental verification of induced ventilation. *ASCE Journal of Environmental Engineering*, 131, 820–826.
- Drori, U. y Ziskind, G. (2004). Induced ventilation of a one-story realsize building. *Energy and Buildings*, 36, 881–890.
- Fatnassi, H., Boulard, T., Poncet, C. y Chave, M. (2006). Optimisation of greenhouse insect screening with computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 93, 301–312. doi:10.1016/j.biosystemseng.2005.11.014
- Fidaros, D. K., Baxevanou, C. A., Bartzanas, T. y Kittas, C. (2010). Numerical simulation of thermal behavior of a ventilated arc greenhouse during a solar day. *Renewable Energy*, 35, 1380–1386. doi:10.1016/j.renene.2009.11.013
- Flores, J. (2010). *Estudio del clima en los principales modelos de invernaderos en México (Malla Sombra, Multitunel y Baticenital), mediante la técnica del CFD (Computational Fluid Dynamics)*(Tesis doctoral). Universidad de Almería.
- Flores, J., Lorenzo, I., Mejía, E. y Montero, I. (2014). Evaluación del desempeño climático de un invernadero baticenital de centro de México mediante dinámica de fluidos computacional(CFD). *Agrociencia*, 48, 131–146.
- Flores, J., Mejía, E., Montero, J. y Rojano, A. (2011). Análisis numérico del clima interior en un invernadero de tres naves con ventilación mecánica. *Agrociencia*, 45, 545–560.
- Flores, J., Ojeda, W., López, I., Rojano, A. y Salazar, I. (2006). Requerimientos de riego para tomate de invernadero. *Terra Latinoamericana*, 25, 127–134.
- Fluent. (2009). Guía de usuario. ANSYS, Inc.
- Hanks, R. J. (1996). Solid Plant Atmospheric Relations. In S. S. y B. Media (Ed.), *Applied Soil Physics* (2nd ed., pp. 102–104). Utah.
- Harmanto, Tantau, H. J. y Salokhe, V. M. (2006). Microclimate and Air Exchange Rates in Greenhouses covered with Different Nets in the Humid Tropics. *Biosystems Engineering*, 94(2), 239–253. doi:10.1016/j.biosystemseng.2006.02.016
- Haxaire, R., Boulard, T. y Mermier, M. (2000). Greenhouse natural ventilation by wind forces.pdf. *Acta Horticulturae*, 534, 31–40.

- Hellickson, M. y Walker, J. (1983). Ventilation systems for livestock structures. In J. Basselman (Ed.), *Ventilation of Agricultural Structures* (pp. 195–196). Michigan: ASAE.
- Henríquez, C., Cabalceta, G., Bertsch, F. y Alvarado, A. (n.d.). *Principales suelos de Costa Rica*. San José.
- Iglesias, N., Montero, J., Muñoz, P. y Antón, A. (2009). Estudio del clima nocturno y el empleo de doble cubierta de techo como alternativa pasiva para aumentar la temperatura nocturna de los invernaderos utilizando un modelo basado en la Mecánica de Fluidos Computacional. *Horticultura Argentina*, 28(67), 18–23.
- Jan, H., Janssens, A. y De Paepe, M. (2008). Coupling moisture transport in air flows and porous material using CFD. In *The 8th symposium on Building Physics in the Nordic Countries*.
- 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, 38(May), 227–233.
- Kim, K., Yoon, J.-Y., Kwon, H.-J., Han, J.-H., Eek Son, J., Nam, S.-W., ... Lee, I.-B. (2008). 3-D CFD analysis of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers. *Biosystems Engineering*, 100(2), 245–255. doi:10.1016/j.biosystemseng.2008.03.006
- Kittas, C., Bartzanas, T. y Jaffrin, A. (2003). Temperature gradients in a partially shaded large greenhouse equipped with evaporative cooling pads. *Biosystems Engineering*, 85, 87–94. doi:10.1016/S1537-5110(03)00018-7
- Kittas, C., Karamanis, M. y Katsoulas, N. (2005). Air temperature regime in a forced ventilated greenhouse with rose crop. *Energy and Buildings*, 37, 807–812. doi:10.1016/j.enbuild.2004.10.009
- Kobayashi, K. y Salam, M. U. (2000). Comparing Simulated and Measured Values Using Mean Squared Deviation and its Components. *Agronomy Journal*, 92(2), 345. doi:10.1007/s100870050043
- Leal, P. M. y Costa, E. (2011). *Apostilla de ingeniería de confort en cultivos protegidos*. (Universidade Estadual de Campinas, Ed.) (1st ed.). São Paulo.
- Limtrakarn, W., Boonmongkol, P., Chompupoung, A., Rungprateepthaworn, K., Kruenate, J. y Dechaumphai, P. (2012). Computational fluid dynamics modeling to improve natural flow rate and sweet pepper productivity in greenhouse. *Advances in Mechanical Engineering*, 2012. doi:10.1155/2012/158563

- Lopez, A. (2012). *Validación de un modelo matemático para predecir las condiciones climáticas interna en un invernadero localizado en la zona norte de Cartago, Costa Rica* (Tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica.
- Majdoubi, H., Boulard, T., Fatnassi, H. y Bouirden, L. (2009). Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: An experimental and CFD assisted study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1050–1062.
- Medrano, E., Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M. C. y Montero, J. I. (2005). Evaluation and modelling of greenhouse cucumber-crop transpiration under high and low radiation conditions. *Scientia Horticulturae*, 105, 163–175. doi:10.1016/j.scienta.2005.01.024
- Molina-Aiz, F. D., Fatnassi, H., Boulard, T., Roy, J. C. y Valera, D. L. (2010). Comparison of finite element and finite volume methods for simulation of natural ventilation in greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 72, 69–86. doi:10.1016/j.compag.2010.03.002
- Nebballi, R., Roy, J. C. y Boulard, T. (2012). Dynamic simulation of the distributed radiative and convective climate within a cropped greenhouse. *Renewable Energy*, 43, 111–129. doi:10.1016/j.renene.2011.12.003
- Norton, T., Sun, D.-W., Grant, J., Fallon, R. y Dodd, V. (2007). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: a review. *Bioresource Technology*, 98(12), 2386–414. doi:10.1016/j.biortech.2006.11.025
- Ould-Khaoua, S. A., Bournet, P. E., Migeon, C., Boulard, T. y Chassériaux, G. (2006). Analysis of Greenhouse Ventilation Efficiency based on Computational Fluid Dynamics. *Biosystems Engineering*, 95, 83–98. doi:10.1016/j.biosystemseng.2006.05.004
- Programa Nacional de Ambientes Protegidos. (2010). *Cuantificación y Valoración de Estructuras y Procesos de Producción Agrícola Bajo Ambientes Protegidos en Costa Rica*. San José.
- Rico, E. (2008). *Modelación Climática en Invernaderos : Ventilación Natural* (Tesis doctoral). Universidad de Querétaro.
- Romero, P., Choi, C. y Lopez, I. (2010). Enhancement of the greenhouse air ventilation rate under climate conditions of central Mexico. *Agrociencia*, 44, 1–15.
- Roy, J. 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, 457–464.

- Roy, J., Vidal, C., Fargues, J. y Boulard, T. (2008). CFD based determination of temperature and humidity at leaf surface. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(2), 201–212. doi:10.1016/j.compag.2007.11.007
- Saldes, A. (2012). *Efecto de la estructura de apilamiento sobre las emisiones de polvo en pilas de almacenamiento de carbón (Tesis de maestría)*. Universidad de Chile.
- Sánchez, J. (2004). Dinámica de fluidos computacional. In *Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujo con capa límite desprendida. Aplicaciones en instalaciones deportivas con gradas cubiertas* (pp. 65–72). Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Sapounas, A., Nikita, C., y Martzopoulos, G. (2008). Numerical and Experimental Study of Fan and Pad Evaporative Cooling System in a Greenhouse with Tomato Crop. *Acta Horticulturae*, 801, 987–994.
- Solano, J. y Villalobos, R. (2000). Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica. *Revista Tópicos Meteorológicos Y Oceanográficos*, 21.
- Stangroom, P. (2004). CFD Modelling of Wind Flow Over Terrain (PhD Thesis) University of Nottingham.
- Teitel, M. (2001). The effect of insect-proof screens in roof openings on greenhouse microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 110, 13–25.
- Teitel, M., Ziskind, G., Liran, O., Dubovsky, V. y Letan, R. (2008). Effect of wind direction on greenhouse ventilation rate, airflow patterns and temperature distributions. *Biosystems Engineering*, 101(3), 351–369. doi:10.1016/j.biosystemseng.2008.09.004
- Tesi, R. (2001). *Medios de protección para la hortoflorofruticultura y el viverismo*. (Mundi-prensa, Ed.) (3 ed). Madrid, España.
- Tong, G., Christopher, D. M. y Li, B. (2009). Numerical modelling of temperature variations in a Chinese solar greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68, 129–139. doi:10.1016/j.compag.2009.05.004

ANEXO A
ANÁLISIS DE VARIANZA POR EL MÉTODO DE TUKEY

Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)			
Eje	Medias	n	E.E.	Eje	Medias	n	E.E.
1	12,46	2	0,11 A	1	97,51	1	5,70 A
2	12,57	3	0,09 A	2	100,00	3	3,29 A
3	12,54	3	0,09 A	3	88,75	2	4,03 A
4	12,55	3	0,09 A	4	99,43	2	4,03 A
5	12,48	3	0,09 A	5	99,13	3	3,29 A
6	12,47	3	0,09 A	6	98,98	3	3,29 A

Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)			
Bloque	Medias	n	E.E.	Bloque	Medias	n	E.E.
A	12,60	5	0,06 A	A	98,68	4	2,86 A
B	12,45	7	0,05 A	B	99,76	6	2,34 A
C	12,52	5	0,06 A	C	93,72	4	2,86 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Figura A1. Análisis de varianza de la temperatura y la humedad relativa entre ejes y bloques por el método de Tukey para el caso II.

Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)			
Eje	Medias	n	E.E.	Eje	Medias	n	E.E.
1	29,30	2	0,83 A	1	51,35	1	5,23 A
2	29,02	3	0,68 A	2	53,92	3	3,02 A
3	28,83	2	0,83 A	3	53,66	2	3,69 A
4	30,08	3	0,68 A	4	47,84	2	3,69 A
5	31,42	3	0,68 A	5	47,37	3	3,02 A
6	31,75	3	0,68 A	6	47,97	3	3,02 A

Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)			
Bloque	Medias	n	E.E.	Bloque	Medias	n	E.E.
A	30,01	4	0,81 A	A	48,48	4	2,64 A
B	30,51	7	0,61 A	B	49,86	6	2,15 A
C	29,88	5	0,72 A	C	52,27	4	2,64 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Figura A2. Análisis de varianza de la temperatura y la humedad relativa entre ejes y bloques por el método de Tukey para el caso IIIA.

Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)			
Eje	Medias	n	E.E.	Eje	Medias	n	E.E.
1	14,14	2	0,30 A	1	96,88	1	1,26 A
2	14,25	3	0,24 A	2	99,82	3	0,73 A
3	13,69	3	0,24 A	3	99,15	1	1,26 A
4	14,30	3	0,24 A	4	97,34	2	0,89 A
5	14,28	3	0,24 A	5	97,40	3	0,73 A
6	14,25	3	0,24 A	6	96,46	3	0,73 A

Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)			
Bloque	Medias	n	E.E.	Bloque	Medias	n	E.E.
A	13,92	5	0,18 A	A	97,36	4	0,86 A
B	14,22	7	0,16 A	B	98,34	6	0,70 A
C	14,29	5	0,18 A	C	97,43	3	0,99 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Figura A3. Análisis de varianza de la temperatura y la humedad relativa entre ejes y bloques por el método de Tukey para el caso IIIB.

Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)			
Eje	Medias	n	E.E.	Eje	Medias	n	E.E.
1	15,65	2	0,08 A	1	98,28	2	2,40 A
2	15,72	3	0,07 A	2	99,27	3	1,96 A
3	15,77	3	0,07 A	3	90,82	2	2,40 A
4	15,75	3	0,07 A	4	96,78	3	1,96 A
5	15,83	3	0,07 A	5	97,53	3	1,96 A
6	15,75	3	0,07 A	6	96,98	3	1,96 A

Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)			
Bloque	Medias	n	E.E.	Bloque	Medias	n	E.E.
A	15,77	5	0,05A	A	97,07	4	1,78 A
B	15,75	7	0,04 A	B	98,48	7	1,34 A
C	15,73	5	0,05 A	C	94,45	5	1,59 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Figura A4. Análisis de varianza de la temperatura y la humedad relativa entre ejes y bloques por el método de Tukey para el caso IVB.

ANEXO B
VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN UTILIZANDO DINÁMICA DE
FLUIDOS COMPUTACIONAL

Cuadro B1. Validación de la temperatura y humedad relativa para el caso IIIA.

Agrupación	RERMC -Temperatura (%)	RERMC -Humedad relativa (%)
Eje 1	22,38	46,75
Eje 2	20,07	40,53
Eje 3	50,07	43,65
Eje 4	23,90	58,12
Eje 5	25,87	83,51
Eje 6	22,18	45,57
Bloque A	39,36	49,12
Bloque B	24,67	82,15
Bloque C	24,88	88,93

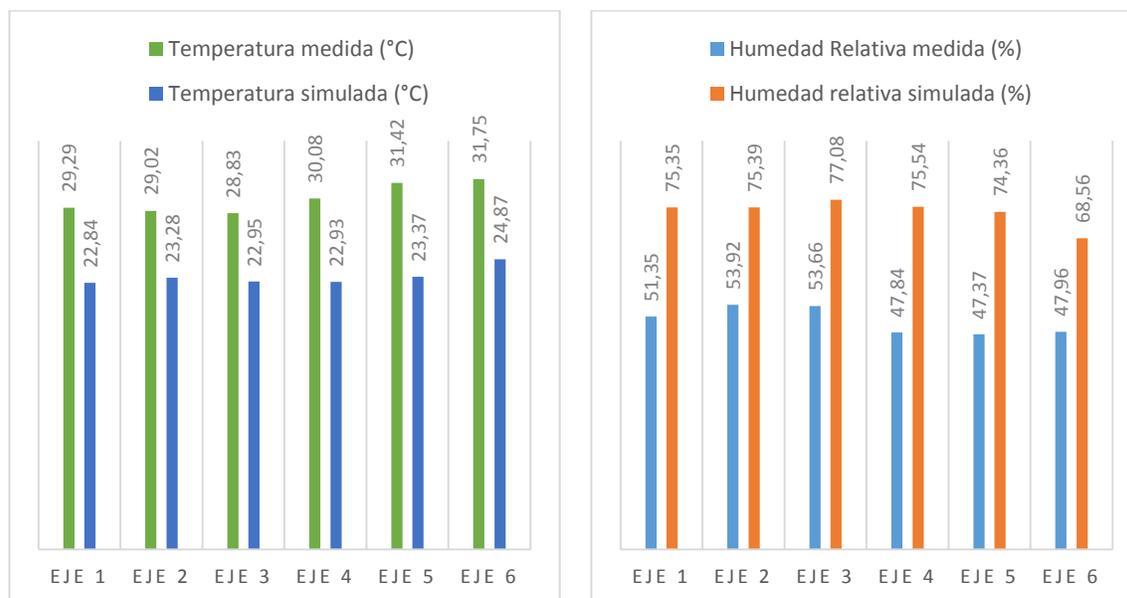


Figura B1. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por ejes para el caso IIIA.

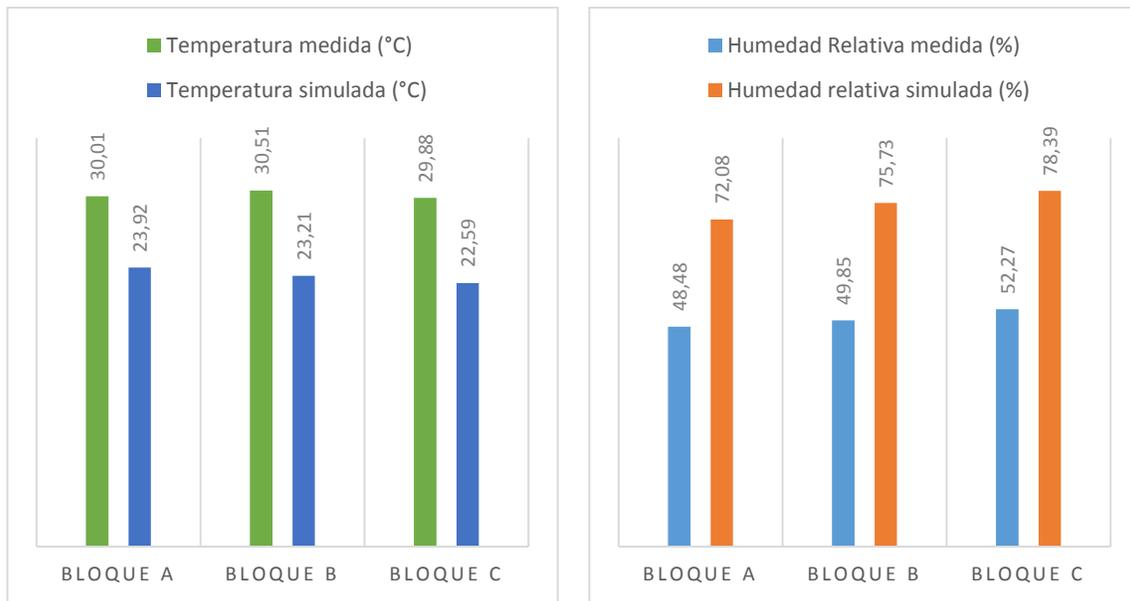


Figura B2. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por bloques para el caso IIIA.

Cuadro B2. Validación de la temperatura y humedad relativa para el caso IV A.

Agrupación	RERMC -Temperatura (%)	RERMC -Humedad relativa (%)
Eje 1	19,61	24,38
Eje 2	22,18	24,76
Eje 3	24,53	24,04
Eje 4	26,03	40,47
Eje 5	28,26	40,27
Eje 6	23,57	30,34
Bloque A	23,86	32,24
Bloque B	26,26	30,58
Bloque C	26,63	31,12

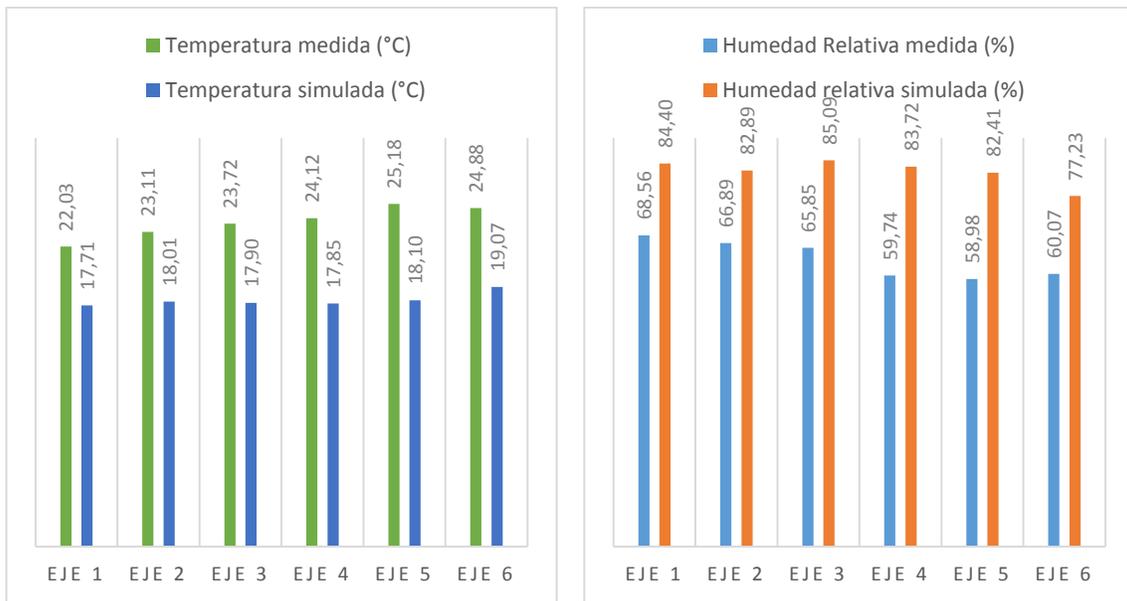


Figura B3. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por ejes para el caso IVA.

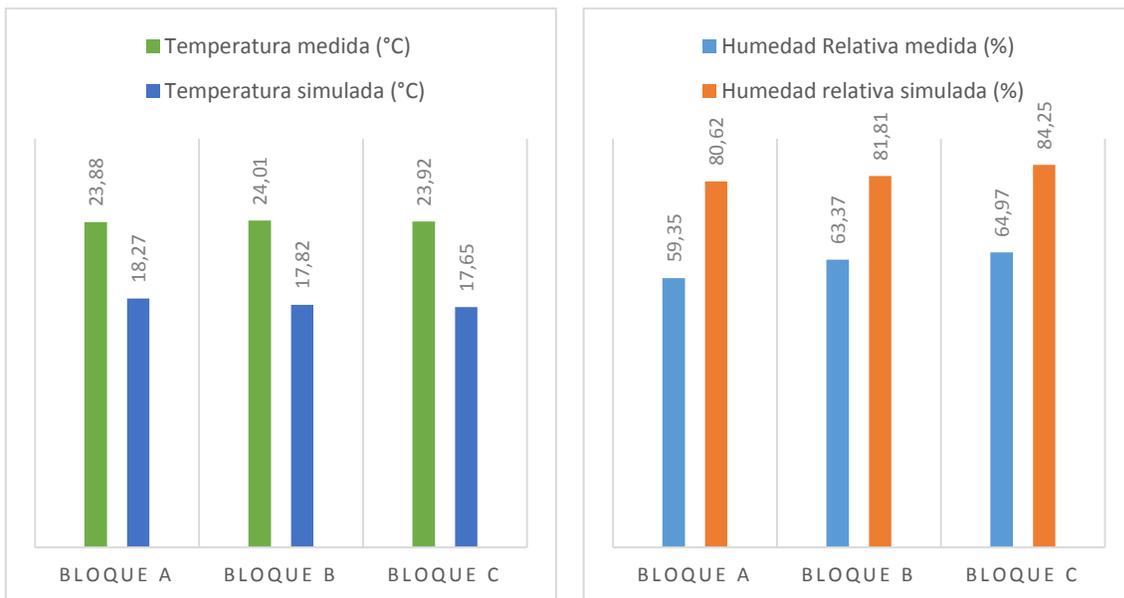
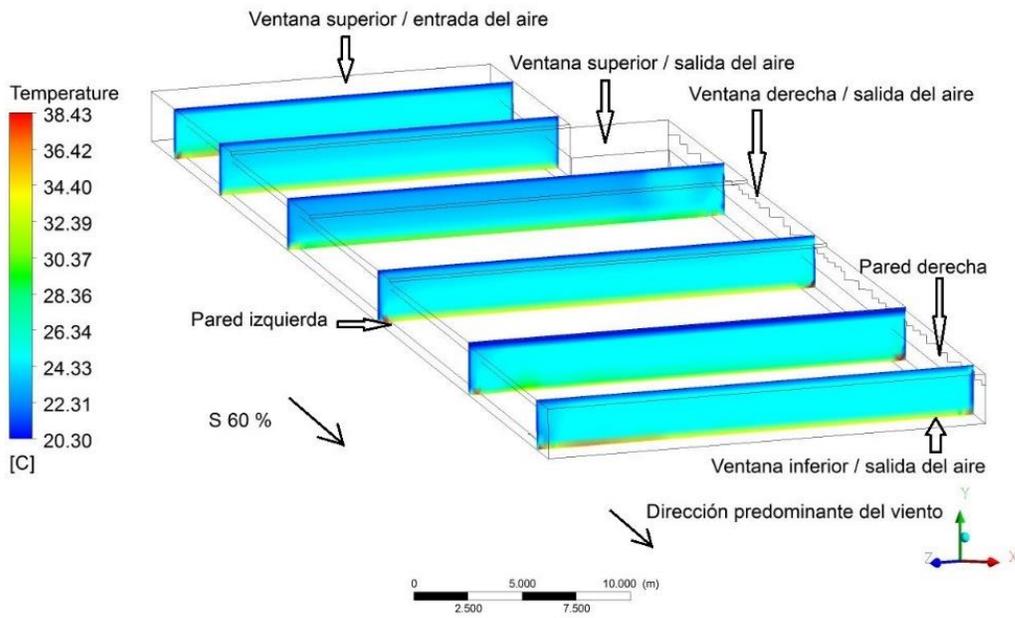
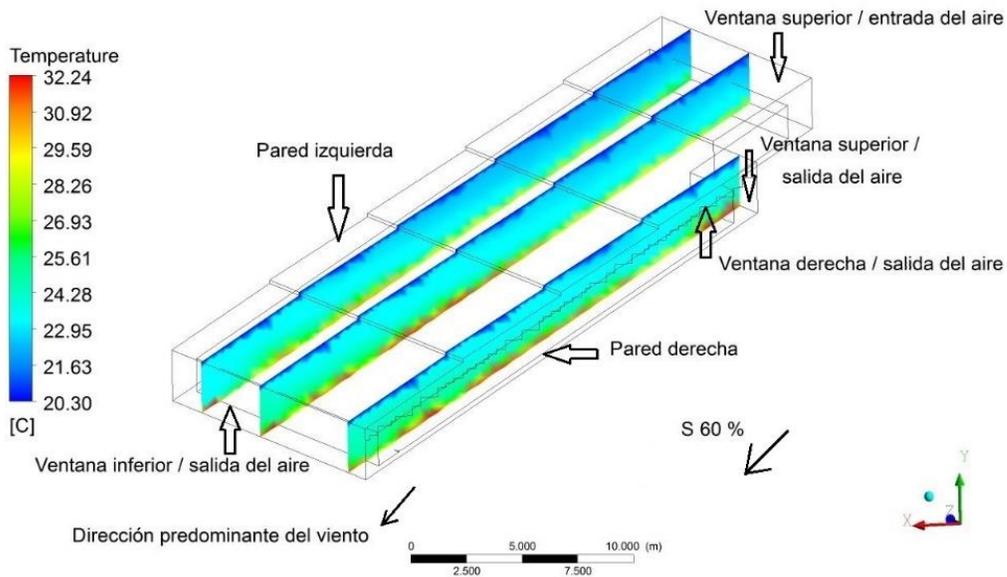


Figura B4. Temperatura y humedad relativa medida y simulada por bloques para el caso IVA.

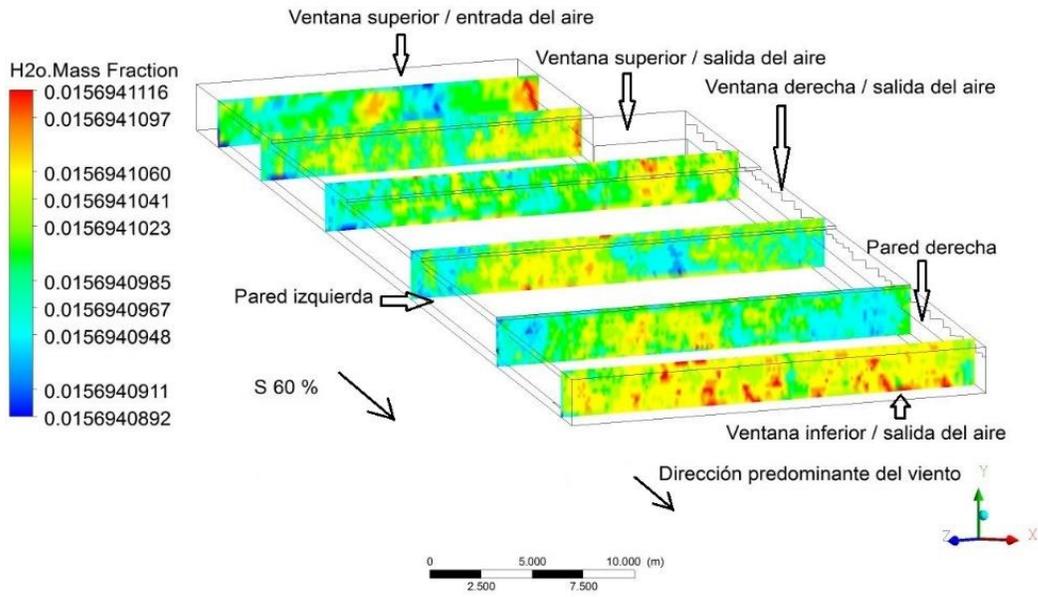


a) En ejes

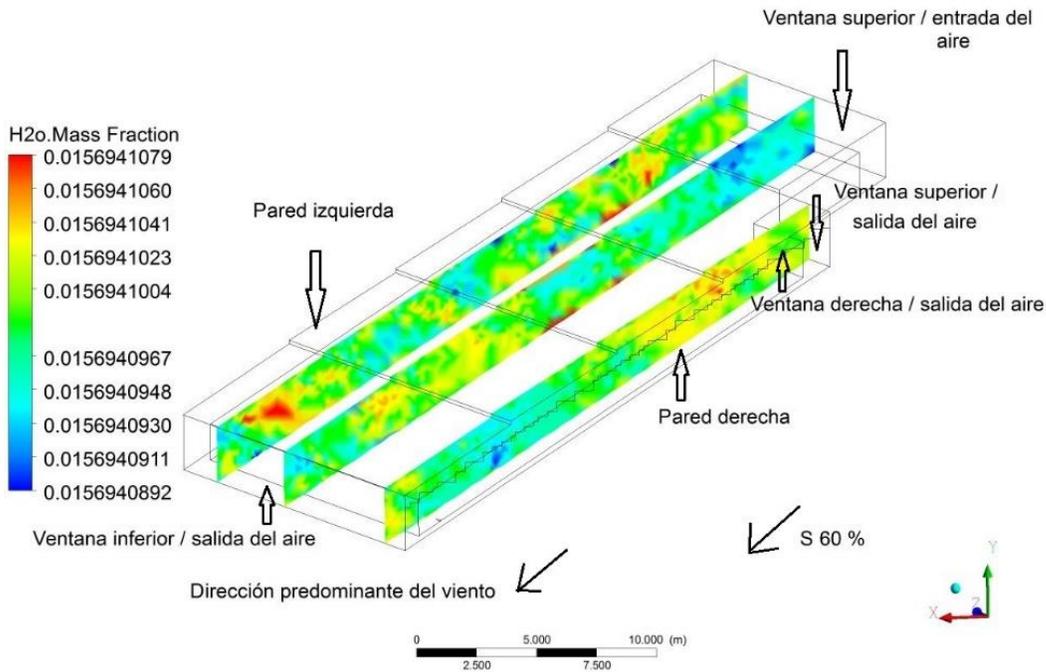


b) En bloques

Figura B5. Distribución de la temperatura simulada en los a) ejes y b) bloques para el caso I.



a) En ejes



b) En bloques

Figura B6. Distribución de la masa de fracción de agua en a) ejes y b) bloques para el caso I.

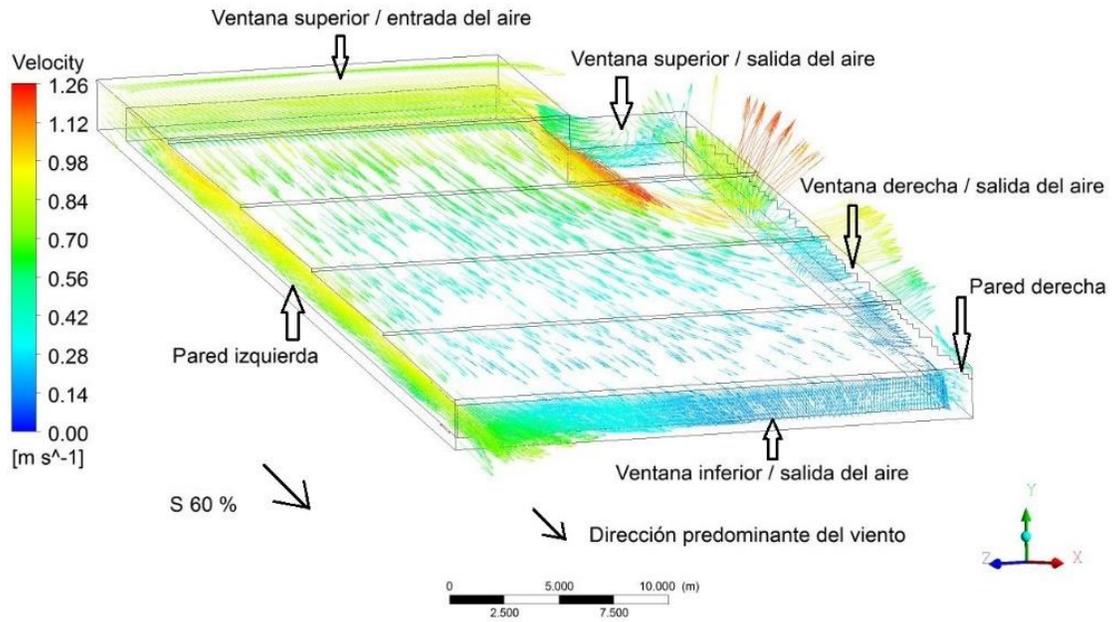


Figura B7. Distribución de la velocidad y dirección del viento dentro del invernadero para el caso I.

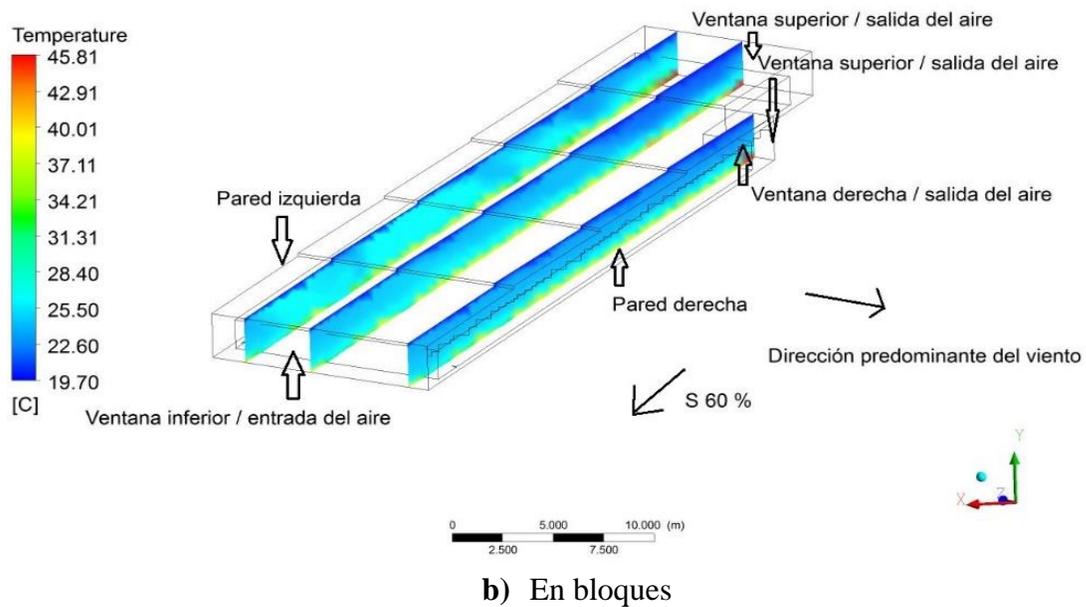
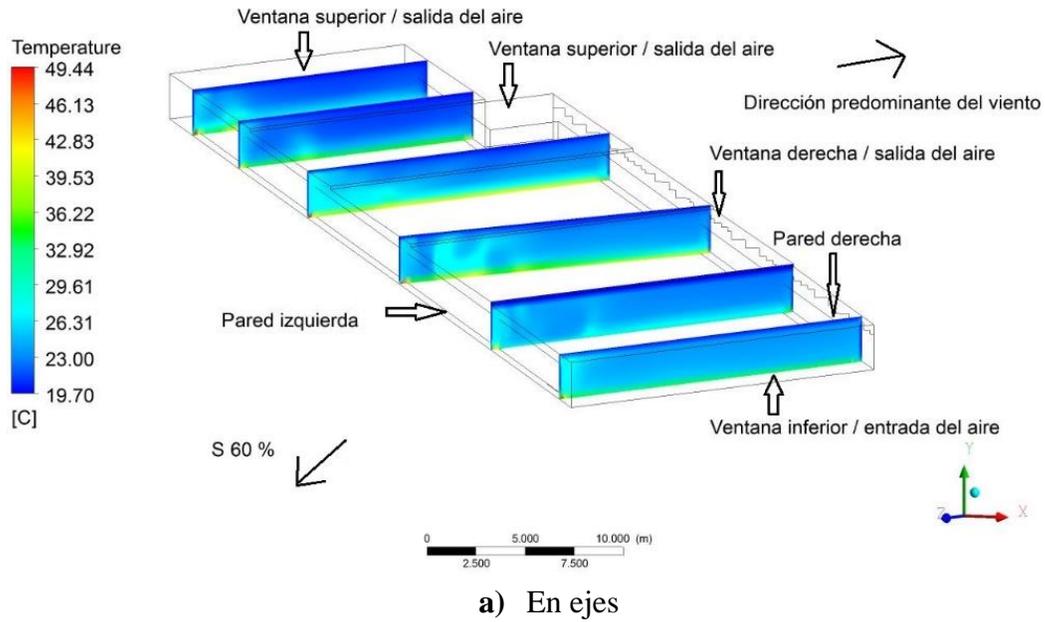


Figura B8. Distribución de la temperatura simulada en los a) ejes y b) bloques para el caso IIIA.

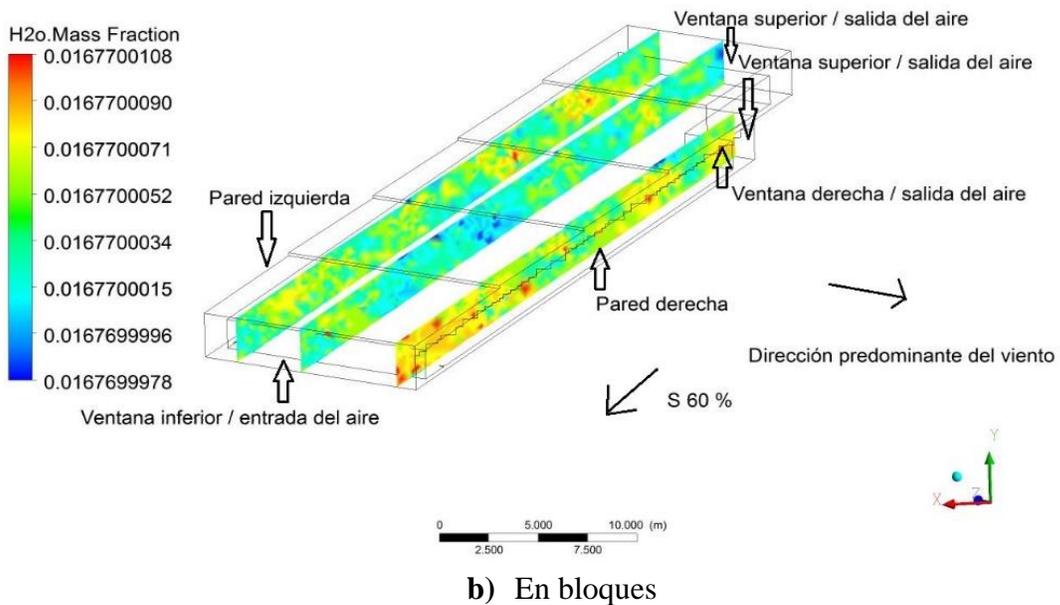
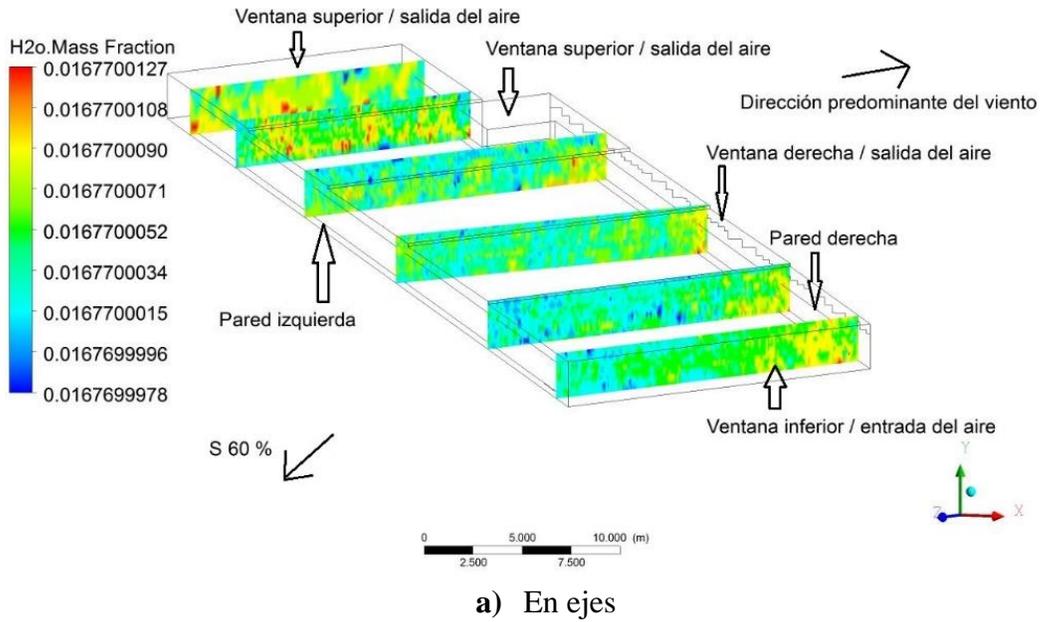


Figura B9. Distribución de la masa de fracción de agua simulada en los a) ejes y b) bloques para el caso IIIA.

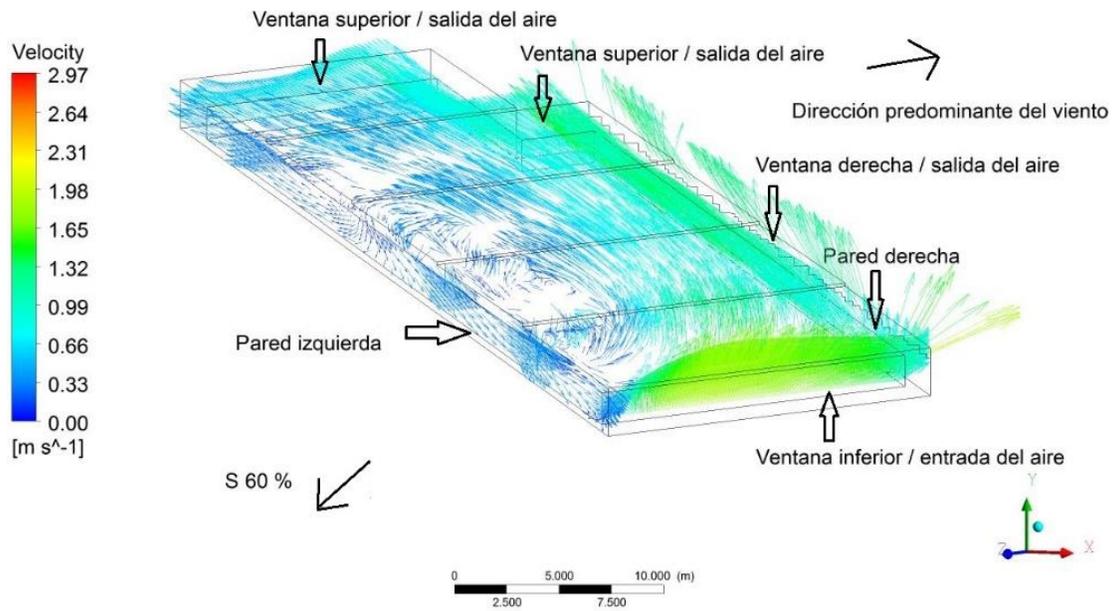


Figura B10. Distribución de la velocidad y dirección del viento dentro del invernadero para el caso IIIA.

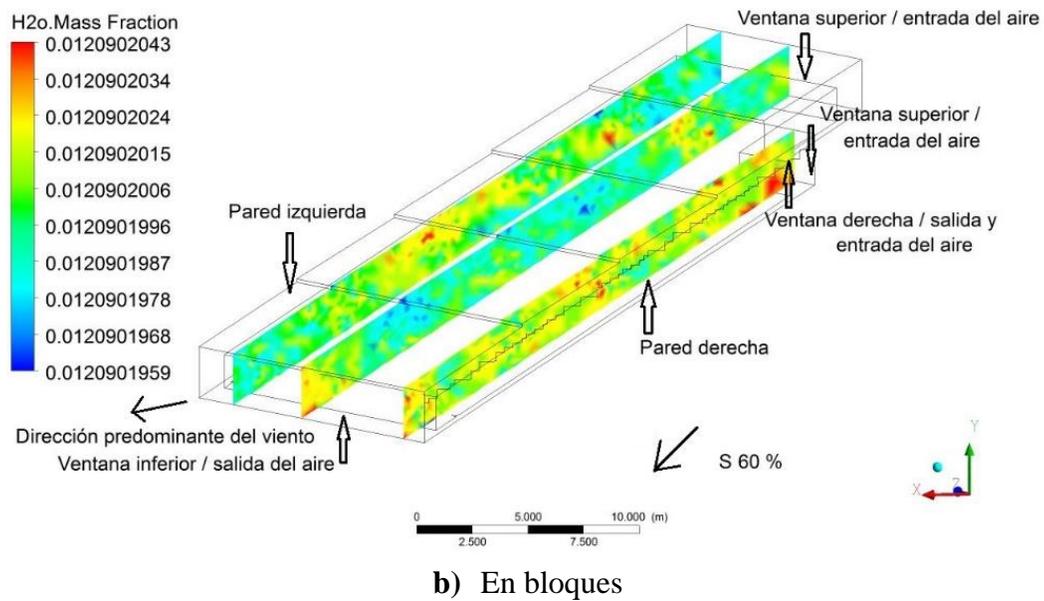
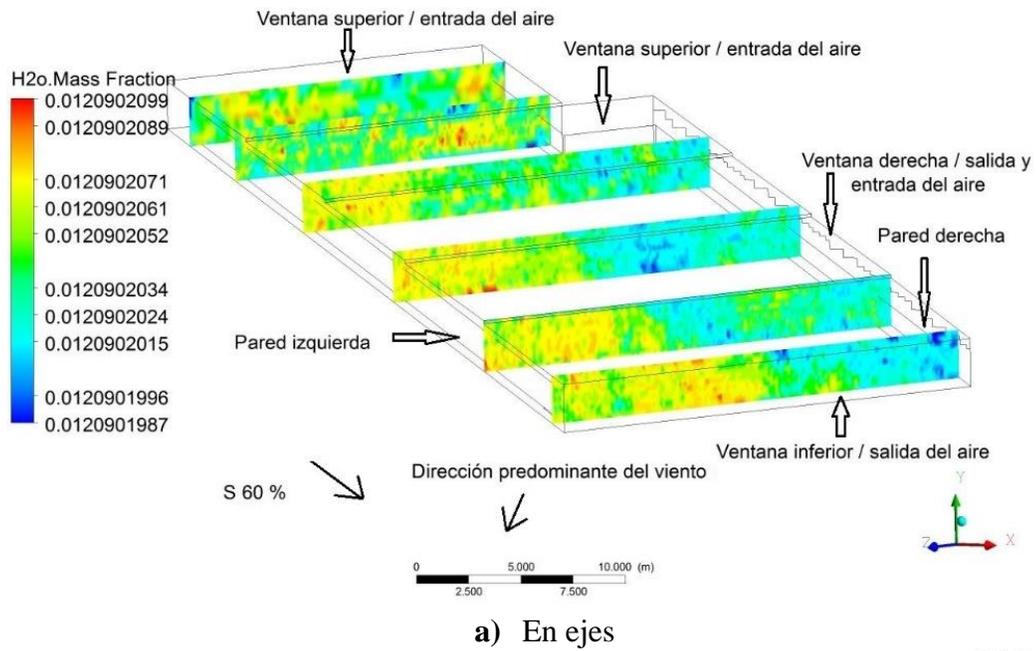


Figura B11. Distribución de la masa de fracción de agua simulada en los a) ejes y b) bloques para el caso IIIB.

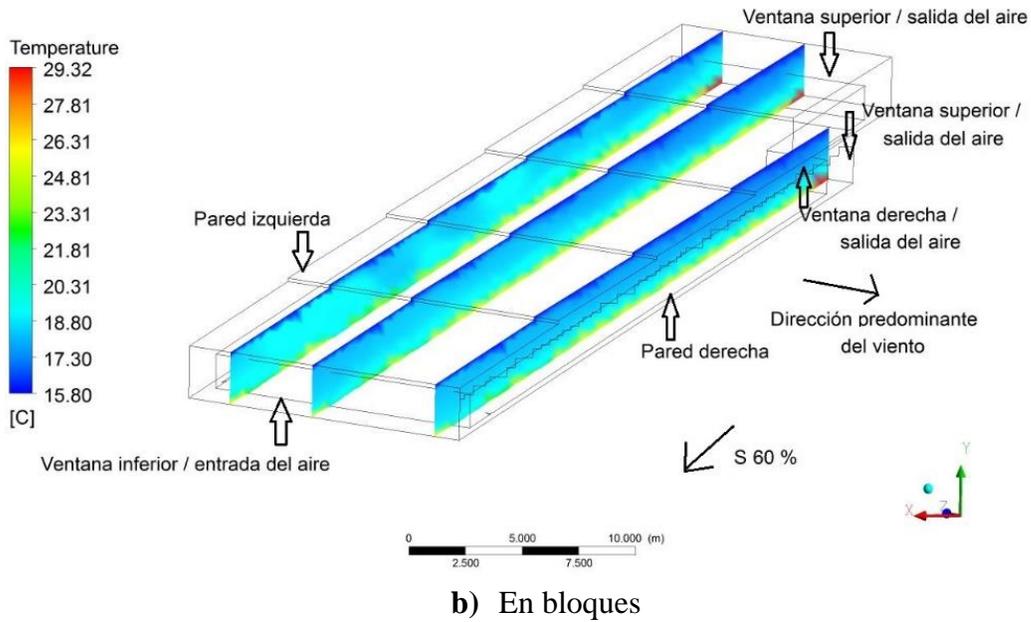
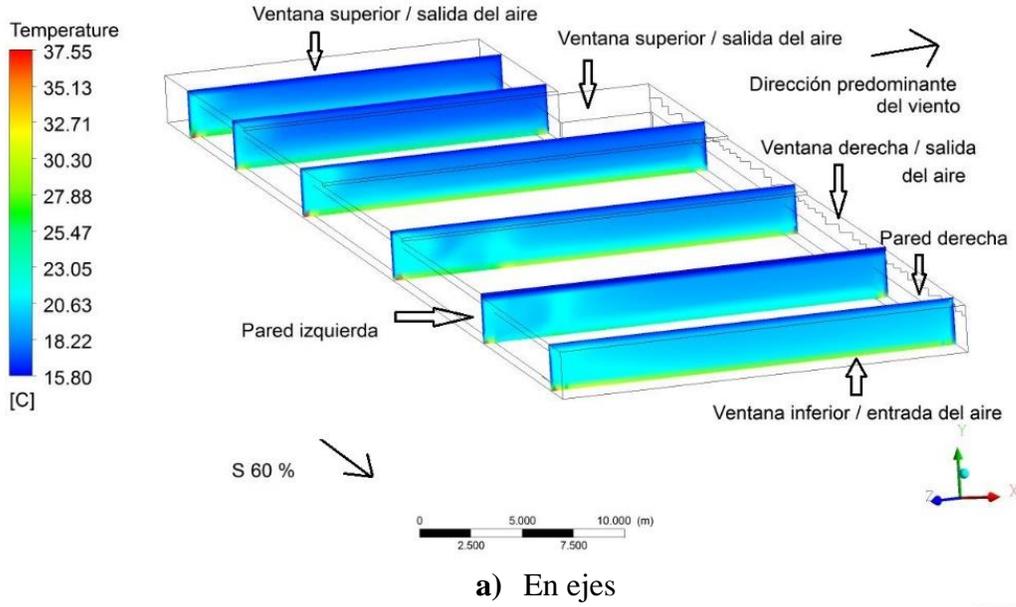


Figura B12. Distribución de la temperatura simulada en los a) ejes y b) bloques para el caso IVA.

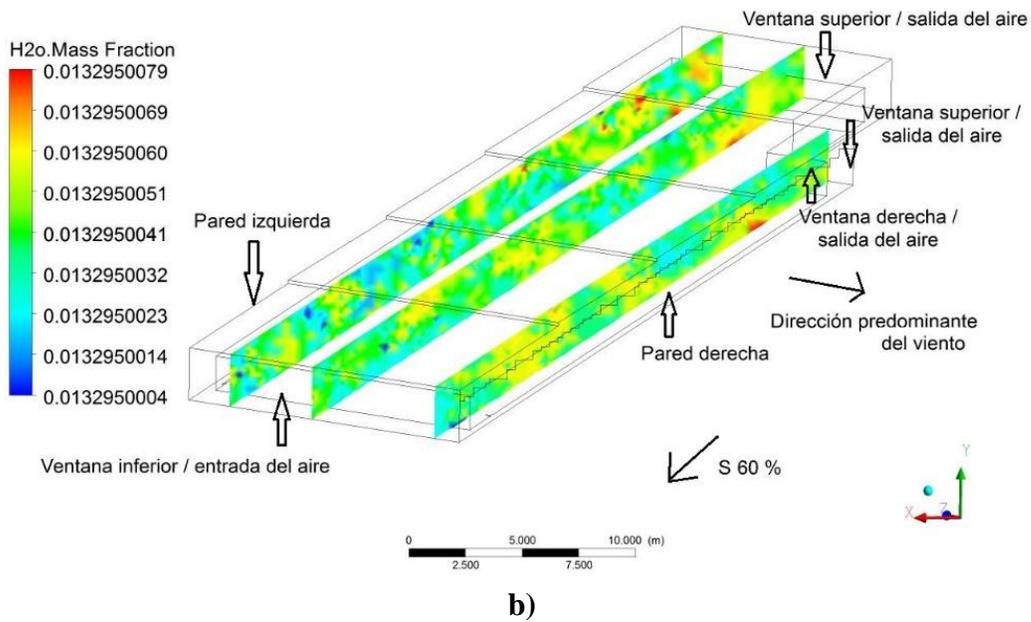
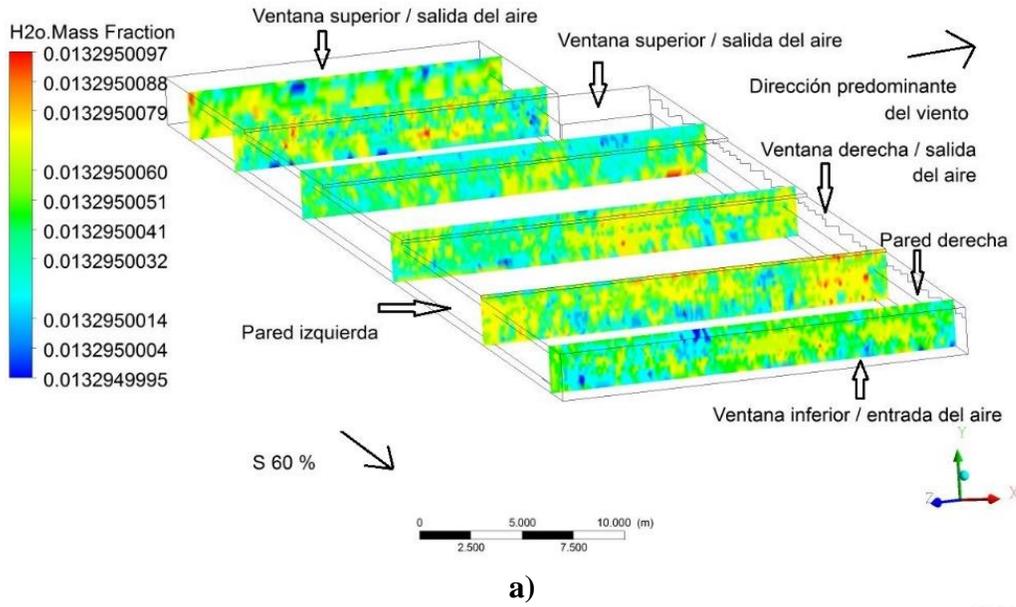


Figura B13. Distribución de la masa de fracción de agua simulada en los a) ejes y b) bloques para el caso IVA.

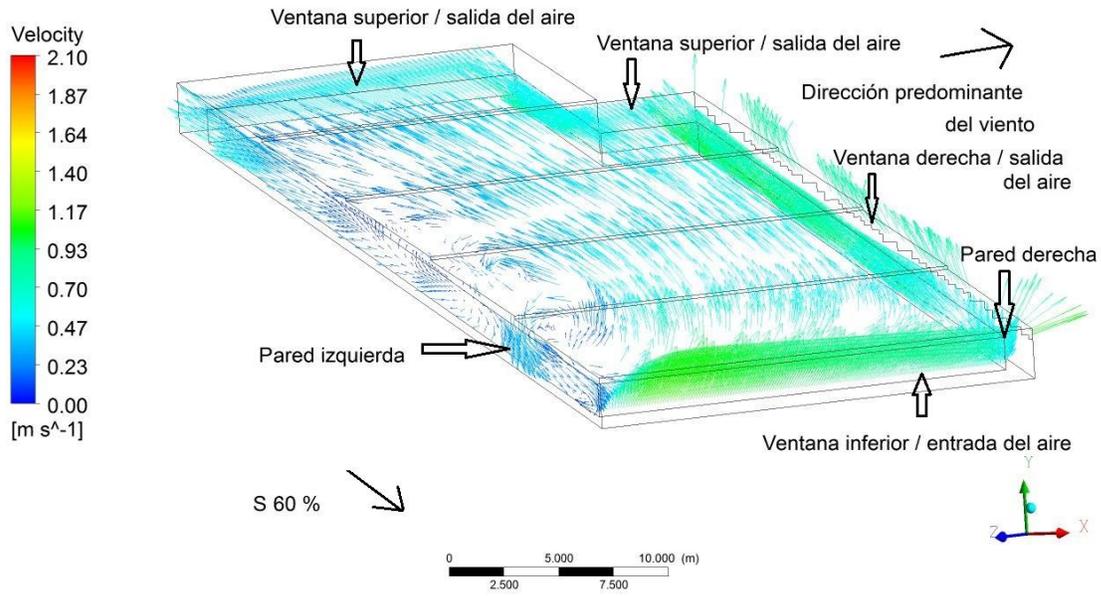


Figura B14. Distribución de la velocidad y dirección del viento dentro del invernadero para el caso IVA.