



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**Modelado y simulación del microclima en un invernadero
para el estudio de métodos de calefacción pasivos adaptables
a las zonas climáticas de Colombia**

Diana Cristina Díaz Guevara

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá, Colombia
2015

**Modelado y simulación del microclima en un invernadero
para el estudio de métodos de calefacción pasivos adaptables
a las zonas climáticas de Colombia**

Diana Cristina Díaz Guevara

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Doctor en Geociencias

Directora:
Ph.D. Nancy Liliana Villegas Bolaños

Línea de Investigación:
Meteorología
Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá, Colombia
2015

A Gabriela Lucía

Agradecimientos

Agradezco a Dios por estar siempre presente en mi experiencia de vida, a mi mamá por tanto amor, a Nicolas por el apoyo incondicional. A mis maestros especialmente a la Doctora Nancy Liliana Villegas Bolaños por su sabiduría y experiencia para guiar el presente trabajo. Al Doctor Carlos Bojacá por su asesoría y consejo. A Colciencias y Colfuturo por la coordinación del programa de crédito educativo para Estudios de Doctorado en Colombia. A la Universidad Nacional de Colombia por acogerme con calidez. A la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano por creer en mi trabajo.

Resumen

El aumento de eventos climáticos adversos a la agricultura y la incertidumbre en los pronósticos de su ocurrencia son situaciones que afectan la planeación y manejo de los proyectos agrícolas. El uso de invernaderos surge como una alternativa para afrontar las condiciones climáticas desfavorables y tener mayor control del medio que rodea el cultivo. Sin embargo, las estructuras más utilizadas en Colombia no cumplen a cabalidad con su objetivo debido a que son aún vulnerables a la alta variabilidad del clima dada por la altitud y procesos estacionales e intraestacionales. El presente trabajo abarca cuatro aspectos que ayudan a mejorar el funcionamiento de un invernadero tradicional colombiano.

El primero es el conocimiento de las características del clima exterior: Se analizaron los factores que inciden en el clima del país con el fin de conocer los procesos predominantes en las diferentes escalas espacio-temporales de variabilidad. Seguidamente, se describió la climatología para las zonas con mayor producción agrícola bajo cubierta teniendo en cuenta la regionalización obtenida del análisis de cluster.

El segundo es el modelado de la dinámica del microclima: Se implementó un modelo matemático del microclima interior en función del clima exterior. El Modelo consistió en un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales planteadas para la temperatura del aire, suelo, cubierta y cultivo en términos de la radiación de energía y los flujos de calor sensible y latente. La presión de vapor y la concentración de CO₂ también fueron considerados. El modelo, programado en lenguaje R y solucionado con la librería deSolve, fue calibrado y validado en tres casos, un invernadero a escala completamente cerrado, uno tipo Richel con ventilación cenital y uno tradicional con ventilación lateral y cenital. Se consideraron como condiciones de entrada al índice de área foliar, radiación global externa, velocidad del viento, humedad relativa, temperatura del aire y temperatura de las capas del suelo.

El tercer aspecto es la simulación y predicción del desempeño climático del invernadero bajo diferentes condiciones del clima: Se utilizó datos horarios de once estaciones automáticas durante las temporadas húmeda y seca ubicadas entre los 311 y 2610 msnm, con temperaturas medias entre 15 y 26^oC y régimen de precipitación bimodal

y monomodal. Se simuló el microclima bajo ambiente frío, templado y cálido considerando un invernadero de 5670 m² con ventilación natural lateral, cenital y presencia de cultivo. Se obtuvo mediante la simulación que, en zonas de clima frío las épocas más críticas para los agricultores son aquellas de temperaturas muy bajas durante la noche y la madrugada. Se evidenció también que durante el día pueden verse expuestos a temperaturas fuera de los rangos óptimos para las especies como hortalizas y flores. Se concluye que en estos lugares el invernadero tradicional es insuficiente para mantener el cultivo protegido debido a que las temperaturas dentro y fuera llegan a ser iguales o en el peor de los casos hay inversión térmica. Se encontró que en zonas de clima templado aunque el invernadero tradicional logra mantener las temperaturas en valores ideales durante el día, en la noche la temperatura puede continuar siendo baja. Finalmente el cuarto aspecto es la proyección de estrategias pasivas: Se simularon métodos pasivos en escenarios fríos que consistieron en la disminución del área de ventilación lateral, cambio de las propiedades del material de cubierta, inclusión de pantallas térmicas y también el efecto de un sistema de almacenamiento de energía mediante mangas de agua.

Se obtuvo que la mejor estrategia para los casos en clima frío es el cambio en las propiedades de la cubierta, garantizando una ganancia térmica tanto en el día como en la noche. Se encontró que la inclusión de la pantalla térmica también ofrece buenos resultados para mejorar la temperatura nocturna siendo la recomendada para las zonas de clima templado. Se evidenció que la disminución de las áreas laterales y el aumento de la altura del invernadero no ofrecen un cambio significativo en la temperatura. Se evaluaron múltiples opciones mediante el modelo de microclima, resaltando la posibilidad de estudiar estrategias como base para la elección del prototipo de invernadero más adecuado según la posición geográfica. Se aportó conocimiento relacionado con el modelado del microclima al implementar por primera vez en Colombia el sistema de ecuaciones en un lenguaje de código abierto integrando los resultados de índice de área foliar y temperatura de las capas del suelo como condiciones de entrada para simular todo el ciclo de producción.

Palabras clave: Agrometeorología, Microclima, Modelado y Simulación, Sistemas de calefacción pasivos..

Abstract

The planning and handle of agricultural activities have been affected by an increasing number of adverse climate event and the inaccuracy on the forecast of such events. The use of greenhouses arise as an alternative to face the unfavourable climate conditions and also to get a better control in the surrounding environment of the crop. However, most of the greenhouses structures used in Colombia have not the optimal performance because they are still vulnerable to the altitude, the high seasonal and intra-seasonal climate variability of the country. This thesis covers four topics which will help to improve the traditional Colombian greenhouse working.

The first one is to study the main outdoor climate characteristic: it was studied the incising factors in the climate of the country in order to know the overriding processes on the different space-time scale of variability. It also was described the climate on the leading locations with higher production crop using the greenhouses and using the zonal cluster analysis.

The second one is the model of the micro-climate dynamics: it was used a mathematical model of the indoor climate with respect to the outdoor climate. The model consists of a set of non-linear differential equations formulated for air, soil, canopy and cover temperatures in terms of radiation, sensible and latent heat flux densities. Also the vapor pressure and CO₂ concentration are considered. The model was chosen because it predicts the greenhouse air temperature with sufficient accuracy for different greenhouse designs and external climates and it was translated into the *R* programming language and equations were solved with the *deSolve library*. The model was calibrated and validated in three different settings, a fully closed scale greenhouse, a Richel type greenhouse with zenith ventilation and a traditional one with zenith and lateral ventilation.

The third topic is the simulation and forecasting of the climate performance in a greenhouse for different climate conditions: it was used hourly data from eleven automatic weather stations recording information during both tropical wet and dry seasons. The stations are situated between 311 and 2610 masl with mean temperatures between 10^oC and 26^oC, and bimodal and unimodal rainfall regimes. The thermal behaviour was studied under cold, warm and temperate climate conditions. The structure used had roof and sidewall ventilation ventilation and presence of a tomato crop. The simulations showed that in cold climate locations the more critical

periods for the agricultural activity are those characterized by very low temperature in the night and dawn. It is also possible to note that, in those places and for specific type of crops, there are not optimal temperature ranges during the day. For those locations, the traditional greenhouses are not enough to protect the crop from adverse climate conditions as consequence of equal indoor-outdoor low temperature or thermal inversion process in the worst of the cases. For temperate climate locations, the traditional greenhouses yield optimal temperature ranges in the day, but in the night it is possible to get low temperature.

Finally, the fourth topic is the projection of passive strategies: it was simulated some passive methods in cold locations, such methods consisted by decreasing the area of sidewall ventilation, changing the properties of the cover material, the inclusion of thermal screen, and also the effect of an energy storage system by water tubes inside the structure.

The best strategy obtained for the cold climate cases is given by the change of the properties of the cover material which yield a thermal profit in the day and in the night. For the temperate climate locations, the best strategy to improve night temperature is the use of thermal screen. On the other hand, the increasing height of the greenhouses structure and the decreasing area of sidewall ventilation are not enough to get a meaningful temperature changes.

Several options were evaluated by the micro-climate model standing out the suitable greenhouse structure according to the geographic location. The use for the first time of such mathematical model produced new knowledge in the branch of greenhouse micro-climate modelling in Colombia.

Keywords: Agrometeorology, Microclimate, Greenhouses, Simulation models, Passive heating systems

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Abstract	X
Lista de símbolos	XXI
1. Introducción	1
2. Climatología de las zonas con mayor producción bajo invernadero en Colombia	7
2.1. Antecedentes sobre el estudio del clima en Colombia	7
2.1.1. Cambio climático en Colombia: evidencias y consecuencias . . .	9
2.1.2. Fenómenos asociados con la variabilidad interanual del clima en Colombia	13
2.1.3. Migración de la ZCIT sobre Colombia y su rol en la variabilidad estacional	15
2.1.4. Influencia de procesos de gran escala y mesoescala en el estado del tiempo en Colombia	16
2.2. Regionalización de las áreas con mayor producción en invernadero por medio del análisis de clúster de la precipitación, humedad relativa, brillo solar y altitud	20
2.3. Climatología de las regiones delimitadas con el análisis de clúster . . .	26
2.4. Conclusiones	38
3. Modelado y simulación del microclima de un invernadero	41
3.1. Descripción del modelo del microclima del invernadero	43
3.1.1. Flujos de masa y energía de un invernadero	43

3.1.2. Sistema de ecuaciones	47
3.2. Simulación de la temperatura del aire y presión de vapor al interior de un invernadero a escala, Richel y tradicional	65
3.3. Validación de la simulación	71
3.3.1. Caso I: Invernadero a escala	71
3.3.2. Caso II: Invernadero Richel	74
3.3.3. Caso III: Invernadero tradicional	78
3.4. Conclusiones	92
4. Desempeño climático del invernadero tradicional en Colombia	97
4.1. Importancia de las variables climáticas en cultivos protegidos	97
4.2. Estudios sobre invernaderos en Colombia	100
4.3. Selección de la información de entrada al MMI	102
4.4. Comportamiento de un invernadero tradicional bajo diferentes condiciones atmosféricas	105
4.5. Conclusiones	159
5. Proyección de estrategias pasivas adaptables a invernaderos tradicionales en diferentes zonas climáticas de Colombia	161
5.1. Elección de las estrategias pasivas a simular	163
5.2. Simulación de estrategias pasivas adaptables a los invernaderos tradicionales	170
5.3. Conclusiones	184
6. Conclusiones	187
A. Anexo: Estaciones meteorológicas seleccionadas para el análisis de los aspectos climáticos	190
B. Anexo: Climogramas de estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis de cluster	200
B.1. Estaciones de la región central y suroccidental	201
B.2. Estaciones de la región noroccidental	214
B.3. Estaciones de la región santanderes	217
B.4. Estaciones de la región suroriental	218

Bibliografía

Lista de Figuras

1-1. Países con mayor uso de invernaderos en el mundo	3
1-2. Producción de tomate bajo invernadero en Colombia	4
1-3. Producción de tomate bajo invernadero por departamento	5
2-1. Escala espacial de fenómenos climáticos de relevancia para Colombia	8
2-2. Escala espacial de fenómenos atmosféricos de relevancia para Colombia	9
2-3. Definiciones del cambio climático	10
2-4. Fenómenos del sistema climático y región de influencia	21
2-5. Estaciones utilizadas para el análisis de clúster	25
2-6. Distribución de los grupos obtenidos en el análisis de clúster	27
2-7. Climogramas representativos de la zona central y suroccidental	29
2-8. Climogramas representativos de la zona noroccidental	31
2-9. Climogramas representativos de la zona de los santanderes	32
2-10. Climogramas representativos de la zona cuenca del catatumbo	33
2-11. Climogramas representativos de la zona piedemonte llanero	35
2-12. Procesos atmosféricos con mayor influencia sobre los conglomerados obtenidos en el análisis de clúster. Fuente: Esta investigación	36
3-1. Elementos básicos que conforman el invernadero	44
3-2. Intercambios de calor sensible y latente entre los elementos	46
3-3. Flujos de radiación entre los elementos del invernadero	46
3-4. Intercambios de MV entre los elementos del invernadero	47
3-5. Ubicación invernaderos usados para la validación	66
3-6. Invernadero pequeño (IP) utilizado en la validación.	67
3-7. Invernadero Richel (IR) usado en la validación.	67
3-8. Variables registradas al exterior del invernadero IP	72
3-9. Simulación de T_{ai} en el invernadero IP	73
3-10. Variables registradas al exterior del invernadero IR	75

3-11. Simulación de T en el invernadero IR	76
3-12. Simulación de PV en el invernadero IR	77
3-13. Variables registradas al exterior del invernadero IT	79
3-14. Simulación de T con el invernadero IT primer mes	81
3-15. Simulación de T con el invernadero IT segundo mes	82
3-16. Simulación de T con el invernadero IT cuarto mes	83
3-17. Simulación de T con el invernadero IT quinto mes	84
3-18. Simulación de PV con el invernadero IT primer mes	86
3-19. Simulación de PV con el invernadero IT segundo mes	87
3-20. Simulación de la PV con el invernadero IT cuarto mes	88
3-21. Simulación de PV con el invernadero IT quinto mes	89
3-22. Comparación gráfica de datos de T reales y simulados	90
3-23. Comparación gráfica de datos de PV reales y simulados	90
4-1. Estaciones automáticas con la información de entrada al MMI	104
4-2. Datos climáticos estación Socha	106
4-3. Datos climáticos estación Boyera	107
4-4. Simulación de T para la estación Socha	109
4-5. Ganancia térmica y DPV medio del IT en Socha	110
4-6. DPV estimado para la estación Socha	111
4-7. Simulación de T para la estación Boyera	112
4-8. DPV estimado para la estación Boyera	113
4-9. Ganancia térmica y DPV medio del IT en Boyera	114
4-10. Datos climáticos estación Emas	116
4-11. Datos climáticos estación Villamaría	117
4-12. Simulación de T para la estación Emas	118
4-13. DPV estimado para la estación Emas	119
4-14. Ganancia térmica y DPV medio del IT en Emas	120
4-15. Simulación de T para la estación Villamaría	122
4-16. DPV estimado para la estación Villamaría	123
4-17. Ganancia térmica y DPV medio del IT en Villamaría	124
4-18. Datos climáticos estación Armenia	125
4-19. Datos climáticos estación Marsella	126
4-20. Simulación de T para la estación Armenia	128
4-21. DPV estimado para la estación Armenia	129

4-22. Ganancia térmica del IT con datos de la estación Armenia	130
4-23. Simulación de T para la estación Marsella	131
4-24. DVP para la estación Marsella	132
4-25. Ganancia térmica del IT con datos de la estación Marsella	133
4-26. Datos climáticos estación Aragón	134
4-27. Simulación de T para la estación Aragón	136
4-28. DPV estimado para la estación Aragón	137
4-29. Ganancia térmica y DPV medio del IT en estación Aragón	138
4-30. Datos climáticos estación Selva	139
4-31. Simulación de T para la estación Selva	140
4-32. DPV estimado para la estación Selva	141
4-33. Ganancia térmica y DPV medio del IT en Selva	142
4-34. Datos climáticos estación Pamplona	144
4-35. Simulación de T para la estación Pamplona	146
4-36. DPV estimado para la estación Pamplona	147
4-37. Ganancia térmica del IT con datos de la estación Pamplona	148
4-38. Datos climáticos estación Universidad Francisco de Paula	149
4-39. Datos de entrada estación Villavicencio	150
4-40. Simulación de T para la estación Villavicencio	152
4-41. Déficit de PV estimado para la estación Villavicencio	153
4-42. Ganancia térmica del IT con datos de la estación Villavicencio	154
4-43. Ganancia térmica lograda en zonas de clima frío	156
4-44. Ganancia térmica lograda en zonas de clima templado	157
4-45. Ganancia térmica en zonas de clima cálido	158
5-1. Resultados de las estrategias pasivas evaluadas en las cuatro semanas de los escenarios Socha, Boyera, Aragón y Pamplona	167
5-2. Resultados de las estrategias pasivas evaluadas en las cuatro semanas de los escenarios Socha, Boyera, Aragón y Pamplona	167
5-3. Cambio de la ganancia térmica con las estrategias pasivas en Socha	171
5-4. Cambio en el DPV con las estrategias pasivas en Socha	172
5-5. Cambio de la ganancia térmica con las estrategias pasivas en Boyera	173
5-6. Cambio en el DPV con las estrategias pasivas en Boyera	174
5-7. Cambio de la ganancia térmica con las estrategias pasivas en Aragón	175
5-8. Cambio en el DPV con las estrategias pasivas en Aragón	176

5-9. Cambio de la ganancia térmica con las estrategias pasivas en Pamplona	177
5-10. Cambio en el DPV con las estrategias pasivas en Pamplona	178
5-11. Cambio de la ganancia térmica con las estrategias pasivas en Emas . .	180
5-12. Cambio en el DPV con las estrategias pasivas en Emas	181
5-13. Cambio de la ganancia térmica con las estrategias pasivas en Villamaría	182
5-14. Cambio en el DPV con las estrategias pasivas en Villamaría	183
5-15. Cambio de la ganancia térmica con las estrategias pasivas en Selva . .	184
5-16. Cambio en el DPV con las estrategias pasivas en Selva	185

Lista de Tablas

3-1. Modelos del microclima de un invernadero consultados	42
3-2. Elementos básicos y opcionales en un invernadero	44
3-3. Variables de estado de un invernadero básico	45
3-4. Condiciones de entrada que influyen sobre el microclima del invernadero	45
3-5. Flujos de energía y masa considerandos en el invernadero	48
3-9. Dimensiones de los invernaderos usados en la validación	68
3-10. Medidas de desviación por variable por escenario de validación	85
3-6. Parámetros constantes	94
3-7. Parámetros que dependen de cada tipo de invernadero	95
3-8. Parámetros que dependen de cada tipo de invernadero	96
4-1. Niveles térmicos de especies cultivadas bajo invernadero	100
4-2. Estaciones automáticas con la información de entrada al MMI	103
5-1. Nuevos parámetros de la cubierta	164
5-2. Propiedades físicas de la pantalla térmica	166
5-3. Add caption	170
A-1. Estaciones meteorológicas	190

Lista de símbolos

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
I	Radiación Global	W m^{-2}
CO	Concentración de CO_2	mg m^{-3}
L	Calor latente	W m^{-2}
MV	Flujo de vapor de agua	$\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$
PV	Presión de vapor	Pa
R	Flujo de radiación infraroja	W m^{-2}
S	Calor sensible	W m^{-2}
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$

Subíndices

Subíndice	Término
ai	Aire inferior o bajo la pantalla térmica
as	Aire superior o sobre la pantalla térmica
c	cubierta incluyendo paredes y techo del invernadero
cal	sistema de calefacción o caldera
co	Equipo para agregar CO ₂ al ambiente
ex	exterior
fo	follaje o conjunto de plantas en crecimiento
Glob	Global
mec	Sistema para disminuir temperatura
neb	Sistema para elevar la humedad
pan	Sistema para control de humedad y temperatura
pa	Sistema para almacenar calor del suelo
ps	Pantalla externa para controlar ingreso de radiación
psp	Cubrimientos aplicados para elevar el albedo
pt	Pantalla interna para controlar niveles de radiación
s	suelo o sustrato del cultivo
s_i	i-ésima capa del suelo
tub	Sistema utilizado para elevar temperatura
v	viento
v_c	Ventanas cenitales
vent	Ventiladores
v_{lat}	Ventanas laterales

Abreviaturas

Abreviatura	Término
IAF	Índice de área foliar
IP	Invernadero pequeño
IR	Invernadero Richel
IT	Invernadero tradicional
RFA	Radiación fotosintéticamente activa
RIC	Radiación Infraroja cercana
RIL	Radiación Infraroja lejana

1. Introducción

La ocurrencia e intensidad de eventos adversos a la agricultura como las heladas, lluvias torrenciales, vientos fuertes, granizadas, inundaciones y deslizamientos esta aumentando (IPCC, 2001; Davis *et al.*, 2015). Datos de la Food and Agriculture Organization (FAO) indican por ejemplo que la frecuencia de este tipo de sucesos a nivel mundial pasó de 195 por año en el periodo 1987-1998 a 365 durante 2000-2006 (FAO, 2008). El informe de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) sobre el clima mundial durante 2001-2010 también concluye que este decenio registró mayor número de eventos atípicos que cualquier otro en los últimos 100 años (OMM, 2013). Estudios como los de Rivington *et al.* (2013), Vermeulen *et al.* (2012) y Travis y Sumner (2012) mencionan además que el impacto de las condiciones desfavorables sobre los cultivos es mayor en los países cercanos a la zona ecuatorial.

El sector agrícola de los países en esta zona es afectado además por la gran incertidumbre en la predicción tanto climática como meteorológica, la cual es ocasionada en gran parte por la poca disponibilidad de datos que alimenten los modelos de pronóstico (Hansen, 2002; Ramirez-Villegas y Challinor, 2012). Un ejemplo canónico en el plazo interanual es la predicción del fenómeno de El Niño Oscilación Sur (ENOS), el cual no tiene intensidad ni periodicidad definida, por lo que anticipar su ocurrencia es complejo. En el mediano plazo está el pronóstico de bajas presiones generadoras de mal tiempo y en el corto plazo la predicción de tormentas fuertes o eventos como los mencionados al inicio.

Ante a este panorama un número creciente de agricultores alrededor del mundo ha optado por sembrar bajo invernadero (Fitz-Rodríguez *et al.*, 2010; Panwar *et al.*, 2011). Los invernaderos son una alternativa viable para proteger los cultivos de condiciones meteorológicas adversas o de un clima desfavorable para una especie dada. El uso de invernaderos también está asociado a una menor incidencia de plagas y por tanto a una disminución en la utilización de pesticidas y preservación de la estructu-

ra del suelo. Una de las mayores ventajas que ofrece el invernadero es la posibilidad de controlar el microclima para mantener el cultivo en un ambiente ideal para su crecimiento y desarrollo. En pocas palabras la implementación adecuada de los invernaderos conduce a una mejor y mayor producción incluso fuera de las temporadas tradicionales.

Los invernaderos más sencillos constan tan solo de la cubierta con ventilación natural controlada de forma manual. Los más completos incorporan sistemas automatizados de calefacción y refrigeración, pantallas térmicas o de sombreado, entre otros elementos. Los sistemas para controlar el microclima interior pueden ser activos o pasivos. Los activos son los que requieren energía convencional para su funcionamiento mientras los pasivos son todos aquellos que no dependen del uso de energía no renovable. En la actualidad las investigaciones en control climático apuntan hacia la optimización del consumo energético del invernadero planteando metodologías que disminuyan el uso de los sistemas activos y promuevan el de los pasivos (Panwar *et al.*, 2011; Ntinis, 2014). Además está tomando auge la concepción del invernadero como un sistema capaz de almacenar energía solar durante el día para reutilizarla en la noche o durante el verano para gastarla en invierno.

El uso de los invernaderos se ha expandido por todo el mundo y el número de hectáreas continúa en rápido aumento. La mayor área de producción bajo invernadero está distribuida en países de Asia y Europa occidental, en el 2008 el total estimado fue de 452500 ha y 169000 ha respectivamente. En Oriente Medio el valor fue de 41000 ha seguidos por África y Europa Oriental con 27600 ha y 26800 ha en cada caso. En Norteamérica el área fue menor con solo 11200 ha y en Centroamérica y Sudamérica fue de 12500 ha solamente (Giacomelli *et al.*, 2008).

En la figura **1-1** son presentados datos del área cultivada bajo invernadero en los países donde el uso de esta modalidad ha crecido notablemente en las últimas décadas. China es el país con mayor área cultivada bajo cubierta, le siguen aunque muy de lejos países como Korea, España, Japón, Turquía, Italia, México, Holanda, Francia, EE.UU y Colombia.

En Colombia el uso de los invernaderos inició en la década de los sesenta y han sido empleados principalmente en el cultivo de flores y de tomate (Boshell, 2009;

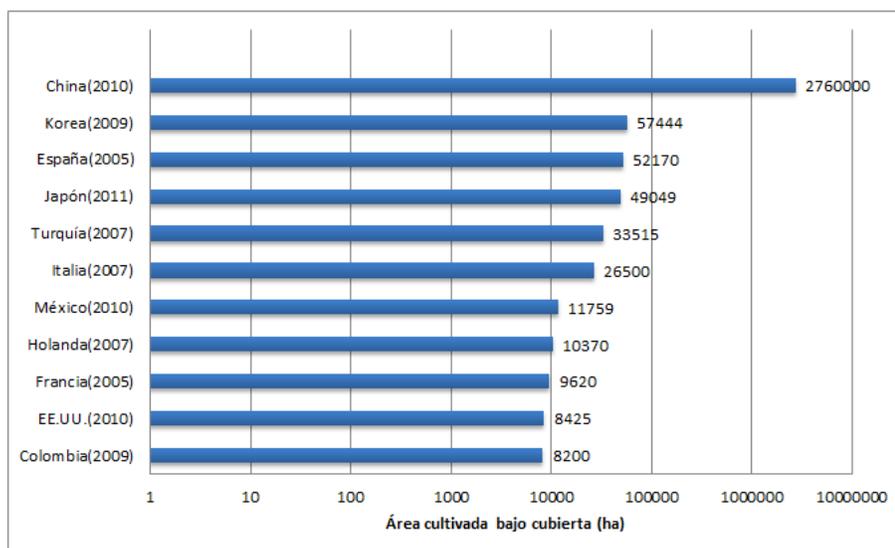


Figura 1-1.: Países con mayor uso de invernaderos. La cifra del área cultivada corresponde al año entre paréntesis. En el caso de Colombia la información solo incluye cultivos de flores (7000 ha) y tomate (1200ha). Fuente de la información: Giacomelli *et al.* (2008) y Agronet (<http://www.agronet.gov.co>)

Acuña, 2009a). En la figura **1-2** son presentados datos sobre el área cosechada y la producción de tomate bajo invernadero entre el 2006 y 2013 en Colombia. La información pertenece a Agronet (<http://www.agronet.gov.co>), vinculado al Ministerio de Agricultura. La gráfica indica un crecimiento sostenido en ambas variables. Los departamentos con mayor producción y área cosechada son Antioquia, Boyacá, Santander, Cundinamarca, Caldas, Risaralda, Quindio, Cauca y Nariño. La figura **1-3** muestra las cifras para cada departamento durante el mismo periodo 2006-2013. En el caso de Norte Santander, Valle del Cauca y Meta solo hay datos para uno o dos años y con producciones por debajo de 1500 Ton/ha, razón por la que no se muestran en la figura.

En Colombia los invernaderos tradicionales en general son de baja tecnología y el nivel de vulnerabilidad del cultivo ante los fenómenos adversos todavía es considerable (Boshell, 2009; Acuña, 2009a; Bojaca *et al.*, 2009, 2010; Bojaca y Schrevens, 2010). La mayoría carecen de control climático exponiendo el cultivo a condiciones no óptimas para su crecimiento y desarrollo. En conclusión aunque el invernadero es

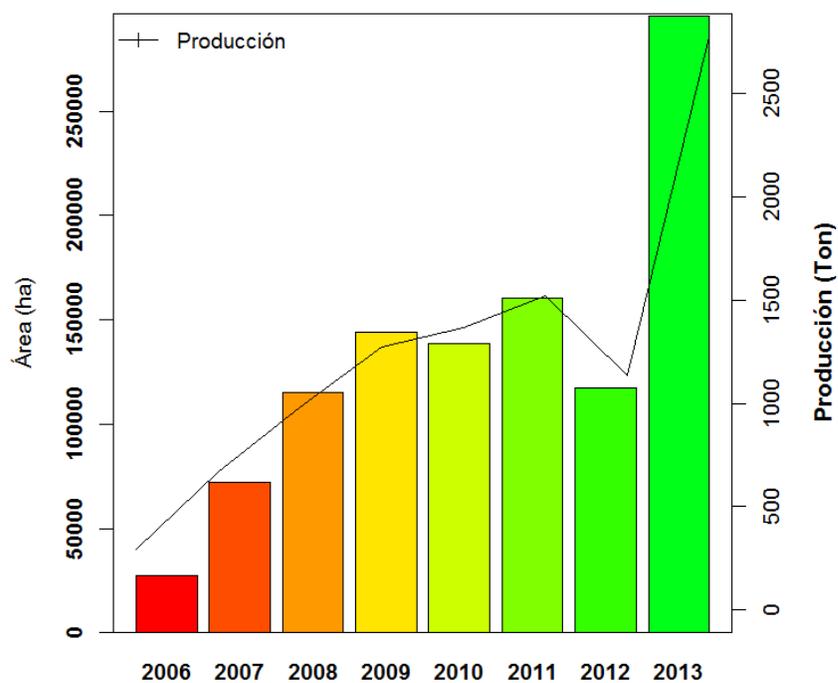


Figura 1-2.: Área cultivada y producción de tomate bajo invernadero en Colombia para el periodo 2006-2013. Fuente de la información: Agronet (<http://www.agronet.gov.co/agronetweb1>)

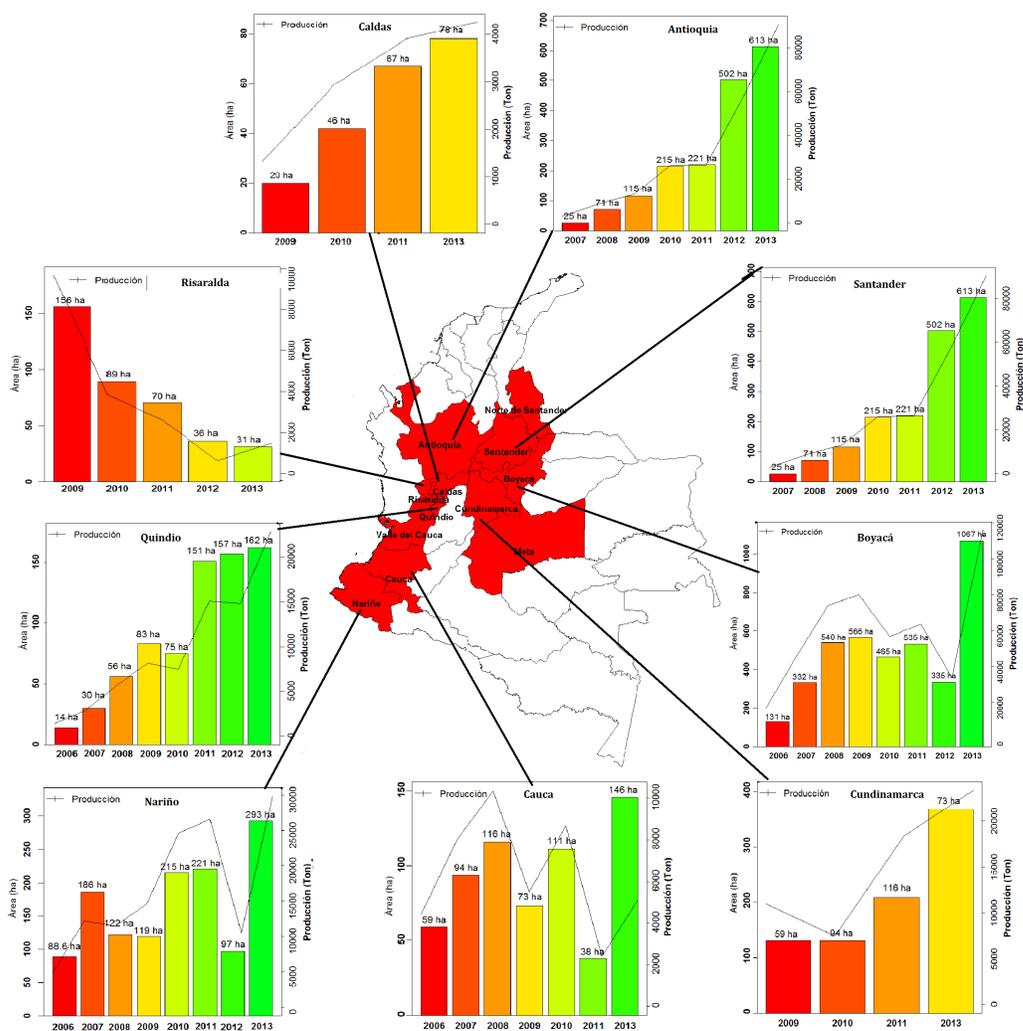


Figura 1-3. Área cultivada y producción de tomate bajo invernadero de los departamentos con mayor uso de esta modalidad en Colombia para el periodo 2006-2013. Fuente de la información: Agronet (<http://www.agronet.gov.co/agronetweb1>)

usado para afrontar condiciones climáticas desfavorables en Colombia no cumplen a cabalidad con el objetivo y deben ser mejorados.

El presente trabajo surgió como una respuesta a la necesidad de generar conocimiento sobre el comportamiento climático de los invernaderos en el país y para hacerlo se eligió el campo del modelado y la simulación de sistemas (MSS). El MSS es uno de los más utilizados en la actualidad para este tipo de investigaciones (Fitz-Rodríguez *et al.*, 2010; Rodríguez *et al.*, 2014). Adicionalmente se evaluaron sistemas pasivos porque son los más viables de implementar para la mayoría de los agricultores colombianos en las diferentes zonas climáticas del país.

Los resultados de la investigación fueron organizados en cuatro capítulos, cada uno siguiendo la estructura de un artículo científico, empezando por una parte introductoria, la presentación de la metodología, luego la descripción y discusión de los resultados obtenidos y finalmente las conclusiones. En el capítulo dos se presenta la climatología de las zonas con mayor producción bajo invernadero, la cual fue realizada mediante un análisis de clúster. El conocimiento de estos procesos fue importante para entender las condiciones climáticas y meteorológicas del área de estudio. En el tercer capítulo se presenta la descripción del modelo programado para simular el microclima del invernadero y los resultados de la validación para tres casos diferentes. En el cuarto capítulo se muestran las estimaciones del desempeño térmico obtenidas para un invernadero tradicional bajo diferentes condiciones externas. Finalmente en el quinto capítulo se encuentran las simulaciones hechas para analizar el efecto de estrategias pasivas especialmente en lugares con clima frío y templado. Los resultados de los análisis realizados en este trabajo son un insumo para quienes a diario trabajan con este tipo de estructuras y son un punto de partida para continuar con el desarrollo de software libre que facilite la automatización y modernización del sistema de cultivo bajo cubierta en el país.

2. Climatología de las zonas con mayor producción bajo invernadero en Colombia

2.1. Antecedentes sobre el estudio del clima en Colombia

El sistema climático (SC) es el conjunto conformado por la atmósfera, hidrósfera, litósfera, criósfera y biósfera cuyos elementos están en continua interacción. El estado del SC depende de la interacción entre los elementos que lo conforman, del forzamiento de factores externos como la radiación solar y los gases de efecto invernadero y de factores determinantes como los aspectos geográficos. Al estado del SC en un momento y lugar determinados es lo que en un sentido amplio se denomina clima. En un sentido más acotado el clima también es definido como la descripción estadística de las condiciones atmosféricas en términos de valores medios (IPCC, 2001).

En el caso de Colombia el clima está controlado por factores determinantes como la ubicación del país sobre el ecuador geográfico, por la cercanía con el océano Pacífico, el mar Caribe, la Amazonía y por la presencia de la cordillera de los Andes. La localización en la zona ecuatorial implica que las variables climáticas son controladas principalmente por la convergencia de los vientos alisios originados en las altas presiones subtropicales. La proximidad con los océanos y la Amazonía asegura un constante ingreso de humedad a la atmósfera y la presencia de los Andes favorece los procesos convectivos y la diversidad de climas en función de la altitud.

Los análisis estadísticos de la información climática, realizados por los autores citados

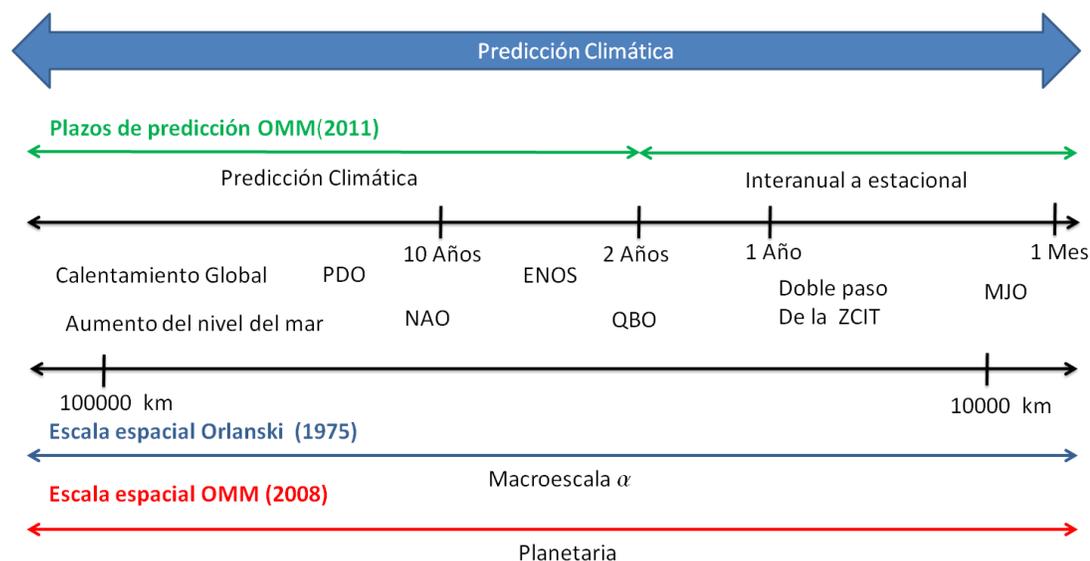


Figura 2-1.: Escala espacial y plazo de predicción climática al cual pertenecen algunos fenómenos de relevancia para Colombia. Fuente: Diagrama elaborado con base en la información de los documentos OMM (2008, 2011). PDO:Pacific Decadal Oscillation, NAO:North Atlantic Oscillation, ENOS: El Niño Oscilación Sur, QBO:Quasi-biennial oscillation, ZCIT:Zona de Convergencia Intertropical, MJO:Madden-Julian Oscillation

a lo largo del capítulo, han permitido identificar las normales climatológicas en cada región del país, así como los fenómenos que explican las fluctuaciones por encima o por debajo de dichas normales en las diferentes escalas temporales y espaciales. En las figuras 2-1 y 2-2 se presenta la ubicación espacial y el plazo de predicción al cual pertenecen los fenómenos de mayor relevancia para Colombia según las categorías de Orlanski (1975) y de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2008, 2011). En la sección 2.1.1 se mencionan los aspectos relacionados con el cambio climático. En la sección 2.1.2 son tratados los fenómenos asociados con la variabilidad interanual, en la sección 2.1.3 se describe la migración de la ZCIT y su rol en la variabilidad estacional y finalmente en la sección 2.1.4 los procesos de gran escala y mesoescala relacionados con el estado del tiempo atmosférico en Colombia.

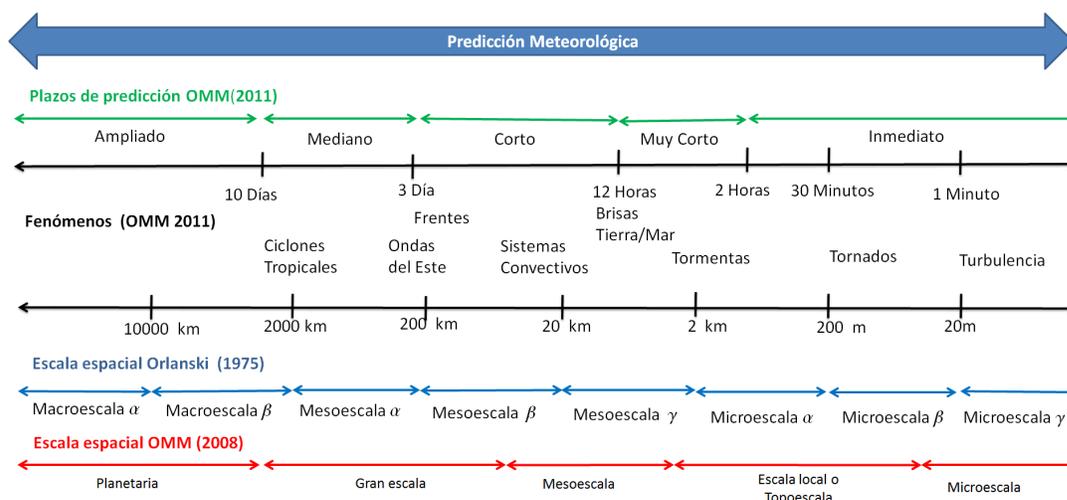


Figura 2-2.: Escala espacial y plazo de predicción meteorológica al cual pertenecen algunos fenómenos de relevancia para Colombia. Fuente: Diagrama elaborado con base en la información de los documentos OMM (2008, 2011)

2.1.1. Cambio climático en Colombia: evidencias y consecuencias

Los estudios paleoclimáticos confirman que el clima de la Tierra ha cambiado continuamente debido a procesos naturales, sin embargo, durante los últimos 30 años este proceso de transformación se ha acelerado comparado con los registrados en los últimos 100 años. El cambio es notable en el rápido aumento de la temperatura promedio de la atmósfera y el océano (IPCC, 2013). En la figura 2-3 se presentan las definiciones dadas por tres de las entidades con mayor autoridad en el tema, el enfoque en cada caso es ligeramente distinto. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la Naciones Unidas a través de la Convención Marco para el Cambio climático (CMNUCC) en sus definiciones enfatizan la responsabilidad del hombre en este proceso (OMM, 2013; CMNUCC, 1992). La definición del IPCC considera tanto los procesos naturales como antropogénicos, aunque en su último informe el (IPCC, 2013) reconoce una mayor responsabilidad a la actividad humana.

Los informes del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) sobre cambio climático (CC) en Colombia revelan las evidencias de esta rápida transformación y los escenarios climáticos más probables en los próximos decenios. Los

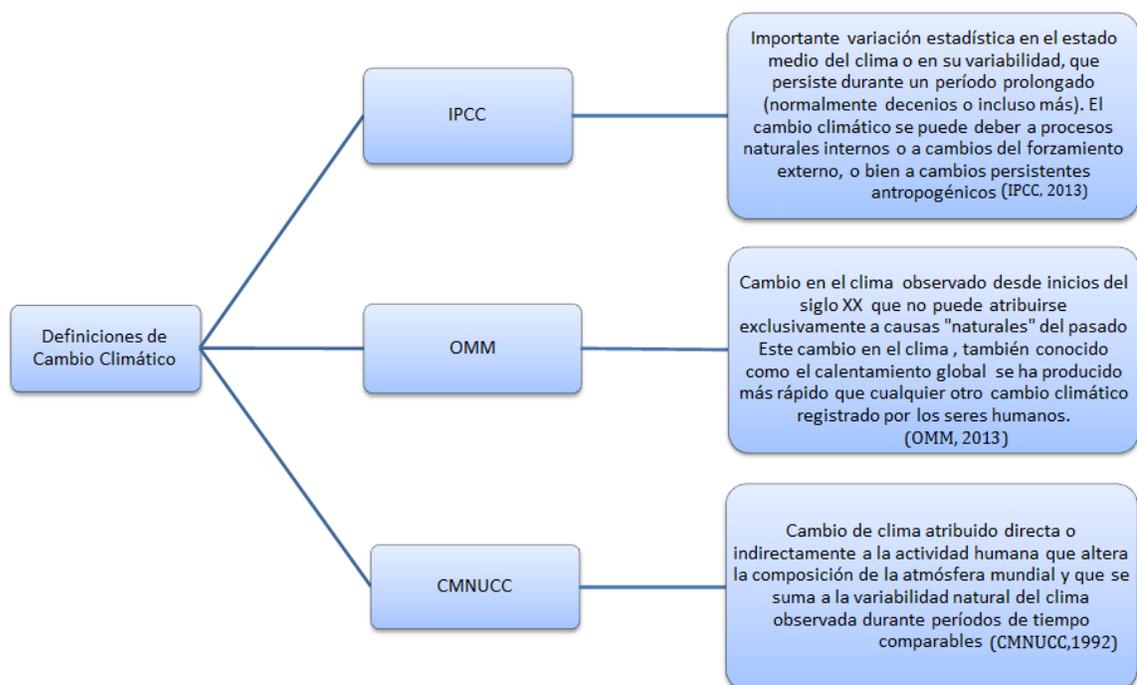


Figura 2-3.: Diferentes enfoques de la definición del cambio climático. Fuente: CMNUCC (1992); OMM (2013); IPCC (2013)

documentos más completos al respecto son los de Ruiz (2010), Mayorga *et al.* (2011), Armenta y Ruiz (2012) y Armenta *et al.* (2014) . Las estimaciones realizadas en estos trabajos revelan que el aumento de la temperatura media en Colombia durante 1971-2000 fue de $0.13^{\circ}\text{C}/\text{década}$, además que el ascenso del nivel del mar para el Caribe fue de $3.5\text{ mm}/\text{año}$ y para el Pacífico de $2.2\text{mm}/\text{año}$ (Ruiz, 2010). En cuanto a la reducción del área de glaciales se estima que oscila entre el 3 y 5 % cada año, en Poveda y Pineda (2009) se realiza un recuento histórico del retroceso de seis de estos sistemas ubicados en los andes colombianos.

Las evaluaciones de escenarios futuros realizadas mediante modelado y simulación muestran que la temperatura promedio del aire crecerá con respecto al mismo período 1971-2000 en 1.4°C para el 2011-2040, 2.4°C para 2041-2070 y 3.2°C para el 2071-2100. En cuanto a la precipitación las simulaciones revelan un descenso entre un 15 y 36 % para amplias zonas de las regiones Caribe y Andina e incrementos en el centro y norte de la Región Pacífica. Por otra parte la humedad relativa disminuiría especialmente en La Guajira, Cesar, Tolima y Huila (Ruiz, 2010; Armenta *et al.*, 2014). Parte de estos resultados también fueron confirmados por Pabón (2012), quien reevalúa las tendencias de la temperatura y precipitación en la segunda mitad del siglo XX y obtiene valores coherentes con los de Ruiz (2010).

Por otra parte los estudios realizados mediante indicadores de eventos extremos muestran disminución de los días de precipitaciones moderadas y fuertes para el centro de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Caldas, Meta, Tolima, Casanare y Putumayo y aumento en los departamentos de Amazonas, Bolívar, Chocó, Quindío, Risaralda, Santander, Sucre y Vichada. El número de días secos consecutivos en un año aumentará para el sur y centro de la cordillera occidental y gran parte de la región Andina, mientras que en el norte de Colombia la tendencia son más días húmedos consecutivos. En cuanto a las precipitaciones para el periodo 2011-2040, encontraron una tendencia hacia la disminución en Boyacá, oriente de Cundinamarca, norte del Valle del Cauca y Putumayo, sur de Antioquia, Valle del Alto Magdalena y en el occidente de Norte de Santander (Armenta y Ruiz, 2012). Más recientemente Palomino-Lemus *et al.* (2015) hacen una proyección de la precipitación en Colombia usando el Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 y nuevamente los resultados están de acuerdo con los expuestos por Ruiz (2010) , Armenta y Ruiz (2012), Armenta *et al.* (2014) y Pabón (2012). La concordancia entre estudios aumentan la

credibilidad sobre los escenarios climáticos que le esperan al país en los próximos decenios de continuar con la tendencia confirmada hasta el momento.

Los efectos del CC sobre el sector agrícola han sido revisados por Ramirez-Villegas y Challinor (2012) mediante los resultados de 17 Modelos de Circulación Global (MCG) encontrando que si no hay medidas de adaptación el 80 % de los cultivos será impactado de forma negativa en más del 60 % del área cultivada actualmente, entre los más afectados se encuentran productos exportables como el café, el cacao, el banano entre otras frutas. Dos casos de estudio específicos son presentados por Fernandez (2013) y García *et al.* (2014) quienes mediante modelado y simulación del cultivo estimaron que el aumento de temperatura trae como consecuencia la disminución del rendimiento en el caso de especies como el arroz, la papa y el maíz debido a estrés hídrico y aumento de enfermedades.

Por su parte el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) ha estudiado las implicaciones del CC sobre la seguridad alimentaria de Bogotá y los pequeños agricultores que la abastecen, por ejemplo Eitzinger *et al.* (2014) reportan que para el 2050 los cambios estimados en precipitación y temperatura afectarían la idoneidad del clima en Colombia entre un 20 % y un 49 % para productos como mango, papaya, maíz y plátano. Para afrontar esta situación la opción de algunos agricultores es cultivar en sitios de mayor altitud deteriorando los ecosistemas de bosque y páramo. En cuanto al efecto del CC sobre la biodiversidad Ramirez-Villegas *et al.* (2014) utilizando un modelo de distribución de especies encontraron que para el 2050 más del 50 % de las 11012 especies de aves y plantas vasculares que analizaron sufrirán una reducción del 47 % de su nicho climático y el 10 % estarán probablemente extintas.

El panorama frente al CC en Colombia es un desafío para todos los sectores socio-económicos. No existen estudios hasta el momento que contradigan las evidencias sobre su ocurrencia y los efectos sobre los ecosistemas, la biodiversidad y la agricultura. Por tanto es uno de los aspectos climáticos que más exige planes de adaptación y mitigación y merece toda la atención tanto de los agricultores como de las autoridades responsables del sector.

2.1.2. Fenómenos asociados con la variabilidad interanual del clima en Colombia

La variabilidad climática interanual en Colombia está controlada principalmente por El Niño-Oscilación Sur (ENOS). Siendo el ENOS un fenómeno que ocasiona anomalías positivas y negativas de la temperatura superficial del mar (TSM) en el Pacífico tropical central y oriental, acompañadas de variaciones en el campo de la presión atmosférica en superficie afecta directa e indirectamente regiones del continente sudamericano e inclusive se conocen teleconexiones con otros países (Steinhoff *et al.*, 2015). El ENOS ha golpeado la economía y productividad del país a lo largo de la historia razón por la cual es uno de los fenómenos de variabilidad más estudiados. La bibliografía al respecto es extensa, solo se citan a continuación algunos de los trabajos pioneros en la comprensión del efecto del ENOS en Colombia.

La mayoría de los estudios sobre el ENOS son realizados usando los índices Southern Oscillation Index (SOI) relacionado con el componente atmosférico y el Ocean Niño Index (ONI) con el componente oceánico (Stevens y Ruscher, 2014). Los primeros resultados de correlación cruzada trimestral entre estos índices y la hidroclimatología del país realizados por Poveda y Mesa (1997) mostraron asociaciones entre el evento Niño, la precipitación y los caudales de los ríos; las correlaciones más fuertes se obtuvieron para el trimestre diciembre-enero-febrero y las más débiles para el periodo marzo-abril-mayo. Por estos datos es sabido hoy en día que en la fase Niño el ENOS ocasiona una disminución de las lluvias, de la humedad del aire y la nubosidad e incrementos en la temperatura del aire. Mientras que en la fase fría o Niña causa el comportamiento opuesto.

Los estudios también han mostrado que el impacto del ENOS sobre las variables hidrológicas se propaga del oeste hacia el este y que la región que experimenta el mayor impacto es la Andina mientras que la Orinoquía y la Amazonía son las menos afectadas. El Niño además está asociado con la ocurrencia de algunos eventos extremos como sequías, heladas e incendios forestales y la Niña con lluvias torrenciales, inundaciones y deslizamientos. Estos resultados se encuentran consignados con detalle en trabajos como los de Poveda y Mesa (1997); Poveda *et al.* (1998, 2001, 2002a, 2011), Montealegre (2009), Arango *et al.* (2012), Hoyos *et al.* (2013) y Córdoba-Machado *et al.* (2015b,a).

En esta misma escala de variabilidad se encuentra la Oscilación Cuasibienal o QBO por sus siglas en inglés. La QBO denota el cambio en la dirección de los vientos zonales tropicales en la estratosfera que alternan entre este y oeste en un periodo entre 24-28 meses. La fluctuación en la dirección avanza desde la baja estratosfera hacia la alta tropósfera ocasionando esfuerzos cortantes verticales que modulan los procesos de convección profunda ecuatorial y afecta la frecuencia de los ciclones tropicales en el Atlántico, por esta razón surgió la hipótesis de una posible correlación entre la QBO y la precipitación en Colombia (Baldwin *et al.*, 2001). En el 2000 Zuluaga *et al.* (2000) correlacionaron linealmente la QBO con la precipitación y la radiación de onda larga de varios sectores del país sin obtener asociaciones estadísticamente significativas. Más recientemente Montealegre (2009), Carmona y Poveda (2012) y Carmona y Poveda (2014) identificaron señales de periodo similar al de la QBO en las anomalías de precipitación. Por su parte Torres (2012) mediante análisis espectral de las series de índices de precipitación en resolución de pentadas, décadas y quincenas también observó modos de la variabilidad interanual asociados a la QBO, sin embargo la existencia de esta banda cuasi-bienal en los registros de lluvia no es observada en todas las estaciones del país y aun no se puede generalizar esta relación.

Además de la relevancia del ENOS o la QBO en la variabilidad interanual hay otros fenómenos que también han sido analizados porque podrían afectar la dinámica climática del país. Uno de ellos es la Oscilación del Atlántico Norte (OAN) que denota la oscilación de la diferencia de presión atmosférica entre la baja de Islandia y la alta de los Azores. La OAN afecta la intensidad de los alisios de noreste, las formaciones tormentosas del Atlántico norte y el desplazamiento de la ZCIT sobre el Atlántico tropical, por tanto indirectamente podría modificar el transporte de humedad desde el océano Atlántico hacia el continente americano (Paegle y Mo, 2002; Vera *et al.*, 2010). En el caso de Colombia, autores como Poveda *et al.* (1998) y Poveda *et al.* (2002a) realizaron correlaciones cruzadas trimestrales entre el índice de la OAN y la precipitación encontrando asociaciones negativas especialmente en el sector de la costa Atlántica y positivas hacia el centro y sur del país con un rezago de seis meses; pero los mismos autores recomiendan profundizar en el tema. Por su parte Montealegre (2009) concluyó que la correlación entre la OAN y la precipitación no sigue un patrón definido y que por lo menos en la banda interanual la correlación parece ser muy baja.

En cuanto a la escala interdecadal o decadal en Colombia son pocos los trabajos disponibles, se menciona en particular la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) que al consistir en el enfriamiento o calentamiento atípico de las aguas superficiales del océano Pacífico Norte de forma persistente durante 20-30 años, en la fase cálida parece reforzar los eventos Niño y en la fría potenciar los episodios Niña (Wang y Liu, 2015). Esto ayudaría a explicar por qué a lo largo de la historia la intensidad de los fenómenos ENSO ha sido tan variada, lo que muestra la importancia del conocimiento de esta oscilación. Para Colombia en 2002 Poveda *et al.* (2002b) correlacionaron el índice de la PDO con los caudales en Colombia y hallaron correlaciones entre 0 y -0.5 entre la PDO y los caudales de un mismo trimestre y los del siguiente; con los valores más altos en el periodo septiembre-noviembre. Sin embargo se necesitan más investigaciones porque el proceso físico no está completamente entendido (Vera *et al.*, 2010).

2.1.3. Migración de la ZCIT sobre Colombia y su rol en la variabilidad estacional

A escala estacional el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) es el proceso de mayor relevancia en Colombia, la ZCIT enmarca la región de alta convección y baja presión cerca al ecuador. En la ZCIT los vientos alisios del noreste originados como un flujo alrededor de la alta del Atlántico Norte se reúnen con los vientos alisios del sureste generados como un flujo alrededor de las altas del Pacífico Sur y Atlántico Sur. La convergencia de los vientos ocasiona el ascenso del aire húmedo ubicado en la zona reforzando la convección generando gran cantidad de nubes cumuliformes y fuertes precipitaciones. La ubicación de la ZCIT oscila de norte a sur debido a la variación anual de las temperaturas superficiales asociadas al ciclo de insolación (Poveda *et al.*, 2006; Basha *et al.*, 2015).

La migración de la ZCIT sobre el territorio colombiano determina las temporadas lluviosas del país presentando dos ramas, una sobre el Pacífico Occidental y otra sobre el continente. El segmento ubicado sobre el Pacífico migra de norte a sur a partir de septiembre-noviembre comenzando entre los 11° y 7° N y llegando a los 2°S en el periodo enero-febrero. A partir de marzo-mayo inicia su movimiento hacia el norte ingresando a la región Caribe entre julio-agosto y continuando hasta alcanzar nuevamente su máxima posición norte. El segmento continental de la ZCIT se desplaza de

forma similar al del Pacífico, pero lo hace entre latitudes más al sur empezando desde los 8°N en septiembre-noviembre y alcanzando los 5°S aproximadamente en enero-febrero, durante marzo-abril mientras cruza los 0 y 1°N se conecta con el segmento del Atlántico por medio de sistemas convectivos. Las coordenadas mencionadas son posiciones promedio ya que la oscilación norte-sur de la ZCIT puede variar año tras año por procesos de interacción océano-atmósfera (Poveda, 2004; Henríquez, 2012).

En una menor escala temporal, conocida como escala intraestacional, está la Oscilación Madden-Julian (OMJ) generada por variaciones en la velocidad y dirección del viento de los niveles altos y bajos de la troposfera con un período de 30 a 60 días (Lau Waliser, 2012). La OMJ modula la duración e intensidad de las temporadas húmeda y seca en Colombia ya que se caracteriza por el desplazamiento hacia el Este de un máximo en nubosidad y precipitación. Los resultados de Torres (2012) muestran que en la fase extrema positiva (subsidente) los procesos convectivos que favorecen la precipitación se amortiguan, mientras que en la fase negativa (convectiva) se intensifican, hecho que se refleja especialmente en el aumento de la precipitación decadal. El trabajo de Yepes (2012) igualmente confirma que el modo principal de variabilidad intraestacional de la precipitación en Colombia está modulado por la OMJ y posiblemente afecte también los caudales medios, la temperatura media y la mínima.

2.1.4. Influencia de procesos de gran escala y mesoescala en el estado del tiempo en Colombia

La gran escala enmarca todos los fenómenos meteorológicos con una escala espacial del orden de los cientos a miles de kilómetros. La OMM la define específicamente entre los 100 y 3000km (OMM, 2008). Los fenómenos que ocurren en esta escala tienen duraciones promedio entre los tres y los 10 días. A esta escala pertenecen los fenómenos extratropicales como los frentes fríos o cálidos, las vaguadas o frentes ocluidos, las depresiones y tormentas extratropicales. Los fenómenos como las ondas del Este, las perturbaciones tropicales y las tres categorías de ciclones tropicales: depresiones, tormentas y huracanes, también hacen parte de esta escala.

Los fenómenos extratropicales pueden llegar a afectar las condiciones atmosféricas de la región norte o sur del país, por ejemplo estudios recientes han revelado una corre-

lación entre el paso de frentes fríos por el Caribe y el aumento de la altura máxima de las olas frente a la costa colombiana (Ortiz-Royero *et al.*, 2013). Por otra parte cuando en una región frontal aumenta la inestabilidad baroclínica y se empieza a desarrollar una tormenta extra-tropical, esta genera oscilaciones en los vientos alisios haciendo que el aire cálido y húmedo de la superficie ascienda y ocasione grandes volúmenes de lluvia en pocos días. Si el proceso continúa y la convección se intensifica hasta llegar a la tropopausa el intenso movimiento vertical tiene como consecuencia más precipitación y vientos fuertes. El ciclo de vida del sistema concluye cuando se configura una vaguada o frente ocluido que consiste en la paulatina desaparición del sector cálido de la superficie, más detalles sobre estos sistemas y su posible influencia en Colombia son descritos en Zea *et al.* (2000). En general los anticiclones subtropicales impiden el acceso de estas tormentas y vaguadas a latitudes tropicales y por eso no es muy difundido su conocimiento, pero es importante conocer su existencia porque cuando logran ingresar a latitudes bajas e interactúan con la ZCIT generan escenarios prolongados de fuertes precipitaciones (Guzmán *et al.*, 2014).

En cuanto a los fenómenos tropicales los más frecuentes en esta escala son las Ondas Tropicales del Este (OTE) que son vaguadas originadas en el chorro africano del Este e independientes de la ZCIT. Adelante y a lo largo de la vaguada de la onda la vorticidad ciclónica es intensa en los niveles bajos a medios. A su paso alteran el campo de presión y generan cambios rápidos en la dirección del viento y aumento de la nubosidad, por tanto a la derecha del eje la presión y la humedad aumentan propiciando en ocasiones actividad tormentosa (Lindner, 2012). Las OTE son perceptibles desde finales de mayo hasta noviembre y su efecto sobre el estado del tiempo del país dura en promedio de 3 a 4 días en un radio de 1000km. Las OTE afectan especialmente la zona de la costa Caribe, el valle del río Magdalena y el oriente del país. Durante el Niño el número de OTE se reduce hecho que está relacionado con la disminución de la precipitación en Colombia durante este evento. El aumento de nubosidad que generan a su paso o perturbación tropical puede continuar desarrollándose hasta configurar un ciclones tropicales (Poveda, 2004).

Los ciclones tropicales (CT) que son sistemas tormentosos de circulación cerrada alrededor de una baja presión en la cuenca del Caribe y sobre el océano Pacífico oriental, surgen a partir de una onda del este, o bajo una vaguada o ciclón en altura, ocasionando a su paso lluvia abundante y vientos fuertes. Una de cada cuatro OTE

evoluciona hasta depresión tropical con movimiento circular definido y velocidades máximas de 18m/s, de éstas una de cada diez llega a convertirse en tormenta tropical cuando el viento alcanza velocidades entre 18 y 33m/s. Si se encuentra sobre el océano en donde una capa suficientemente gruesa tiene una TSM superior a 26°C y persiste un viento con velocidad mayor a 33m/s entonces la depresión llega a convertirse en huracán (Lindner, 2012). Los CT pueden llegar a influir directamente sobre las islas de San Andrés y Providencia y el extremo norte de Guajira o indirectamente sobre el centro y norte del país si llegan a interactuar con la ZCIT o combinarse con otra onda del Este (Ortiz Royero, 2012; Guzmán *et al.*, 2014). Los fenómenos tropicales como los mencionados tienen un mayor efecto sobre el estado del tiempo en el país que los extratropicales.

Otras estructuras atmosféricas de gran escala que interactúan con los anteriores fenómenos son las denominados por León y Eslava (2000) y Pabón y Correa (2005) Sistemas Sinópticos del Pacífico (SSP) y Sistemas Sinópticos de la Amazonía (SSA). La mayoría de los SSP son configurados durante el segundo semestre del año y son producto de la combinación de tres factores. El primero es el recurvamiento, al cruzar el ecuador, de los vientos Alisios del sureste que facilita el transporte de humedad desde el océano Pacífico cálido hacia el continente. El segundo es el flujo de los Estes que pasan sobre el mar Caribe y continúa hacia el Pacífico favoreciendo el ascenso de masas de aire y la conformación de una zona de baja presión, la cual se ubica sobre los límites entre Colombia y Panamá y entre la región central y oeste del mar Caribe, es una zona semipermanente, apreciable principalmente a partir de junio y es conocida también como baja anclada de Panamá. Finalmente el tercer factor es la presencia de serranías en la región Pacífica que refuerza los movimientos convectivos en esa zona.

El recurvamiento hacia el noreste de los vientos del sureste al cruzar el ecuador es uno de los factores responsables de la dinámica de la llamada por Poveda y Mesa (1999) “corriente de chorro superficial del Chocó”. Esta corriente transporta humedad desde el océano Pacífico al continente, es más fuerte en los meses de octubre-noviembre y más débil durante febrero-marzo. Recientemente Palomino-Lemus *et al.* (2015) analizaron la distribución espacial del régimen de rotación estacional del vector viento y confirmaron que la circulación en esta zona cumple con las características de monzón e influye en la precipitación de la región occidental del país. Denominaron al proceso

”monzón del Oeste de América Ecuatorial”.

La combinación de los factores mencionados y el relieve del sector son la causa del desarrollo de nubes, fuertes precipitaciones y tormentas eléctricas convirtiendo al Pacífico colombiano en una de las regiones del planeta con los mayores registros de lluvia anual Poveda y Mesa (2000); Sakamoto *et al.* (2011). Los SSP ocupan en promedio zonas con un radio superior a los 1000 km afectando al litoral Pacífico, áreas sobre la cordillera occidental y en ocasiones alcanzan la cordillera oriental alterando el tiempo en sectores de la región Andina. Cuando las bajas presiones llegan al interior del país en la noche causan lluvias en la madrugada en Risaralda, Caldas, Quindío, Antioquia, Córdoba y el Magdalena medio.

Por su parte los SSA pueden tener dos orígenes: el primero, el desplazamiento de frentes fríos del sur que avanzan hacia la región tropical sobre el océano y el continente. Cuando estos frentes logran cruzar el ecuador y llegar al sureste del país generan líneas de inestabilidad y convección organizada en la Amazonía colombiana. Cuando la inestabilidad es fuerte alcanza a modificar también el estado del tiempo de la Orinoquía y el lado de la cordillera oriental. El segundo, es el sistema de baja presión sobre la región amazónica en niveles bajos creada por el flujo de calor latente de condensación que la selva aporta a la atmósfera. Esta baja se moviliza desde el norte de Bolivia a principios del año hasta alcanzar el extremo sureste de Colombia a mitad del año. La baja amazónica ocasiona descensos de la temperatura del aire y ayuda a intensificar las precipitaciones en la Amazonía (Pabón y Correa, 2005; Espinoza *et al.*, 2009).

En cuanto a los procesos de mesoescala la convección es el proceso principal que configura los denominados sistemas convectivos de mesoescala (SCM) caracterizados por alta nubosidad y precipitación (Mejía y Poveda, 2005). La intensidad, la duración y la velocidad de desplazamiento de los SCM varían en función de la latitud, de si ocurren sobre el océano o sobre el continente y de las condiciones hidrológicas locales; pero el proceso de formación es similar. Sobre el territorio colombiano los SCM generan cielos nublados y precipitaciones de variada intensidad en poco tiempo, pueden configurarse en varias regiones, sin embargo son más frecuentes sobre el Amazonas y la región Pacífica entre mayo y junio. La duración de estos SCM es de 18 a 36 horas en promedio y al disminuir el ingreso de radiación solar también afectan la amplitud

diurna de la temperatura (León y Eslava, 2000; Sakamoto *et al.*, 2011).

En la región Andina el proceso de mesoescala dominante es la circulación térmica ocasionada por el calentamiento diferencial de la superficie que va incrementando su elevación o circulación valle-montaña. En las zonas costeras del Pacífico y el Caribe la circulación mar-tierra generada por el calentamiento diferencial de la superficie del mar y de la Tierra controla la dinámica atmosférica. En la costa Pacífica, el flujo mar-tierra al encontrarse con la cadena montañosa presente en la zona refuerza los procesos convectivos que alimentan los sistemas sinópticos del Pacífico mencionados en la sección anterior. En la región Caribe y llanos orientales en la mesoescala el proceso dominante es la convección local que ocurre por el calentamiento de la superficie que obliga al aire a ascender y enfriarse adiabáticamente hasta el nivel de condensación y la consecuente formación de nubes. Los centros convectivos generados evolucionan en poco tiempo, tienen poco avance horizontal y son responsables de las lluvias vespertinas o nocturnas (Mejía y Poveda, 2005; Henríquez, 2012; Guzmán *et al.*, 2014).

El conocimiento de los antecedentes presentados en esta sección permite tener una visión global de los factores que controlan el clima en Colombia los cuales se resumen en la tabla 2-4, la cual servirá de referencia para la comprensión de las condiciones climáticas de las zonas con mayor uso de invernaderos en Colombia.

2.2. Regionalización de las áreas con mayor producción en invernadero por medio del análisis de clúster de la precipitación, humedad relativa, brillo solar y altitud

Luego de presentar los principales fenómenos responsables de la variabilidad climática en las diferentes escalas espacio-temporales el objetivo siguiente fue conocer el comportamiento medio de las variables climáticas en determinados puntos de interés. El primer paso fue regionalizar el área de estudio por medio del análisis de clúster utilizando precipitación, humedad relativa, brillo solar y altura sobre el nivel del

Escala de variabilidad climática	Fenómeno o Proceso	Región afectada en Colombia	
Decenios, siglos y más	Cambio Climático	Evidencias relevantes: Aumento de la temperatura media en 0.13°C/década, e incremento del nivel del mar (3.5 mm/año en el Caribe y 2.2 mm/año en el Pacífico), durante el periodo 1971-2000. Consecuencias: Descenso de la precipitación en gran parte de las regiones Andina y Caribe e incremento de la misma en el centro y norte de la región Pacífica y Amazonas. Aumento de la temperatura media hasta en 1.4°C para el 2011-2040. Afectación del nicho climático de múltiples especies vegetales y animales.	
Interanual (años)	ENOS	En la fase Niño ocasiona una disminución de las lluvias, de la humedad del aire y la nubosidad e incrementos en la temperatura del aire, mientras que en la fase fría o Niña causa el comportamiento opuesto. El periodo con mayores consecuencias es octubre-marzo y la región que experimenta el mayor impacto es la Andina mientras que la Orinoquía y la Amazonía son las menos afectadas.	
Estacional (meses)	ZCIT	Su desplazamiento es el proceso dominante de la variabilidad estacional en todas las regiones de país, responsable de la existencia de las dos temporadas húmedas y secas típicas en gran parte del territorio nacional.	
Intraestacional (semanas a meses)	OMJ	Es la principal fuente de la variabilidad intraestacional de la precipitación en Colombia, su efecto es apreciable especialmente en la región Pacífica y Andina.	
Tiempo (minutos, horas, días)	Fenómenos de gran escala espacial (100 y 3000km)	Extratropicales	La presencia de frentes, tormentas y vaguadas extratropicales puede llegar a generar oscilaciones en los vientos alisios haciendo que el aire cálido y húmedo de la superficie sea inestable y ocasione grandes volúmenes de lluvia en pocos días. Aunque su influencia es poco frecuente en Colombia. La región Caribe puede ser la más afectada por el paso de frentes fríos/
		Tropicales	El paso de ondas tropicales, el desarrollo de depresiones, tormentas y ciclones tropicales sobre el Atlántico afectan especialmente la región norte y nororiente del país durante la segunda mitad del año.
		Sistemas sinópticos del Pacífico	Están asociados a la corriente en chorro del Chocó y la baja anclada de Panamá, afectan principalmente a la región Pacífica y parte occidental de la región Andina.
		Sistemas Sinópticos de la Amazonia	Están asociados al sistema de baja presión sobre la región Amazónica en niveles bajos creada por el flujo de calor latente de condensación que la selva aporta a la atmósfera, así como a l efecto de frentes fríos del sur. Su mayor área de influencia es el sector suroriental del país.
	Fenómenos de mesoescala (3-100km)	La circulación valle-montaña es el proceso de mesoescala dominante en la región Andina. La circulación mar-tierra es el movimiento típico en las zonas costeras del Pacífico y el Caribe. La convección local juega un papel determinante en la región Caribe y Llanos Orientales	

Figura 2-4.: Fenómenos del sistema climático y región de mayor influencia en Colombia. Fuente: Tabla elaborada en el presente trabajo con base en las referencias citadas. ENOS: El Niño Oscilación Sur, ZCIT: Zona de Convergencia Intertropical, MJO: Madden-Julian Oscillation

mar (altitud). A la fecha existen trabajos de regionalización del país en función del comportamiento estacional de la precipitación y el componente geográfico como los de Casas (2005), Hurtado (2009) y Guzmán *et al.* (2014), sin embargo aunque la precipitación es esencial para conocer las características del clima exterior y de las condiciones del suelo, en el contexto del presente trabajo es importante integrar las otras tres variables al análisis debido a la trascendencia que tienen en el manejo de los sistemas bajo invernadero. La humedad relativa está asociada con la presión de vapor externa e interna y por consiguiente con la transpiración del cultivo, el potencial de condensación y la propagación de enfermedades. El brillo solar está relacionado directamente con el flujo de radiación que puede recibir el invernadero durante el día y la altitud está asociada con la temperatura externa.

Por otra parte los trabajos previos han utilizado métodos estadísticos como el análisis de componentes principales (Guzmán *et al.*, 2014) o modelos probabilísticos (Hurtado, 2009), en este caso para determinar las zonas con características climáticas similares se usará Análisis de Clúster (AC) como lo sugiere también Boshell (2009); Leuprecht y Gobiet (2010). El AC es principalmente una herramienta exploratoria, más que una herramienta inferencial. Dado un conjunto de datos el proceso definirá grupos y asignará miembros en diferentes niveles de agregación. Distinto a un análisis discriminatorio el proceso no contiene reglas para asignar membresía a futuras observaciones. El resultado ideal de un AC es una división de los datos que minimice las diferencias entre los miembros de un clúster dado y maximice la diferencia entre los miembros de diferentes clústers (Wilks, 2011).

Hay dos técnicas principales: no jerárquicas y jerárquicas. La idea central en la mayoría de los métodos no jerárquicos es elegir una partición inicial de los datos y luego alterar las pertenencias a los clústers para así obtener una nueva partición que revele una estructura determinada en los datos de entrada. Los métodos no jerárquicos se diseñan para agrupar variables de datos en una única clasificación de k clústers, donde k se especifica a priori. En estos métodos se utiliza un conjunto de puntos *semilla* como los centroides (o vectores de valores medios) de los clústers y se construye el conjunto inicial asignando cada variable u observación al clúster con el centroide más próximo. Posteriormente se recalculan los centroides y las distancias de las observaciones, reasignando las observaciones a los nuevos clústers. Estos procesos se aplican de forma iterada hasta que convergen a una configuración estable.

Las técnicas jerárquicas se subdividen en aglomerativas y disociativas. En las aglomerativas los objetos son progresivamente agregados hasta que se juntan en un solo clúster. En los divisivos o disociativos se comienza con todos los objetos en un solo clúster inicial el cual se va separando a través de divisiones sucesivas en clústers cada vez más pequeños hasta tener tantos como el número de objetos que se está analizando. En este estudio se aplicó la técnica jerárquica aglomerativa porque se parte de un grupo de observaciones de varias variables las cuales se quiere agrupar en un número de clústers con características similares, pero que el número de clústers final sea determinado por el investigador en función de los procesos físicos que puedan explicar dicha clasificación.

Etapas del análisis de clúster jerárquico aglomerativo:

- Selección de la muestra de datos y selección del concepto de distancia o similitud. Se utilizan medidas de similitud que definen proximidad, no covariación y caracterizan la distancia entre los objetos en un espacio geométrico perteneciente a una característica concreta. Las distancias métricas más utilizadas son las de minkovskov, euclideana, y Mahalanobis. En el presente estudio se eligió la métrica euclidiana:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^t (X_{ik} - X_{jk})^2} \quad (2-1)$$

- Selección y aplicación del criterio de agrupación: es el algoritmo de clasificación para la obtención de los clústers, entre los más comunes están: (1) distancia mínima, (linkage simple) en este caso los grupos se unen considerando la menor de las distancias existentes entre los miembros más cercanos de distintos grupos. (2) distancia máxima, (linkage completo) en este caso los grupos se unen considerando la menor de las distancias existentes entre los miembros más lejanos de distintos grupos. (3) Método de Ward, el cual utiliza una aproximación al análisis de la varianza para evaluar la distancia entre clústers, intentando minimizar la suma de los cuadrados de los residuos de cada dos hipotéticos clústers que pueden ser formados en cada paso. El método de Ward entonces

agrupa de forma jerárquica elementos de modo que se minimice la función:

$$W = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_k} (X_{ijk} - \bar{X}_{ik})^2 \quad (2-2)$$

Donde W es la suma cuadrática interna del grupo k , es decir es la suma de desviaciones en todas las variables m para todos los sujetos n_j dentro del grupo k . X_{ijk} es el valor de la variable i para cada sujeto j perteneciente al grupo k , y \bar{X}_{ik} es la media de la variable i en el grupo k . En el presente estudio se eligió el método de Ward.

- Elección de la estructura correcta es decir el número óptimo de grupos, para ello existen algunas técnicas como la observación de la variación intragrupal que pueden ayudar, sin embargo, la elección depende en gran parte de los criterios o conocimientos previos del autor (Wilks, 2011).

El análisis de clúster (AC) permitió clasificar el área de estudio considerada en la presente investigación en grupos homogéneos teniendo en cuenta la similitud de las variables elegidas. La métrica Euclidiana y el método de Ward fueron elegidos porque los resultados fueron los más coherentes con los procesos físicos expuestos en la sección 2.1 como el paso de la zona de convergencia intertropical sobre el territorio nacional, la presencia frecuente de sistemas sinópticos o los procesos de mesoescala generadores de la precipitación.

El área de estudio comprendió todos los departamentos resaltados con rojo en la figura 1-3. La figura 2-5 muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas pertenecientes al IDEAM seleccionadas por estar sobre el área de interés. La tabla con las coordenadas y código de cada estación se ubica en el anexo A.

Las variables analizadas corresponden a las series de los valores medios mensuales de la precipitación total, el brillo solar y la humedad relativa registrada durante el período 1980-2010, así como la altitud de cada estación seleccionada. Las series de datos fueron revisadas teniendo en cuenta las recomendaciones de la OMM expuestas en OMM (2008) que son:

- Identificación de datos atípicos para determinar si su origen corresponde a un evento extremo, a un un evento de variabilidad climática o a un error en la medida.

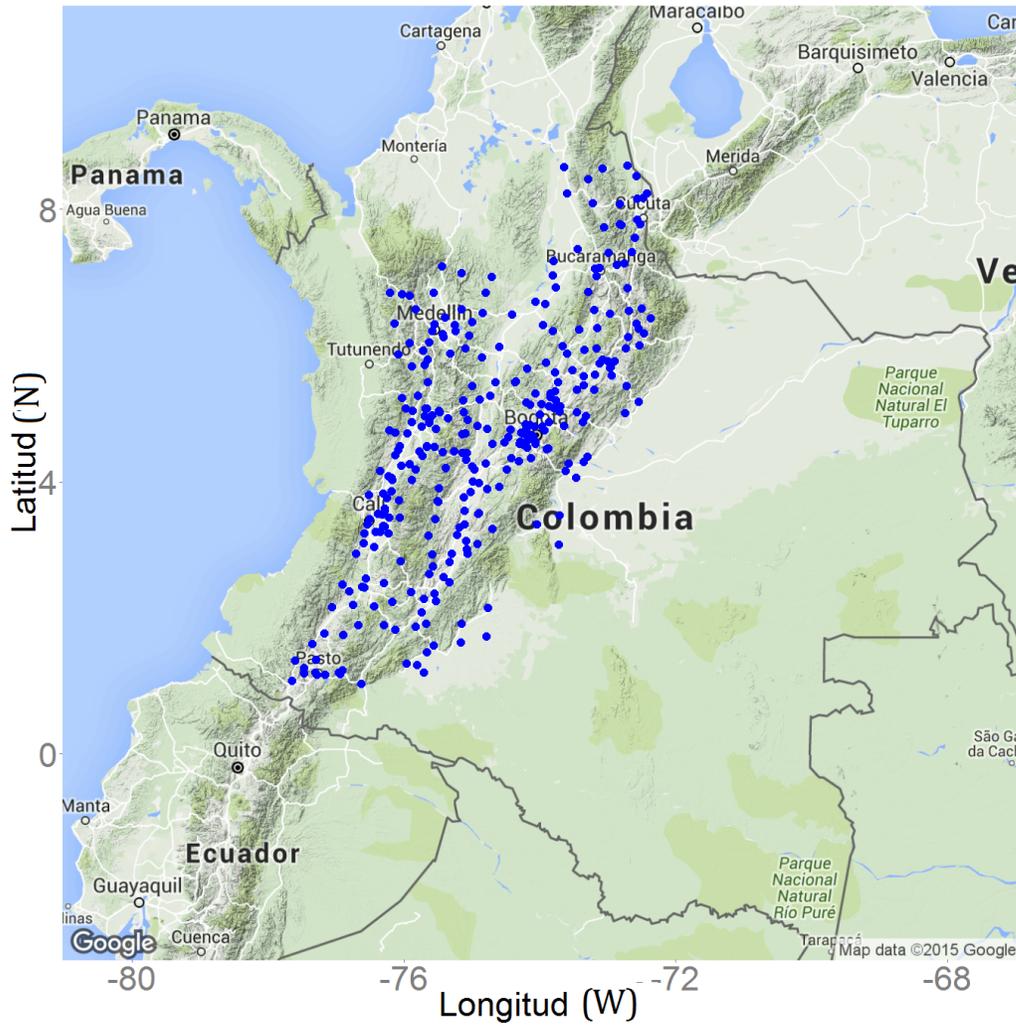


Figura 2-5.: Distribución de estaciones utilizadas para el análisis de clúster.

- Identificación de datos fuera de rango o sin coherencia respecto a la climatología
- Revisión de la coherencia interna, cronológica y espacial.

Los promedios mensuales multianuales fueron calculados con las series que superaron la primera revisión y que tuvieron información al menos de 25 años sin más de dos años consecutivos sin datos. Con los valores climatológicos estimados se realizó el análisis de clúster.

El análisis de clúster (AC) teniendo en cuenta la precipitación, la humedad relativa, el brillo solar y la altitud de la estación dio como resultado ocho grupos con características homogéneas, distribuidas como se muestra en la figura 2-6. A continuación se describen las características de los grupos teniendo en cuenta la cuenca hidrográfica sobre la que se encuentran. La zona donde se ubican los tres grupos con tonos azules (oscuro, medio y claro) se denominó región centro y suroccidental, la zona con las estaciones de color rojo se llamó región noroccidental, la zona con el grupo de color amarillo se nombró región Santanderes, la zona con el grupo de color morado se llamó la región cuenca del Catatumbo y la zona con las estaciones de color naranja y verde se denominó la región suroriental.

Para acompañar los resultados del análisis de clúster se realizaron gráficas donde se puede observar la similitud en el patrón de la precipitación, humedad relativa y brillo solar entre estaciones de un mismo grupo y la diferencia con las pertenecientes a los demás; así mismo, se graficaron los valores climatológicos de variables no consideradas en el análisis de clúster como la evaporación, temperatura media, mínima y máxima. Todas las gráficas resultantes se presentan en el anexo B, el color de las barras en cada figura corresponde al color del clúster al cual pertenece, relacionado con la figura 2-6.

2.3. Climatología de las regiones delimitadas con el análisis de clúster

En la región centro y suroccidental se reúnen tres tipos de conglomerados, todos tienen en común que el régimen de precipitación es bimodal debido al desplazamiento

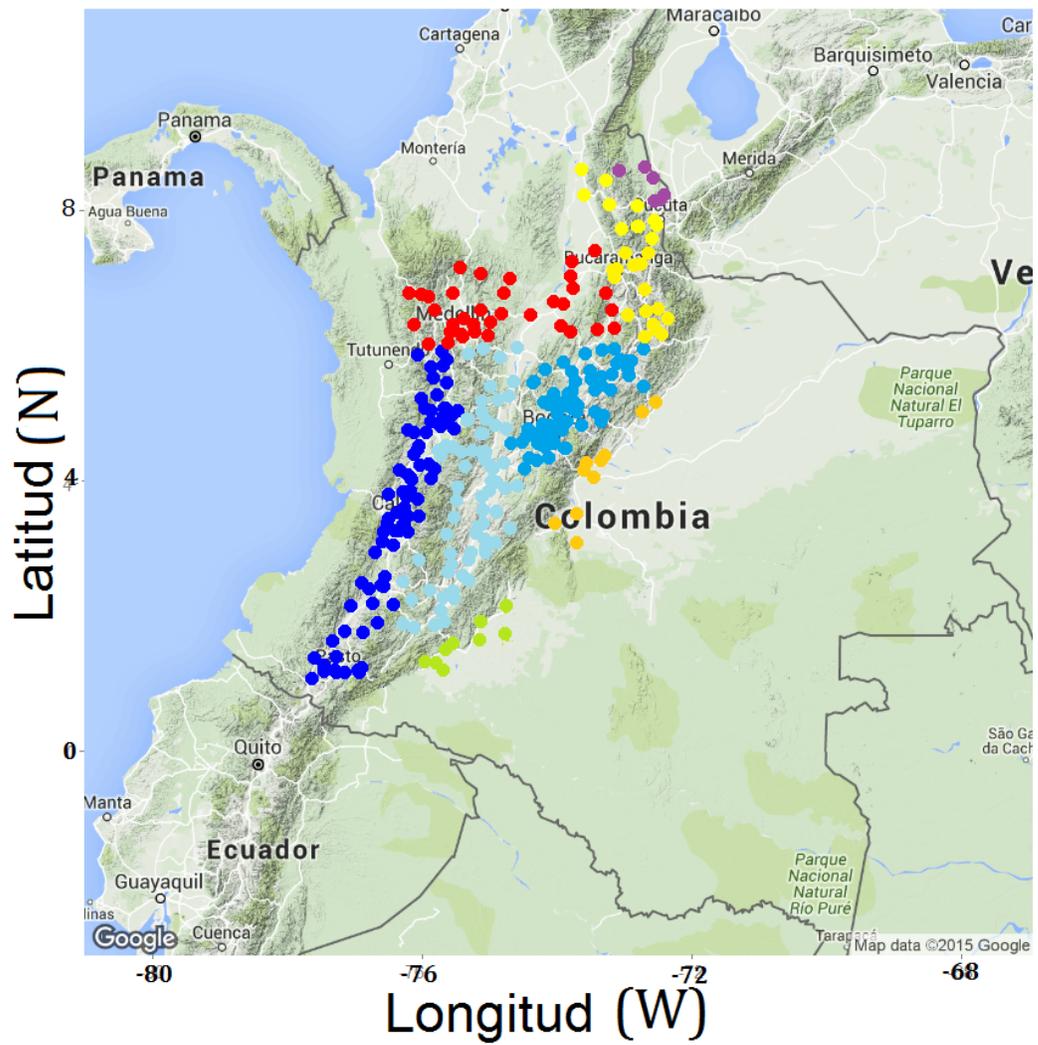


Figura 2-6.: Distribución de los grupos obtenidos en el análisis de clúster. Fuente: Esta investigación

de la ZCIT la cual ocasiona dos temporadas húmedas de marzo-mayo y septiembre-noviembre, como se aprecia en los climogramas de la figura **2-7**.

Las estaciones que conformaron el clúster azul oscuro están situadas en el costado oriental de la cordillera occidental y parte del valle, los niveles medios mensuales de precipitación en este clúster oscilan entre 30 y 130 mm. La estación aeropuerto A. Bonilla (Figura **2-7**). es representativa de este clúster. Por su ubicación esta zona recibe masas de aire cuya humedad ya ha sido descargada a barlovento y por tanto las estaciones pueden tener registros menores que aquellas instaladas al costado opuesto o sobre la cordillera central. Teniendo en cuenta los fenómenos mencionados en la sección 2.1 y resumidos en la tabla **2-4** , la precipitación de este clúster puede ser más influenciada por los procesos sinópticos del Pacífico que los demás grupos configurados. La humedad relativa media varía alrededor del 80 %, el brillo solar entre 150 y 200 horas/mes, donde los meses con más horas de sol son junio y enero. Otras variables representadas en las figuras del anexo B como la evaporación tiene un rango entre 80 y 100 mm a lo largo del año. La temperatura mínima media oscila alrededor de 16°C y la máxima de 26°C. La temperatura media por su parte varía entre 19°C y 23°C.

Las estaciones localizadas entre la cordillera central y oriental y que conforman el clúster azul claro tienen niveles de precipitación que varían entre 50 y 350mm, el climograma de la estación manzanares (Figura **2-7**) es representativo de este grupo de estaciones. En esta zona los procesos más dominantes son los fenómenos de mesoescala como la circulación valle-montaña. La humedad relativa media varía alrededor del 82 %, el brillo solar entre 150 y 200 horas/mes, los meses con más horas de sol también son junio y enero. La evaporación tiene un rango entre 90 y 110 mm a lo largo del año. En este clúster la temperatura mínima media varía alrededor de 20°C y la máxima de 28°C. La temperatura media oscila entre 23°C y 25°C.

Las estaciones sobre el costado occidental de la cordillera oriental agrupadas en el clúster azul medio son menos lluviosas en la época que reciben vientos con componente Este por lo que las masas de aire descargan la mayor parte de la humedad en su ascenso por el costado occidental. La época en que este efecto es más notable es durante junio julio cuando llueve más en el piedemonte Amazónico que en el valle del alto Magdalena. El rango de precipitaciones esta entre 25 y 120mm, la estación

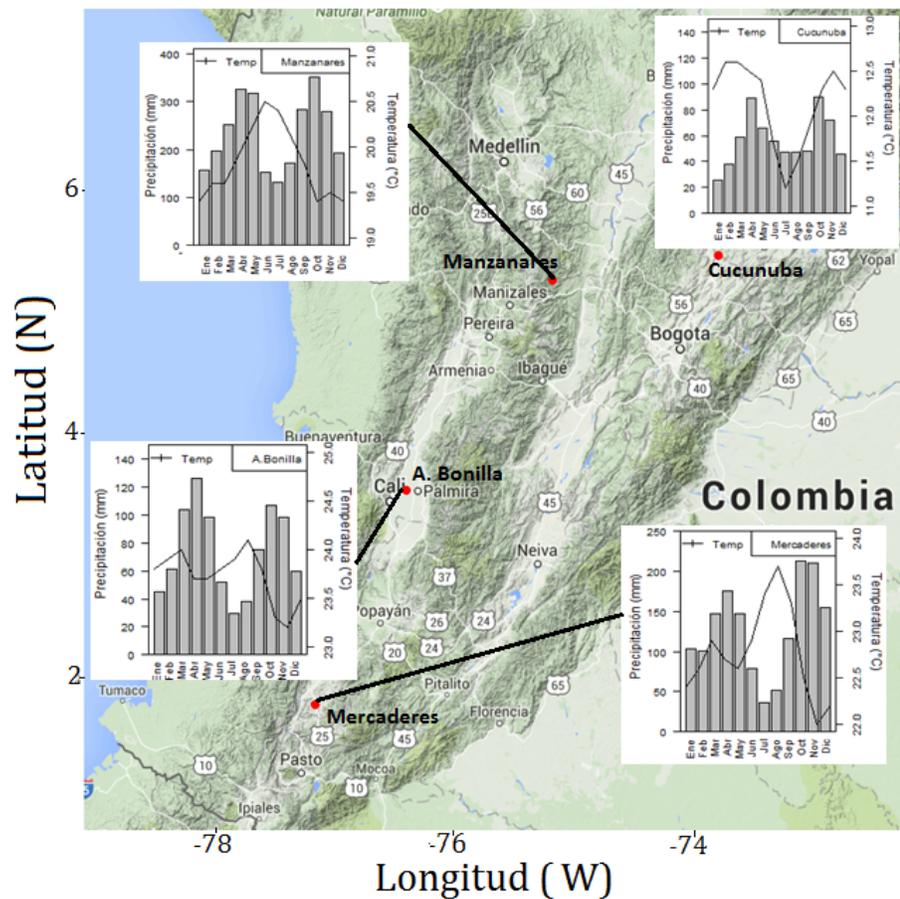


Figura 2-7.: Climogramas representativos de la zona central y suroccidental construidos con información de precipitación y temperatura media mensual del periodo 1980-2010. Fuente: Esta investigación

Cucunuba (Figura 2-7) es un ejemplo de este clúster. La humedad relativa media varía alrededor del 78 %, enero y junio nuevamente son los meses con más horas de sol y el rango de variación se mantiene entre 150 y 200 horas/mes, la evaporación tiene un rango entre 80 y 90 mm a lo largo del año. La temperatura mínima media está alrededor de los 7°C y la máxima de 20°C. La temperatura media por su parte oscila entre 13°C y 14°C.

En la región noroccidental se hallan las estaciones identificadas con color rojo en el mapa 2-6, en este caso la distribución de la precipitación continúa siendo bimodal y

los niveles oscilan entre 50 y 250 mm. La diferencia radica en que la amplitud de los valores medios mensuales de precipitación es menor, lo cual se aprecia al comparar los climogramas de la figura **2-7** con los de la figura **2-8**. Este comportamiento podría estar relacionado con que la zona se encuentra localizada entre las latitudes donde se ha identificado la presencia de la corriente en Chorro del Choco y que en la zona la elevación de la cordillera occidental es menor, lo que favorece el ingreso de las masas húmedas del Pacífico y de los sistemas sinópticos explicados en la sección 2.1.4. En las estaciones que pertenecen a esta región la humedad relativa media varía alrededor del 80 %, el brillo solar entre 125 y 200 horas/mes y es muy homogéneo en el año. La evaporación tiene un rango entre 90 y 110 mm. La temperatura mínima media varía alrededor de 17°C y la máxima de 28°C. La temperatura media por su parte oscila entre 21°C y 23°C.

En la región Santanderes se conserva la bimodalidad en el régimen de precipitación, pero presentando menores valores y mayor duración de la primera temporada húmeda como se aprecia en los climogramas de la figura **2-9**. Los niveles oscilan entre 40 y 200 mm. Mientras que en los casos anteriores la primera temporada húmeda tiene un máximo sobresaliente durante un mes, en esta región dicho máximo es notable durante dos meses o más, por ejemplo en la estación Llano Grande el primer periodo de precipitación es de tres meses (marzo-mayo) con un nivel de pluviosidad sostenido durante toda la temporada. En esta región la humedad relativa media varía alrededor del 81 %, el brillo solar entre 150 y 210 horas/mes alcanzando los mayores valores en enero y los más bajos justamente durante la primera temporada húmeda. Las estaciones de este clúster no tenían series completas de evaporación y temperatura por lo que establecer su rango en este caso no fue posible, aunque por la altitud de las estaciones del clúster la mayoría está en zonas templadas.

En la región Cuenca del Catatumbo el rasgo más sobresaliente es que la segunda temporada lluviosa es más intensa que la primera, los valores oscilan entre 80 y 380mm. Al comparar los climogramas de la figura **2-10** con los de la figura **2-9** se observa esta mayor concentración de la precipitación hacia el segundo semestre del año. La explicación a este comportamiento podría deberse a la influencia de la dinámica del Atlántico caracterizada por fenómenos tropicales como las ondas del este, las depresiones y tormentas tropicales, cuya mayor actividad se presenta justamente en la segunda mitad del año, como se mencionó en la sección 2.1. La interacción de estos

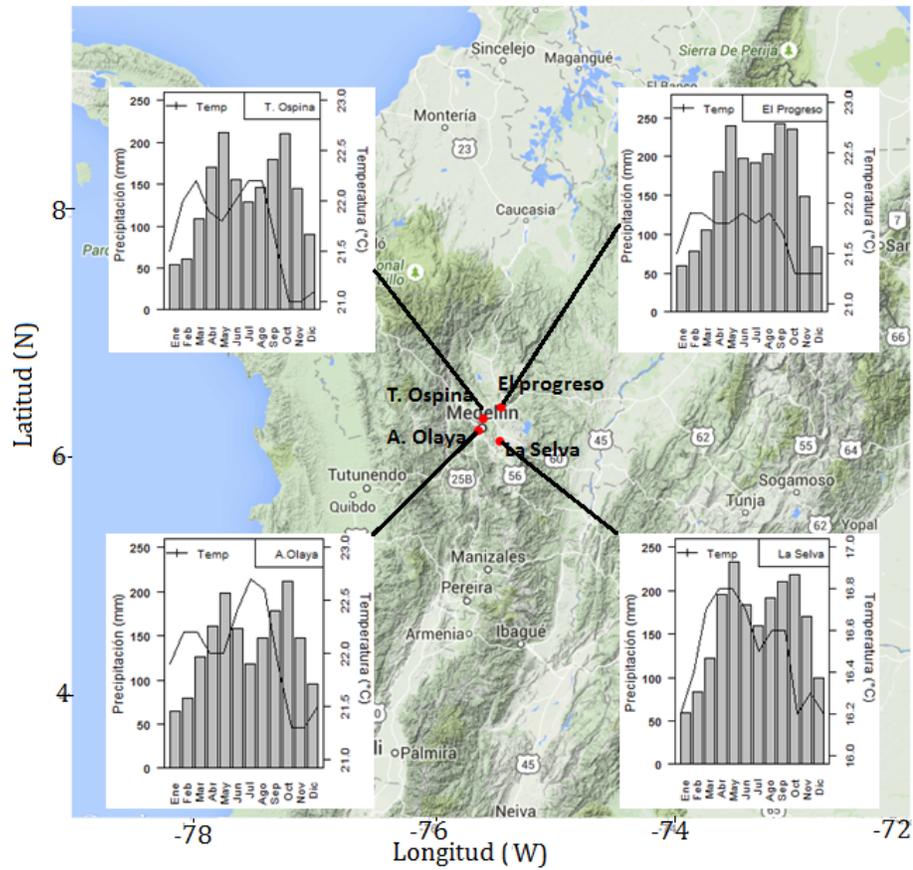


Figura 2-8.: Climogramas representativos de la zona noroccidental construidos con información de precipitación y temperatura del periodo 1980-2010. Fuente: Esta investigación

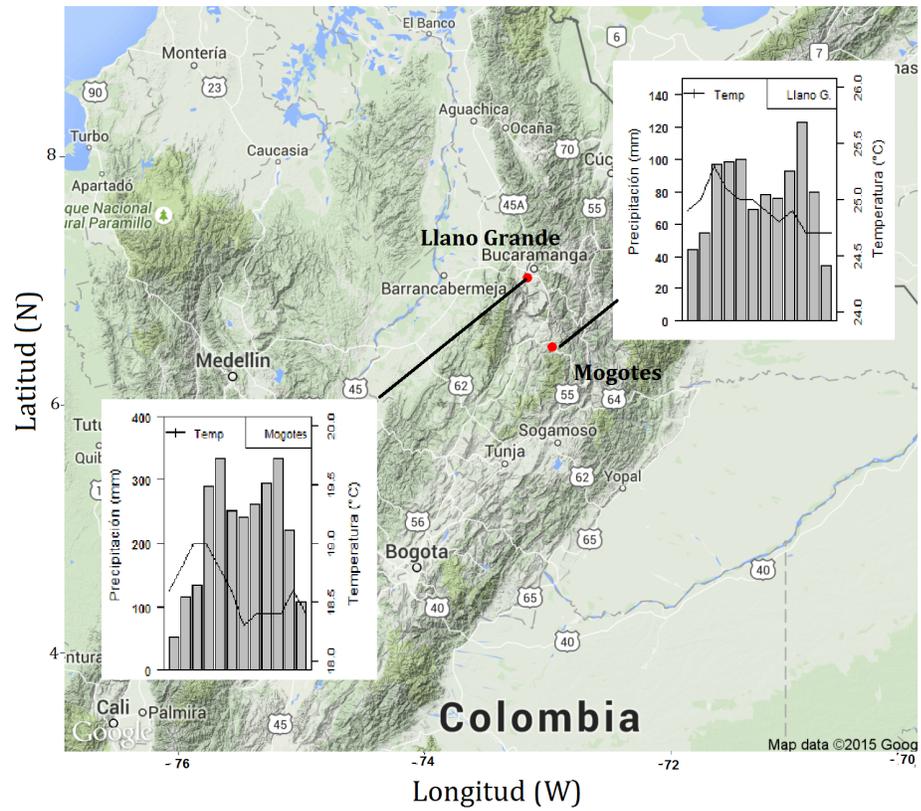


Figura 2-9.: Climogramas representativos de la zona de los Santanderes construidos con información de precipitación y temperatura media mensual del periodo 1980-2010. Fuente: Esta investigación

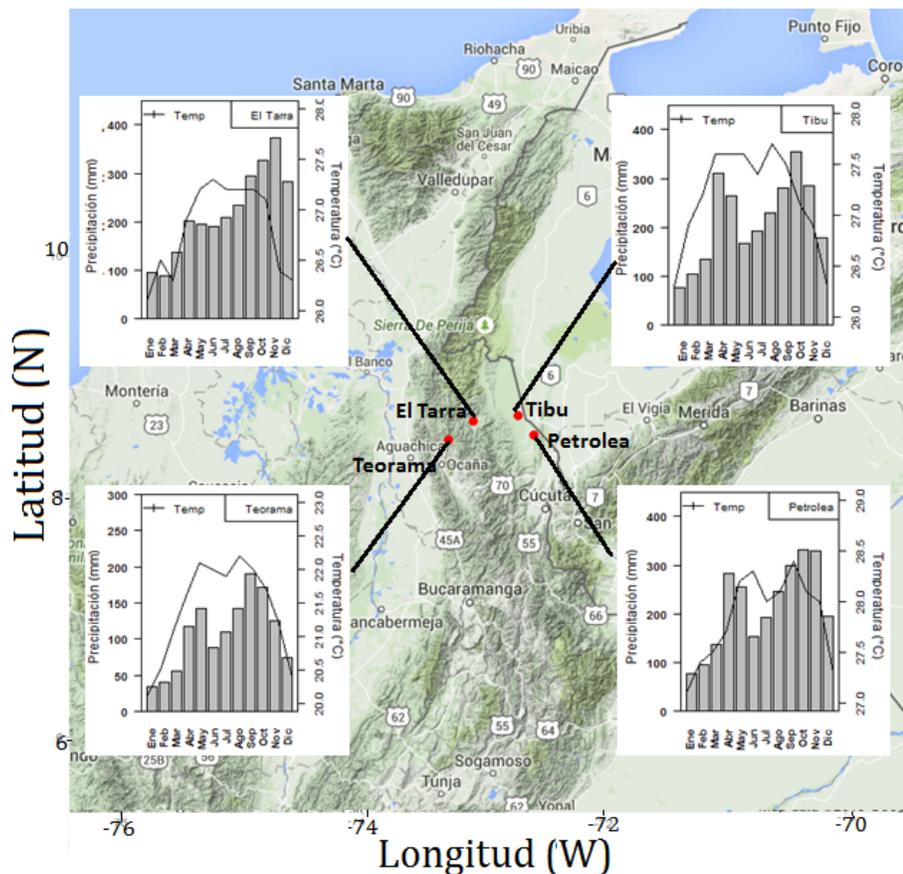


Figura 2-10.: Climogramas representativos de la zona cuenca del catatumbo construidos con información de precipitación y temperatura media mensual del periodo 1980-2010. Fuente: Esta investigación

eventos con el desplazamiento de la ZCIT hacia el sur durante esta época ocasiona que los vientos del noreste transporten consigo la humedad desde el Atlántico y de esta forma se favorezca la precipitación haciéndola mayor que la del primer semestre del año. La humedad relativa media varía alrededor del 82 %, el brillo solar entre 160 y 200 horas/mes. La mayoría de las estaciones pertenecientes a este clúster registraron temperatura media superior a 26 °C.

En la región suroriental se reúnen dos tipos de conglomerados ambos con patrones de precipitación diferentes a los de las demás áreas. En esta zona hay una tendencia a la unión de las dos temporadas húmedas de abril y octubre. Los climogramas de las

estaciones ubicadas más hacia el sector de los llanos orientales (estaciones naranjas en la figura **2-6**) muestran que la primera temporada de lluvia es ligeramente más intensa que la segunda como se observa en la figura **2-11**. Las estaciones más hacia el pie de monte amazónico (estaciones verdes en la figura **2-6**) tienen un régimen monomodal. La principal razón para el comportamiento en este sector podría estar relacionado con la influencia de los sistemas sinópticos de la Amazonía generados gracias al sistema de baja presión que se desplaza desde el norte de Bolivia y alcanza el sur de país a mediados de año incrementando la pluviosidad en esta época y creando una sola y extensa temporada húmeda que va desde abril a noviembre y una sola seca de diciembre a abril. La humedad relativa media varía alrededor del 78 %, el brillo solar entre 100 y 150 horas/mes. La temperatura mínima media varía alrededor de 20°C y la máxima de 32°C. La temperatura media por su parte oscila entre 24°C y 26°C.

El comportamiento de la humedad relativa y el brillo solar a lo largo del año es muy similar en el área de estudio, con rangos de variación entre el 78 y el 82 % y entre 100 y 150 horas de sol al mes respectivamente. En los resultados obtenidos en el análisis de clúster y en las gráficas por cada estación se evidencia que las variables que más definen la diferencia entre un grupo y otro son la precipitación y la temperatura del aire representada por la altitud. En el caso de la precipitación el comportamiento se rige por la ubicación de la zona respecto a las cordilleras y el grado de influencia de los fenómenos de escala planetaria, gran escala y mesoescala sobre dicha región, los cuales fueron resumidos en la tabla **2-4**.

En la figura **2-12** se relacionan los fenómenos de la tabla **2-4** con el mapa **2-6** de esta forma se visualizan los procesos de mayor influencia en cada región y por tanto determinantes en la conformación de cada clúster. En la gráfica el cambio climático enmarca todo el mapa con un cuadro rojo porque es un proceso que afecta a todo el territorio nacional como bien lo enfatizan Ruiz (2010); Pabón (2012); Armenta y Ruiz (2012); Armenta *et al.* (2014); Palomino-Lemus *et al.* (2015) en sus investigaciones. El desplazamiento norte-sur de la ZCIT, representado por la flecha de doble punta, determina en la región de estudio el predominio del régimen bimodal de la precipitación, así como las ligeras variaciones del brillo solar a lo largo del año, hecho que es bien descrito en Poveda (2004); Montealegre (2009); Henríquez (2012). El ENOS aunque no fue analizado en este trabajo es un proceso de alto impacto en

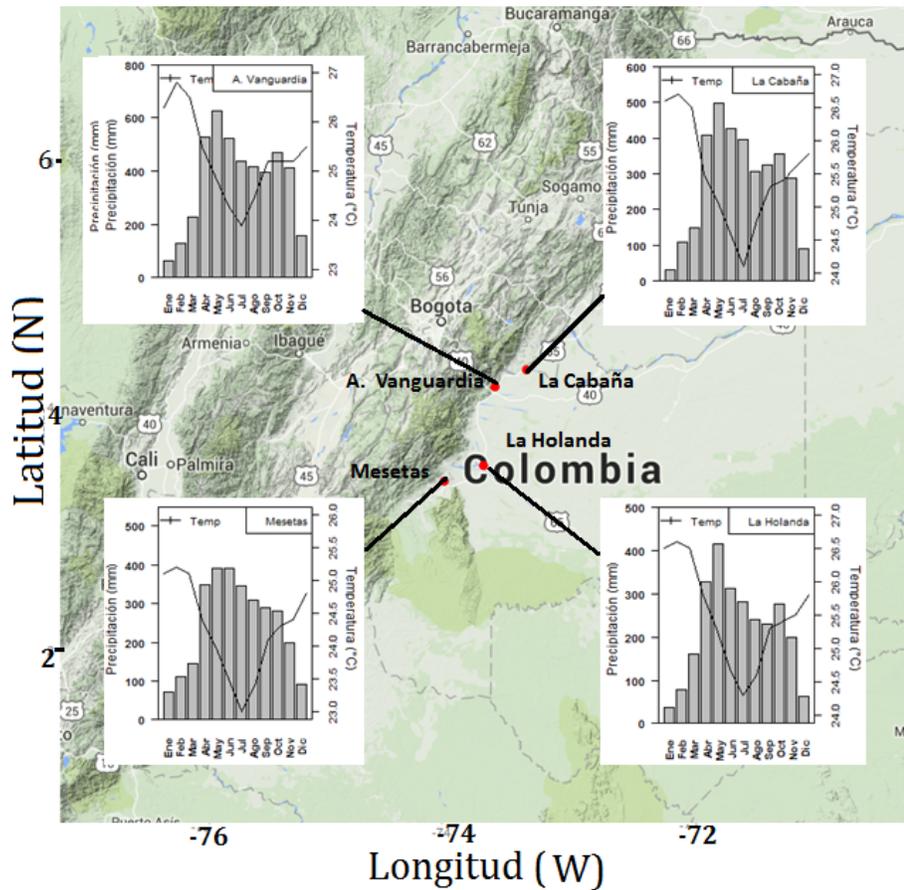


Figura 2-11.: Climogramas representativos de la zona piedemonte llanero construidos con información de precipitación y temperatura media mensual del periodo 1980-2010. Fuente: Esta investigación

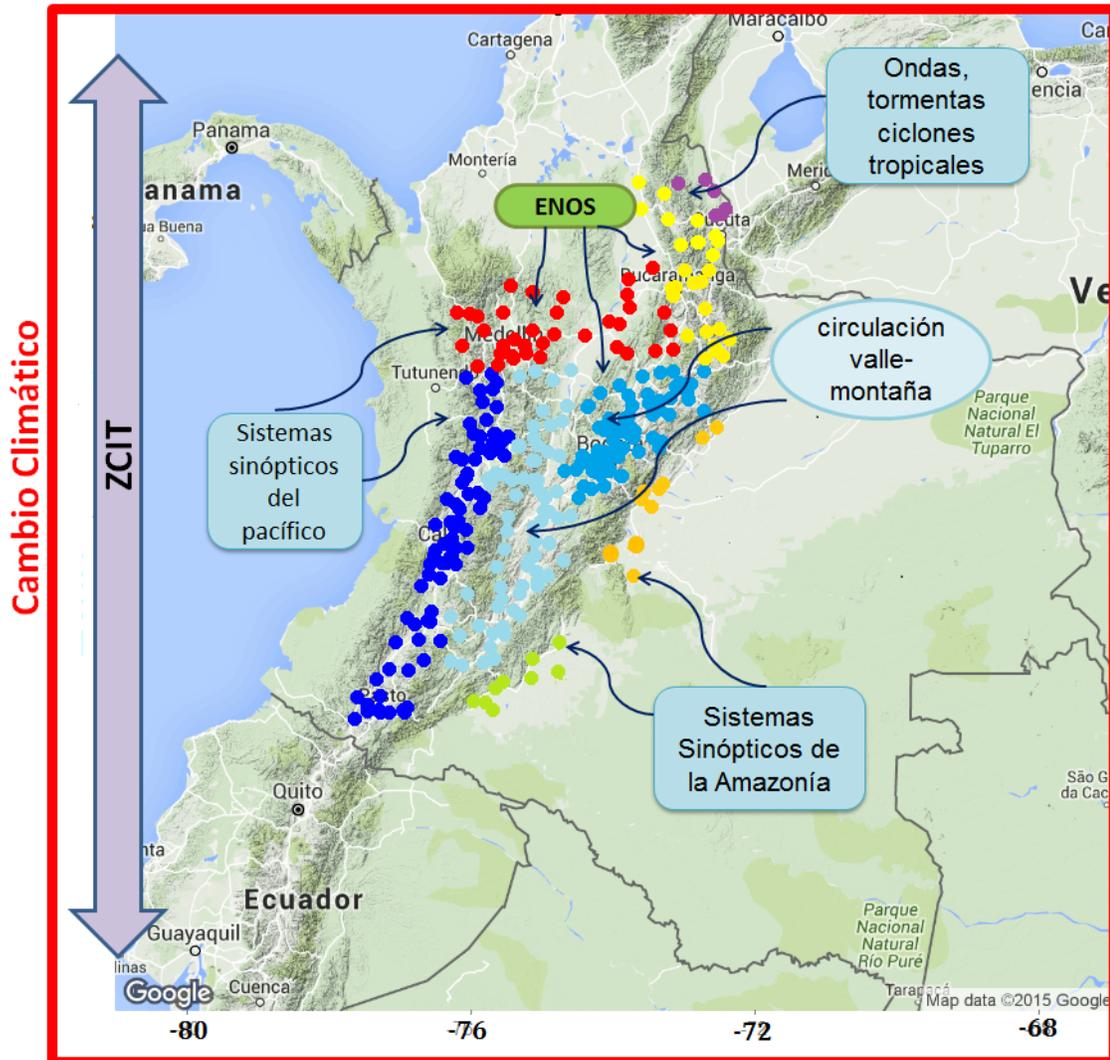


Figura 2-12.: Procesos atmosféricos con mayor influencia sobre los conglomerados obtenidos en el análisis de clúster. Fuente: Esta investigación

la región andina como lo reportan Arango *et al.* (2012); Hoyos *et al.* (2013) por lo que aparece en el mapa. Los procesos mencionados hasta aquí tienen una influencia similar en todas las zonas analizadas, la cercanía de la región con los sistemas de gran escala y mesoescala, representados por cuadros y óvalos respectivamente, completan el panorama. En la figura **2-12** se relaciona cada sistema con el clúster donde el grado de influencia sobre la dinámica climática es mayor. La clasificación obtenida guarda completa coherencia con los trabajos de León y Eslava (2000); Poveda y Mesa (2000); Pabón y Correa (2005); Espinoza *et al.* (2009); Sakamoto *et al.* (2011) quienes han analizado por separado estos sistemas sinópticos. La climatología obtenida en cada clúster es el resultado de la interacción entre todos los procesos señalados en el mapa **2-12**.

Las referencias citadas a lo largo del capítulo contienen el conocimiento general que se tiene actualmente del clima en Colombia algunas de ellas más difundidas a través de artículos de circulación internacional y otras no tanto por ser notas técnicas o revistas de circulación local. Sin embargo es esencial dar mayor visibilidad a toda la producción científica relacionada con las ciencias atmosféricas en Colombia no solo para no ser reiterativos en las investigaciones sino para poder contrastar los resultados encontrados y construir nuevo conocimiento con el respaldo de una comunidad científica consolidada. Por ejemplo, los resultados del análisis de clúster expuestos son coherentes con los trabajos previos citados pero la diversidad climática del país es tan alta que sería ideal contar con más referencias recientes para compararlos. Sin embargo son pocos los trabajos relacionados directamente con el estudio del clima en Colombia o su asociación con procesos atmosféricos y oceánicos de escala planetaria o regional que estén publicados en revistas de alto impacto o albergadas en bases de datos reconocidas. Este hecho lo confirma una búsqueda detallada en sistemas como SCOPUS, lo mismo ocurre si el sondeo se hace para Centroamérica y norte de Sudamérica.

Gran parte de los resultados de la búsqueda son artículos relacionados con cambio climático como los ya citados de Carmona y Poveda (2014); Palomino-Lemus *et al.* (2015) u otros como el de Osorio *et al.* (2016) quienes evalúan fuentes de energía renovables provenientes del océano o el de Calderón *et al.* (2015) que analizan la reducción de las emisiones de CO₂ en Colombia. Otros tipo de artículos que son frecuentes tienen que ver más con aplicaciones de la climatología y la meteorología

como la búsqueda de los vínculos entre el cambio climático y variabilidad climática con vectores de propagación de enfermedades como el dengue, la leishmaniasis o la enfermedad de chagas por citar algunos ejemplos están Cordovez *et al.* (2013); González *et al.* (2013); Quintero-Herrera *et al.* (2015). También sobre el efecto de los parámetros atmosféricos en la producción de especies agrícolas como el café (Turbay *et al.*, 2015), guayaba (Parra-Coronado *et al.*, 2015) entre otros más.

En la búsqueda de referencias relacionadas llaman la atención el trabajo de Duque-Méndez *et al.* (2014) quienes reconocen también la necesidad de realizar más publicaciones sobre los aspectos climáticos del país y plantean nuevos métodos de almacenamiento, control de calidad y análisis de datos meteorológicos, lo cual ha sido uno de los limitantes más mencionados para la investigación en el área. También se debe citar el documento Díaz y Villegas (2015) que trata sobre la relación entre índices macroclimáticos y variables meteorológicas de superficie en Colombia y que fue elaborado por la autora del presente documento razón por la que contiene apartes tomados de este capítulo.

En este contexto el mayor aporte del primer capítulo además de la obtención de zonas con características similares es reunir en un mismo trabajo los aspectos sobresalientes de los procesos climáticos de escala planetaria, gran escala y mesoescala relevantes para la variabilidad climática en el país y que de esta forma sea un insumo para la comunidad científica que requiere una mayor difusión de este conocimiento.

2.4. Conclusiones

La búsqueda de antecedentes sobre el estudio del clima en Colombia permitió identificar los procesos de mayor influencia sobre la variabilidad climática en el país, la descripción de cada uno fue presentada de acuerdo a su escala espacio-temporal característica. El resultado de la recopilación fue la articulación de contenidos para ofrecer un panorama consolidado desde la escala planetaria a la mesoescala. A nivel nacional se reconocen las evidencias y consecuencias del cambio climático, las cuales anticipan un futuro incierto en particular para el sector agrícola. A si mismo se repasa la asociación entre los eventos Niño y Niña con la variabilidad interanual del clima

y la ocurrencia de eventos adversos a la agricultura como sequías, heladas y lluvias fuertes. Se resalta también que la ZCIT además de determinar la estacionalidad de las dos épocas secas y húmedas puede interactuar con sistemas extratropicales, ondas del este, ciclones tropicales o la baja presión de la Amazonía y propiciar temporadas de intensa y prolongada lluvia sobre territorio nacional.

A nivel regional mediante el análisis de clúster realizado con la precipitación, la humedad relativa, el brillo solar y la altitud de la zona de estudio, fueron identificados ocho grandes zonas con características climáticas homogéneas, tres ubicadas en la región central y suroccidental del país, dos en la región suroriental y una en la región noroccidental, Santanderes y cuenca del Catatumbo. El comportamiento de la humedad relativa y el brillo solar a lo largo del año es muy similar en el área de estudio y las diferencias entre los clúster no es tan marcada como si lo es en cuanto a la precipitación y la altitud, los promedios de estas dos variables varían entre el 78 y el 82 % para la humedad y entre 100 y 150 horas de sol. Los rangos de la precipitación y temperatura de las estaciones en cada clúster a lo largo del año fueron variados.

En el primer clúster de la región central los niveles medios mensuales de precipitación oscilan entre 30 y 130 mm con temperatura mínima media de 16°C, máxima de 26°C y temperatura promedio entre 19°C y 23°C. En el segundo la precipitación varía entre 50 y 350mm, la temperatura mínima media es de 20°C, la máxima de 28°C y una promedio entre estaciones de 23°C y 25°C. En el tercero el rango de precipitaciones esta entre 25 y 120mm, temperatura mínima media de 7°C, máxima de 20°C y promedio entre 13°C y 14°C. En el clúster de la región noroccidental la precipitación oscila entre 50 y 250 mm, la temperatura mínima media es de 17°C, la máxima de 28°C y la promedio entre 21°C y 23°C. En el clúster de la región Santanderes se precipitan entre 40 y 200 mm mensuales y la altitud media corresponde a un clima templado. En el de la zona del Catatumbo los niveles medios mensuales de precipitación varían entre 80 y 380mm y la temperatura promedio es superior a 26°C. Finalmente en el séptimo y octavo clúster ubicados al suroriente del existe una sola y extensa temporada húmeda que va desde abril a noviembre y una sola seca de diciembre a abril. Los niveles que se alcanzan son superiores a los demás con precipitaciones que pueden llegar a los 500mm mensuales, la temperatura mínima media varia alrededor de 20°C y la máxima de 32°C, mientras que la promedio entre 24°C y 26°C.

La clasificación obtenida fue coherente con estudios previos de regionalización de la precipitación, además corresponde con la cercanía e influencia de los sistemas sinópticos de gran escala y con los procesos convectivos de mesoescala. Las zonas ubicadas hacia el sector occidental son influenciadas por los sistemas sinópticos del Pacífico que surgen de la interacción entre el relieve y las masas de aire húmedo transportadas por el campo de viento desde el océano hacia el continente. Las zonas entre cordilleras son controladas especialmente por la convección local y el flujo valle-montaña, las del nororiente reciben la influencia de la interacción océano-atmósfera sobre el Atlántico y los del oriente son afectados por la cercanía con la Amazonía.

3. Modelado y simulación del microclima de un invernadero

Los invernaderos son sistemas físicos conformados por un conjunto de objetos que presentan entre sí una interacción de tipo causal. El clima o microclima del invernadero es, en este contexto, el estado del sistema definido según la evolución temporal de magnitudes físicas como la presión de vapor y la temperatura de los elementos presentes. Los invernaderos al ser sistemas físicos con una cantidad de energía asociada en cada instante pueden ser representados por medio de un modelo matemático que permita describir la dinámica de las variables de estado también denominado microclima del invernadero. El análisis del comportamiento del invernadero mediante modelado y simulación tiene como ventajas el ahorro de tiempo y dinero. Ahorro de tiempo porque agiliza la elección de la configuración más eficiente de acuerdo a los requerimientos climáticos establecidos en función del cultivo y ahorro de dinero porque disminuye el gasto de recursos económicos ya que pueden compararse el desempeño de diferentes materiales y dimensiones sin recurrir necesariamente a su implementación real. El presente trabajo fue realizado pensando en estas ventajas y en la necesidad de contar con un modelo de libre acceso que facilite el estudio del microclima en los invernaderos más usados en Colombia.

Durante el proceso fueron estudiadas varias versiones de modelos de microclima buscando aquel que fuera adaptable con la gran variedad de condiciones climáticas del país. Los modelos revisados con mayor detalle se presentan en la tabla **3-1**, todos estos están basados en los mismos principios físicos y se diferencian entre sí en la cantidad de variables de estado, en la parametrización y en el tipo de invernadero para el cual fue implementado. Las referencias de la tabla **3-1** han sido el punto de partida de posteriores publicaciones que reportan mejoras u optimizaciones del modelo, por eso algunas de ellas son tesis o artículos antiguos, pero esenciales para comprender en detalle las ecuaciones que los conforman. Como se aprecia la mayoría

han sido originados en regiones de latitudes medias donde las estaciones climáticas son el limitante principal en la producción agrícola. Por el contrario las referencias sobre el desarrollo o la implementación de modelos de microclima en países latinos son pocas comparadas con las de Europa, Asia o Norteamérica. En Colombia el trabajo más relacionado con el tema es el de Ruiz y Cotrino (2010) el cual considera un modelo tipo caja negra obtenido a partir de datos experimentales, razón de más para contribuir en este campo con la elaboración de un programa de código abierto que puede ser usado bajo las condiciones climáticas del país.

Tabla 3-1.: Modelos del microclima de un invernadero consultados según país de origen o aplicación

Continente	País o Zona	Referencia
Asia	India	Sharma <i>et al.</i> (1999)
Norteamérica	Canadá	Ahmadi y Glockner (1982)
Norteamérica	USA	Takakura (1983)
Asia-Oceanía	Indonesia	Impron <i>et al.</i> (2007)
Europa	Mediterráneo	Boulard <i>et al.</i> (1996)
Europa	Mediterráneo	Zhang (1997)
Europa	Mediterráneo	Wang y Boulard (2000)
Europa	Mediterráneo	Tavares <i>et al.</i> (2001)
Europa	Países Bajos	Bot (1983)
Europa	Países Bajos	van Henten (1994)
Europa	Países Bajos	de Zwart (1996)
Europa	Países Bajos	Vanthoor (2011)

Luego de la revisión bibliográfica, el modelo implementado, programado y calibrado fue el iniciado en la Universidad de Wageningen (Holanda) y desarrollado a través de muchos trabajos dentro de los cuales fueron principal referencia para el presente capítulo los Bot (1983), van Henten (1994), de Zwart (1996) y Vanthoor *et al.* (2011). El modelo holandés fue elegido por tres razones, la primera por ser heurístico, es decir, basado en los principios físicos de conservación que explican los procesos naturales de intercambio de masa y energía que ocurren en el invernadero. La segunda por ser un conjunto de expresiones matemáticas cuya solución requiere métodos numéricos ampliamente difundidos. La tercera por ser adaptable a condiciones climáticas externas que cambian significativamente en periodos de horas como es el caso del clima en Colombia. El presente capítulo presenta la descripción del modelo seleccionado

para su implementación en código abierto y la correspondiente validación. Los resultados alcanzados pretenden ser un aporte que contribuya a la mejor planeación de los proyectos productivos bajo cubierta en el país.

3.1. Descripción del modelo del microclima del invernadero

El Modelo del Microclima del Invernadero (MMI) implementado consiste en un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales planteadas para la temperatura del aire, suelo, cubierta y cultivo en términos de la radiación de energía y los flujos de calor sensible y latente. La presión de vapor y la concentración de CO_2 también son consideradas. El medio se considera homogéneo, sin gradientes espaciales significativos de temperatura, presión de vapor o CO_2 , lo cual es una aproximación al medio real. El invernadero que considera el modelo está conformado por los elementos básicos indicados en la figura 3-1. En la tabla 3-2 son presentados los símbolos de cada elemento tanto básico como de aquellos opcionales para hacer control climático. Los términos correspondientes a los dispositivos de control fueron incluidos en el MMI, a pesar de su limitado uso en Colombia, en caso de ser requeridos.

El microclima o estado del invernadero es definido según la evolución temporal de la temperatura de cada elemento, la presión de vapor y la concentración de CO_2 del aire. Los datos de entrada representan las condiciones climáticas del lugar donde se halla el invernadero, también es una entrada el estado de desarrollo del cultivo dado por el valor del Índice de Área Foliar (IAF) y la concentración de CO_2 . En las tablas 3-3 y 3-4 son presentadas las unidades y símbolos correspondientes, la letra mayúscula indica la variable y el subíndice el elemento respectivo, notación que fue iniciada por de Zwart (1996) y que es usual en el planteamiento de modelos de microclima.

3.1.1. Flujos de masa y energía de un invernadero

En la figura 3-2 son ilustrados los flujos de calor sensible (S) y latente (L), en la figura 3-3 los flujos de radiación fotosintéticamente activa (R_{rfa}), radiación infrarroja cercana (R_{ric}), radiación infrarroja lejana (R_{i-j}) y en la figura 3-4 los flujos de vapor

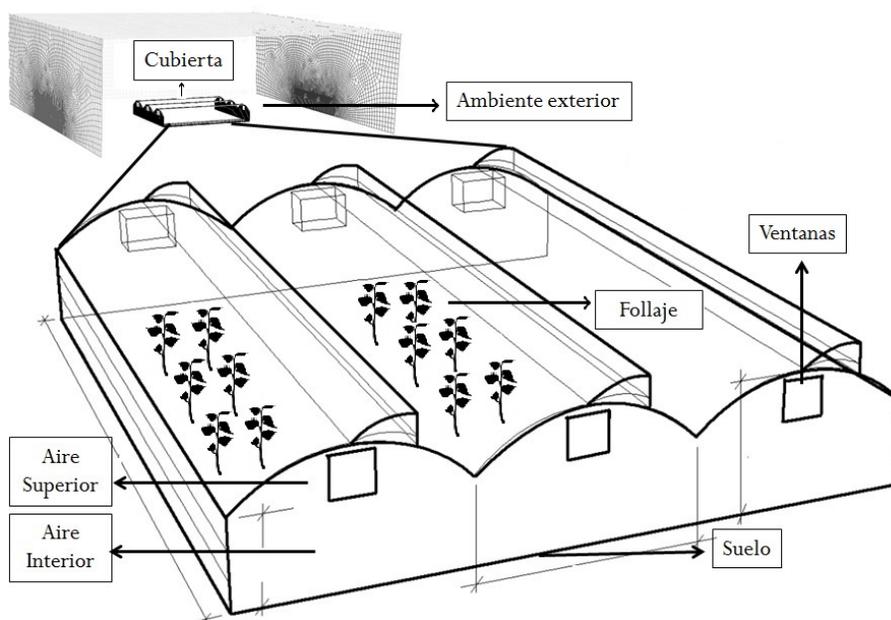


Figura 3-1.: Elementos básicos que conforman el invernadero

Tabla 3-2.: Elementos básicos y opcionales en un invernadero

Función	Nombre	Símbolo	Descripción
Básicos	Suelo	s	Sustrato del cultivo
	Follaje	fo	Conjunto de plantas en crecimiento
	Aire inferior	ai	Aire del invernadero
	Aire superior	as	Volumen de aire en contacto con la cubierta
	Cubierta	c	Paredes y techo del invernadero
	Ventanas laterales	v_{lat}	Ventilación natural lateral
	Ventanas cenitales	v_c	Ventilación natural cenital
Sombra	Pantalla de sombreo	ps	Pantalla externa para controlar ingreso de radiación
	Películas delgadas	psp	Cubrimientos aplicados para elevar el albedo
Enfriamiento	Ventilador	vent	Ventiladores
	Nebulizador	neb	Sistema para elevar la humedad
	Refrigeración mecánica	mec	Sistema para disminuir temperatura
	Panel humidificador	pan	Sistema para control de humedad y temperatura
Calentamiento	Pantalla térmica	pt	Pantalla interna para controlar niveles de radiación
	Tuberías de agua caliente	tub	Sistema utilizado para elevar temperatura
	Aerotermino o calefactor	cal	Equipo para elevar temperatura
	Sistema de calefacción pasiva	pa	Sistema para almacenar calor
Otros	Inyector de CO ₂	co	Equipo para agregar CO ₂ al ambiente

Tabla 3-3.: Variables de estado de un invernadero básico

Variable	Unidad	Elemento	Símbolo
Temperatura	°C	Suelo	T_s
		Follaje	T_{fo}
		Aire inferior	T_{ai}
		Aire superior	T_{as}
		Cubierta	T_c
		Pantalla térmica	T_{pt}
Presión de Vapor	Pa	Aire inferior	PV_{ai}
		Aire superior	PV_{as}
Concentración de CO ₂	mg/m ³	Aire inferior	CO_{ai}
		Aire superior	CO_{as}

Tabla 3-4.: Condiciones de entrada que influyen sobre el microclima del invernadero

Entrada	Unidad	Símbolo
Radiación global	W/m ²	I_{Glob}
Temperatura del aire exterior	°C	T_{ex}
Velocidad del viento	m/s	V_v
Presión de vapor exterior	Pa	PV_{ex}
Temperatura de las capas del suelo	°C	T_{si}
Índice de área foliar	-	IAF
Concentración de CO ₂ exterior	mg/m ³	CO_{ex}

de agua (MV) y de CO₂ (MC) presentes en un invernadero básico. Los subíndices identifican los elementos de la tabla 3-2 entre los cuales ocurre la transferencia, el término *ex* hace referencia al aire externo y *cin*, *ceX* a la parte de la cubierta en contacto con el aire interior y exterior respectivamente. Los recuadros R solar y R cielo representan la radiación que incide sobre el invernadero proveniente del sol y de la emisión de la atmósfera.

En la tabla 3-5 son presentadas las expresiones matemáticas y unidades utilizadas para calcular cada flujo. El flujo de energía transferida por convección, conducción y radiación es función de la diferencia de temperatura entre el elemento *i* (T_i) y el *j* (T_j). El flujo de vapor de agua desde el aire hacia un objeto depende de la diferencia

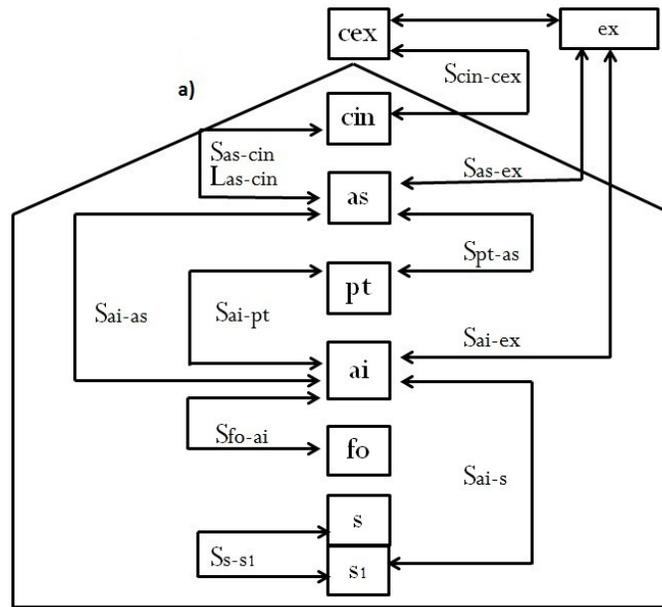


Figura 3-2.: Intercambios de calor sensible y latente entre los elementos

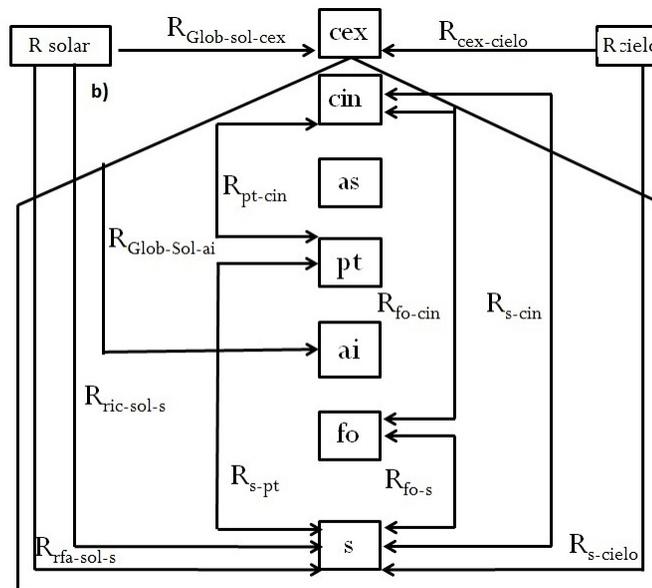


Figura 3-3.: Flujos de radiación entre los elementos del invernadero

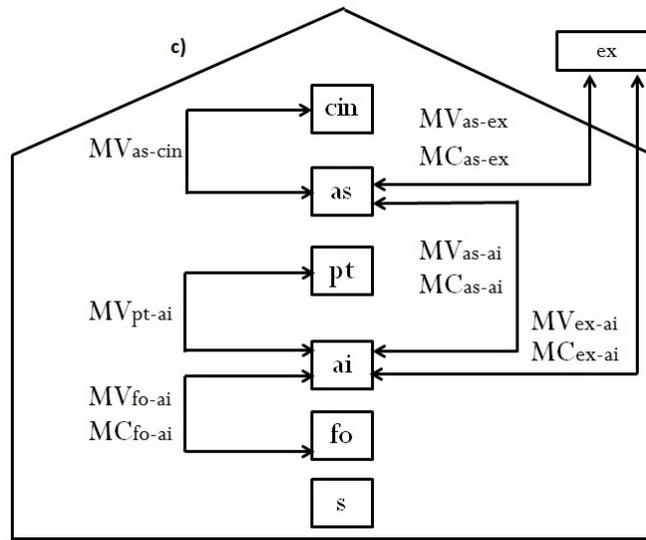


Figura 3-4.: Intercambios de MV entre los elementos del invernadero

entre la presión de vapor del aire (PV_i) y la presión de vapor saturado (PV_j) a la temperatura del objeto. Los términos CIC_{ij} son los coeficientes de intercambio de masa o energía entre el elemento i y el j , ΔH es el calor latente de evaporación, A_{ij} es la superficie del objeto por metro cuadrado de suelo bajo invernadero, ϵ_i y ϵ_j son los coeficientes de emisión infrarroja, F_{ij} es el área efectiva o factor de visión entre i y j y σ la constante de Stefan-Boltzmann. La deducción de los CIC_{ij} puede ser consultada en los trabajos de Bot (1983), de Zwart (1996) o más recientemente en los libros de van Straten *et al.* (2011) y Rodríguez *et al.* (2014). El conocimiento de los flujos entre los elementos del sistema invernadero es la base para plantear el balance de masa y energía para cada elemento del sistema invernadero. Las constantes y parámetros necesarios para el cálculo de cada flujo se resumen en las tablas 3-6, 3-7, 3-8 al final del capítulo.

3.1.2. Sistema de ecuaciones

El sistema de ecuaciones que constituye el MMI fue planteado teniendo en cuenta los flujos de masa y energía de las figuras 3-2, 3-3 y 3-4. Las ecuaciones describen la dinámica de cada variable de estado del invernadero mencionada en la tabla 3-3 por

Tabla 3-5. Flujos de energía y masa considerandos en el invernadero

Flujos	Unidad	Expresión para estimarlo
Calor sensible por convección y conducción	Wm^{-2}	$S_{ij} = CIC_{ij}(T_i - T_j)$
Calor latente	Wm^{-2}	$L_{ij} = \Delta H MV_{ij}$
Vapor de H_2O	$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$MV_{ij} = 6,4 * 10^{-9} CIC_{ij}(PV_i - PV_j)$
Energía por radiación infrarroja	Wm^{-2}	$R_{ij} = A_{ij}\epsilon_i\epsilon_j F_{ij}\sigma(T_i^4 - T_j^4)$

lo que conforman en esencia el modelo del microclima del invernadero. El origen de las ecuaciones planteadas en esta sección puede ser consultada en de Zwart (1996)

- La ecuación para describir la evolución temporal de la temperatura del aire es:

$$cap_{ai} \frac{dT_{ai}}{dt} = R_{Glob-sol-ai} - S_{ai-ex} + S_{fo-ai} - S_{ai-s} - S_{ai-as} \quad (3-1)$$

Donde cap_{ai} es la capacidad calorífica del aire en el invernadero:

$$cap_{ai} = h_{ai}\rho_{ai}cp_{ai} \quad \text{con} \quad \rho_{ai} = \rho_{ai}^* \exp \left[-\frac{ghM_{ai}}{293,15R} \right] \quad (3-2)$$

h_{ai} es la distancia entre el suelo y la pantalla térmica y cp_{ai} es el calor específico del aire. ρ_{ai} es la densidad del aire que varía exponencialmente en función de la altitud h y depende de parámetros como la densidad al nivel del mar ρ_{ai}^* , la gravedad g , la constante universal de los gases ideales R y la masa molar del aire M_{ai} .

$R_{Glob-sol-ai}$ es la cantidad de la radiación solar que llega al invernadero y que en efecto recibe el aire interior:

$$R_{Glob-sol-ai} = I_{Glob}\eta_{Glob-ai}(\tau_{c-RFA}\eta_{Glob-RFA} + (a_{fo-RIC} + a_{s-RIC})\eta_{Glob-RIC}) \quad (3-3)$$

I_{Glob} es la radiación global exterior tomada como condición de entrada (**3-4**), $\eta_{Glob-ai}$ es la cantidad de I_{Glob} que absorbe la estructura del invernadero, $\eta_{Glob-RFA}$ y $\eta_{Glob-RIC}$ son las fracciones de $\eta_{Glob-ai}$ que es fotosintéticamente activa (RFA) e infrarroja cercana (RIC) respectivamente. τ_{c-RFA} , a_{fo-RIC} y a_{s-RIC} son los coeficientes de transmisión de RFA de la cubierta y de absorción de RIC del follaje y del suelo.

S_{ai-ex} es el calor sensible intercambiado entre el aire inferior y el exterior:

$$S_{ai-ex} = CIC_{ai-ex}(T_{ai} - T_{ex}) \quad (3-4)$$

$$CIC_{ai-ex} = \rho_{ai} c p_{ai} (f_{v_{lat}} + f_{v_{for}}) \quad (3-5)$$

T_{ex} es la temperatura del aire exterior tomada como condición de entrada (**3-4**). $f_{v_{lat}}$ y $f_{v_{for}}$ representan la cantidad de m^3/s de aire que ingresa al invernadero de forma natural (ventanas laterales) o forzada respectivamente, para calcularlos se utilizan las ecuaciones 3-119 y 3-120

S_{fo-ai} es el calor sensible intercambiado entre el aire y el follaje:

$$S_{fo-ai} = CIC_{fo-ai}(T_{fo} - T_{ai}) \quad (3-6)$$

$$CIC_{fo-ai} = 2\alpha_{ho-ai} IAF \quad (3-7)$$

T_{fo} es la temperatura del cultivo estimada con la ecuación diferencial expuesta en la expresión 3-102. α_{ho-ai} es el coeficiente de intercambio de calor entre la hoja y el aire.

S_{ai-s} es el calor sensible intercambiado entre el aire y la capa externa del suelo:

$$S_{ai-s} = CIC_{ai-s}(T_{ai} - T_s) \quad (3-8)$$

$$CIC_{ai-s} = \begin{cases} \alpha_{ai-s} \|(T_{ai} - T_s)\|^{0,33} & T_s > T_{ai} \\ \alpha_{ai-s} \|(T_{ai} - T_s)\|^{0,25} & T_s \leq T_{ai} \end{cases} \quad (3-9)$$

T_s es la temperatura del suelo estimada con la ecuación diferencial expuesta en la expresión 3-19. α_{ai-s} es el coeficiente de intercambio de calor entre el aire y suelo.

S_{ai-as} es el calor sensible intercambiado entre el aire inferior y el superior que está ubicado en la parte alta del invernadero y en contacto con la cara interna de la cubierta

$$S_{ai-as} = CIC_{ai-as}(T_{ai} - T_{as}) \quad (3-10)$$

$$CIC_{ai-as} = \rho_{ai} c p_{ai} f_{pt} \quad (3-11)$$

f_{pt} es el flujo de aire que puede pasar a través de la pantalla térmica, la expresión para calcularlo es 3-121.

Los términos a continuación son agregados a la ecuación 3-1 cuando el invernadero cuenta con equipos de control climático y son establecidos los flujos de energía adicionales, el signo que tengan dependerá de si su función es aumentar o disminuir la temperatura del aire.

tuberías de agua caliente:

$$S_{tub-ai} = CIC_{tub-ai}(T_{tub} - T_{ai}) \quad (3-12)$$

$$CIC_{tub-ai} = 1,99\pi\phi_{tub}l_{tub}\|T_{tub} - T_{ai}\|^{0,25} \quad (3-13)$$

ϕ_{tub} y l_{tub} son el diámetro y la longitud de la tubería respectivamente.

Paneles humidificadores:

$$S_{pan-ai} = f_{pan}(\rho_{ai}c_{p_{ai}}T_{ex} - \Delta H\rho_{ai}(\eta_{pan}(x_{pan} - x_{ex}))) \quad (3-14)$$

f_{pan} son los m^3/s de aire que aporta el ventilador, η_{pan} es la eficiencia del sistema, x_{pan} y x_{ex} son las cantidades de vapor de agua dentro y fuera del sistema.

Calefacción:

$$S_{cal-ai} = \frac{P_{cal}}{A_s} \quad (3-15)$$

S_{cal-ai} representa el flujo directo de calor que aporta la calefacción al aire del invernadero, P_{cal} es la potencia del dispositivo y A_s es la superficie de suelo bajo invernadero.

Nebulizadores:

$$L_{ai-neb} = \Delta H MV_{ai-neb} \quad (3-16)$$

$$MV_{ai-neb} = \frac{\phi_{neb}}{A_s} \quad (3-17)$$

L_{ai-neb} es el calor latente necesario para evaporar el agua del follaje cuando se realiza nebulización, ϕ_{neb} es la capacidad del nebulizador.

S_{pas-ai} es el calor sensible que aportaría un sistema de calefacción pasiva en caso de ser adoptado:

$$S_{pa-ai} = CIC_{pa-ai}(T_{si} - T_{ai}) \quad (3-18)$$

- La ecuación para describir la evolución temporal de la temperatura del suelo es:

$$cap_s \frac{dT_s}{dt} = R_{RFA-sol-s} + R_{RIC-sol-s} + R_{fo-s} - R_{s-cin} - R_{s-cielo} \quad (3-19)$$

$$- S_{s-s_i=1} - S_{ai-s} \quad (3-20)$$

Donde cap_s es la capacidad térmica del suelo:

$$cap_s = h_s \rho_s c p_s \quad (3-21)$$

h_s, ρ_s y $c p_s$ son el espesor, la densidad y el calor específico de la primera capa del suelo.

$R_{RFA-sol-s}$ es la radiación fotosintéticamente activa (RFA) que absorbe el suelo.

$$R_{RFA-sol-s} = (1 - \rho_{s-RFA}) R_{RFA-Gh} e^{-K_{1RFA} IAF} \quad (3-22)$$

$$R_{RFA-Gh} = (1 - \eta_{Glob-ai}) \tau_{c-RFA} \eta_{Glob-RFA} I_{Glob} \quad (3-23)$$

ρ_{s-RFA} es el coeficiente de reflexión de RFA del suelo y K_{1RFA} es el coeficiente de extinción de la RFA del follaje.

$R_{RIC-sol-s}$ es la cantidad de RIC que absorbe el suelo.

$$R_{RIC-sol-s} = (1 - \eta_{Glob-ai}) a_{s-RIC} \eta_{Glob-RIC} I_{Glob} \quad (3-24)$$

R_{fo-s} es el flujo de radiación infraroja lejana (RIL) entre el suelo y el follaje:

$$R_{fo-s} = A_{fo} \epsilon_{fo} \epsilon_s F_{fo-s} \sigma ((T_{fo} + 273,15)^4 - (T_s + 273,15)^4) \quad (3-25)$$

$$A_{fo} = 1 - e^{-K_{RIL} IAF}, \quad F_{fo-s} = 1 - 0,49 \pi l_{tub} \phi_{tub} \quad (3-26)$$

ϵ_{fo} y ϵ_s son los coeficientes de emisión de RIL de la planta y del suelo respectivamente y K_{RIL} es el coeficiente de extinción de la RIL del follaje.

R_{s-cin} es el flujo de RIL entre el suelo y la superficie interior de la cubierta:

$$R_{s-cin} = A_s \epsilon_s \epsilon_{cin} F_{s-cin} \sigma ((T_s + 273,15)^4 - (T_{cin} + 273,15)^4) \quad (3-27)$$

$$F_{s-cin} = \tau_{pt-RIL}^* (1 - 0,49 \pi l_{tub} \phi_{tub}) e^{-K_{RIL} IAF} \quad (3-28)$$

$$\tau_{pt-RIL}^* = \begin{cases} 1 & \text{sin pantalla térmica} \\ \tau_{pt-RIL} & \text{con pantalla térmica} \end{cases} \quad (3-29)$$

T_{cin} es la temperatura de la cubierta interna calculada con la ecuación 3-48. ϵ_{cin} es el coeficiente de emisión de RIL de la cara interna de la cubierta y τ_{pt-RIL} es el coeficiente de transmisión de RIL de la pantalla térmica si la hay.

$R_{s-cielo}$ es el flujo de RIL entre el suelo y el cielo:

$$R_{s-cielo} = A_s \epsilon_s \epsilon_{cielo} F_{s-cielo} \sigma ((T_s + 273,15)^4 - (T_{cielo} + 273,15)^4) \quad (3-30)$$

$$F_{s-cielo} = \tau_{c-RIL} (\tau_{pt-RIL}^*) (1 - 0,49 \pi l_{tub} \phi_{tub} e^{-K_{RIL} I_{AF}}) \quad (3-31)$$

τ_{c-RIL} es el coeficiente de transmisión de RIL de la cubierta y ϵ_{cielo} es el coeficiente de emisión de RIL del cielo.

T_{cielo} es la temperatura del cielo y es calculada con la expresion tomada de de Zwart (1996):

$$T_{cielo} = ((1 - fr) \epsilon_{cielo}^* (T_{ex} + 273,15)^4 + fr (T_{ex} + 273,15)^4 - \frac{9}{\sigma})^{0,25} \quad (3-32)$$

ϵ_{cielo}^* es el coeficiente de emisión de RIL del cielo despejado y se calcula mediante la expresión:

$$\epsilon_{cielo}^* = 0,53 + 6 * 10^{-3} (PV_{ex})^{0,5} \quad (3-33)$$

Donde PV_{ex} es la presión de vapor externa calculada a partir de la temperatura de punto de rocío que está en función de las condiciones de entrada: temperatura y humedad relativa (ecuación 3-122).

fr es la fracción de nubes presentes en el cielo, se estima a partir de la razón entre la radiación solar que recibe el invernadero (I_{Glob}) y la que llega asumiendo cielo completamente despejado (I_{Sol}):

$$fr = \frac{\sum I_{Glob}}{\sum I_{Sol}} \quad (3-34)$$

$$(3-35)$$

La sumatoria se realiza sobre las horas de cada día que se está analizando. Para estimar $\sum I_{Sol}$ se programó un módulo independiente en función de la latitud y la longitud del lugar. El módulo calcula la longitud del día, de la noche, la hora del

amanecer, del atardecer e I_{Sol} . En resumen la nubosidad en cualquier instante es calculada como la razón entre la radiación solar que recibe el invernadero y la que llega asumiendo cielo completamente despejado. Cuando no hay radiación el denominador de esta expresión sería nulo por tanto en la noche la nubosidad se calcula como un valor promedio entre la nubosidad de un día con la del día siguiente.

La expresión 3-32 ha sido validada para lugares donde predominan los cielos cubiertos. El ideal es contar con una expresión o modelo validado en el lugar donde se necesita calcular la temperatura del cielo. Para el MMI se utilizó la expresión 3-32 y también se utilizó la propuesta consignada en Impron *et al.* (2007) que ha sido planteada para todas las condiciones de cielo.

$$T_{cielo} = 94 + 12,6In(T_{ex}) - 13fr + 0,341T_{ex} \quad (3-36)$$

Para la validación del MMI se utilizó 3-36.

$S_{s-s_{i=1}}$ representa la energía transferida por conducción entre la capa externa s y la primera capa interna de suelo $s_{i=1}$, la cual dependerá de la temperatura de cada una de ellas.

$$S_{s-s_{i=1}} = CIC_{s-s_i}(T_s - T_{s_{i=1}}) \quad (3-37)$$

$$CIC_{s-s_i} = \frac{2\lambda_s}{h_{s_{i=1}} + h_s} \quad (3-38)$$

$$(3-39)$$

λ_s es la conductividad térmica del suelo, h_s y $h_{s_{i=1}}$ son el espesor de la primera y siguiente capa del suelo respectivamente.

$T_{s_{i=1}}$ es la temperatura de la capa $s_{i=1}$. $T_{s_{i=1}}$ depende de la temperatura de la capa $s_{i=2}$ y esta a su vez de la de $s_{i=3}$ y así sucesivamente hasta $i = n$ donde n hace referencia a la capa donde la temperatura puede considerarse constante. Debido a que en las primeras capas de suelo la temperatura varía con el tiempo debe calcularse el valor de cada una de ellas para poder estimar el valor de $S_{s-s_{i=1}}$ en cada instante, para hacerlo hay dos posibilidades:

-La primera opción es determinar la temperatura de cada capa mediante una ecuación diferencial tal como lo propone Vanthoor *et al.* (2011).

-La segunda opción es programar un modelo independiente de temperatura de suelo de tal forma que la salida de dicho modelo se convierta en entrada al MMI.

En otras palabras en la primera opción la temperatura de cada capa de suelo es una variable de estado y en la segunda opción es una condición de entrada. En el presente trabajo se consideró la segunda opción.

S_{ai-s} es descrito en la ecuación 3-8.

En caso de tener sistemas de tuberías de agua cálida también habrá que incluirse el término R_{tub-s} a la ecuación 3-19, R_{tub-s} es el flujo de RIL entre el suelo y el sistema de tuberías:

$$R_{tub-s} = A_{tub}\epsilon_{tub}\epsilon_s F_{tub-s}\sigma((T_{tub} + 273,15)^4 - (T_s + 273,15)^4) \quad (3-40)$$

$$A_{tub} = \pi l_{tub}\phi_{tub}, \quad F_{tub-s} = 0,49 \quad (3-41)$$

ϵ_{tub} es el coeficiente de emisión de RIL de la tubería.

- El aire superior como se mencionó al plantear la ecuación 3-10 es aquel que está ubicado en la parte alta del invernadero y en contacto con la cara interna de la cubierta. La ecuación que describe la dinámica de la temperatura del aire superior es:

$$cap_{as}\frac{dT_{as}}{dt} = -S_{as-cin} - S_{as-ex} + S_{ai-as} \quad (3-42)$$

cap_{as} es la capacidad del aire en el compartimiento:

$$cap_{as} = h_{as}\rho_{ai}cp_{ai} \quad h_{as} = h_{Gh} - h_{ai} \quad (3-43)$$

h_{Gh} es la distancia entre el suelo y la cubierta y h_{ai} es la distancia entre el suelo y la pantalla térmica.

S_{as-cin} es el calor sensible intercambiado entre el aire superior y la cara interna de

la cubierta:

$$S_{as-cin} = CIC_{as-cin}(T_{as} - T_{cin}) \quad (3-44)$$

$$CIC_{as-cin} = CCI_{ex}(|T_{as} - T_{cin}|)^{0,33} \frac{A_c}{A_s} \quad (3-45)$$

CCI_{ex} es el coeficiente de intercambio de calor entre la cubierta y el aire exterior y A_c es el área de la cubierta incluyendo paredes.

S_{as-ex} es el calor sensible intercambiado entre el aire superior y el aire exterior:

$$S_{as-ex} = CIC_{as-ex}(T_{as} - T_{ex}) \quad (3-46)$$

$$CIC_{as-ex} = \rho_{ai} cp_{ai} f_{vc} \quad (3-47)$$

f_{vc} representan los m^3s^{-1} de aire que ingresan al invernadero por las ventanas cenitales, las expresiones para estimar su valor se presentan en la sección 3.1.2.

- La ecuación para describir la evolución temporal de la temperatura de la superficie interior de la cubierta es:

$$cap_{cin} \frac{dT_{cin}}{dt} = R_{fo-cin} + R_{s-cin} - S_{cin-cex} + S_{as-cin} + L_{as-cin} \quad (3-48)$$

$$(3-49)$$

cap_{cin} es la capacidad calorífica de la cubierta:

$$cap_{cin} = 0,1cap_c \quad (3-50)$$

$$cap_c = \begin{cases} \cos(\psi)(h_{psp}\rho_{psp}cp_{psp} + h_c\rho_c cp_c) & \text{con psp} \\ \cos(\psi)(h_c\rho_c cp_c) & \text{sin psp} \end{cases} \quad (3-51)$$

h_{psp} , h_c , ρ_{psp} , ρ_c , cp_{psp} y cp_c son el espesor, la densidad y el calor específico de la pantalla semipermanente (psp) y la cubierta (c).

R_{fo-cin} es el flujo de RIL intercambiado con el follaje:

$$R_{fo-cin} = A_{fo}\epsilon_{fo}\epsilon_{cin}F_{fo-cin}\sigma((T_{fo} + 273,15)^4 - (T_{cin} + 273,15)^4) \quad (3-52)$$

$$F_{fo-cin} = \tau_{pt-RIL}^* \quad (3-53)$$

$$(3-54)$$

$S_{cin-cex}$ es el flujo de calor sensible entre la cubierta interna y la externa

$$S_{cin-cex} = CIC_{cin-cex}(T_{cin} - T_{cex}) \quad (3-55)$$

$$CIC_{cin-cex} = \frac{\lambda_c}{h_c} \quad (3-56)$$

λ_c es la conductividad térmica de la cubierta.

L_{as-cin} es el calor latente necesario para evaporar el agua ubicada sobre la cara interna de la cubierta:

$$L_{as-cin} = \Delta H M V_{as-cin} \quad (3-57)$$

$$M V_{as-cin} = \frac{6,4 * 10^{-9} C I C_{as-cin} (P V_{as} - P V_{cin})}{1 + \exp [s_v (P V_{as} - P V_{cin})]} \quad (3-58)$$

$$P V_{cin} = 610,78 \exp \left[\frac{17,0809 T_{cin}}{T_{cin} + 234} \right] \quad (3-59)$$

s_v es la pendiente de la función para las diferencias de presión de vapor en función de la temperatura.

R_{s-cin} y S_{as-cin} son descritos en la ecuación 3-27 y 3-44 respectivamente.

Si hay tuberías de agua cálida se adiciona el término:

$R_{tub-cin}$ es el flujo de RIL intercambiado con la tubería:

$$R_{tub-cin} = A_{tub} \epsilon_{tub} \epsilon_{cin} F_{tub-cin} \sigma ((T_{tub} + 273,15)^4 - (T_{cin} + 273,15)^4) \quad (3-60)$$

$$F_{tub-cin} = (\tau_{pt-RIL}^*) 0,49 e^{-K_{RIL} I A F} \quad (3-61)$$

- La ecuación para describir la evolución temporal de la temperatura de la cubierta exterior es:

$$cap_{cex} \frac{dT_{cex}}{dt} = R_{Glob-sol-cex} + S_{cin-cex} - R_{cex-cielo} - S_{cex-ex} \quad (3-62)$$

cap_{cex} es la capacidad calorífica de la cubierta definida igual que cap_{cin} en la ecuación 3-50.

$R_{Glob-sol-ces}$ es la radiación solar que absorbe la cubierta exterior:

$$R_{Glob-sol-ces} = (a_{c-RFA}\eta_{Glob-RFA} + a_{c-RIC}\eta_{Glob-RIC})I_{Glob} \quad (3-63)$$

a_{c-RFA} y a_{c-RIC} son los coeficientes de absorción de RFA y RIC de la cubierta.

$R_{ces-cielo}$ es el flujo de RIL intercambiado con el cielo:

$$R_{ces-cielo} = A_{ces}\epsilon_{ces}\epsilon_{cielo}F_{ces-cielo}\sigma((T_{ces} + 273,15)^4 - (T_{cielo} + 273,15)^4) \quad (3-64)$$

$$A_{ces} = 1 \quad F_{ces-cielo} = 1 \quad (3-65)$$

ϵ_{ces} es el coeficiente de emisión de RIL de la cubierta externa.

S_{ces-ex} es el calor sensible intercambiado entre la cubierta exterior y el aire exterior:

$$S_{ces-ex} = CIC_{ces-ex}(T_{ces} - T_{ex}) \quad (3-66)$$

$$CIC_{ces-ex} = (A_c A_s)(CCI_{ex1} + CCI_{ex2} V_v^{CCI_{ex3}}) \quad (3-67)$$

CCI_{ex1} , CCI_{ex2} y CCI_{ex3} son coeficientes de intercambio de calor entre la cubierta y el aire exterior.

$S_{cin-ces}$ es descrita en la ecuación 3-55

- La ecuación para describir la evolución temporal de la presión de vapor del aire es:

$$capPV_{ai} \frac{dPV_{ai}}{dt} = MV_{fo-ai} - MV_{ai-ex} - MV_{ai-as} \quad (3-68)$$

$capPV_{ai}$ es la capacidad del aire de almacenar vapor de agua:

$$capPV_{ai} = \frac{M_{ag}}{h_{ai}R(T_{ai} + 273,15)} \quad (3-69)$$

M_{ag} es la masa molar del agua.

MV_{fo-ai} es el vapor intercambiado entre el aire y el follaje:

$$MV_{fo-ai} = VEC_{fo-ai}(PV_{fo} - PV_{ai}) \quad (3-70)$$

$$VEC_{fo-ai} = \frac{(2\rho_{ai}c_{p_{ai}}IAF)}{(\Delta H\gamma(r_b + r_s))} \quad (3-71)$$

γ es la constante psicométrica, r_b es la resistencia de la capa límite del follaje al transporte de vapor y r_s es la mínima resistencia del follaje a la transpiración.

MV_{ai-ex} es el vapor intercambiado entre el aire inferior con el exterior:

$$MV_{ai-ex} = \left[\frac{M_{ag} f_{ai-ex}}{R} \right] \left[\frac{PV_{ai}}{T_{ai} + 273,15} - \frac{PV_{ex}}{T_{ex} + 273,15} \right] \quad (3-72)$$

$$MV_{ai-ex} = \left[\frac{M_{ag} f_{pan}}{R} \right] \left[\frac{PV_{ai}}{T_{ai} + 273,15} \right] \quad (3-73)$$

$$f_{ai-ex} = f_{v_{lat}} + f_{v_{for}} \quad (3-74)$$

MV_{ai-as} es el vapor intercambiado entre el aire inferior y el superior:

$$MV_{ai-as} = \left[\frac{M_{ag} f_{ai-as}}{R} \right] \left[\frac{PV_{ai}}{T_{ai} + 273,15} - \frac{PV_{as}}{T_{as} + 273,15} \right] \quad (3-75)$$

$$f_{ai-as} = f_{pt} \quad (3-76)$$

$$(3-77)$$

Si hay elementos adicionales como paneles humidificadores, calefacción o nebulización deberán agregarse a la ecuación para presión de vapor los siguientes términos.

MV_{pan-ai} es el vapor intercambiado con el panel humidificador:

$$MV_{pan-ai} = \rho_{ai} f_{pan} (\eta_{pan} (x_{pan} - x_{ex}) + x_{ex}) \quad (3-78)$$

MV_{cal-ai} es el vapor intercambiado con la calefacción:

$$MV_{cal-ai} = \eta_{vap} S_{cal-ai} \quad (3-79)$$

η_{vap} es el vapor liberado por Joule de calor sensible producido por el calentador, S_{cal-ai} es definido en 3-15.

MV_{ex-pan} es el flujo de vapor entre el aire exterior e interior cuando se utiliza el panel humidificador:

$$MV_{ex-pan} = f_{Pad} \frac{M_{agua}}{R} \left(\frac{VP_{Air}}{T_{Air} + 273,15} \right) \quad (3-80)$$

$$(3-81)$$

MV_{ai-neb} es el vapor intercambiado con el sistema de nebulización definido en 3-16

- La ecuación para describir la evolución temporal de la presión de vapor del aire superior:

$$capPV_{as} \frac{dPV_{as}}{dt} = MV_{ai-as} - MV_{as-cin} - MV_{as-ex} \quad (3-82)$$

$capPV_{as}$ es la capacidad del aire superior para almacenar vapor de agua:

$$capPV_{as} = \frac{M_{ag}h_{as}}{R(T_{as} + 273,15)} \quad (3-83)$$

MV_{ai-as} es descrito en la sección 3-75.

MV_{as-cin} es el vapor intercambiado con la cara interior de la cubierta:

$$MV_{as-cin} = \left[\frac{1}{1 + \exp [s_v(PV_{as} - PV_{cin})]} \right] 6,4 * 10^{-9} CIC_{as-cin} (PV_{as} - PV_{cin}) \quad (3-84)$$

$$(3-85)$$

CIC_{as-cin} y PV_{cin} es descrito en las ecuaciones 3-44 y 3-57.

MV_{as-ex} es el vapor intercambiado con el aire externo:

$$MV_{as-ex} = \frac{M_{ag}f_{as-ex}}{R} \left[\frac{PV_{as}}{T_{as} + 273,15} - \frac{PV_{ex}}{T_{ex} + 273,15} \right] \quad f_{as-ex} = f_{v_c} \quad (3-86)$$

f_{v_c} es descrito en la ecuación 3-118

- La ecuación para describir la evolución temporal de la concentración de CO_2 del aire:

$$capCO_{ai} \frac{dCO_{ai}}{dt} = -MC_{ai-fo} - MC_{ai-ex} - MC_{ai-as} \quad (3-87)$$

$capCO_{ai}$ es la capacidad del aire del invernadero de almacenar CO_2 :

$$capCO_{ai} = h_{ai}CO_{ai} \quad (3-88)$$

$$(3-89)$$

MC_{ai-fo} es el CO_2 que consume el cultivo y su valor depende del proceso de fotosíntesis y de la respiración de las plantas.

MC_{ai-ex} es el CO_2 intercambiado entre el aire del invernadero y el aire exterior:

$$MC_{ai-ex} = f_{ai-ex}(CO_{ai} - CO_{ex}) \quad (3-90)$$

$$(3-91)$$

f_{ai-ex} es definido en 3-72

MC_{ai-as} es el CO_2 intercambiado entre el aire inferior y el aire superior:

$$MC_{ai-as} = f_{ai-as}(CO_{ai} - CO_{as}) \quad (3-92)$$

f_{ai-as} es definido en 3-75

En caso de tener elementos adicionales que por su funcionamiento aporten CO_2 deberán incluirse en la ecuación 3-87 los siguientes términos correspondientes a cada dispositivo:

MC_{cal-ai} que es el CO_2 intercambiado entre el aire y la calefacción:

$$MC_{cal-ai} = \eta_{CO_2} S_{cal-ai} \quad (3-93)$$

$$(3-94)$$

η_{CO_2} es el CO_2 liberado por Joule de calor sensible producido por la calefacción y S_{cal-ai} es definido en 3-15.

MC_{Ext-ai} que es el CO_2 que aporta la fuente externa al interior del invernadero:

$$MC_{Ext-ai} = \frac{\phi_{ExtCO_2}}{A_s} \quad (3-95)$$

$$(3-96)$$

ϕ_{ExtCO_2} es la capacidad de la fuente externa de CO_2 .

MC_{pan-ai} que es el CO_2 que aporta el uso de panel humidificador:

$$MC_{pan-ai} = f_{pan}(CO_{pan} - CO_{ai}) \quad (3-97)$$

$$CO_{pan} = CO_{ex} \quad (3-98)$$

- La ecuación para describir la evolución temporal de la concentración de CO_2 del aire en la parte superior es:

$$capCO_{as} \frac{dco_{as}}{dt} = MC_{ai-as} - MC_{as-ex} \quad (3-99)$$

$capCO_{as}$ es la capacidad del aire de almacenar CO_2 :

$$capCO_{as} = (h_{Gh} - h_{ai})CO_{as} \quad (3-100)$$

MC_{ai-as} es descrito en la ecuación 3-92.

MC_{as-ex} es el flujo de CO_2 intercambiado entre el aire superior y el exterior:

$$MC_{as-ex} = f_{as-ex}(CO_{as} - CO_{ex}) \quad (3-101)$$

f_{as-ex} es definido en 3-86.

- La ecuación para describir la evolución temporal de la temperatura del cultivo es:

$$cap_{fo} \frac{dT_{fo}}{dt} = R_{RFA-sol-fo} + R_{RIC-sol-fo} - S_{fo-ai} - L_{fo-ai} - R_{fo-cin} - R_{fo-s} - R_{fo-cielo} \quad (3-102)$$

cap_{fo} es la capacidad calorífica del follaje:

$$cap_{fo} = cap_{ho}IAF \quad (3-103)$$

cap_{ho} es la capacidad calorífica de un metro cuadrado de cultivo.

$R_{RFA-sol-fo}$ es la radiación RFA que el follaje absorbe:

$$R_{RFA-sol-fo} = R_{RFA-sol-fo}^* + R_{RFA-s-fo} \quad (3-104)$$

$$R_{RFA-sol-fo}^* = R_{RFA-Gh}(1 - \rho_{fo-RFA})(1 - e^{-K_1 RFA IAF}) \quad (3-105)$$

$$R_{RFA-s-fo} = R_{RFA-Gh}e^{-K_1 RFA IAF} \rho_{s-RFA}(1 - \rho_{fo-RFA})(1 - e^{-K_2 RFA IAF}) \quad (3-106)$$

ρ_{fo-RFA} y ρ_{s-RFA} son los coeficientes de reflexión de RFA de la planta y el suelo respectivamente. R_{RFA-Gh} se definió en 3-22.

$R_{RIC-sol-fo}$ es la radiación RIC que el follaje absorbe:

$$R_{RIC-sol-fo} = (1 - \eta_{Glob-ai})a_{fo-RIC}\eta_{Glob-RIC}I_{Glob} \quad (3-107)$$

$R_{fo-cielo}$ es el flujo de RIL entre el follaje y el cielo:

$$R_{fo-cielo} = A_{fo}\epsilon_{fo}\epsilon_{cielo}F_{fo-cielo}\sigma((T_{fo} + 273,15)^4 - (T_{cielo} + 273,15)^4) \quad (3-108)$$

$$F_{fo-cielo} = \tau_{c-RIC}\tau_{pt-RIC} \quad (3-109)$$

τ_{c-RIC} es el coeficiente de transmisión de RIC de la cubierta y en caso de tener τ_{pt-RIC} sería el correspondiente coeficiente de la pantalla térmica

L_{fo-ai} es el flujo de calor latente debido a la transpiración de las plantas:

$$L_{fo-ai} = \Delta H M V_{fo-ai} \quad (3-110)$$

S_{fo-ai} , R_{fo-cin} y R_{fo-s} son definidos en 3-6, 3-52 y 3-25 respectivamente.

Cuando hay tuberías de agua caliente deberá adicionarse:

R_{tub-fo} es el flujo de RIL entre el follaje y la tubería:

$$R_{tub-fo} = A_{tub} \epsilon_{tub} \epsilon_{fo} F_{tub-fo} \sigma ((T_{tub} + 273,15)^4 - (T_{fo} + 273,15)^4) \quad (3-111)$$

$$F_{tub-fo} = 0,49(1 - e^{-K_{1RFA} I A F}) \quad (3-112)$$

Expresiones relacionadas con la ventilación

La ventilación en un invernadero puede ser natural o forzada, con ventilación natural el flujo de aire entre el exterior y el interior ocurre a través de ventanas que pueden estar ubicadas en las paredes laterales y/o en el techo del invernadero. Con ventilación forzada el flujo de aire depende del dispositivo utilizado para crear el flujo de aire. Para calcular la cantidad de aire que ingresa al invernadero en cada caso se utilizaron las expresiones consignadas en Kittas *et al.* (1997); Boulard y Baille (1995); Perez-Parra *et al.* (2004):

- La expresión para calcular la cantidad de metros cúbicos de aire que ingresan cada segundo por unidad de área del invernadero a través de las aperturas cenitales es:

$$f_{vc}^* = \frac{A_c C_d}{2A_s} \sqrt{\frac{g h_v}{2} \frac{T_{ai} - T_{ex}}{T + 273,15} + C_w V_v^2} \quad (3-113)$$

C_d es el coeficiente de descarga que depende de la forma de las aperturas, C_w es el coeficiente de la presión del viento global, h_v es la dimensión vertical de las aperturas y V_v es la velocidad del viento tomada como condición de entrada.

- La expresión para calcular la cantidad de metros cúbicos de aire que ingresan cada segundo por unidad de área del invernadero a través de las aperturas laterales es:

$$f_{v_{lat}}^* = \frac{C_d A_{lat} V_v}{2A_s} \sqrt{C_w} \quad (3-114)$$

A_{lat} es el área de las ventanas laterales.

- La expresión para calcular la cantidad de metros cúbicos de aire que ingresan cada segundo por unidad de área del invernadero a través de las aperturas cenitales y ventanas laterales es:

$$f_{v-lat-c}^* = \frac{C_d}{A_s} \sqrt{\left(\frac{A_{lat} A_c}{\sqrt{A_c^2 + A_{lat}^2}}\right)^2 \left(2gh_{lat-c} \frac{T_{ai} - T_{ex}}{T + 273,15}\right) + \left(\frac{A_{lat} + A_c}{2}\right)^2 C_w V_v^2} \quad (3-115)$$

h_{lat-c} es la distancia entre los puntos medios de las aperturas laterales y cenitales.

Cuando se utilizan mallas anti-insectos se debe tener en cuenta el efecto que tienen sobre el flujo de aire que ingresa al invernadero, la ventilación se reduce en un factor η_{Ins} :

$$\eta_{Ins} = \zeta_{Ins}(2 - \zeta_{Ins}) \quad (3-116)$$

ζ_{Ins} es el área de cada orificio por unidad de área de la malla.

Por otra parte debe considerarse la ganancia o pérdida de aire a través de fugas que ocurren por los espacios que no quedan completamente cerrados en la estructura del invernadero, para estimar este flujo se utiliza la expresión:

$$f_f = \begin{cases} 0,25c_f & V_v < 0,25 \\ V_v c_f & V_v \geq 0,25 \end{cases} \quad (3-117)$$

c_f es el coeficiente de fuga que depende de la estructura del invernadero.

Considerando los efectos mencionados de las mallas anti-insectos y de las fugas, las expresiones finales para calcular las tasas de ventilación por las aperturas del techo (f_{v_c}) y las ventanas laterales ($f_{v_{lat}}$) serían:

$$f_{v_c} = \begin{cases} \eta_{Ins} f_{v_c}^* + 0,5 f_f & \text{si } \eta_c \geq \eta_{ch} \\ \eta_{Ins} f_{v-lat-c} \eta_c + 0,5 f_f & \text{sin pt } \eta_c < \eta_{ch} \\ \eta_{Ins} f_{v_c}^* + 0,5 f_f & \text{con pt } \eta_c < \eta_{ch} \end{cases} \quad (3-118)$$

$$f_{v_{lat}} = \begin{cases} \eta_{Ins} f_{v_{lat}}^* + 0,5 f_f & \text{si } \eta_c \geq \eta_{ch} \\ \eta_{Ins} f_{v-lat-c} \eta_c + 0,5 f_f & \text{sin pt } \eta_c < \eta_{ch} \\ \eta_{Ins} f_{v_{lat}}^* + 0,5 f_f & \text{con pt } \eta_c < \eta_{ch} \end{cases} \quad (3-119)$$

η_c es la razón entre el área de la apertura del techo y el área total de ventilación y η_{ch} es el umbral por encima del cual no se considera que ocurra el efecto chimenea.

Cuando la ventilación es forzada la expresión para estimar el flujo de aire es:

$$f_{v_{for}} = \phi_{v_{for}} / A_s \quad (3-120)$$

$\phi_{v_{for}}$ es el flujo de aire que el sistema de ventilación forzada puede aportar.

Si existe pantalla térmica la expresión para calcular el flujo de aire que pasa a través de la pantalla es:

$$f_{pt} = \begin{cases} K_{pt} | T_{Air} - T_{out} |^{0,66} & \text{con pt} \\ (\rho_{ai} g 2 \rho_{ai} | \rho_{ai} - \rho_{ex} |)^{0,5} & \text{sin pt} \end{cases} \quad (3-121)$$

K_{pt} es el coeficiente de flujo de aire que pasa a través de la pantalla térmica.

3.2. Simulación de la temperatura del aire y presión de vapor al interior de un invernadero a escala, Richel y tradicional

El conjunto de ecuaciones descrito en la sección anterior constituye el MMI que fue elegido para simular el comportamiento del invernadero. El MMI fue escrito en el lenguaje de programación R utilizando la interfaz gráfica Rsudio y solucionado mediante la librería deSolve diseñada por Soetaert *et al.* (2010) para resolver ecuaciones diferenciales. El MMI pertenece a la categoría de problemas de valor inicial de un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden y por tanto solucionable mediante la familia de algoritmos Runge-Kutta con pasos de tiempo fijos y variables incluidos en deSolve. En el presente caso se optó por Runge-Kutta de orden cuatro como método numérico y paso de tiempo de un minuto. El código escrito permite modificar los datos de entrada al paso de tiempo del método numérico o por el contrario cambiar el paso de tiempo del método al de la resolución de los datos de entrada.

Las simulaciones con el modelo fueron realizadas para tres tipos de invernaderos; dos de ellos pertenecientes al Centro de Bio-Sistemas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano ubicado en Chía (Cundinamarca) y un tercero instalado en el municipio de Santa Sofía (Boyacá). La figura 3-5 muestra la ubicación y vista superior de los invernaderos utilizados.

- El primer invernadero fue un invernadero pequeño (IP) construido a escala. La estructura del IP tenía plástico de calibre 8 (0,200mm) excepto el techo donde tenía calibre 10 (0,250 mm). En este caso no había cultivo y estaba completamente cerrado como se observa en la figura 3-6.
- El segundo fue un invernadero RICHEL (IR) tipo capilla 9.6 XR MODELO G, referencia AGROCLEAR XF. En la parte frontal, lateral y culata tenía plástico calibre 8 (0.200 mmm) y en techo y ventanas calibre 10 (0.250mm). Caso sin cultivo y únicamente con ventilación cenital como se observa en la figura 3-7.
- El tercero fue un invernadero tradicional (IT) de madera, construido con plástico calibre 8 (0.200 mmm). Caso con cultivo, ventilación natural cenital per-

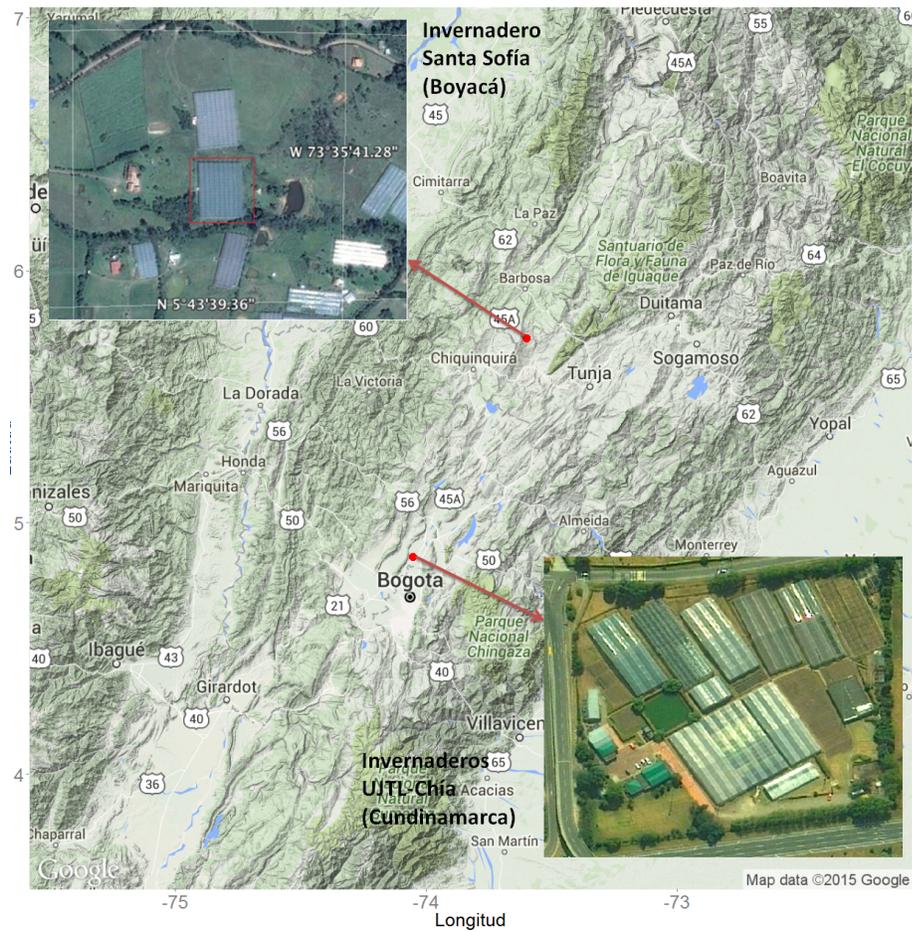


Figura 3-5: Ubicación de los invernaderos usados para la validación. Abajo: Centro de Bio-Sistemas. (UJTL). Chía, Cundinamarca. Arriba: Invernadero en Santa Sofía, Boyacá.

manente y lateral con cierre de ventanas a las 6:00pm y apertura alrededor de las 8:00 am. Las dimensiones de los tres casos son descritas en la tabla **3-9**.



Figura 3-6.: Invernadero pequeño (IP) utilizado en la validación.



Figura 3-7.: Invernadero Richel (IR) usado en la validación.

Tabla 3-9.: Dimensiones de los invernaderos usados en la validación

Parámetro	IP	IR	IT
Ancho de naves (m)	7	9.6	7
Largo de naves (m)	9	15	90
Número de naves (-)	1	2	9
Largo invernadero (m)	9	15	90
Ancho invernadero (m)	7	19.2	63
Área invernadero (m ²)	63	288	5670
Altura bajo canal (m)	2.3	4	3.6
Altura cumbre (m)	3.5	6.5	5
Pendiente de la canal (°)	19	22	22

Los parámetros correspondientes a cada uno de los tres invernaderos IP, IR e IT fueron tomados de trabajos como Vanthoor *et al.* (2011); Leal y Pissani (2010). Las condiciones de entrada de la tabla 3-4 fueron recolectados de la siguiente manera:

- La radiación global, temperatura del aire y velocidad del viento en el exterior fueron registrados durante épocas y periodos de tiempo distintos. Las medidas fueron hechas con una estación meteorológica compacta METOS (Pessl Instruments) con los sensores ubicados a 2m de altura respecto al suelo. En el IP los datos fueron registrados cada seis minutos desde el 21 hasta el 27 de marzo de 2012 para una primera prueba con plástico negro sobre el suelo y desde el 30 de marzo hasta el 5 de abril de 2012 para una segunda prueba con plástico blanco. En el IR los datos fueron grabados cada 10 minutos para el periodo del 10 al 16 de noviembre de 2012. Para el IT fueron tomados cada hora durante abril-agosto de 2012. La toma de datos con periodos diferentes obedece al propósito de probar el código del MMI con datos de entrada de varias resoluciones.
- La presión de vapor del aire exterior fue calculada en función de la temperatura y la humedad relativa del aire a partir de la expresión sugerida por la Organización Meteorológica Mundial en la guía de instrumentos meteorológicos y métodos de observación (OMM, 2008) .

$$PV = 611,2 \exp \left[\frac{17,62 * T}{T + 243} \right] \quad (3-122)$$

Donde T es la temperatura del aire cuando se calcula la presión de vapor saturado o la temperatura de punto de rocío si se calcula la presión de vapor.

- La temperatura de las capas de suelo fue estimada utilizando el módulo también escrito en lenguaje R, el cual contiene el modelo para simular la temperatura del suelo a diferentes profundidades. Los valores fueron calculados con la misma resolución temporal que la usada para tomar los datos climáticos del punto anterior.
- El índice de área foliar también fue estimado mediante un módulo escrito en lenguaje R con la misma resolución temporal. El modulo contiene un modelo de crecimiento del cultivo de tomate el cual fue calibrado y validado por miembros del grupo de Modelado y Simulación de Biosistemas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano. El modelo se describe en Gil *et al.* (2015).
- La concentración de CO_2 en el exterior fue considerada constante debido a que en los dos primeros casos no había cultivo que pudiera modificar los niveles de CO_2 y en el tercero el invernadero no estaba cerrado o semicerrado como para permitir una variación considerable de esta variable.

Los datos del microclima al interior de los invernaderos fueron medidos usando dos termocuplas (T-type, copper-constantan) ubicadas dentro de cápsulas ventiladas que registraban la temperatura de bulbo húmedo y seco. Cada termocupla estaba conectada a un datalogger remoto (Escort DLS EJ-2E) que registraba la información. Los datos de las variables atmosféricas recolectados por cada estación se organizan en un archivo Inputs.csv, al cual se adiciona los valores de IAF y T_{s_i} . En el código se establecen condiciones iniciales y paso de tiempo. El código lee Inputs.csv, calcula los parámetros ópticos, los términos I_{Sol} , fr , T_{cielo} y los flujos de energía y masa y resuelve los valores de las variables de estado por cada paso de tiempo. Dentro del código se incluyen parámetros de control que activan o desactivan los términos según sean necesarios, por ejemplo si hay tuberías de agua cálida el parámetro de

control estara en 1 sino estará en 0. Estos parámetros de control facilitarán futuros estudios sobre control y optimización del sistema invernadero. Para tener acceso al código solicitarlo al autor del presente documento. No fue incluido como anexo ya que todo el código escrito ocupa 60 páginas y hacía demasiado extenso el documento.

La validación de los resultados se realiza de forma cualitativa a través de las gráficas de los valores observados y simulados y de forma cuantitativa estimando las siguientes medidas de desviación:

Eficiencia del modelado (EM), un $EM = 1$ implica un ajuste perfecto y un $ME < 0$ indica que no hay concordancia entre el valor observado y el simulado (Mayer y Butler, 1993).

$$EM = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{obs,i} - y_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{obs,i} - \bar{y}_{obs})^2} \quad (3-123)$$

Coefficiente de determinación del Modelo (CD), $CD = 1$ equivale a un ajuste perfecto, $CD > 1$ indica que el modelo tiene tendencia a subestimar los datos respecto a los valores reales y $CD < 1$ implica, por el contrario, que la simulación sobrestima la realidad (Tedeschi, 2006).

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{sim,i} - \bar{y}_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{obs,i} - \bar{y}_{obs})^2} \quad (3-124)$$

Dos medidas de error: el Coeficiente del error (CE) y el Error cuadrático medio relativo (ECMR). $C=0$ es el ajuste perfecto, valores mayores o menores equivalen a una baja capacidad de predicción del modelo (J. *et al.*, 2000). ECMR indica en porcentaje la concordancia entre las observaciones y los valores simulados, un umbral igual o menor al 10 % se considera aceptable para modelos dinámicos determinísticos como el MMI (Vanthoor, 2011).

$$CE = \frac{\sum_{i=1}^n (|y_{obs,i} - y_{sim,i}|)}{n\bar{y}_{obs}} \quad (3-125)$$

$$ECMR = \frac{100}{\bar{y}_{obs}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{sim,i} - y_{obs,i})^2} \quad (3-126)$$

Donde \bar{y}_{obs} y \bar{y}_{sim} son el promedio de los datos medidos y simulados respectivamente, n es el número de observaciones realizadas, $y_{sim,i}$ es el dato simulado en el paso de tiempo i y $y_{obs,i}$ es el dato real en el mismo instante i .

3.3. Validación de la simulación

3.3.1. Caso I: Invernadero a escala

El proceso de validación con el invernadero IP fue realizado para dos casos. En el primero el suelo fue cubierto con plástico negro y en el segundo con plástico blanco. La figura 3-8 muestra las variables de entrada para el proceso de validación registrada cada seis minutos en ambos casos.

El MMI fue compilado con los datos de radiación solar, temperatura del aire exterior, velocidad del viento, presión de vapor del aire y temperatura del suelo. Los resultados obtenidos en la simulación son presentados en la figura 3-9. La línea roja corresponde a los datos medidos al interior del invernadero y la negra a los datos simulados.

En el caso del plástico negro sobre el suelo el modelo predijo la temperatura del aire en el invernadero IP con una eficiencia (EM) de 0.95, un coeficiente de determinación (CD) del 1.25, un error (CE) de 0.01 y un error cuadrático medio relativo (ECMR) del 3,1 %. En el caso del plástico blanco los valores fueron respectivamente EM= 0.97, CD=1.07, CE=0.01 y ECMR del 2.79 %. En ambos casos los valores de las medidas de desviación están dentro de los límites que indican una concordancia entre los valores simulados y los observados de acuerdo a los criterios expuestos en Tedeschi (2006) y Ruiz y Cotrino (2010). La predicción del MMI para el segundo caso fue ligeramente mejor, esto puede deberse a que los valores para las propiedades físicas y los coeficientes de reflexión fueron más adecuados para el plástico blanco que para el negro, en todo caso los dos escenarios de validación mostraron la eficiencia del MMI para predecir la temperatura en un ambiente sencillo y pequeño como el del invernadero IP, además de lograr representar condiciones de suelo diferentes.

La similitud entre los datos simulados y los reales es mayor durante el día y menor en la noche; esto puede explicarse por la forma en que se está estimando la nubosidad

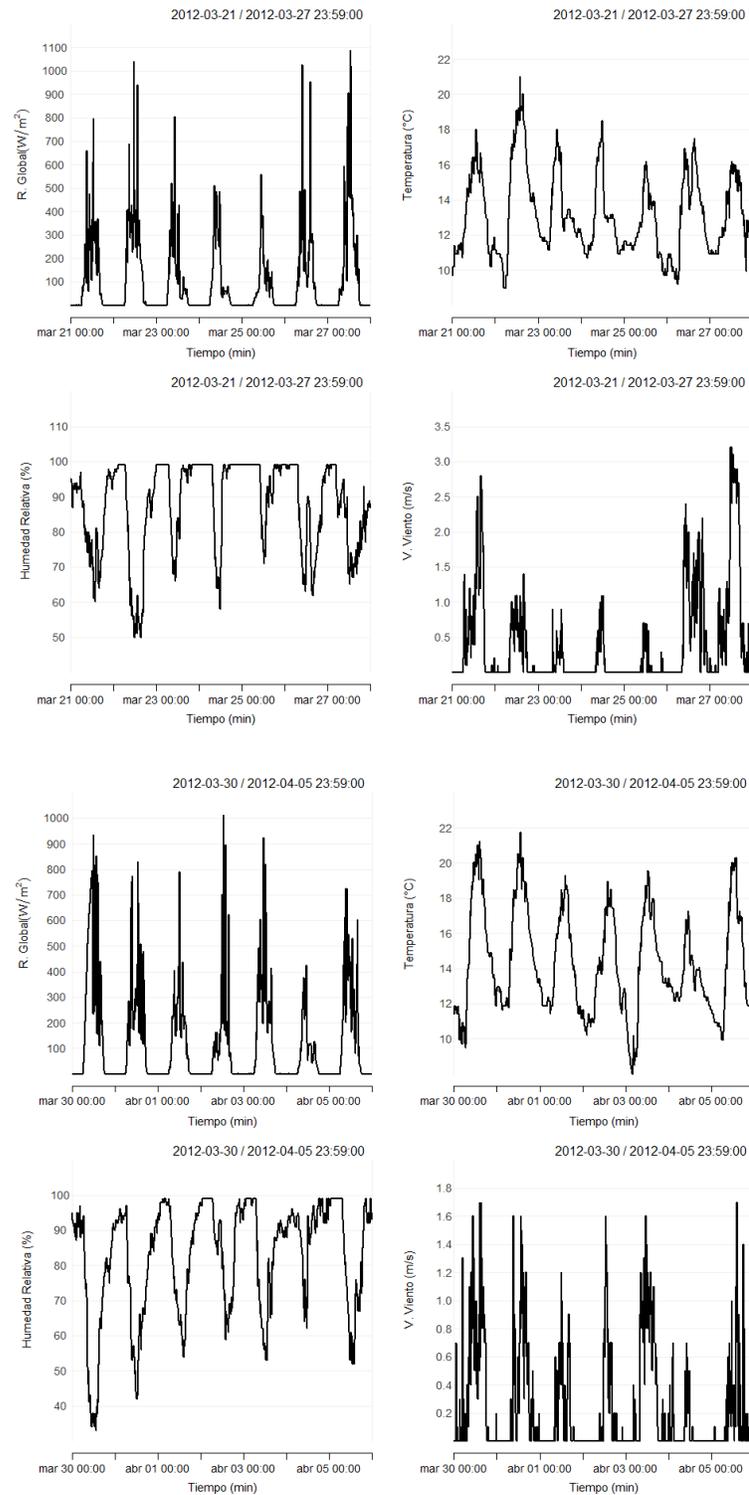


Figura 3-8.: Variables registradas al exterior del invernadero IP cada seis minutos del 21 al 27 de marzo de 2012 con el plástico negro y desde el 30 de marzo al 5 de abril de 2012 con el plástico blanco. Fuente: Esta investigación

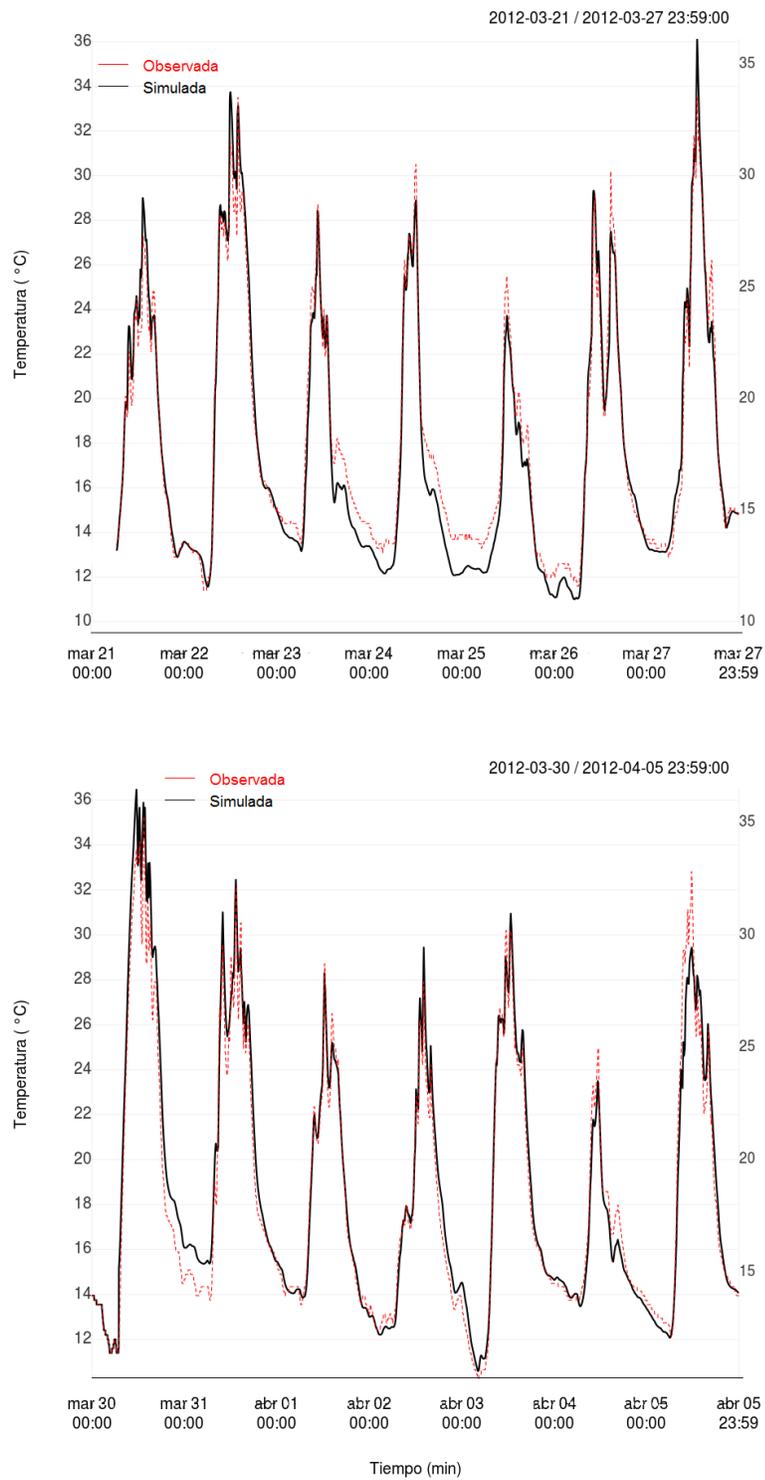


Figura 3-9.: Resultados de la simulación de la temperatura del aire en el invernadero IP

nocturna en el MMI. En la descripción de la ecuación 3-34 se mencionó que esta es estimada como el promedio entre la nubosidad de un día y la del día siguiente, este cálculo puede subestimar la nubosidad para países como Colombia, ubicados en el ecuador, bajo la constante influencia de la zona de convergencia intertropical (sección 2.1.3) y de procesos convectivos generados por la presencia de las cordilleras (2.1.4). Baille *et al.* (2006) en su trabajo recalca que cielos con poca nubosidad generan grandes pérdidas de energía de la cubierta hecho que se refleja en la temperatura interna del aire. (Montero *et al.*, 2013) por su parte analiza el efecto de pantallas de sombra para evitar esta fuga de energía en la noche, limitando justamente el efecto de la nubosidad en el balance de energía del invernadero, este tipo de estrategias serán retomadas en el capítulo cuatro. A pesar de la aproximación los valores están dentro del margen aceptable para los propósitos de la investigación.

La poca discrepancia entre los datos reales y simulados en este primer caso obedece a que se tiene el invernadero cerrado y sin cultivo, hecho que hace anular varios términos que dependen de parámetros que no se conocen con exactitud como los asociados a las tasas de intercambio y renovación del aire o a la transpiración del cultivo. Además el reducido volumen de aire encerrado contribuye a considerarlo en efecto como un medio homogéneo, sin diferencias significativas de temperatura, presión de vapor o CO_2 , lo cual es uno de los supuestos fundamentales en el planteamiento de los modelos de microclima que no consideran las tres dimensiones espaciales (Bojaca *et al.*, 2009).

3.3.2. Caso II: Invernadero Richel

El proceso de validación con el invernadero IR fue realizado para incluir los términos de ventilación, a diferencia del caso anterior que era de volumen menor y estaba completamente cerrado, el invernadero IR tenía ventilación cenital y era de mayor tamaño. La figura 3-10 muestra las variables de entrada medidas cada diez minutos. Los resultados obtenidos en la simulación para el invernadero IR de la temperatura del aire y la presión de vapor son presentados en las figuras 3-11 y 3-12 respectivamente. La línea roja corresponde a los datos medidos al interior del invernadero y la negra a los datos simulados.

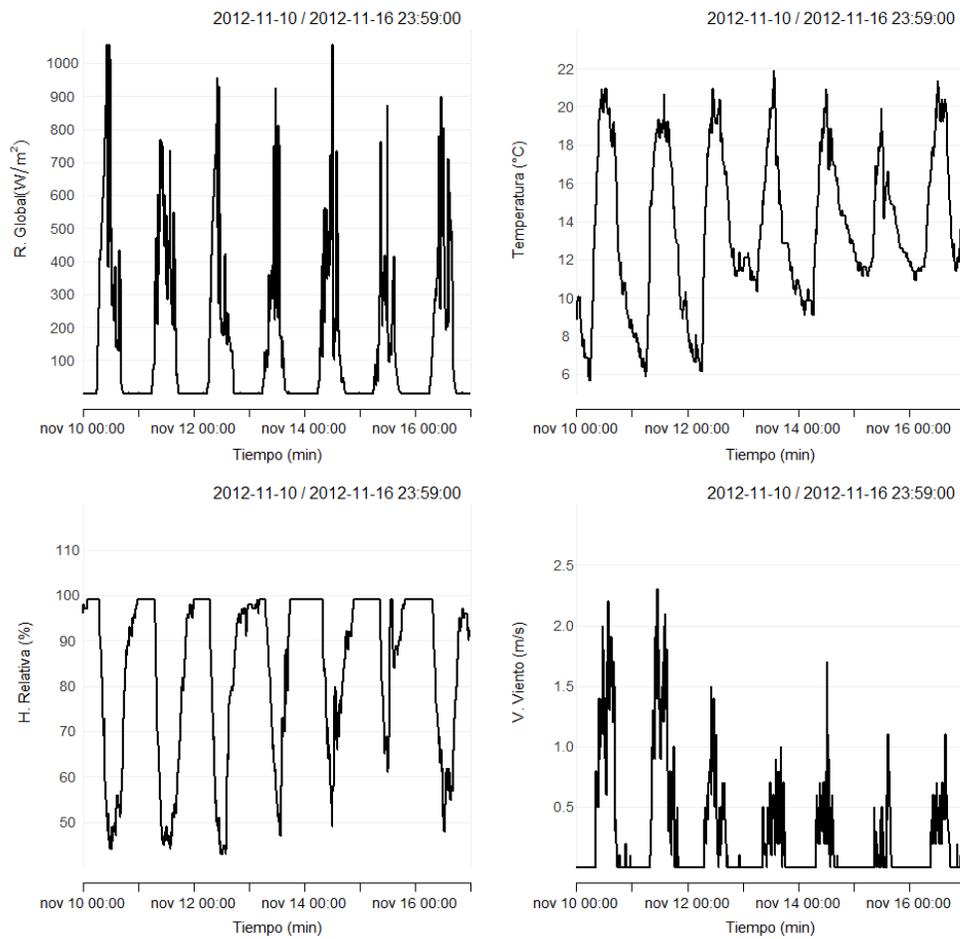


Figura 3-10.: Variables registradas al exterior del invernadero IR cada diez minutos del 10 al 16 de Noviembre de 2012

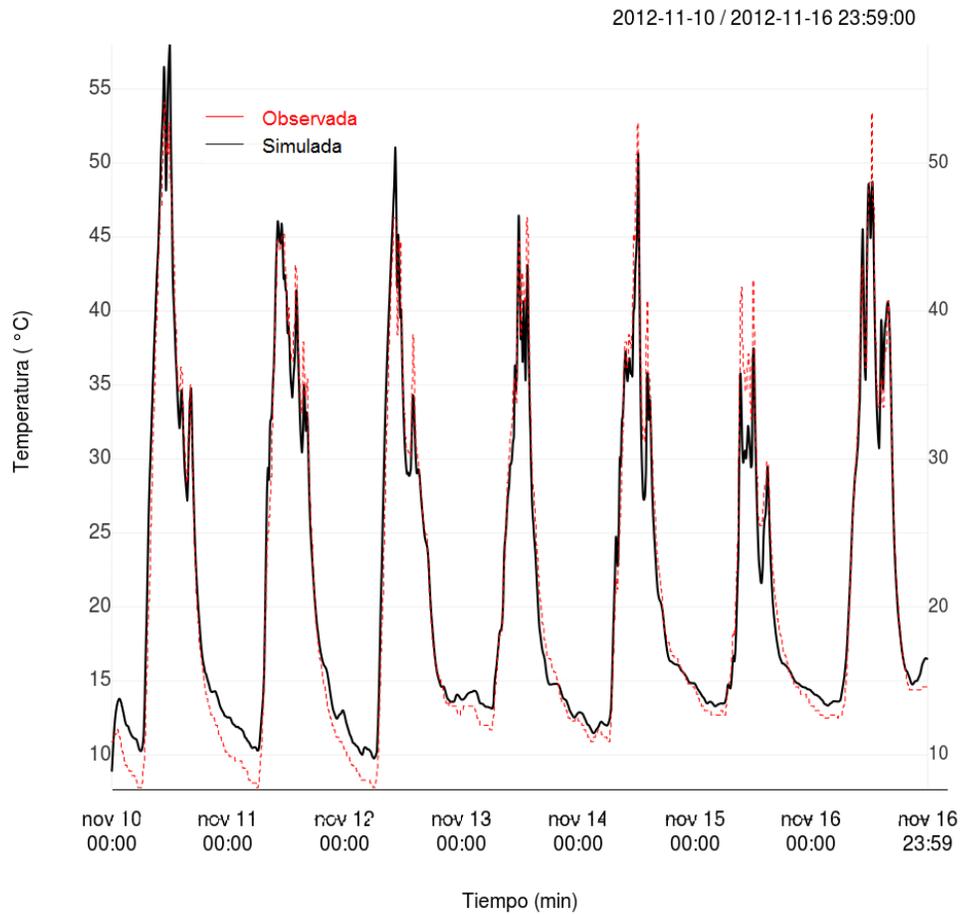


Figura 3-11.: Resultados de la simulación de la temperatura del aire en el invernadero IR

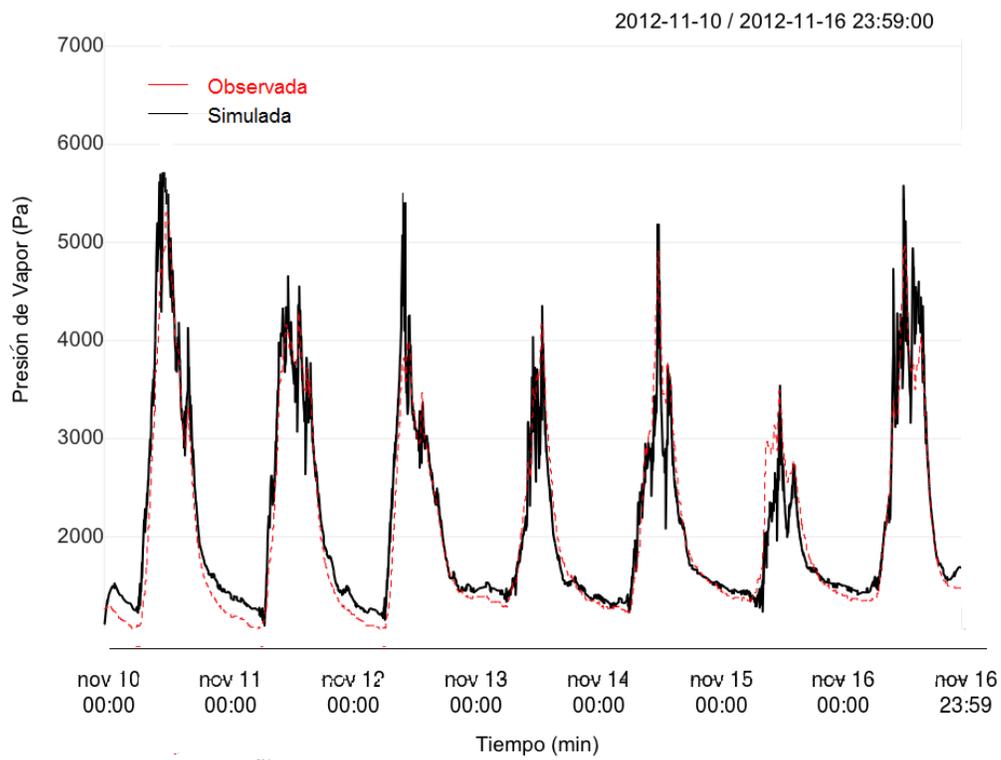


Figura 3-12.: Resultados de la simulación de la presión de vapor en el invernadero IR

El MMI predijo la temperatura del aire en el invernadero IR con una eficiencia (EM) de 0.97, un coeficiente de determinación (CD) del 0.88, un error (CE) de 0.02 y un error cuadrático medio relativo (ECMR) del 4,7%. En el caso de la presión de vapor fueron respectivamente EM= 0.98, CD=1.05, CE=0.05 y ECMR del 3.0%. El valor de las medidas de desviación continúa en el rango considerado como aceptable en este tipo de modelos. Al igual que con el invernadero IP la mayor diferencia entre los datos simulados y los reales ocurre en horas de la noche y parte de la madrugada por las mismas razones planteadas en el caso anterior. Una de las razones que podría explicar un incremento de las medidas de desviación es la inclusión de los términos de ventilación que contienen tres coeficientes de intercambio de calor entre la cubierta y el aire exterior que eran desconocidos. En este caso fueron tomados para un invernadero de techo en arco y doble pared de polietileno (Vanthoor *et al.*, 2011), similar al Richel pero no igual. Aunque los valores elegidos están dentro del rango para este tipo de invernadero, la discrepancia en la geometría y el tiempo de uso influyen sobre las propiedades físicas y ópticas de los materiales y los valores de los coeficientes pueden variar (Boshell, 2009), apesar de esta condición un error del 4,7% indica que el proceso de calibración fue apropiado.

3.3.3. Caso III: Invernadero tradicional

El proceso de validación con el invernadero IT fue realizado para un ciclo completo de cultivo. El propósito con este invernadero fue incluir las variables asociadas al desarrollo del dosel. Los datos de entrada fueron medidos cada hora. La figura **3-13** muestra las variables de entrada desde abril hasta agosto organizadas en cuatro bloques debido a su extensión temporal. Los registros entre el 11 de Mayo y el 11 de junio fueron descartados por no superar el control de calidad de los datos pues más de la mitad de los valores de temperatura y humedad estuvieron fuera del rango aceptable para estas variables.

Los resultados obtenidos en la simulación de la temperatura del aire y de la presión de vapor para el invernadero IT son presentados en las figuras **3-14** a **3-21**. La línea roja corresponde a los datos medidos al interior del invernadero y la negra a los datos simulados. La letra W seguida de un número que aparece bajo las curvas de temperatura y humedad relativa indican la semana de año correspondiente a la fecha de la simulación.

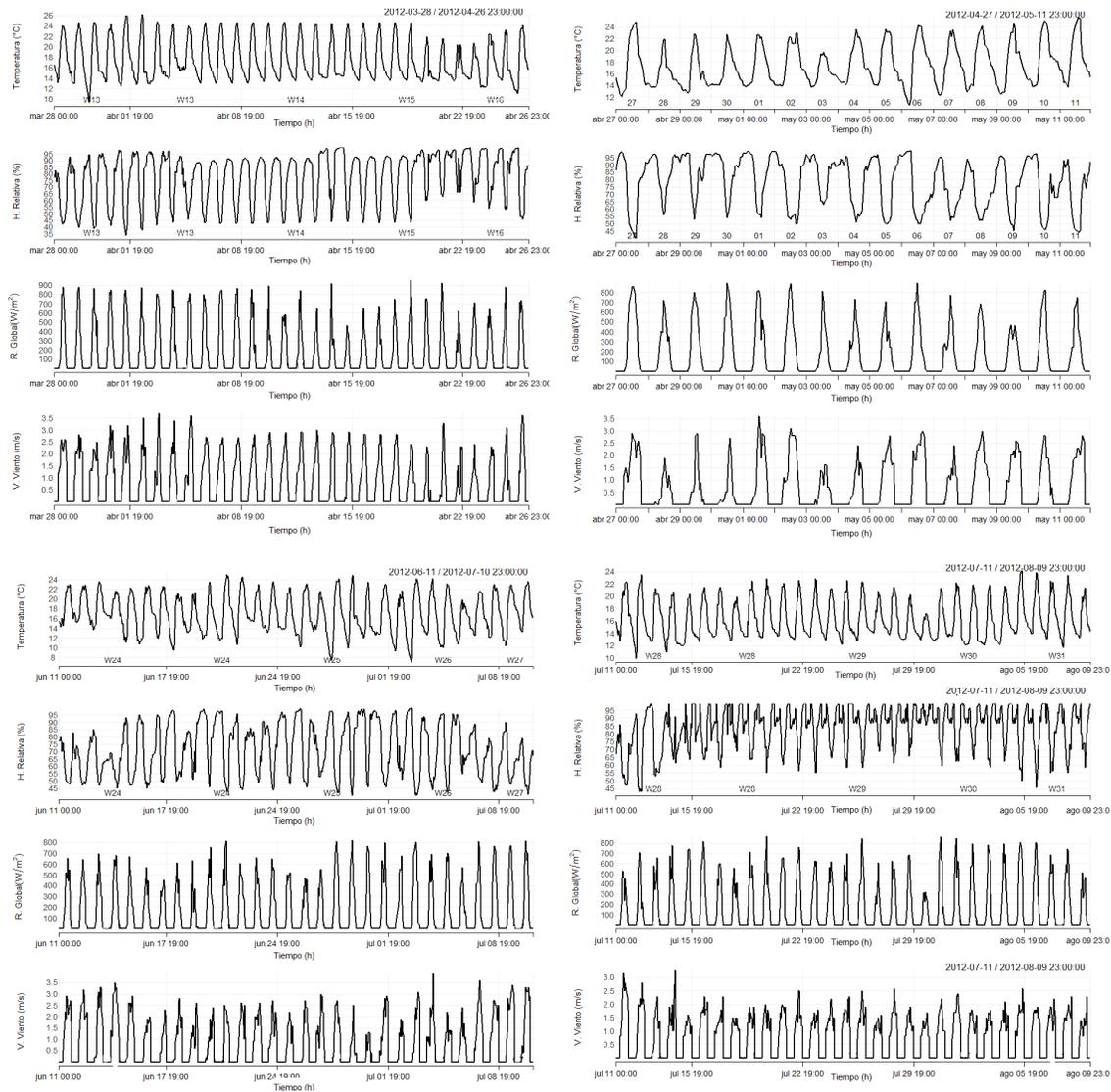


Figura 3-13.: Variables registradas al exterior del invernadero IT cada hora desde el 28 de marzo hasta el 9 de agosto de 2012. Fuente: Esta investigación

En el caso del invernadero tradicional IT el modelo predijo la temperatura del aire con una eficiencia (EM) de 0.79, un coeficiente de determinación (CD) del 1.01, un error (CE) de 0.07 y un error cuadrático medio relativo (ECMR) del 11,75 %. En el caso de la presión de vapor EM= 0.71, CD=1.3, CE=0.09 y ECMR del 13.70 %. El principal hecho que permitió la simulación de más de tres meses fue que el valor del LAI fue estimado también mediante un modelo con la misma resolución temporal de los demás datos de entrada (Gil *et al.*, 2015). Las mayores diferencias entre la simulación y los datos reales para el invernadero IT ocurren en la semana 15 (W15), 27 (W27), y 28 (W28) como se puede apreciar en las figuras **3-14**, **3-17**, **3-18** y **3-21**. Al buscar estas semanas en los datos de entrada de la figura **3-13** se observa un comportamiento atípico en la variable humedad relativa. Las alteraciones en la medida de humedad relativa modifican las estimaciones de la presión de vapor del aire exterior y en consecuencia la estimación del flujo de vapor entre el aire interior y exterior (ecuación 3-72). Cambios en la estimación de este flujo afecta el cálculo de la presión de vapor del aire interior (ecuación 3.1.2) y en consecuencia la del flujo de calor latente (ecuación 3-110) entre el aire y las plantas debido a la transpiración. Tales modificaciones finalmente influyen sobre la ecuación para la temperatura del cultivo (ecuación 3-102) y del aire (ecuación 3-1).

La comparación entre las gráficas de temperatura y presión de vapor y los errores estimados sugieren que el MMI representa mejor el comportamiento de la temperatura que el de la presión de vapor. La estimación de la presión de vapor cuando no hay dispositivos de control depende de la interacción del aire con el cultivo y del intercambio de aire entre el medio interior y el exterior, como se puede ver en las ecuaciones 3-70 y 3-72 estos dos términos contienen parámetros relacionados con el cultivo como la resistencia de la capa límite del dosel al transporte de vapor y otros relacionados con los flujos de aire. En el caso del IT el cultivo era de tomate y se usaron parámetros calculados y verificados en van Straten *et al.* (2011); Vanthoor (2011); van Straten *et al.* (2011). Por el contrario en el caso de la ventilación la estimación del flujo de aire para invernaderos tradicionales puede cambiar de un caso a otro debido a las fugas que puede tener la estructura.

Por otra parte en el MMI se programó la apertura y cierre de ventanas laterales a la misma hora todos los días (8:00am,5:00pm) pero esto en muchas ocasiones no es

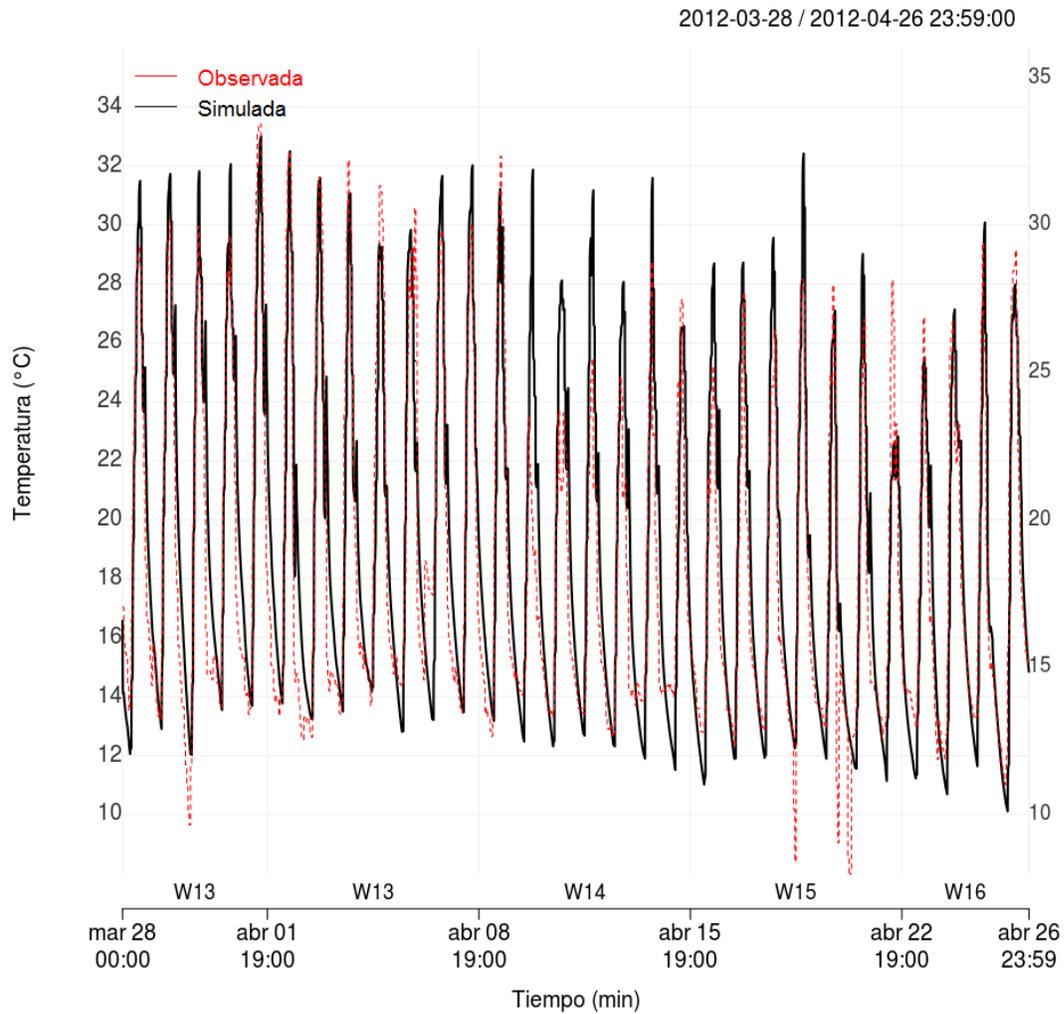


Figura 3-14.: Resultados de la simulación de la temperatura del aire en el invernadero IT para el periodo del 28 de marzo al 26 de abril

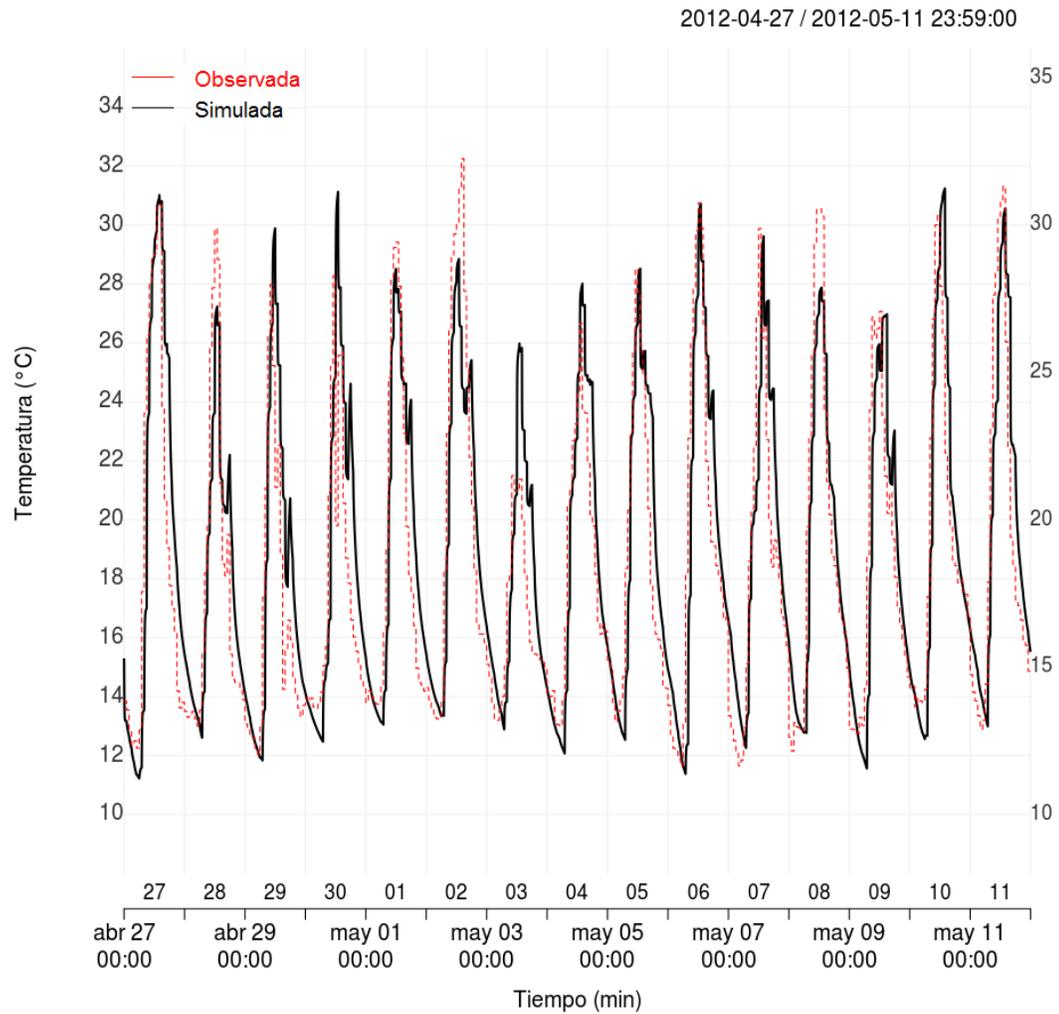


Figura 3-15.: Resultados de la simulación de la temperatura del aire en el invernadero IT para el periodo del 27 de abril al 11 de mayo

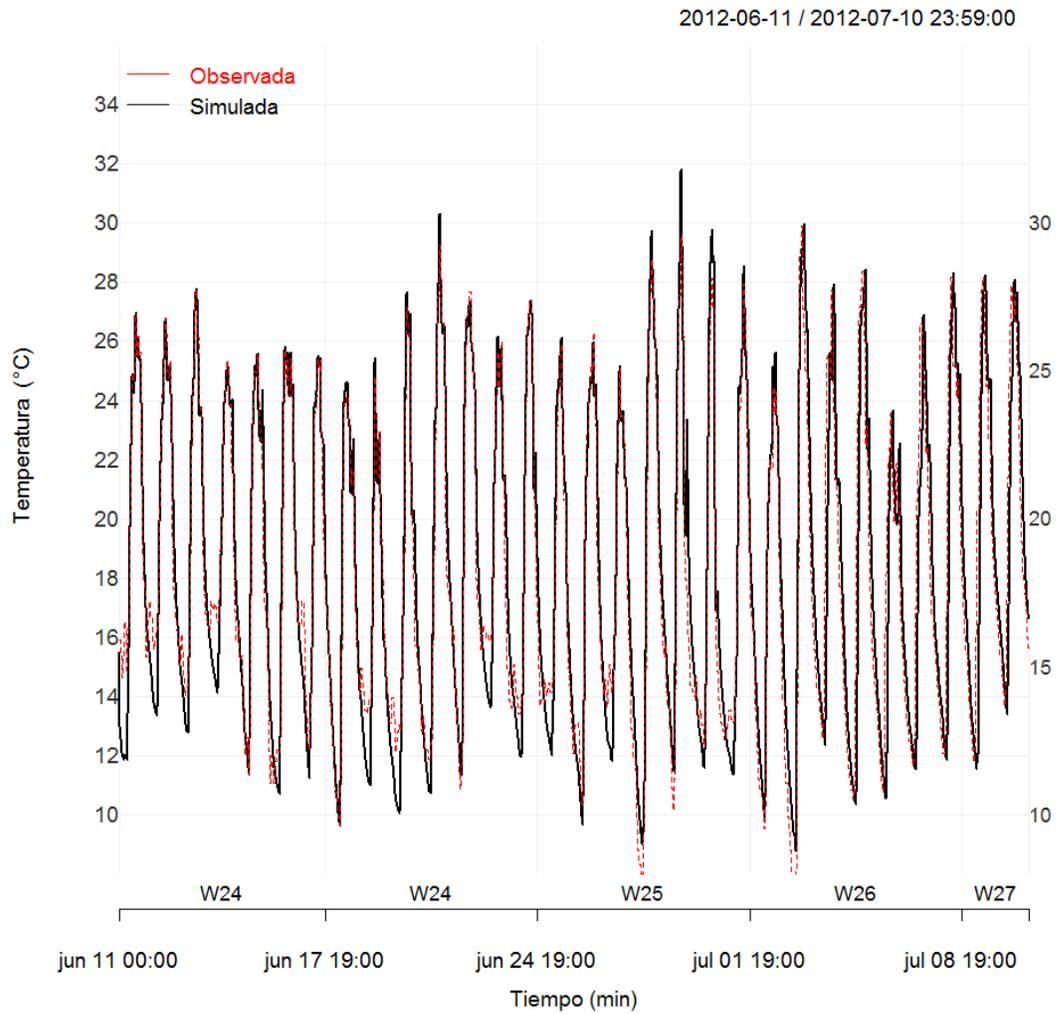


Figura 3-16.: Resultados de la simulación de la temperatura del aire en el invernadero IT para el periodo del 11 de junio al 8 de julio

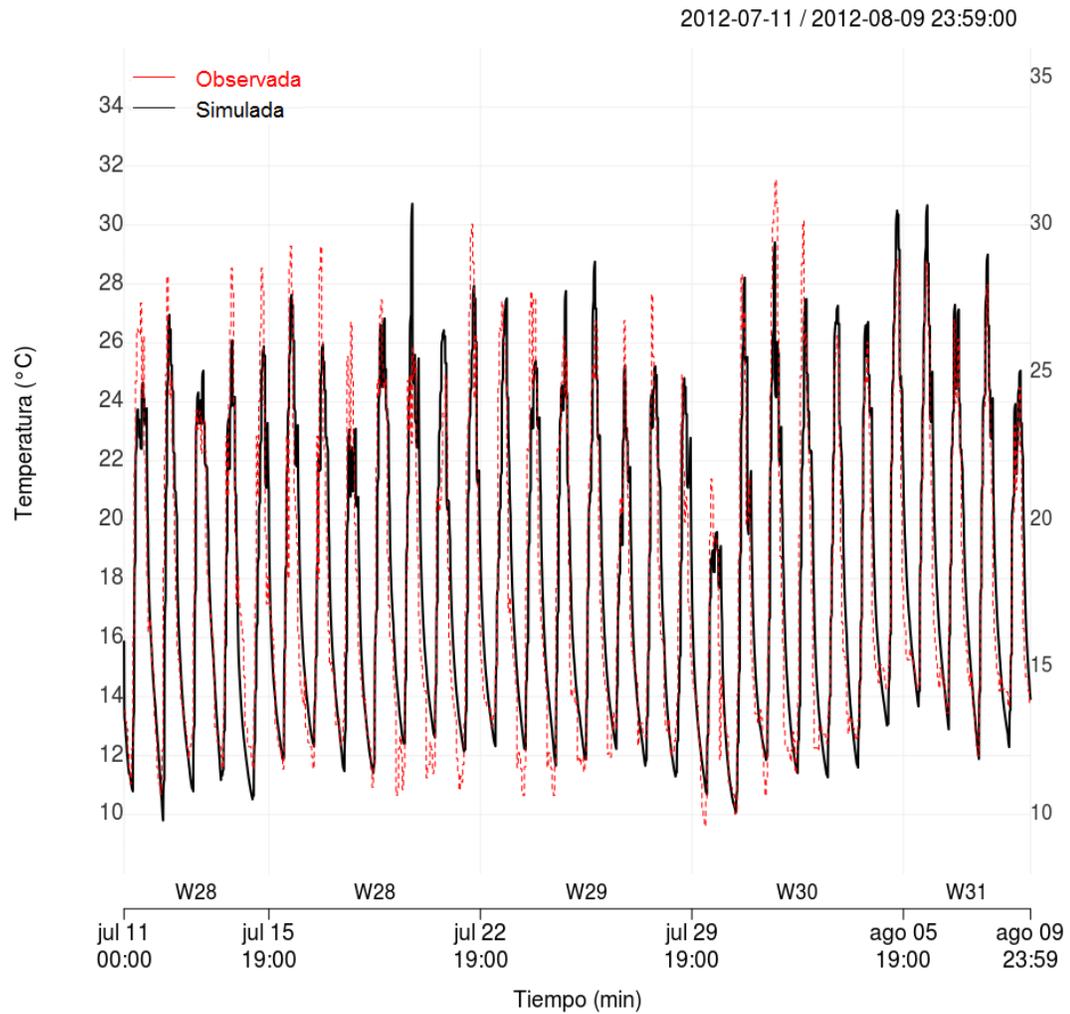


Figura 3-17.: Resultados de la simulación de la temperatura del aire en el invernadero IT para el periodo del 11 de julio al 9 de agosto

exacto pues depende del protocolo que el agricultor tiene establecido para su cultivo. Este hecho afecta la estimación del flujo de vapor de agua que es más sensible a la subestimación de las tasas de renovación del aire que la temperatura (Pahuja *et al.*, 2015).

La tabla **3-10** reúne las medidas de desviación calculadas para las variables temperatura y presión de vapor del aire en los correspondientes escenarios de validación. Las mejores estimaciones se obtienen con el invernadero IP, seguido del IR. Cuando se integra el cultivo los coeficientes de error desmejoran especialmente para la presión de vapor así que este es uno de los aspectos por mejorar. La gráfica **3-22** contiene los resultados de la regresión lineal para la temperatura en los cuatro casos analizados y en **3-23** para la presión de vapor del último caso. Las gráficas muestran la concordancia entre los datos simulados y reales.

Tabla 3-10.: Medidas de desviación por variable por escenario de validación

	T. en IP-blanco	T. en IP-negro	T en IR	T en IT	PV en IR	PV en IT
EM	0,97	0,95	0,97	0,79	0,98	0,71
CD	1,07	1,25	0,88	1,01	1,05	1,3
CE	0,01	0,01	0,02	0,07	0,05	0,09
ECMR (%)	2,79	3,10	4,70	11,7	3,00	13,7

T=Temperatura, PV=Presión de vapor, IP=Invernadero pequeño, IR=Richel y IT= Tradicional. EM=Eficiencia del modelo, CD=Coefficiente de determinación, CE=Coefficiente de error, ECMR=Error cuadrático medio relativo. Fuente:Esta investigación.

Las medidas de desviación de la tabla **3-10** y las regresiones lineales presentadas en las figuras **3-22** y **3-23** son similares a las obtenidas por Vanthoor *et al.* (2011); Ruiz y Cotrino (2010); Gruber *et al.* (2011); Fatnassi *et al.* (2013) quienes también realizan procesos de validación de diferentes tipos de modelos de microclima. Vanthoor *et al.* (2011) usando el modelo holandés obtiene ECMR por debajo de 10 %, sin embargo los resultados presentados en su artículo corresponden a periodos de tiempo de días, donde parámetros como el LAI no varían sensiblemente. En este caso se presentan los resultados para todo el ciclo de cultivo con un LAI que varía entre 0 y 3 durante el periodo simulado. Por su parte Ruiz y Cotrino (2010) usando un modelo de subespacios tipo caja negra valida sus resultados con 72 horas de datos obteniendo muy buenos resultados con errores porcentuales de simulación, errores cuadráticos medio y absoluto menores al 8 %, pero nuevamente no se considera el crecimiento del

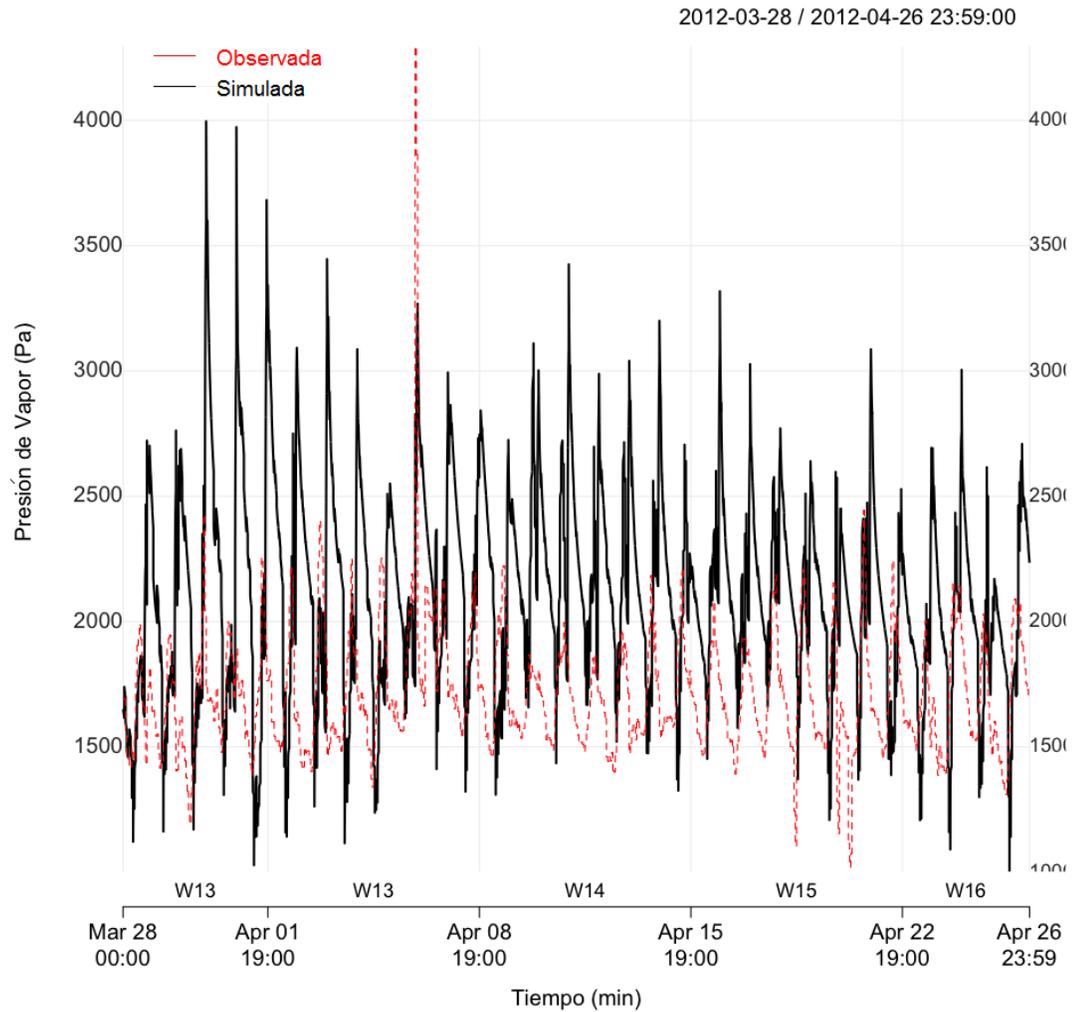


Figura 3-18.: Resultados de la simulación de la presión de vapor en el invernadero IT para el periodo del 28 de marzo al 26 de abril

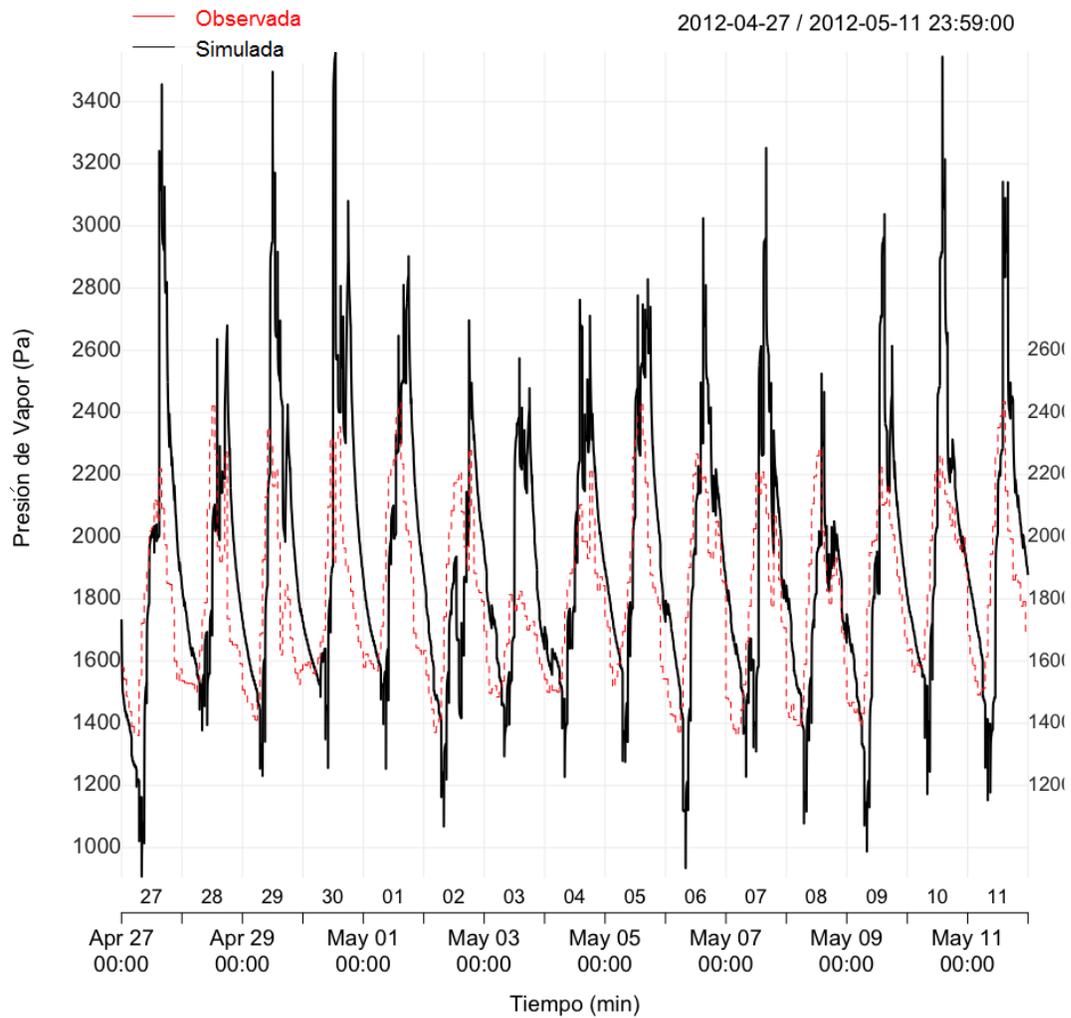


Figura 3-19.: Resultados de la simulación de la presión de vapor en el invernadero IT para el periodo del 27 de abril al 11 de mayo

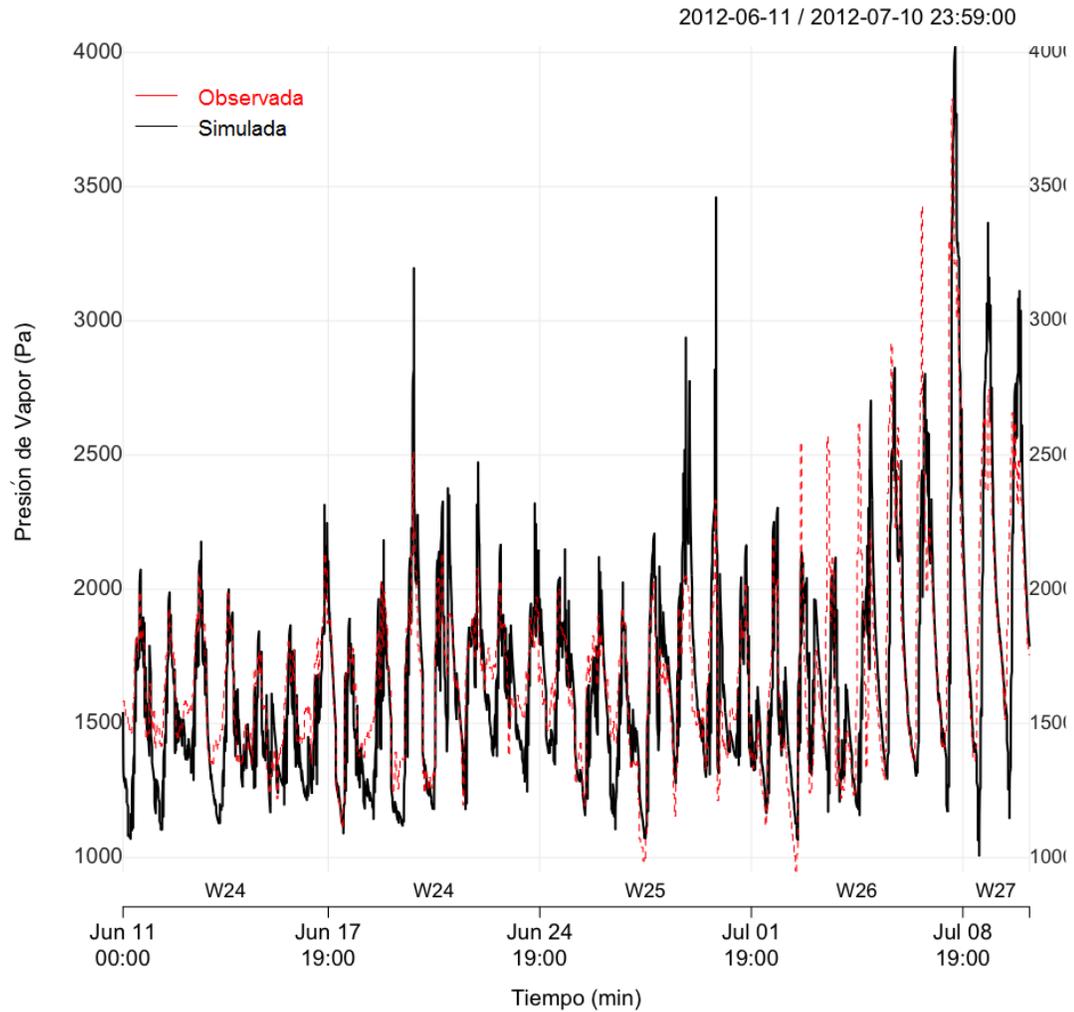


Figura 3-20.: Resultados de la simulación de la presión de vapor en el invernadero IT para el periodo del 11 de junio al 8 de julio

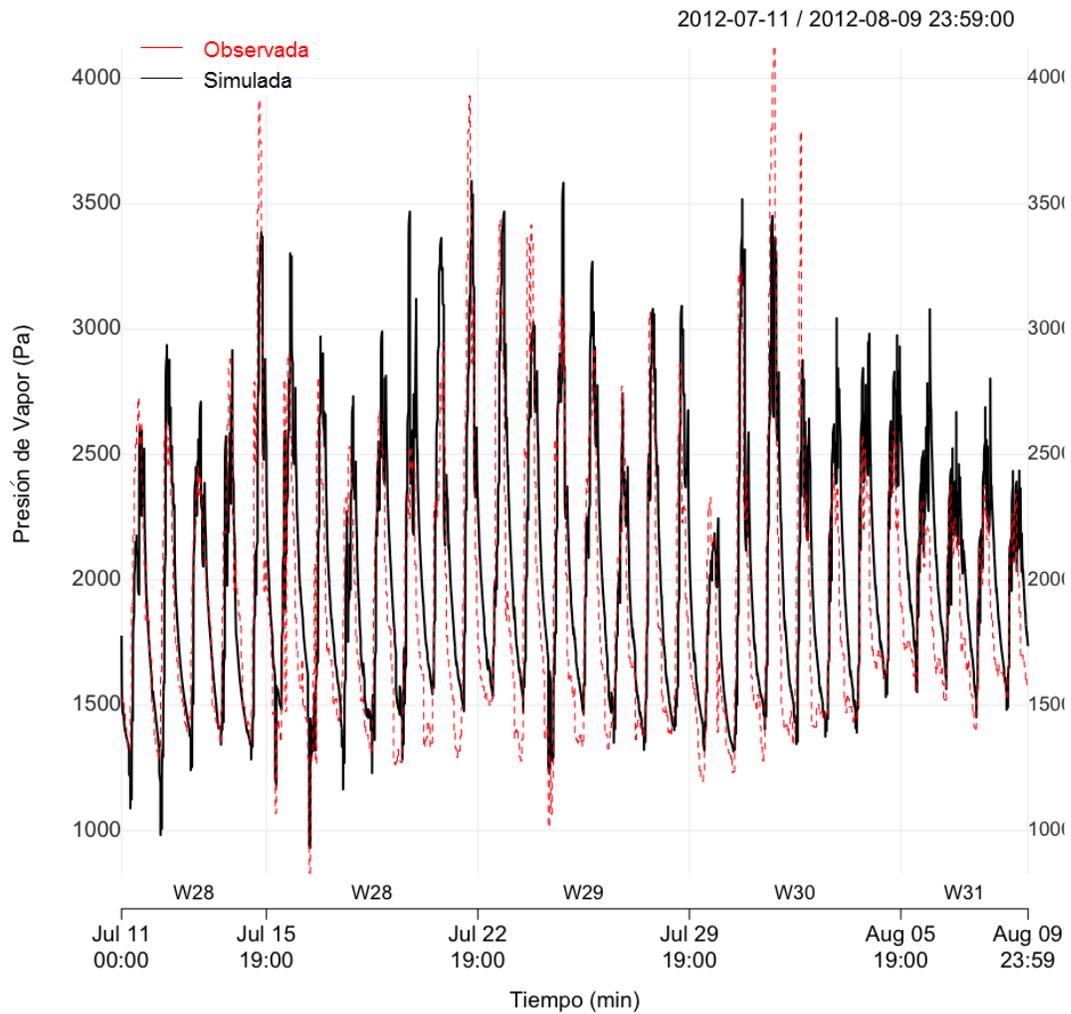


Figura 3-21.: Resultados de la simulación de la presión de vapor en el invernadero IT para el periodo del 11 de julio al 9 de agosto

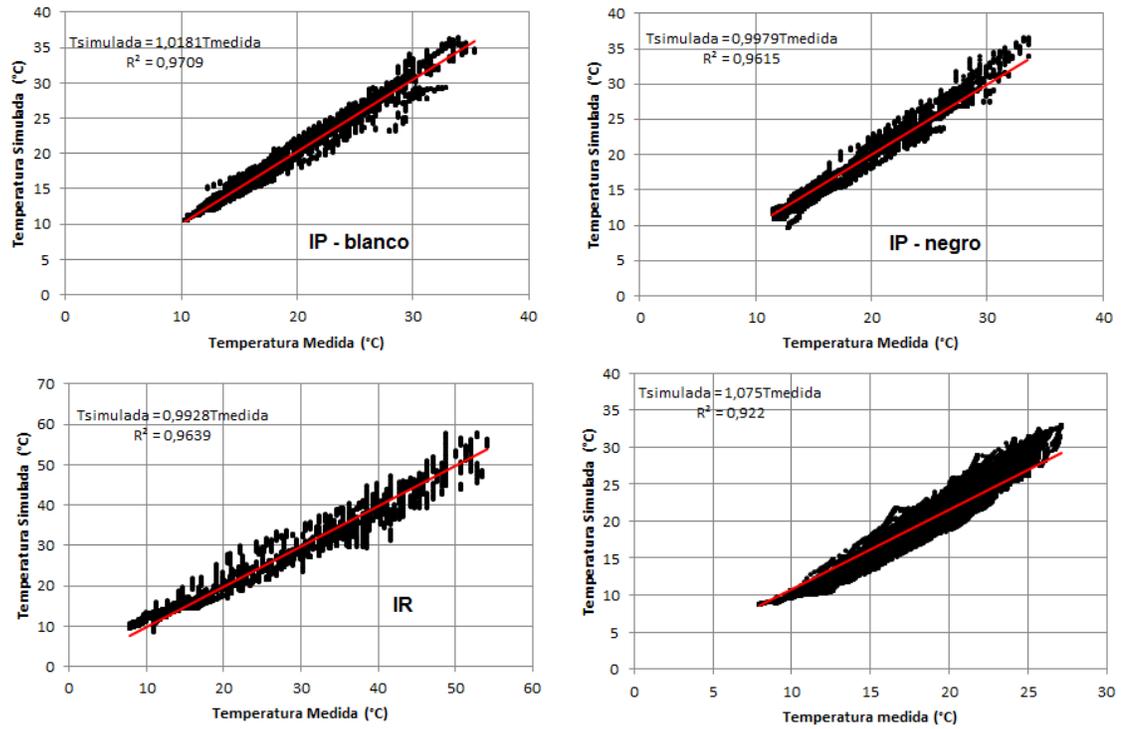


Figura 3-22.: Comparación entre datos medidos y simulados de temperatura con el invernadero pequeño (IP), Richel (IR) y tradicional (IT)

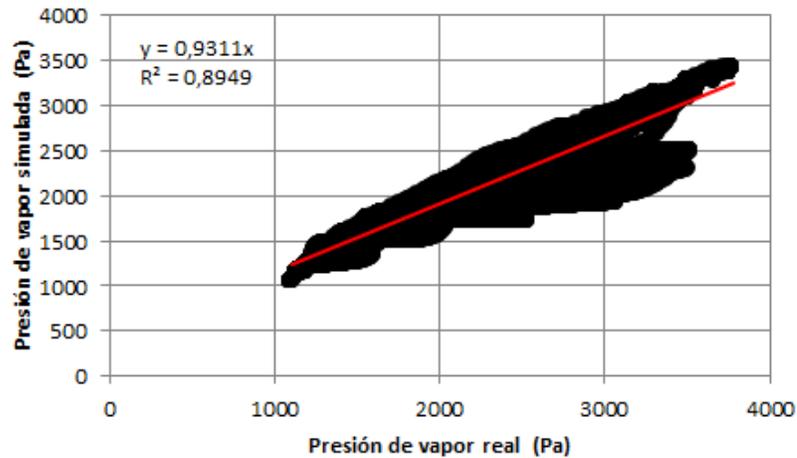


Figura 3-23.: Comparación entre datos medidos y simulados de presión de vapor con el invernadero tradicional (IT)

cultivo y su efecto sobre las variables climáticas. En el caso de Gruber *et al.* (2011) utilizan un modelo de series de Volterra de segundo orden, identificado a partir de datos experimentales de entrada y salida obteniendo errores por debajo del 4 %, sin embargo el cuyo punto de partida de este tipo de modelos no son los principios físicos de conservación, hecho limita la posibilidad de modificar variables de estado, parametrizaciones y condiciones de entrada (van Straten *et al.*, 2011; Rodríguez *et al.*, 2014). En el trabajo de Fatnassi *et al.* (2013) utilizan un modelo unidimensional sencillo para evaluar el efecto de pantallas anti-insectos sobre el microclima y obtienen un R^2 de 0.94 y 0.93 para temperatura y humedad respectivamente, similar a los aquí obtenidos que variaron entre 0.89 y 0.97, estos valores y el comportamiento observado en las gráficas de las regresiones los consideran suficientes para poder usar el modelo en el diseño de invernaderos que requieren pantallas anti-insectos.

Los valores de desviación obtenidos y la comparación con trabajos de la misma naturaleza indican que el MMI es un modelo capaz de simular el microclima de un invernadero tradicional, con diferentes condiciones externas, materiales, resoluciones de tiempo y estado del cultivo. La ventaja del MMI frente a los modelos de las publicaciones citadas radica principalmente en la inclusión del desarrollo del cultivo y en la posibilidad de variar con facilidad parámetros de la geometría o materiales por estar escrito en código abierto. El código abierto permite a cualquier usuario realizar un número ilimitado de simulaciones a diferencia de algunos como el Fitz-Rodríguez *et al.* (2010) que es limitado en la cantidad de escenarios considerados u otros cuyos códigos por estar en software licenciados no son muy asequibles así sean para fines de investigación.

Los resultados obtenidos demuestran que el MMI es capaz de simular la temperatura del aire y la presión de vapor, sin embargo los aspectos que pueden mejorarse son varios, por ejemplo la estimación de la temperatura del cielo o el esquema utilizado para calcular la nubosidad. Además estimar mejor los coeficientes de intercambio de calor de la cubierta con el aire exterior, los coeficientes de descarga y de presión del viento. A pesar de los múltiples factores por mejorar el proceso de validación es satisfactorio y en su versión actual está listo para ser utilizado en otros contextos como evaluar el efecto de las propiedades ópticas de la cubierta sobre las variables de estado, cambiar el tipo de suelo o probar metodologías de control climático. Se destaca también el hecho de ser el primer modelo de predicción del microclima validado para

invernaderos en Colombia. Por ahora la herramienta ha sido culminada y está a disposición de quien la requiera con fines de investigación.

3.4. Conclusiones

La simulación del comportamiento de la temperatura y presión de vapor del aire al interior de un invernadero fue realizada mediante la implementación de un Modelo matemático del Microclima (MMI), utilizado por primera vez en Colombia. El MMI fue planteado en términos de los flujos de calor latente, calor sensible, radiación y vapor de agua involucrados en el sistema físico bajo estudio. Las condiciones de entrada fueron las variables climáticas radiación global, temperatura del aire, humedad relativa, temperatura del suelo e índice de área foliar. Para los dos últimos factores se contó con dos módulos independientes. La simulación fue realizada para tres casos que diferían en localización, área del invernadero y época del año. Los dos primeros invernaderos se ubicaron en Chia-Cundinamarca, el primero con un área de 63m² y monitoreado cada seis minutos durante marzo-abril y el segundo de 288 m² con registros cada diez minutos en noviembre. El tercero se ubicó en Santa Sofía-Boyacá con un área de 5670m² y monitoreado cada hora durante todo un ciclo de cultivo de marzo hasta agosto.

En el caso del invernadero a escala con plástico negro sobre el suelo el modelo predijo la temperatura del aire con una eficiencia (EM) de 0.95, un coeficiente de determinación (CD) del 1.25, un error (CE) de 0.01 y un error cuadrático medio relativo (ECMR) del 3,1 %. En el caso del plástico blanco los valores fueron respectivamente EM= 0.97, CD=1.07, CE=0.01 y ECMR del 2.79 %. En el caso del invernadero tradicional IR el modelo predijo la temperatura del aire con una EM= 0.97, un CD=0.88, un CE=0.02 y un ECMR del 4,7 %. En el caso de la presión de vapor en IR fueron EM= 0.98, CD=1.05, CE=0.05 y ECMR del 3.70 %.

Con el invernadero tradicional IT el modelo predijo la temperatura del aire con un EM=0.79, CD=1.01, CE=0.07 y un ECMR de 11,75 %. En el caso de la presión de vapor fueron respectivamente EM= 0.71, CD=1.3, CE=0.09 y ECMR del 13.70 %.

En todos los casos los resultados fueron satisfactorios y las discrepancias entre los datos reales y simulados estuvieron dentro del rango aceptable para este tipo de mo-

delos. La predicción del comportamiento del microclima para todo un ciclo de cultivo hasta el momento no había sido lograda en Colombia con la aproximación alcanzada en el presente trabajo. La principal ventaja del modelo implementado respecto a los modelos planteados para simular el microclima de los invernaderos radica en la posibilidad de adaptarlo a diferentes geometrías, materiales, estado del cultivo y paso de tiempo. El aporte a la cadena de conocimientos relacionados con el modelado del microclima fue principalmente implementar el sistema de ecuaciones en un lenguaje de programación de código abierto e integrar los resultados de índice de área foliar y temperatura de las capas del suelo como condiciones de entrada para simular todo el ciclo de producción.

El proceso de simulación evidenció que los parámetros ante los cuales el modelo es más afectado son los relacionados con la ventilación, los intercambios de calor de la cubierta y el medio exterior y aquellos que intervienen en el cálculo de los flujos de vapor de agua. A pesar de los factores por mejorar, la validación en todos los escenarios fue satisfactoria como lo indicaron las medidas de desviación, las cuales estuvieron siempre dentro de los límites recomendados. De esta forma los resultados de los coeficientes de eficiencia, determinación y error brindan la confianza para continuar usando el MMI en otros proyectos con fines de investigación del desarrollo de la actividad agrícola bajo cubierta.

Tabla 3-6.: Parámetros constantes

Símbolo	Valor	Unidad	Descripción
α_{ho-ai}	5	W/m ² K	Coefficiente de intercambio de calor entre la hoja y el aire
ΔH	2.45×10^6	J/kg	Calor latente de evaporación del agua
σ	5.67×10^{-8}	W/m ² K ⁴	Constante de Boltzman
ϵ_{fo}	1	-	Coefficiente de emisión de RIL de la planta
ϵ_{cielo}	1	-	Coefficiente de emisión de RIL del cielo
$\eta_{Glob-RIC}$	0.5	-	Proporción entre la RIC y la radiación global externa
$\eta_{Glob-RFA}$	0.5	-	Proporción entre la RFA y la radiación externa
η_{CO_2}	0.057	mg/J	CO ₂ liberado por Joule de calor sensible producido por un calentador
η_{vap}	4.43×10^{-8}	kg/J	vapor liberado por Joule de calor sensible producido por un calentador
ρ_{ai}^*	1.20	kg/m ³	Densidad del aire a nivel del mar
ρ_{fo-RFA}	0.07	-	Coefficiente de reflexión de RFA de la planta
ρ_{fo-RIC}	0.35	-	Coefficiente de reflexión de RIC de la planta
ρ_{ace}	7850	kg/m ³	Densidad del acero
ρ_{ag}	1×10^3	kg/m ³	Densidad del agua
γ	65.8	Pa/K	Constante Psicométrica
ω	1.99×10^{-7}	1/s	Frecuencia anual para calcular la temperatura del suelo
cap_{ho}	1.2×10^3	J/m ² K	Capacidad calorífica de un metro cuadrado de follaje
c_{evap1}	4.30	W/m ²	Resistencia de los estomas ante el efecto de la radiación
c_{evap2}	0.54	W/m ²	Resistencia de los estomas ante el efecto de la radiación
c_{evap3}^{da}	6.1×10^{-7}	1/ppm ²	Resistencia de los estomas ante el efecto del CO ₂ de día
c_{evap3}^{noche}	1.1×10^{-11}	1/ppm ²	Resistencia de los estomas ante el efecto del CO ₂ de noche
c_{evap4}^{da}	4.3×10^{-6}	1/Pa ²	Resistencia de los estomas a la diferencia de PV de día
c_{evap4}^{noche}	5.2×10^{-6}	1/Pa ²	Resistencia de los estomas a la diferencia de PV de noche
cp_{ai}	1×10^3	J/kg K	Calor específico del aire
cp_{ag}	4.18×10^3	J/kg K	Calor específico del agua
cp_{ace}	0.64×10^3	J/kg K	Calor específico del acero
g	9.81	m/s ²	Aceleración de la gravedad
K_{1RFA}	0.7	-	Coefficiente de Extinción de la RFA
K_{2RFA}	0.7	-	Coefficiente de Extinción de la RFA reflejada por el suelo o piso
K_{RIC}	0.27	-	Coefficiente de Extinción de RIC del follaje
K_{RIL}	0.94	-	Coefficiente de Extinción de RIL del follaje
M_{ai}	28.96	kg/kmol	Masa molar del Aire
M_{ag}	18	kg/kmol	Masa molar del agua
R	8.314×10^3	J/kmol K	Constante Universal de los gases
R_{fo}	5	W/m ²	Radiación sobre el canopy en el atardecer y el amanecer
r_b	275	s/m	Resistencia de la capa límite del canopy al transporte de vapor
r_s	82.0	s/m	Mínima resistencia del follaje a la transpiración

Tabla 3-7.: Parámetros que dependen de cada tipo de invernadero

Símbolo	Unidad	Descripción
$\eta_{Glob-ai}$	-	Proporción de la radiación global absorbida por la estructura del invernadero
ψ	$^{\circ}$	Pendiente de la cubierta del invernadero
A_c	m^2	Área de la cubierta incluyendo paredes
A_s	m^2	Superficie del suelo bajo invernadero
CCI_{ex}	W/m^2K	Coefficiente de intercambio de calor entre la cubierta y el aire exterior
CCI_{ex1}	W/m^2K	Coefficiente de intercambio de calor entre la cubierta y el aire exterior
CCI_{ex2}	J/m^3K	Coefficiente de intercambio de calor entre la cubierta y el aire exterior
CCI_{ex3}	-	Coefficiente de intercambio de calor entre la cubierta y el aire exterior
h_{ai}	m	Distancia entre el suelo y la pantalla térmica
h	m	Altura sobre el nivel del lugar donde se ubica el invernadero
h_{Gh}	m	Distancia entre el suelo y la cubierta
ϵ_{cin}	-	Coefficiente de emisión de RIL de la cubierta interna
ϵ_{ceex}	-	Coefficiente de emisión de RIL de la cubierta externa
ρ_c	kg/m^3	Densidad del material de la cubierta
ρ_{c-RIC}	-	Coefficiente de reflexión de RIC de la cubierta
ρ_{c-RFA}	-	Coefficiente de reflexión de RFA de la cubierta
ρ_{c-RIL}	-	Coefficiente de reflexión de RIL de la cubierta
τ_{c-RIC}	-	Coefficiente de transmisión de RIC de la cubierta
τ_{c-RFA}	-	Coefficiente de transmisión de RFA de la cubierta
τ_{c-RIL}	-	Coefficiente de transmisión de RIL de la cubierta
a_{c-RFA}	-	Coefficiente de absorción de RFA de la cubierta
a_{c-RIC}	-	Coefficiente de absorción de RIC de la cubierta
λ_c	$W/m K$	Conductividad térmica de la cubierta
cp_c	$J/K kg$	Calor específico de la cubierta
h_c	m	Espesor de la cubierta
α_{ai-s}	-	Coefficiente de intercambio suelo-aire
f_{pan}	-	aire que aporta el ventilador

Tabla 3-8.: Parámetros que dependen de cada tipo de invernadero

Símbolo	Unidad	Descripción
ϵ_s	-	Coefficiente de emisión de RIL del suelo
ρ_s	kg/m ³	Densidad del suelo
a_{fo-RIC}	-	Coefficiente de absorción de RIC del follaje
a_{s-RIC}	-	Coefficiente de absorción de RIC del suelo
ρ_{s-RIC}	-	Coefficiente de reflexión de RIC del suelo
ρ_{s-RFA}	-	Coefficiente de reflexión de RFA del suelo
cp_s^*	J/K kg	Calor específico del suelo
h_s	m	Espesor de la primera capa del suelo
h_{s-1}	m	Espesor de la siguiente capa del suelo
$\rho_s cp_s$	J/m ³ K	Capacidad calorífica volumétrica del suelo
λ_s	W/m K	Conductividad térmica del suelo
ϕ_{tub}	m	Diámetro de la tubería
l_{tub}	m	Longitud de la tubería
ϵ_{tub}	-	Coefficiente de emisión de RIC de la tubería
η_{pan}	-	Eficiencia del dispositivo
x_{pan}	kg _{ag} /kg _{ai}	Contenido del vapor de agua del aire en el dispositivo
x_{ex}	kg _{ag} /kg _{ai}	Contenido del vapor de agua del aire exterior
ϕ_{neb}	kg _{ag} /s	Capacidad del nebulizador
s_v	m /W ²	Pendiente de la función para las diferencias de presión de vapor
ϕ_{ExtCO_2}	mg /s	Capacidad de la fuente externa de CO ₂
MC_{ai-fo}	mg/m ² s	Flujo de CO ₂ del aire hacia el cultivo
h_{psp}	m	Espesor de la pantalla semipermanente
ρ_{psp}	kg/m ³	Densidad de la pantalla semipermanente
cp_{psp}	J/Kkg	Calor específico de la pantalla semipermanente
h_v	m	Dimensión vertical de las aperturas laterales
C_d	-	Coefficiente de descarga aperturas del techo
C_w	-	Coefficiente de la presión del viento
A_{lat}	m ²	Área de las ventanas laterales
h_{lat-c}	m	Distancia entre los puntos medios de las aperturas laterales y del techo
ζ_{Ins}	-	Área del orificio por unidad de área de la malla anti-insectos
c_f	-	Coefficiente de fuga que depende de la estructura del invernadero
η_{ch}	-	Umbral para el efecto chimenea
ϕ_{vfor}	m ³ /s	Flujo de aire del sistema de ventilación forzada

4. Desempeño climático del invernadero tradicional en Colombia

4.1. Importancia de las variables climáticas en cultivos protegidos

Para los cultivos bajo cubierta las variables climáticas más importantes en los procesos de germinación, crecimiento, floración, fecundación y maduración del fruto son la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa y la concentración del dióxido de carbono.

La radiación que recibe la cubierta del invernadero contienen el ultravioleta (UV), la radiación fotosintéticamente activa (RFA), el infrarrojo cercano (RIC) y el infrarrojo lejano (RIL). El UV es negativo para el crecimiento adecuado de las plantas y el desgaste del plástico, por eso son recomendables cubiertas que reflejen esta longitud de onda. La (RFA) es la que las plantas absorben con mayor intensidad, especialmente en el azul y el rojo por tanto sería deseable una cubierta que tenga mayores coeficientes de transmisión en este rango de longitudes de onda (Rodríguez *et al.*, 2014), por ejemplo, los procesos fotosintéticos alcanzan los máximos de productividad con valores de RFA alrededor de los 450 W/m^2 a concentraciones de CO_2 entre 700 y 3100ppm (Boshell, 2009). La RIC ayuda a elevar la temperatura del aire ya que esta es absorbida por los elementos del invernadero y luego emitida como radiación de onda larga (RIL), por eso se han recomendado transmitancias del plástico al menos del 80 % cuando el objetivo es disponer de más energía térmica. Si la necesidad por el contrario es reducir el ingreso de RIC se usan cubiertas con menor coeficiente de transmisión de RIC, se aplican películas blancas en la cara externa del plástico o se

instalan mallas de sombreado (van Straten *et al.*, 2011).

La temperatura es el siguiente factor relevante pues interviene en la fotosíntesis, procesos fisiológicos y metabólicos (Acuña, 2009a). Por esta razón la temperatura es la primera variable a monitorear en el invernadero dependiendo del cultivo bajo cubierta. En la tabla 4-1 se muestran algunos de los valores de referencia para las especies más cultivadas en invernadero, el objetivo es mantener el ambiente dentro del rango óptimo tanto de día como de noche. Temperaturas por debajo o por encima de los límites biológicos hacen imposible que la planta realice adecuadamente sus funciones desacelerando el crecimiento y el desarrollo. Aunque Colombia se encuentre en la zona ecuatorial la topografía que genera la presencia de las cordilleras hace posible que en algunos lugares se presenten temperaturas críticas por debajo de los 10 °C o superiores a 34°C, por esta razón es necesario determinar las necesidades de control de temperatura que tiene un invernadero en función del lugar donde se instale, identificar si la sola estructura ofrece las condiciones óptimas o si requiere de estrategias adicionales de calefacción o refrigeración para cumplir su objetivo .

En los cultivos de flores, que son los que más hacen uso de invernaderos en Colombia, se ha identificado que temperaturas diurnas elevadas inducen una reducción de la asimilación neta por utilización excesiva de azúcares, incrementan los compuestos fenólicos y ocluye los vasos conductores, se producen flores más pequeñas, coloración pálida y menos vida en florero. En contraste las temperaturas bajas reducen el transporte de azúcares a las yemas axilares próximas y a los pétalos y aumentan los niveles de almidón y sacarosa en las hojas. En Boshell (2009) se describen con mayor detalle las consecuencias de las bajas y altas temperaturas en los cultivos de rosas y claveles producidos en Colombia.

La humedad relativa tiene un papel regulador en la evotranspiración de las plantas, al igual que la temperatura cada cultivo tiene unos rangos ideales para esta variable (Stanghellini, 1987; Takakura, 1983; Rodríguez *et al.*, 2014). Cuando la humedad es baja se crea un gradiente importante entre la presión de vapor en el aire y la presión de vapor en los tejidos vegetales estableciéndose un flujo de agua desde el interior de la planta hacia el aire que la rodea. Al interior del invernadero un valor inferior al 60 % empieza a ser riesgoso porque la demanda hídrica aumenta significativamente pero un valor por debajo de 30 % es crítico y se debe necesariamente aumentar el

contenido de agua en el aire.

Ambientes con valores por encima del 80 % son propicios para el desencadenamiento de enfermedades fungosas y sobre el 90 % para la multiplicación de agentes patógenos. Como se describió en el capítulo uno Colombia es un país en el cual gran parte de su territorio registra una humedad relativa promedio por encima del 75 % y este valor tiende a aumentar al interior del invernadero tradicional cuando no hay una ventilación adecuada. El mildew veloso es una de las consecuencias del exceso de humedad ya que favorece su propagación, para combatirlo hay técnicas tan sencillas como el aumento de la ventilación, costosas como el uso de calefacción u otras fungicidas (Fernández *et al.*, 2011).

En cuanto a la concentración de CO_2 es sabido su importancia para la fotosíntesis en la planta, los valores promedio en la atmósfera oscilan alrededor de 360ppm a 390 ppm pero al interior del invernadero pueden variar entre 320-500 ppm o incrementarse hasta 800ppm o más cuando es agregado de forma intencional al ambiente interior (van Straten *et al.*, 2011). Ha sido ya demostrado con especies de flores y hortalizas que la combinación de aumentar la concentraciones de CO_2 , incrementar la temperatura del aire hasta el máximo del rango óptimo del cultivo y maximizar la intensidad de radiación PAR que ingresa al invernadero es estrategia que garantiza el incremento en las tasas de acumulación de materia seca. En Colombia hasta el momento esta no ha sido una estrategia común debido a que la estructura de los invernaderos tradicionales harían imposible conservar el CO_2 en su interior por las fugas de aire.

Finalmente la velocidad del viento influye en la circulación del aire interior, en las tasas de renovación del volumen de aire, en los procesos de evapotranspiración y demanda de agua de las plantas. Al interior del invernadero la velocidad disminuye siendo necesario en ocasiones la implementación de ventilación forzada para disminuir la temperatura o el contenido de humedad (Rodríguez *et al.*, 2014). En Colombia los valores de velocidad del viento no son altos por estar en la zona ecuatorial donde los vientos alisios se encuentran con velocidades menores a las de latitudes más altas, esto ocasiona muchas veces tasas de renovación por debajo de 30 que es el mínimo aconsejable (Villagrán *et al.*, 2012; Flores-Velazquez *et al.*, 2014). Sin embargo en épocas como Julio-agosto cuando la ZCIT pasa sobre el territorio nacional despla-

Tabla 4-1.: Niveles térmicos de especies cultivadas bajo invernadero. Fuente: Acuña (2009a)

Especie	Tmín letal	Tmín biológica	T óptima día	T.óptima noche	Tmáx biológica
Hortícola					
Tomate	0 a 2	8 a 10	22 a 26	13 a 16	26 a 30
Pepino	0 a 4	10 a 13	18 a 24	18 a 20	28 a 32
Melón	0 a 2	12 a 14	24 a 30	18 a 21	20 a 34
Lechuga	-2 a 0	4 a 6	15 a 20	10 a 15	25 a 30
Fresa	-2 a 1	6	18 a 22	10 a 13	
Flores					
Clavel	-4 a 0	4 a 6	18 a 21	10 a 12	26 a 32
Rosa	-6 a 0	8 a 12	20 a 25	14 a 16	30 a 32
Crisantemo		6 a 8	20 a 25	13 a 16	25 a 30
Gladiolo	0 a 2	5	16 a 20	10 a 12	25 a 30
Tulipán		4 a 6	22 a 25	12 a 18	

T=Temperatura, Tmín=Temperatura mínima, Temperatura máxima

zándose de sur a norte los vientos son más fuertes y es en esta época cuando se debe vigilar que la estructura resista el esfuerzo del viento.

La posibilidad de controlar la relación entre las variables climáticas y el cultivo es una de las grandes ventajas que ofrece el invernadero, pero esta capacidad es poco explotada en los invernaderos de bajo costo como los usados en Colombia. El interés por cambiar esta situación y optimizar el sistema clima-cultivo ha aumentado en la última década como lo demuestra la existencia de cada vez más estudios sobre el desempeño de los invernaderos, sus características y desventajas. A continuación se mencionan algunos de los más representativos, además de los ya citados.

4.2. Estudios sobre invernaderos en Colombia

Aspectos relacionados con el uso de invernaderos en Colombia han sido estudiados por autores como Cooman *et al.* (2006); Acuña (2009a,b); Boshell (2009); Ruiz y Cotrino (2010); Bojaca *et al.* (2009, 2010); Bojaca y Schrevens (2010); Gil *et al.* (2015); Villagrán *et al.* (2012). Cooman *et al.* (2006) ha elaborado documentos sobre los aspectos técnicos y económicos de la producción de tomate bajo cubierta identificando las deficiencias térmicas de las estructuras. Cooman *et al.* (2006) a través del análisis de datos medidos en invernaderos ubicados en la sabana de Bogotá, encontró que la

diferencia entre las temperaturas externa e interna en un invernadero típico es en promedio 1.7°C durante día y noche y tan solo de 1°C si solo se considera el periodo nocturno, ganancia que es insuficiente para proteger cultivos en temporadas de bajas temperaturas o heladas.

Por su parte, los libros de Acuña (2009b,a) contienen la caracterización de los invernaderos más usados para cultivos de flores en la Sabana de Bogotá, así como aspectos sobre el diseño estructural y las patologías típicas que presentan. Los resultados fueron obtenidos mediante encuestas y análisis estadísticos. Acuña (2009b,a) también estudia la ventilación y circulación del aire al interior del invernadero usando análisis de imágenes digitales y dinámica de fluidos computacional, reportando tasas de renovación del volumen de aire insuficientes para la conservación de un microclima óptimo. En el caso de Boshell (2009) su libro describe la relación entre las variables climáticas y los cultivos de flores, así como el uso de instrumentos y técnicas para el manejo del riesgo climático en la floricultura.

En 2010 por primera vez Ruiz y Cotrino (2010) utiliza un modelo sencillo tipo caja negra para estudiar las variaciones de temperatura en un invernadero, pero su alcance es aún reducido para realizar control u optimización de parámetros. En la misma época Bojaca *et al.* (2009, 2010); Bojaca y Schrevens (2010) en una serie de artículos analizan la distribución espacial de la temperatura en los invernaderos y evalúan aspectos técnicos y económicos de la producción bajo cubierta en la Sabana de Bogotá usando modelos estadísticos. En 2012 Villagrán *et al.* (2012) hace uso nuevamente de la mecánica de fluidos computacional para evaluar métodos de optimización de la ventilación natural al interior de un invernadero multinunel. Recientemente Gil *et al.* (2015) hacen un análisis del impacto ambiental de la producción de tomate en Colombia usando un modelo de crecimiento del cultivo bajo condiciones óptimas y datos recolectados en campo, los resultados que obtienen mediante el análisis del ciclo de vida muestra el impacto de pesticidas y fertilizantes como el nitrógeno y los aspectos ambientales por mejorar. Además de los documentos mencionados hay manuales, cursos y notas técnicas que no contienen resultados de investigación sino que están más enfocados hacia la enseñanza de las bases teóricas de la agricultura protegida.

Los trabajos citados resaltan los problemas en el desempeño climático y las pato-

logías de las estructuras más implementadas en los cultivos de flores y hortalizas como el tomate. Todos resaltan la importancia del comportamiento de las variables climáticas al interior del invernadero y sugieren el uso de modelos de predicción del microclima o de diseño estructural como estrategias para mejorar la producción de las especies cultivadas bajo cubierta. Con el fin de aportar y responder a las necesidades de control climático de los invernaderos tradicionales se realizaron con el modelo MMI, validado en el capítulo dos, un conjunto de simulaciones bajo las diferentes condiciones climáticas externas identificadas con el análisis de cluster del capítulo uno. Para empezar se describe el proceso de selección de la información utilizada como datos de entrada al MMI y finalmente los resultados obtenidos.

4.3. Selección de la información de entrada al MMI

Con el panorama sobre la importancia de la radiación solar, la temperatura del aire, humedad relativa, la concentración de CO_2 y velocidad del viento para los cultivos protegidos, el siguiente paso es establecer el comportamiento de la temperatura del aire y la presión de vapor en el invernadero tradicional ante diferentes condiciones atmosféricas externas, para hacerlo se realizó el procedimiento descrito a continuación.

La evaluación del comportamiento de un invernadero tradicional bajo diferentes condiciones meteorológicas externas fue realizada con el MMI. Las condiciones de entrada de la tabla 3-4 fueron recolectados así: La radiación global, velocidad del viento, temperatura y humedad relativa del aire exterior fueron tomadas de las estaciones meteorológicas automáticas pertenecientes al sistema de recepción satelital de datos del IDEAM HYDRAS3. El índice de área foliar se consideró igual a dos (IAF=2).

Las simulaciones con el MMI se realizaron con la misma parametrización usada para las simulaciones correspondientes al invernadero IT (tabla 3-9). Las estaciones automáticas elegidas para obtener la información de entrada al MMI fueron aquellas que cumplieran las siguientes condiciones:

- Estaciones con series horarias completas de radiación global, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento durante mínimo cinco días de la

primera semana de los meses más húmedos (abril y octubre) y de los más secos (enero y julio).

- Estaciones ubicadas en las cinco regiones determinadas en el capítulo uno.
- Estaciones de una misma región pero con diferentes alturas sobre el nivel de mar. Esta condición surge considerando que el comportamiento de la temperatura del aire en Colombia varía principalmente en función de la altura.

De todas las estaciones que cumplieron las anteriores condiciones se seleccionaron las más representativas por cada región, las coordenadas y ubicación de las elegidas son presentadas en la tabla 4-2 y en la figura 4-1.

Tabla 4-2.: Estaciones automáticas con la información climática de entrada al MMI

Código	Nombre	Longitud,W	Latitud,N	Altitud,m	Región
24035360	Socha	-73,00	5,99	2.503	Central
24015110	La Boyera	-73,85	5,30	2.610	Central
26155230	Emas	-75,51	5,09	2.200	Central
26155220	Villamaria	-75,51	5,05	1.902	Central
26125290	Armenia	-75,68	4,54	1.458	Central
26135290	Marsella	-75,74	4,93	1.649	Central
27015320	Aragón	75,82	6,53	2.600	Noroccidental
23085260	La selva	-75,41	6,13	2.090	Noroccidental
16015120	U. Pamplona	-72,67	7,36	2.362	Santanderes
16015110	U. Francisco de Paula	-72,49	7,90	311	Catatumbo
35035100	ICA Villavicencio	-73,63	4,14	444	suroriental

Para cada una de las 11 estaciones se obtuvieron los datos climáticos provenientes del sistema HYDRAS3 con una resolución de 1 hora, esta información junto con los valores de LAI, CO₂ y T_{S_i} conformaron el conjunto de condiciones de entrada al MMI. Las simulaciones de la temperatura del aire y presión de vapor fueron luego usadas para calcular la ganancia térmica y el deficit de presión de vapor.

Apartir de las variables atmosféricas y de los resultados de la simulación en cada estación se identificaron las diferentes necesidades de aclimatización que debería satisfacer un invernadero tradicional según el lugar donde se encuentre. Las estaciones escogidas para la región centro y suroriental son Socha, Boyera, Emas, Villamaría,

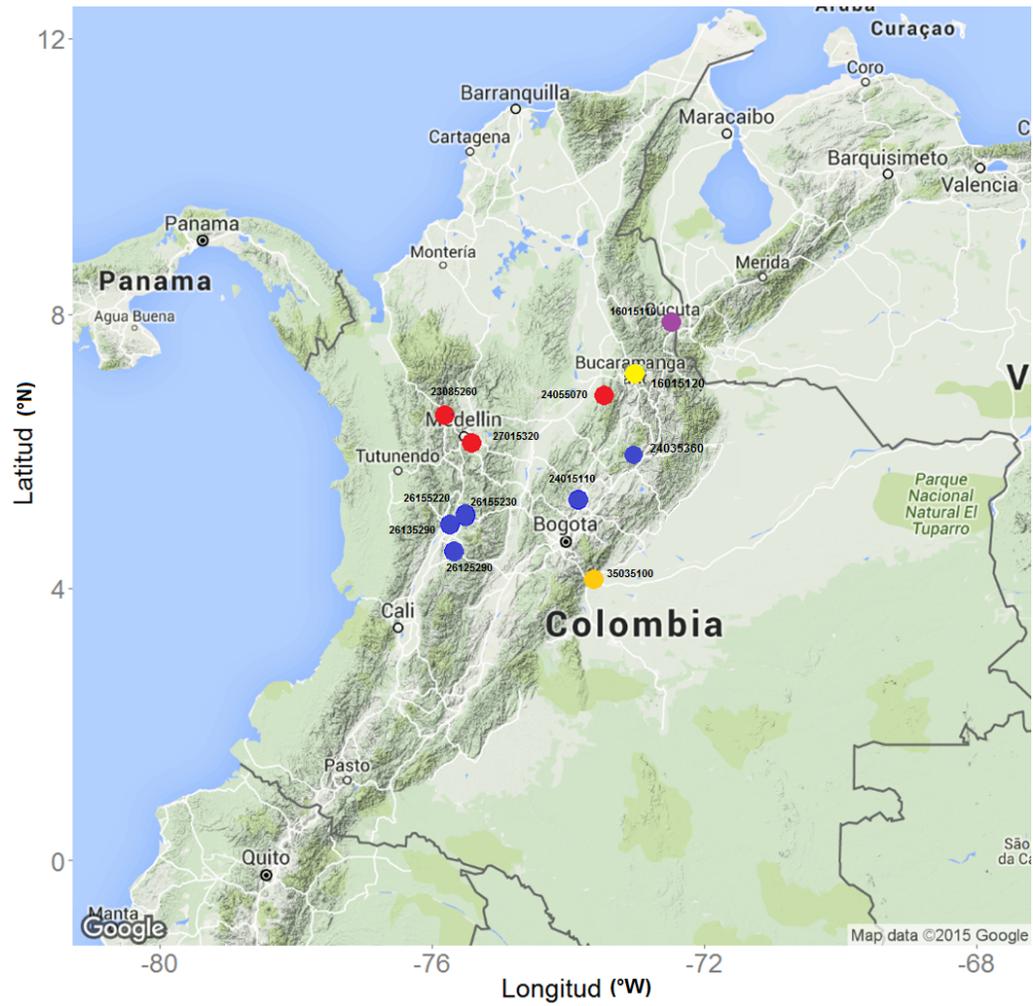


Figura 4-1.: Estaciones automáticas con la información climática de entrada al MMI

Armenia y Marsella; para la región noroccidental son Aragón y Selva; para la región santanderes es U. Pamplona, para la región Catatumbo la estación U. Francisco de Paula y para la suroriental la estación ICA Villavicencio. En la siguiente sección se presenta la descripción de las condiciones de entrada al MMI, la simulación de la temperatura del aire, la estimación de la ganancia térmica y el déficit de presión de vapor (DPV) por cada estación seleccionada. Los datos correspondientes a estaciones ubicadas en la misma región, con alturas que no diferían en altura más de 300 msnm fueron analizados de forma conjunta por la similitud entre los rangos de cada variable.

4.4. Comportamiento de un invernadero tradicional bajo diferentes condiciones atmosféricas

Los datos correspondientes a las estaciones Socha y Boyera, ambas ubicadas en la región central y suroccidental a 2503msnm y 2610 msnm respectivamente se muestran en las figuras 4-2 y 4-3. En las gráficas se observa que la diferencia entre el valor máximo y mínimo que puede alcanzar la temperatura del aire en un mismo día fue hasta de 18°C. El mayor intervalo de variación ocurre en la semana de enero, por ejemplo en Socha en un mismo día se registraron 6°C y 24°C. La humedad relativa promedio varió entre 40 % y 80 %, en Socha fueron mayores los registros de abril y octubre, mientras que en Boyera la humedad fue alta en las cuatro semanas revisadas. La radiación global en los días monitoreados osciló entre 0 y 1000 Wm^{-2} , pero en el caso de Boyera hubo mayor presencia de sistemas sinópticos o de mesoscala que generaron nubosidad disminuyendo la radiación hasta valores por debajo de 400 Wm^{-2} durante periodos de horas a días. En cuanto a la velocidad del viento ambos casos registraron valores entre 0,5 ms^{-1} y 6 ms^{-1}

La simulación de la temperatura del aire interior con el invernadero tradicional, ubicado bajo condiciones atmosféricas como las de la estación Socha, se presenta en la figura 4-4 y la estimación de la ganancia térmica y DPV medio durante el periodo diurno y nocturno en la figura 4-5. La mayor ganancia tanto diurna como nocturna fue lograda en julio, 4.5°C en el día y 0.3°C en la noche, debido a que fue la época con más flujo de radiación. La menor ganancia térmica en la noche ocurre en los días de abril cuando se alcanza en promedio solo 0.1 °C más que en el exterior y la menor

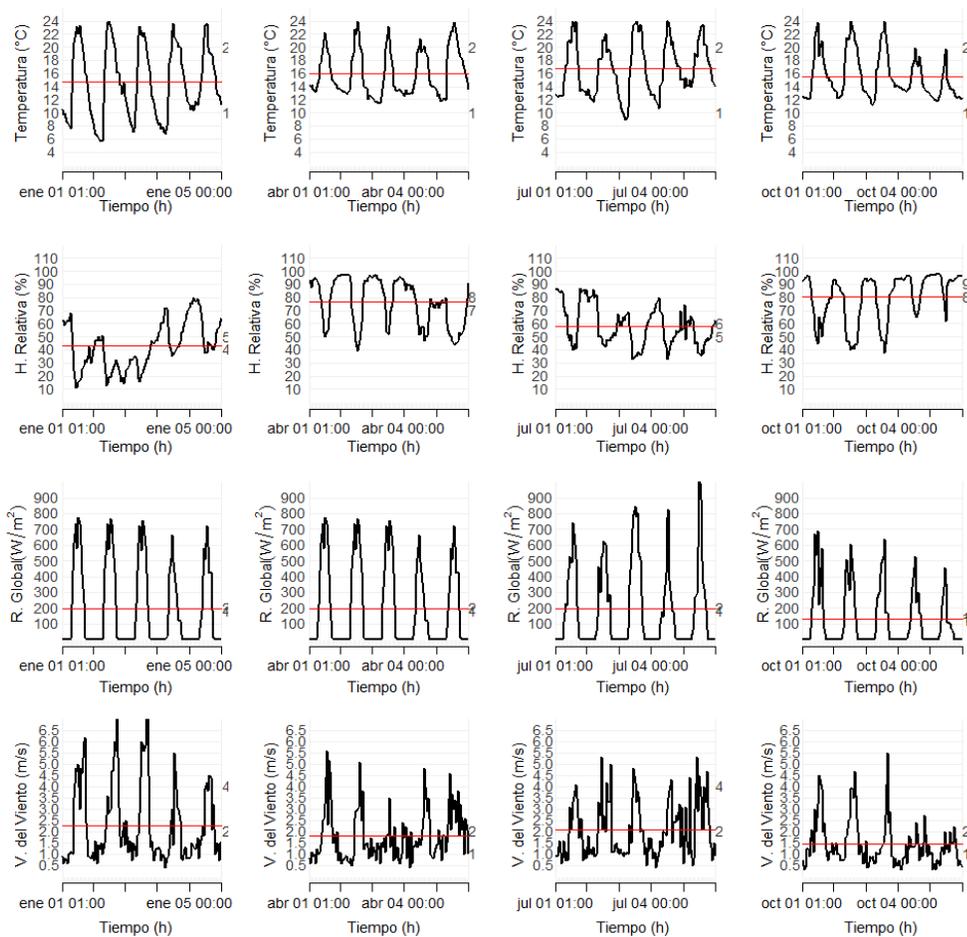


Figura 4-2.: Información climática de entrada correspondiente a la estación Socha para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

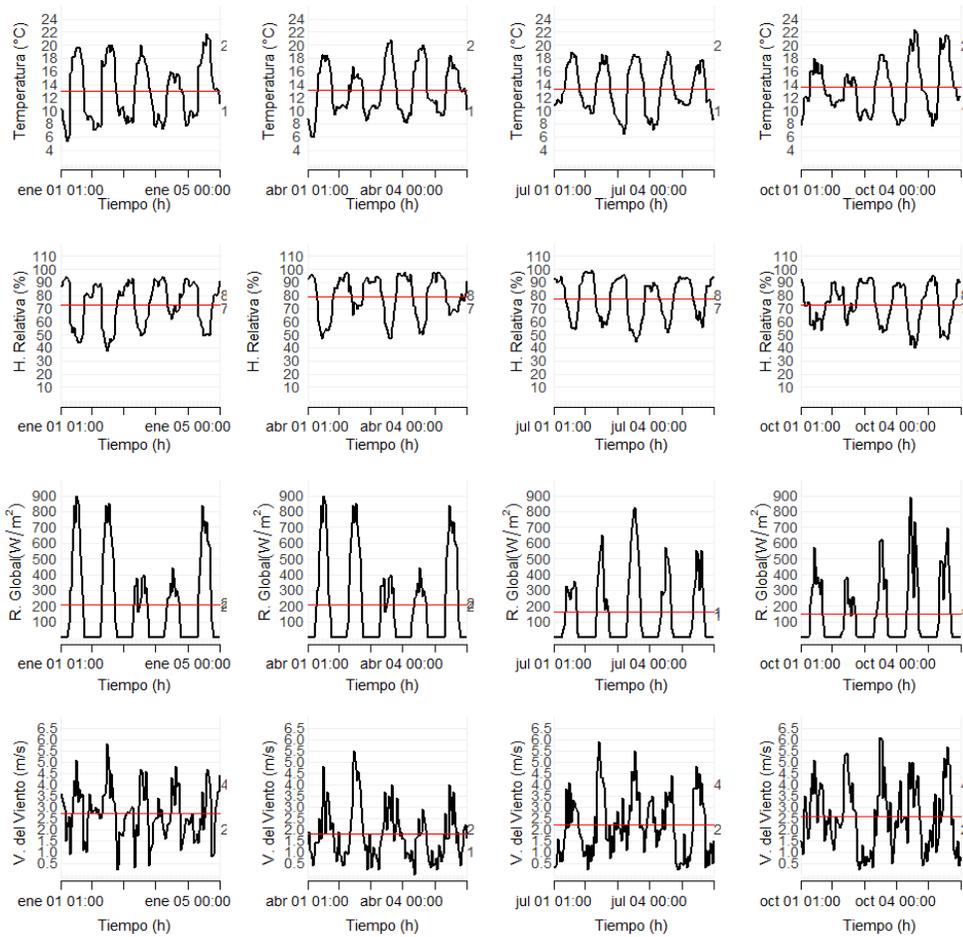


Figura 4-3.: Información climática de entrada correspondiente a la estación Boyera para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

en el día sucede en la semana de octubre debido al descenso de casi 100 W/m^2 en el promedio de la radiación solar de esos días. El balance es negativo durante enero y octubre cuando se presenta inversión térmica, siendo el medio interno hasta 2°C más frío que el externo, sin embargo el caso de enero es más crítico porque los valores descienden por debajo de los 10°C mientras que en octubre a pesar de la inversión los valores mínimos no llegan a superar la barrera de los 10°C letal para especies como los de la tabla 4-1. Por otra parte el déficit de presión de vapor (DPV) calculado, presentado en la figura 4-6, es mayor en las semanas de enero y julio, en donde algunos días supera los 3500 Pa . El DPV permanece dentro del rango registrado para ambientes bajo cubierta, se observa como el menor DPV coincide con la segunda temporada húmeda.

La simulación de la temperatura del aire interior con el invernadero tradicional ubicado bajo condiciones atmosféricas de la estación Boyera se presenta en la figura 4-7 y la estimación de la ganancia térmica y DPV medio durante el periodo diurno y nocturno en la figura 4-9. La disminución de la radiación solar por los procesos convectivos de la zona ocasionó menor ganancia térmica comparada con el caso Socha. El balance más positivo diurno fue de 3.2°C en enero y de 2.7°C en abril cuando la radiación estuvo por encima de los 850 W/m^2 ; a su vez los días con menor ganancia fueron los de octubre con solo 0.3°C en promedio. En cuanto a las noches no hubo ganancias superiores a 0.1°C en ningún caso. Cuando la radiación estuvo por debajo de los 400 W/m^2 la ganancia de temperatura fue prácticamente nula como se puede observar en el tercer y cuarto día de la semana de enero y abril. El único mes con inversión térmica fue Octubre. Por otra parte aunque hubo ganancia neta en las cuatro semanas revisadas, el microclima continua siendo frío para las especies más cultivadas en esta modalidad y se necesita una estrategia adicional de calefacción. En cuanto al DPV presentado en la figura 4-8 se observa que oscila entre 0 y 2500 Pa y es mayor en enero aunque se conserva dentro de valores adecuados. Los valores medios de DPV son consecuencia de los altos porcentajes de humedad registrados en la zona.

Los cultivos bajo cubierta en lugares de la región central y suroccidental con las características meteorológicas de las estaciones Socha y Boyera están expuestos a bajas temperaturas durante todo el año, con el uso de invernaderos tradicionales en este tipo de zonas se lograría elevar la temperatura hasta en 4.5°C , pero el problema es durante las noches teniendo en cuenta que la ganancia térmica no es suficiente para

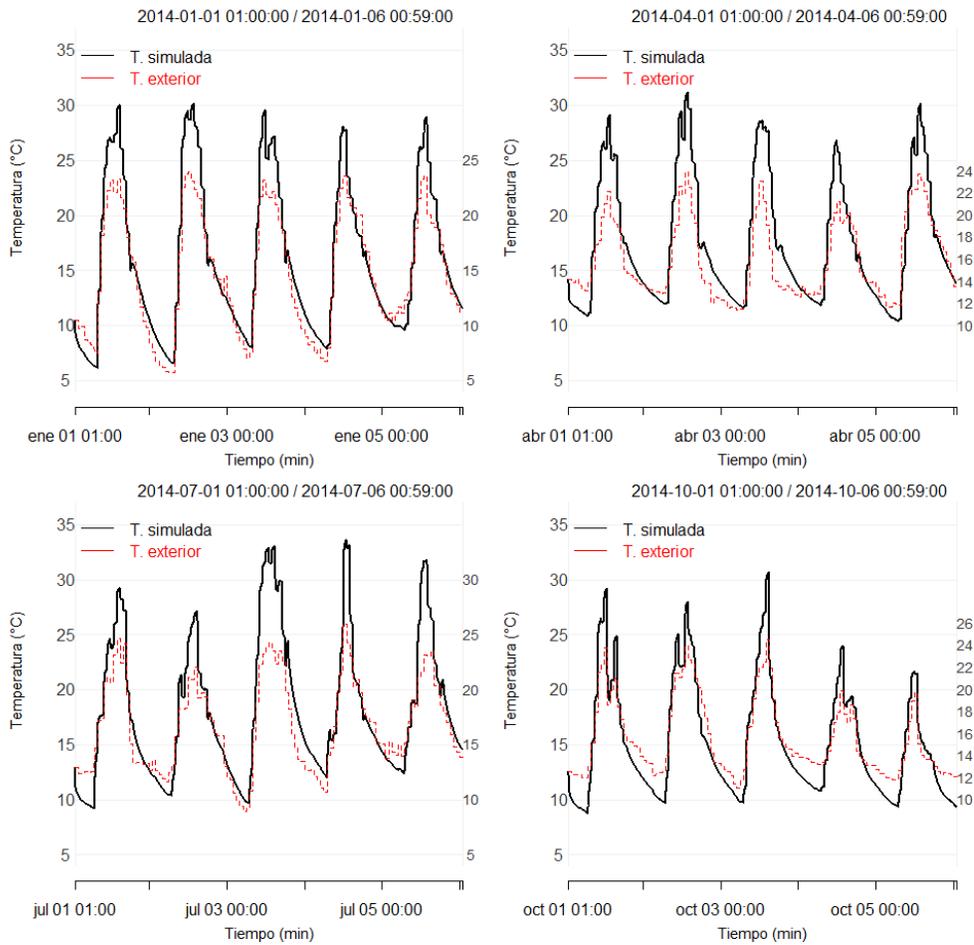


Figura 4-4.: Simulación de la temperatura del aire correspondiente a la estación Socha para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014.

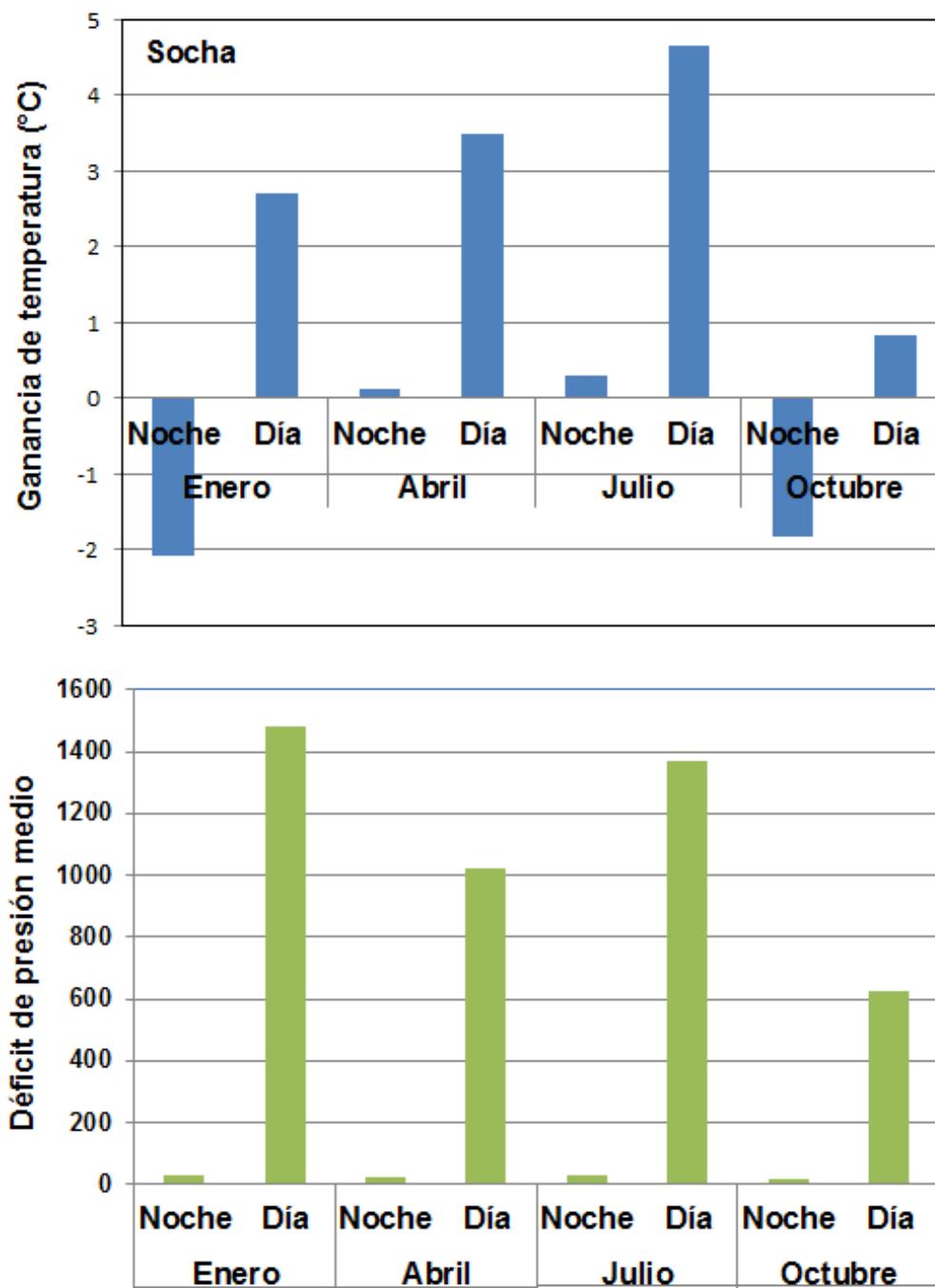


Figura 4-5.: Ganancia térmica y DPV medio del IT en Socha para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014.

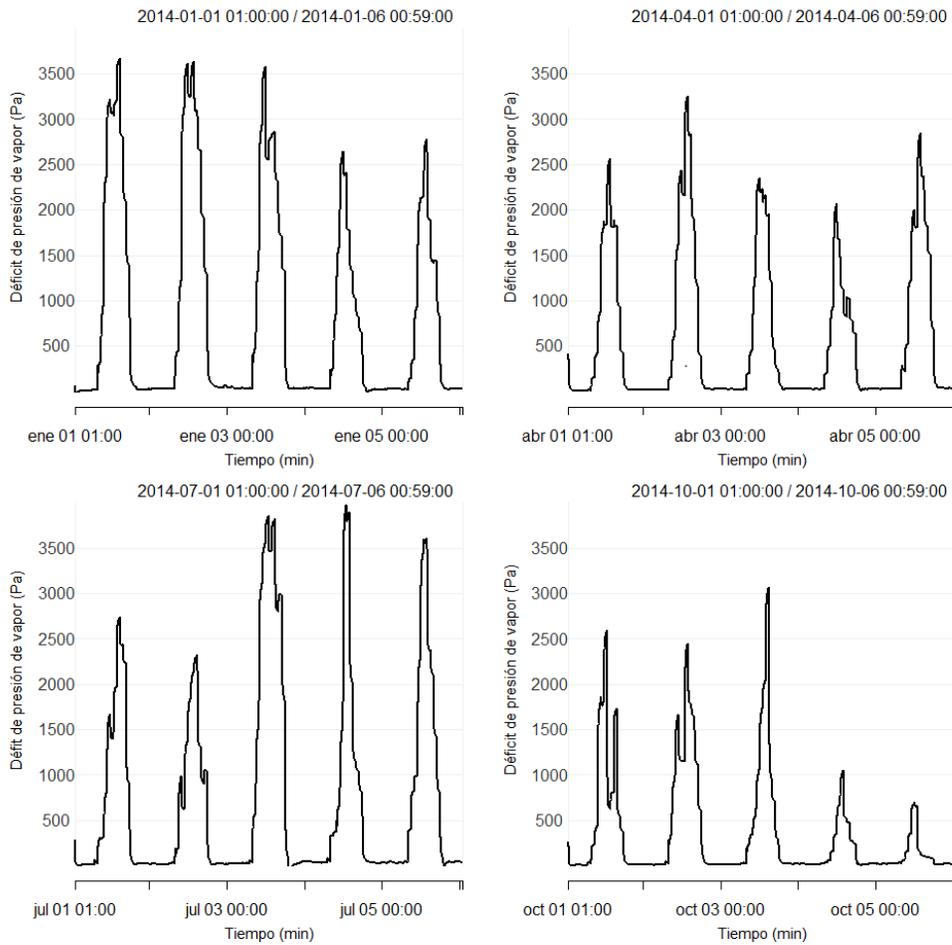


Figura 4-6.: Simulación del déficit presión de vapor correspondiente a la estación Socha para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014.

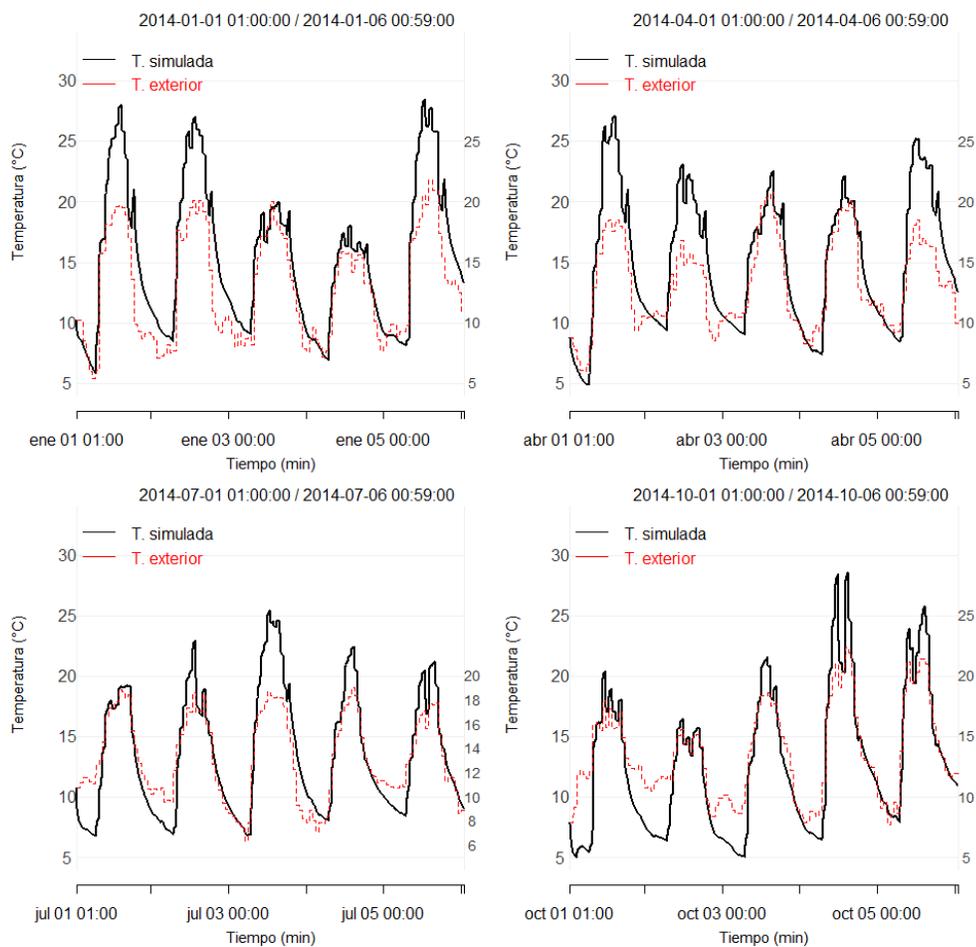


Figura 4-7.: Simulación de la temperatura del aire correspondiente a la estación Boyera para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

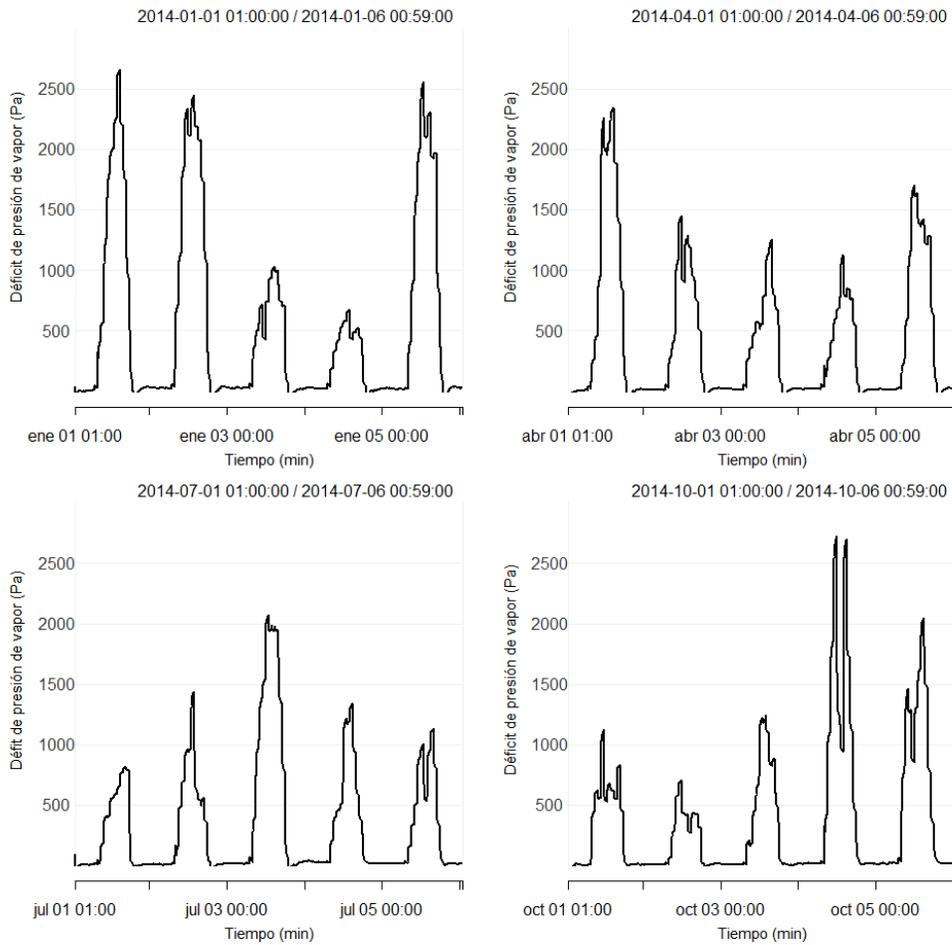


Figura 4-8.: Déficit de la presión de vapor correspondiente a la estación Boyera para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

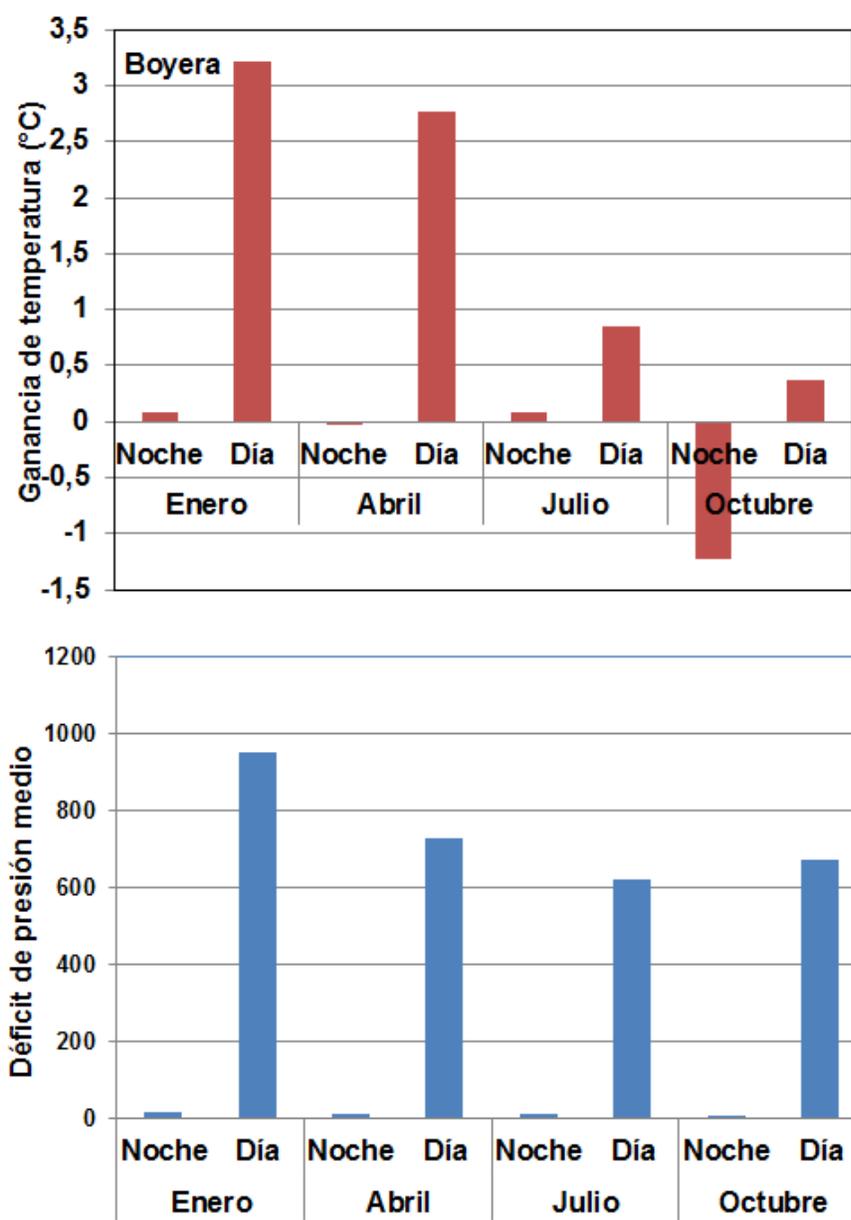


Figura 4-9.: Ganancia térmica y DPV medio del IT en Boyera para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

alcanzar el rango óptimo, incluso durante parte del día. Con una estructura como la utilizada en la simulación todavía existe la necesidad de protegerse de los mínimos biológicos o letales por lo menos en el caso de hortalizas y flores. En cuanto a el DPV se observó que en Socha el DPV con la misma estructura fue 1000Pa mayor que en Boyera. Otro aspecto a analizar en estos lugares es que dada la gran diferencia entre la temperatura mínima y máxima también es viable evaluar estrategias de almacenamiento de energía durante el día para ser reutilizada en la noche, en particular durante enero cuando parte del día tiene alta radiación y la noche bajas temperaturas.

Los datos correspondientes a las estaciones Emas y Villamaría, ambas ubicadas en la región central y suroccidental a 2200 msnm y 1902 msnm respectivamente se muestran en las figuras **4-10** y **4-11**. En las gráficas se observa que la diferencia entre el valor máximo y mínimo de la temperatura del aire en un mismo día fue de 12° en promedio, es decir que la amplitud de la oscilación en temperatura fue menor que en Socha y Boyera las cuales estaban a mayor altura sobre el nivel del mar. La humedad relativa promedio varió entre 70 y 90 %, la radiación solar osciló entre 0 y 800 Wm^{-2} y la velocidad del viento entre 0.5 y 5 ms^{-1} .

La simulación de la temperatura del aire interior con el invernadero tradicional ubicado bajo condiciones atmosféricas como las de la estación Emas se presenta en la figura **4-12** y la estimación de la ganancia térmica y DPV medio durante el periodo diurno y nocturno en la figura **4-14**. La máxima ganancia diurna fue de 3.2 °C y se obtuvo durante los días de julio y Octubre mientras que la nocturna fue de 1.6 °C en abril. El balance diurno menos positivo ocurrió en enero con solo 0.3 °C y el nocturno en octubre con 0.1°C. resultados obtenidos los días cuando la radiación exterior estuvo por debajo de los 400 Wm^{-2} . El mayor número de días con inversión térmica ocurre en enero con un valor medio de -1.4°C respecto a la temperatura externa, esto debido a la disminución de la radiación promedio en 50 Wm^{-2} con relación a las demás semanas. El DPV presentado en la figura **4-13**, no superó los 2000Pa mientras que en julio y octubre fue mayor llegando a 3500Pa en algunos días. El DPV continua dentro del rango de 0.1 a 1kPa continuando alrededor de valores que no implican un alto impacto sobre el cultivo.

La simulación de la temperatura del aire interior con el invernadero tradicional ubicado bajo condiciones atmosféricas como las de la estación Villamaría se presenta en la

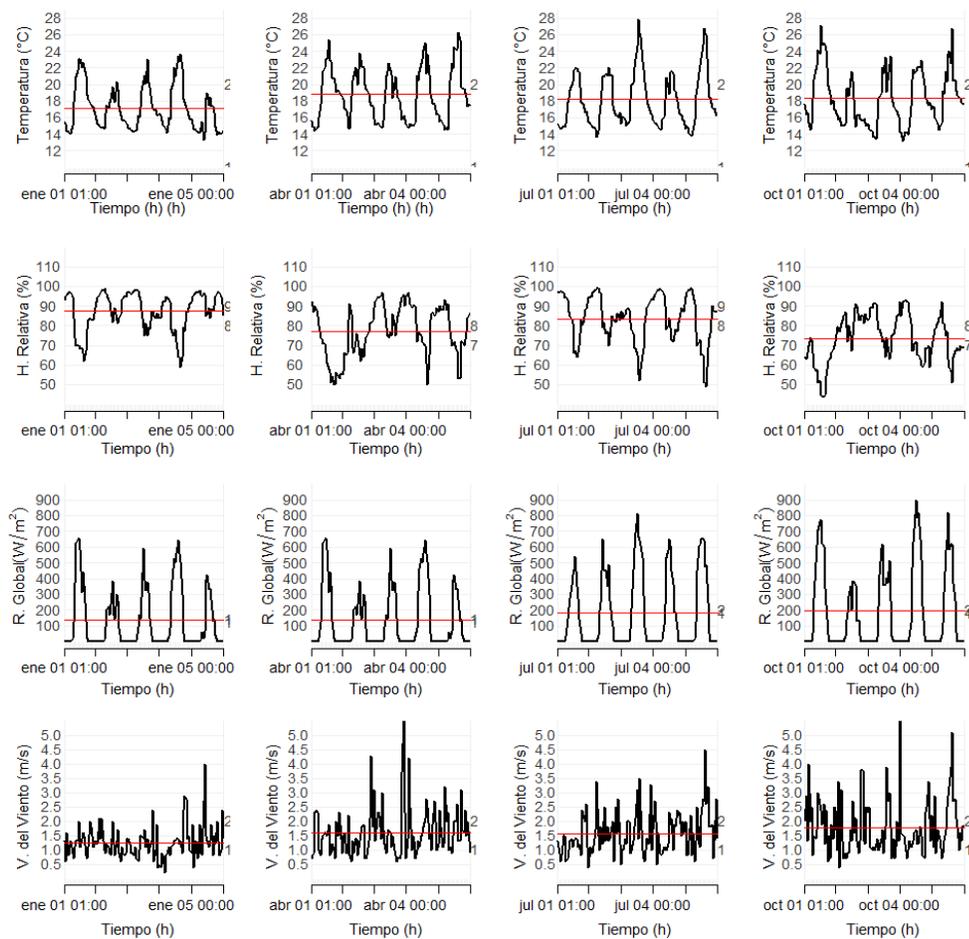


Figura 4-10.: Información climática de entrada correspondiente a la estación Emas para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

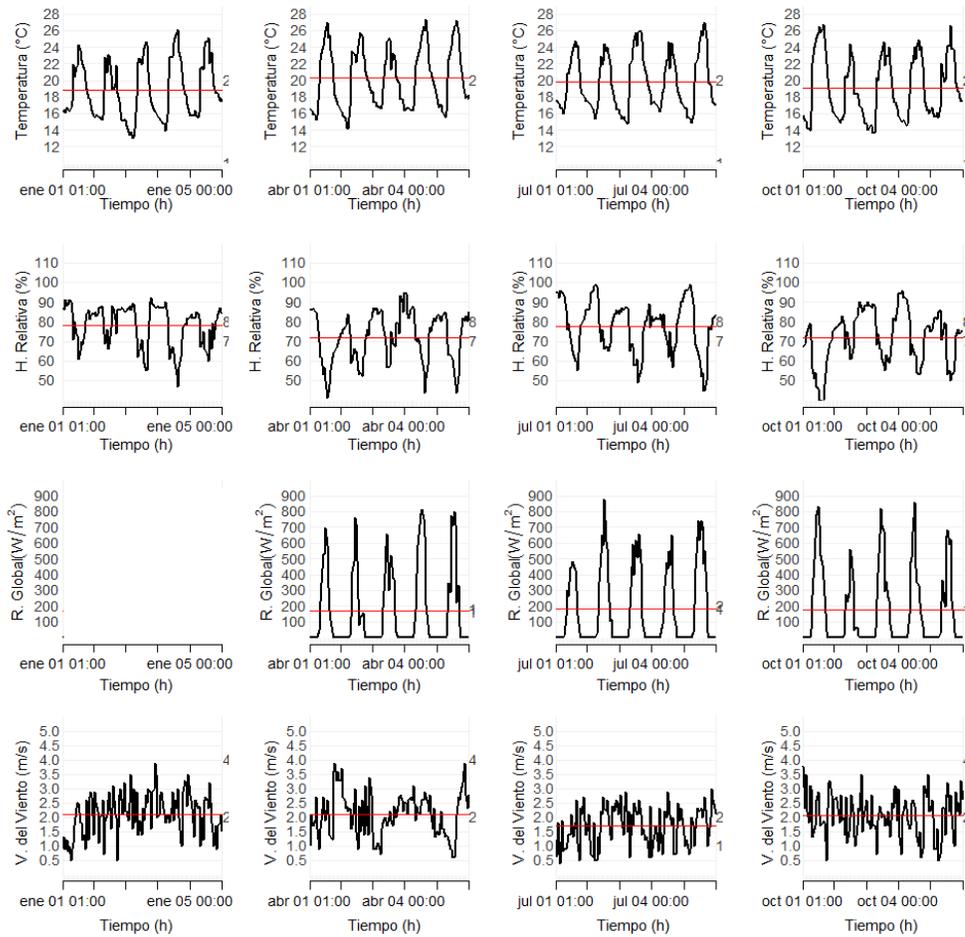


Figura 4-11.: Información climática de entrada correspondiente a la estación Villamaría para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

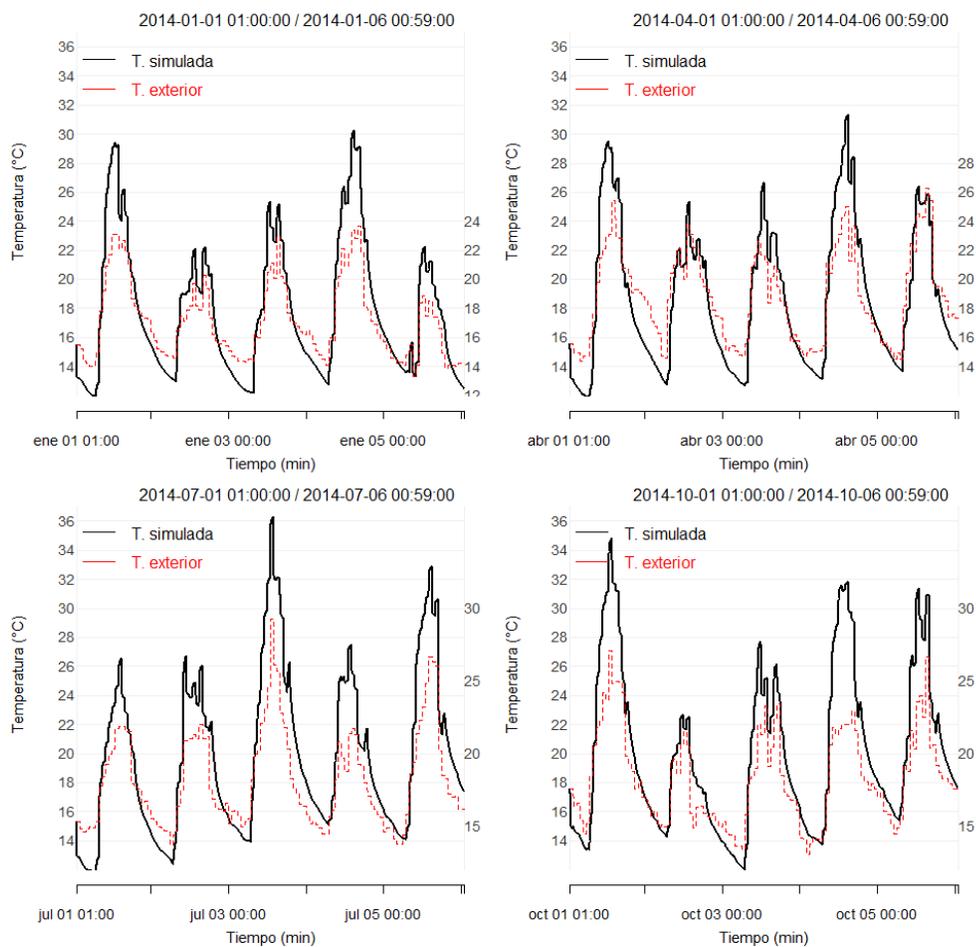


Figura 4-12.: Simulación de la temperatura del aire correspondiente a la estación Emas para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

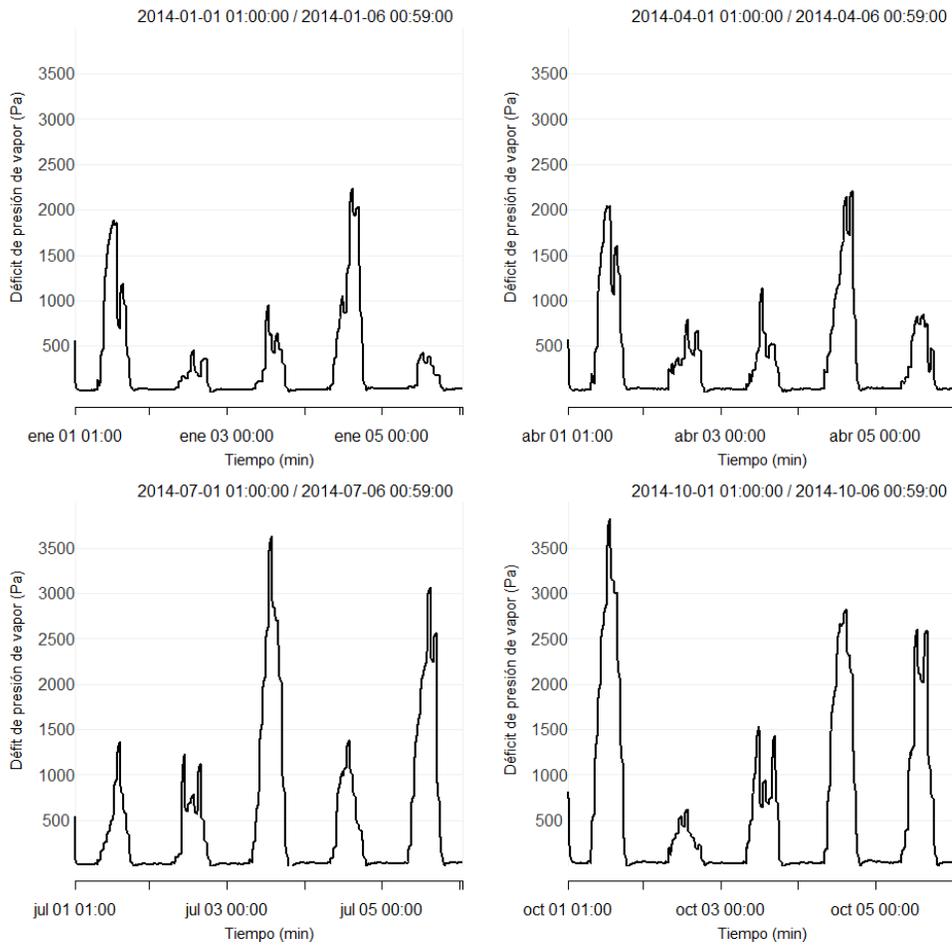


Figura 4-13.: Déficit de la presión de vapor correspondiente a la estación Emas para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

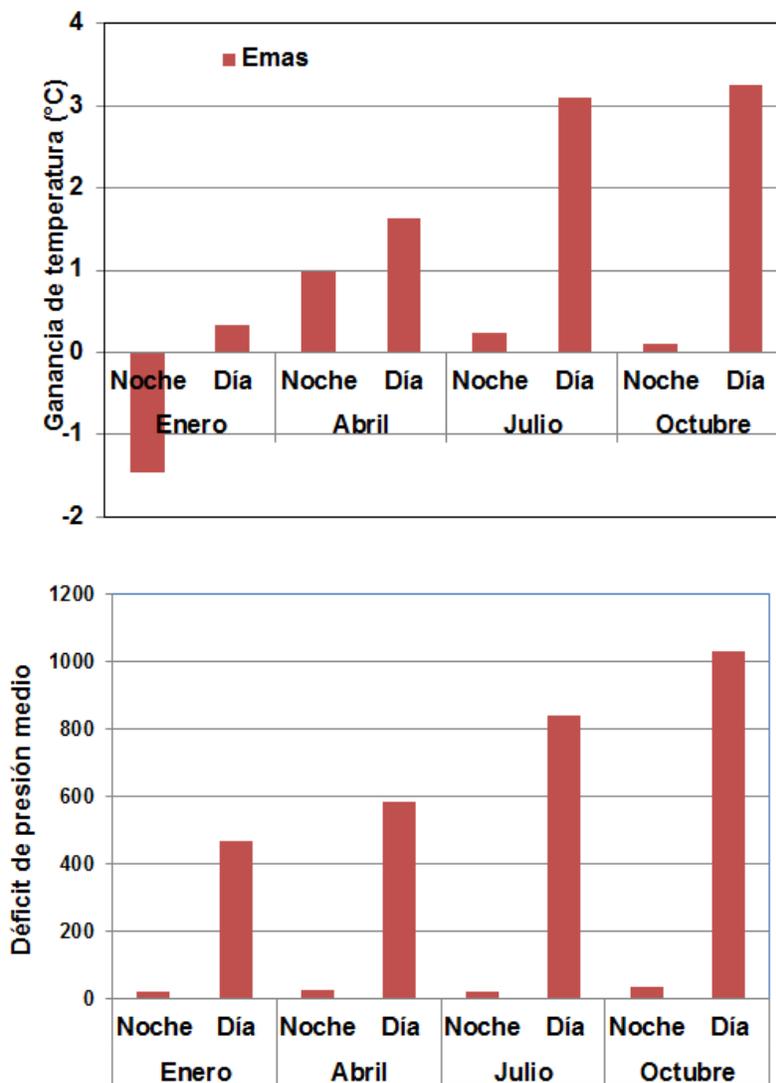


Figura 4-14.: Ganancia térmica y DPV medio del IT en Socha para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

figura **4-15** y la estimación de la ganancia térmica y DPV medio durante el periodo diurno y nocturno en la figura **4-17**. La máxima ganancia diurna se obtuvo en abril con 3.2°C en promedio, aunque para las demás semanas el balance también fue positivo con promedios cercanos a 3°C . La mayor diferencia entre ambos ambientes en la noche ocurre en octubre con 1.5°C seguido de abril y julio con valores cercanos a 1°C , en enero no hubo datos disponibles de radiación por lo que no fue posible realizar la simulación para esa semana. El caso de Villamaria es particular por la similitud del comportamiento de la temperatura del aire durante todas las semanas exploradas. El DPV **4-16**, es mayor en la semana de enero llegando a 4500Pa , mientras que en los demás casos oscila entre 0 y 3000Pa . El DPV superó la barrera de 1kPa como es esperado dada la mayor temperatura media de la zona, al igual que la ganancia térmica los valores no varían significativamente a lo largo del año.

Las condiciones climáticas naturales representadas por estaciones como Emas o Villamaria son adecuadas para productos como los de la tabla **4-1** entre otros. El uso de invernaderos es justificado en el caso de necesitar un mayor control sobre la cantidad y calidad de la producción, protegerse de lluvia excesiva o de presencia de plagas. El invernadero puede ser sencillo y con ventilación natural teniendo en cuenta la menor diferencia entre las temperaturas diurnas y nocturnas.

Los datos correspondientes a las estaciones Armenia y Marsella, ubicadas en la región central y suroccidental a 1458msnm y a 1649msnm se presentan en las figuras **4-18** y **4-19** respectivamente. La diferencia entre el valor máximo y mínimo que puede alcanzar la temperatura del aire en un mismo día fue hasta de 10° . En esta zona a menor altura la diferencia de temperatura entre día y noche se redujo. Las temperaturas fueron mayores y se registraron datos por encima de 30°C . La humedad de estas estaciones oscila entre 50% y 100% . El rango de la radiación solar fue de 0 y 900Wm^{-2} y los máximos locales pueden variar entre 400, 700 y 900Wm^{-2} de un día a otro, lo que refleja actividad convectiva y nubosidad frecuente durante esos días. La velocidad del viento varió entre 0 y 4.5ms^{-1} .

La simulación de la temperatura del aire interior con el invernadero tradicional ubicado bajo condiciones atmosféricas como las de la estación Armenia se presenta en la figura **4-20** y la estimación de la ganancia térmica durante el periodo diurno y nocturno en la figura **4-22**. Las mayores ganancias térmicas promedio se obtuvieron

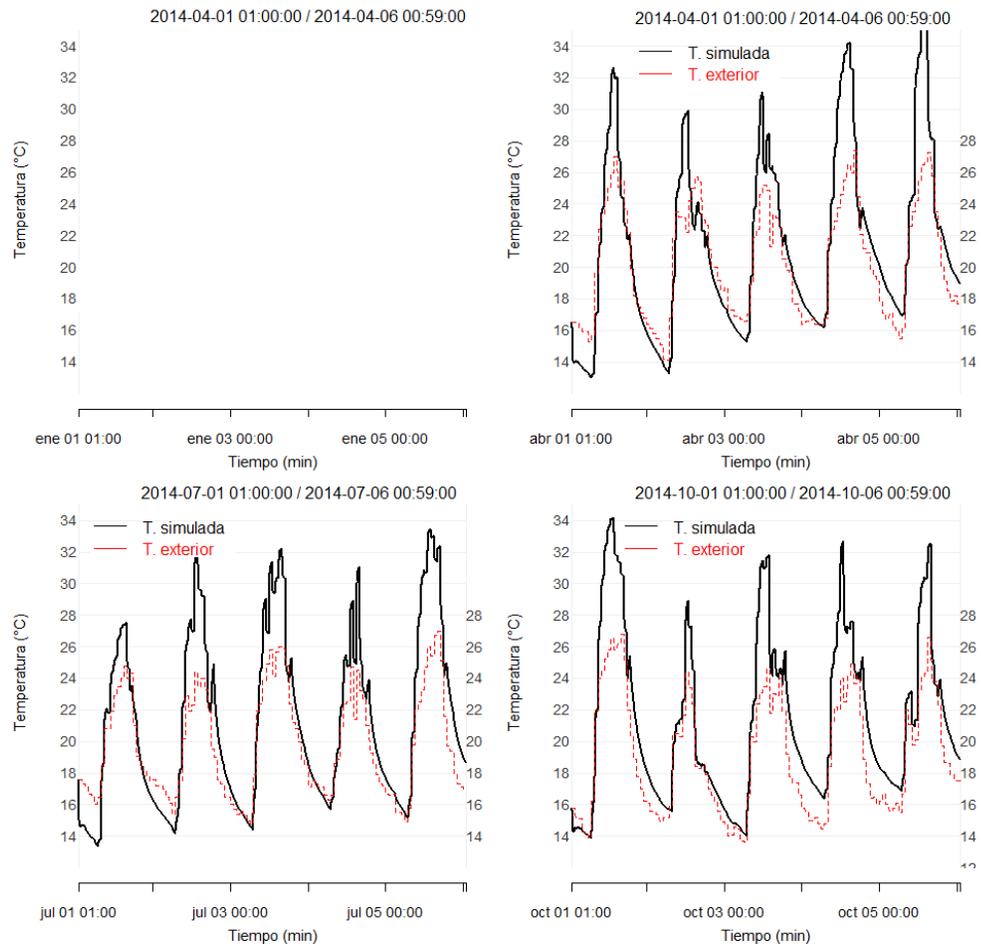


Figura 4-15.: Simulación de la temperatura del aire correspondiente a la estación Villamaría para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

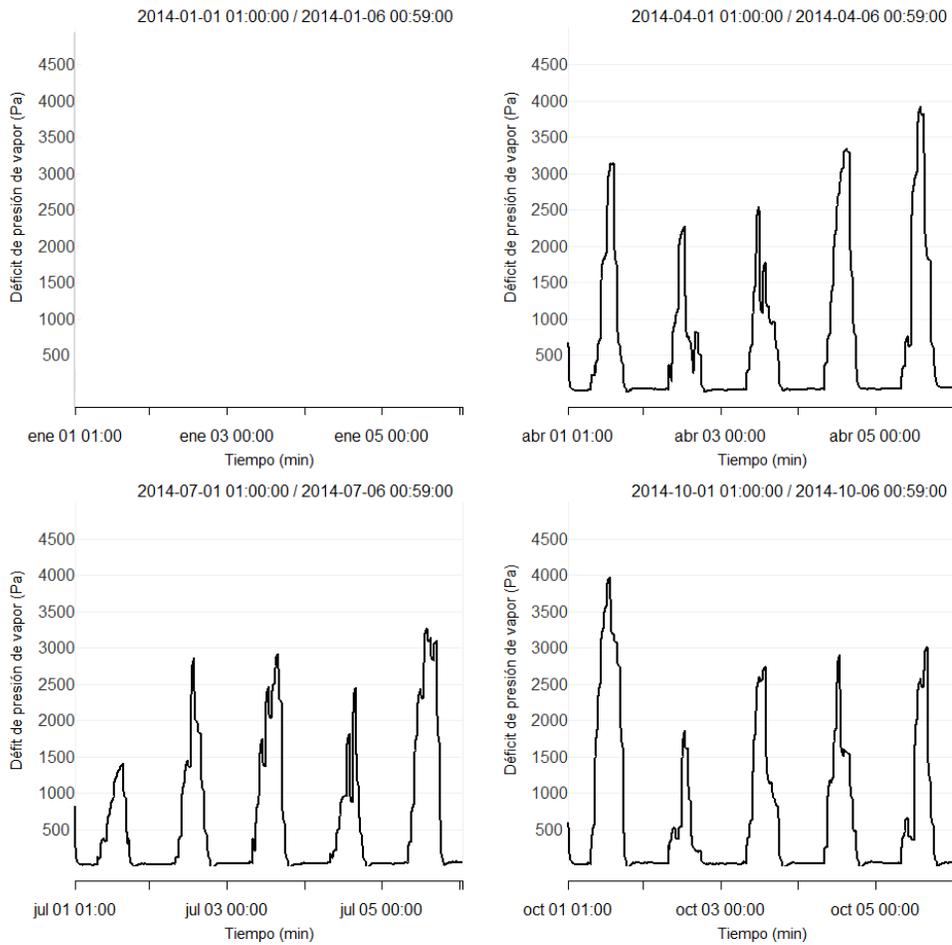


Figura 4-16.: Déficit de la presión de vapor correspondiente a la estación Villamaría para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

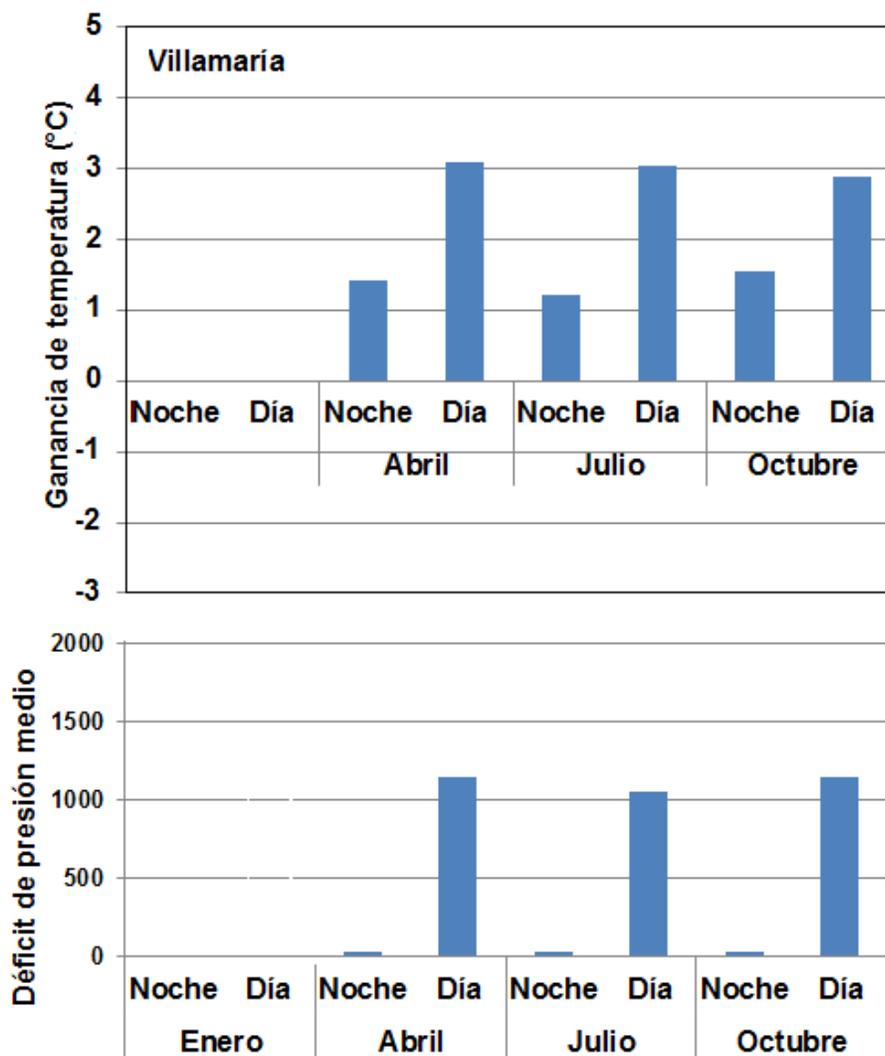


Figura 4-17.: Ganancia térmica y DPV medio del IT en Villamaría para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

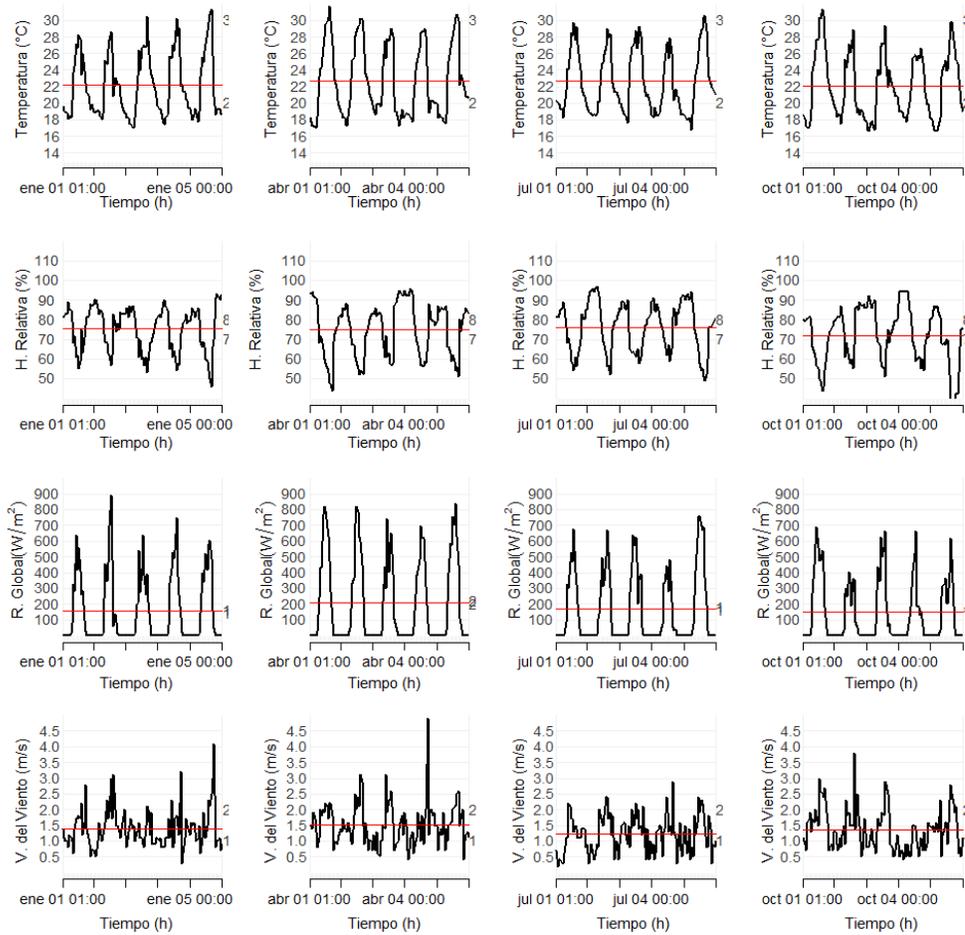


Figura 4-18.: Información climática de entrada correspondiente a la estación Armenia para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

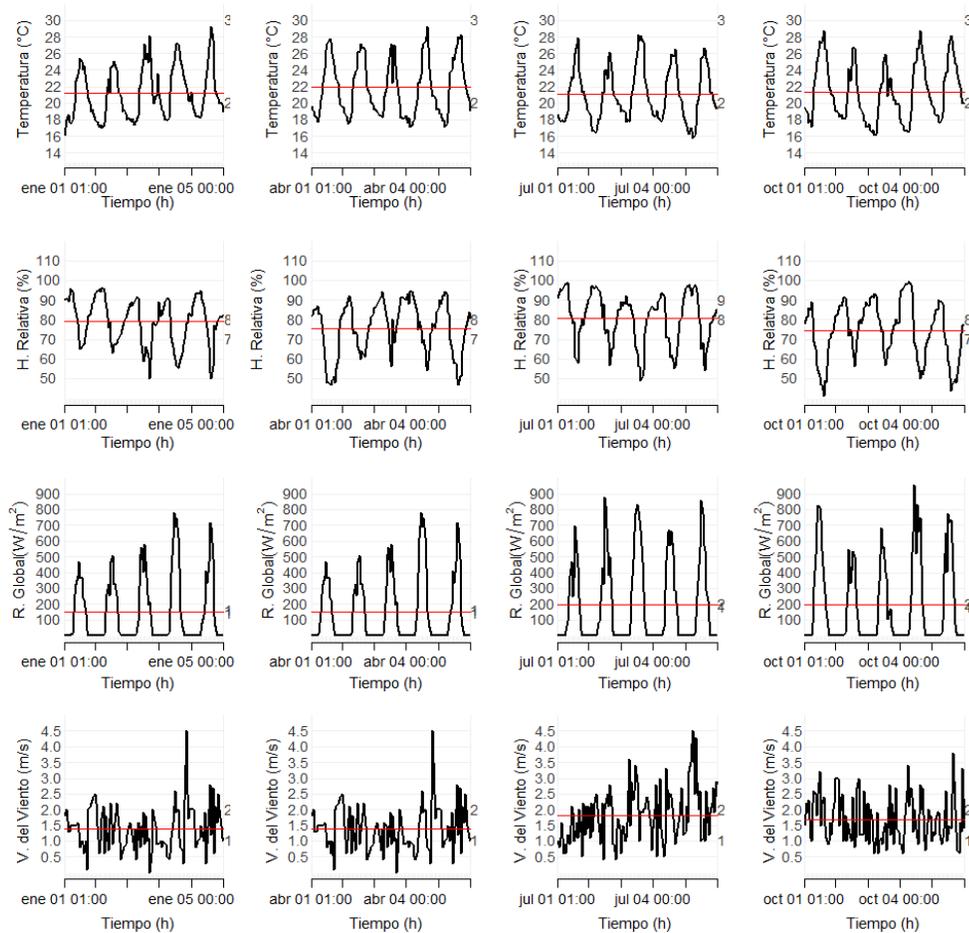


Figura 4-19.: Información climática de entrada correspondiente a la estación Marsella para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

en la semana de abril, 3.2°C en el día y 1.1°C en la noche, mientras que la menor durante la semana de octubre con solo 1°C en el día. El DPV osciló entre 0 y 4000 Pa como se observa en la figura **4-21**, El DPV medio supera los 1.6kPa sugiriendo que la planta puede estar expuesta a una mayor demanda de agua por parte de la atmósfera.

La simulación de la temperatura del aire interior con el invernadero tradicional ubicado bajo condiciones atmosféricas como las de la estación Marsella se presenta en la figura **4-23** y la estimación de la ganancia térmica durante el periodo diurno y nocturno en la figura **4-25**. En la semana de julio y octubre se obtienen diferencias positivas promedio de 3°C en el día y de 0.7°C en la noche. Por el contrario en enero la diferencias son más bajas. Debido a que el rango natural en el cual osciló la temperatura en Armenia y Marsella esta sobre los 17°C durante la noche el uso de invernaderos en este tipo de zonas se justifica en la medida que sean eficientes para disminuir la temperatura cuando sus valores superen el máximo óptimo o biológico por temporadas prolongadas o ante fenómenos como el ENSO. La estructura del invernadero tradicional debe ser entonces ideada para tal fin. En la figura **4-24** se observa que el DPV oscila entre 0 y 4000 Pa. El DPV medio supera los también es superior a 1.5 kPa por la mayor temperatura promedio del ambiente.

Los datos correspondientes a la estación Aragón ubicada en la región noroccidental a 2600 msnm se muestran en la figura**4-26**. La diferencia entre el valor máximo y mínimo que alcanzó la temperatura del aire en un mismo día fue hasta de 15°C . La humedad relativa promedio se mantuvo para los casos analizados entre el 80 % y el 90 %. En las cuatro semanas el comportamiento de la humedad fue uniforme debido a que la amplitud de la precipitación fue similar en la época seca y húmeda. La radiación solar osciló entre 0 y 1000 Wm^{-2} y la velocidad del viento entre 0.5 y 6.5 ms^{-1} . Los cultivos ubicados en esta zona necesitan protegerse de las bajas temperaturas especialmente en las madrugadas. A diferencia de las estaciones de la región central y suroccidental en Aragón la época más crítica fue enero cuando se registraron las menores temperaturas, incluso por debajo del valor letal de varias de las especies cultivadas en el sector. (tabla **4-1**).

La simulación de la temperatura del aire interior con el invernadero tradicional ubicado bajo condiciones atmosféricas como las de la estación Aragón se presenta en la figura **4-27** y la estimación de la ganancia térmica durante el periodo diurno y

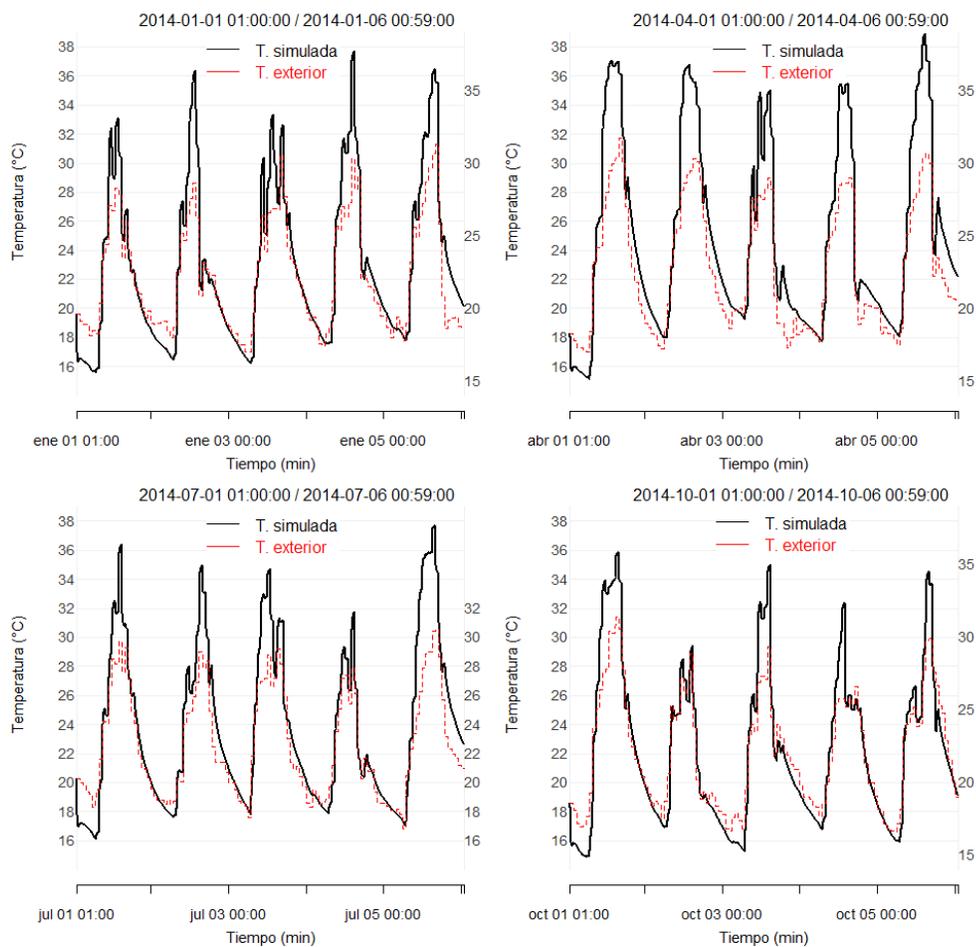


Figura 4-20.: Simulación de la temperatura del aire correspondiente a la estación Armenia para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

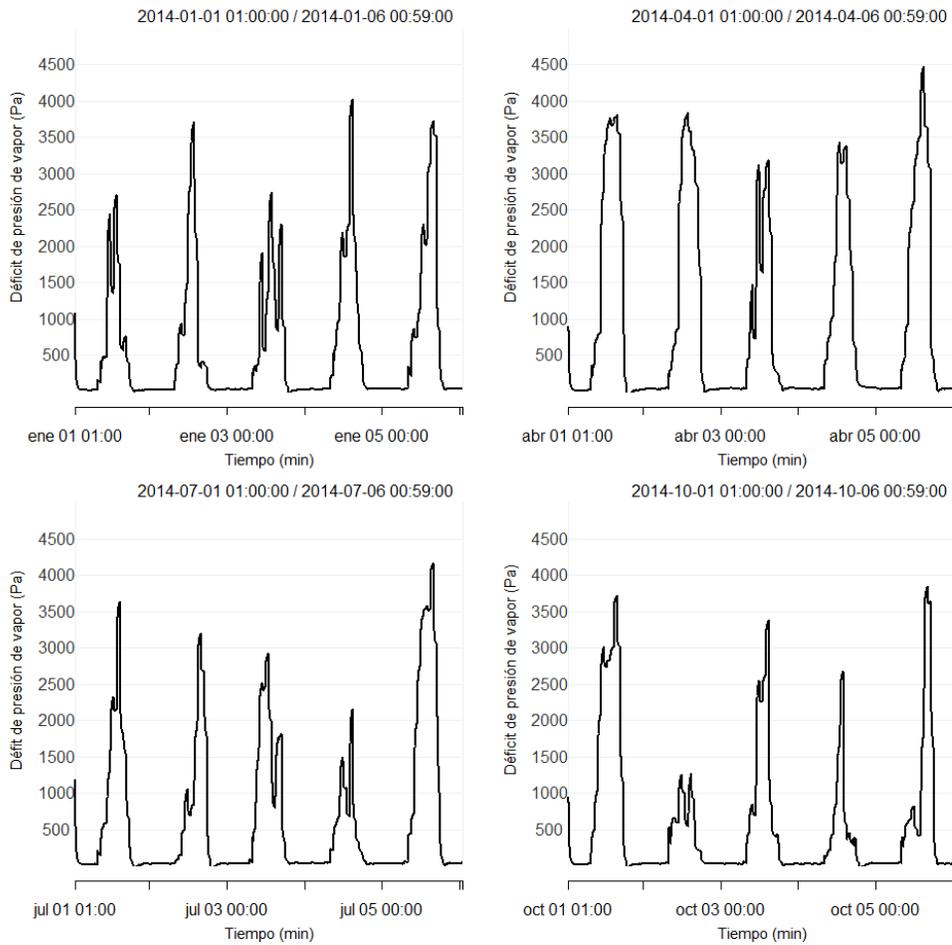


Figura 4-21.: Déficit de la presión de vapor correspondiente a la estación Armenia para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

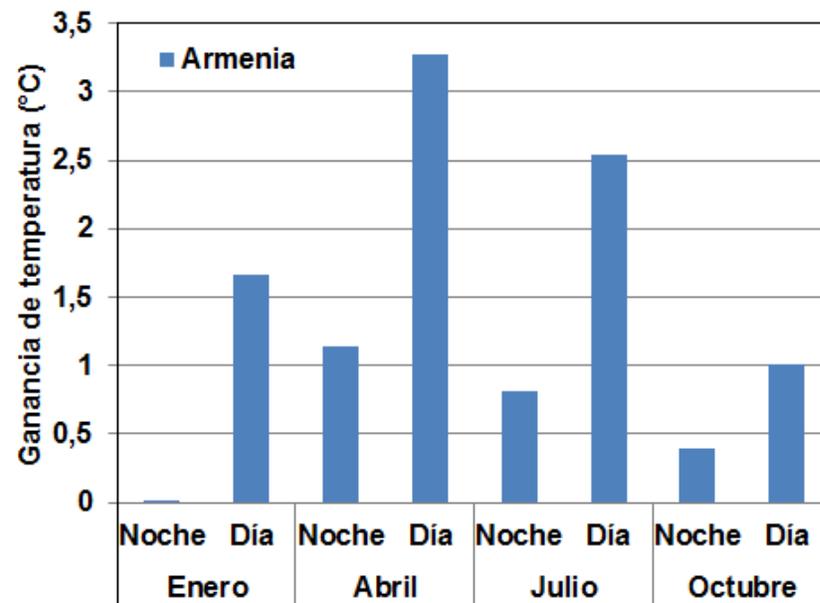


Figura 4-22.: Simulación de la temperatura del aire correspondiente a la estación Armenia para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

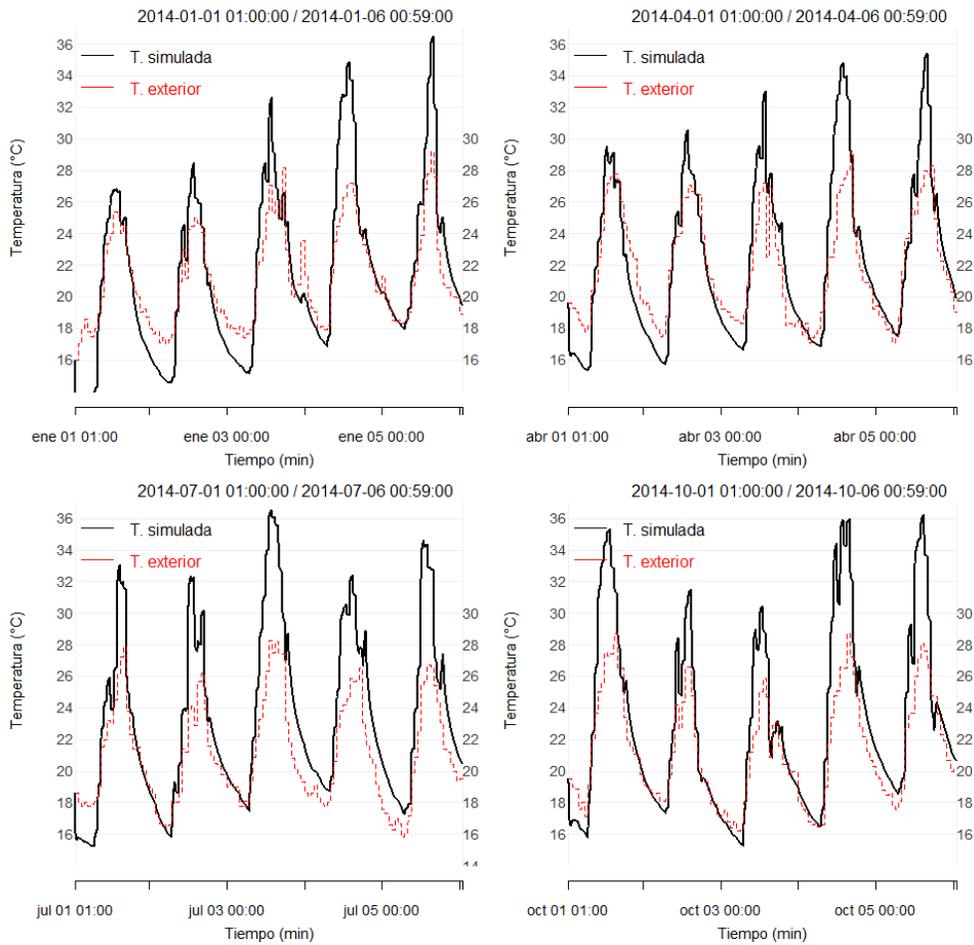


Figura 4-23.: Simulación de la temperatura del aire correspondiente a la estación Marsella para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

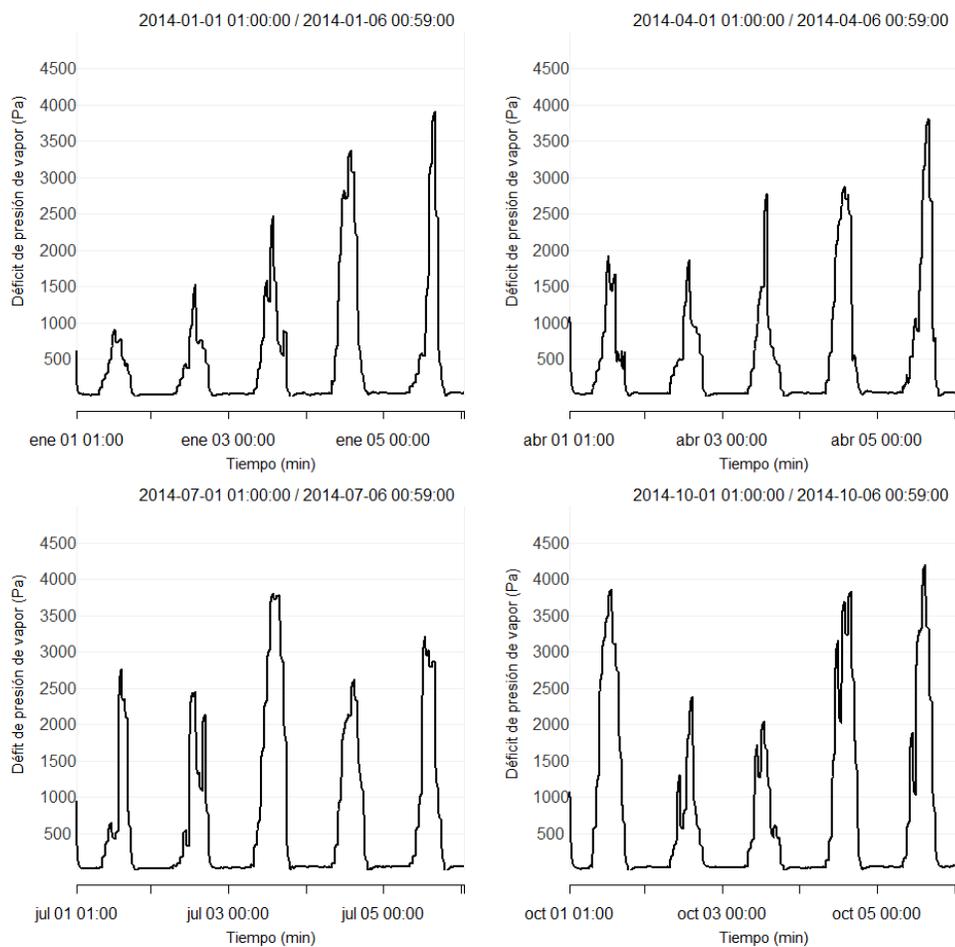


Figura 4-24.: Déficit de la presión de vapor correspondiente a la estación Marsella para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

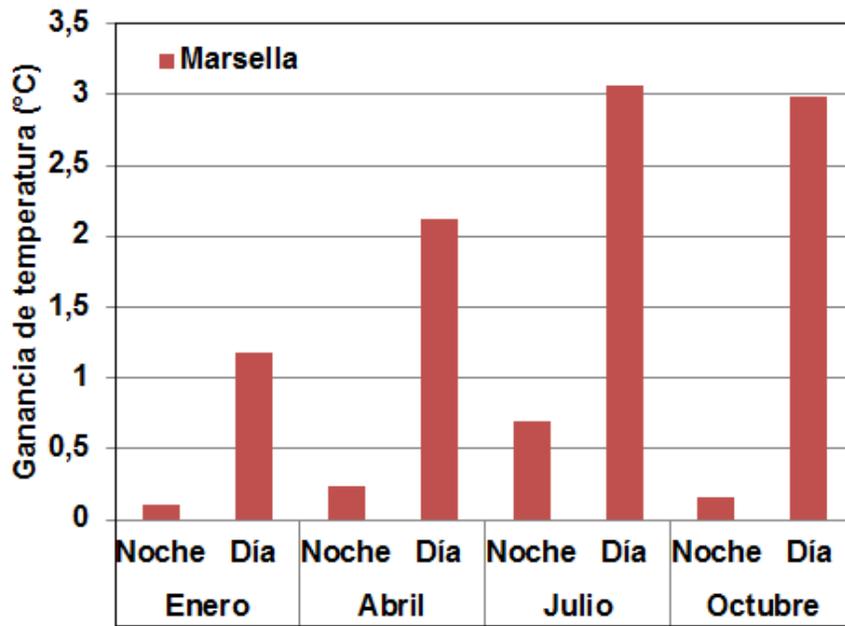


Figura 4-25.: Simulación de la temperatura del aire correspondiente a la estación Marsella para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

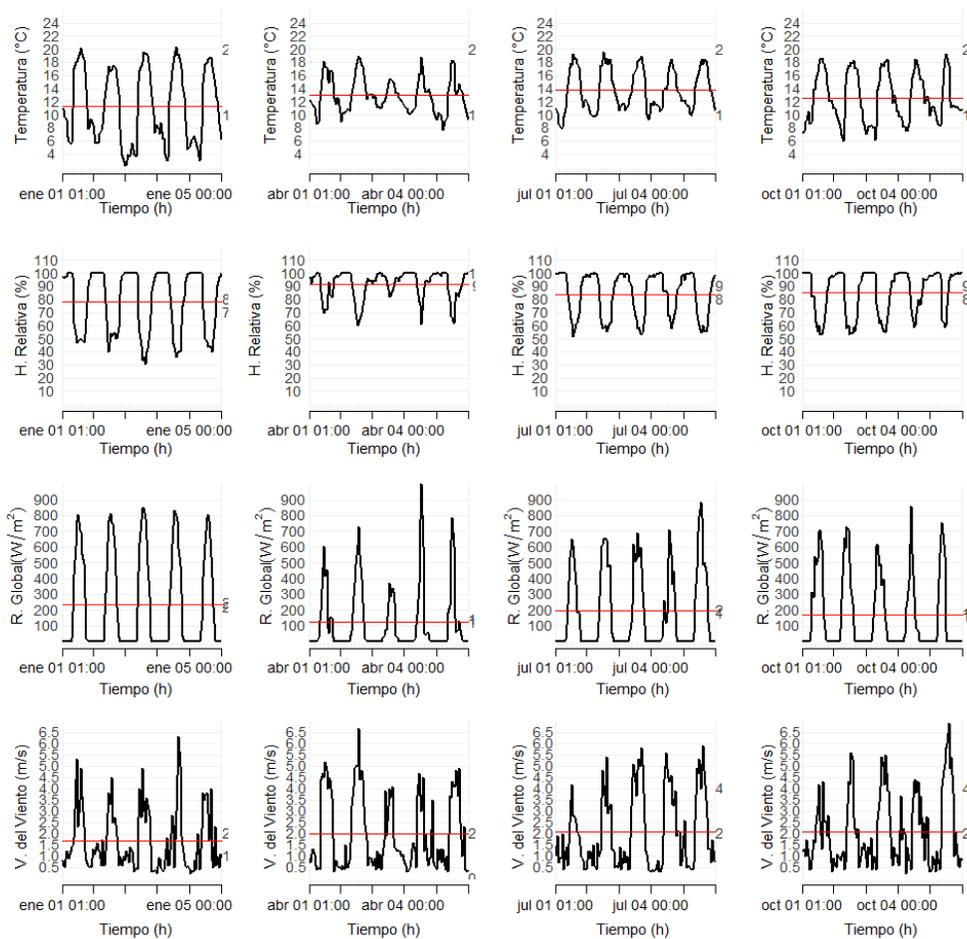


Figura 4-26.: Información climática de entrada correspondiente a la estación Aragón para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

nocturno en la figura **4-29**. Debido a las mayores temperaturas del aire se presentó ganancia térmica en todas las cuatro semanas estudiadas, las mayores en enero y julio y las menores en abril y octubre con valores desde los 0.3 °C hasta los 5.2°C, nunca hay inversión térmica. El DPV oscila entre 0 y 2500 Pa en las cuatro semanas de la simulación como se observa en la figura **4-27**. El DPV medio es mayor durante enero, pero se mantienen por debajo de lo 1.2 kPa.

Los datos correspondientes a la estación Selva ubicada en la región noroccidental ubicada a 2090 msnm se muestran en la figura **4-30**. La diferencia entre el valor máximo y mínimo que puede alcanzar la temperatura del aire en un mismo día fue de 13°C en promedio. La exposición a temperaturas por debajo de 10°C fue menor y la ocurrencia de heladas en estas condiciones fue muy baja. La humedad relativa promedio también permaneció entre el 80 y el 90%. El rango de la radiación es el mismo que en la estación Aragón, entre 0 y 1000 Wm^{-2} . La velocidad del viento es menor por lo menos para las semanas revisadas y oscila entre 0.5 y 3,5 ms^{-1} . Con variables atmosféricas como las de la estación Selva las condiciones naturales son ideales para especies hortícolas y flores, el uso del invernadero garantizaría la protección ante eventos extremos y un mayor control sobre la calidad del producto.

La simulación de la temperatura del aire interior con el invernadero tradicional ubicado bajo condiciones atmosféricas como las de la estación Selva se presenta en la figura **4-31** y la estimación de la ganancia térmica durante el periodo diurno y nocturno en la figura **4-33**. Los resultados más positivos tanto en el día como en la noche ocurren en la semana de julio con 5.4°C y 4°C respectivamente, mientras que las ganancias más bajas se obtienen en la de enero, mes en que además se produce la única inversión térmica. Un factor clave para que en Selva se obtenga una de las mayores ganancias son los valores de velocidad del viento que en las cuatro épocas oscilaron alrededor de 1 ms^{-1} valor que esta por debajo del promedio de todos los demás casos analizados hasta el momento. El DPV oscila entre 0 y 3500 Pa a lo largo de las cuatro semanas, siendo mayor en promedio los días de julio como se aprecia en la figura **4-32**. El DPV medio llega hasta un poco más de 1.4 kPa en promedio y el menor valor coincide con la segunda temporada húmeda por la mayor disponibilidad de agua en el ambiente.

Las variables atmosféricas de las estaciones Aragón y Selva ubicadas en la región noroccidental presentan un comportamiento uniforme en las cuatro semanas revisadas

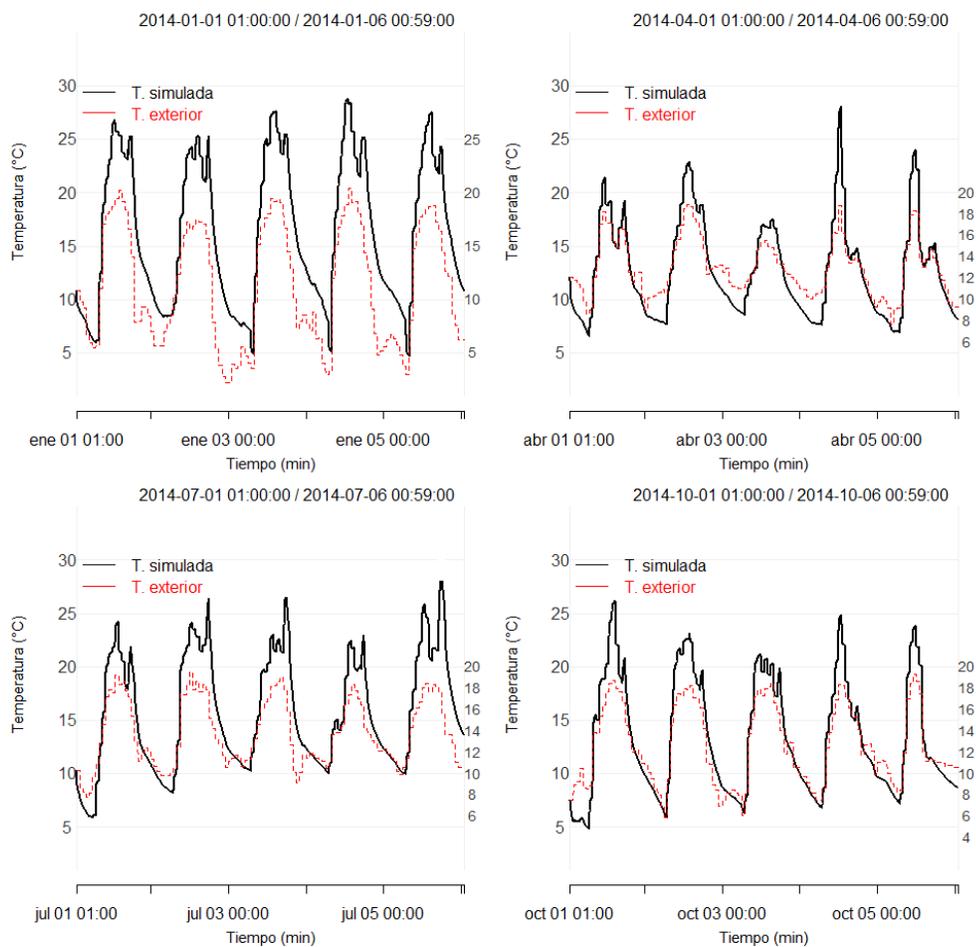


Figura 4-27.: Simulación de la temperatura del aire correspondiente a la estación Aragón para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

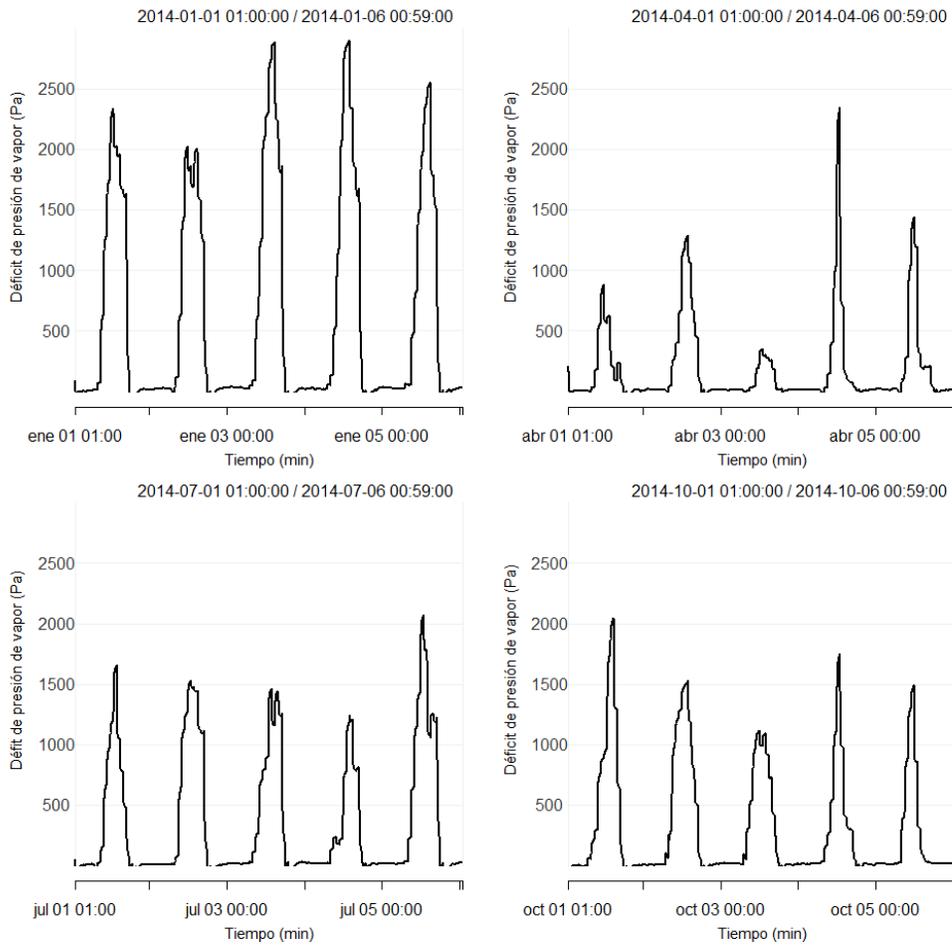


Figura 4-28.: Déficit de la presión de vapor correspondiente a la estación Aragón para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

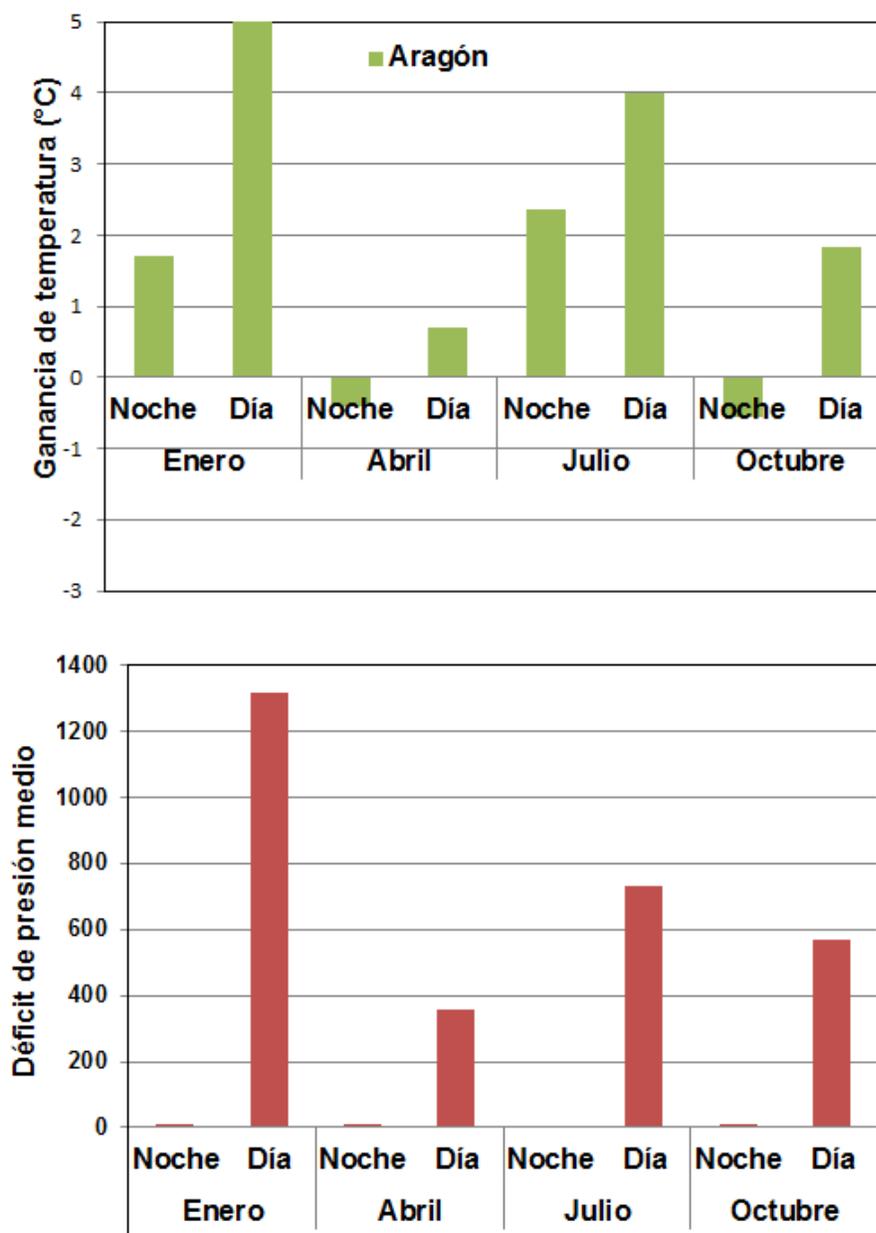


Figura 4-29.: Ganancia térmica y DPV medio del IT en Aragón Aragón para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

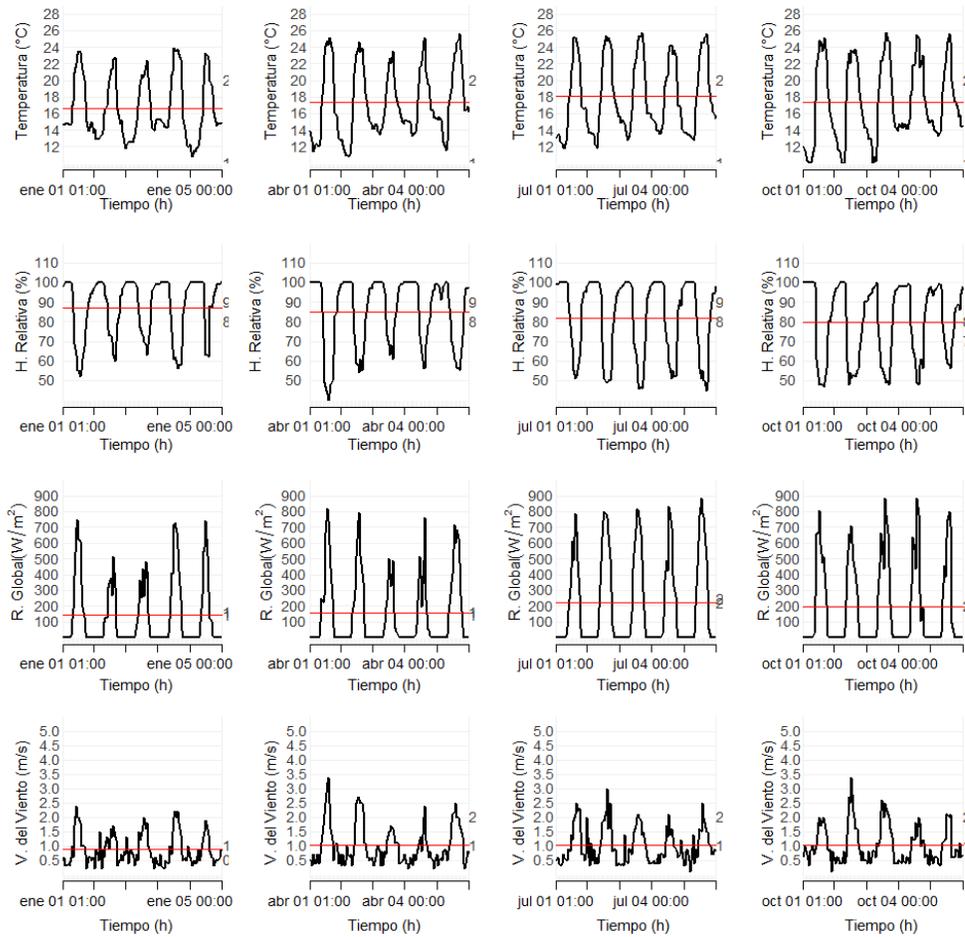


Figura 4-30.: Información climática de entrada correspondiente a la estación Selva para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

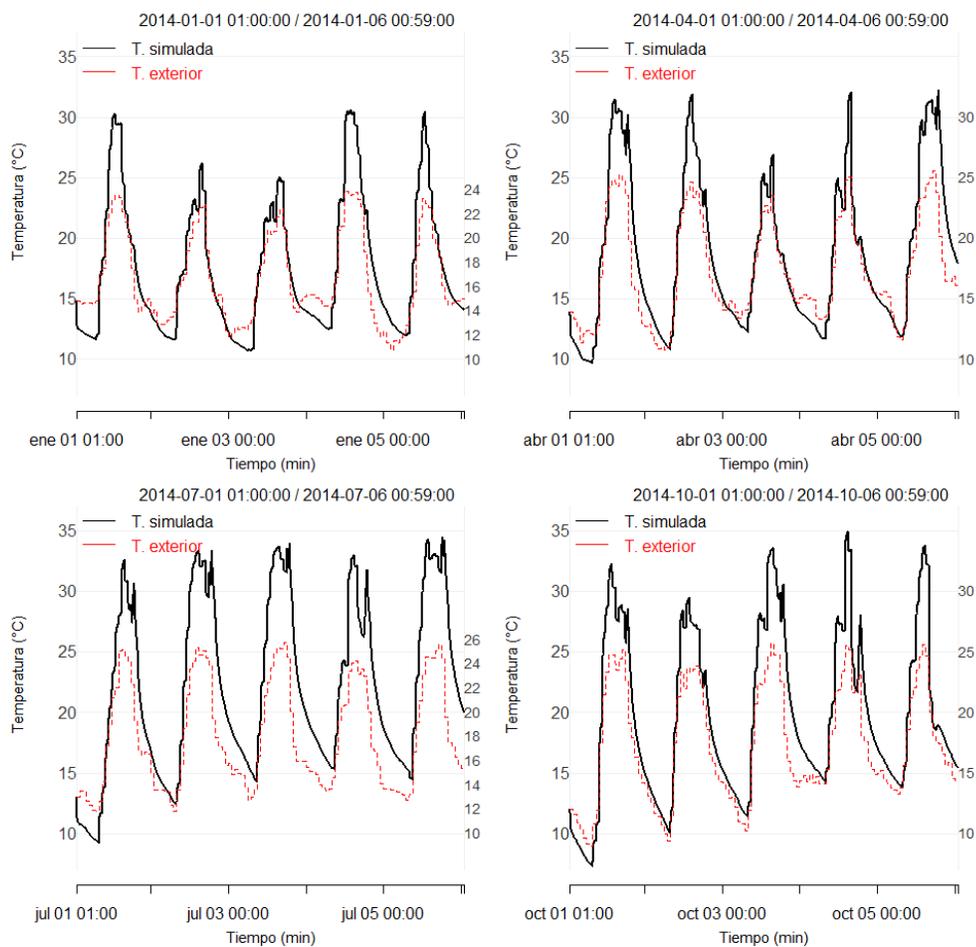


Figura 4-31.: Simulación de la temperatura del aire correspondiente a la estación Selva para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014.

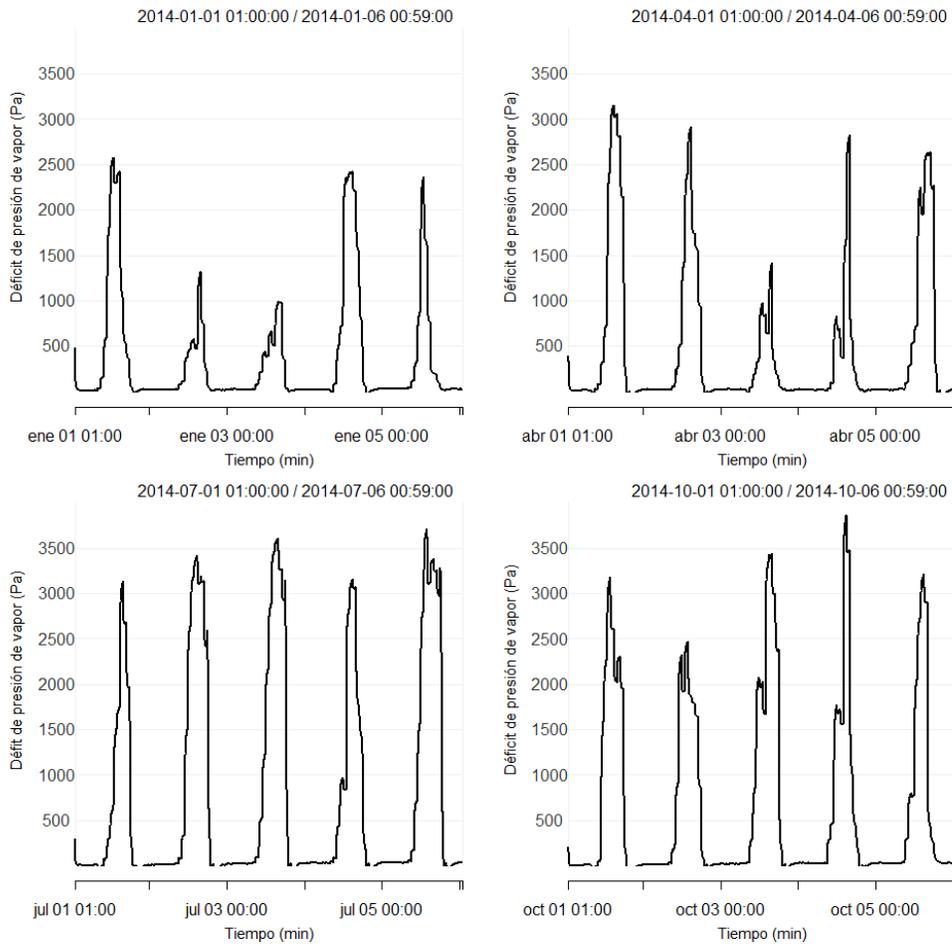


Figura 4-32.: Déficit de la presión de vapor correspondiente a la estación Selva para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014.

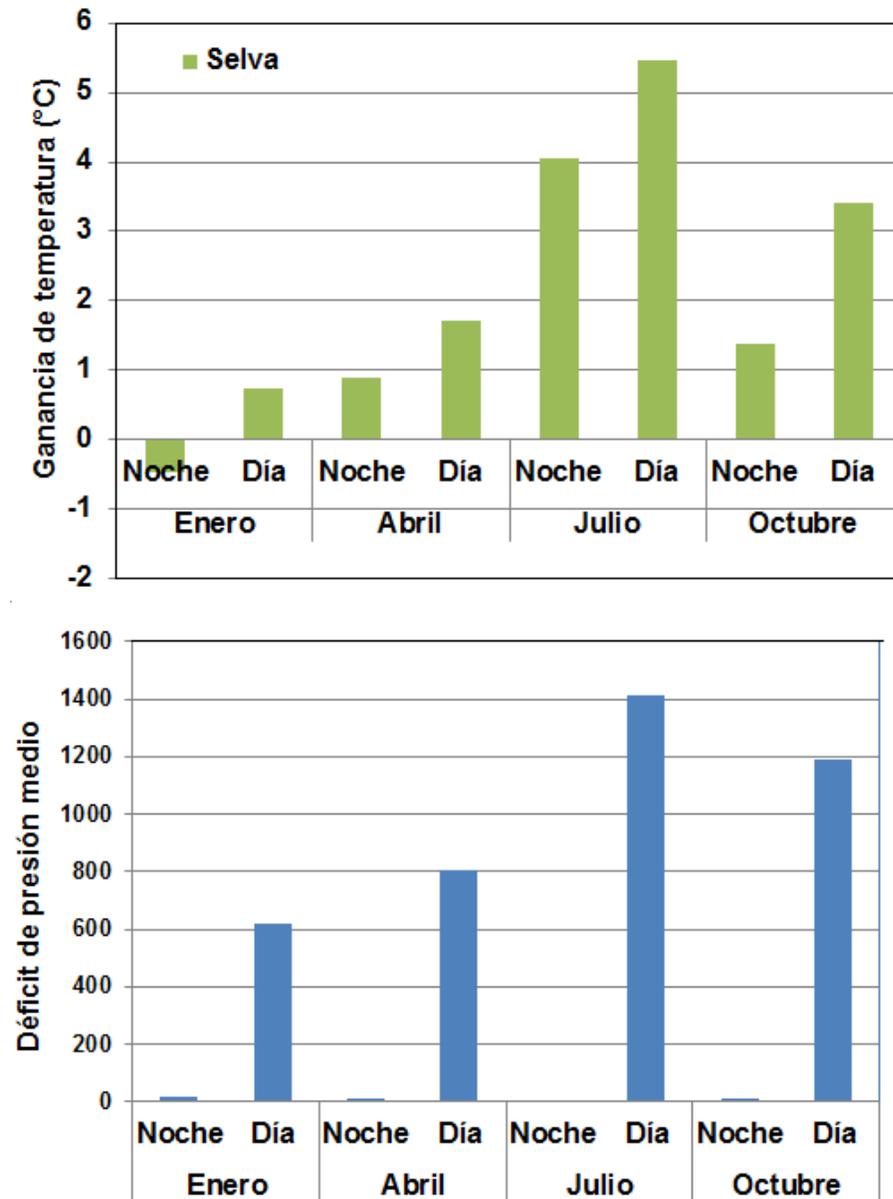


Figura 4-33.: Ganancia térmica y DPV medio del IT en Selva para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014.

debido a la menor diferencia entre las temporadas húmedas y secas, este hecho se ve reflejado tanto en la temperatura como en la humedad del aire. Por su ubicación a esta zona alcanzan a llegar masas húmedas del Pacífico que pasan sobre la cordillera occidental que en esta latitud tiene menor elevación, por esa razón los valores de humedad están en promedio entre 80-90% o más y disminuye entre más hacia el oriente. En esta región la amplitud de la temperatura durante el día es menor comparada con la alcanzada en la región central y suroccidental y las necesidades térmicas que pueden tener los invernaderos de esta región también son menores pues la temperatura promedio del aire es mayor.

Los datos de la estación Pamplona ubicada en la región Santander a 2362msnm se muestran en la figura 4-34. La diferencia entre el valor máximo y mínimo que puede alcanzar la temperatura del aire en un mismo día fue hasta de 13°C. La humedad relativa promedio oscila alrededor del 70% y es menor respecto a la registrada hacia el sector occidental porque los sistemas sinópticos del Pacífico tienen menor influencia. La radiación solar varió entre 0-900 Wm^{-2} y la velocidad del viento entre 0 y 5.5 ms^{-1} . Al igual que la estación Socha, Boyera y Aragón debido a la altitud sobre el nivel del mar la temperatura puede alcanzar valores muy bajos que amenazan los cultivos.

La simulación de la temperatura del aire interior con el invernadero tradicional ubicado bajo condiciones atmosféricas como las de la estación Pamplona se presenta en la figura 4-35 y la estimación de la ganancia térmica durante el periodo diurno y nocturno en la figura 4-37. La ganancia en este caso es similar en todas las temporadas simuladas con valores positivos entre 0.9°C y 1.1°C. Según los resultados en todas las épocas puede ocurrir inversión térmica de hasta 1.5°C. Aunque los rangos de la temperatura del aire, radiación y humedad relativa en Pamplona (figura 4-34) son semejantes a los de Boyera la respuesta del invernadero es diferente, incluso aunque la temperatura y radiación alcanzan valores superiores en Pamplona el invernadero es menos eficiente que en Boyera. La explicación a este comportamiento podría estar en que cada estación pertenece a una región diferente en cuanto al comportamiento de la precipitación y el brillo solar como se demostró en el capítulo uno, además la velocidad media del viento durante las semanas de abril y julio es mayor en Pamplona y eso contribuye a una mayor tasa de renovación que en Boyera ocasionando al final una menor conservación de la temperatura. Los resultados son coherentes con

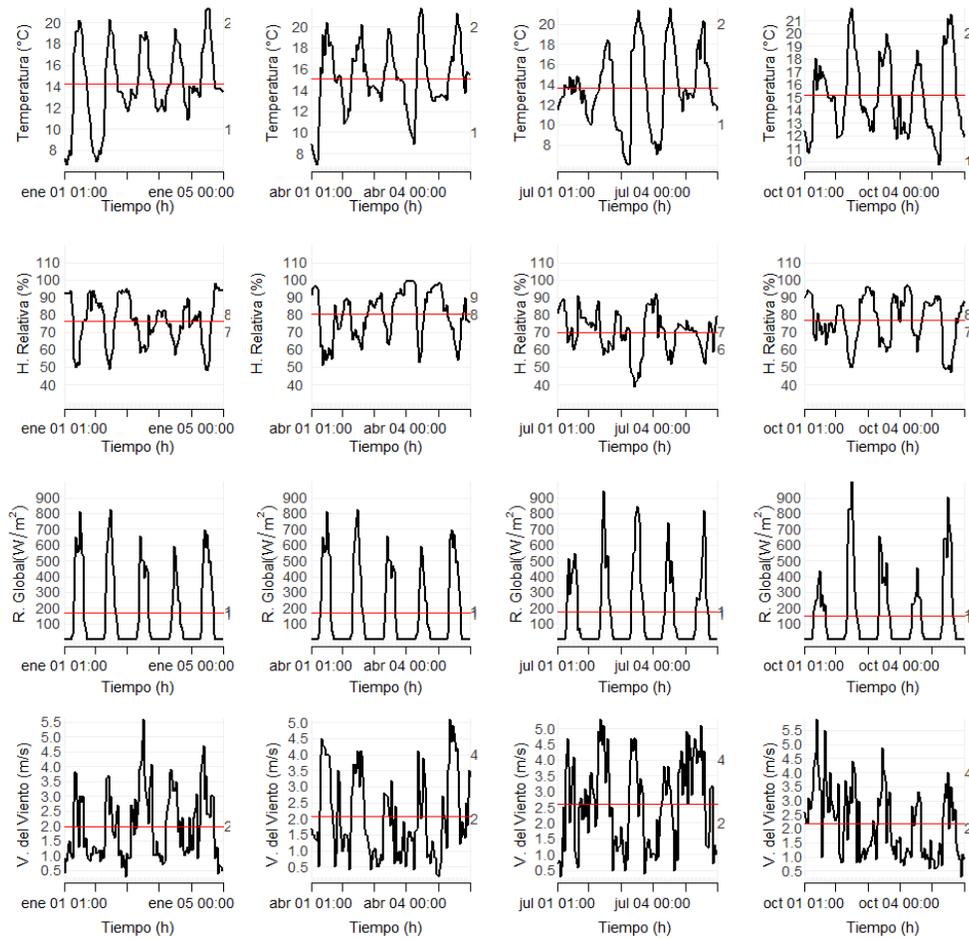


Figura 4-34.: Información climática de entrada correspondiente a la estación Pamplona para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

los registros de heladas en Colombia que ubican al municipio de Pamplona en la lista de las localidades más susceptibles a la ocurrencia de este evento. El DPV presenta un comportamiento muy variado en las semana revisadas, en enero oscila entre 0 y 3000 Pa, en abril entre 0 y 2500 Pa, en julio sube nuevamente a más de 3500 Pa y en octubre a más de 4000 Pa como se aprecia en la figura 4-36. En Pamplona se obtuvieron los valores más bajos de DPV medios coherente con las características climáticas de la zona donde se ubica esta estación, que es una zona húmeda y fría.

Finalmente los datos de las estaciones Universidad Francisco de Paula e ICA Villavicencio ubicadas en el Catatumbo y región suroriental a 311 msnm y 444 msnm se muestran en las figuras 4-38 y 4-39 respectivamente. En estas estaciones el rango en que osciló la temperatura y la humedad relativa fueron similares. En la zona del Catatumbo la diferencia entre el valor máximo y mínimo que puede alcanzar la temperatura del aire en un mismo día fue hasta de 11°C, los valores oscilan entre 23°C y 33°C, la humedad relativa promedio osciló alrededor del 70% y 80% y la velocidad de viento alrededor de 1ms⁻¹ en enero y abril y entre 1.5 ms⁻¹ y 2.5 ms⁻¹ en julio y octubre. En la zona suroriente la diferencia entre el valor máximo y mínimo de la temperatura del aire en un mismo día fue también de 11°C, los valores de temperatura oscilaron entre 23°C y 34°C y la humedad relativa promedio varió entre 60% y 80%. En cuanto a la radiación ambas estaciones reportaron valores entre los 0 y 1000 Wm⁻². En la estación Villavicencio la velocidad del viento es la mayor registrada con valores que alcanzan hasta 7.5 ms⁻¹, siendo esta la única diferencia notable entre ambas estaciones.

Los resultados de la simulación para la temperatura del aire interior con el invernadero tradicional en Universidad Francisco de Paula e ICA Villavicencio tuvieron el mismo patrón y por eso se presenta solo el caso de Villavicencio en las figuras 4-40 y 4-42. El primer aspecto para mencionar es que un invernadero con la misma parametrización que la utilizada en los demás casos solo lograría elevar aún más la temperatura como se observa en las gráficas y ese no es el requerimiento de estas zonas, por el contrario se necesita evaluar cómo refrigerar el ambiente de forma pasiva. A pesar de una mayor temperatura del aire la máxima ganancia diurna es de 2.1°C cifra que no es superior a la obtenida en las zonas menos cálidas. En la noche la diferencia entre ambos ambientes es poca y en ningún caso supero los 0.5°C, la causa puede ser que la velocidad del viento es una de las mayores registradas y puede

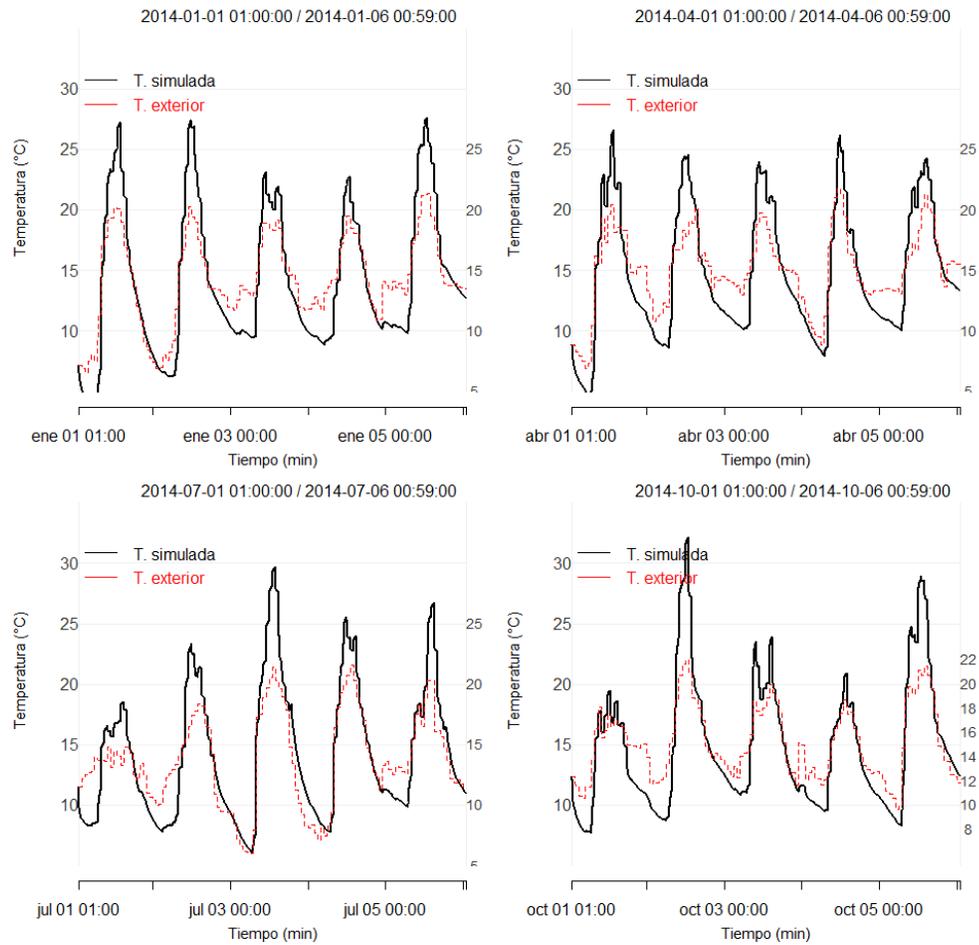


Figura 4-35.: Simulación de la temperatura del aire correspondiente a la estación Pamplona para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

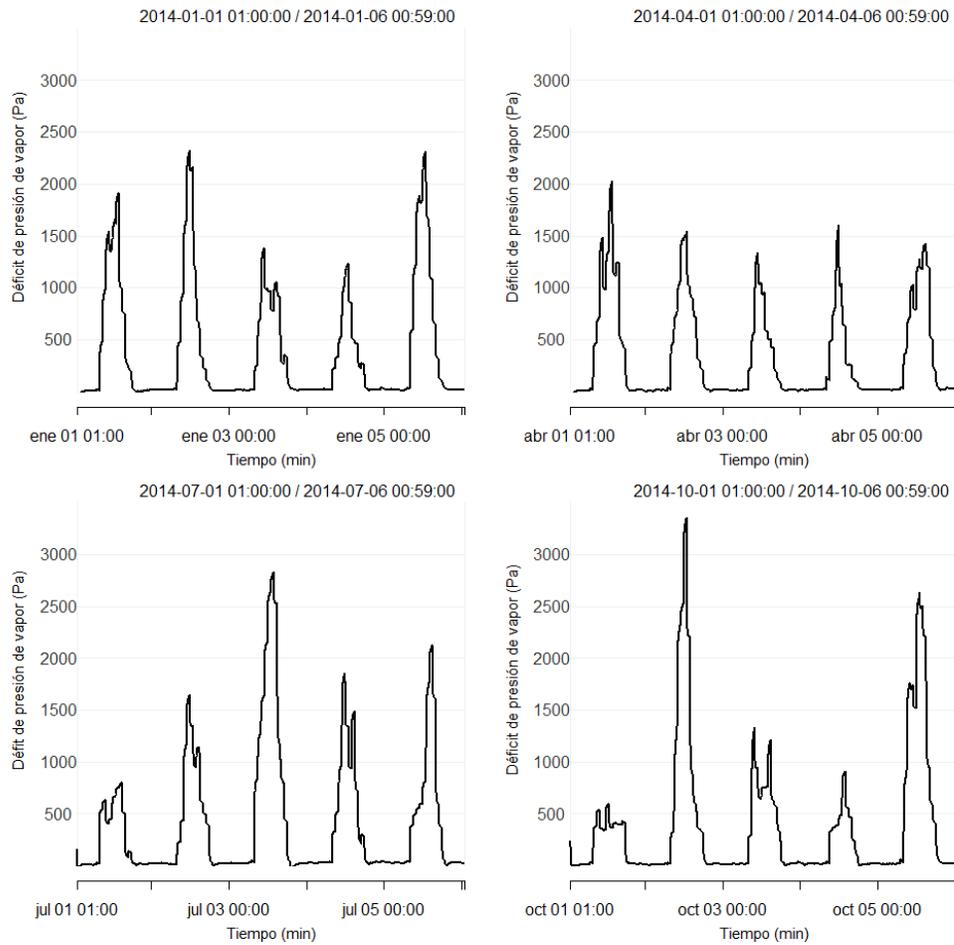


Figura 4-36.: Déficit de la presión de vapor correspondiente a la estación Pamplona para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

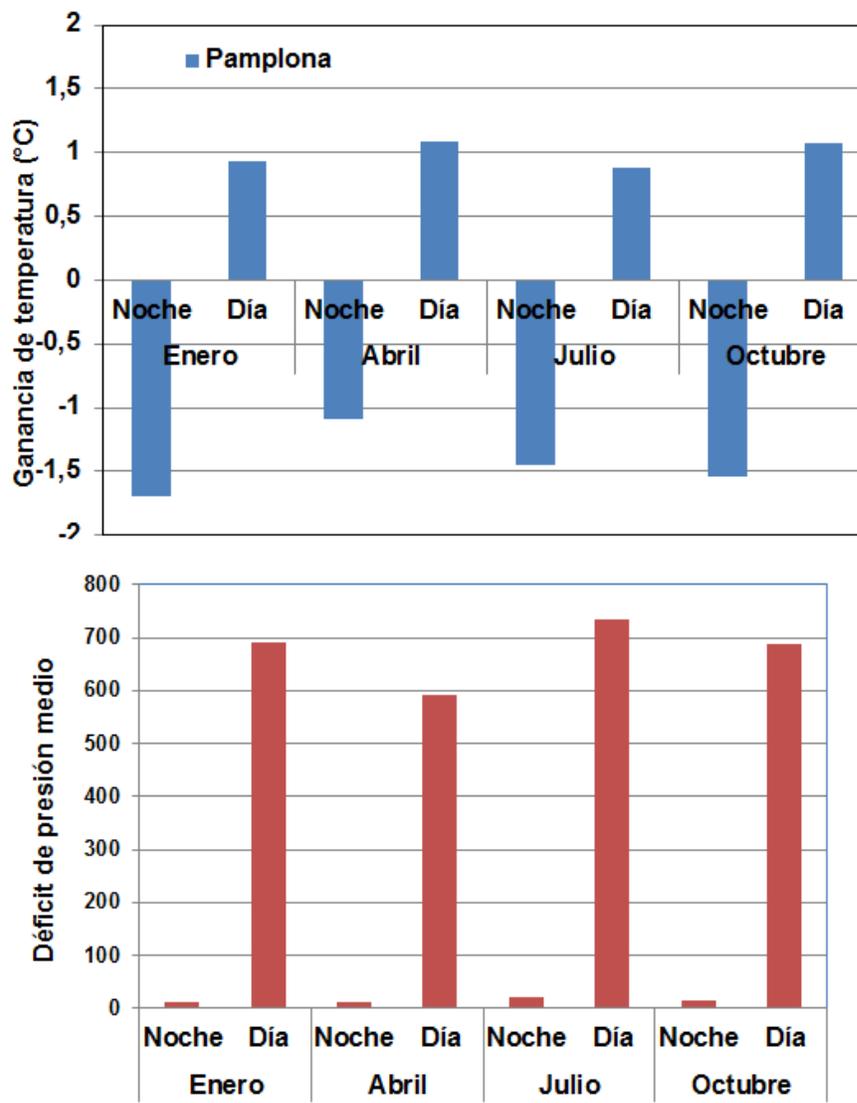


Figura 4-37: Ganancia térmica del IT con datos de la estación Pamplona para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

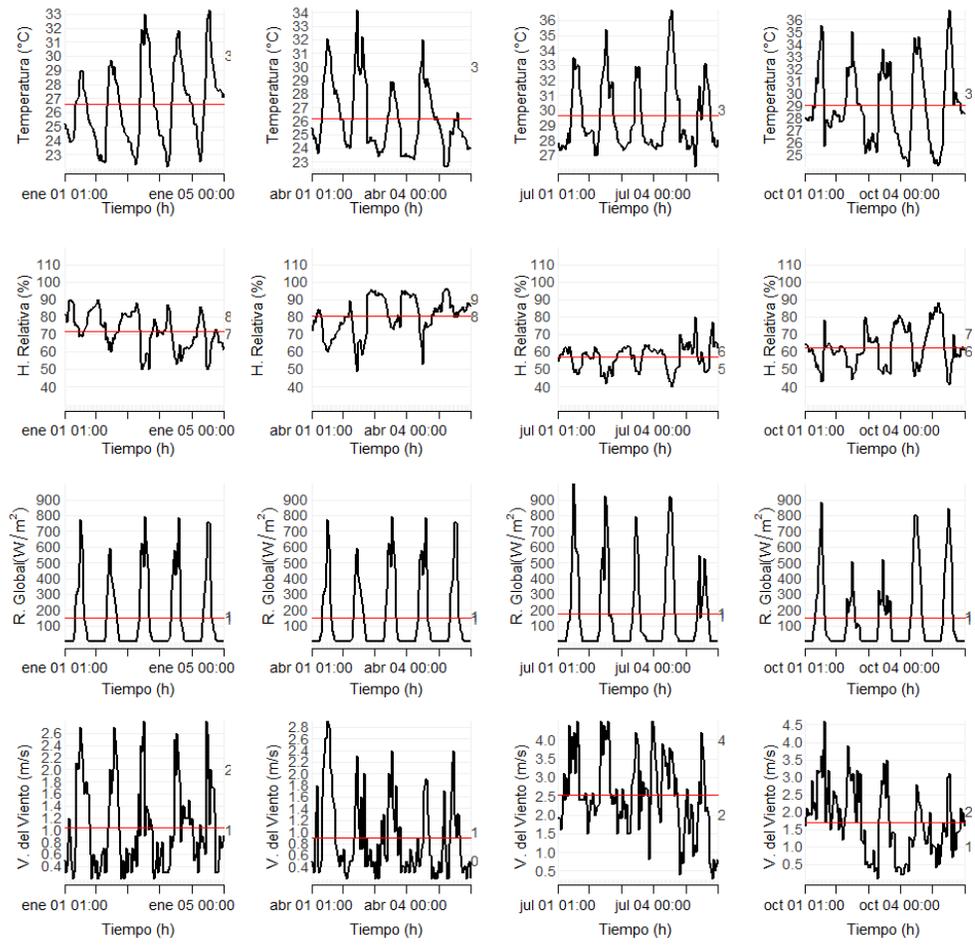


Figura 4-38.: Información climática de entrada correspondiente a la estación Universidad Francisco de Paula para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

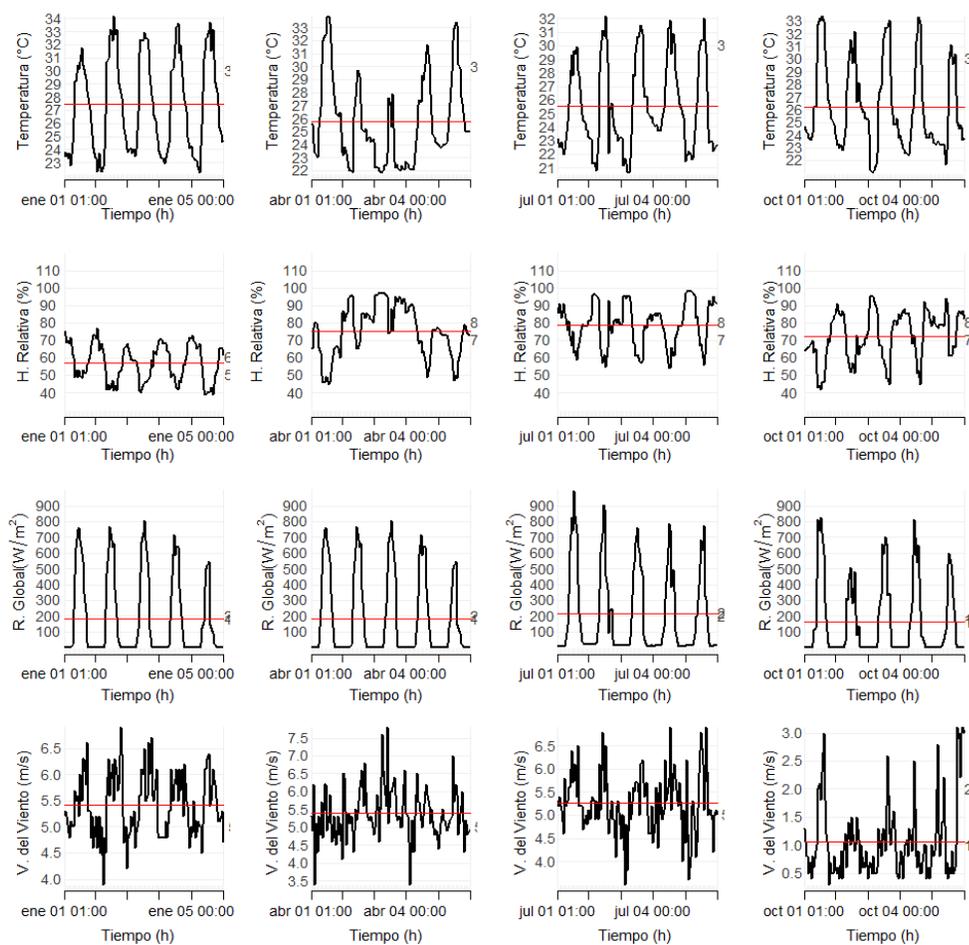


Figura 4-39.: Información climática de entrada correspondiente a la estación Villavicencio para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

compensar el hecho de tener altas temperaturas externas. El sentido de realizar esta simulación radica en la importancia de conocer cómo se desempeña el invernadero tradicional cuando las condiciones externas llegan a superar la barrera de los 30°C y cómo una temperatura externa alta no implica necesariamente mayor ganancia esto depende de el conjunto de todas las variables atmosféricas. Los valores de temperatura ocasionan además un elevado valor de DPV como se aprecia en la figura 4-41 llegando a más de 4500 Pa. En villavicenci no se gráfica el DPV medio por la misma razón que en Armenia y Marsella donde los valores superan los 1.8kPa confirmando que en estas zonas el objetivo de un invernadero debería ser proteger los cultivos de temperaturas elevadas y estrés hídrico.

El conjunto de las 11 estaciones representaron la diversidad de condiciones climáticas de las regiones con mayor uso de invernaderos y esa variedad se vio reflejada también en las simulaciones de la temperatura y la presión de vapor al interior del invernadero. En cuanto a temperatura del aire se consideraron condiciones frías, templadas y cálidas. Clima frío con las estaciones Socha, Boyera, Aragón y Pamplona ubicadas todas a más de 2300 msnm y donde el rango de la temperatura fue de 4°C a 24°C. Clima templado con estaciones entre 1900 y 2300 msnm como lo fueron Emas, Villamaría y Selva con valores entre 10°C a 28°C y clima cálido con aquellas instaladas por debajo de los 1900msnm como Armenia, Marsella, Villavicencio y U. Francisco de Paula, en las cuales la temperatura varió entre 16°C y 34°C. En cuanto a humedad relativa los escenarios fueron menos variados, los valores medios oscilaron entre el 75 % y 90 % y se apreciaron solo ligeras diferencias respecto a la ubicación, por ejemplo, las estaciones localizadas hacia el noroccidente del país y que alcanzan a ser influenciadas por los sistemas sinópticos del Pacífico registraron 10 % más de humedad que las ubicadas hacia el oriente.

En cuanto a la radiación solar los valores oscilaron entre 0 y 900 W/m² sin grandes variaciones durante el año como es normal para la región tropical, pero en algunas estaciones los valores bajaron hasta 400 W/m² probablemente en respuesta al desarrollo de procesos convectivos de mesoescala frecuentes sobre el territorio nacional, como se mencionó en la sección 2.1.4. Por otra parte los valores medios de la velocidad del viento oscilaron entre 1.5 y 2.5 ms⁻¹, solo en la región del piedemonte llanero el viento alcanza una mayor intensidad. La baja intensidad del viento es típica de la región ecuatorial que como se mencionó al inicio es controlada por el desplazamiento

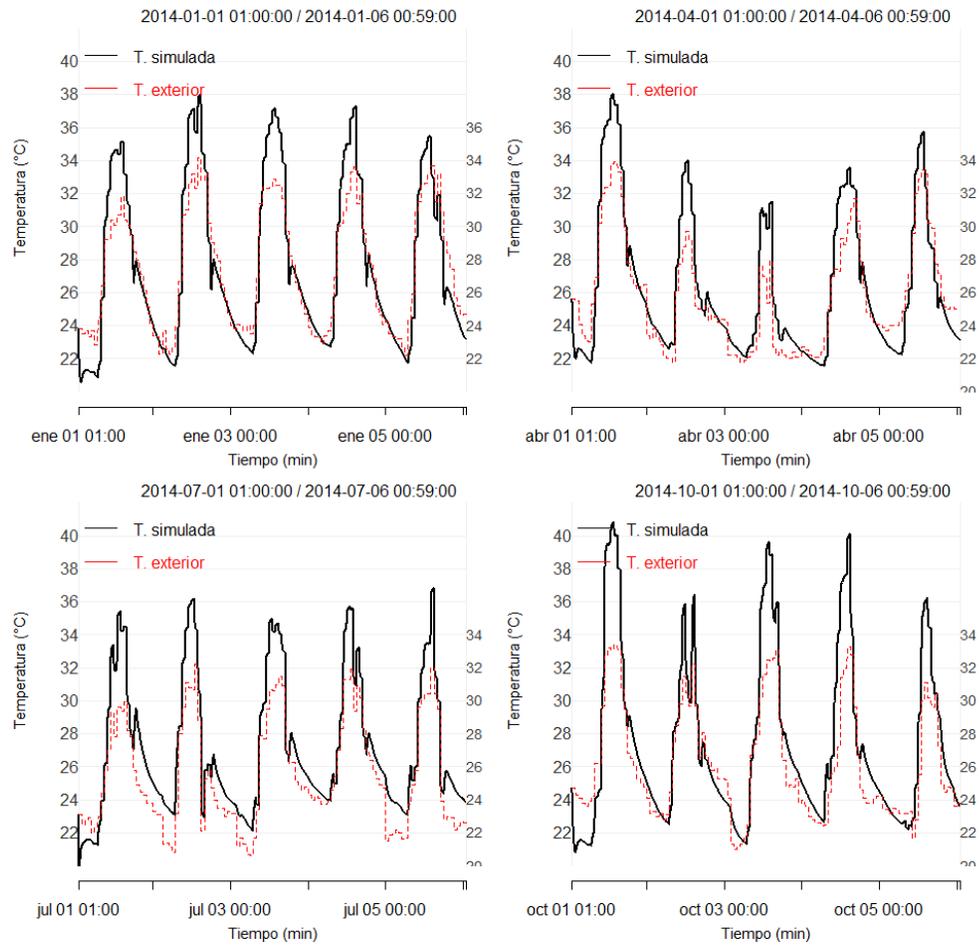


Figura 4-40.: Simulación de la temperatura del aire correspondiente a la estación Villavicencio para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

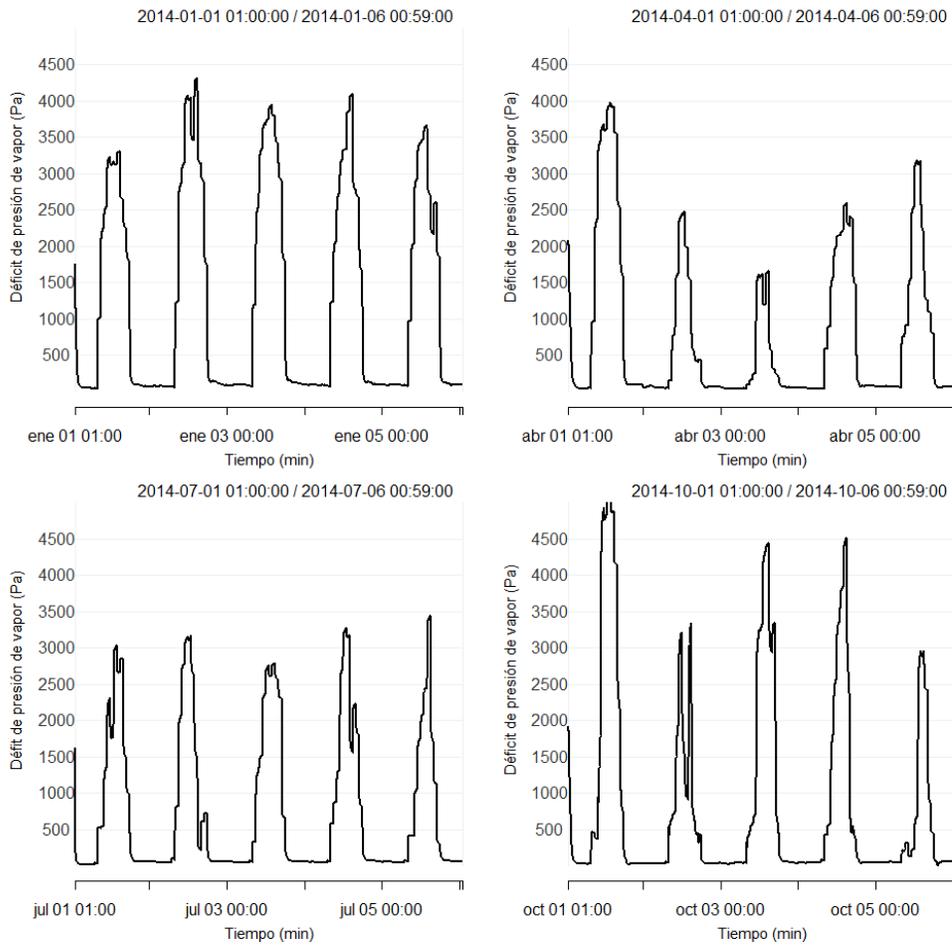


Figura 4-41.: Simulación de la presión de vapor correspondiente a la estación Villavicencio para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

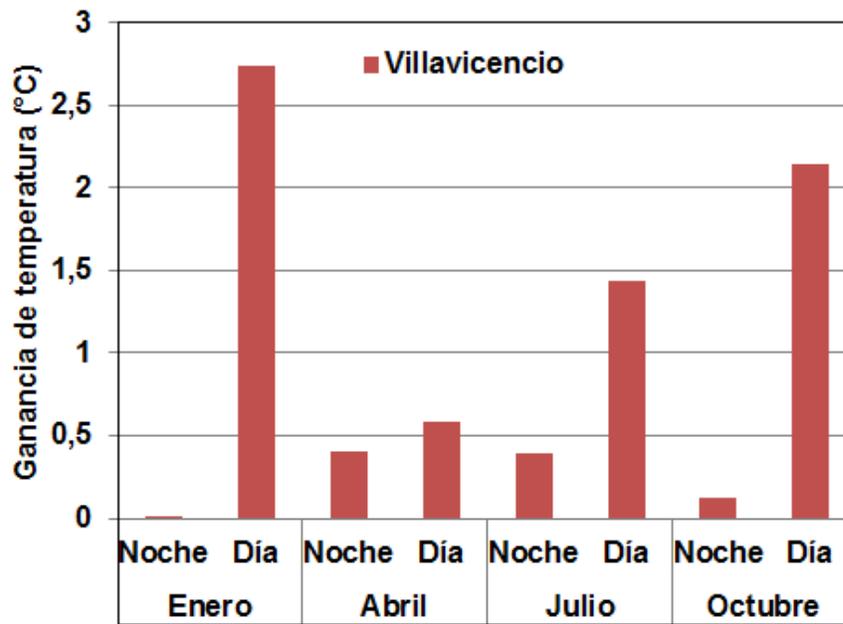


Figura 4-42.: Ganancia térmica del IT con datos de la estación U. Francisco de Paula para la primera semana de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2014

de la ZCIT.

Las simulaciones para la zonas con clima frío, con las condiciones dadas por las estaciones Socha, Boyera, Aragón y Pamplona evidencian que un invernadero tradicional logra elevar la temperatura durante el día pero no garantiza a los cultivos la permanencia dentro del rango óptimo. En la noche el panorama no es diferente y la ganancia de térmica en el medio interno es mínima o nula, incluso en varios casos puede ocurrir inversión térmica. La figura 4-43 muestra que en las zonas frías el mejor desempeño térmico del invernadero, teniendo en cuenta tanto el día como la noche, se obtiene en el mes de Julio cuando hay menos precipitación en todas las regiones evaluadas y el balance más negativo ocurre en Octubre durante la segunda temporada de lluvia. Enero tiene como característica particular que es un mes en el que se puede lograr una máxima ganancia diurna pero también una mínima nocturna, debido justamente a que en el día el invernadero recibe más horas de brillo solar pero también en las noches hay mayor pérdida de energía por emisión de radiación de onda larga desde la tierra en respuesta a los cielos despejados típicos de esa temporada.

En condiciones de clima templado como el que rodea a las estaciones Emas, Villamaría o Selva las simulaciones muestran que un invernadero tradicional puede garantizar los rangos de temperatura óptimos si se trata de especies como las de la tabla 4-1 esto debido a que el requerimiento térmico es mucho menor y una ganancia entre 3°C y 5°C en el día sería suficiente. Durante la noche aunque la ganancia es menor pueden lograrse entre 1°C y 1.5°C, la época más crítica sería la de enero cuando el invernadero necesita tener un mejor desempeño ante la eventual ocurrencia de episodios fríos o simplemente de temperaturas que estén por debajo de los mínimos biológicos. En promedio las condiciones climáticas naturales son favorables y permanecen dentro del mínimo y máximo biológico, además la amenaza de heladas o eventos extremos de calor es menor comparada con zonas frías y cálidas.

En clima cálido como el registrado en las estaciones Armenia, Marsella, Villavicencio entre otras, la simulaciones muestran que el invernadero tradicional eleva más la temperatura como era de esperarse pero la diferencia entre el medio interno e interno es similar a la lograda en las zonas frías o cálidas, es decir no necesariamente por estar en una zona de clima cálido el invernadero tradicional logra una mayor diferencia de temperatura externa e interna (Figura 4-45). En este caso como se sobrepasa los

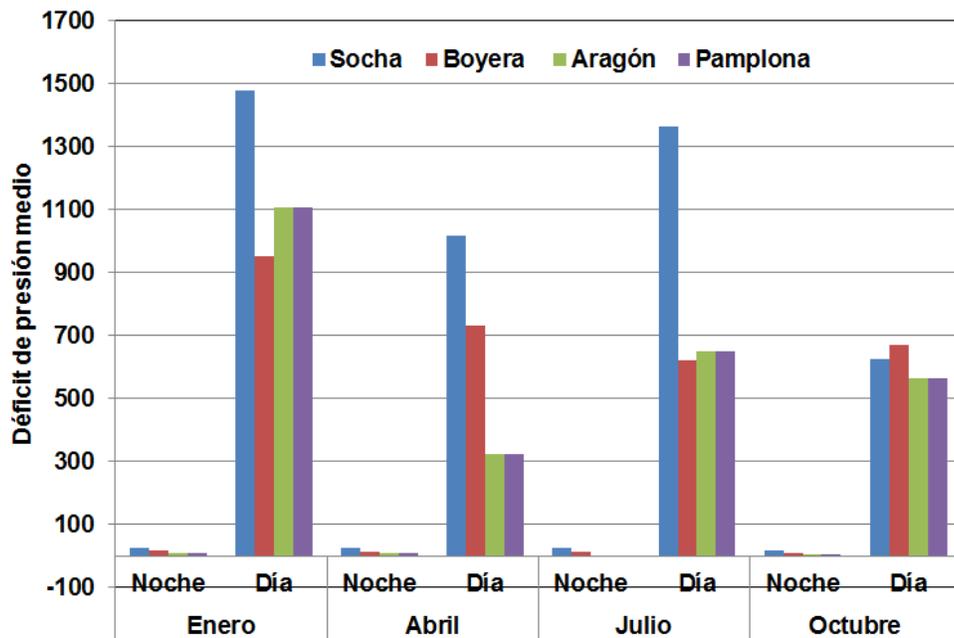
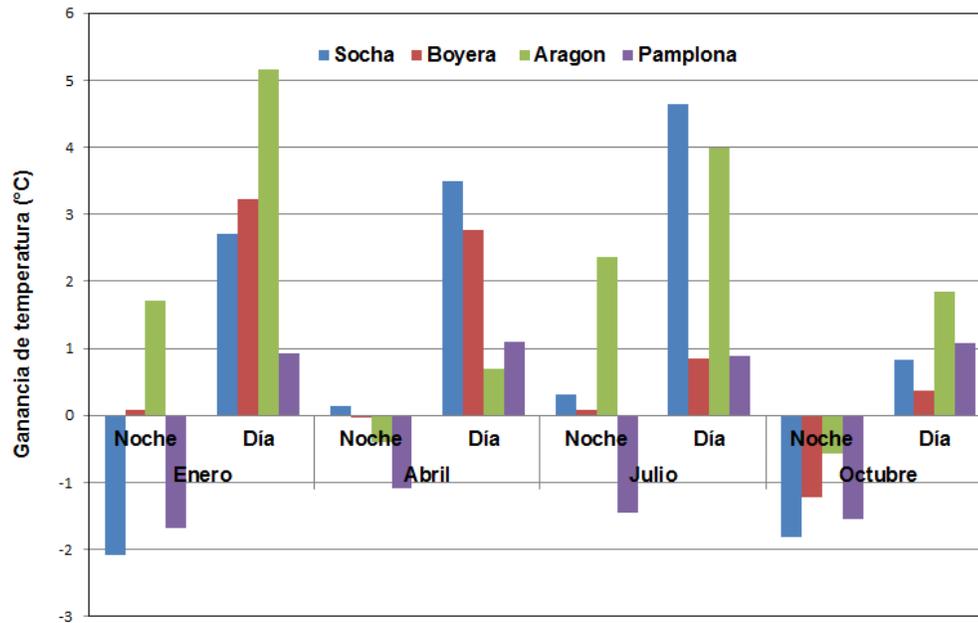


Figura 4-43.: Ganancia térmica lograda en zonas de clima frío

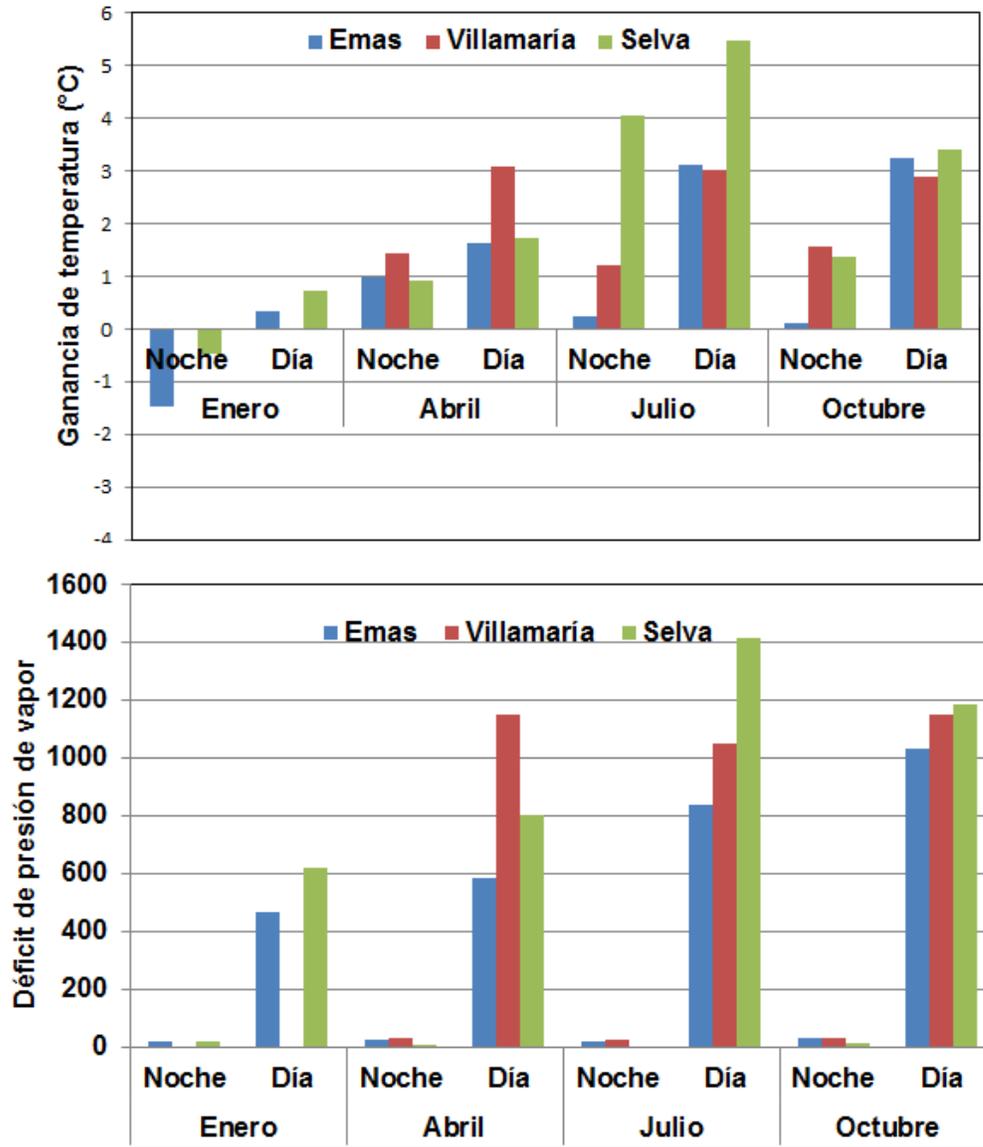


Figura 4-44.: Ganancia térmica lograda en zonas de clima templado

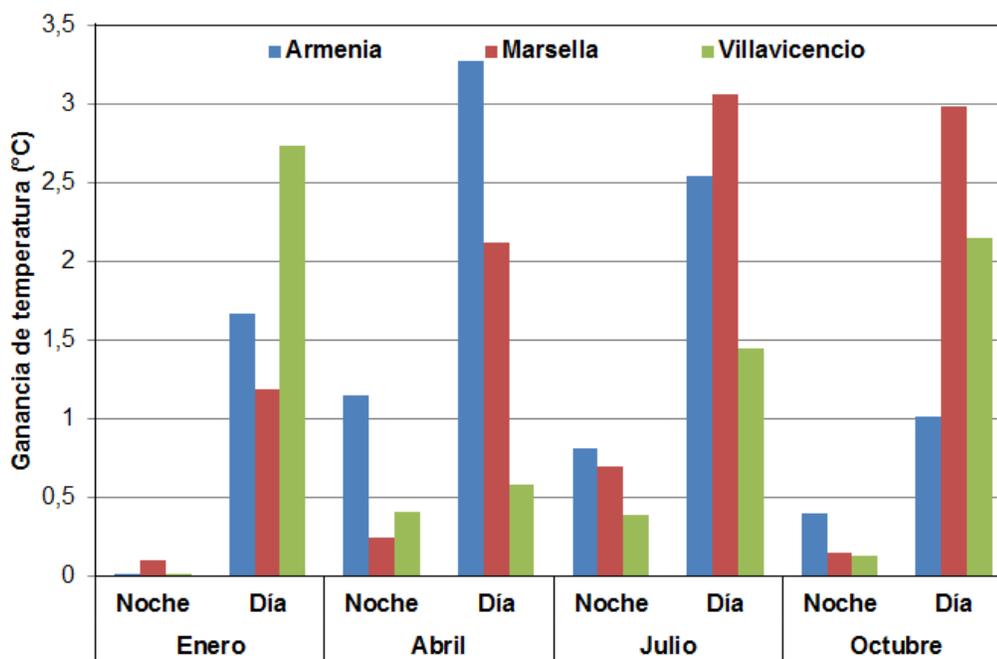


Figura 4-45.: Ganancia térmica en zonas de clima cálido

máximos biológicos de algunas especies el objetivo de la estructura sería el de proteger al cultivo de elevadas temperaturas por medio de sombra o pantallas térmicas que reflejen la radiación incidente.

Los resultados presentados son coherentes con los obtenidos parcialmente por autores como Cooman *et al.* (2006); Bojaca *et al.* (2009, 2010); Bojaca y Schrevens (2010); Villagrán *et al.* (2012) quienes han reportado las limitaciones de los invernaderos tradicionales en la sabana de Bogotá, a partir de datos medidos y no simulados. A diferencia de los trabajos citados, en esta oportunidad el estudio comprende todas las regiones con mayor producción bajo cubierta en el país. Las simulaciones realizadas muestran la capacidad del MMI de pronosticar el desempeño de un invernadero con climas externos diferentes, hecho que permite identificar las características que debería tener el invernadero para crear el microclima óptimo, al igual que lo hacen desde hace décadas en países europeos líderes en este campo como Holanda, España, Grecia (Baeza *et al.*, 2013), o más recientemente Israel, China e India que han tomado impulso gracias al desarrollo de estructuras innovadoras que aprovechan me-

por la radiación solar (Su y Xu, 2015). A pesar del surgimiento de técnicas como la dinámica de fluidos computacional (CFD), el modelado y simulación mediante modelos de microclima como el MMI continua siendo la forma más común de estudiar el desempeño de los invernaderos con un grado de aproximación aceptable como lo constatan publicaciones recientes como las de van Beveren *et al.* (2015); Su y Xu (2015); Nimmermark y Maslak (2015). En la actualidad son dos caminos de aproximación que no compiten y por el contrario se complementan, ya que con CFD se pueden establecer parámetros como tasas de renovación que son luego utilizados en los modelos no tridimensionales y con estos últimos se puede estimar el efecto de cambios en la temperatura del cielo o apertura de ventanas en los coeficientes de intercambio de calor (Flores-Velazquez *et al.*, 2014; Piscia *et al.*, 2015).

4.5. Conclusiones

Los datos de entrada utilizados mostraron que en las estaciones a más de 2300msnm la temperatura del aire llega a variar de 4°C a 24°C en un mismo día, entre 1900 y 2300 msnm lo hace de 10°C a 28°C y por debajo de los 1900msnm entre 16°C y 34°C. En cuanto a humedad relativa los valores medios oscilan entre el 75 % y 90 % y se apreciaron solo ligeras diferencias respecto a la ubicación. En cuanto a la radiación solar los valores oscilaron entre 0 y 900 W/m², pero en algunas estaciones los valores bajaron hasta 400 W/m². Los valores medios de la velocidad del viento oscilaron entre 1.5 y 2.5 ms⁻¹ y solo en el piedemonte llanero el viento alcanza una mayor intensidad.

Las simulaciones con los datos de las estaciones Socha, Boyera, Aragón y Pamplona revelaron que la mínima ganancia térmica diurna fue de 0.9°C y la máxima de 5.1°C, mientras que en la noche se obtuvieron valores negativos de hasta -2°C y positivos no superiores a 2.2°C. Estas estaciones representan los lugares de clima frío donde el invernadero tradicional debe elevar la temperatura durante las horas nocturnas y también parte del día durante cualquier época del año. En las estaciones Emas, Villamaría y Selva la mínima ganancia térmica diurna fue de 0.3°C y la máxima de 5.5°C, en la noche el resultado menos favorable se obtuvo siempre en la semana de enero con valores negativos de -2.5°C y la mayor ganancia en Julio con hasta 4°C. Estas estaciones representan las áreas donde el requerimiento térmico ocurre especialmente en enero. Con las estaciones de Marsella, Armenia, Universidad francisco

de Paula y Villavicencio las simulaciones mostraron una menor diferencia entre la temperatura externa e interna y que al ser los rangos de temperatura los más altos la necesidad principal es la sobra y en este sentido el invernadero también es una opción.

5. Proyección de estrategias pasivas adaptables a invernaderos tradicionales en diferentes zonas climáticas de Colombia

Los invernaderos de alta tecnología logran tasas de producción óptimas pero requieren mayor inversión y consumo de energías no renovables, por el contrario aquellos que usan métodos pasivos tienen un costo económico y ambiental menor (Bot, 2001; Chau *et al.*, 2009; Alkilani *et al.*, 2011). Por ejemplo el sistema de calefacción que utiliza una caldera para calentar agua y tuberías para distribuirla fue clave para que países como Holanda logre productividades de 50, 26 y 70 kgm⁻² en cultivos como tomate, pimentón y pepino respectivamente, sin embargo para llegar a estos niveles de productividad se necesitaron entre 45 y 55 m³ de combustible por cada m⁻² como lo reportó van der Velden *et al.* (2004). La desventaja de los sistemas activos es justamente su consumo de combustibles fósiles. Un estudio de Chau *et al.* (2009) demostró que la operación de tales sistemas equivale a un cuarto de los costos operacionales del cultivo. Para el año 2000 en Holanda el uso de combustibles fósiles representaba más del 50% del impacto ambiental total de la producción bajo invernadero (Ammerlaan *et al.*, 2000) y gastaba el 79% de la energía total utilizada en agricultura (Lansink y Bezlepkin, 2003), debido a estas cifras se propusieron llegar al 2020 con el mínimo o cero consumo de combustibles fósiles. Otros países como China, España, Grecia, Israel e India también han concentrado sus esfuerzos en desarrollar sistemas de menor impacto ambiental como bien lo resume en su artículo Alkilani *et al.* (2011).

Desde entonces las investigaciones se han concentrado en el estudio de estrategias que reduzcan el impacto ambiental del invernadero y los costos de su funcionamiento lo que le dio a los sistemas pasivos mayor protagonismo del que habían tenido.

Antes de reconocerse la importancia de reducir el consumo de energía no renovable se consideraban métodos pasivos a aquellos cuidados preventivos antes de iniciar el cultivo como el manejo adecuado del suelo o el drenaje de aire frío (Boshell, 2009), más adelante se fueron considerando también el manejo de la ventilación, el uso de acolchados y pantallas térmicas como estrategias pasivas o híbridas efectivas en el control climático. A la fecha el campo en plena evolución es el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía que se consideran pasivos o híbridos ya que una o la única fuente de energía que utilizan es la solar o la geotérmica entre otras (Panwar *et al.*, 2011; Alkilani *et al.*, 2011; Bonachela *et al.*, 2012; Ntinias, 2014).

El estudio de la ganancia térmica de los sistemas pasivos mediante la formulación de modelos matemáticos es reciente (Alkilani *et al.*, 2011) y la mayoría de investigaciones se concentran en regiones ubicadas en zonas de latitudes medias y altas mientras que muy pocas existen para países cerca al ecuador (Sethir, 2009; Kumar *et al.*, 2010), probablemente porque pocos funcionan con sistemas activos y no porque no exista la necesidad de control climático. No tener estaciones climáticas de verano o invierno podría pensarse que es una de las razones para el poco estudio de sistemas de control de clima, pero es todo lo contrario, ya que en países como Colombia pueden ocurrir escenarios típicos de las cuatro estaciones en un mismo día, especialmente en las zonas de mayor altitud como se evidenció en el capítulo anterior.

Considerando que la tendencia global es reducir el uso de sistemas activos y que en Colombia priman los invernaderos de bajo costo, el objetivo del presente capítulo fue evaluar estrategias pasivas adaptables a las diferentes zonas climáticas del país. Los métodos simulados fueron sencillos y económicos la primera condición garantiza que sea posible adecuarlos en la realidad a los invernaderos tradicionales y la segunda que su montaje no requiera un elevado costo de inversión. El modelo MMI permitió explorar casos de estudio bajo condiciones frías y templadas de acuerdo con las necesidades de aclimatización establecidas en el capítulo anterior. Las simulaciones realizadas mostraron el efecto de cada estrategia pasiva y facilitaron la comparación de las ganancias térmicas alcanzadas.

5.1. Elección de las estrategias pasivas a simular

La simulación del comportamiento del invernadero tradicional en Colombia bajo diferentes condiciones climáticas externas contribuyó a identificar las necesidades de aclimatización que deben satisfacer estas estructuras. De acuerdo a los resultados en zonas de clima frío las épocas más críticas para los agricultores son aquellas caracterizadas por temperaturas muy bajas durante la noche y la madrugada, pero también durante el día pueden verse expuestos a temperaturas fuera de los rangos óptimos para las especies más cultivadas bajo invernadero como son las hortalizas y flores. Con las simulaciones se pudo apreciar que en estos lugares el invernadero tradicional es insuficiente para mantener el cultivo protegido, las temperaturas dentro y fuera llegan a ser iguales o en el peor de los casos hay inversión térmica. En cuanto a las zonas de clima templado aunque el invernadero tradicional logra mantener las temperaturas en valores ideales durante el día, en la noche la temperatura puede continuar siendo baja. En cuanto a las zonas cálidas si existen estructuras para invernadero el objetivo de estas será crear un ambiente más fresco.

Los resultados de las simulaciones del capítulo anterior son el punto de referencia para comparar si las alternativas evaluadas aquí mejoran o no la ganancia del invernadero tradicional. Se usaron las siguientes convenciones para cada prueba, F_i con $i = 0, 1, 2, \dots$ indica las pruebas realizadas para zonas con clima frío, donde 0 es la prueba de referencia evaluada en el capítulo tres y 1, 2, 3.. identifica las diferentes estrategias pasivas simuladas. De forma análoga T_i con $i = 0, 1, 2, \dots$ indica las pruebas bajo escenarios templados. Las primeras simulaciones fueron realizadas para los escenarios fríos de Socha, Boyera, Aragón y Pamplona. El primer método de calefacción pasivo analizado, denominado caso F_1 , fue la disminución del área de ventilación lateral, para hacerlo se modificó el parámetro h_v . En F_2 se cambiaron las propiedades del material de cubierta, los nuevos valores se presentan en la tabla **5-1**.

F_3 consistió en la inclusión de una pantalla térmica durante las horas nocturnas. Para F_3 se agregó una ecuación diferencial al MMI para representar la dinámica de la temperatura de la pantalla térmica y su relación con los demás elementos del invernadero. La ecuación fue la siguiente:

Tabla 5-1.: Nuevos parámetros de la cubierta

Símbolo	Unidad	Nuevo valor
ρ_{c-RIC}	-	0.21
ρ_{c-RFA}	-	0.21
ρ_{c-RIL}	-	0.05
τ_{c-RIC}	-	0.77
τ_{c-RFA}	-	0,77
τ_{c-RIL}	-	0.1
λ_c	W/m K	0.018
cp_c	J/K kg	2500
h_c	m	$0,25 * 10^{-3}$

$$cap_{pt} \frac{dT_{pt}}{dt} = S_{ai-pt} + L_{ai-pt} + R_{fo-pt} + R_{s-pt} - R_{pt-cin} \quad (5-1)$$

$$- S_{pt-as} - R_{pt-cielo} + R_{tub-pt} \quad (5-2)$$

cap_{pt} es la capacidad calorífica de la pantalla térmica:

$$cap_{pt} = h_{pt} \rho_{pt} cp_{pt} \quad (5-3)$$

h_{pt} , ρ_{pt} y cp_{pt} son el espesor, la densidad y el calor específico de la pantalla térmica respectivamente.

S_{ai-pt} es el calor sensible intercambiado entre el aire y la pantalla térmica:

$$S_{ai-pt} = CIC_{ai-pt} (T_{ai} - T_{pt}) \quad (5-4)$$

$$CIC_{ai-pt} = 1,7 ||T_{ai} - T_{pt}||^{0,33} \quad (5-5)$$

L_{ai-pt} es el flujo de calor latente causado por la condensación sobre la pantalla térmica:

$$L_{ai-pt} = \Delta H M V_{ai-pt} \quad (5-6)$$

R_{fo-pt} es el flujo de RIL entre el follaje y la pantalla térmica:

$$R_{fo-pt} = A_{fo} \epsilon_{fo} \epsilon_{pt} F_{fo-pt} \sigma ((T_{fo} + 273,15)^4 - (T_{pt} + 273,15)^4) \quad (5-7)$$

$$F_{fo-pt} = 1 \quad (5-8)$$

ϵ_{pt} es el coeficiente de emisión de RIL la pantalla térmica.

R_{s-pt} es el flujo de RIL entre el suelo y la pantalla térmica:

$$R_{s-pt} = A_s \epsilon_s \epsilon_{pt} F_{s-pt} \sigma ((T_s + 273,15)^4 - (T_{pt} + 273,15)^4) \quad (5-9)$$

$$F_{s-pt} = (1 - 0,49\pi l_{tub} \phi_{tub}) e^{-K_{RIL} IAF} \quad (5-10)$$

R_{pt-cin} es el flujo de RIL intercambiado con la pantalla térmica:

$$R_{pt-cin} = A_{pt} \epsilon_{pt} \epsilon_{cin} F_{pt-cin} \sigma ((T_{pt} + 273,15)^4 - (T_{cin} + 273,15)^4) \quad (5-11)$$

$$F_{pt-cin} = 1 \quad (5-12)$$

A_{pt} es el área de la pantalla térmica por metro cuadrado de suelo.

S_{pt-as} es el calor sensible intercambiado entre el aire superior y la pantalla térmica:

$$S_{pt-as} = C I C_{pt-as} (T_{pt} - T_{as}) \quad (5-13)$$

$$C I C_{pt-as} = 1,7 \|T_{pt} - T_{as}\|^{0,33} \quad (5-14)$$

$$(5-15)$$

$R_{pt-cielo}$ es el flujo de RIL entre la pantalla térmica y el cielo:

$$R_{pt-cielo} = A_{pt} \epsilon_{pt} \epsilon_{cielo} F_{pt-cielo} \sigma ((T_{pt} + 273,15)^4 - (T_{cielo} + 273,15)^4) \quad (5-16)$$

$$F_{pt-cielo} = \tau_{c-RIC} \quad (5-17)$$

En caso de tener tuberías de agua cálida se adiciona R_{tub-pt} que es el flujo de RIL entre la pantalla térmica y la tubería

$$R_{tub-pt} = A_{tub} \epsilon_{tub} \epsilon_{pt} F_{tub-pt} \sigma ((T_{tub} + 273,15)^4 - (T_{pt} + 273,15)^4) \quad (5-18)$$

$$F_{tub-pt} = 0,49 e^{-K_{RIL} IAF} \quad (5-19)$$

Debe agregarse a la ecuación 3.1.2 el término MV_{ai-pt} que es el vapor intercambiado entre el aire y la pantalla térmica:

$$MV_{ai-pt} = \frac{6,4 * 10^{-9} C I C_{ai-pt} (P V_{ai} - P V_{pt})}{1 + \exp [s_v (P V_{ai} - P V_{pt})]} \quad (5-20)$$

$$P V_{pt} = 610,78 \exp \left[\frac{17,0809 T_{pt}}{T_{pt} + 234} \right] \quad (5-21)$$

Tabla 5-2.: Propiedades físicas de la pantalla térmica

Símbolo	Unidad	Descripción	Valor
ϵ_{pt}	-	Coficiente de emisión de RIL la pantalla térmica	0.8
ρ_{pt}	kg/m ³	Densidad del material de la pantalla térmica	200
ρ_{pt-RIC}	-	Coficiente de reflexión de RIC de la pantalla térmica	0.5
ρ_{pt-RFA}	-	Coficiente de reflexión de RFA de la pantalla térmica	0.4
ρ_{pt-RIL}	-	Coficiente de reflexión de RIL de la pantalla térmica	0.1
τ_{pt-RIC}	-	Coficiente de transmisión de RIC de la pantalla térmica	0.4
τ_{pt-RFA}	-	Coficiente de transmisión de RFA de la pantalla térmica	0.4
τ_{pt-RIL}	-	Coficiente de transmisión de RIL de la pantalla térmica	0.2
cp_{pt}	J/K kg	Calor específico de la pantalla térmica	1800
h_{pt}	m	Espesor la pantalla térmica	0.35*10 ³
K_{pt}	m/K ^{0.66} s	Coficiente de flujo de la pantalla térmica	10 ⁻³

Todos los valores de los parámetros para las ecuaciones anteriores se presentan en la tabla **5-2**.

Además de las tres opciones mencionadas se formularon las expresiones matemáticas con las cuales evaluar un Método de Almacenamiento de Energía (MAE). A diferencia de los métodos mencionados esta estrategia requiere mayor inversión y requerimientos en el invernadero, por eso fue analizada de forma independiente. Cuando se esta planteando un MAE el primer paso es decidir si se desea almacenar calor sensible o latente y el tipo de material que se utilizará para hacerlo (Alkilani *et al.*, 2011). En este caso las ecuaciones corresponden a un MAE de calor sensible mediante mangas de polietileno transparente llenas de agua, las cuales se ubican sobre el suelo como se observa en la figura **5-1**, la cual es solo una gráfica ilustrativa.

El efecto del MAE se representó por medio de la siguiente ecuación diferencial. Cada término indica la interacción entre la manga de agua y los demás elementos del invernadero. La ecuación fue la siguiente:

$$cap_m \frac{dT_m}{dt} = R_{sol-m} + R_{m-cin} + R_{m-fo} + R_{m-s} + S_{m-ai} + S_{m-s} \quad (5-22)$$

Donde cap_m es la capacidad calorífica de la manga de agua.

R_{sol-m} es la cantidad de la radiación solar que llega al invernadero y que en efecto absorbe la manga de agua:

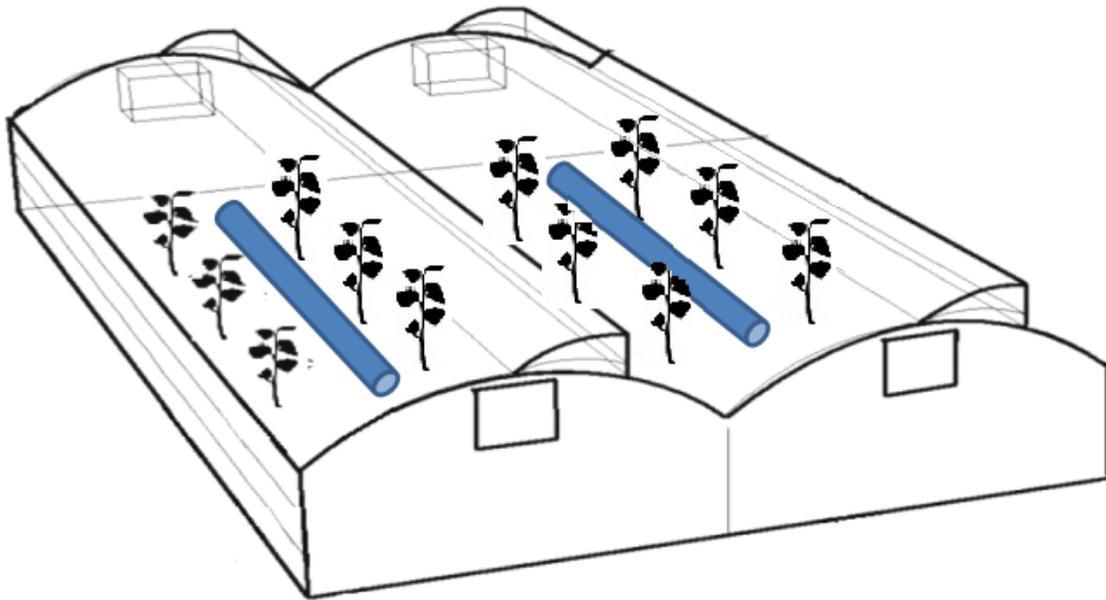


Figura 5-1.: Resultados de las estrategias pasivas evaluadas en las cuatro semanas de los escenarios Socha, Boyera, Aragón y Pamplona

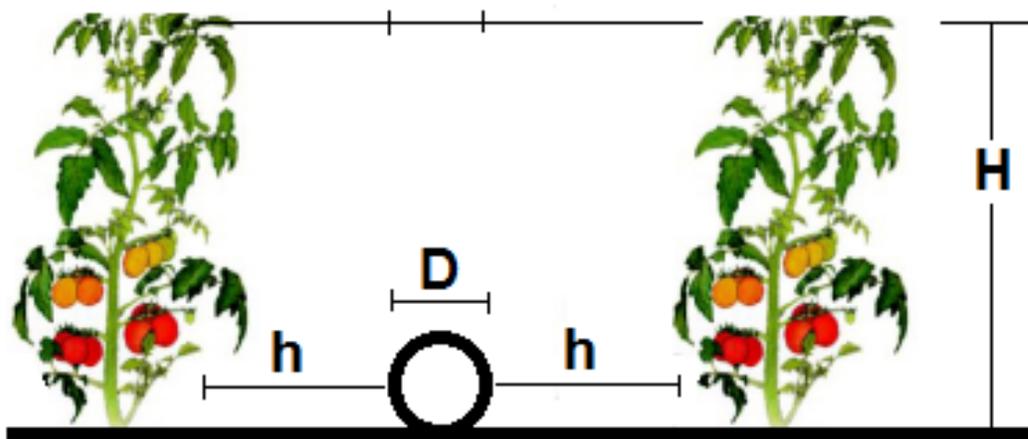


Figura 5-2.: Resultados de las estrategias pasivas evaluadas en las cuatro semanas de los escenarios Socha, Boyera, Aragón y Pamplona

$$R_{sol-m} = I_m \alpha_m + (\rho_{sol-s} + I_m) \alpha_m^* F_{m-s} \frac{A_m - A_{ms}}{A_m} \quad (5-23)$$

$$F_{m-s} = \frac{2h}{2H + D + 4h} \quad (5-24)$$

I_m es la radiación que llega a la superficie de la manga, α_m y α_m^* es el coeficiente de absorción de la radiación solar y dela que refleja el suelo respectivamente. F_{m-s} es el área efectiva o factor de visión entre la manga y el suelo. A_m es el área de la proyección horizontal de la manga y A_{ms} es el área en contacto con el suelo. ρ_{sol-s} es la cantidad de radiación reflejada por el suelo dada por la ecuación:

$$\rho_{sol-s} = [(1 - R_{RFA-sol-s}) + (1 - R_{RIC-sol-s})] \quad (5-25)$$

Donde $R_{RFA-sol-s}$ y $R_{RIC-sol-s}$ fueron definidas en 3-22 y 3-24 respectivamente. R_{m-cin} es el flujo de radiación infraroja lejana (RIL) entre la manga y la cubierta:

$$R_{m-cin} = A_m^* \epsilon_m \epsilon_{cin} F_{m-cin} \sigma ((T_m + 273,15)^4 - (T_{cin} + 273,15)^4) \quad (5-26)$$

$$F_{m-cin} = \frac{D + 2h}{2H + D + 4h} \quad (5-27)$$

$$(5-28)$$

A_m^* es la superficie de la manga por metro cuadrado de suelo bajo invernadero, ϵ_m es el coeficiente de emisión de RIL, F_{m-cin} es el área efectiva o factor de visión entre la manga y la cubierta. Las longitudes D , h , y H se señalan en la figura 5-2. D es el diametro de la bolsa, h es la longitud del suelo entre bolsa y planta y H es la altura de las plantas.

R_{m-fo} es el flujo de radiación infraroja lejana (RIL) entre la manga y el follaje:

$$R_{m-fo} = A_m^* \epsilon_m \epsilon_{fo} F_{m-fo} \sigma ((T_m + 273,15)^4 - (T_{fo} + 273,15)^4) \quad (5-29)$$

$$F_{m-fo} = \frac{2H}{2H + D + 4h} \quad (5-30)$$

$$(5-31)$$

R_{m-s} es el flujo de radiación infraroja lejana (RIL) entre la manga y el suelo.

$$R_{m-s} = A_m^* \epsilon_m \epsilon_s F_{m-s} \sigma ((T_m + 273,15)^4 - (T_s + 273,15)^4) \quad (5-32)$$

$$(5-33)$$

S_{m-ai} es el calor sensible intercambiado entre la manga y el aire inferior

$$S_{m-ai} = CIC_{m-ai} (T_m - T_{ai}) \quad (5-34)$$

$$CIC_{m-ai} = \begin{cases} 1,24(T_m - T_{ai})^{1/3} & T_{ai} < T_m \\ 0,59\left(\frac{T_m - T_{ai}}{A_m^*}\right)^{1/4} & T_{ai} > T_m \end{cases} \quad (5-35)$$

S_{m-s} es el calor intercambiado entre la manga y el suelo sobre el cual esta ubicado.

$$S_{m-s} = CIC_{m-s} (T_m - T_s) \quad (5-36)$$

$$CIC_{m-s} = 0,55(10^8 A_{s_s}^3 (T_s - T_m))^{1/4} \quad (5-37)$$

A_{s_s} es el área del suelo en contacto con la bolsa.

Cada término debe a su vez ser adicionado a la ecuación del otro elemento con el que interactua. La simulación del MAE dependerá de la elección de los materiales y dimensiones elegidas. En este caso se plantean las ecuaciones para que sean punto de partida de futuras investigaciones. Haciendo pruebas con una mangas de 50cm de diametro y polietileno transparente se obtuvo que la temperatura del agua al interior de las mangas tienen un máximo dos entre una y dos horas después de que se registra el máximo de radiación y su efecto sobre la temperatura del aire eleva el promedio de la temperatura diurna en 0.6°C y en la noche se ve un cambio positivo tan solo de 0.2°C. Teniendo en cuenta los resultados de un primer ejercicio se sugiere realizar posteriores estudios con esta modalidad mejorando las estimación de los parámetros del módulo presentado. Si bien la ganancia no supera 1°C se pueden evaluar otro tipo de materiales o dimensiones y verificar si se pueden obtener mejores resultados.

Bajo los escenarios de clima templado Emas, Villamaría y Selva se probaron las mismas alternativas que en clima frío, en este caso de denominaron T_1 , T_2 , T_3 , pero adicionalmente se probaron T_4 que consistio en ampliar h_v y T_5 en elevar la altura bajo canal h_{ai} . En la tabla **5-3** se resumen todas las alternativas. Luego de realizar

Tabla 5-3.: Add caption

Zona	Estrategía
Zonas Frías	F_0 : Simulación con el invernadero tradicional sin ninguna estrategia adicional
	F_1 : Simulación reduciendo el área de ventilación lateral
	F_2 : Simulación cambiando el tipo de cubierta
	F_3 : Simulación incluyendo una pantalla térmica durante el período nocturno
Zonas Templadas	T_0 : Simulación con el invernadero tradicional sin ninguna estrategia adicional
	T_1 : Simulación reduciendo el área de ventilación lateral
	T_2 : Simulación cambiando el tipo de cubierta
	T_3 : Simulación incluyendo una pantalla térmica durante el período nocturno
	T_4 : Simulación duplicando el área de ventilación lateral
T_5 : Simulación aumentando la altura bajo canal	

las simulaciones se estimó la diferencia en temperatura lograda con cada estrategia respecto a la alcanzada con el solo invernadero tradicional. Los valores fueron representados en diagramas de barras para facilitar la comparación entre los casos analizados.

5.2. Simulación de estrategias pasivas adaptables a los invernaderos tradicionales

Los resultados de las estrategias F_1 , F_2 y F_3 evaluadas en las cuatro semanas de los escenarios Socha, Boyera, Aragón y Pamplona se presentan en las figuras **5-3,5-5,5-7,5-9**. Los casos T_1 , T_2 , T_3 , T_4) y T_5 correspondientes a Emas, Villamaría y Selva se muestran en la figura **5-11, 5-13, 5-15**.

La figura **5-3** muestra que en Socha con F_1 la ganancia térmica mejoró hasta en 1.2°C durante el día. En la noche el cambio es mínimo ya que tanto en F_0 como F_1 las ventanas laterales se consideran cerradas después de las 6:00pm. La pequeña diferencia que se observa en la noche puede deberse a que al aumentar la temperatura diurna las primeras horas de la noche serán también más cálidas haciendo que el promedio ascienda en este caso entre 0.1 y 0.3°C . Con F_2 se logró un aumento medio de 2.3°C en la temperatura nocturna y el efecto sobre la estimación del promedio diario fue de 0.5 a 1°C . Con F_3 el balance fue mejor lograndose hasta 4°C más en la noche y 2.5°C en el día comparado con el escenario de referencia F_0 .

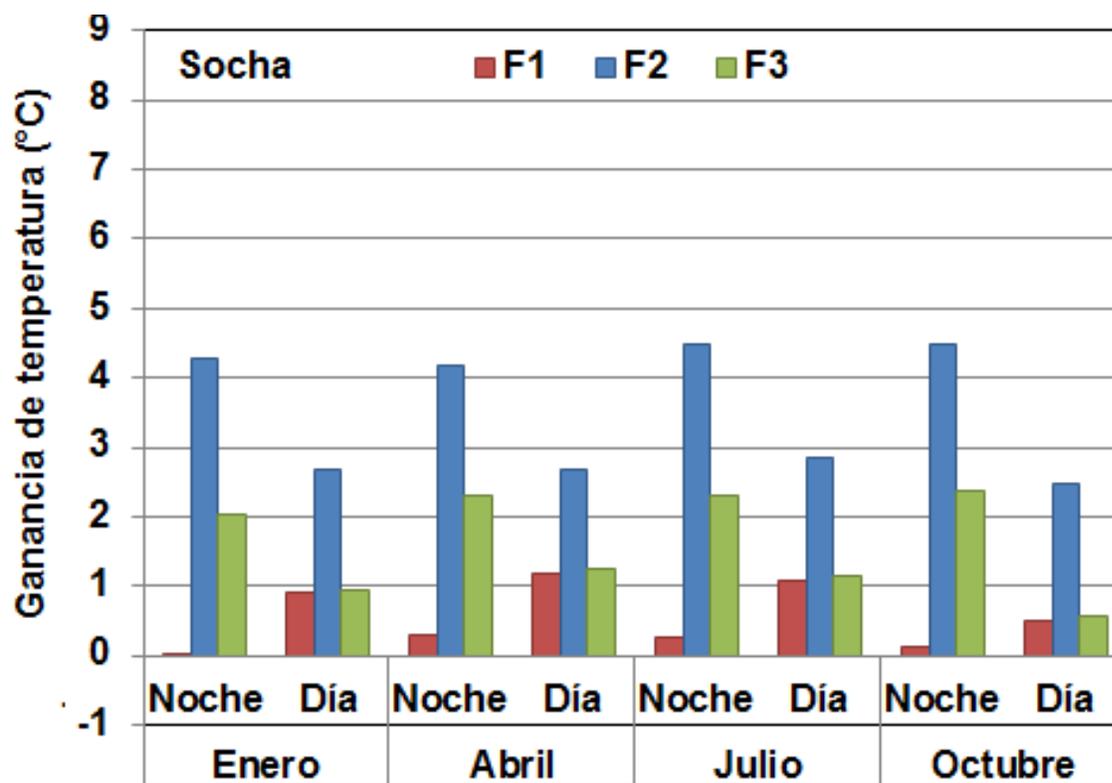


Figura 5-3.: Cambio de la ganancia térmica con las estrategias pasivas en Socha

La figura 5-5 muestra que en Boyera con F_1 la ganancia térmica aumentó menos de 1°C en el día, esta diferencia no es suficiente para superar la inversión térmica que se presenta en las noches de las semanas de abril y octubre. Con F_2 se logró un aumento de 2.2°C en la temperatura nocturna y el efecto en el día fue de 0.5°C a 0.8°C , estos valores son suficientes para evitar la inversión térmica. Con las condiciones de Boyera la estrategia F_3 elevó la temperatura nocturna entre 2°C y 4°C y la diurna entre 2.8°C y 5.8°C por encima de lo logrado con F_0 , estos resultados son ideales para la noche y en el día se continuaría dentro de un rango biológico adecuado.

La figura 5-7 muestra que en Aragón con F_1 la diferencia respecto a F_0 fue de 0.2 a 1.75°C en las noches mientras que en el día el máximo cambio fue de 0.74°C . Con F_2 se logró un aumento entre 2.35 a 3.61°C de la temperatura nocturna y el efecto en

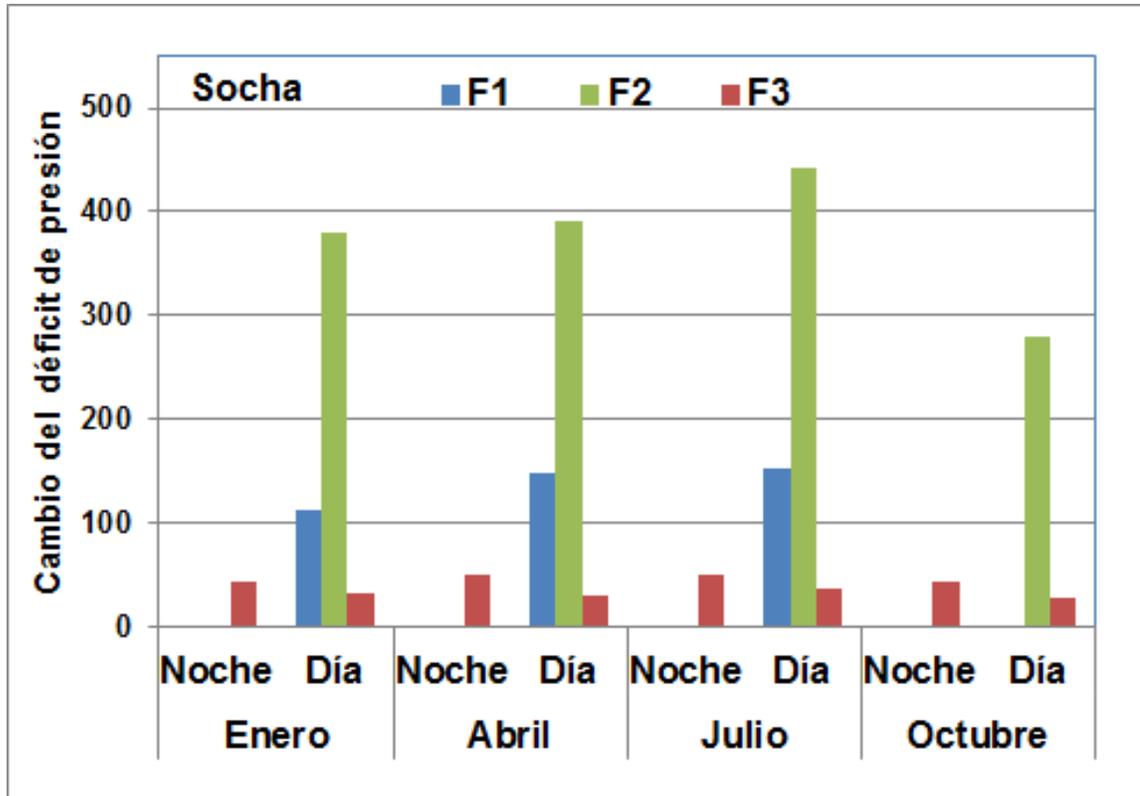


Figura 5-4.: Cambio en el DPV con las estrategias pasivas en Socha

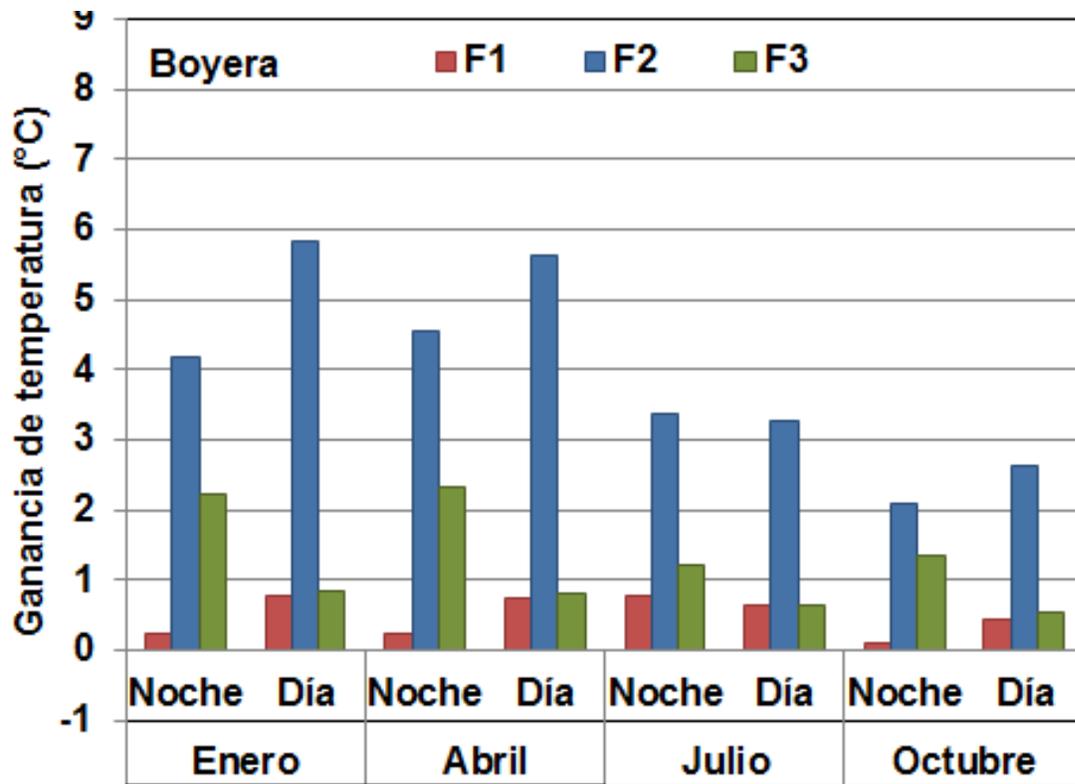


Figura 5-5.: Cambio de la ganancia térmica con las estrategias pasivas en Boyera

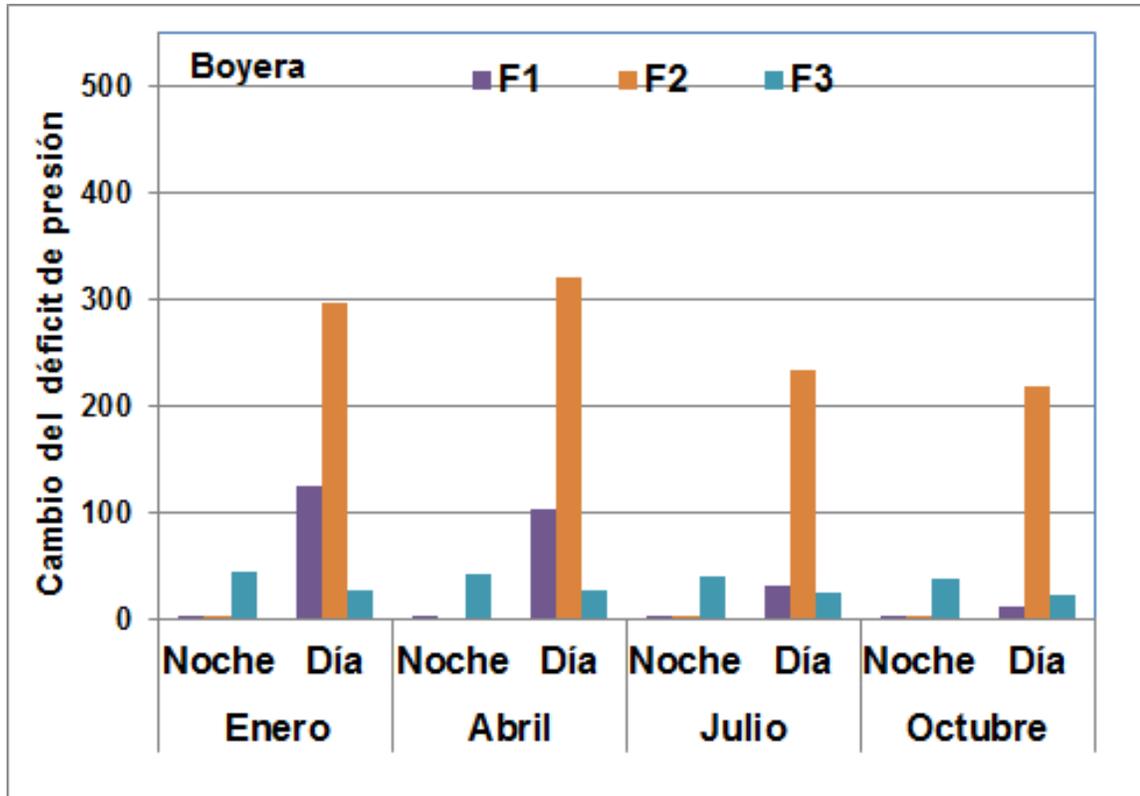


Figura 5-6.: Cambio en el DPV con las estrategias pasivas en Boyera

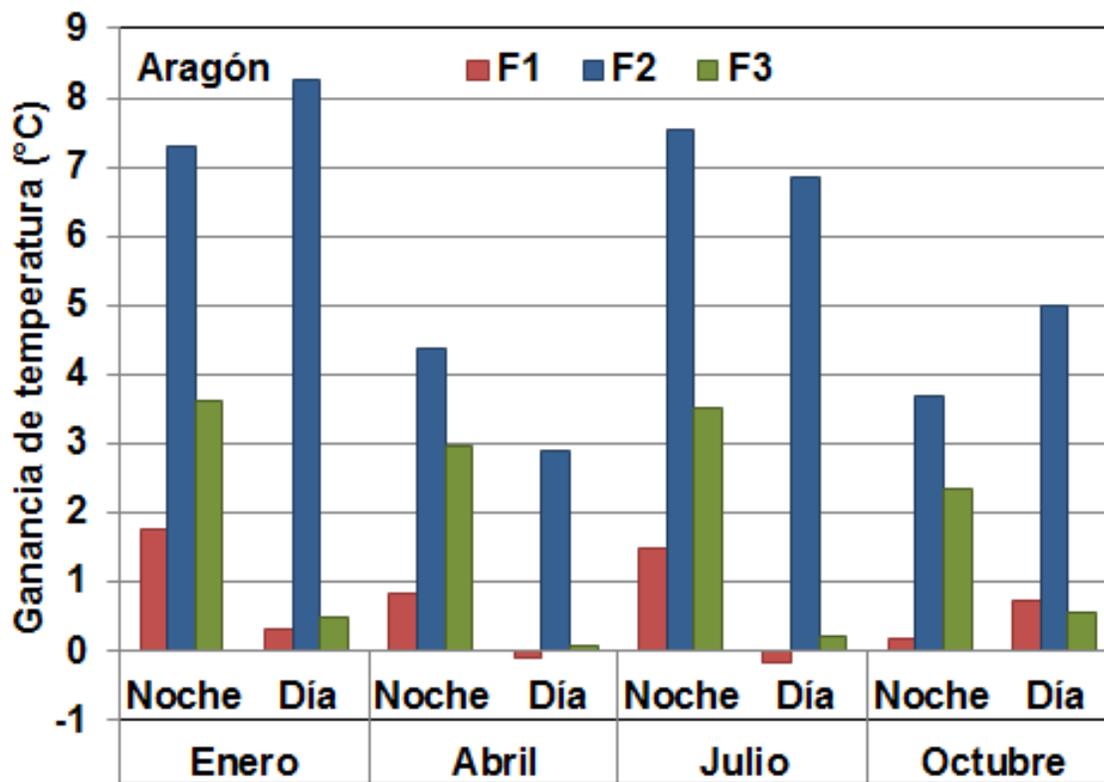


Figura 5-7.: Cambio de la ganancia térmica con las estrategias pasivas en Aragón

el día fue alrededor de 0.07 a 0.5°C. Los resultados con F_3 mostraron un ascenso de la temperatura nocturna entre 3.68°C y 7.30°C y para la diurna entre 2.29°C hasta 8.25°C más que F_0 . Aragón presenta un comportamiento diferente a Socha y Boyera, contrario a lo esperado reducir el área de ventilación en el día no se traduce en un aumento en el promedio diurno de la temperatura y el cambio es apreciable pero en el periodo nocturno.

La figura 5-9 muestra que en Pamplona con F_1 la diferencia respecto a F_0 fue de 0.15 a 0.19 °C en las noches mientras que el día el máximo cambio fue de 0.67 0.83°C. Con F_2 se logró un aumento entre 2.3 de la temperatura nocturna y el efecto en el día fue alrededor de 0.5°C. Los resultados con F_3 mostraron un ascenso de la temperatura nocturna entre 0.71°C y 2.21°C y para la diurna entre 3.29°C hasta 3.5°C más que F_0 .

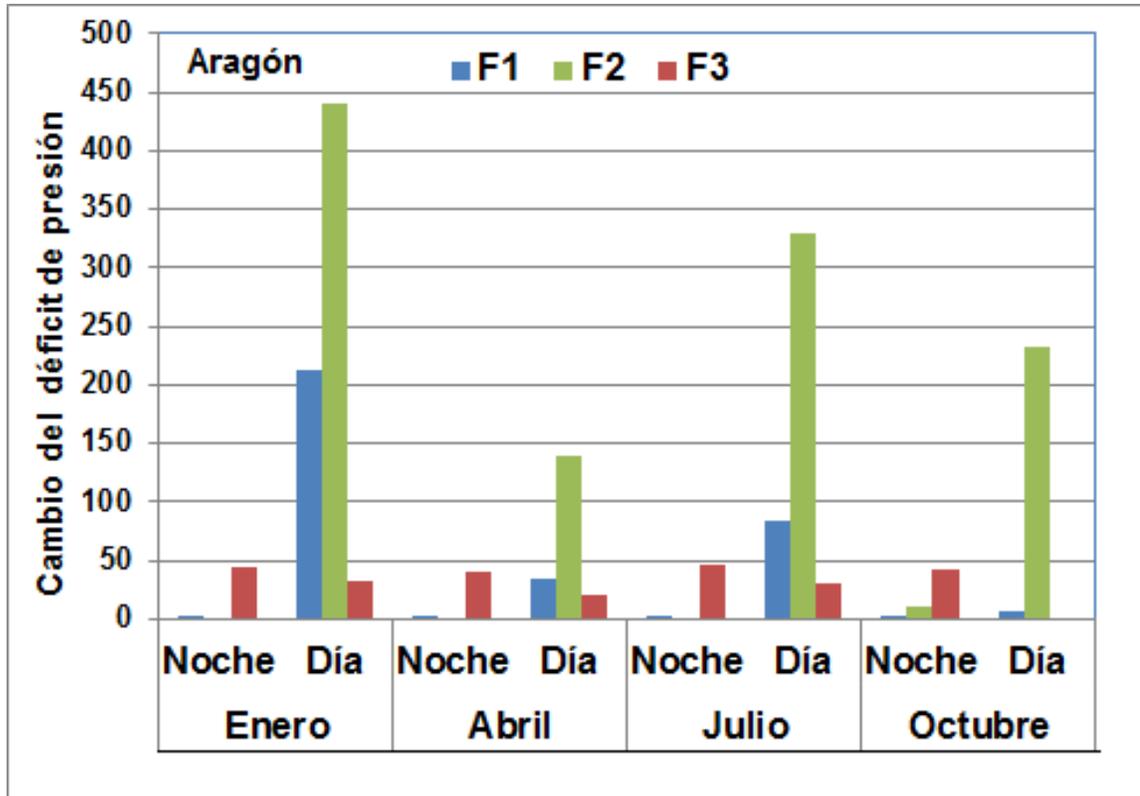


Figura 5-8.: Cambio en el DPV con las estrategias pasivas en Aragón

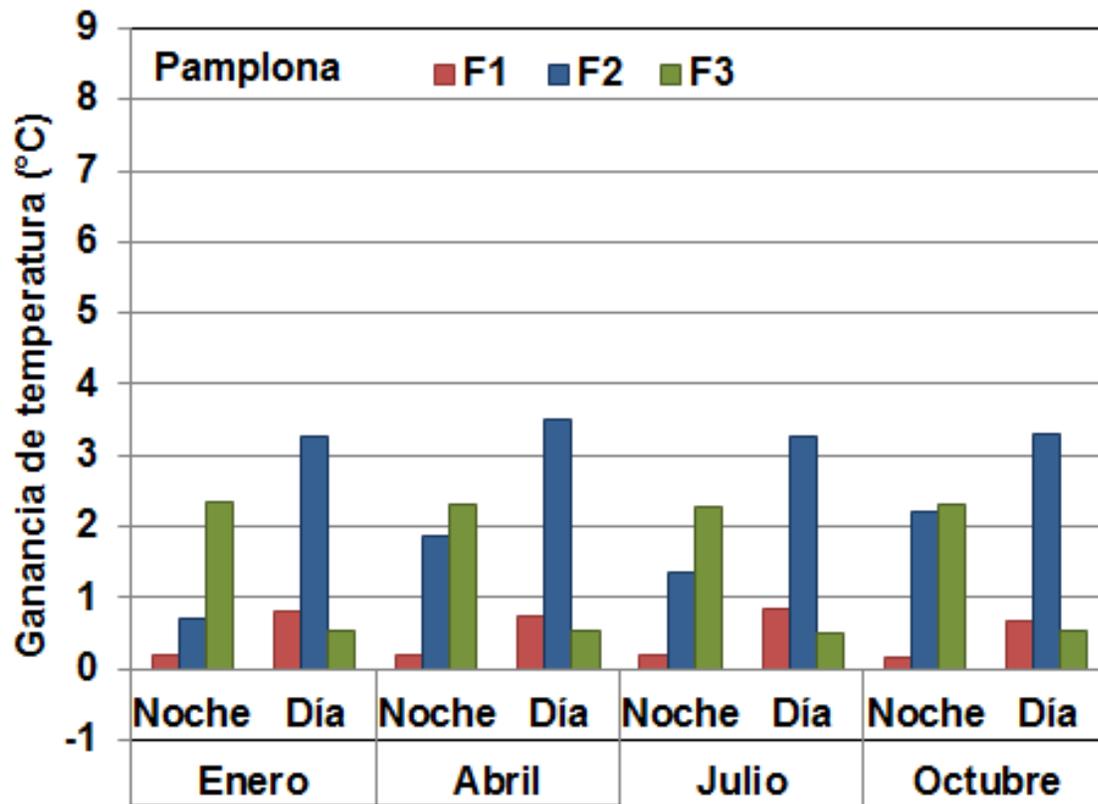


Figura 5-9.: Cambio de la ganancia térmica con las estrategias pasivas en Pamplona

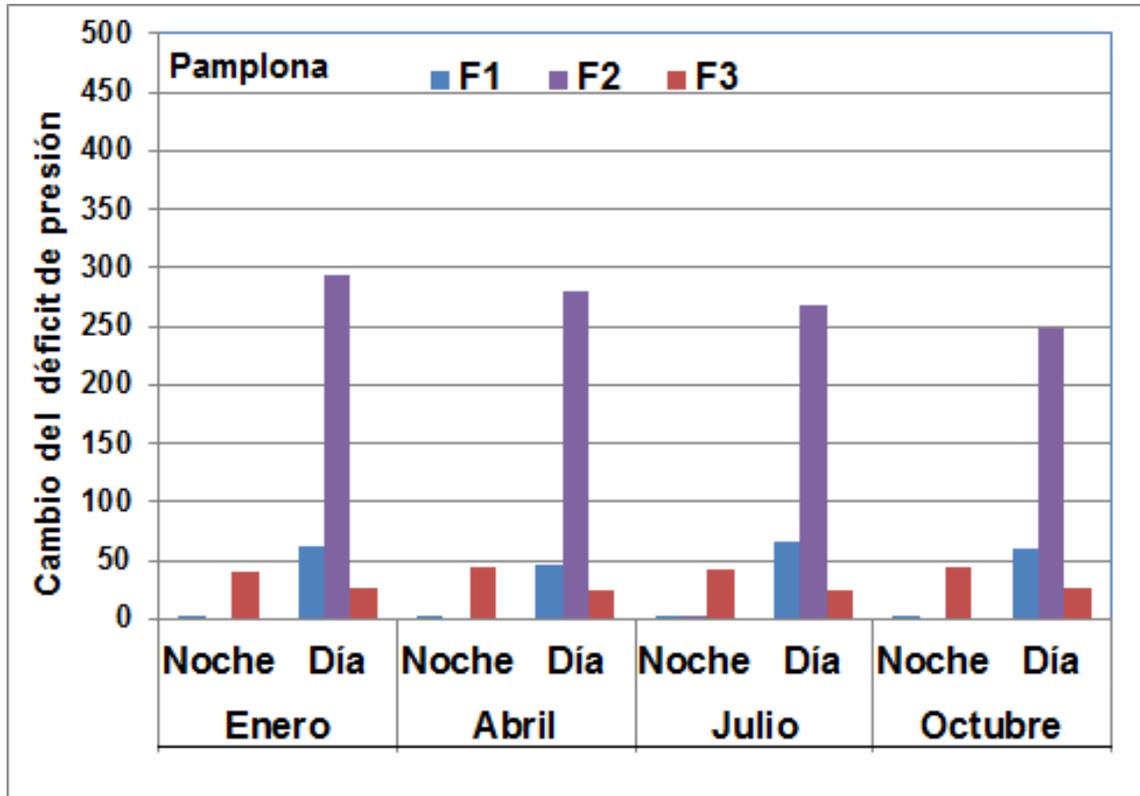


Figura 5-10.: Cambio en el DPV con las estrategias pasivas en Pamplona

La figura **5-11** muestra que en Emas con T_1 la diferencia respecto a T_0 fue de 0.2°C en promedio durante la noche y entre 0.63 y 1.23°C en el día. Con T_2 se logró un aumento de 0.68 a 2.29°C en la temperatura nocturna y el efecto en el día fue alrededor de 0.5°C en todas las semanas, estos valores sería suficientes para prevenir inversión térmica nocturna. Los resultados con T_3 mostraron un ascenso de la temperatura nocturna entre 2.3°C y 4.23°C y para la diurna entre 2.36°C hasta 2.69°C más que T_0 , estos resultados son apropiados para el periodo nocturno, sin embargo en el día se superaría el máximo óptimo. Con T_4 no hay cambio apreciable que supere los 0.02°C . Finalmente con T_5 el cambio es negativo en la noche y oscila entre -0.06 y -0.16°C comparado con T_0 , pero en el día se logra disminuir la temperatura entre 0.4 y 0.6°C . Una combinación de T_2 y T_5 serían una elección apropiada ya que cuando se requiera T_2 logra conservar la temperatura en la noche y T_5 mantiene más fresco el cultivo en el día, las cuales son las necesidades de los invernaderos ubicados bajo condiciones climáticas como las observadas en la estación Emas.

La figura **5-13** muestra que en Villamaria con T_1 la diferencia respecto a T_0 también fue de 0.2°C en las noches y entre 0.95 y 1.08°C en el día. Con T_2 se logró un aumento alrededor de 2.1°C de la temperatura nocturna en todas las semanas y el efecto en el día fue alrededor de 0.5°C . Los resultados con T_3 mostraron un ascenso de la temperatura nocturna entre 2.67°C y 4.09°C y para la diurna entre 2.12°C hasta 2.77°C más que T_0 , estos resultados son apropiados para el periodo nocturno, pero altos para el diurno. Con T_4 no hay cambios sobresalientes. Para T_5 el cambio fue de -0.1°C en la noche y en el día entre 0.54 y 0.61°C . El manejo controlado de T_2 y T_5 también sería la ideal para invernaderos bajo condiciones externas como las de villamaria.

La figura **5-15** muestra que en Selva con T_1 la diferencia fue de 0.2 y 0.3°C en las noches y entre 0.75 y 1.44°C en el día. Con T_2 la temperatura nocturna mejoró alrededor de 2.3°C todas las semanas y el efecto en el día fue alrededor de 0.5°C . Los resultados con T_3 fueron de 4.7°C a 6.25°C más en la noche y entre 2.5°C a 3.2°C más en el día, al igual que en Emas y Villamaria las ganancias para el periodo nocturno son recomendables, pero para el día podrían ser muy altos. Con T_4 tampoco hay cambios. Con T_5 el cambio en la noche fue de -0.1 a -0.2°C y en el día entre 0.4 y 0.6°C . Con el caso de Selva se confirma que para los invernaderos ubicados en clima templado el uso de pantallas térmicas durante la noche mejora la ganancia térmica hasta en 2.3°C respecto a lo que logra la sola estructura tradicional y que para evitar

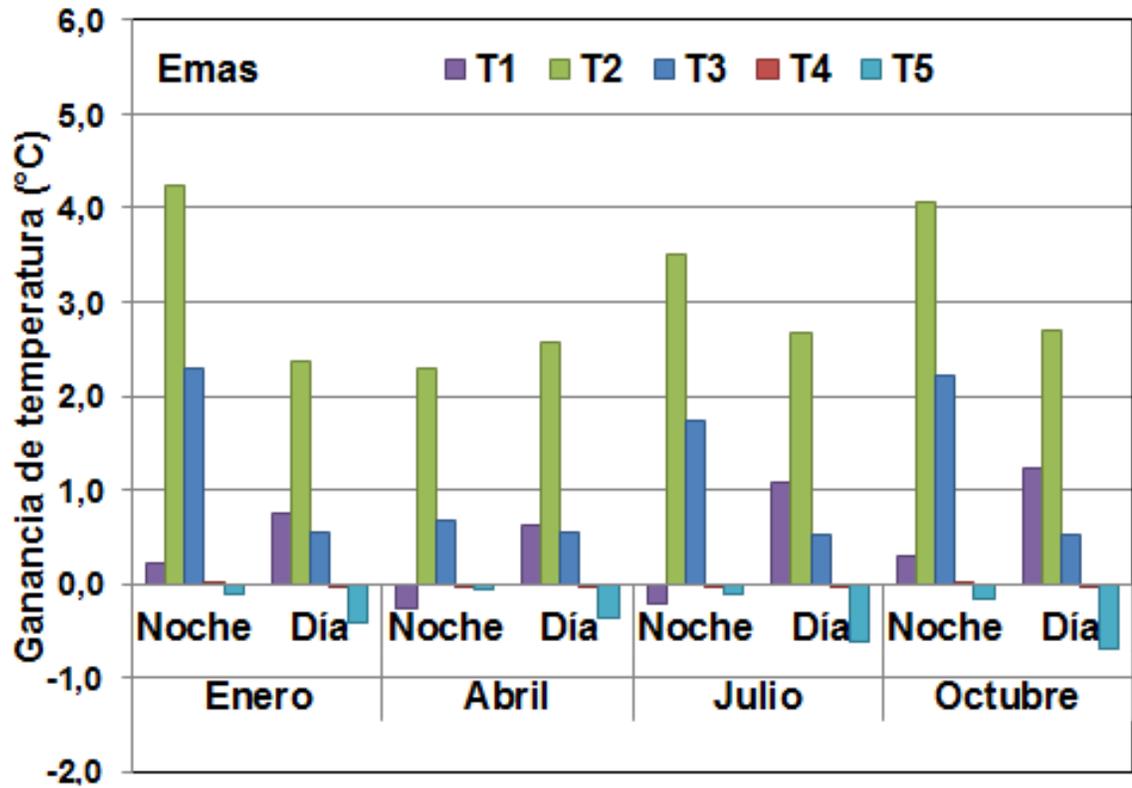


Figura 5-11.: Cambio de la ganancia térmica con las estrategias pasivas en Emas

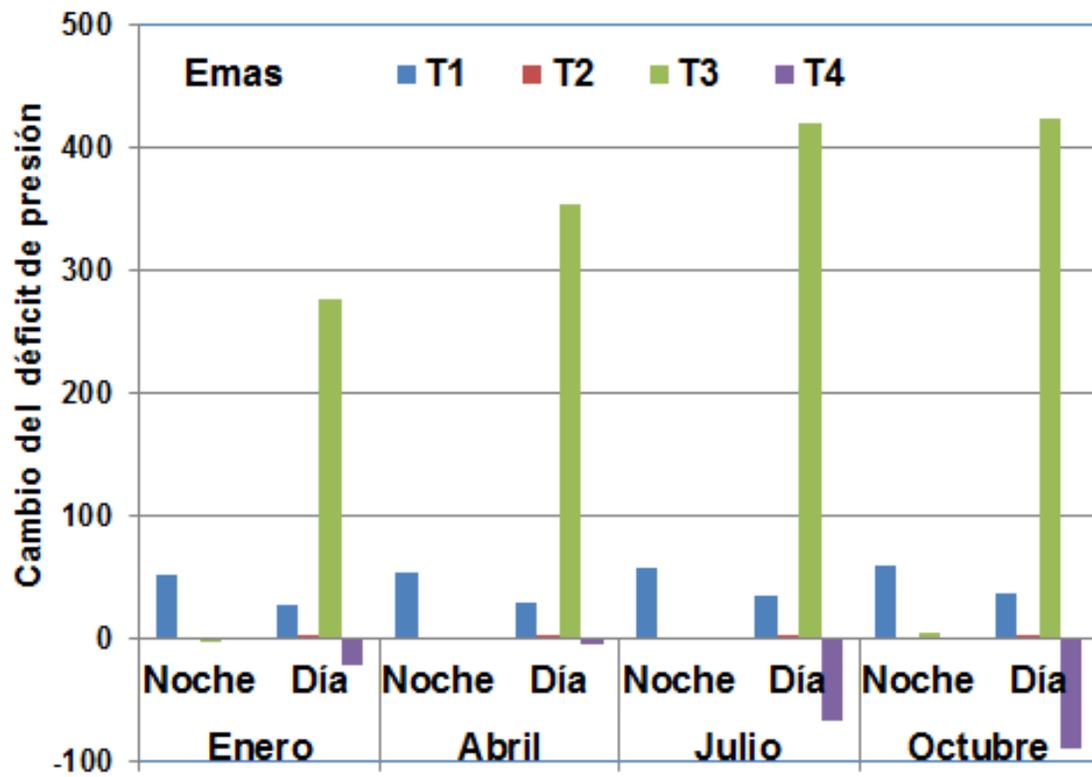


Figura 5-12.: Cambio en el DPV con las estrategias pasivas en Emas

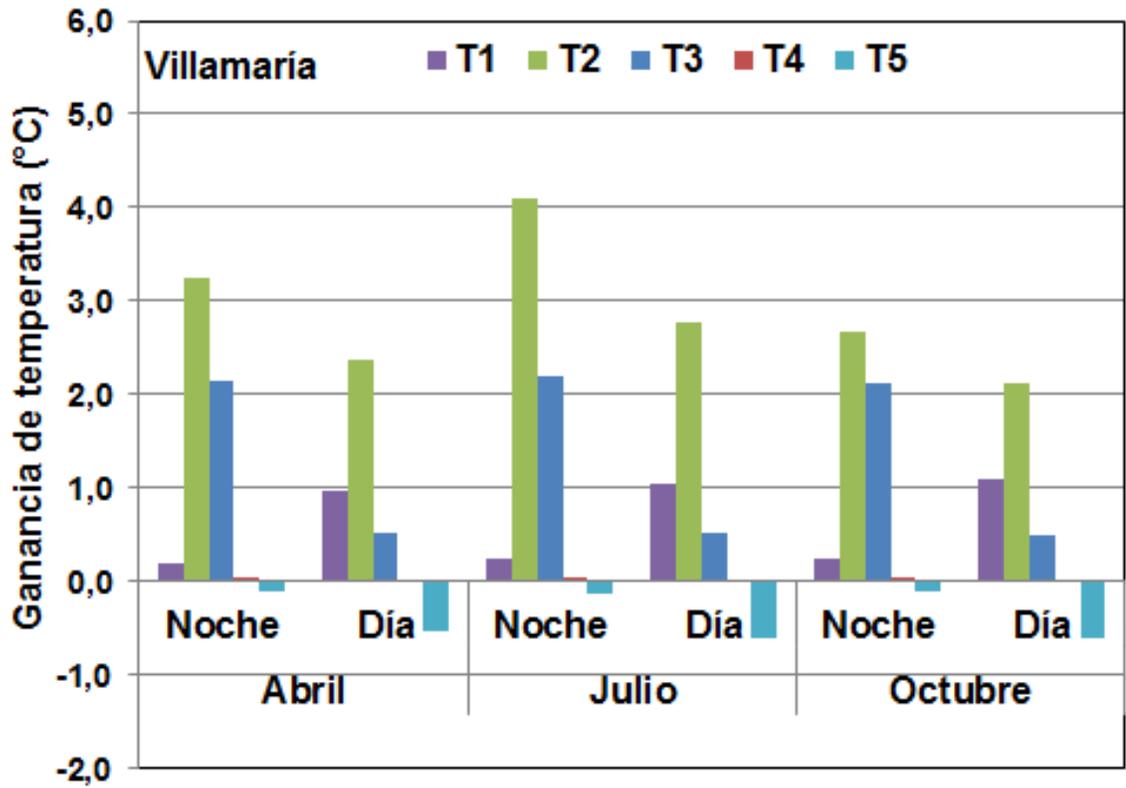


Figura 5-13.: Cambio de la ganancia térmica con las estrategias pasivas en Villamaría

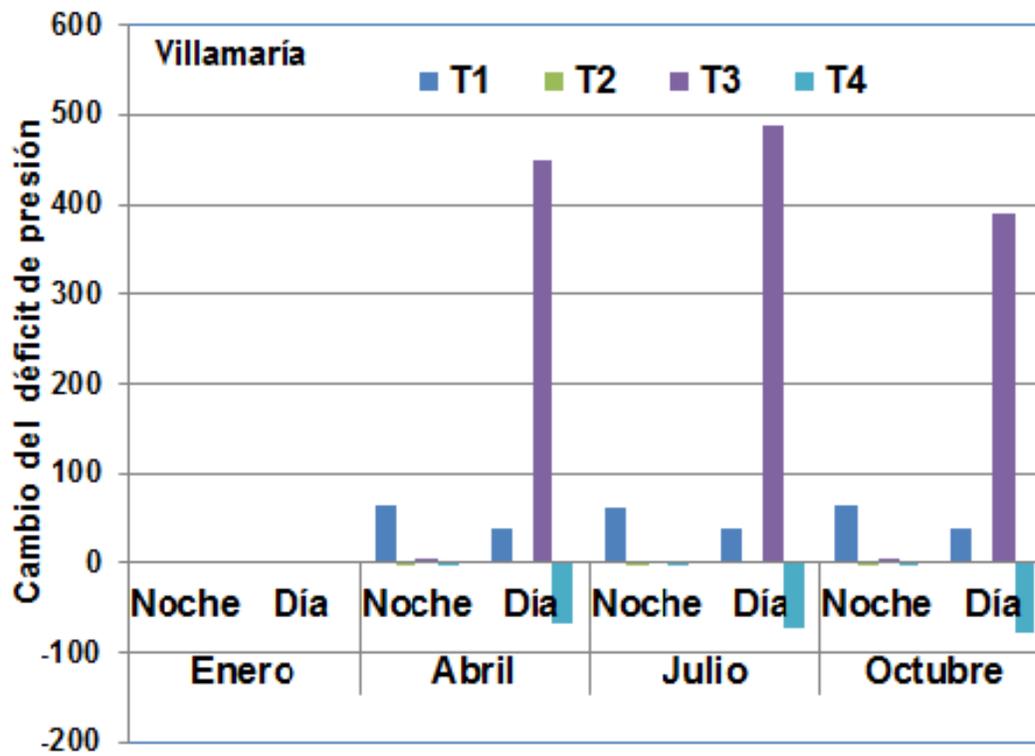


Figura 5-14.: Cambio en el DPV con las estrategias pasivas en Villamaría

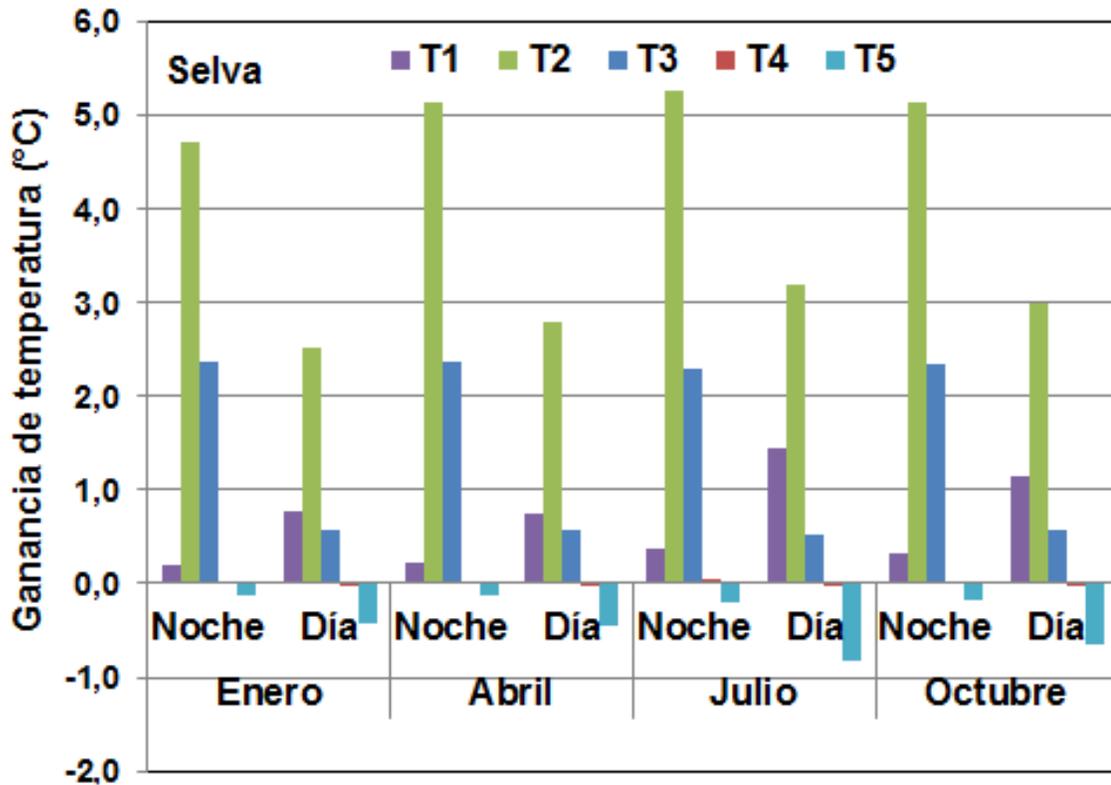


Figura 5-15.: Cambio de la ganancia térmica con las estrategias pasivas en Selva

superar los límites óptimos de temperatura en el día ventanas laterales más amplias serían una solución factible.

5.3. Conclusiones

Las simulaciones muestran en forma general que para los casos evaluados en clima frío la mejor estrategia es aquella que contempla un cambio en las propiedades de la cubierta, ya que garantiza una ganancia térmica tanto en el día como en la noche. La inclusión de la pantalla térmica también ofrece buenos resultados para mejorar la temperatura nocturna, mientras que la disminución de las áreas laterales no ofrecen un aumento significativo de la temperatura. Las gráficas del déficit de presión muestran que el aumento de temperatura tiene como costo el aumento de DPV, sin

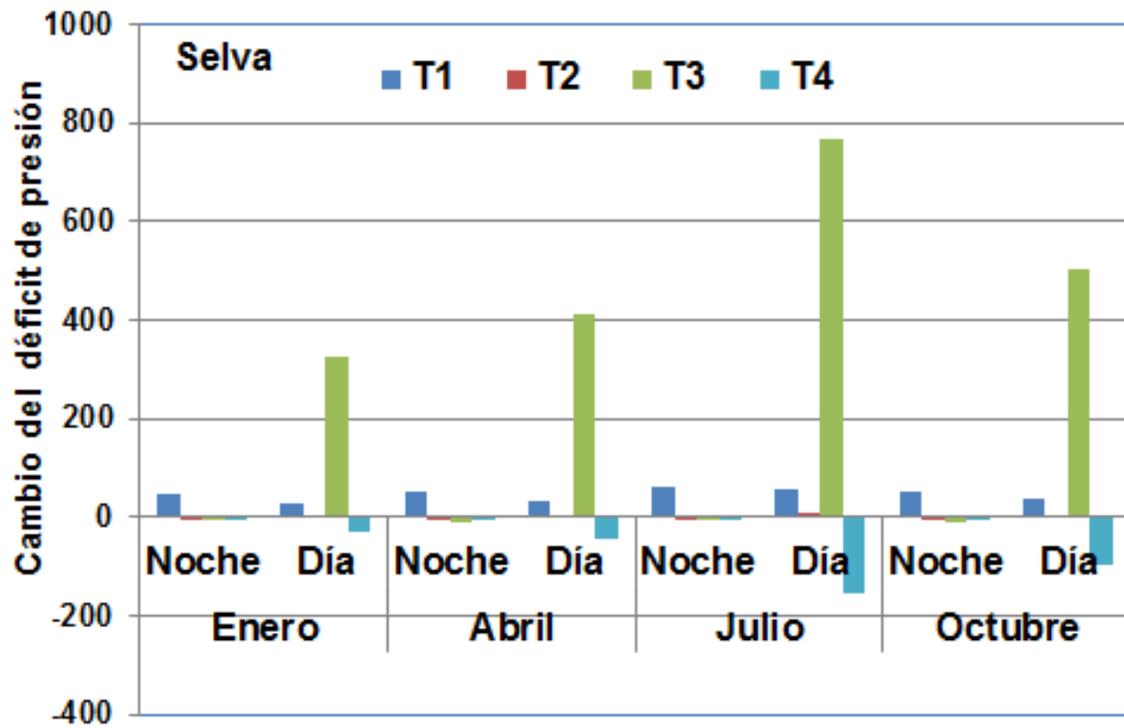


Figura 5-16.: Cambio en el DPV con las estrategias pasivas en Selva

embargo en promedio los valores obtenidos para las estaciones estudiadas continúan dentro del rango usual para un ambiente bajo invernadero. La combinación de métodos como cambio de material y aumento de ventilación lateral podría ser lo indicado en los casos donde el aumento de temperatura hace necesario evitar valores de DPV muy altos. Para clima cálido no se presentaron simulaciones de estrategias pasivas, pero el MMI evaluado considera en las ecuaciones de las propiedades óptimas el efecto de incluir pantallas de sombreado y su efecto sobre el microclima. Por tanto con el MMI pueden ser estudiados en futuros trabajos también métodos de refrigeración que en este caso no se revisaron porque era evaluar formas sencillas de elevar temperatura. La ventaja de que el código sea abierto es justamente la posibilidad de que cualquier persona pueda usarlo para estudiar múltiples modificaciones o transformaciones del sistema.

6. Conclusiones

Se identificaron los procesos de mayor influencia sobre la variabilidad climática en el país. Se presentaron evidencias y consecuencias del cambio climático que sugieren la necesidad de contar con estrategias de mitigación y adaptación para el sector agrícola. Se revisó la asociación entre los eventos Niño y Niña con la variabilidad interanual y la ocurrencia de sequías, heladas y lluvias fuertes. Se resaltó el papel de la migración de la ZCIT en la determinación de las épocas secas y húmedas, así como su interacción con sistemas extratropicales, ondas del este, ciclones tropicales y la baja presión de la Amazonía.

Se determinaron mediante el análisis de cluster ocho zonas homogéneas teniendo en cuenta la precipitación, humedad relativa, brillo solar y altitud. Se ubicaron tres zonas en la región central y suroccidental del país, dos en la región suroriental y una en la región noroccidental, Santanderes y cuenca del Catatumbo. Se evidenció que el comportamiento de la humedad relativa y el brillo solar a lo largo del año es similar en el área de estudio con variaciones del 78 al 82 % y de 100 a 150 horas de sol respectivamente. Las zonas ubicadas hacia el sector occidental (primer y cuarto cluster) son influenciadas por los sistemas sinópticos del Pacífico que surgen de la interacción entre el relieve y las masas de aire húmedo transportadas por el campo de viento desde el océano hacia el continente. La precipitación en el primer cluster osciló entre 30 y 130 mm y en el cuarto entre 50 y 250 mm, presentando temperaturas promedio entre 19°C y 23°C y 21°C y 23°C respectivamente. Las zonas entre cordilleras (segundo, tercero y quinto clusters) son controladas especialmente por la convección local y el flujo valle-montaña. La precipitación en el segundo cluster osciló entre 50 y 350mm, en el tercero entre 25 y 120mm, en el quinto entre 40 y 200 mm. Por su parte la temperatura media en el segundo cluster osciló entre 23°C y 25°C, en el tercero entre 13°C y 14°C, y en el quinto fue superior a 26°C. La zona ubicada al nororiente de Colombia (sexto cluster) recibe la influencia de procesos de interacción océano-atmósfera relacionados con el Atlántico. La precipitación en este

cluster osciló entre 80 y 380mm. Finalmente las zonas localizadas al suroriente (séptimo y octavo cluster) son afectados por la cercanía con la Amazonía, presentando una sola y extensa temporada húmeda que va desde finales de abril a noviembre y una sola seca de diciembre a inicios de abril con valores de 500mm de precipitación y temperatura promedio entre 24°C y 26°C.

Se implementó por primera vez en Colombia un modelo matemático del microclima, planteado en términos de los flujos de calor latente y sensible, radiación y vapor de agua. Se utilizaron en calidad de condiciones de entrada a la radiación global, temperatura del aire, humedad relativa, temperatura del suelo y el índice de área foliar. Se contó con módulos independientes para estimar los últimos dos factores mencionados. Se simuló el microclima en dos invernaderos ubicados en Chia-Cundinamarca y uno en Santa Sofía- Boyacá de diferentes dimensiones y parámetros.

Se predijo la temperatura del aire y presión de vapor en el invernadero IP con plástico negro con una eficiencia (EM) de 0.95, un coeficiente de determinación (CD) del 1.25, un error(CE) de 0.01 y un error cuadrático medio relativo (ECMR) del 3,1%. En el caso del plástico blanco los valores fueron respectivamente EM= 0.97, CD=1.07, CE=0.01 y ECMR del 2.79%. En el caso del invernadero tradicional IR el modelo predijo la temperatura del aire con una EM= 0.97, un CD=0.88, un CE=0.02 y un ECMR del 4,7%. En el caso de la presión de vapor en IR fueron EM= 0.98, CD=1.05, CE=0.05 y ECMR del 3.70%. Con el invernadero tradicional IT el modelo predijo la temperatura del aire con un EM=0.79, CD=1.01, CE=0.07 y un ECMR de 11,75%. En el caso de la presión de vapor fueron respectivamente EM= 0.71, CD=1.3, CE=0.09 y ECMR del 13.70%. Se concluyó que los resultados fueron satisfactorios con similitud entre los datos reales y simulados en un rango aceptable para este tipo de modelos.

Se logró por primera vez en Colombia predecir el comportamiento del microclima del invernadero para todo un ciclo de cultivo. Se aportó conocimiento relacionado con el modelado del microclima al implementar por primera vez en Colombia el sistema de ecuaciones en un lenguaje de código abierto integrando los resultados de índice de área foliar y temperatura de las capas del suelo como condiciones de entrada para simular todo el ciclo de producción. Se evidenció que el modelo es más sensible a parámetros de ventilación, intercambios de calor entre la cubierta y el medio exterior

y flujos de vapor de agua.

Se observó en los datos de entrada al modelo que a menor altitud de las estaciones la amplitud diaria de la temperatura disminuye. Se apreciaron leves diferencias en la humedad relativa relacionadas con la ubicación. En promedio la radiación solar osciló entre 0 y 900 W/m^2 y la velocidad del viento entre 1.5 y 2.5 ms^{-1} a excepción del piedemonte llanero donde alcanza una mayor intensidad.

se obtuvo en zonas de clima frío con invernadero tradicional una mínima ganancia térmica diaria de 0.9°C y máxima de 5.1°C en Socha, Boyera, Aragón y Pamplona y en la noche variaron entre -2°C y 2.2°C . En este caso el invernadero debe elevar la temperatura en horas nocturnas y parte del día durante cualquier época del año.

En zonas de clima templado se obtuvo la mínima ganancia térmica diaria de 0.3°C y la máxima de 5.5°C en Emas, Villamaría y Selva. En la noche el resultado menos favorable fue en la semana de enero con -2.5°C y la mayor ganancia en Julio con 4°C . Concluyendo que en estas áreas el requerimiento térmico ocurre especialmente en enero. En zonas de clima cálido como Marsella, Armenia, Universidad francisco de Paula y Villavicencio las simulaciones mostraron una menor diferencia entre la temperatura externa e interna.

Finalmente el cuarto aspecto es la proyección de estrategias pasivas: Se simuló métodos pasivos en escenarios fríos que consistieron en la disminución del área de ventilación lateral, cambio de las propiedades del material de cubierta, inclusión de pantallas térmicas y también el efecto de un sistema de almacenamiento de energía mediante mangas de agua.

A. Anexo: Estaciones meteorológicas seleccionadas para el análisis de los aspectos climáticos

Tabla A-1.: Estaciones meteorológicas

CODIGO	LON	LAT	ELEV	MUNICIPIO	DPTO
1102501	-76,088	5,881	1870	Ciudad Bolivar	Antioquia
1107502	-76,139	6,324	1810	Urrao	Antioquia
1111502	-76,033	6,761	1200	Canasgordas	Antioquia
1111504	-76,207	6,781	1330	Frontino	Antioquia
2307501	-74,850	5,833	423	Sonson	Antioquia
2308504	-75,418	6,135	2090	Rionegro	Antioquia
2308508	-74,840	6,486	872	San Roque	Antioquia
2308511	-75,241	6,214	1915	Penol	Antioquia
2308514	-75,100	5,967	1300	San Francisco	Antioquia
2308516	-75,254	6,312	1890	San Vicente	Antioquia
2308520	-75,427	6,176	2140	Rionegro	Antioquia
2308521	-75,002	6,349	952	San Rafael	Antioquia
2308522	-75,039	6,158	1085	San Carlos	Antioquia
2309501	-74,412	6,465	150	Puerto Berrio	Antioquia
2310503	-74,796	6,779	965	Vegachi	Antioquia
2317502	-74,712	7,008	630	Remedios	Antioquia
2617503	-75,694	5,720	1120	Tamesis	Antioquia
2617504	-75,651	5,800	655	Fredonia	Antioquia
2618502	-75,322	5,884	2250	La Union	Antioquia

CODIGO	LON	LAT	ELEV	MUNICIPIO	DPTO
2619501	-75,850	5,533	1570	Jardin	Antioquia
2619502	-75,884	5,701	1250	Andes	Antioquia
2620502	-75,717	5,933	1600	Venecia	Antioquia
2621501	-75,923	6,042	2032	Concordia	Antioquia
2622503	-75,831	6,537	530	Santafe de Antioquia	Antioquia
2622504	-75,916	6,733	1540	Buritica	Antioquia
2625502	-75,446	7,160	1200	Valdivia	Antioquia
2701507	-75,589	6,221	1490	Medellin	Antioquia
2701509	-75,556	6,323	1438	Bello	Antioquia
2701511	-75,564	6,784	2600	Santa Rosa de Osos	Antioquia
2701515	-75,400	6,417	1390	Barbosa	Antioquia
2701519	-75,150	6,543	1700	Santo Domingo	Antioquia
2701526	-75,625	6,048	1770	Caldas	Antioquia
2702503	-75,150	7,067	1610	Anori	Antioquia
2120523	-74,100	4,633	2556	Bogota	Bogota D.C.
2120524	-74,067	4,567	2800	Bogota	Bogota D.C.
2120525	-74,183	4,617	2540	Bogota	Bogota D.C.
2120534	-74,183	4,617	2585	Bogota	Bogota D.C.
2120536	-74,133	4,350	3455	Bogota	Bogota D.C.
2120552	-74,150	4,700	2546	Bogota	Bogota D.C.
2120558	-74,062	4,598	2725	Bogota	Bogota D.C.
2120559	-74,083	4,817	2560	Bogota	Bogota D.C.
2120571	-74,103	4,669	2552	Bogota	Bogota D.C.
2120579	-74,142	4,696	2547	Bogota	Bogota D.C.
2311501	-74,597	5,984	350	Puerto Boyacá	Boyacá
2312508	-74,185	5,667	1070	Otanche	Boyacá
2401502	-73,600	5,883	1700	Moniquira	Boyacá
2401518	-73,783	5,617	2545	Chiquinquirá	Boyacá
2401522	-73,499	5,512	2600	Samaca	Boyacá
2401530	-73,521	5,646	2215	Villa de Leyva	Boyacá
2402503	-73,167	5,967	2700	Duitama	Boyacá
2403501	-72,549	6,248	2950	La Uvita	Boyacá
2403512	-73,078	5,805	2485	Duitama	Boyacá
2403513	-73,359	5,556	2690	Tunja	Boyacá
2403514	-72,960	5,687	2500	Sogamoso	Boyacá
2403515	-72,904	5,777	2530	Nobsa	Boyacá
2403517	-73,120	5,749	2470	Paipa	Boyacá

CODIGO	LON	LAT	ELEV	MUNICIPIO	DPTO
2403518	-73,001	5,776	2548	Tibasosa	Boyacá
2403524	-72,375	6,410	3716	Guican	Boyacá
2403525	-72,467	6,183	2888	Chita	Boyacá
2403528	-72,733	5,967	2680	Socha	Boyacá
2403530	-73,193	5,582	2700	Toca	Boyacá
2403531	-72,508	6,553	2350	Chiscas	Boyacá
2403532	-72,708	6,136	2594	Sativanorte	Boyacá
2403533	-72,582	6,329	2150	Boavita	Boyacá
2403534	-72,971	5,680	2500	Sogamoso	Boyacá
3507501	-73,457	5,357	2438	Nuevo Colon	Boyacá
3507502	-73,453	5,025	1930	Sutatenza	Boyacá
3507503	-73,353	5,425	2200	Ramiriqui	Boyacá
3507504	-73,320	4,977	1300	Macanal	Boyacá
3508502	-73,207	5,361	2120	Rondon	Boyacá
3509503	-72,950	5,567	3000	Cuitiva	Boyacá
3519505	-72,721	5,415	1550	Pajarito	Boyacá
3523501	-72,541	6,013	3590	Socota	Boyacá
2302501	-75,133	5,200	1420	Manzanares	Caldas
2305504	-74,994	5,416	1475	Samana	Caldas
2613505	-75,700	4,967	1400	Chinchina	Caldas
2614505	-75,875	5,052	1020	Viterbo	Caldas
2615502	-75,583	4,983	1310	Chinchina	Caldas
2615505	-75,483	5,050	2150	Manizales	Caldas
2615509	-75,667	5,083	1010	Palestina	Caldas
2615511	-75,473	5,033	2062	Manizales	Caldas
2615514	-75,683	5,083	1020	Palestina	Caldas
2615515	-75,354	4,937	4150	Villamaria	Caldas
2617507	-75,650	5,467	1320	Supia	Caldas
4403502	-75,563	1,592	244	Florencia	Caqueta
4403503	-75,664	1,503	280	Florencia	Caqueta
4404501	-75,964	1,328	320	San Jose del Fragua	Caqueta
4404502	-75,705	1,195	270	Valparaiso	Caqueta
4404503	-75,811	1,306	300	Belen de Los Andaquies	Caqueta
4601501	-74,766	2,149	300	San Vicente del Caguan	Caqueta
4601502	-74,785	1,735	240	San Vicente del Caguan	Caqueta
4603501	-75,163	1,640	270	El Doncello	Caqueta

CODIGO	LON	LAT	ELEV	MUNICIPIO	DPTO
4603502	-75,150	1,921	285	Puerto Rico	Caqueta
3519502	-72,749	5,021	460	Tauramena	Casanare
3519503	-72,551	5,180	380	Aguazul	Casanare
2105503	-76,169	2,244	2085	Purace	Cauca
2105504	-76,056	2,836	1860	Paez	Cauca
2601502	-76,441	2,174	2900	Purace	Cauca
2602503	-76,445	3,051	1040	Santander de Quilichao	Cauca
2602507	-76,292	2,513	3065	Totoro	Cauca
2602509	-76,565	2,588	1873	Cajibio	Cauca
2603502	-76,905	2,500	3012	El Tambo	Cauca
2603503	-76,612	2,456	1757	Popayan	Cauca
2603504	-76,707	2,943	1130	Suarez	Cauca
2603505	-76,583	2,450	1850	Popayan	Cauca
2603506	-76,800	2,400	1700	El Tambo	Cauca
2604501	-76,420	3,265	1003	Puerto Tejada	Cauca
2605506	-76,600	3,100	970	Buenos Aires	Cauca
2606501	-76,350	3,272	1009	Miranda	Cauca
2606502	-76,226	3,248	1156	Miranda	Cauca
4401503	-76,675	1,902	2971	San Sebastian	Cauca
5201502	-77,063	2,158	677	Patia	Cauca
5202502	-76,893	1,755	1946	Bolivar	Cauca
5202503	-77,166	1,773	1286	Mercaderes	Cauca
5202505	-76,754	2,197	1870	La Sierra	Cauca
2321503	-73,603	8,229	208	Aguachica	Cesar
2321505	-73,642	8,616	163	La Gloria	Cesar
2119503	-74,417	4,350	1550	Tibacuy	Cundinamarca
2119506	-74,487	4,193	950	Pandi	Cundinamarca
2119507	-74,312	4,310	2256	Pasca	Cundinamarca
2120516	-74,183	4,717	2545	Funza	Cundinamarca
2120539	-73,733	5,083	2675	Choconta	Cundinamarca
2120540	-73,867	5,117	2580	Nemocon	Cundinamarca
2120541	-73,983	5,150	3100	Cogua	Cundinamarca
2120542	-74,209	4,691	2543	Mosquera	Cundinamarca
2120548	-73,717	5,033	2760	Choconta	Cundinamarca
2120551	-74,283	4,600	2607	Soacha	Cundinamarca
2120557	-74,217	4,850	2590	Subachoque	Cundinamarca
2120561	-74,250	4,550	2565	Sibate	Cundinamarca

CODIGO	LON	LAT	ELEV	MUNICIPIO	DPTO
2120562	-73,367	4,883	2625	Guatavita	Cundinamarca
2120565	-73,933	4,767	2620	Tabio	Cundinamarca
2120566	-74,527	4,582	810	Anapoima	Cundinamarca
2120567	-74,438	4,771	1915	Anolaima	Cundinamarca
2120570	-73,868	4,880	2750	Guasca	Cundinamarca
2120572	-74,189	4,506	2900	Soacha	Cundinamarca
2120574	-73,701	5,118	2709	Choconta	Cundinamarca
2120577	-74,276	4,732	2550	Madrid	Cundinamarca
2120591	-74,001	4,989	2600	Zipaquira	Cundinamarca
2120592	-73,964	4,821	2650	Sopo	Cundinamarca
2120598	-74,201	4,792	2560	Tenjo	Cundinamarca
2120601	-73,800	5,089	2550	Suesca	Cundinamarca
2120602	-74,139	4,835	2575	Tabio	Cundinamarca
2120606	-74,253	4,717	2575	Madrid	Cundinamarca
2120607	-74,300	4,567	1540	El Colegio	Cundinamarca
2120608	-74,467	4,667	1250	Cachipay	Cundinamarca
2123501	-74,698	4,565	300	Jerusalen	Cundinamarca
2303502	-74,658	5,474	172	Puerto Salgar	Cundinamarca
2306507	-74,200	5,167	1940	Pacho	Cundinamarca
2306511	-74,355	5,483	1347	Yacopi	Cundinamarca
2306512	-74,140	5,142	2000	Pacho	Cundinamarca
2306513	-74,367	5,467	1340	Yacopi	Cundinamarca
2312507	-74,067	5,300	2150	San Cayetano	Cundinamarca
2401511	-73,850	5,300	2610	Villa de San Diego de Ub	Cundinamarca
2401512	-73,739	5,471	2580	Fuquene	Cundinamarca
2401515	-73,767	5,200	2860	Cucunuba	Cundinamarca
2401519	-73,783	5,333	2550	Villa de San Diego de Ub	Cundinamarca
2401521	-73,850	5,250	2700	Sutatausa	Cundinamarca
3503504	-73,900	4,483	2999	Fomeque	Cundinamarca
3503505	-73,883	4,500	3800	Fomeque	Cundinamarca
3505501	-73,301	4,377	280	Paratebueno	Cundinamarca
3506501	-73,647	4,830	1752	Gacheta	Cundinamarca
2120542	-74,209	4,691	2543	Mosquera	Cundinamarca
2101502	-76,128	1,825	1320	Pitalito	Huila
2101503	-76,298	1,891	1800	San Agustin	Huila
2102502	-75,740	2,082	1350	Altamira	Huila
2103502	-75,679	1,914	2035	Guadalupe	Huila

CODIGO	LON	LAT	ELEV	MUNICIPIO	DPTO
2103504	-75,831	1,871	1045	Suaza	Huila
2104501	-75,708	2,285	810	Agrado	Huila
2105502	-75,895	2,381	1070	La Plata	Huila
2106503	-75,550	2,367	1500	Gigante	Huila
2106504	-75,533	2,255	1305	Garzon	Huila
2108502	-75,632	2,651	1095	Iquira	Huila
2108503	-75,575	2,763	1030	Teruel	Huila
2109501	-75,330	2,830	460	Palermo	Huila
2110503	-75,326	2,525	1155	Algeciras	Huila
2110505	-75,421	2,603	553	Campoalegre	Huila
2111502	-75,293	2,949	439	Neiva	Huila
2111506	-75,188	3,332	400	Villavieja	Huila
2111507	-75,077	3,018	1300	Tello	Huila
2111508	-75,220	3,225	430	Villavieja	Huila
2111510	-75,069	2,946	1100	Neiva	Huila
2111514	-74,921	3,094	2100	Baraya	Huila
2111516	-75,085	3,136	600	Baraya	Huila
2112501	-75,588	2,935	1300	Santa Maria	Huila
2114504	-75,114	3,376	440	Villavieja	Huila
2114507	-74,703	3,312	1475	Colombia	Huila
3207503	-73,725	3,084	325	Vistahermosa	Meta
3207504	-73,716	3,516	360	Granada	Meta
3207505	-74,045	3,381	620	Mesetas	Meta
3502502	-73,467	4,067	336	Villavicencio	Meta
3503502	-73,620	4,163	423	Villavicencio	Meta
3503503	-73,582	4,278	450	Restrepo	Meta
3504502	-73,361	4,303	305	Cumaral	Meta
4701510	-77,165	1,163	2830	Pasto	Narino
5203502	-77,346	1,622	1046	Taminango	Narino
5204501	-77,306	1,201	2871	Pasto	Narino
5204502	-77,294	1,389	1873	Chachagui	Narino
5205502	-77,643	1,075	3120	Tuquerres	Narino
5205503	-77,468	1,187	1602	Consaca	Narino
5205504	-77,282	1,163	2820	Pasto	Narino
5205506	-77,603	1,376	1711	Samaniego	Narino
5205507	-77,467	1,267	1700	Consaca	Narino
1601501	-72,530	7,781	250	Cucuta	Norte Santander

CODIGO	LON	LAT	ELEV	MUNICIPIO	DPTO
1601502	-72,648	7,376	2340	Pamplona	Norte Santander
1601503	-72,540	7,571	1760	Ragonvalia	Norte Santander
1601504	-72,428	8,230	90	Cucuta	Norte Santander
1601506	-72,600	7,583	1235	Chinacota	Norte Santander
1602501	-72,570	7,850	285	Cucuta	Norte Santander
1602502	-72,567	8,153	90	El Zulia	Norte Santander
1602503	-72,820	7,776	860	Salazar	Norte Santander
1602504	-72,482	8,170	100	Cucuta	Norte Santander
1602506	-72,800	7,767	1000	Salazar	Norte Santander
1603501	-72,715	8,638	50	Tibu	Norte Santander
1603502	-72,579	8,485	62	Tibu	Norte Santander
1603503	-72,821	8,079	320	Sardinata	Norte Santander
1604502	-73,081	8,594	180	El Tarra	Norte Santander
1605502	-73,289	8,445	1160	Teorama	Norte Santander
1605504	-73,227	8,090	1430	Abrego	Norte Santander
2319518	-73,055	7,738	1882	Cachira	Norte Santander
3701501	-72,757	7,210	2765	Silos	Norte Santander
4401501	-76,623	1,037	405	Villagarzon	Putumayo
4701503	-76,909	1,230	2100	Sibundoy	Putumayo
4701504	-76,964	1,201	2118	Colon	Putumayo
4701509	-76,936	1,171	2093	Sibundoy	Putumayo
2612506	-75,770	4,458	1247	Armenia	Quindio
2612507	-75,667	4,517	1450	Calarca	Quindio
2612508	-75,733	4,383	1250	Buenavista	Quindio
2612509	-75,667	4,533	1550	Armenia	Quindio
2613504	-75,738	4,817	1367	Pereira	Risaralda
2613506	-75,633	4,917	1600	Santa Rosa de Cabal	Risaralda
2613507	-75,533	4,783	2120	Pereira	Risaralda
2613510	-75,881	4,881	999	Pereira	Risaralda
2613511	-75,632	4,870	1770	Santa Rosa de Cabal	Risaralda
2614502	-75,800	5,275	2024	Guatica	Risaralda
2614503	-75,970	5,082	1670	Santuario	Risaralda
5401501	-76,031	5,233	1515	Pueblo Rico	Risaralda
2312504	-73,922	6,618	180	Puerto Parra	Santander
2312505	-74,065	6,652	168	Puerto Parra	Santander
2312506	-73,917	5,761	1690	Albania	Santander
2312512	-73,952	6,309	300	Cimitarra	Santander

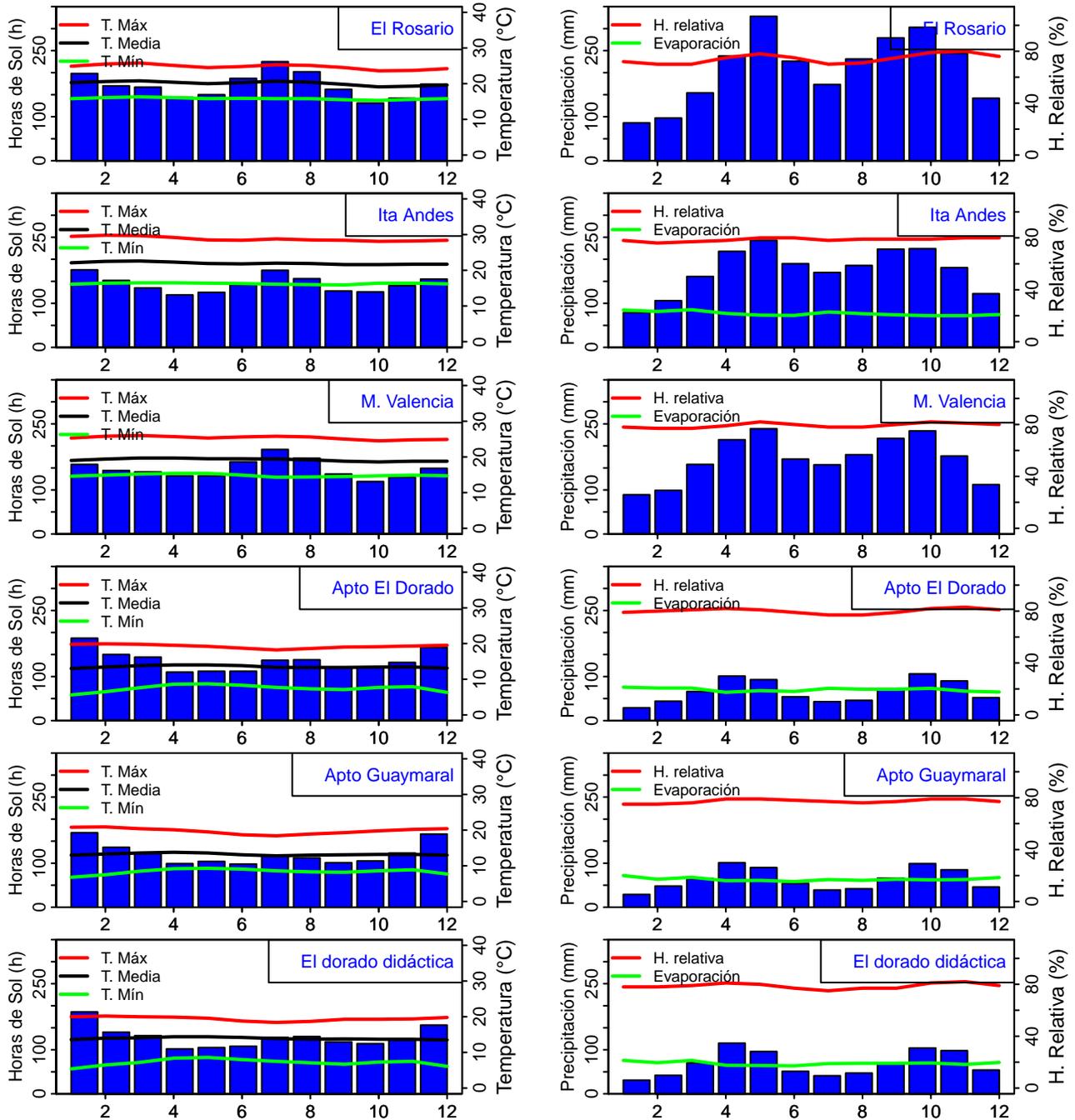
CODIGO	LON	LAT	ELEV	MUNICIPIO	DPTO
2312513	-73,809	6,221	1085	Landazuri	Santander
2315503	-73,812	7,029	126	Barrancabermeja	Santander
2315504	-73,765	6,860	162	Barrancabermeja	Santander
2318501	-73,537	7,456	328	Sabana de Torres	Santander
2319504	-73,122	7,145	1018	Bucaramanga	Santander
2319509	-72,991	7,369	1725	Surata	Santander
2319511	-73,167	7,025	777	Giron	Santander
2319513	-73,186	7,129	1189	Lebrija	Santander
2319517	-73,447	7,416	172	Sabana de Torres	Santander
2319520	-72,991	7,483	1850	Surata	Santander
2401525	-73,419	6,240	1400	Guadalupe	Santander
2401527	-73,673	5,997	2170	Velez	Santander
2401528	-73,344	5,945	1900	Gambita	Santander
2402502	-73,199	6,533	2120	Pinchote	Santander
2402504	-72,969	6,470	1667	Mogotes	Santander
2402505	-73,153	6,266	1350	Charala	Santander
2403526	-72,697	6,521	1160	Capitanejo	Santander
2403527	-72,711	6,844	2698	Cerrito	Santander
2405503	-73,286	6,793	1810	Zapatoca	Santander
2406501	-73,800	7,243	138	Puerto Wilches	Santander
3701502	-72,872	7,190	3214	Tona	Santander
2113502	-75,019	3,860	425	Saldana	Tolima
2113503	-75,112	3,577	415	Natagaima	Tolima
2113504	-75,123	3,777	485	Coyaima	Tolima
2115502	-74,900	3,550	1260	Dolores	Tolima
2115504	-74,909	3,536	1456	Dolores	Tolima
2116502	-74,600	3,933	1610	Villarrica	Tolima
2116503	-74,777	3,899	400	Purificacion	Tolima
2118502	-74,964	4,191	431	Espinal	Tolima
2118503	-74,985	4,012	360	Guamo	Tolima
2118504	-74,802	4,280	286	Flandes	Tolima
2121507	-75,267	4,450	1300	Ibague	Tolima
2121508	-74,999	4,235	475	Espinal	Tolima
2121510	-75,428	4,444	1920	Cajamarca	Tolima
2121514	-75,083	4,333	780	Ibague	Tolima
2124501	-75,074	4,432	750	Ibague	Tolima
2124504	-75,144	4,430	928	Ibague	Tolima

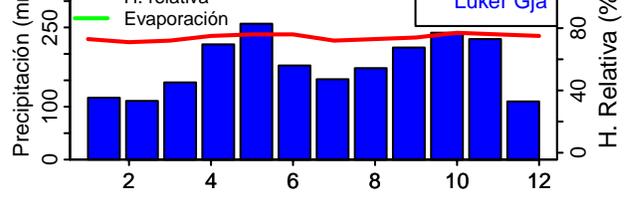
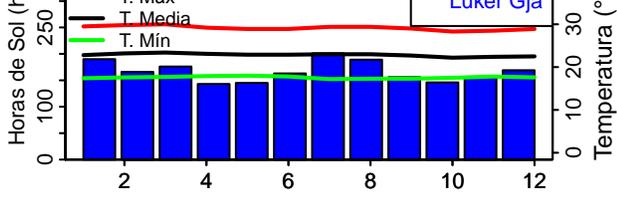
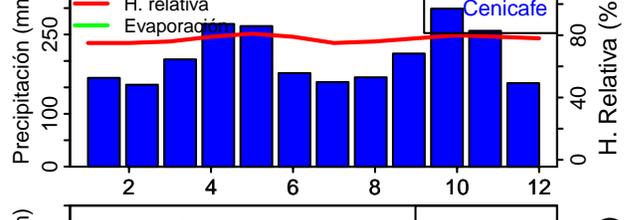
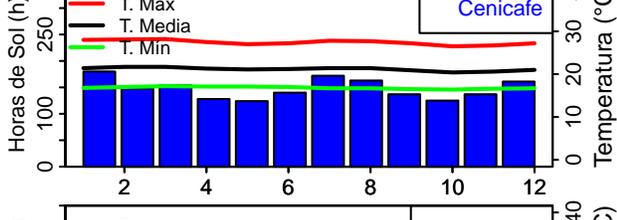
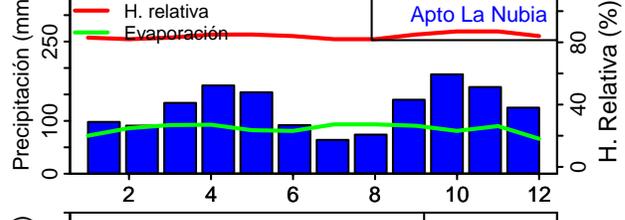
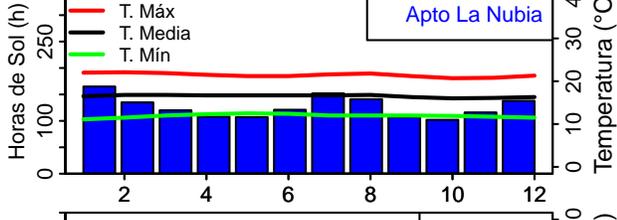
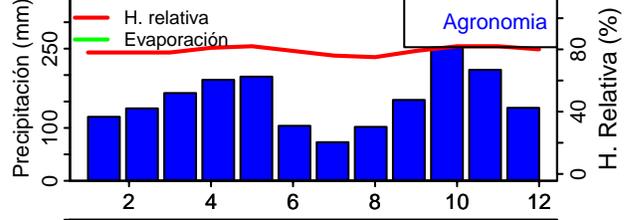
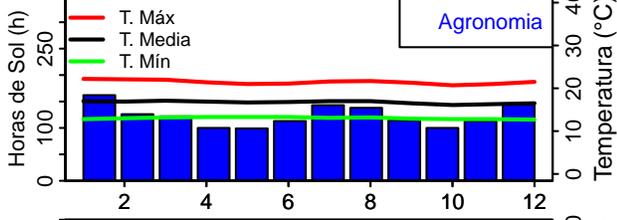
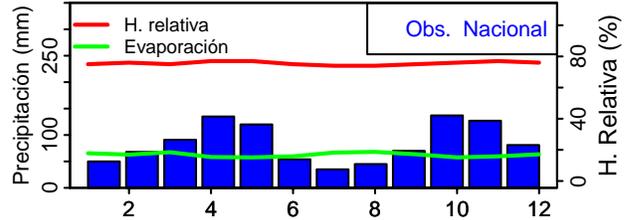
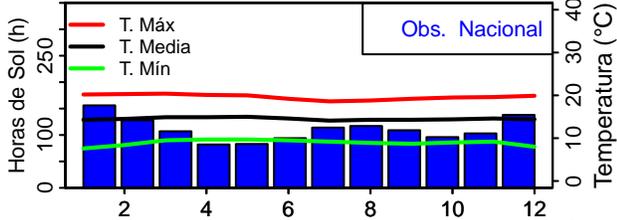
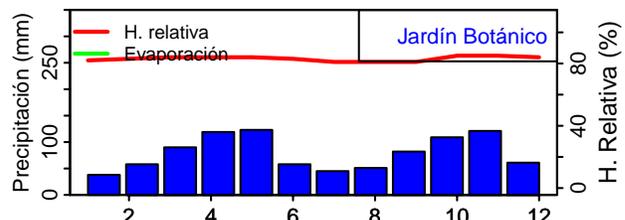
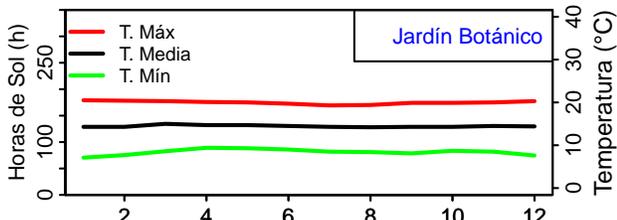
CODIGO	LON	LAT	ELEV	MUNICIPIO	DPTO
2124514	-75,098	4,714	2271	Santa Isabel	Tolima
2125508	-74,771	4,787	450	Ambalema	Tolima
2125511	-75,139	4,710	2927	Santa Isabel	Tolima
2125512	-75,117	5,031	2029	Villahermosa	Tolima
2125513	-75,067	4,917	1430	Libano	Tolima
2125514	-74,924	4,824	500	Lerida	Tolima
2202501	-75,639	3,213	1355	Planadas	Tolima
2204501	-75,507	3,725	1040	Chaparral	Tolima
2205502	-75,540	3,459	500	Ataco	Tolima
2205503	-74,902	3,989	300	Purificacion	Tolima
2206504	-75,488	3,914	1500	San Antonio	Tolima
2206505	-75,500	3,717	1000	Chaparral	Tolima
2207503	-75,381	4,215	2020	Rovira	Tolima
2301504	-74,883	5,217	475	Mariquita	Tolima
2302502	-74,733	5,265	222	Honda	Tolima
2605505	-76,585	3,246	1010	Jamundi	Valle
2605507	-76,535	3,379	1004	Cali	Valle
2607501	-76,317	3,525	1041	Palmira	Valle
2607503	-76,283	3,350	1040	Pradera	Valle
2607504	-76,389	3,536	989	Palmira	Valle
2607505	-76,281	3,577	1061	Palmira	Valle
2607508	-76,304	3,363	1050	Florida	Valle
2607509	-76,217	3,483	1350	Palmira	Valle
2608511	-76,350	4,167	1380	Trujillo	Valle
2608512	-76,503	3,458	1002	Cali	Valle
2609508	-76,078	3,733	2364	El Cerrito	Valle
2609510	-76,283	3,617	1100	El Cerrito	Valle
2609512	-76,250	3,767	1128	Guadalajara de Buga	Valle
2609520	-76,183	3,867	1320	Guadalajara de Buga	Valle
2609523	-76,302	3,836	1070	Guadalajara de Buga	Valle
2609525	-76,067	3,483	3520	Palmira	Valle
2610509	-75,917	4,267	1540	Sevilla	Valle
2610514	-75,888	4,033	3003	Sevilla	Valle
2610515	-76,037	4,242	1065	Bugalagrande	Valle
2610516	-76,227	4,093	1012	Tulua	Valle
2610519	-76,183	4,067	1014	Tulua	Valle
2610522	-75,950	4,717	920	Cartago	Valle

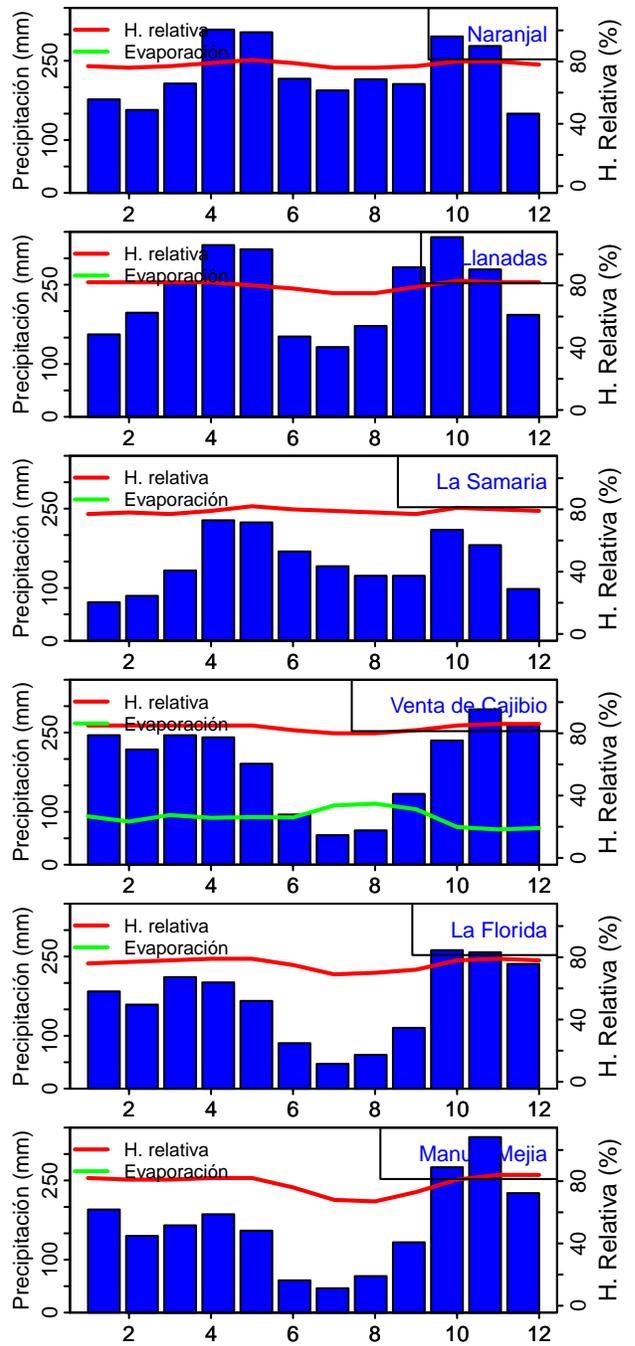
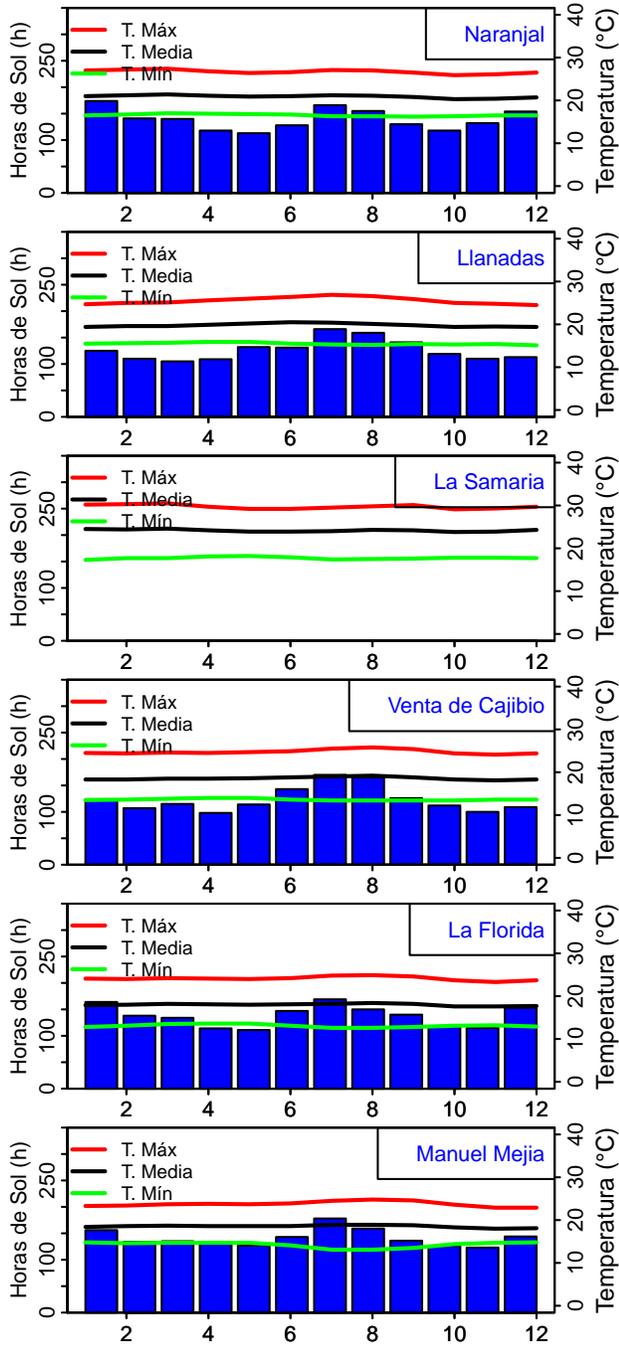
CODIGO	LON	LAT	ELEV	MUNICIPIO	DPTO
2610523	-76,171	4,030	1114	Tulua	Valle
2611503	-76,134	4,402	930	Roldanillo	Valle
2611504	-76,066	4,533	946	La Union	Valle
2611508	-76,080	4,480	922	Roldanillo	Valle
2612510	-75,550	4,517	1320	Alcala	Valle
2612513	-75,832	4,185	1731	Sevilla	Valle
5311503	-76,517	3,817	1360	Restrepo	Valle
5403502	-76,126	4,724	1600	Argelia	Valle
5403503	-76,217	4,767	1400	El Cairo	Valle

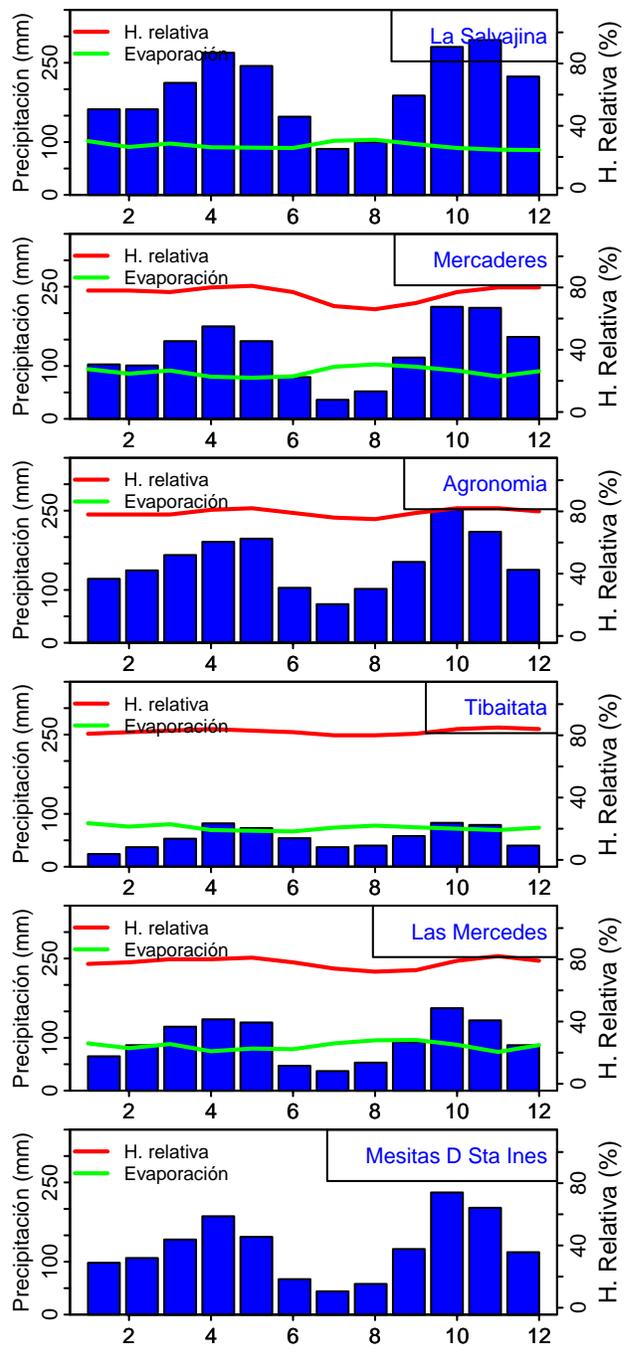
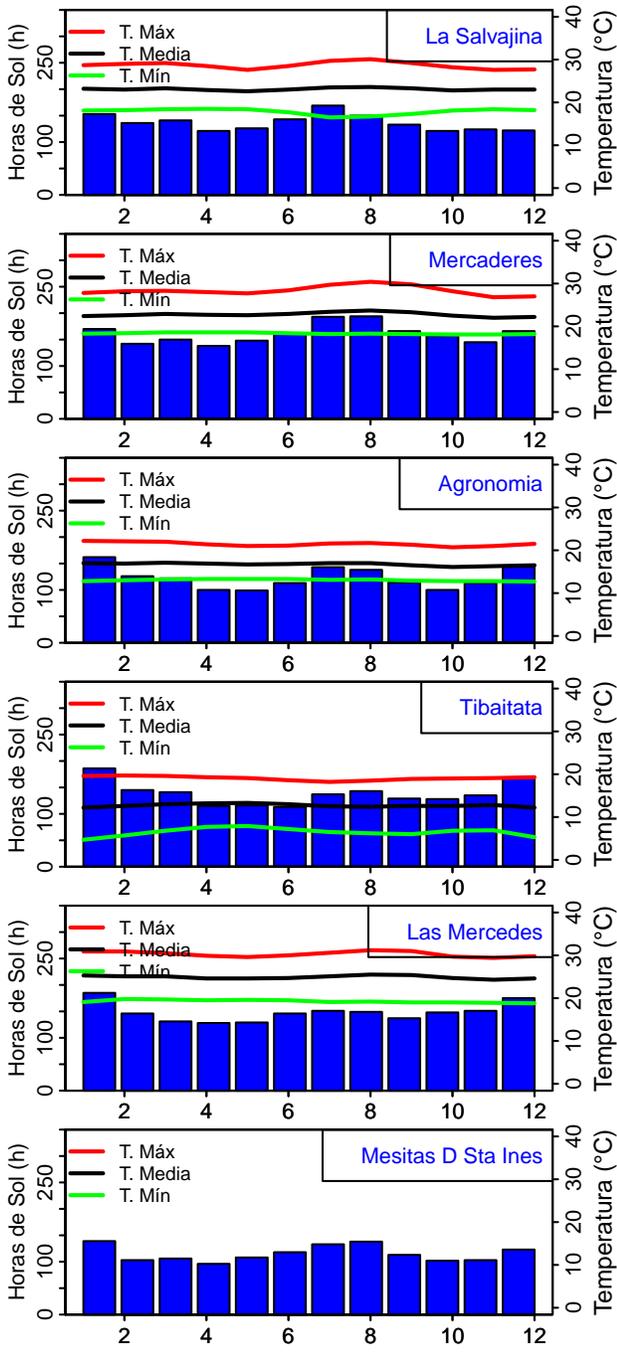
**B. Anexo: Climogramas de
estaciones meteorológicas
utilizadas en el análisis de cluster**

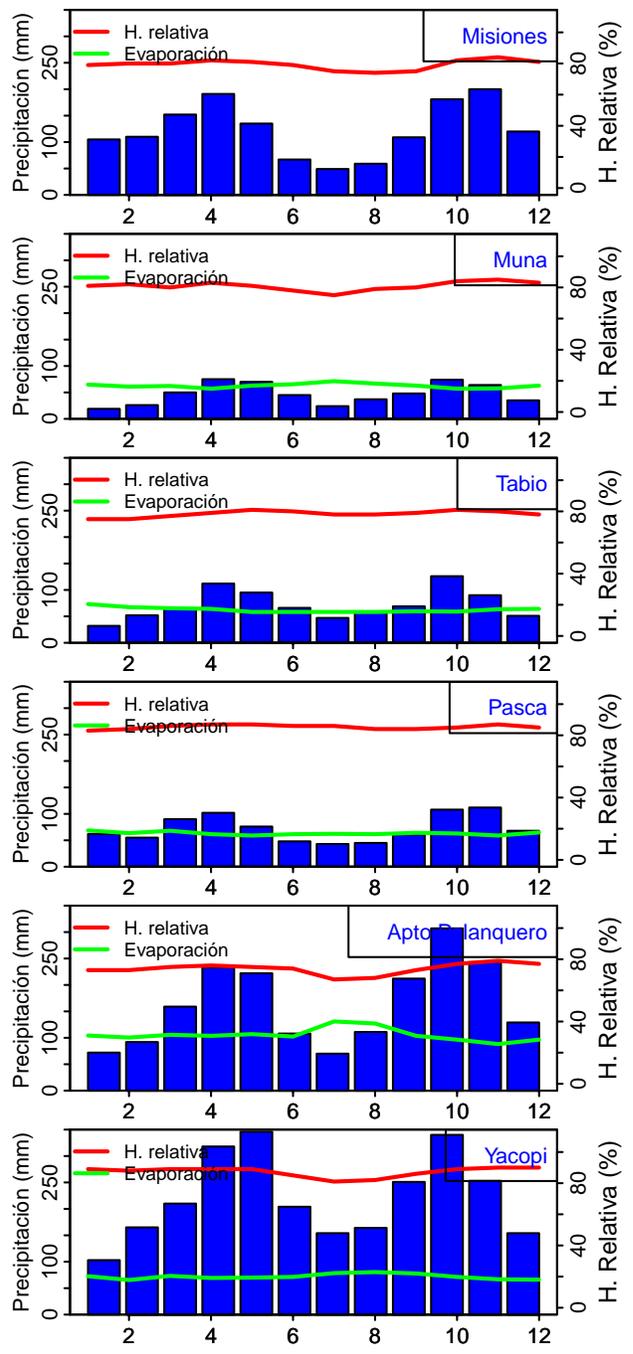
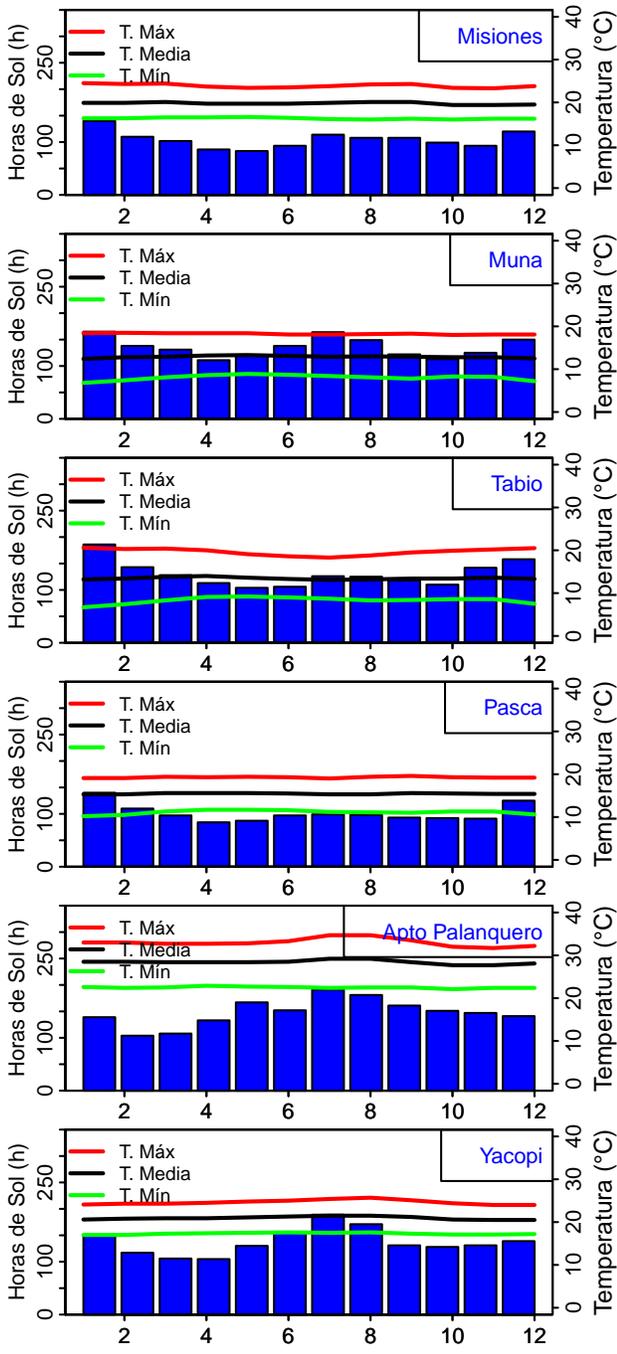
B.1. Estaciones de la región central y suroccidental

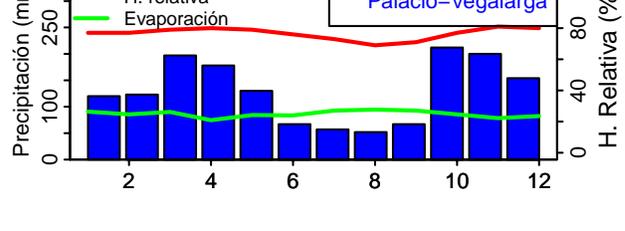
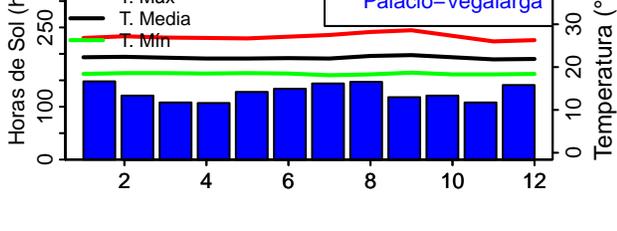
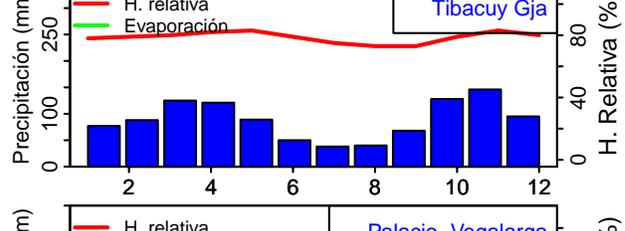
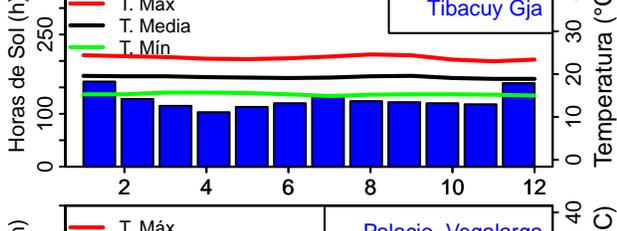
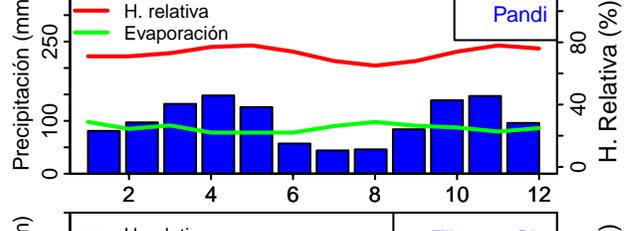
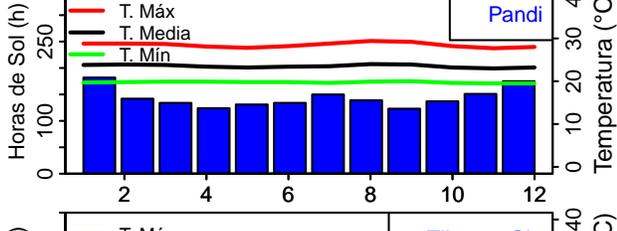
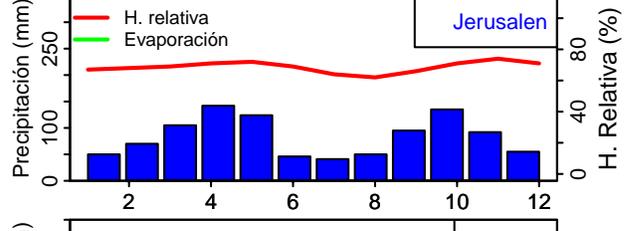
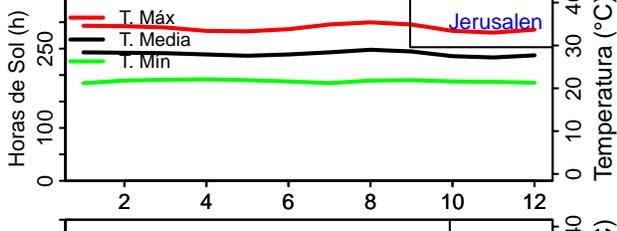
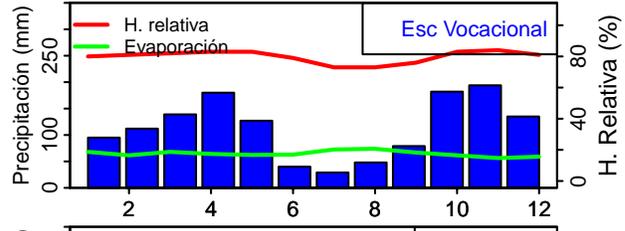
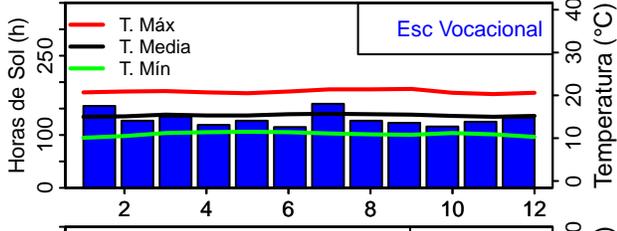
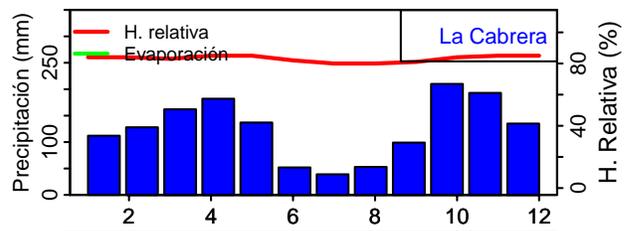
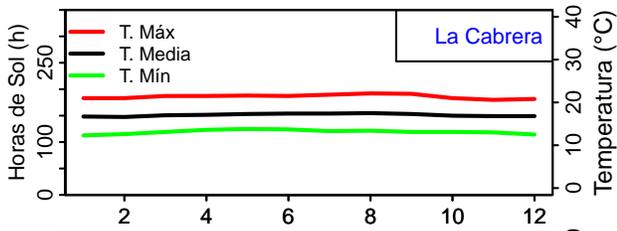


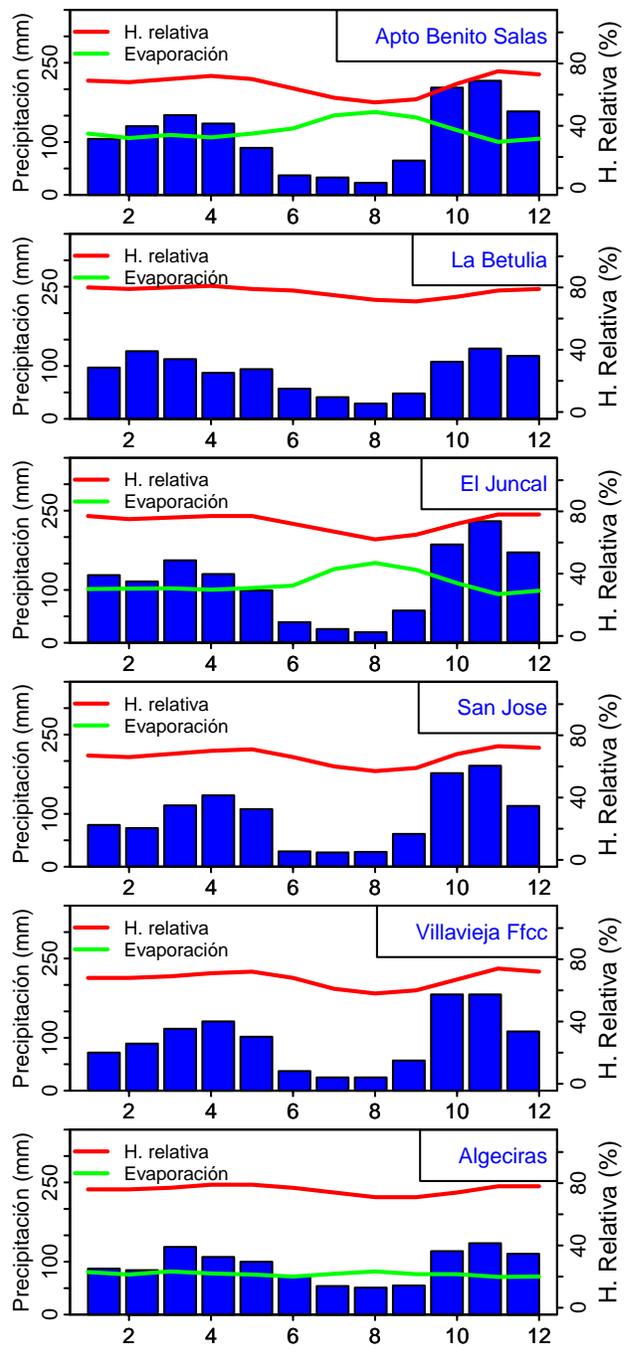
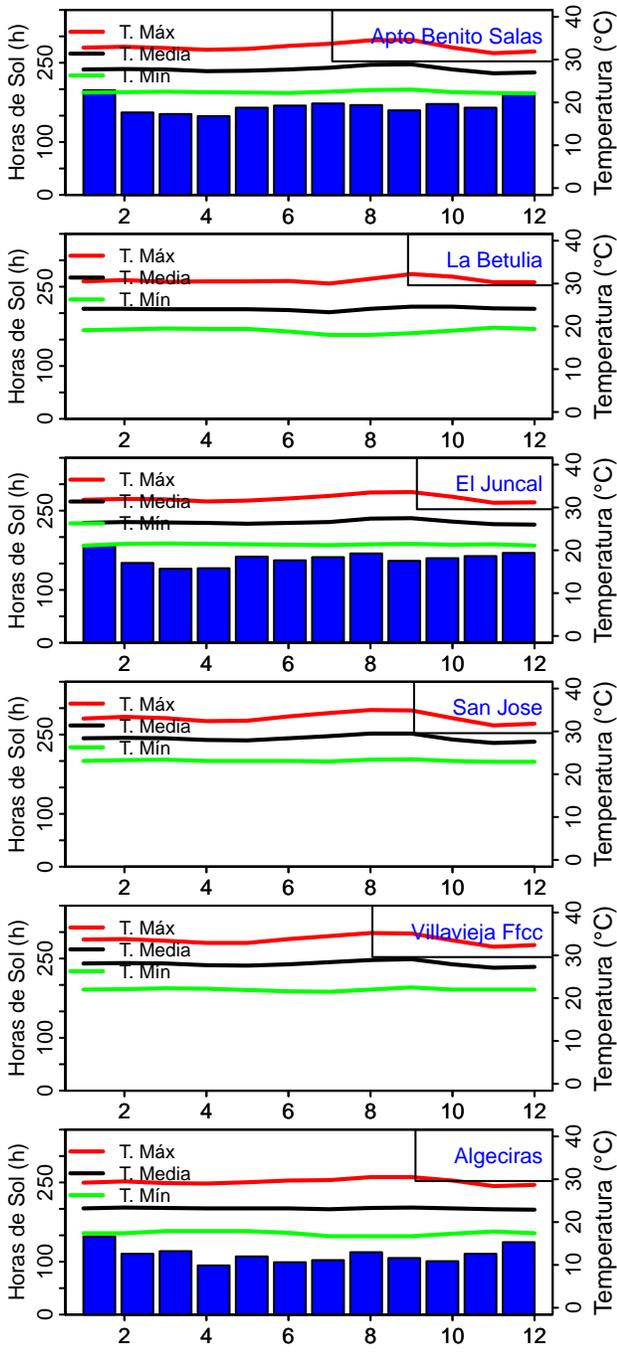


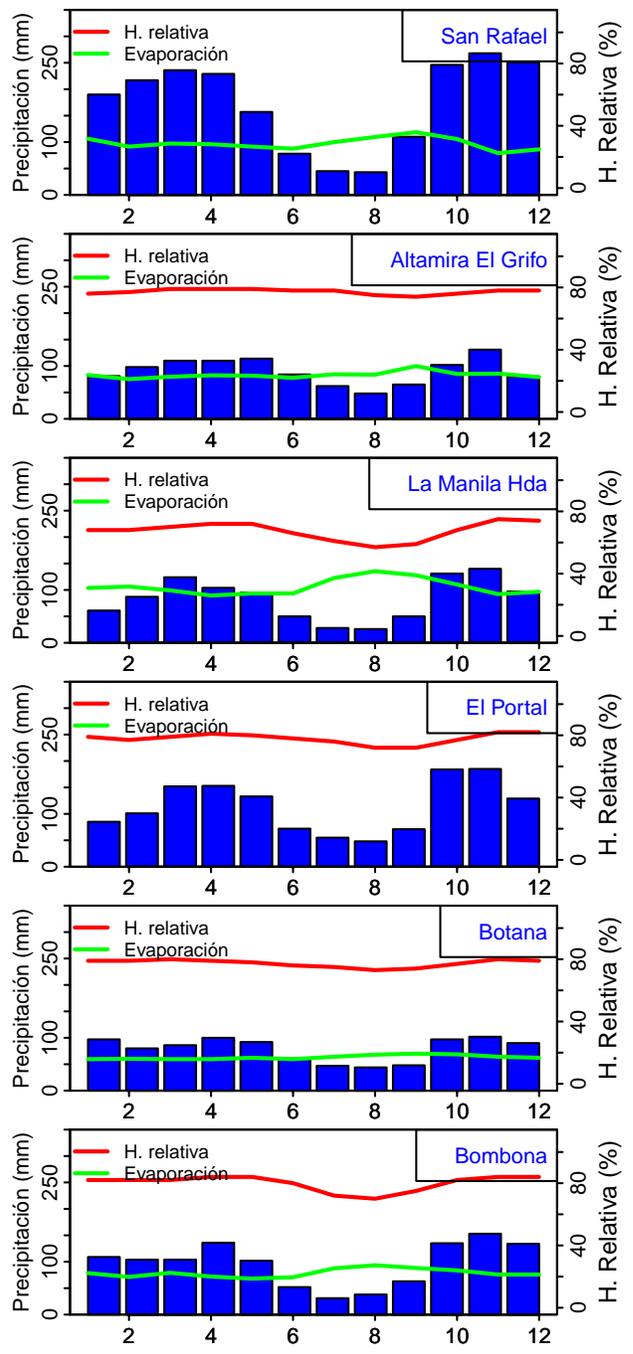
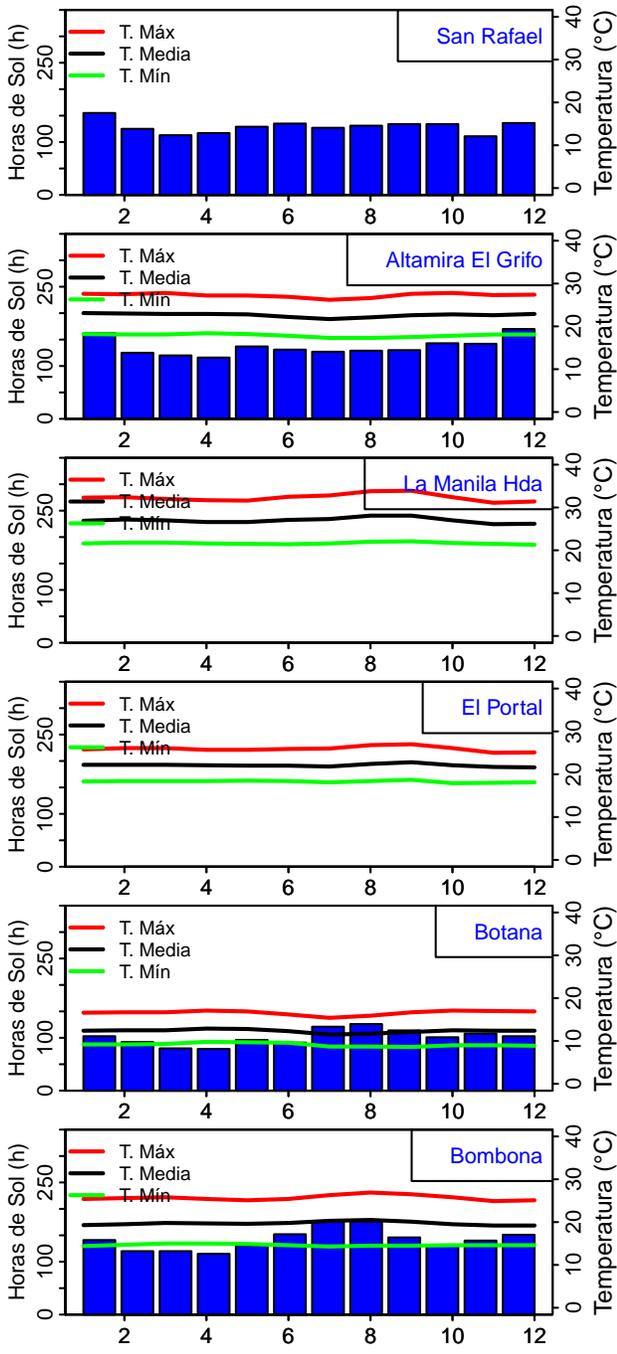


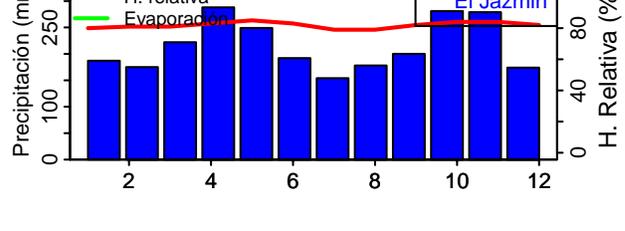
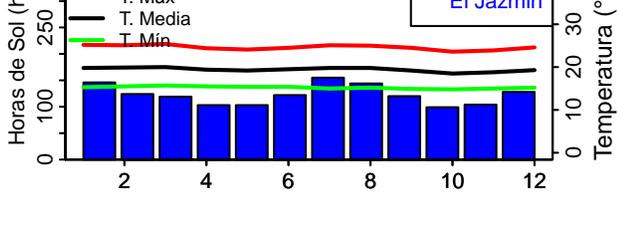
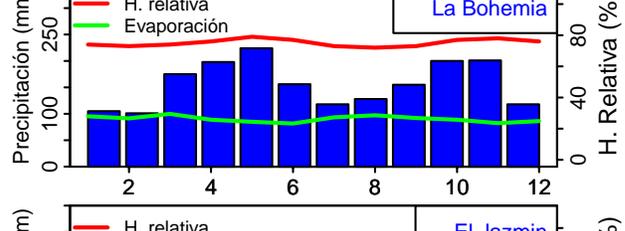
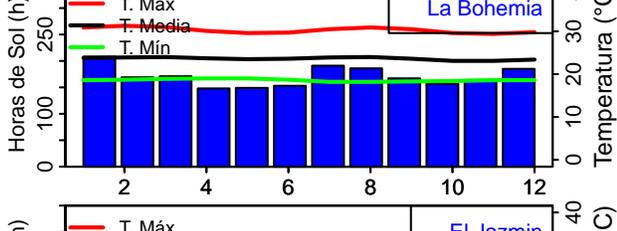
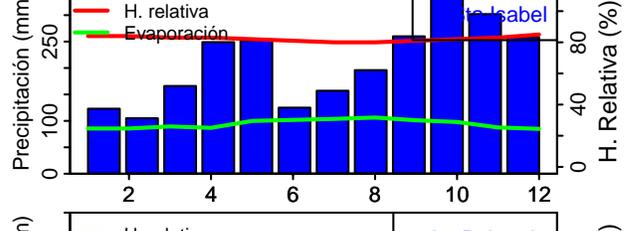
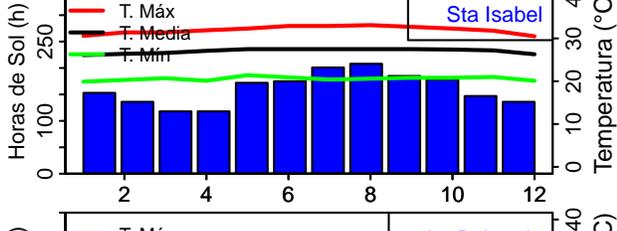
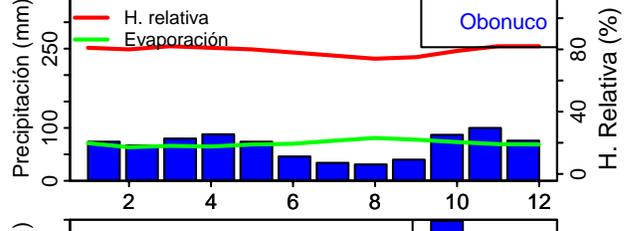
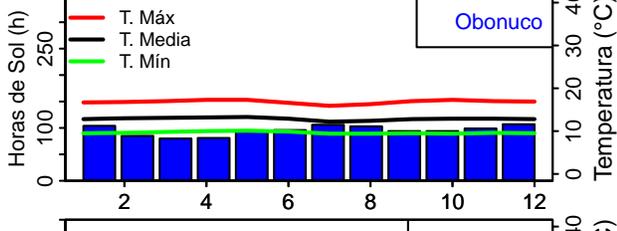
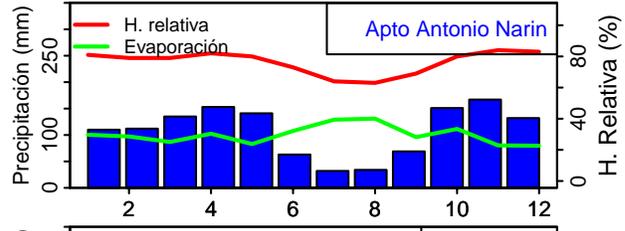
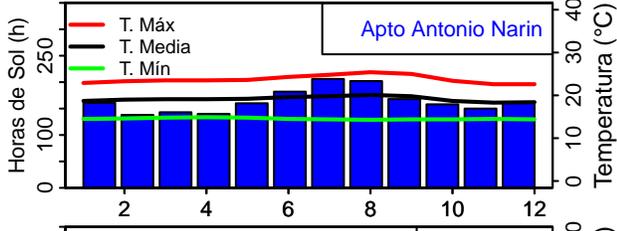
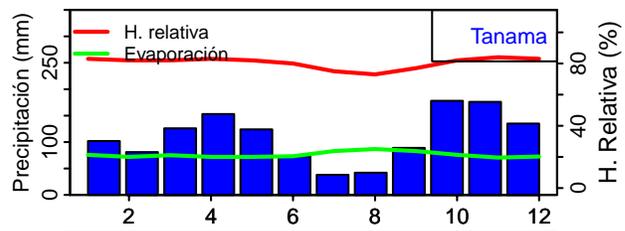
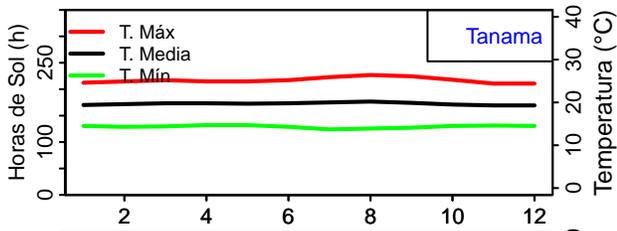


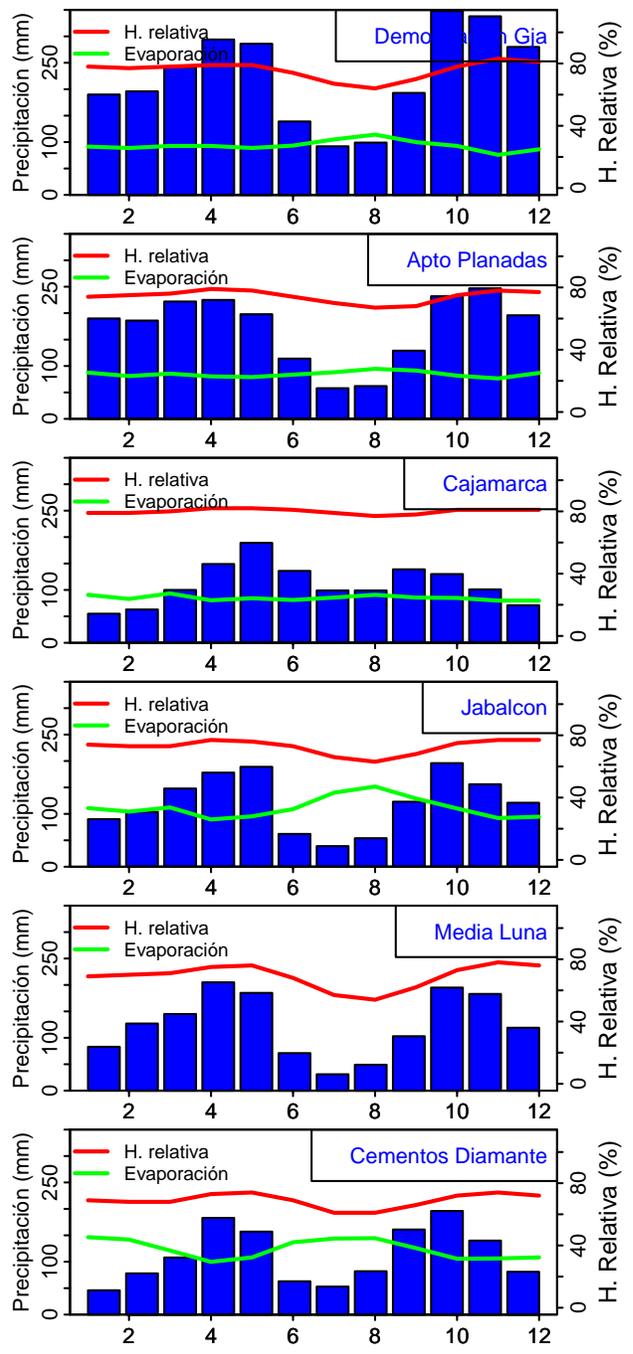
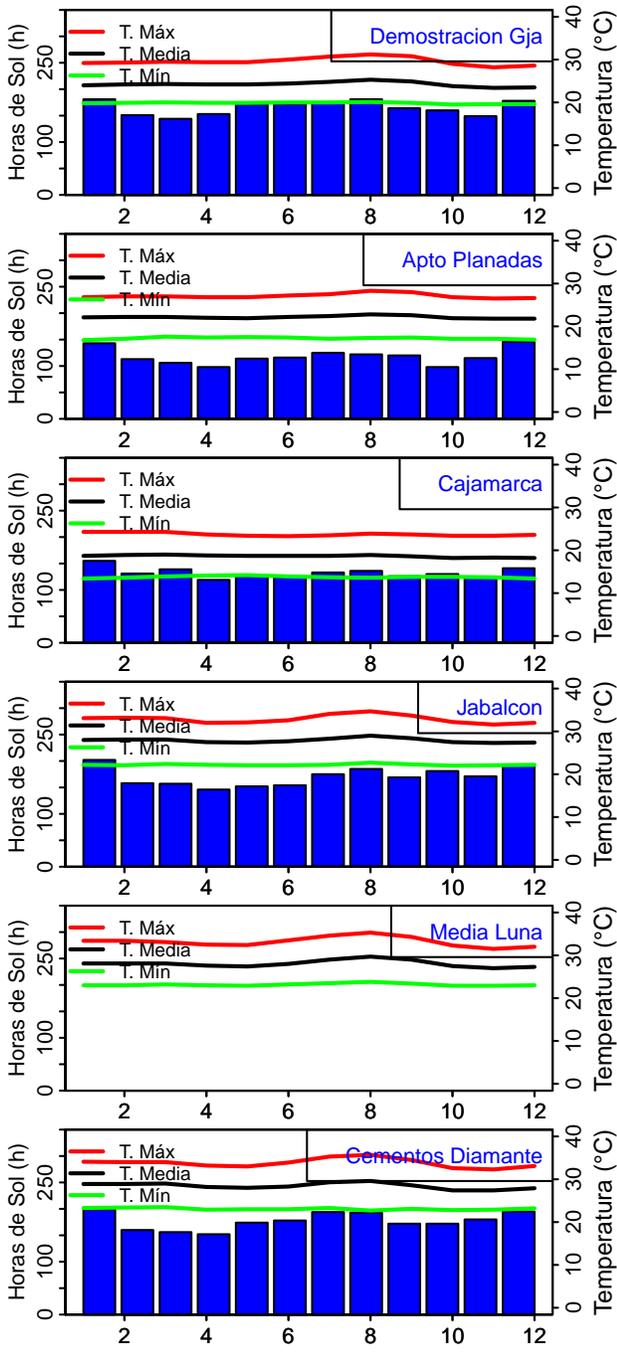


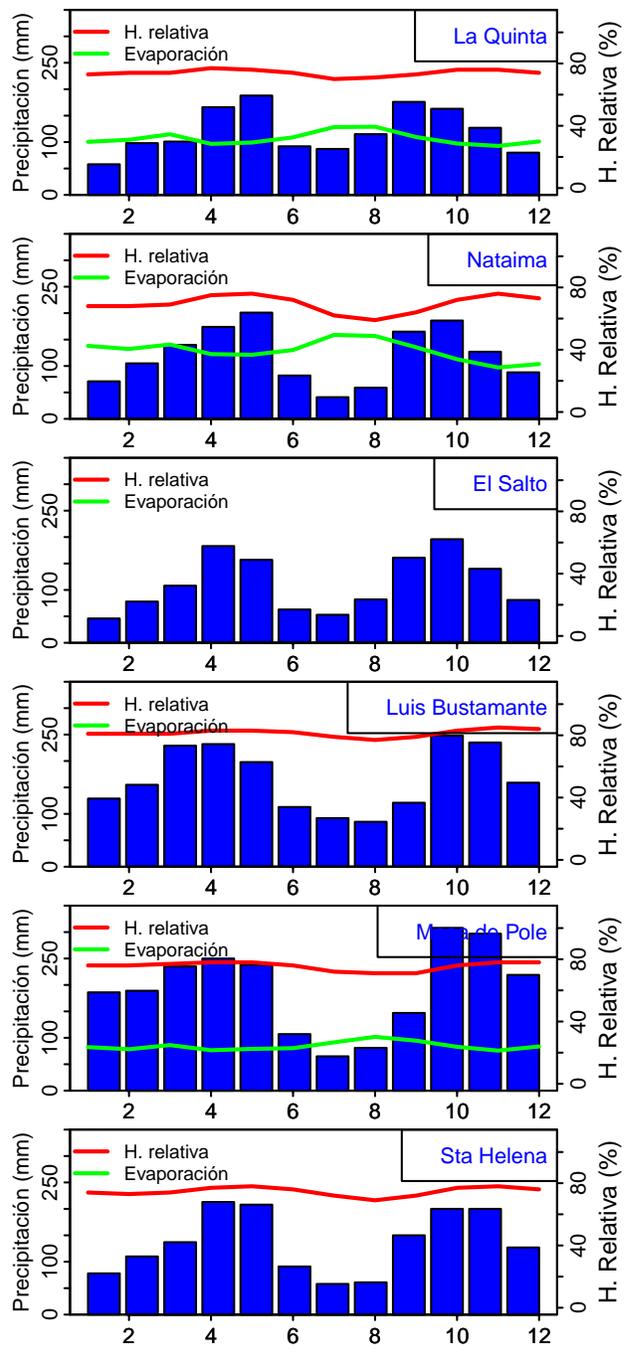
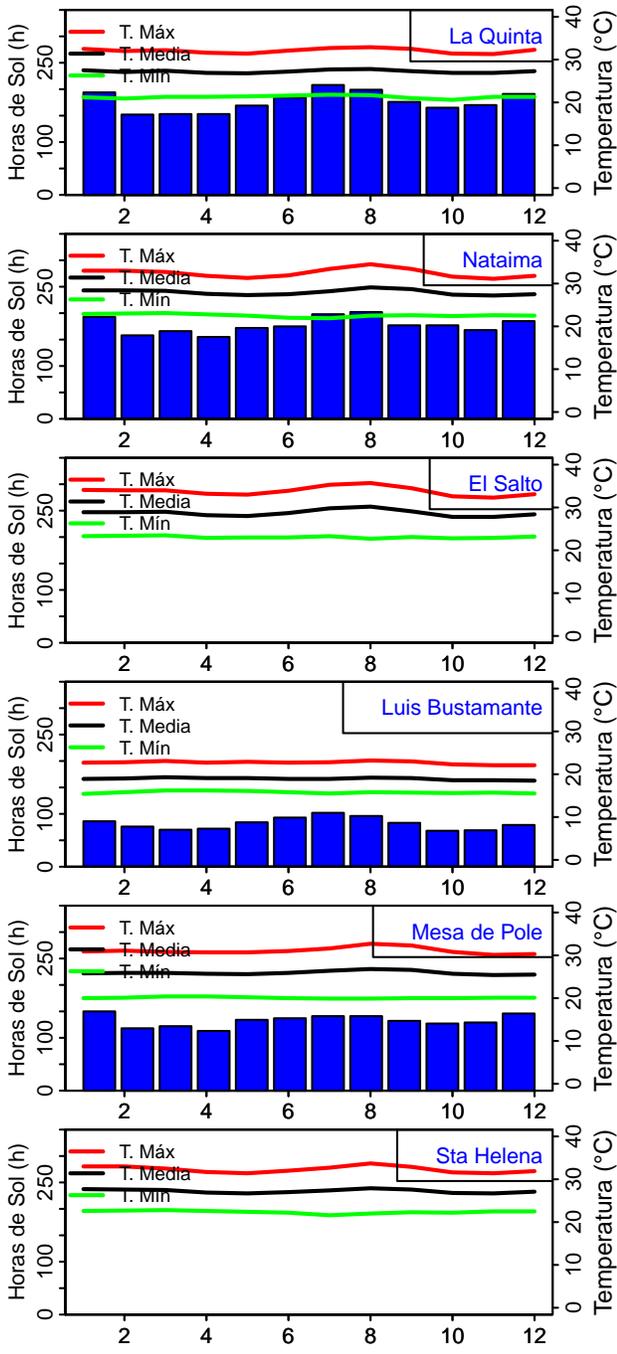


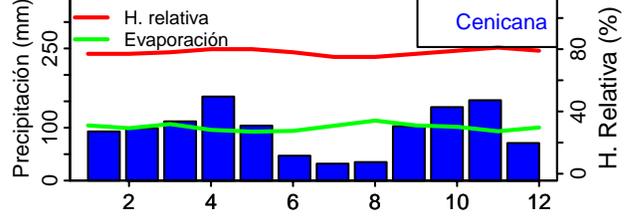
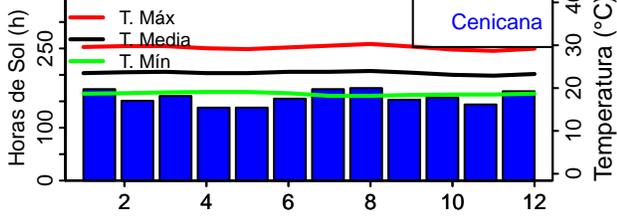
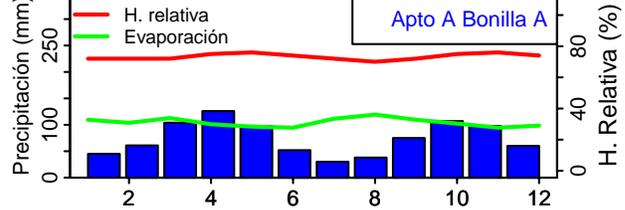
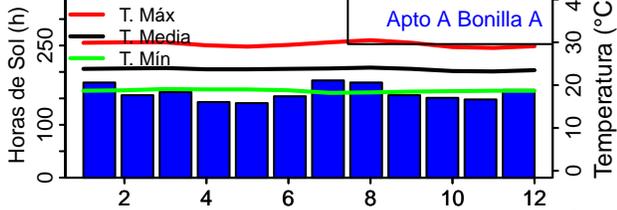
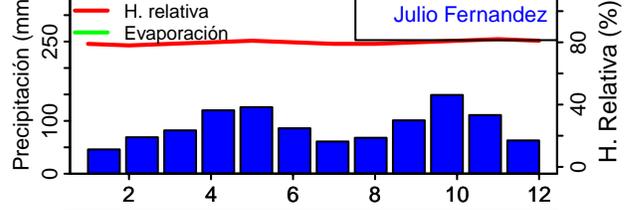
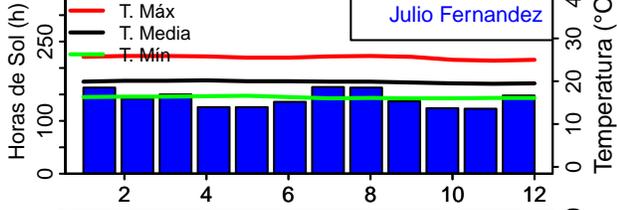
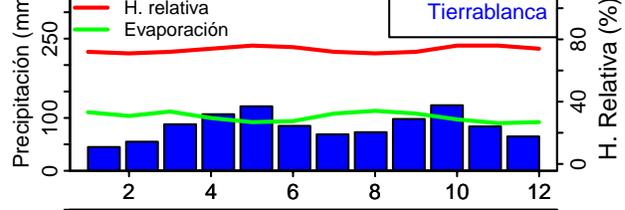
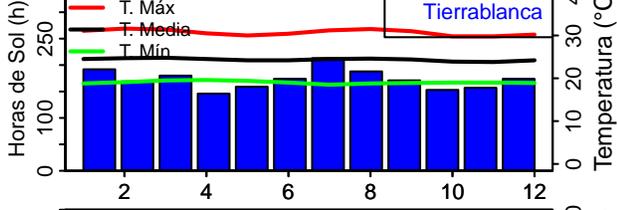
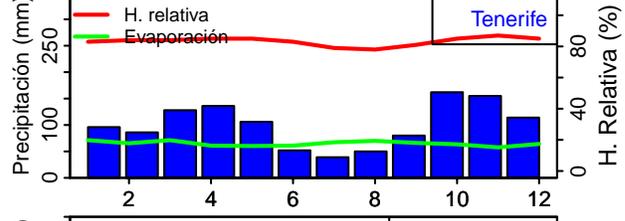
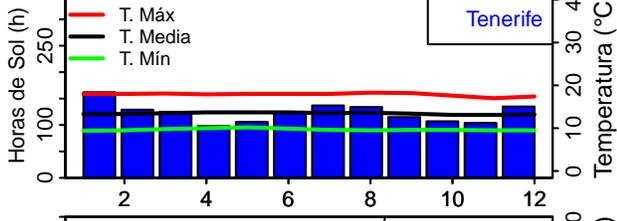
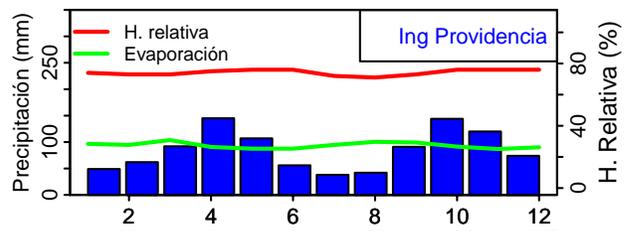
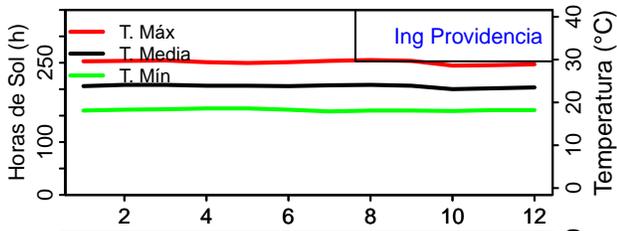


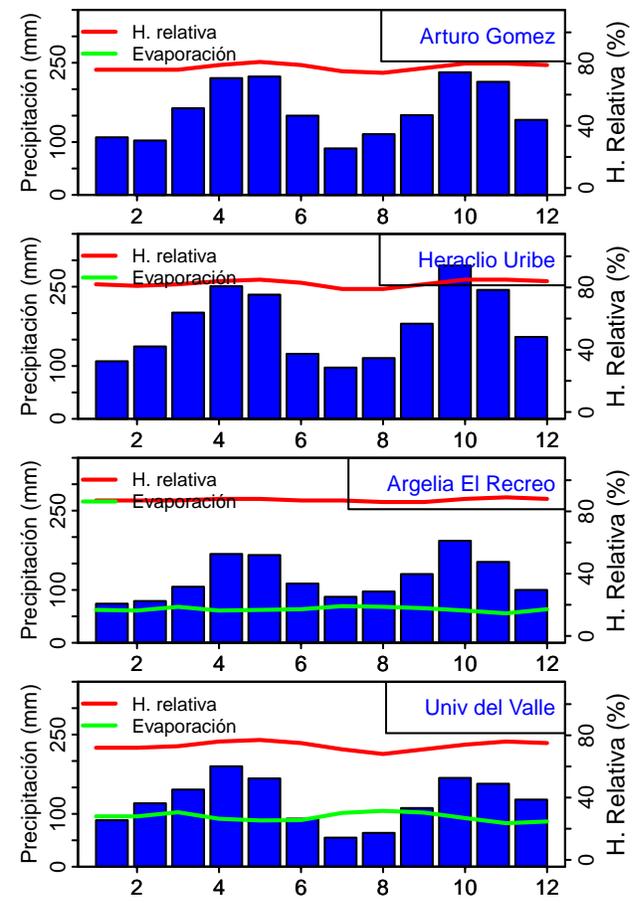
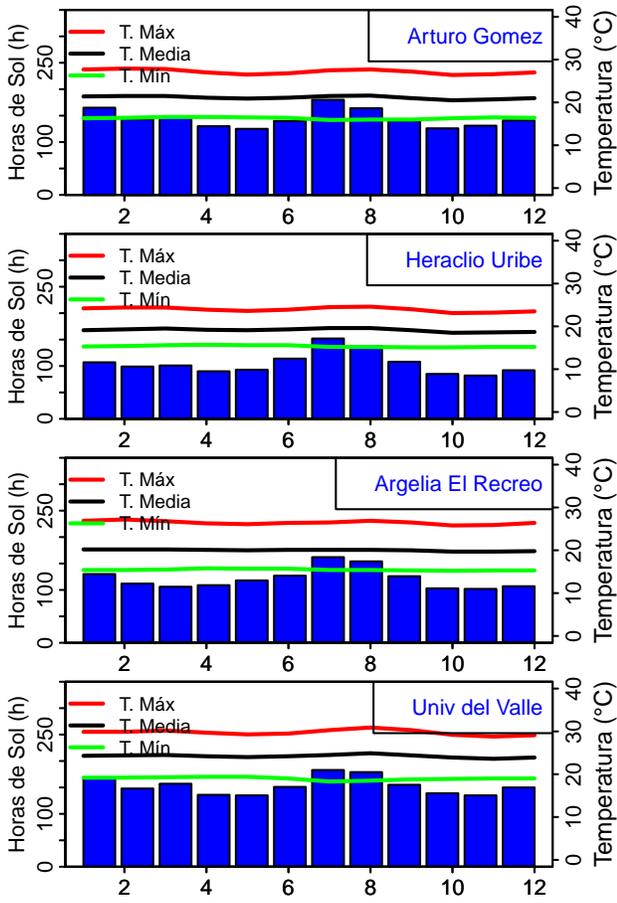




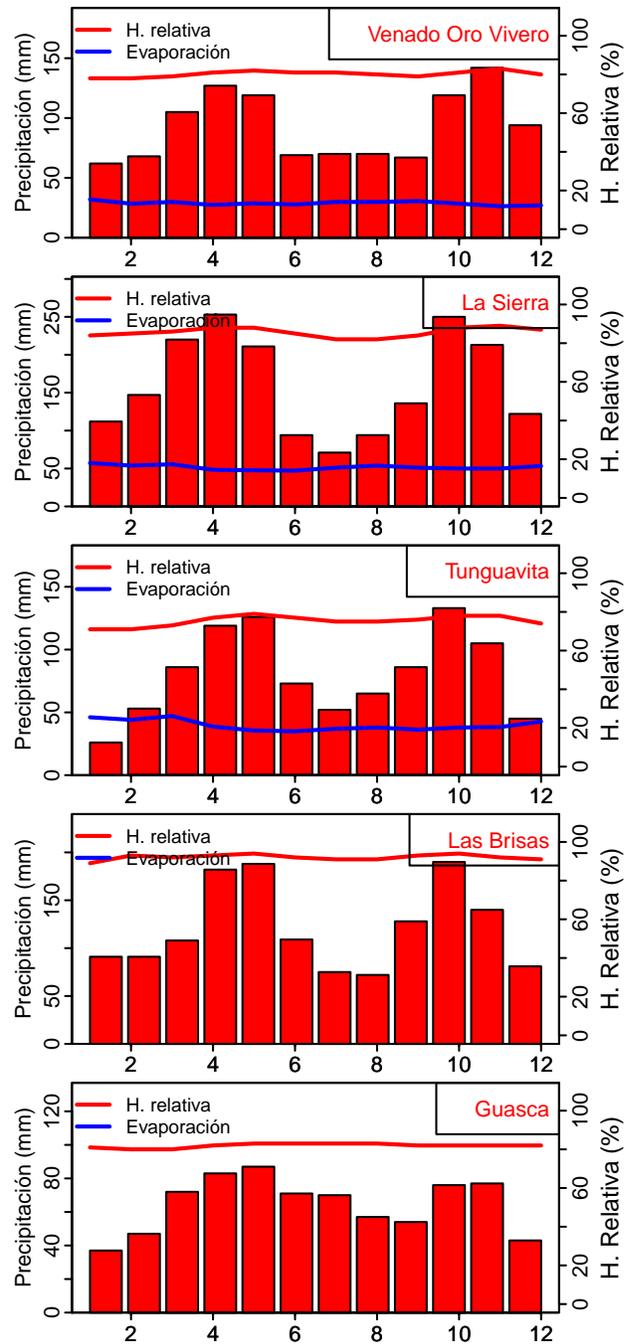
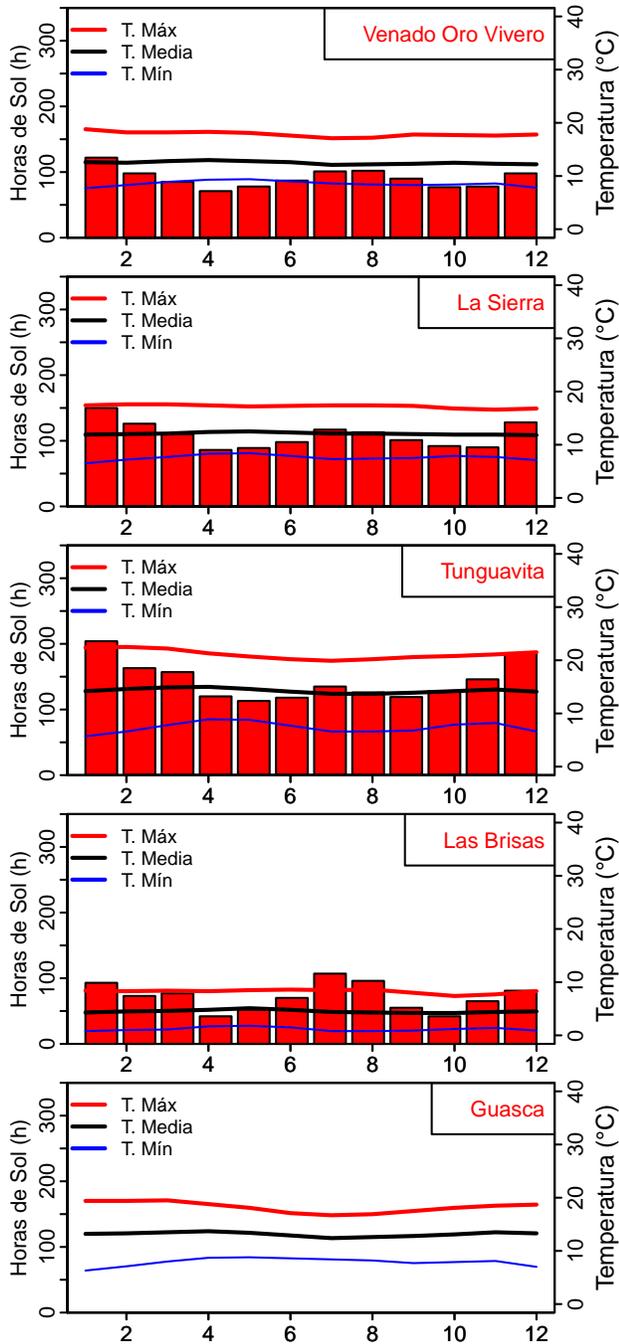


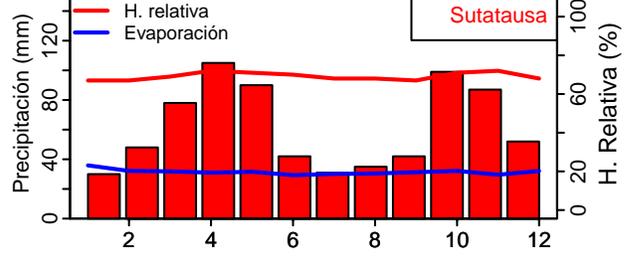
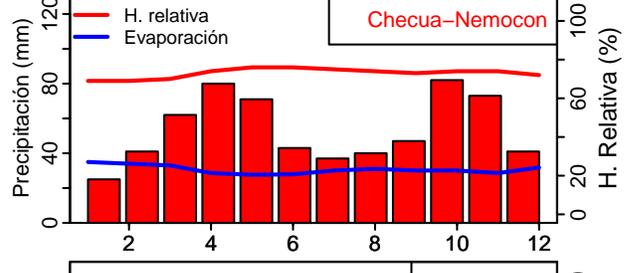
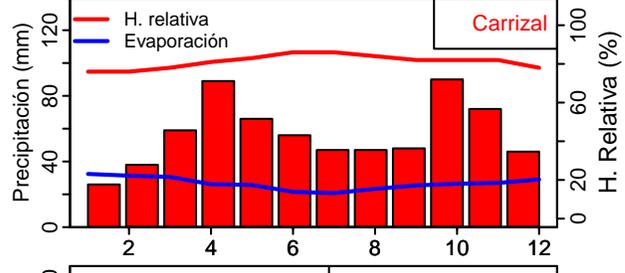
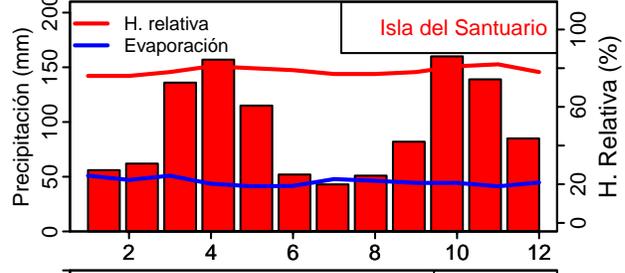
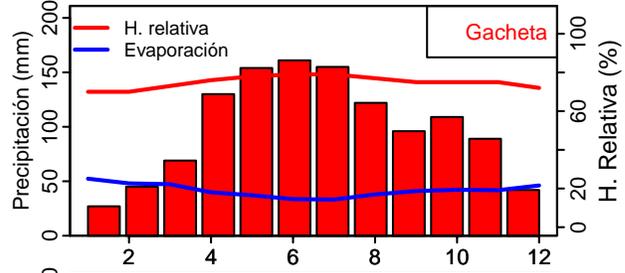
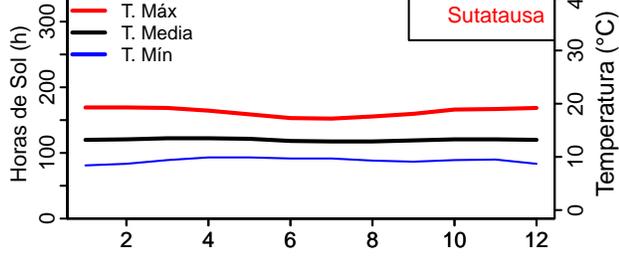
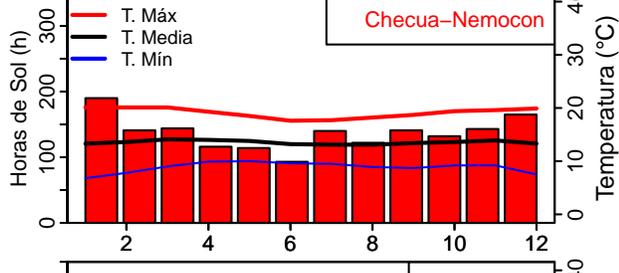
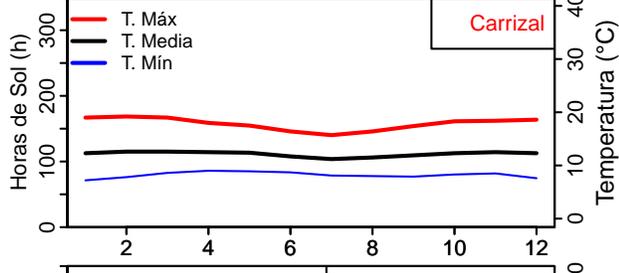
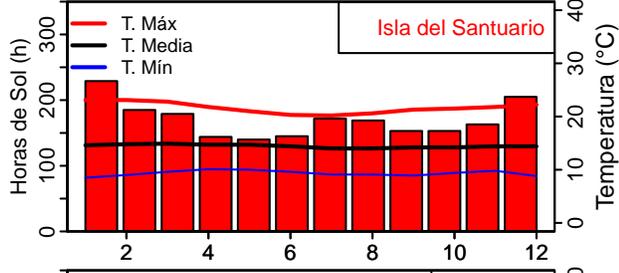
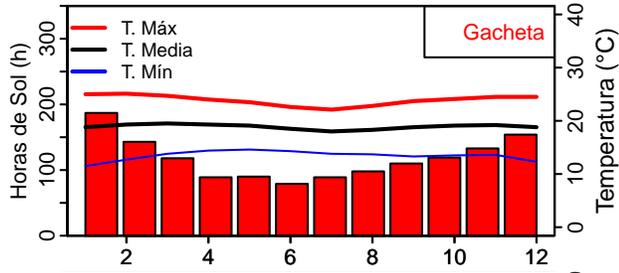


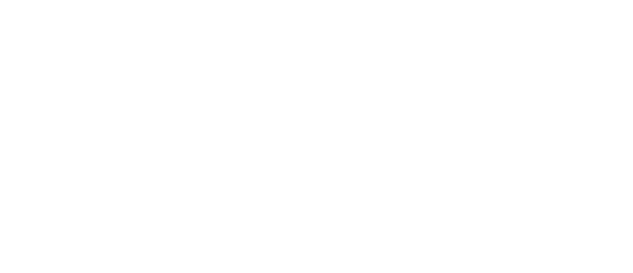
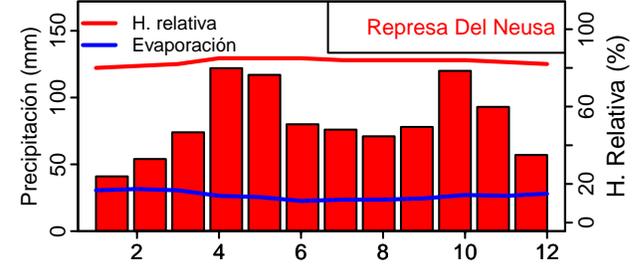
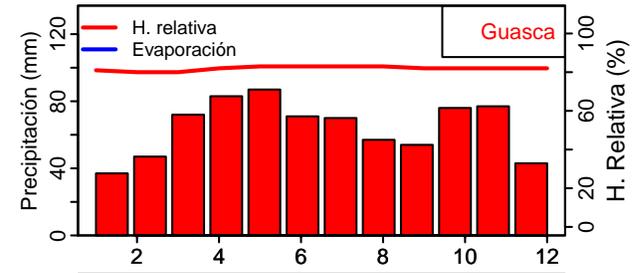
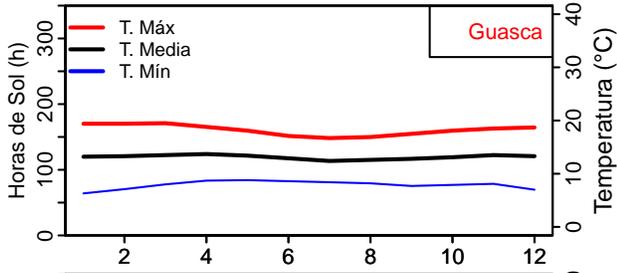
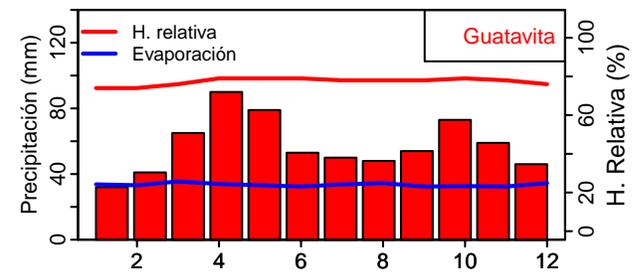
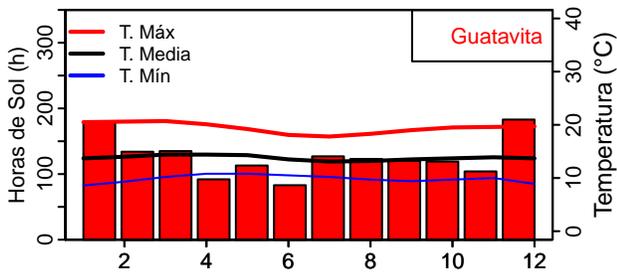




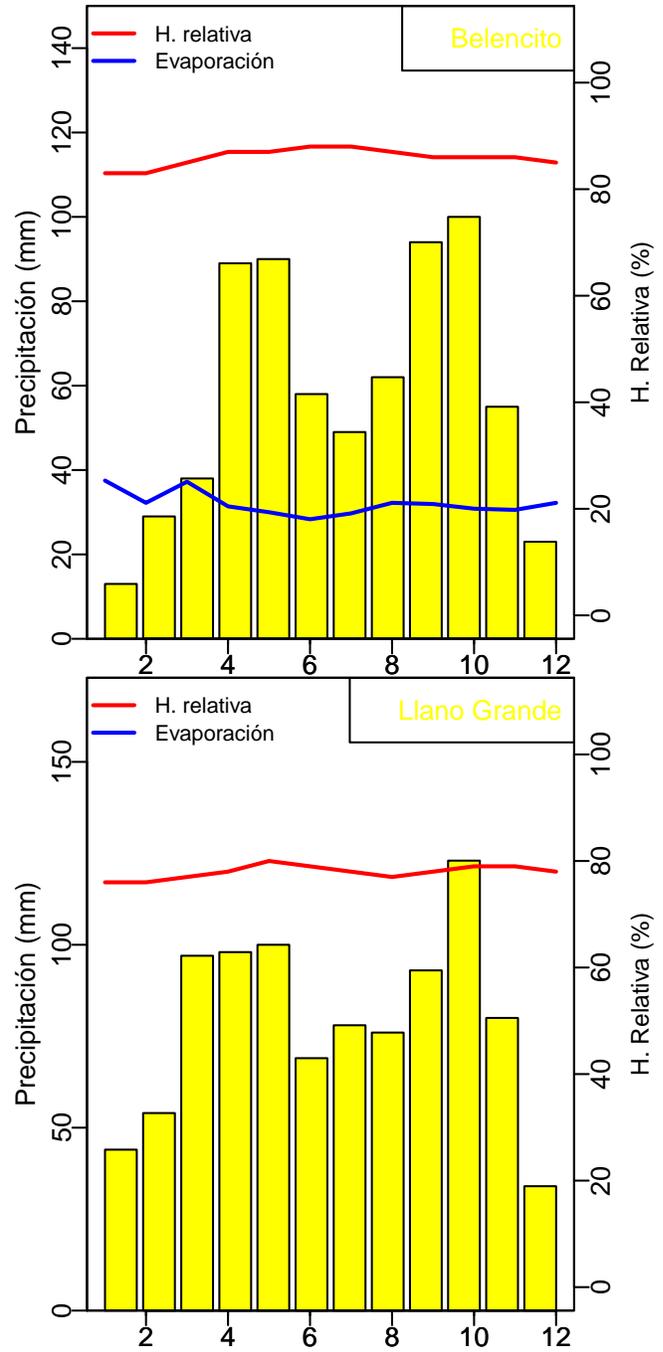
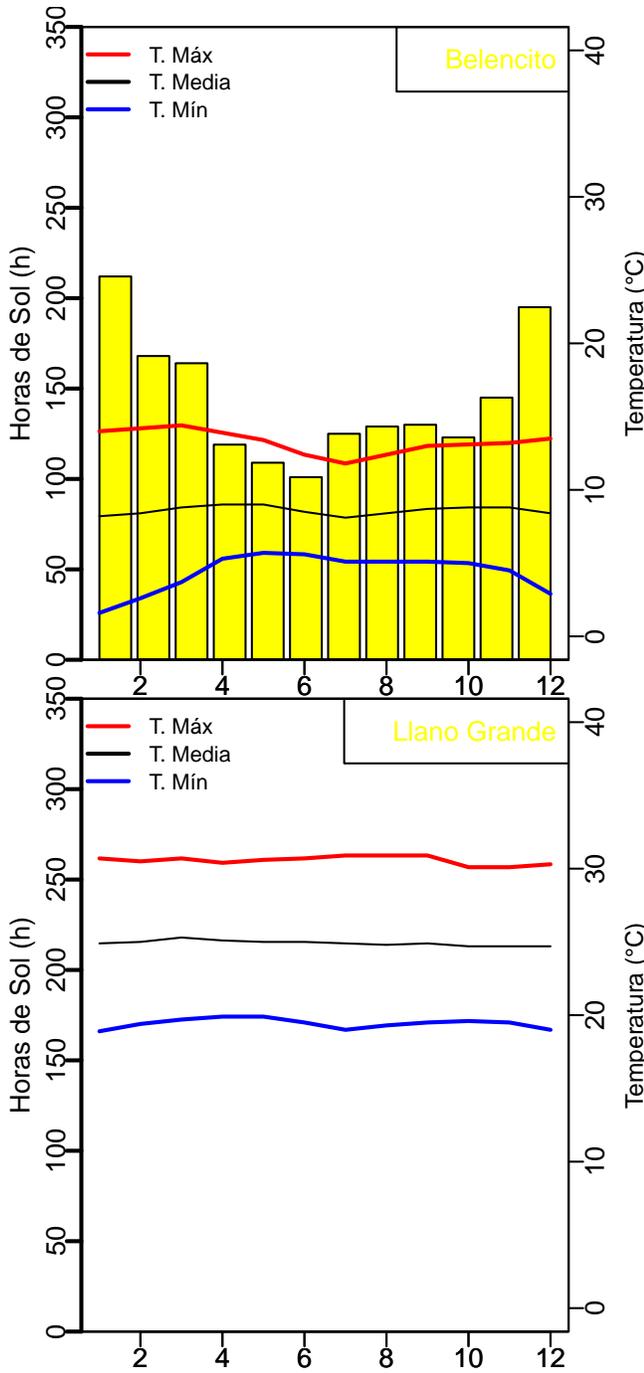
B.2. Estaciones de la región noroccidental



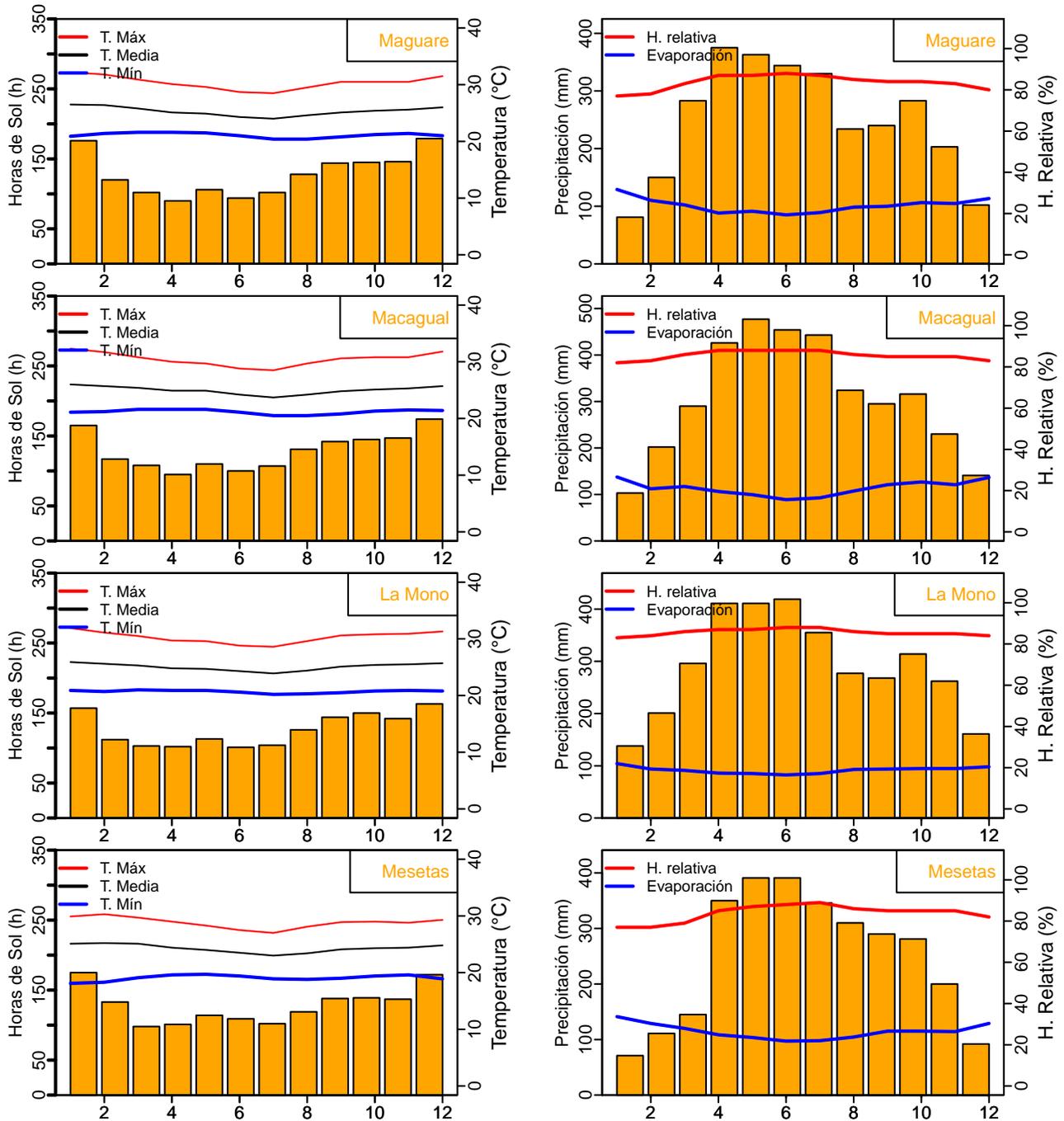


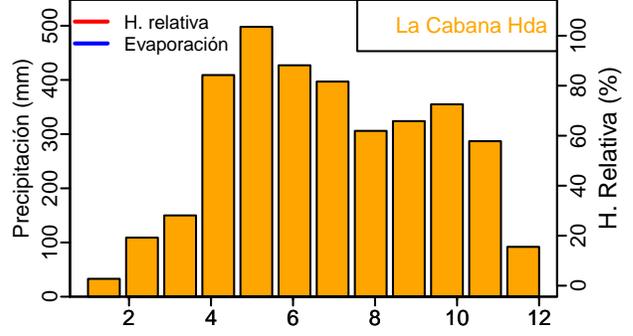
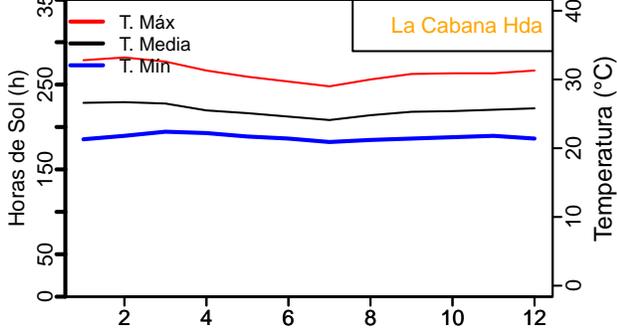
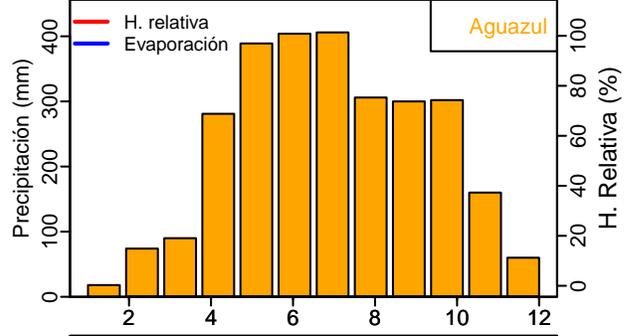
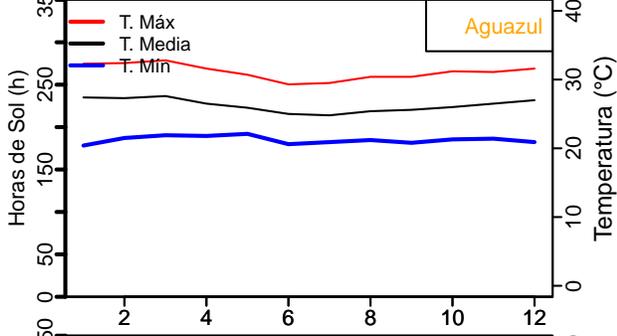
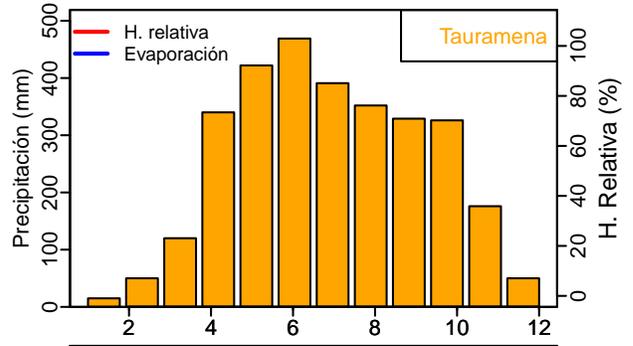
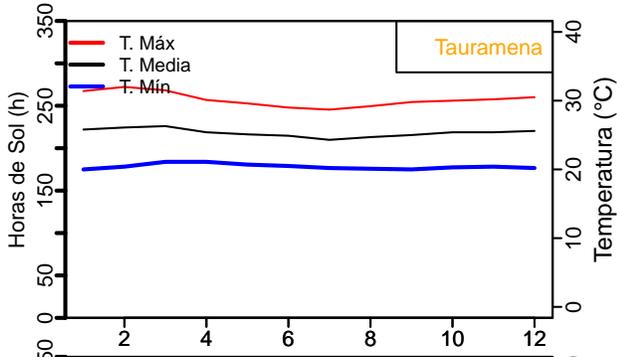


B.3. Estaciones de la región santanderes



B.4. Estaciones de la región suroriental





Bibliografía

- Acuña, J. F. (2009a). *Control climático en invernaderos*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Acuña, J. F. (2009b). *Grupo de Investigación en tecnología de invernaderos y agroplasticultura: Experiencias*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Ahmadi, G. y Glockner, P. (1982). Dynamic simulation of the performance of an inflatable greenhouse in the southern part of Alberta. I. Analysis and average winter conditions. *Agricultural Meteorology*, 27(3-4):155–180.
- Alkilani, M., Sopian, K., Alghoul, M., Sohif, M., y Ruslan, M. (2011). Review of solar air collectors with thermal storage units. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15:1474 –1490.
- Ammerlaan, J., Ruijs, M., van Uffelen, R., van der Maas, A., Jonkman, B., y Ogier, J. (2000). Glasshouse of the future. *Acta Horti*, 536:215–222.
- Arango, C., Dorado, J., D., G., y Ruíz, J. F. (2012). Variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada al ciclo el niño, la niña oscilación sur. Nota técnica, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Subdirección de Meteorología, Bogotá-Colombia.
- Armenta, G. E., Dorado, J., Rodríguez, A., y Ruiz, J. F. (2014). Escenarios de cambio climático para precipitación y temperaturas en Colombia. Nota técnica, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Subdirección de Meteorología, Bogotá-Colombia.
- Armenta, G. E. y Ruiz, J. F. (2012). Indicadores de eventos extremos en los escenarios de cambio climático para el periodo 2011-2040. Nota técnica, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Subdirección de Meteorología, Bogotá-Colombia.

- Baeza, E. J., Stanghellini, C., y Castilla, N. (2013). Protected cultivation in europe. *Acta Horticulturae*, 987:11–28.
- Baille, A., López, J., Bonachela, S., González-Real, M., y Montero, J. (2006). Night energy balance in a heated low-cost plastic greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137(1-2):107–118.
- Baldwin, M. P., Gray, L., Dunkerton, T., Hamilton, K., Haynes, P., Randel, W., Holton, J., Alexander, M., Hirota, I., Horinouchi, T., Jones, D., Kinnersley, J., Marquardt, C., Sato, K., y Takahashi, M. (2001). The quasi-biennial oscillation. *Reviews of Geophysics*, 39(2):179–229.
- Basha, G., Kishore, P., Venkat Ratnam, M., Ouarda, T., Velicogna, I., y Sutterley, T. (2015). Vertical and latitudinal variation of the intertropical convergence zone derived using gps radio occultation measurements. *Remote Sensing of Environment*, 163:262–269.
- Bojaca, C., Gil, R., y Cooman, A. (2009). Use of geostatistical and crop growth modelling to assess the variability of greenhouse tomato yield caused by spatial temperature variations. *computers and electronics in agriculture*, 65:219–227.
- Bojaca, C. y Schrevens, E. (2010). Energy assessment of peri-urban horticulture and its uncertainty: Case study for bogota, colombia. *Energy*, 35:2109–2118.
- Bojaca, C., Wyckhuys, k., Gil, R., Jimenez, J., y Schrvens, E. (2010). Sustainability aspects of vegetable production in the peri-urban environment of bogotá, colombia. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2010:487–498.
- Bonachela, S., Granados, M. R., López, J., Hernández, J., Magn, J., Baeza, E., y Baille, A. (2012). How plastic mulches affect the thermal and radiative microclimate in an unheated low cost greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152:65–72.
- Boshell, F. (2009). *Manejo del riesgo climático en la floricultura colombiana*. Centro de Innovación de la floricultura Colombiana, CENIFLORES, Bogotá.

- Bot, G. P. A. (1983). *Greenhouse Climate from Physical Processes to a Dynamic Model*. Tesis de doctorado, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands.
- Bot, G. P. A. (2001). Developments in indoor sustainable plant production with emphasis on energy saving. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30(1-3):151 – 165.
- Boulard, T. y Baille, A. (1995). Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61(1):37 – 47.
- Boulard, T., Draoui, B., y Neirac, F. (1996). Calibration and validation of a greenhouse climate control model. En *Acta Horticulturae*, volumen 406, pp. 49–61.
- Calderón, S., Alvarez, A., Loboguerrero, A., Arango, S., Calvin, K., Kober, T., Daenzer, K., y Fisher-Vanden, K. (2015). Achieving co2 reductions in colombia: Effects of carbon taxes and abatement targets. *Energy Economics*.
- Carmona, A. y Poveda, G. (2012). Aplicacion de la trasformada de hilbert-huang en la detección de modos de variabilidad hidroclimática en colombia. *Dyna*, 175:72–80.
- Carmona, A. M. y Poveda, G. (2014). Detection of long-term trends in monthly hydro-climatic series of colombia through empirical mode decomposition. *Climatic Change*, 123(2):301–313.
- Casas, A. (2005). Regionalización del territorio colombiano de acuerdo a la precipitación. Nota técnica, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Subdirección de Meteorología.
- Chau, J., Sowlati, T., Sokhansanj, S., Preto, F., Melin, S., y B, X. (2009). Techno-economic analysis of wood biomass boilers for the greenhouse industry. *Applied Energy*, 86(3):364 – 371.
- CMNUCC (1992). Convención marco para el cambio climático. Nota técnica, Organización de las Naciones Unidas.

- Cooman, A., Bojacá, C., y Schrevens, E. (2006). Technical and economical evaluation of low temperature tomato cropping in the tropics. *Acta Hortic*, 719:543–550.
- Córdoba-Machado, S., Palomino-Lemus, R., Gámiz-Fortis, S., Castro-Díez, Y., y Esteban-Parra, M. (2015a). Assessing the impact of el niño modoki on seasonal precipitation in colombia. *Global and Planetary Change*, 124:41–61.
- Córdoba-Machado, S., Palomino-Lemus, R., Gámiz-Fortis, S., Castro-Díez, Y., y Esteban-Parra, M. (2015b). Influence of tropical pacific sst on seasonal precipitation in colombia: prediction using el niño and el niño modoki. *Climate Dynamics*, 44(5-6):1293–1310.
- Cordovez, J., Rendon, L., Gonzalez, C., y Guhl, F. (2013). Using the basic reproduction number to assess the effects of climate change in the risk of chagas disease transmission in colombia. *Acta Tropica*, 129(1):74–82.
- Davis, J., O’Grady, A. P., Dale, A., Arthington, A., Gell, P., Driver, P., Bond, N., Casanova, M., Finlayson, M. R., Watts, S., Capon, J., Nagelkerken, I., Tingley, R., Fry, B., Page, T., y Specht, A. (2015). When trends intersect: The challenge of protecting freshwater ecosystems under multiple land use and hydrological intensification scenarios. *Science of The Total Environment*, 534:65 – 78.
- de Zwart, H. F. (1996). *Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model*. Tesis de doctorado, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands.
- Díaz, D. C. y Villegas, N. (2015). Correlación canónica entre índices macroclimáticos y variables meteorológicas de superficie en colombia. *Actualidad y Divulgación Científica (in press)*.
- Duque-Méndez, N. D., Orozco-Alzate, M., y Vélez, J. J. (2014). Análisis de datos hidroclimatológicos usando técnicas OLAP. *DYNA (Colombia)*, 81(185):160–167.
- Eitzinger, A., Laderach, P., Bunn, C., Quiroga, A., Benedikter, A., Pantoja, A., Gordon, J., y Bruni, M. (2014). Implications of a changing climate on food security and smallholders’ livelihoods in bogotá, colombia. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19(2):161–176.

- Espinoza, J., Ronchail, J., Guyot, J., Cochonneau, G., N. F., W., L., De Olivera, E., Pombosa, R., y Vauchel, P. (2009). Spatio-temporal rainfall variability in the amazon basin countries (brazil, peru, bolivia, colombia, and ecuador). *J. Climatol*, 29:1574–1574.
- FAO (2008). Climate change and disaster risk management, technical background document from the expert consultation. Nota técnica, Food and Agriculture Organization.
- Fatnassi, H., Boulard, T., y Bouirden, L. (2013). Development, validation and use of a dynamic model for simulate the climate conditions in a large scale greenhouse equipped with insect-proof nets. *Computers and Electronics in Agriculture*, 98:54–61.
- Fernández, B. R., Castillo, B., Díaz, E., y Camacho, J. H. (2011). Evaluating electrolysed oxidising water as a fungicide using two rose varieties (*Rosa* sp) in greenhouse conditions. *Ingeniería e Investigación*, 31(2):91–101.
- Fernandez, M. (2013). Efectos del cambio climático en el rendimiento de tres cultivos mediante el uso del modelo aquacrop. Nota técnica, Fondo financiero de proyectos de desarrollo (FONADE), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Subdirección de Meteorología y Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Bogotá-Colombia.
- Fitz-Rodríguez, E., Kubotab, C., Giacomellia, G. A., Tignor, M. E., Wilson, S., y McMahon, M. (2010). Dynamic modeling and simulation of greenhouse environments under several scenarios: A web-based application. *Computers and Electronics in Agriculture*, 70:105–116.
- Flores-Velazquez, J., Montero, J. I., Baeza, E. J., y Lopez, J. C. (2014). Mechanical and natural ventilation systems in a greenhouse designed using computational fluid dynamics. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 7(1):1–16.
- García, J., Riano, N. H., y Magnitskiy, S. (2014). Simulation of corn (*zea mays* l.) production in different agricultural zones of colombia using the aquacrop model. *Agronomia Colombiana*, 32(3):358–366.

- Giacomelli, G., Castilla, N., van Henten, E., Mears, D., y Sase, S. (2008). Innovations in greenhouse engineering. *ISHS Acta Horticulturae*, 801:75–88.
- Gil, R., Bojacá, C., y Schrevens, E. (2015). Environmental savings in tomato production under optimal agrochemicals management: a modeling approach. *Acta Horti (in press)*.
- González, C., Paz, A., y Ferro, C. (2013). Predicted altitudinal shifts and reduced spatial distribution of leishmania infantum vector species under climate change scenarios in colombia. *Acta Tropica*, 129(1):83–90.
- Gruber, J., Guzmán, J., Rodríguez, F., Bordons, C., Berenguel, M., y Sánchez, J. (2011). Nonlinear MPC based on a Volterra series model for greenhouse temperature control using natural ventilation. *Control Engineering Practice*, 19(4):354–366.
- Guzmán, D., Ruíz, J. F., y M., C. (2014). Regionalización de colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través del análisis de componentes principales. Nota técnica, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Subdirección de Meteorología, Bogotá-Colombia.
- Hansen, J. (2002). Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: issues, approaches, challenges. *Agricultural Systems*, 74:309–330.
- Henríquez, M. (2012). *Climatología ambiental de Colombia*. U. Santo Tomás, Bogotá-Colombia.
- Hoyos, N., Escobar, J., Restrepo, J., Arango, A., y Ortiz, A. (2013). Impact of the 2010 e 2011 la niña phenomenon in colombia, southamerica: The human toll of an extreme weather event. *Applied Geography*, 39:16–25.
- Hurtado, A. F. (2009). Estimación de los campos mensuales históricos de precipitación en el territorio colombiano. Tesis de máster, Universidad Nacional de Colombia.
- Impron, I., Hemming, S., y Bot, G. (2007). Simple greenhouse climate model as a design tool for greenhouses in tropical lowland. *Biosystems Engineering*, 98(1):79–89.

- IPCC (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, New York.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, New York.
- J., Y., Greenwood, D., Rowell, D., Wadsworth, G., y Burns, I. (2000). Statistical methods for evaluating a crop nitrogen simulation model. *Agricultural Systems*, 64(1):37 – 53.
- Kittas, C., Boulard, T., y Papadakis, G. (1997). Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings : Sensitivity to temperature and wind effects. *Transactions of the ASAE*, 40(2):415–425.
- Kumar, K., Jha, M., Tiwari, K., y Singh, A. (2010). Modeling and evaluation of greenhouse for floriculture in subtropics. *Energy and Buildings*, 20:1075–1083.
- Lansink, A. y Bezlepkin, I. (2003). The effect of heating technologies on {CO₂} and energy efficiency of dutch greenhouse firms. *Journal of Environmental Management*, 68(1):73 – 82.
- Leal, J. y Pissani, J. (2010). Modelado del clima para un invernadero en marcín, nuevo lecón, mcéxico. *Redalyc*, 13.
- León, G., Z. J. y Eslava, J. A. (2000). Sistemas sinópticos de la amazonía y del pacífico. *Meteorología Colombiana*, 2(1):39–42.
- Leuprecht, A. y Gobiet, A. (2010). Classification of precipitation regions in the alpine area using cluster analysis. Nota técnica, Wegener Center for Climate and Global Change, University of Graz.
- Lindner, J. (2012). *Lessons from Hurricane Ike, A brief introduction to the meteorology of tropical cyclones*. Texas A and M University Press.
- Mayer, D. G. y Butler, D. G. (1993). Theoretical modelling aspects statistical validation. *Ecological Modelling*, 68(1):21 – 32.

- Mayorga, R., Hurtado, G., y Benavides, H. (2011). Evidencias de cambio climático en Colombia con base en información estadística. Nota técnica, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Subdirección de Meteorología, Bogotá-Colombia.
- Mejía, J. y Poveda, G. (2005). Ambientes atmosféricos de sistemas convectivos de mesoescala sobre Colombia durante 1998 según la misión trmm y el reanálisis ncep-ncar. *Acad. Colomb. Cienc.*, 29:495–514.
- Montealegre, E. (2009). Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala. Nota técnica, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Subdirección de Meteorología, Bogotá-Colombia.
- Montero, J. I., Muñoz, P., Sánchez-Guerrero, M. C., Medrano, E., Piscia, D., y Lorenzo, P. (2013). Shading screens for the improvement of the night time climate of unheated greenhouses. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11:32.
- Nimmermark, S. A. y Maslak, K. (2015). Measured energy use in a greenhouse with tomatoes compared to predicted use by a mechanistic model including transpiration. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2015:65–70.
- Ntinias, G.K. and Fragos, V. N.-M. C. (2014). Thermal analysis of a hybrid solar energy saving system inside a greenhouse. *Energy Conversion and Management*, 81:428–439.
- OMM (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. World Meteorological Organization, Geneva.
- OMM (2011). *Guide to Climatological Practices*. World Meteorological Organization, Geneva.
- OMM (2013). *The Global Climate 2001-2010, A Decade of Climate Extremes*. World Meteorological Organization, Geneva.
- Orlanski, I. (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of American Meteorological Society*, 53:527–530.

- Ortiz Royero, J. (2012). Exposure of the colombian caribbean coast, including san andrés island, to tropical storms and hurricanes, 1900 to 2010. *Natural Hazards*, 61(2):815–827.
- Ortiz-Royero, J., Otero, L., Restrepo, J., Ruiz, J., y Cadena, M. (2013). Cold fronts in the colombian caribbean sea and their relationship to extreme wave events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11):2797–2804.
- Osorio, A., Ortega, S., y Arango-Aramburo, S. (2016). Assessment of the marine power potential in colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53:966–977.
- Pabón, J. (2012). Cambio climático en colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo xx y escenarios posibles para el siglo xxi. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36(139):261–278.
- Pabón, J. y Correa, R. (2005). Los sistemas meteorológicos de escala sinóptica de la amazonia, sus efectos e impacto socioeconómico en el sur del territorio colombiano. *Cuadernos de Geografía - Revista Colombiana de Geografía*, 14:65–81.
- Paegle, J. y Mo, K. (2002). Linkages between summer rainfall variability over south america and sea surface temperature anomalies. *Journal of Climate*, 15(12):1389–1407.
- Pahuja, R., Verma, H. K., y Uddin, M. (2015). Implementation of greenhouse climate control simulator based on dynamic model and vapor pressure deficit controller. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*.
- Palomino-Lemus, R., Córdoba-Machado, S., Gámiz-Fortis, S., Castro-Díez, Y., y Esteban-Parra, M. (2015). Summer precipitation projections over northwestern south america from cmip5 models. *Global and Planetary Change*, 131:11–23.
- Panwar, N., Kaushik, S., y Kothari, S. (2011). Solar greenhouse an option for renewable and sustainable farming. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15:3934–3945.
- Parra-Coronado, A., Fischer, G., y Camacho-Tamayo, J. H. (2015). Development and quality of pineapple guava fruit in two locations with different altitudes in Cundinamarca, Colombia. *Bragantia*, 74(3):359–366.

- Perez-Parra, J., Baeza, E., Montero, J. I., y B.J., B. (2004). Natural ventilation of parral greenhouses. *Biosystems engineering*, 87(3):355 – 366.
- Piscia, D., Muñoz, P., Panadès, C., y Montero, J. (2015). A method of coupling CFD and energy balance simulations to study humidity control in unheated greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115:129–141.
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Acad. Colomb. Cienc.*, 28:201–222.
- Poveda, G., Álvarez, D., y Rueda, O. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their impact on one of the earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, 36(11-12):2233–2249.
- Poveda, G., Gil, M., y Quiceno, N. (1998). El ciclo anual de la hidrología de Colombia en relación con el ENSO y la NAO. *Bull. Inst.fr. études andines*, 27(3):721–731.
- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M., Quiceno, N., y Mantilla, R. (2001). Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *Water Resources Research*, 37(8):2169–2178.
- Poveda, G. y Mesa, O. (1997). Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena. *Journal of Climate*, 10(10):2690–2702.
- Poveda, G. y Mesa, O. (1999). La corriente de chorro superficial del oeste ('del Choco') y otras dos corrientes de chorro en Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. *Acad. Colomb. Cienc.*, 23:517–528.
- Poveda, G., Mesa, O., Carvajal, L. and Hoyos, C. M.-J. C. A., y A., P. (2002a). Predicción de caudales medios mensuales en ríos colombianos usando métodos no lineales. *Meteorología Colombiana*, 6:101–110.
- Poveda, G. y Mesa, O. J. (2000). On the existence of Lloró (the rainiest locality on earth): Enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low-level jet. *Geophysical Research Letters*, 27(11):1675–1678.

- Poveda, G. y Pineda, K. (2009). Reassessment of colombia's tropical glaciers retreat rates: are they bound to disappear during the 2010 to 2020 decade? *Adv. Geosci*, 7:1–10.
- Poveda, G., Velez, J., Mesa, O. and Hoyos, C., Mejia, J., Barco, O., y Correa, P. (2002b). Influencia de fenómenos macroclimaticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: Cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorología Colombiana*, 6:121–130.
- Poveda, G., Waylen, P., y Pulwarty, R. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern south america and southern mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(1):3–27.
- Quintero-Herrera, L., Ramírez-Jaramillo, V., Bernal-Gutiérrez, S., Cárdenas-Giraldo, E., Guerrero-Matituy, E., Molina-Delgado, A., Montoya-Arias, C., Rico-Gallego, J., Herrera-Giraldo, A., Botero-Franco, S., y Rodríguez-Morales, A. (2015). Potential impact of climatic variability on the epidemiology of dengue in Risaralda, Colombia, 2010-2011. *Journal of infection and public health*, 8(3):291–7.
- Ramirez-Villegas, J. y Challinor, A. (2012). Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: issues, approaches, challenges. *Agricultural and Forest Meteorology*, 161:26–45.
- Ramirez-Villegas, J., Cuesta, F., Devenish, C., Peralvo, M., Jarvis, A., y Arnillas, C. (2014). Using species distributions models for designing conservation strategies of tropical andean biodiversity under climate change. *Journal for Nature Conservation*, 22(5):391–404.
- Rivington, M., Matthews, K. and Buchan, K., Miller, D. and Bellocchi, G., y Russell, G. (2013). Climate change impacts and adaptation scope for agriculture indicated by agro-meteorological metrics. *Agricultural Systems*, 114:15–31.
- Rodríguez, F., l Berenguel, M., Guzmán, J., y Ramírez-Arias, A. (2014). *Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth*. Springer, New York.
- Ruiz, F. O. y Cotrino, C. E. (2010). Identificación de un modelo del clima en un invernadero mediante métodos por subespacios. *Ingeniería e Investigación*, 30(2):157–167.

- Ruiz, J. F. (2010). Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (panorama 2011-2100). Nota técnica, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Subdirección de Meteorología, Bogotá-Colombia.
- Sakamoto, M., Ambrizzi, T., y Poveda, G. (2011). Moisture sources and life cycle of convective systems over western Colombia. *Advances in Meteorology*, p. 11.
- Sethir, V. (2009). On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation. *Solar Energy*, 83:21–38.
- Sharma, P., Tiwari, G., y Sorayan, V. (1999). Temperature distribution in different zones of the micro-climate of a greenhouse: a dynamic model. *Energy Conversion and Management*, 40(3):335–348.
- Soetaert, K., Petzoldt, T., y Setzer, R. W. (2010). Solving differential equations in R: Package desolve. *Journal of Statistical Software*, 33(9):1–25.
- Stanghellini, C. (1987). *Transpiration of greenhouse crops, an aid to climate management*. Tesis de doctorado, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands.
- Steinhoff, D., Monaghan, A., y Clark, M. (2015). Projected impact of twenty-first century ENSO changes on rainfall over central America and northwest South America from CMIP5 AOGCMs. *Climate Dynamics*, 44(5-6):1329–1349.
- Stevens, K. y Ruscher, P. (2014). Large scale climate oscillations and mesoscale surface meteorological variability in the Appalachian-Chattahoochee-Flint River basin. *Journal of Hydrology*, 517:700–714.
- Su, Y. y Xu, L. (2015). A greenhouse climate model for control design. En *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, pp. 47–53.
- Takakura, T. (1983). *Climate Under Cover*. (Kluwer Academic Publishers, Holland.
- Tavares, C., Gonçalves, A., Castro, P., Loureiro, D., y Joyce, A. (2001). Modelling an agriculture production greenhouse. *Renewable Energy*, 22(1-3):15–20.

- Tedeschi, L. (2006). Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural Systems*, 89(2-3):225 – 247.
- Torres, C. E. (2012). Efecto de las ondas madden-julian en la precipitación sobre algunas regiones del territorio colombiano. Tesis de máster, Universidad Nacional de Colombia.
- Travis, J. y Sumner, D. (2012). Agricultural technologies for climate change in developing countries: Policy options for innovation and technology diffusion. *Food Policy*, 37:114–123.
- Turbay, S., Nates Cruz, B., Jaramillo Vallejo, F. L., Vélez, J. J., y Ocampo, O. L. (2015). Adaptación a la variabilidad climática entre los caficultores de las cuencas de los ríos Porce y Chinchiná, Colombia. *Investigaciones Geográficas*, 85(85):95–112.
- van Beveren, P., Bontsema, J., van Straten, G., y van Henten, E. (2015). Optimal control of greenhouse climate using minimal energy and grower defined bounds. *Applied Energy*, 159:509–519.
- van der Velden, N., Janse, J., Kaarsemaker, R., y Maaswinkel, R. (2004). Sustainability of greenhouse fruit vegetables: Spain versus the netherlands development of a monitoring system. *Acta Horti*, 655:275–281.
- van Henten, E. (1994). *Greenhouse Climate Management: An Optimal Control Approach*. Tesis de doctorado, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands.
- van Straten, G., van Willigenburg, G., van Henten, E., y van Ooteghem, R. (2011). *Optimal control of greenhouse cultivation*. CRC press.
- Vanthoor, B. (2011). *A model-based greenhouse design method*. Tesis de doctorado, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands.
- Vanthoor, B., Stanghellini, C., van Henten, E., y de Visser, P. (2011). A methodology for model-based greenhouse design: Part 1. a greenhouse climate model for a broad range of designs and climates. *Biosystems engineering*, 110:363–377.

- Vera, C., Barange, M., Dube, O., Goddard, L., Griggs, D., Kobysheva, N., Odada, E., Parey, S., Polovina, J., Poveda, G., Seguin, B., y Trenberth, K. (2010). Needs assessment for climate information on decadal timescales and longer. *Procedia Environmental Sciences*, 1(1):275–286.
- Vermeulen, S., Aggarwal, P., Ainslie, A., Angelone, C., Campbell, B., Challinor, A., Hansen, J., Ingram, J., Jarvis, A., Kristjanson, P., Lau, C., Nelson, G., Thornton, P., y Wollenberg, E. (2012). Options for support to agriculture and food security under climate change. *environmental science and policy*, 15:136–144.
- Villagrán, E., Gil, R., Acuña, J., y Bojacá, C. (2012). Optimization of ventilation and its effect on the microclimate of a colombian multispan greenhouse. *Agronomía Colombiana*, 30(2):282–288.
- Wang, S. y Boulard, T. (2000). Predicting the Microclimate in a Naturally Ventilated Plastic House in a Mediterranean Climate. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 75(1):27–38.
- Wang, X. y Liu, H. (2015). Pdo modulation of enso effect on tropical cyclone rapid intensification in the western north pacific. *Climate Dynamics*.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic press, London.
- Yepes, L. J. (2012). Variabilidad climática intraestacional y su efecto sobre la precipitación en colombia: Diagnóstico y pronóstico. Tesis de máster, Universidad Nacional de Colombia.
- Zea, J., León, G., y Eslava, J. A. (2000). Influencia de sistemas extratropicales en colombia. *Meteorología Colombiana*, 1(1):31–40.
- Zhang, Y. (1997). Predicting the microclimate inside a greenhouse: an application of a one-dimensional numerical model in an unheated greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 86(3-4):291–297.
- Zuluaga, M. D., Posada, J. E., y Poveda, G. (2000). Relaciones entre las fases de la oscilación cuasibienal -qbo-, la precipitación mensual, y la radiación de onda larga emergente en colombia. p. 7.