



Parámetros ambientales que afectan a los trabajadores en invernaderos raspa y amagado.
Diseño, construcción y desarrollo de software para dispositivo mecánico de medición

Abril 2017



Instituto Andaluz de Prevención de Riesgos Laborales
CONSEJERÍA DE EMPLEO, EMPRESA Y COMERCIO
Laboratorio-Observatorio Andaluz de Condiciones de Trabajo en el Sector Agrícola (LASA)

Parámetros ambientales que afectan a los trabajadores en invernaderos raspa y amagado. Diseño, construcción y desarrollo de software para dispositivo mecánico de medición

MEMORIA JUSTIFICATIVA

AUTORES:

ÁNGEL JESÚS CALLEJÓN FERRE
JOSÉ PÉREZ ALONSO

JOSÉ LUIS BLANCO CLARACO
JAVIER LÓPEZ MARTÍNEZ

Almería, Abril de 2017



Parámetros ambientales que afectan a los trabajadores en invernaderos raspa y amagado. Diseño, construcción y desarrollo de software para dispositivo mecánico de medición

AUTORES:

**ÁNGEL JESÚS CALLEJÓN FERRE
JOSÉ PÉREZ ALONSO**

**JOSÉ LUIS BLANCO CLARACO
JAVIER LÓPEZ MARTÍNEZ**

ALMERÍA, ABRIL DE 2017

Agradecimientos

Al Instituto Andaluz de Prevención de Riesgos Laborales por financiar y hacer posible esta investigación.

A D. José Atienza Piedra, D. José Antonio López Martínez, D. Juan Martínez Checa y D. Juan Herrero Martínez, todos ellos del Departamento de Ingeniería de la Universidad de Almería y, D. Javier González Monroy y D. Javier González Giménez del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga, por su ayuda desinteresada.

ÍNDICE GENERAL

| | Página |
|--|--------|
| 1. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | 7 |
| 1.1. ANTECEDENTES..... | 8 |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN..... | 9 |
| 1.3. HIPÓTESIS | 9 |
| 1.4. OBJETIVOS | 9 |
| 2. CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 11 |
| 2.1. VIGILANCIA DEL AMBIENTE DE TRABAJO | 12 |
| 2.2. LA AGRICULTURA BAJO PLÁSTICO DEL SURESTE DE ESPAÑA (ALMERÍA) | 12 |
| 2.3. ESTRÉS TÉRMICO EN INVERNADEROS | 13 |
| 2.4. NORMAS E ÍNDICES DE EVALUACIÓN..... | 17 |
| 2.5. REDES DISTRIBUIDAS DE SENSORES | 18 |
| 3. CAPÍTULO 3. MATERIAL Y MÉTODOS | 20 |
| 3.1. ÁREA DE ESTUDIO..... | 21 |
| 3.2. PARÁMETROS CLIMÁTICOS | 21 |
| 3.3. ÍNDICE ULTRAVIOLETA SOLAR MUNDIAL (UVI)..... | 23 |
| 3.4. DISEÑO EXPERIMENTAL..... | 24 |
| 3.5. ESTACIONES DE MEDIDA | 26 |
| 3.6. ARQUITECTURA DE LA RED DE DATOS | 29 |
| 4. CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 33 |
| 4.1. RESULTADOS..... | 34 |
| 4.1.1. Limitaciones en resultados | 34 |
| 4.1.2. Gráficas del día medio quincenal/mensual de cada parámetro en el interior del invernadero (t_a , t_g , h_r , t_r , t_o y ultravioleta)..... | 35 |
| 4.1.3. Gráficas del día medio quincenal/mensual de cada parámetro en el exterior del invernadero (t_a , t_g , h_r y ultravioleta) | 45 |
| 4.1.4. Vídeos 3D desde el 15/09/2016 hasta el 28/02/2017..... | 55 |
| 4.2. DISCUSIÓN | 63 |
| 5. CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES | 67 |
| 6. CAPÍTULO 6. REFERENCIAS..... | 69 |
| 7. CAPÍTULO 7. ANEXOS | 75 |
| 7.1. ANEXO I. UNE-EN ISO 7726, UNE-EN ISO 7730, UNE-EN ISO 8996, UNE-EN 27243, UNE-EN ISO 7933, UNE-EN ISO 9920, NORMA ANSI/ASHRAE 55-2013, ÍNDICE UV SOLAR MUNDIAL: GUÍA PRÁCTICA | 77 |
| 7.2. ANEXO II. DISEÑO ESTACIONES DE MEDIDA | 512 |
| 7.3. ANEXO III. CONSTRUCCIÓN ESTACIONES DE MEDIDA | 515 |
| 7.4. ANEXO IV. DVD CON VIDEOS 3D (t_a , t_g , \bar{t}_r y t_o)..... | 566 |

ÍNDICE FIGURAS

| | Página |
|--|--------|
| 1. Figura 1. Localización de invernaderos en el Sureste de España (Almería)..... | 8 |
| 2. Figura 2. Los tres pilares de la Sostenibilidad y su pirámide triangular en el tiempo (Zink, 2014) | 9 |
| 3. Figura 3. Vigilancia del ambiente de trabajo en los diferentes sectores Económicos | 12 |
| 4. Figura 4. Histograma medio de trabajadores con el método de LEST (Guélaud et al., 1975) en invernaderos tipo Almería de calabacín, sandía y tomate (Callejón-Ferre et al., 2009)..... | 14 |
| 5. Figura 5. Histograma medio de trabajadores con el método de LEST (Guélaud et al., 1975) en invernaderos tipo Almería de melón, berenjena, pimiento y pepino (Callejón-Ferre et al., 2011b)..... | 14 |
| 6. Figura 6. Reloj de decisión donde se muestra Humidex Index (HI) medio de cada día y hora (universal) del mes (Callejón-Ferre et al., 2011a)..... | 15 |
| 7. Figura 7. Escala y Código Internacional de colores (OMD, 2003) | 24 |
| 8. Figura 8. Diseño experimental con red de estaciones de medida..... | 25 |
| 9. Figura 9. Diseño estación de medida | 27 |
| 10. Figura 10. Estación de medida fabricada (interior de invernadero)..... | 10 |
| 11. Figura 11. Contraste de estación de medida fabricada con dos estaciones Comerciales | 29 |
| 12. Figura 12. Vista general de la arquitectura del sistema diseñado | 30 |
| 13. Figura 13. Módulos electrónicos que componen cada una de las estaciones de medida | 32 |
| 14. Figura 14. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 16 al 30/09/2016)..... | 35 |
| 15. Figura 15. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 1 al 15/10/2016)..... | 36 |
| 16. Figura 16. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 16 al 31/10/2016)..... | 37 |
| 17. Figura 17. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 1 al 15/11/2016)..... | 38 |
| 18. Figura 18. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 16 al 30/11/2016)..... | 39 |
| 19. Figura 19. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 1 al 15/12/2016)..... | 40 |
| 20. Figura 20. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 16 al 31/12/2016)..... | 41 |
| 21. Figura 21. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 1 al 15/01/2017)..... | 42 |
| 22. Figura 22. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 16 al 31/01/2017)..... | 43 |
| 23. Figura 23. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 1 al 28/02/2017)..... | 44 |
| 24. Figura 24. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 16 al 30/09/2016)..... | 45 |

| | |
|---|----|
| 25. Figura 25. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 16 al 15/10/2016)..... | 46 |
| 26. Figura 26. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 16 al 31/10/2016)..... | 47 |
| 27. Figura 27. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 1 al 15/11/2016)..... | 48 |
| 28. Figura 28. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 16 al 30/11/2016)..... | 49 |
| 29. Figura 29. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 1 al 15/12/2016)..... | 50 |
| 30. Figura 30. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 16 al 31/12/2016)..... | 51 |
| 31. Figura 31. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 1 al 15/01/2017)..... | 52 |
| 32. Figura 32. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 16 al 31/01/2017)..... | 53 |
| 33. Figura 33. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 1 al 28/02/2017)..... | 54 |
| 34. Figura 34. Temperatura del aire medida a tres alturas por la estación de medida nº 5, del 27 de noviembre al 3 de diciembre de 2016..... | 55 |
| 35. Figura 35. Temperatura de globo medida a tres alturas por la estación de medida nº 5, del 27 de noviembre al 3 de diciembre de 2016..... | 56 |
| 36. Figura 36. Humedad relativa del aire medida a tres alturas por la estación de medida nº 5, del 27 de noviembre al 3 de diciembre de 2016..... | 56 |
| 37. Figura 37. Radiación ultravioleta medida por la estación de medida nº 5, del 27 de noviembre al 3 de diciembre de 2016..... | 57 |
| 38. Figura 38. Medida de la heterogeneidad vertical para los parámetros: a) temperatura del aire; b) temperatura radiante media (día 16 de enero de 2017) | 59 |
| 39. Figura 39. Medida de la heterogeneidad vertical para temperatura radiante media (día 25 de enero de 2017) | 60 |
| 40. Figura 40. Medida de la heterogeneidad vertical para temperatura del aire durante los días del 23 al 27 de enero de 2017 | 60 |
| 41. Figura 41. Medida de la heterogeneidad horizontal para los parámetros: a) temperatura del aire; b) temperatura radiante media (día 16 de enero de 2017) | 61 |
| 42. Figura 42. Medida de la heterogeneidad horizontal para temperatura del aire durante los días del 23 al 27 de enero de 2017 | 62 |

ÍNDICE TABLAS

| | Página |
|---|--------|
| 1. Tabla 1. Evolución de “Wind Chill Index” (WCI*; Environment Canada, 2001) en el día medio de cada mes para un invernadero tipo Almería considerando 5 km h ⁻¹ y hora universal. Valores en rojo denotan condiciones de leves molestias (Callejón-Ferre et al., 2011a) | 16 |
| 2. Tabla 2. Valor coeficiente “A” para el cálculo de la temperatura operativa (ISO, 1998) | 22 |
| 3. Tabla 3. Desviación de los parámetros climáticos para ambientes homogéneos (ISO, 1998) | 23 |
| 4. Tabla 4. Características del sistema de cultivo e invernadero | 24 |
| 5. Tabla 5. Características de los instrumentos de medida | 28 |

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

En el Sureste de España (Almería) se localiza la mayor concentración de invernaderos de Europa (Figura 1) con aproximadamente 30000 hectáreas. Su producción llega hasta las 3.5 millones de toneladas (2000 millones de euros) de las que se exportan aproximadamente el 80%. Estos invernaderos emplean entre 45000 y 55000 personas que se dedican casi por completo al cultivo de frutas y hortalizas (Cabrera-Sánchez et al., 2016).

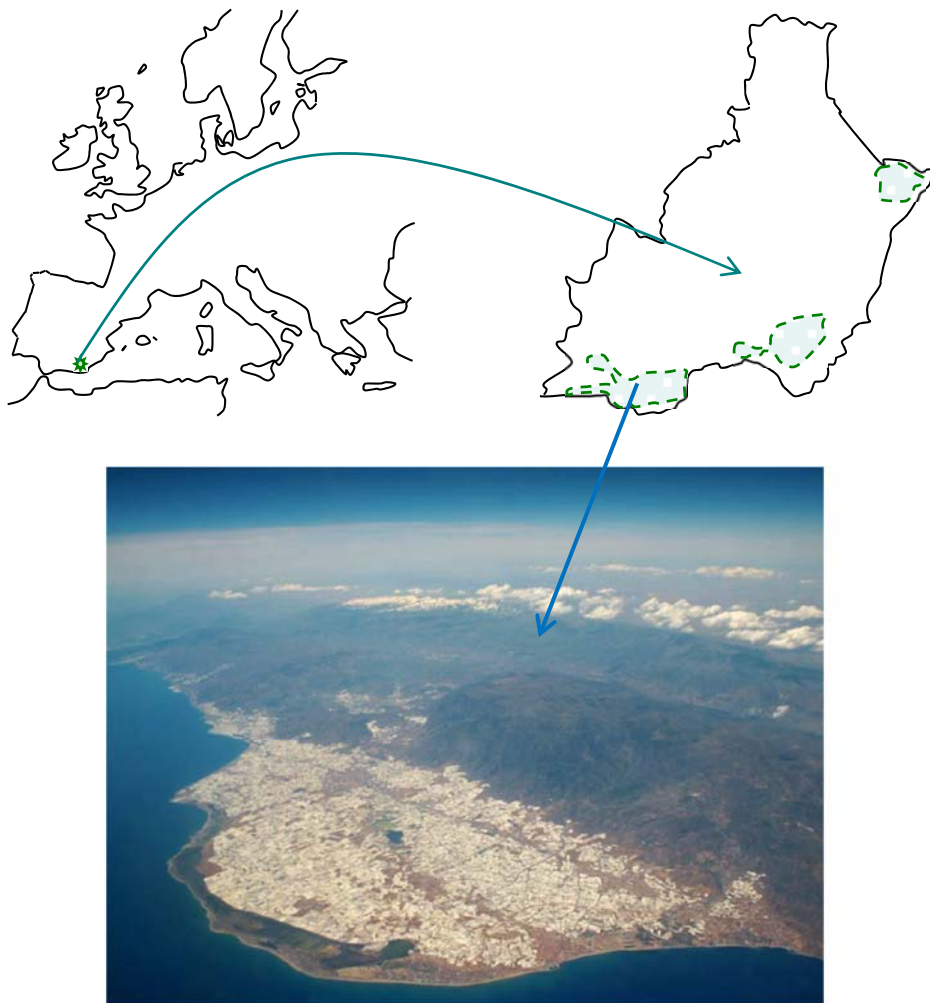


Figura 1. Localización de invernaderos en el Sureste de España (Almería).

Los clientes de la agricultura bajo plástico, europeos principalmente, demandan alimentos saludables y obtenidos de forma sostenible. ¿Qué alcance tiene esta afirmación? El **desarrollo sostenible** satisface las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades (WCED, 1987). Zink (2014) indica

que la sostenibilidad de cualquier empresa o proceso se basa en el desarrollo económico, ecológico y social mantenido en el tiempo (Figura 2).

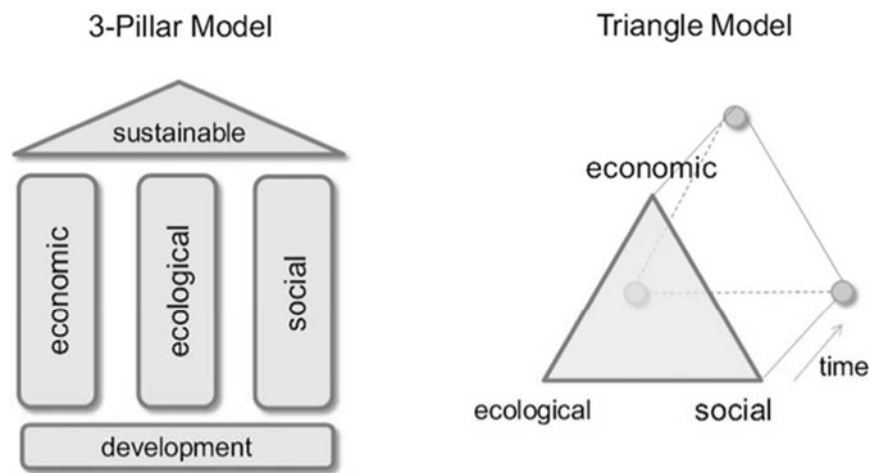


Figura 2. Los tres pilares de la Sostenibilidad y su pirámide triangular en el tiempo (Zink, 2014).

En la actualidad la sostenibilidad de cualquier actividad consiste en **fabricar un buen producto (Ej: tomate) respetando el medio ambiente y los derechos de los trabajadores durante todos los años que se realice dicha actividad.**

1.2 JUSTIFICACIÓN

La ausencia de datos ambientales de ámbito laboral (temperatura de globo, radiación ultravioleta, etc.) en el interior de invernaderos y casi nulo conocimiento desde hace más de seis lustros justificaría este estudio.

1.3 HIPÓTESIS

Esta investigación desea demostrar el efecto sobre los trabajadores de la evolución de la radiación ultravioleta y temperatura radiante media, a tres alturas antropométricas (cabeza, cintura y pies) dentro de un invernadero raspa y amagado de hortalizas.

1.4 OBJETIVOS

El objetivo general este trabajo de investigación es conocer las condiciones de trabajo ambientales (temperatura operativa, temperatura radiante media, temperatura de globo, radiación ultravioleta y velocidad de viento) de los trabajadores de invernadero con cultivo de

tomate mediante el diseño, fabricación, desarrollo de software y construcción de un equipo de medida adaptado (a invernaderos).

Para lograr este objetivo general, se han propuesto los siguientes objetivos específicos:

- a) Conocer las condiciones de trabajo ambientales de los trabajadores de invernadero.
- b) Proponer medidas de protección, en su caso, para los trabajadores de invernadero.
- c) Diseño mecánico de dispositivo antropométrico a tres alturas para la medida de temperatura ambiental, temperatura de globo, radiación ultravioleta y humedad relativa.
- d) Diseño y desarrollo de software para el dispositivo mecánico de medición.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 VIGILANCIA DEL AMBIENTE DE TRABAJO

Los trabajadores interactúan directamente con su entorno laboral. Dicho entorno, dependiendo de los diferentes sectores productivos (Figura 3), puede variar y debe ser vigilado identificando y evaluando los peligros y riesgos que puedan afectar a la seguridad y salud de los trabajadores (ILO, 1985).

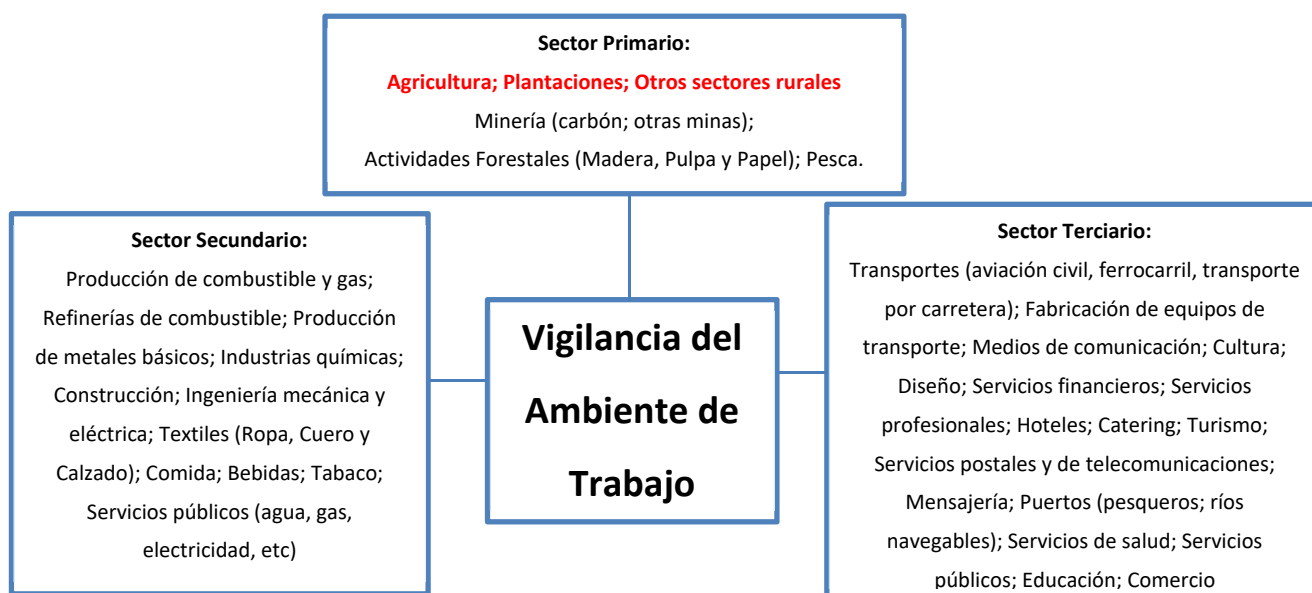


Figura 3. Vigilancia del ambiente de trabajo en los diferentes sectores económicos.

La vigilancia del ambiente de trabajo trata de integrar todas las disciplinas de la cultura de seguridad (salud, accidentes, factores psicosociales, ergonomía, higiene, enfermedades, etc.). En agricultura (Sector primario) se distinguen tres factores en la disciplina de la ergonomía ambiental: factores físicos, factores del organismo y factores adaptativos (Rohles, 1985). Estos factores tendrán mayor o menor incidencia sobre los trabajadores según las tareas agrícolas que éstos realicen.

2.2 LA AGRICULTURA BAJO PLÁSTICO DEL SURESTE DE ESPAÑA (ALMERÍA)

La agricultura se extiende por todo el planeta, siendo la segunda fuente de empleo mundial. Implica contacto con plantas, animales, maquinaria, fertilizantes, fitosanitarios, insectos, etc., tanto en zonas protegidas (interiores) como al aire libre (ILO, 2010).

En el Sureste de España (Almería; Figura 1), como ya se ha dicho, se concentra la mayor superficie de invernaderos de Europa. Estos invernaderos son edificaciones metálicas ligeras

recubiertas de plástico transparente, con ventilación lateral y cenital, en cuyo interior con incidencia de radiación solar difusa, se consiguen condiciones ambientales favorables para el cultivo de hortalizas (Pérez-Alonso et al., 2011). Además, están provistos de sensores como psicrómetros, termómetros, piranómetros, conductivímetros, phmetros, etc., orientados al control de parámetros puramente agronómicos (Castilla, 2005) que no siempre son los más idóneos para el bienestar de los trabajadores (Callejón-Ferre et al., 2011a).

Las hortalizas que se cultivan son tomates, pimientos, pepinos, calabacines, berenjenas, judías, sandías y melones. Para obtenerlas con éxito, los trabajadores realizan tareas relacionadas con el ciclo de crecimiento de los vegetales, tales como siembra, trasplante, podas, protección de cultivos, recolección, etc. Dichas labores se realizan entre finales de julio y primeros de junio del año siguiente, consiguiendo así concluir un ciclo de cultivo completo (campaña agrícola). También, se suelen realizar tareas de mantenimiento cuando no existe cultivo (Callejón-Ferre et al., 2009; 2011b).

Los inviernos suaves del Sureste de España (Figura 1) favorecen la no utilización de calefacción en los cultivos de invernadero; no obstante, la diversidad de temperaturas a lo largo de las cuatro estaciones climáticas del año provocan unas condiciones ambientales muy variables en el interior del invernadero, desde más de 40°C en verano hasta poco más de 2-3°C en invierno (por la noche) (Callejón-Ferre et al., 2011a; Cecchini et al., 2010).

2.3 ESTRÉS TÉRMICO EN INVERNADEROS

En las condiciones descritas en el apartado anterior, el estudio de estrés por calor en humanos requiere del análisis de magnitudes físicas asociadas al ambiente (temperatura, humedad, velocidad del aire, etc.), de variables relacionadas con el individuo y el tipo de trabajo (tasa metabólica, aclimatación, actividad física, ropa, etc.; ISO, 2004a).

Mediante métodos generales que identifican pero no cuantifican, Callejón-Ferre et al. (2009; 2011b) advirtieron estrés por calor moderado en cultivos de invernadero de calabacín, sandía y tomate (Figura 4) además de melón, berenjena, pimiento y pepino (Figura 5).

Parámetros ambientales que afectan a los trabajadores en invernaderos raspa y amagado. Diseño, construcción y desarrollo de software para dispositivo mecánico de medición

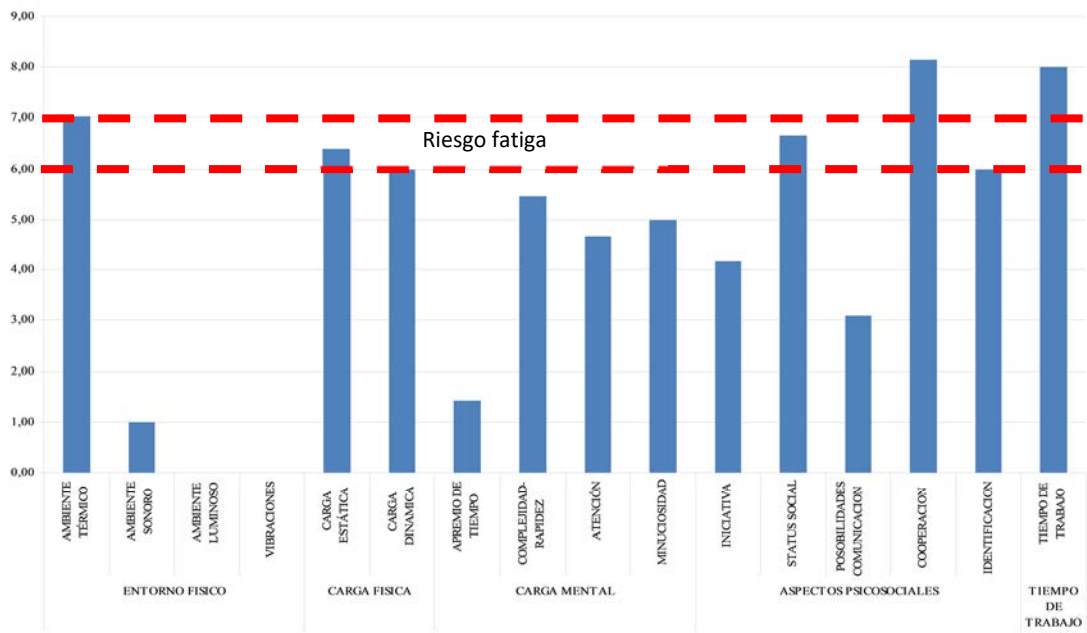


Figura 4. Histograma medio de trabajadores con el método de LEST (Guélaud et al., 1975) en invernaderos tipo Almería de calabacín, sandía y tomate (Callejón-Ferre et al., 2009).

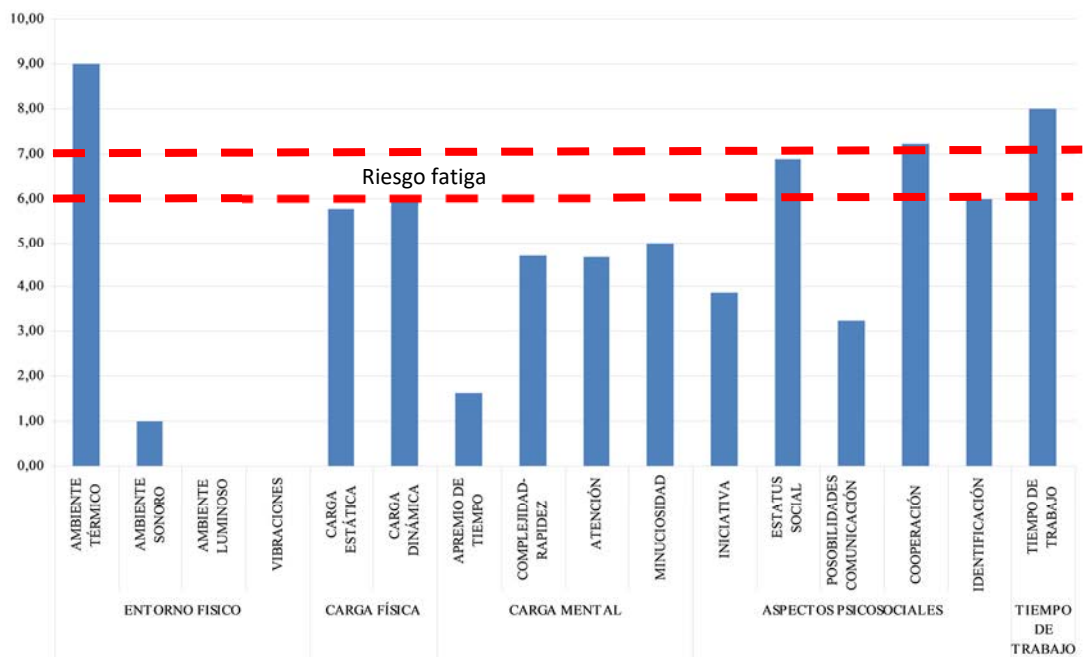


Figura 5. Histograma medio de trabajadores con el método de LEST (Guélaud et al., 1975) en invernaderos tipo Almería de melón, berenjena, pimiento y pepino (Callejón-Ferre et al., 2011b).

Callejón-Ferre et al. (2011a) estudiaron las condiciones térmicas de los trabajadores en invernaderos tipo Almería mediante “Humidex Index” (HI; Masterton and Richardson, 1979) observando que, durante los meses más cálidos, era común el riesgo de estrés por calor (Figura 6). Cecchini et al. (2010) demostraron que, en invernaderos de Italia central, existe la posibilidad de golpes de calor durante las horas más calurosas del día tanto en primavera como en verano. En latitudes similares de Italia, Marucci et al. (2012) advirtieron estrés térmico entre abril y octubre para los trabajadores de invernadero (semillero hortícola multitúnel) que se dedicaban a injertar hortalizas. Resultados similares se han encontrado en invernaderos de Calabria (Sur de Italia; Diano et al., 2016) y de Japón (Okushima et al., 2001), donde las labores agrícolas durante el verano demostraron ser muy peligrosas, sobre todo al medio día. Adicionalmente mediante “Wind Chill Index” (WCI; Environment Canada, 2001) no se ha encontrado riesgo de estrés por frío (Tabla 1; Callejón-Ferre et al., 2011a).

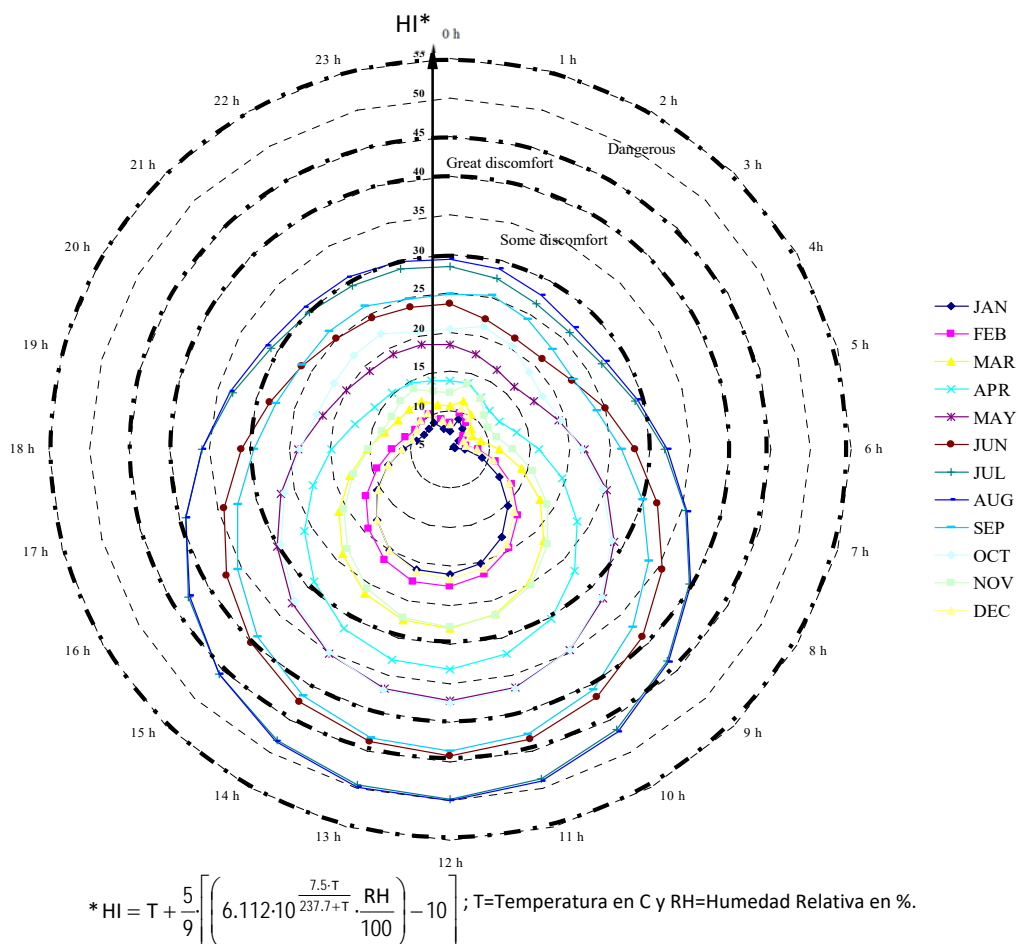


Figura 6. Reloj de decisión donde se muestra Humidex Index (HI) medio de cada día y hora (universal) del mes (Callejón-Ferre et al., 2011a).

Tabla 1. Evolución de “Wind Chill Index” (WCI*; Environment Canada, 2001) en el día medio de cada mes para un invernadero tipo Almería considerando 5 km h⁻¹ y hora universal.

Valores en rojo denotan condiciones de leves molestias (Callejón-Ferre et al., 2011a).

| Horas | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0 | 8 | 9 | 11 | 13 | 16 | 19 | 23 | 23 | 21 | 17 | 12 | 9 |
| 1 | 8 | 9 | 10 | 13 | 16 | 19 | 22 | 23 | 20 | 17 | 12 | 9 |
| 2 | 8 | 9 | 10 | 12 | 15 | 19 | 22 | 23 | 20 | 17 | 11 | 9 |
| 3 | 7 | 9 | 10 | 12 | 15 | 19 | 22 | 22 | 20 | 17 | 11 | 9 |
| 4 | 7 | 9 | 9 | 12 | 15 | 18 | 22 | 22 | 20 | 17 | 11 | 9 |
| 5 | 7 | 8 | 9 | 12 | 15 | 19 | 22 | 22 | 20 | 17 | 11 | 9 |
| 6 | 7 | 8 | 9 | 13 | 18 | 23 | 25 | 24 | 20 | 17 | 11 | 9 |
| 7 | 7 | 9 | 12 | 18 | 23 | 27 | 29 | 28 | 24 | 19 | 12 | 9 |
| 8 | 10 | 13 | 18 | 22 | 26 | 30 | 32 | 32 | 28 | 24 | 17 | 12 |
| 9 | 16 | 17 | 21 | 25 | 29 | 32 | 35 | 35 | 31 | 26 | 21 | 16 |
| 10 | 18 | 20 | 23 | 27 | 30 | 34 | 36 | 36 | 33 | 28 | 23 | 18 |
| 11 | 20 | 21 | 25 | 28 | 31 | 35 | 38 | 37 | 34 | 29 | 24 | 20 |
| 12 | 21 | 22 | 25 | 28 | 31 | 35 | 38 | 38 | 34 | 29 | 24 | 20 |
| 13 | 20 | 22 | 25 | 28 | 31 | 35 | 38 | 38 | 34 | 29 | 24 | 20 |
| 14 | 20 | 21 | 24 | 28 | 30 | 34 | 38 | 37 | 33 | 28 | 22 | 19 |
| 15 | 18 | 19 | 23 | 26 | 29 | 33 | 37 | 36 | 31 | 26 | 20 | 17 |
| 16 | 15 | 17 | 20 | 24 | 27 | 32 | 35 | 34 | 29 | 24 | 18 | 14 |
| 17 | 12 | 14 | 17 | 21 | 25 | 30 | 33 | 32 | 27 | 21 | 15 | 12 |
| 18 | 10 | 12 | 14 | 18 | 22 | 27 | 30 | 29 | 24 | 20 | 14 | 11 |
| 19 | 10 | 11 | 13 | 15 | 19 | 24 | 27 | 26 | 22 | 19 | 13 | 11 |
| 20 | 9 | 10 | 12 | 14 | 18 | 22 | 25 | 25 | 22 | 18 | 13 | 10 |
| 21 | 9 | 10 | 12 | 14 | 17 | 21 | 24 | 24 | 22 | 18 | 12 | 10 |
| 22 | 8 | 10 | 11 | 14 | 17 | 20 | 23 | 24 | 21 | 18 | 12 | 10 |
| 23 | 8 | 10 | 11 | 13 | 16 | 20 | 23 | 23 | 21 | 18 | 12 | 9 |

* WCI = $13.12 + 0.6215 \cdot T - (11.37 \cdot V^{0.16}) + (0.3965 \cdot T \cdot V^{0.16})$; T=Temperatura en °C y V=Velocidad Viento en km·h⁻¹.

Otras investigaciones se han orientado hacia el estudio de las condiciones ambientales que padecen los trabajadores que se dedican a la construcción de invernaderos tipo Almería (Pérez-Alonso et al., 2011). Este último escenario es diferente de los anteriores, ya que la mayoría de las actividades se realizan al aire libre. El ambiente térmico respecto a los trabajadores del interior de invernaderos es más desfavorable y por ende los riesgos por golpe de calor también, sobre todo en periodos estivales.

2.4 NORMAS E ÍNDICES DE EVALUACIÓN

La evaluación del entorno térmico está regulada por varias normas (Parsons, 2013; Anexo I), entre otras muchas. La “International Standard Organization” (ISO) clasifica el ambiente (térmico) en dos categorías: moderado y extremo. Cada categoría se evalúa mediante un índice y la correspondiente norma ISO. Los ambientes moderados deben ser evaluados a través del índice “Predicted Mean Vote” (PMV) según la norma ISO 7730 (ISO, 2015). Los ambientes extremos deben tratarse inicialmente mediante el índice “Wet Bulb Globe Temperature” (WBGT) según lo establecido en la norma ISO 7243 (ISO, 1989). Si se superan los límites del índice WBGT, se requiere un análisis más detallado basado en la ecuación del balance energético (transferencia de calor sujeto-ambiente). Este análisis debe realizarse de acuerdo con la Norma ISO 7933 (ISO, 2004a), donde se sugiere el índice “Predicted Heat Strain” (PHS). Además de los estándares ISO, numerosos índices de confort y estrés han sido descritos en la literatura sobre ambiente térmico (Epstein and Moran, 2006; D'Ambrosio-Alfano et al., 2011).

El índice WBGT (ISO, 1989) debe calcularse de acuerdo con uno de los siguientes dos escenarios: i) dentro de edificios y fuera de edificios sin radiación solar, y ii) fuera de edificios con radiación solar. Dado que la cubierta de los invernaderos tipo Almería es de plástico (con varios aditivos), los trabajadores dentro del invernadero estarán expuestos a radiación difusa (Nijskens et al., 1985). Entonces, las condiciones dentro de los invernaderos no coinciden con ninguno de los escenarios descritos por la norma ISO 7243 (ISO, 1989) respecto al cálculo del índice WBGT. Además, Budd (2008) advirtió de las limitaciones del índice WBGT en ambientes con humedad alta y velocidad de viento baja; justo lo que suele ocurrir dentro de un invernadero. Por esta razón, Callejón-Ferre et al. (2011a) utilizaron un índice empírico denominado “Humidex Index” (HI) (Masterton and Richardson, 1979) para evaluar el estrés térmico en el interior de invernaderos tipo Almería.

El cálculo de todos los índices anteriores requiere de la medición de varios parámetros climáticos (temperatura del aire, temperatura bulbo húmedo, temperatura del globo negro, velocidad del aire, humedad, etc.). Concretamente, para los índices PMV y PHS, también se requiere la tasa metabólica relacionada con la actividad física del trabajador, basada en ISO 8996 (ISO, 2004b), el aislamiento de ropa y la tasa de sudor según ISO 9920:2007 (ISO, 2007). Todas las mediciones de los parámetros climáticos deben realizarse de conformidad con la norma ISO 7726:1998 (ISO, 1998). Se definen, en ella, las características mínimas de los

instrumentos para medir las magnitudes físicas que definen un entorno térmico. Además, se indica que los valores de las magnitudes físicas pueden variar en función del espacio y del tiempo, diferenciando entre ambientes heterogéneos y homogéneos. En el caso de los primeros, las mediciones de magnitudes físicas deben realizarse en diferentes posiciones a lo largo del lugar de trabajo, en dirección horizontal y también en dirección vertical. Estudios previos sugieren ambientes heterogéneos en los invernaderos (López et al., 2012; 2013); no obstante, dicha heterogeneidad ha sido detectada en parámetros climáticos involucrados en el crecimiento de las plantas, pero aún no se ha demostrado con magnitudes físicas relacionadas con el estrés por calor. Para satisfacer esta necesidad, la implementación de un sistema de medición multipunto dentro de un invernadero proporcionaría información relevante sobre la variación temporal y espacial de los parámetros climáticos relacionados con el estrés térmico en el entorno de trabajo.

Por otro lado, la norma ISO 17166 (ISO, 1999) describe la formulación del índice ultravioleta solar mundial (UVI) basándose en el espectro de acción de referencia de la Comisión Internacional sobre Iluminación (CIE) para el eritema inducido por la radiación ultravioleta (UV) en la piel humana. Dicha radiación (UV) va desde los 100 hasta los 400 nm dividiéndose en tres intervalos bien diferenciados: radiación UVA (315-400 nm), UVB (280-315 nm) y UVC (100-280 nm). Al espacio de trabajo humano llegan longitudes de onda UVA y un porcentaje muy bajo de UVB (OMD, 2003).

2.5 REDES DISTRIBUIDAS DE SENSORES

Numerosos autores han propuesto el empleo de redes distribuidas de sensores heterogéneos para la monitorización en entornos agrícolas, ya sea en campo abierto o en invernaderos (Ruiz-García et al., 2009). Las tecnologías y protocolos de comunicaciones por radio más propicios para este tipo de aplicaciones han sido: Bluetooth (Dursch et al, 2004), XBee (Baronti et al., 2007), WiFi (Anastasi et al., 2009) y RFID (Hamrita and Hoffacker, 2005).

A pesar de que todas estas tecnologías se han empleado en distintos proyectos, hoy se tiene experiencia suficiente para valorar las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas. Bluetooth ofrece una distancia de conexión muy reducida, y ofrece muy poca flexibilidad en el formato y topología de las comunicaciones cuando existen más de dos nodos en el sistema. WiFi, regulada por el estándar IEEE 802.11 (IEEE, 2012) es el protocolo más empleado en oficinas, hogares y smartphones; sin embargo, su consumo energético es más elevado que

otras alternativas, y por lo que tampoco resulta ideal para aplicaciones de adquisición de datos que deban funcionar de manera ininterrumpida. RFID emplea una frecuencia de radiofrecuencia mucho más baja que todas las otras tecnologías (en el rango de MHz en lugar de GHz), lo que le permite incluso alimentar pequeños dispositivos a través de las ondas de radio, sin necesidad de cables. Su alcance, sin embargo, es muy reducido (apenas 1-2 metros) por lo que su uso en aplicaciones de adquisición de datos en amplias superficies tampoco resulta óptimo. El protocolo XBee, diseñado específicamente para redes de múltiples nodos, permite la conexión en una diversidad de topologías, manteniendo el consumo energético en un mínimo. Por lo que parece ser el ideal para aplicaciones en agricultura bajo plástico (Baronti et al., 2007; Ruiz-García et al., 2009) y más concretamente su variante regulada por el estándar IEEE 802.15.4 (IEEE, 2009).

CAPÍTULO 3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

La investigación se ha llevado a cabo en las instalaciones de la Universidad de Almería (UAL), diferenciando dos fases. La primera de diseño/fabricación en los laboratorios/talleres del Área de Ingeniería Mecánica del Departamento de Ingeniería (36° 49' 44" N, 2° 24' 27" W, 2-5 m sobre el nivel del mar). La segunda, de experimentación y toma de datos, en un invernadero tipo Almería (raspa y amagado) de la finca experimental de la Fundación UAL-Anecoop (36° 51' 55" N, 2° 17' 1" W, 98 m sobre el nivel del mar).

3.2 PARÁMETROS CLIMÁTICOS

La norma ISO 7726 (ISO, 1998) describe como parámetros climáticos básicos la temperatura del aire ($t_a = C$), la temperatura radiante media ($\bar{t}_r = C$), la velocidad del aire ($v_a = m \cdot s^{-1}$) y la humedad del aire (%) (expresada por la presión parcial de vapor, $P_a = kPa$). A partir de estos parámetros básicos se pueden obtener otros parámetros climáticos para evaluar los índices de confort y estrés térmico. También, dichos parámetros básicos se usan para definir los límites de ambientes homogéneos (ISO, 1998).

La temperatura radiante media (\bar{t}_r), puede obtenerse a partir de la temperatura del globo negro (t_g) en condiciones de convección natural y globo negro normalizado de 15 cm de diámetro (D; ISO, 1998; Ecuación 1).

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + 0.4 \cdot 10^8 \cdot |t_g - t_a|^{1/4} \cdot (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (\text{Ecuación 1})$$

En caso de convección forzada, se debe usar la Ecuación 2.

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + 2.5 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0.6} \cdot (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (\text{Ecuación 2})$$

La selección de ecuaciones (natural o forzada) requiere del cálculo del coeficiente de transmisión de calor por convección ($h_{cg} = w \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), que se define, para la convección natural (Ecuación 3), como:

$$h_{cg} = 1.4 \cdot \left(\frac{t_g - t_a}{D} \right)^{1/4} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Y para la convección forzada (Ecuación 4), como:

$$h_{cg} = 6.3 \cdot \left(\frac{v_a^{0.6}}{D^{0.4}} \right) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Entonces, el mayor de los dos coeficientes obtenidos por las Ecuaciones 3 y 4 determinaría el tipo de convección que se utilizaría (natural o forzada). También, de manera más sencilla, se podría utilizar siempre la ecuación de convección forzada (Ecuación 2) en el caso de entornos térmicos donde el estrés por calor fuese posible (ISO, 1998).

A partir de los valores climáticos básicos es posible obtener otros parámetros climáticos como la temperatura operativa (t_o) (Ecuación 5; ISO, 1998), necesaria para el cálculo del índice PMV (ISO, 2005), o la temperatura natural del bulbo húmedo (t_{nw}), requerida para la ecuación del índice WBGT (ISO, 1989; D'Ambrosio-Alfano et al., 2004).

$$t_o = \frac{t_a \cdot \sqrt{10 \cdot v_a} + \bar{t}_r}{1 + \sqrt{10 \cdot v_a}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

También, para el cálculo de la temperatura operativa (t_o) (Ecuación 6; ISO, 1998):

$$t_o = A \cdot t_a + (1 - A) \cdot \bar{t}_r \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde el valor de "A" variará, en función de la velocidad relativa del aire, V_{ar} ($m \cdot s^{-1}$; Tabla 2).

Tabla 2. Valor coeficiente "A" para el cálculo de la temperatura operativa (ISO, 1998).

| Velocidad Aire ($m \cdot s^{-1}$) | A |
|-------------------------------------|-----|
| <0.2 | 0.5 |
| 0.2-0.6 | 0.6 |
| 0.6-10 | 0.7 |

En cuanto a la variación espacial de los parámetros físicos dentro del lugar de trabajo, la ISO 7726 (ISO, 1998) establece algunos límites para los parámetros básicos donde, si la variación de los parámetros básicos se encuentra dentro de un rango determinado, el

ambiente puede considerarse homogéneo. En otro caso, si la variación de los parámetros climáticos excede del rango anterior, el espacio de trabajo debe ser evaluado como un entorno heterogéneo. La Tabla 3 muestra la desviación máxima admisible, a partir de su valor medio, de los parámetros básicos medidos a lo largo del lugar de trabajo para ser considerados como homogéneos. La homogeneidad del entorno se evalúa para cada parámetro básico individualmente, es decir, el espacio puede ser homogéneo en la temperatura del aire pero heterogéneo en temperatura radiante.

Tabla 3. Desviación de los parámetros climáticos para ambientes homogéneos (ISO, 1998).

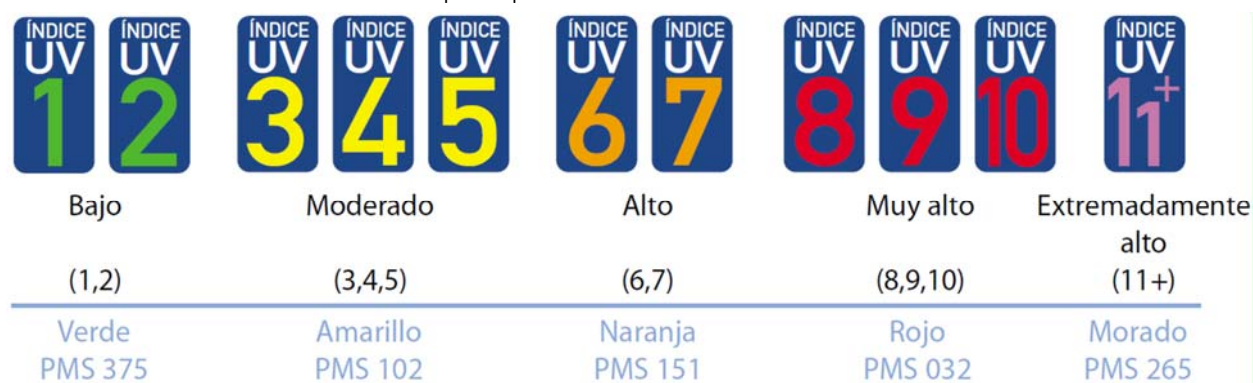
| Parámetros | Desviación admisible* |
|--|---|
| Temperatura del aire (t_a) | $\pm 2.0^{\circ}\text{C}$ ($0^{\circ}\text{C} < t_a < 50^{\circ}\text{C}$) |
| Temperatura radiante media (\bar{t}_r) | $\pm 10.0^{\circ}\text{C}$ ($0^{\circ}\text{C} < \bar{t}_r < 50^{\circ}\text{C}$) |
| Velocidad del aire (v_a) | $\pm (0.3 + 0.15 \cdot v_a)$ m s ⁻¹ |
| Presión parcial de vapor (P_a) | ± 0.45 kPa |

*Para ambientes térmicos donde el estrés por calor es posible (tipo S).

La heterogeneidad espacial del ambiente debe evaluarse en dirección vertical y horizontal. En la dirección vertical, ISO 7726 (ISO, 1998) establece tres alturas donde las magnitudes físicas deben medirse: en el tobillo (0,1 m), en el abdomen (1,1 m) y en los niveles de cabeza (1,7 m). Los valores entre paréntesis son recomendaciones para el trabajo permanente, y pueden ser modificados para que se ajusten a las características de cada población. Para calcular el valor medio de estas tres mediciones deben utilizarse factores de ponderación de 1, 2 y 1, respectivamente para el tobillo, abdomen y cabeza. En este trabajo, se ha diseñado una estación de medición que incluye sensores a tres alturas (ver apartado 3.4).

3.3 ÍNDICE ULTRAVIOLETA SOLAR MUNDIAL (UVI)

El UVI mide la intensidad de la radiación UV solar en la superficie de trabajo. Es un índice adimensional difundido a nivel mundial por un código de colores (Figura 7).



*Colores de referencia del sistema Pantone Matching System (PMS).

Figura 7. Escala y Código Internacional de colores (OMD, 2003).

Se obtiene en función de una constante de valor $40 \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ (k_{er}), de la irradiancia espectral solar a la longitud de onda λ (E_{λ} en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$), del espectro de acción de referencia para el eritema [$s_{er}(\lambda)$] y del diferencial de longitud de onda utilizado en la integración [$d(\lambda)$] (Ecuación 7; ISO, 1999; ver Anexo I).

$$\text{UVI} = k_{er} \cdot \int_{250 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E_{\lambda} \cdot s_{er}(\lambda) d(\lambda) \quad (\text{Ecuación 7})$$

3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

En entornos heterogéneos, las magnitudes físicas deben medirse en el lugar donde el operario puede ser colocado. Se deben considerar los resultados parciales para determinar los valores medios requeridos para la evaluación del estrés térmico. Se ha instalado una “batería” de sensores a tres alturas en un invernadero tipo Almería, situado a 15 km al este de la ciudad de Almería (36° 52' N - 2° 17' W, 98 m s.n.m.). Tanto las características principales del invernadero, cultivo y diseño de red de sensores, se encuentran en la Tabla 4 y Figura 8.

Tabla 4. Características del sistema de cultivo e invernadero.

| | |
|-------------|--|
| Dimensiones | 32 m x 32 m; h = 4.10 m en cumbre y h=3.40 m en amagado. |
| Cubierta | Polietileno tricapa nuevo, 200 μm de espesor, 81% de transmitancia de luz visible y 29% de transmitancia de luz difusa. |
| Ventilación | Ventanas laterales manuales y cenitales automáticas (18 m x 1.5 m; n=4). |
| Blanqueo | Blanqueo desde el 7/09/2016 hasta 29/09/2016 (primeras lluvias). |
| Suelo | Sistema enarenado (suelo original de 20-30 cm, estiércol de 1-3cm y arena de 8-12 cm). |
| Cultivo | Tomate (riego por goteo); Altura plantas de 2.1 m con gancho y descuelgue. |

Una red de 12 estaciones de medición se ha distribuido a lo largo del invernadero con el fin de obtener datos representativos verticales y horizontales (Figura 8). Además, se ha colocado una estación de medición adicional fuera del invernadero para medir las condiciones climáticas al aire libre.

Las mediciones comenzaron el 7 de septiembre de 2016, antes de trasplantar las plantas de tomate, y han finalizado el 28 de febrero de 2017.

Con este diseño experimental se proporciona información relevante sobre la variación de los parámetros climáticos tanto en el tiempo como en el espacio (horizontal y vertical).

3.5 ESTACIONES DE MEDIDA

Para cumplir con ISO 7726 (ISO, 1998) en entornos heterogéneos, se ha diseñado y construido una estación de medición personalizada (Anexos II y III). La estación de medición incluye un soporte estructural, varios instrumentos de medición y una caja electrónica para el procesamiento de datos (Figuras 9 y 10). El soporte consta principalmente de un poste vertical con tres barras horizontales ajustables en altura. Estas barras horizontales se han fijado a 0.2245 m, 0.9340 m y a 1.558 m del suelo (altura del tobillo, del abdomen y de la cabeza, respectivamente), que aunque no son las alturas recomendadas en ISO 7726 (ISO, 1998) corresponden con el percentil 50 de la población española (Carmona-Benjumea, 2001).

Parámetros ambientales que afectan a los trabajadores en invernaderos raspa y amagado. Diseño, construcción y desarrollo de software para dispositivo mecánico de medición

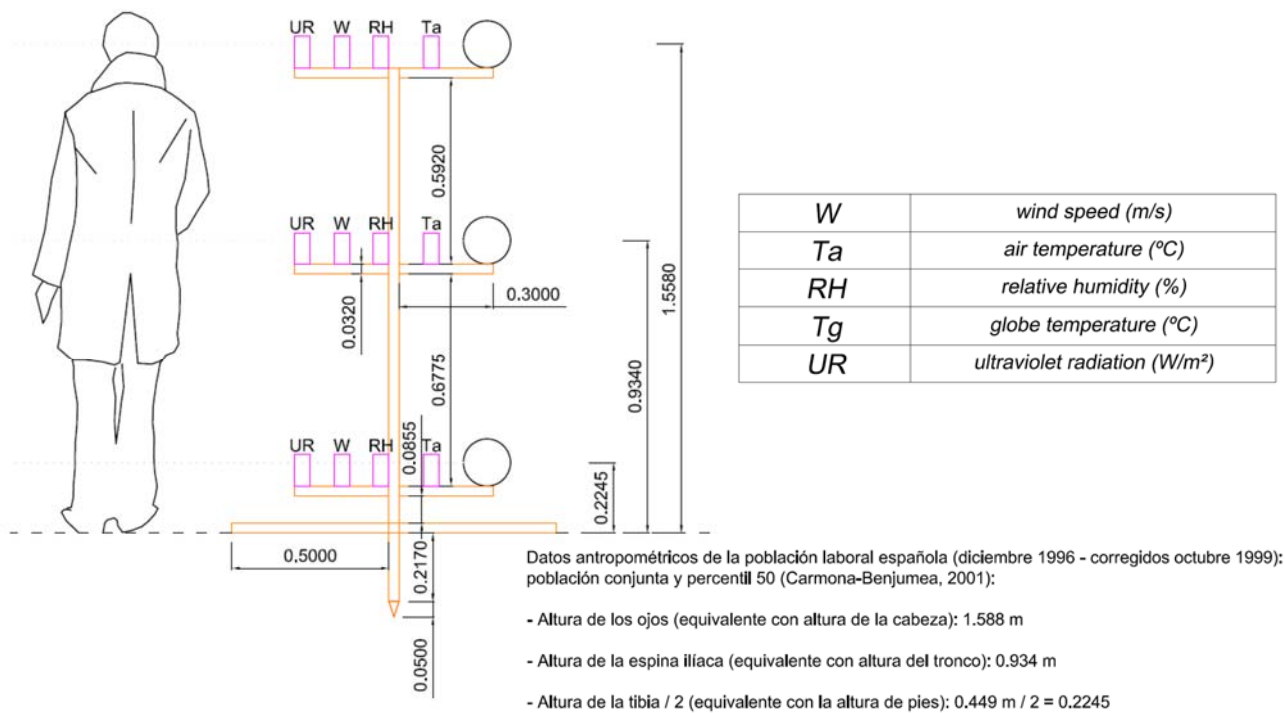


Figura 9. Diseño estación de medida.



Figura 10. Estación de medida fabricada (interior de invernadero).

Cada barra horizontal está equipada con cuatro sondas para medir los parámetros microclimáticos: temperatura del aire (t_a), temperatura del globo negro (t_g), velocidad del aire (v_a) y humedad relativa (HR). Adicionalmente, y fuera de norma, se ha instalado un sensor ultravioleta (mide UVI) para ver cómo influye la degradación del plástico sobre la misma.

Las características de cada sensor se definen en la Tabla 5 y se han seleccionado para cumplir con la precisión mínima requerida por ISO 7726 (ISO, 1998) excepto la radiación ultravioleta que no aparece en ISO 7726 (ISO, 1998).

Tabla 5. Características de los instrumentos de medida.

| Parámetro | Fabricante | Modelo | Rango de medida | Precisión |
|-----------------------------------|---------------|------------|---------------------------|------------------------------------|
| Temp. aire (t_a) | TC Direct | 515-725 | -15°C to 250°C | ± 0.06°C (at 0°C) |
| Temp. Globo (t_g) | TC Direct | 515-725 | -15°C to 250°C | ± 0.06°C (at 0°C) |
| Velocidad aire (v_a) | Modern Device | Rev. C | 0 to 20 m s ⁻¹ | ± 10%, 5 cm s ⁻¹ mínimo |
| Humedad Relativa (HR) | Silicon Labs | Si7021-A20 | 0 to 100% HR | ± 3% RH |
| Radiación Ultravioleta (Sólo UVI) | Silicon Labs | Si1145 | 0-15 | ± 1 |

Para medir la temperatura del globo negro (t_g), se ha colocado una sonda Pt100 dentro de una boya de latón (66% Cu y 34% Zn), con 15 cm de diámetro y 0.5 mm de espesor. Posteriormente se ha pintado de color negro mate.

Tanto los sensores de temperatura del aire (pt100) como los de humedad relativa, han sido protegidos mediante protecciones ventiladas de color blanco para evitar la radiación solar directa y la posible caída de agua condensada desde la cubierta de plástico del invernadero.

Para la medir la velocidad del aire (v_a) se ha utilizado un sensor anemométrico de alambre caliente.

Como ya se ha dicho, además de los cuatro sensores, se ha colocado un sensor de radiación ultravioleta en la barra superior de cada estación de medición. La intención es medir la radiación ultravioleta que pasa a través del plástico e incide sobre los trabajadores, además de observar el más que previsible aumento de su valor conforme se vaya degradando el plástico a lo largo de su vida útil (3 años).

Todos los sensores están conectados a una caja electrónica donde las señales medidas son convertidas y procesadas (ver apartado 3.6.). La caja electrónica está alimentada por cable desde una fuente de alimentación ininterrumpida.

De cada tipo de sensor se ha comprado uno verificado/calibrado según normas internacionales. A partir de él se han calibrado los demás. Una vez hecho ésto, se han comprobado los datos de las estaciones de medida respecto a dos estaciones de medida comerciales (Figura 11), obteniéndose valores similares; no obstante, mencionar que los sensores de viento no han sido finalmente validados.



Figura 11. Contraste de estación de medida fabricada con dos estaciones comerciales.

3.6 ARQUITECTURA DE LA RED DE DATOS

Como se muestra en la figura 12, existen cuatro tipos de entidades: (1) las estaciones de medida, distribuidas a lo largo y ancho del invernadero que se está monitorizando, (2) la estación central de control, instalada en una caja registro dentro del mismo invernadero, (3) un servidor, instalado en Centro de Proceso de Datos de la Universidad de Almería (CPD-UAL) y, opcionalmente, (4) operadores remotos.

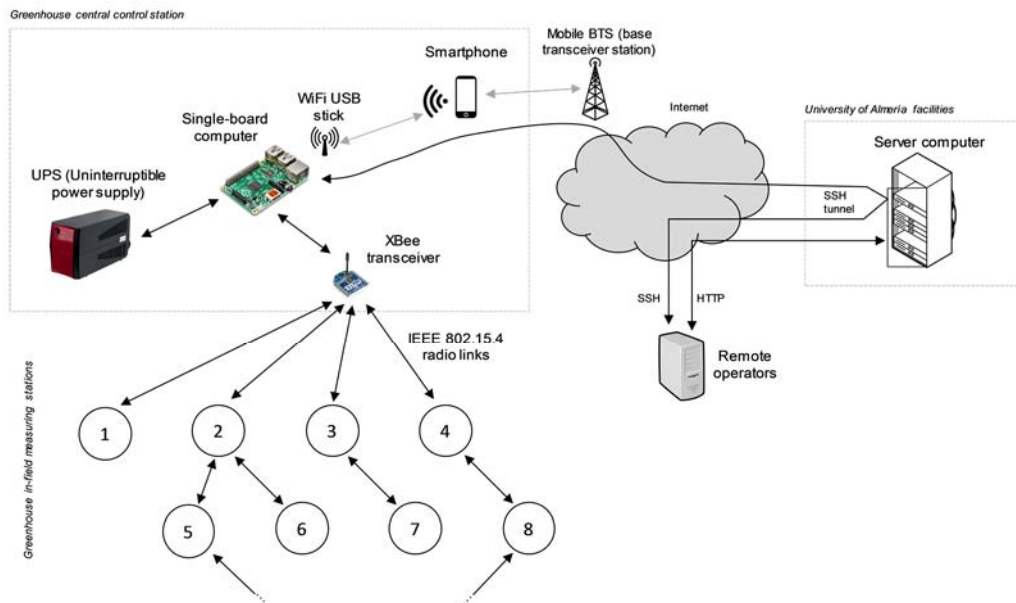


Figura 12. Vista general de la arquitectura del sistema diseñado.

El núcleo del sistema lo forman las estaciones de medida y la estación central, instaladas todas localmente en el invernadero, y tienen capacidad operativa totalmente autónoma sin intervención externa. Los elementos externos (servidor y operadores) son añadidos que mejoran la usabilidad del sistema al permitir conocer el estado del mismo en tiempo real desde cualquier lugar del planeta con acceso a Internet. El servidor instalado en el centro de procesamiento de datos de la Universidad de Almería (CPD-UAL) también se emplea para almacenar copias de seguridad de todos los datos recogidos de forma diaria por la estación central del invernadero, siempre y cuando exista conectividad y cobertura móvil en la zona.

Las estaciones de medida se conectan con el nodo central, y también entre sí cuando es necesario, empleando radioenlaces punto a punto del tipo IEEE 802.15.4 de baja potencia (<10 mW) en la banda de 2.4 GHz. El firmware de las estaciones de medida, y el software del nodo central (ambos programados en C++ y compilados para plataforma AVR 8 bit y ARM, respectivamente) se han diseñado de forma que existe una tabla de enrutamiento reconfigurable que define las rutas de comunicación deseadas para el intercambio de paquetes de datos entre el nodo central y las estaciones base. De esta forma, se consigue expandir el máximo rango de alcance de la señal radio, que típicamente sufre grandes

atenuaciones en entornos con alta densidad de plantas, mediante el uso de estaciones de medida como repetidores a nivel de paquetes de radio.

La estación de control central se encarga de enviar, con una periodicidad de 20 segundos, un paquete a todas las estaciones de medida indicando que deben realizar el muestreo de los datos de todos los sensores. De esta forma, se asegura que todas las estaciones muestrean datos al mismo tiempo. Tras unos segundos, tiempo requerido para adquirir todas las señales analógicas mediante conversores ADC de precisión, el nodo central inicia una ronda de consultas (*polling*) para requerir a cada estación que envíe los valores medidos. Todos los datos son almacenados en una estructura de directorios y ficheros que hace fácil la realización de copias de seguridad diarias.

Siempre que exista conectividad a Internet, conseguida mediante un Smartphone 4G, el nodo central enviará los datos recogidos de forma diaria a un servidor emplazado en el CPD-UAL.

Los operadores (los investigadores de este proyecto) pueden acceder a dichos datos en el servidor mediante una sencilla interfaz web (HTTP), o mediante protocolos de transmisión de ficheros seguros (SSH).

Así mismo, el sistema se ha configurado de forma que se permiten realizar conexiones desde cualquier lugar provisto de acceso a Internet, hasta el ordenador central del invernadero. Esto no es trivial, al estar éste último detrás de una NAT (Network Address Translation) del operador móvil que impide la conexión directa desde el exterior. La solución adoptada consiste en una conexión SSH inversa desde el nodo central del invernadero hasta el servidor en el CPD-UAL, establecida las 24h del día en espera de ser requerida por un operador externo.

En cuanto a la arquitectura interna de cada estación de medida, ésta se muestra de manera simplificada en la Figura 13. El sistema está basado en un microcontrolador AVR8 (Atmel) de bajo coste y reducido consumo energético. La conexión a la red radio IEEE 802.15.4 se realiza mediante una capa software que proporciona acceso al API de un módulo XBee S1, físicamente conectado mediante una UART estándar.

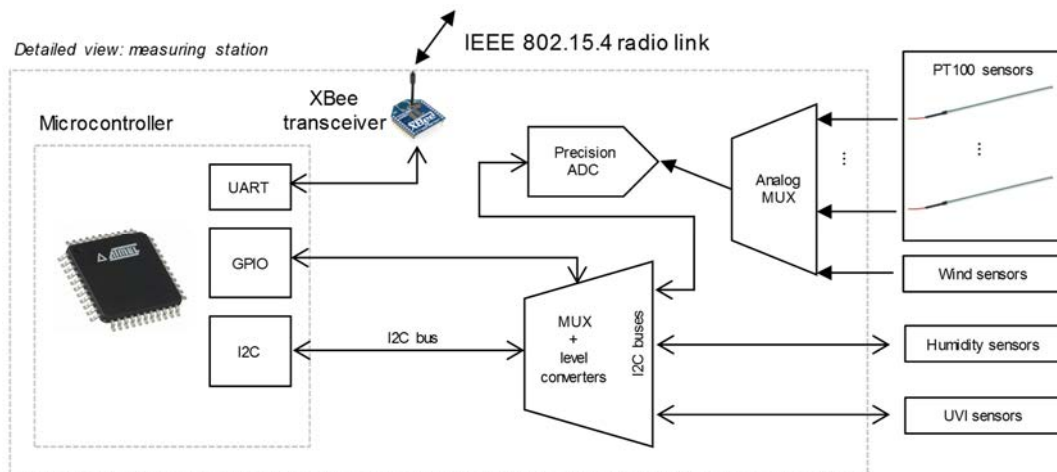


Figura 13. Módulos electrónicos que componen cada una de las estaciones de medida.

El resto de sensores son accesibles mediante un bus I2C, que ha sido multiplexado de forma que se puedan leer multitud de dispositivos conectados simultáneamente en el mismo bus. Se han incluido conversores de voltaje para hacer compatibles dispositivos con niveles lógicos tanto de 5V como de 3.3V. Finalmente, los sensores analógicos (sondas PT100 para temperatura, sensores de viento del tipo “hot wire”) son adquiridos, tras la correspondiente etapa analógica, por un ADC (Analog-to-digital converter) de alta precisión, que proporciona una resolución del orden de 1 μ V.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS

4.1.1 Limitaciones en resultados

El análisis de datos se ha realizado teniendo en cuenta la hora UTC (Coordinated Universal Time/Hora Universal Coordinada). Esto es importante ya que la hora local en Almería sería una hora más en horario de invierno y dos horas más en horario de verano.

Las velocidades de viento alcanzadas en el interior del invernadero están entre los valores 0.2 y $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Igualmente, añadir que se requiere de un análisis estadístico bastante profundo para analizar las nubes de puntos de los sensores de viento. Como la velocidad relativa coincide con la velocidad absoluta (estaciones de medición estáticas), dichos puntos no influyen en el cálculo de la temperatura operativa (t_o) y se ha optado por no tratarlos (no es necesario), considerando “convección natural” y un coeficiente “A” de valor 0.6 (Tabla 2; ISO, 1998).

Los datos de viento de la estación exterior han sido descartados por su alta variabilidad y excesivo “ruido”. Por esta razón no se han podido realizar las gráficas de temperatura radiante y operativa exteriores.

Respecto a la radiación ultravioleta (UVI), ésta se comenzó a medir con unos sensores que tuvieron que ser sustituidos a finales de octubre por presentar muy poca precisión y fallos graves de funcionamiento, por lo que sólo se tienen desde noviembre hasta el 28/02/2017. En el exterior, estos nuevos sensores sólo funcionaron hasta mediados de enero de 2017. Sólo se observó horizontalmente con sensores en la barra superior, no evaluándose verticalmente.

Por último, el mes de febrero en el interior del invernadero hubo cortes de suministro energético importantes por lo que los datos se representan con el día medio mensual sin quincenas.

4.1.2 Gráficas del día medio quincenal/mensual de cada parámetro en el interior del invernadero (ta, tg, hr, tr, to y ultravioleta)

DEL 16 AL 30 DE SEPTIEMBRE DE 2016

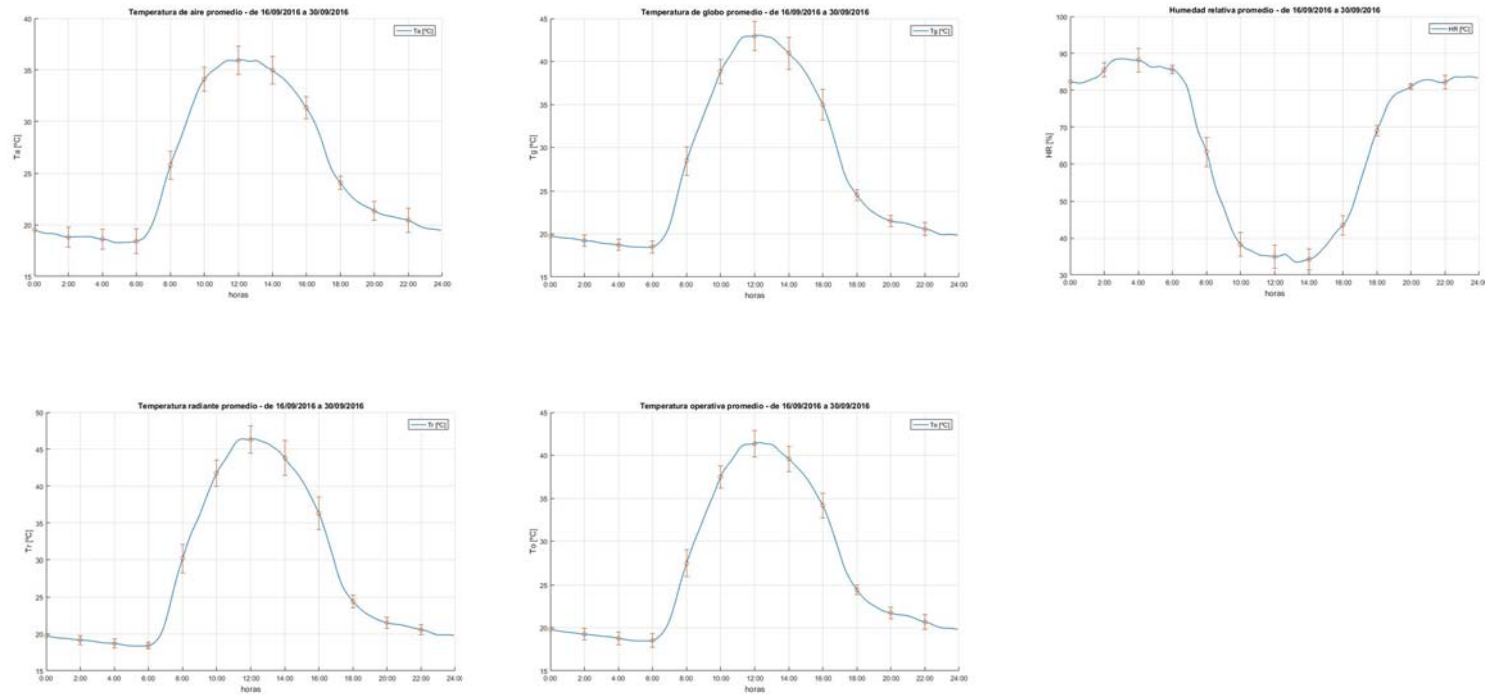


Figura 14. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 16 al 30/09/2016).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (37°), de globo (44°), radiante media (47.5°) y operativa (43°) máxima sobre las 12 h. Igualmente, pero referido a temperatura de aire (17°), de globo (17°), radiante media (17°) y operativa (17°) mínima, sobre las 6 h. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 4 h con un 91% y mínima sobre las 14 h con el 32% (Figura 14).

DEL 1 AL 15 DE OCTUBRE DE 2016

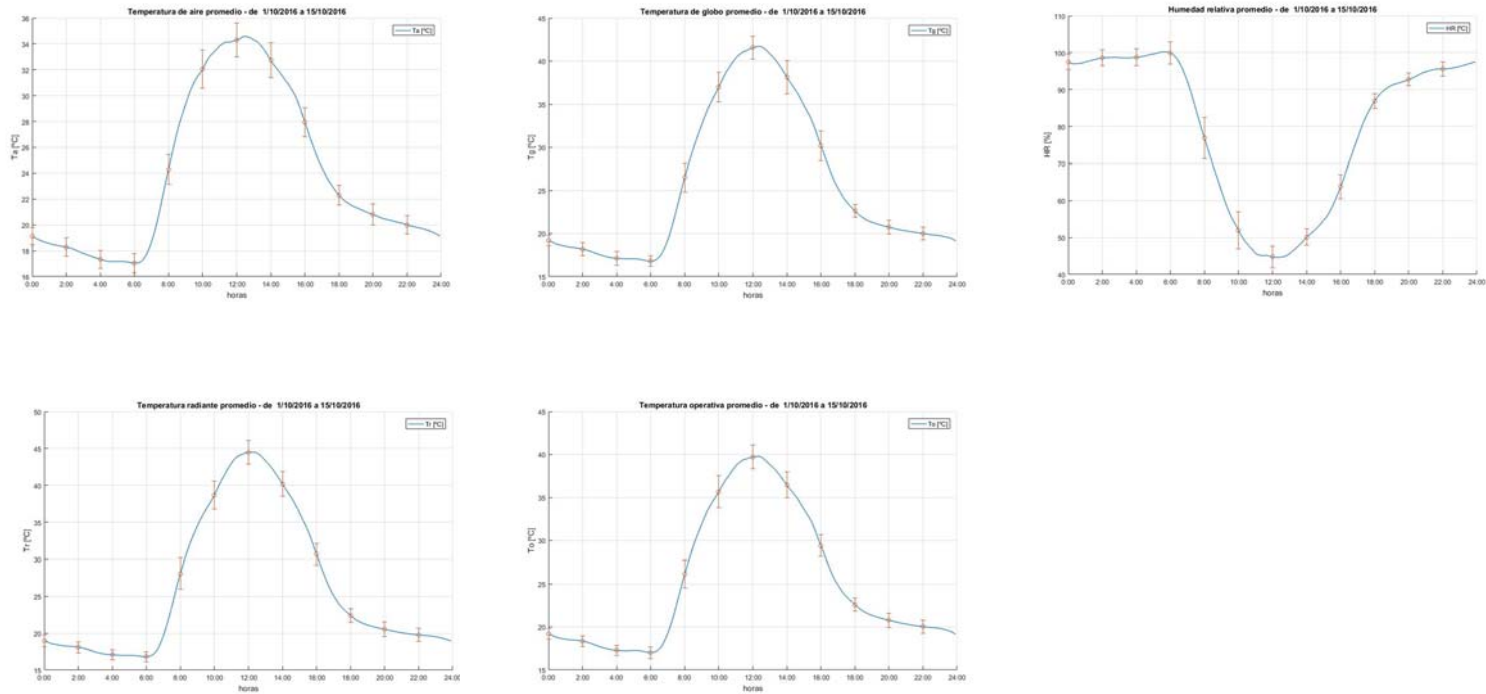


Figura 15. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 1 al 15/10/2016).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (36°), de globo (43°), radiante media (46°) y operativa (41°) máxima sobre las 12 h. Igualmente, pero referido a temperatura de aire (16°), de globo (16°), radiante media (16°) y operativa (16°) mínima, sobre las 6 h. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 6 h con más del 100% y mínima sobre las 14 h con el 41% (Figura 15).

DEL 16 AL 31 DE OCTUBRE DE 2016

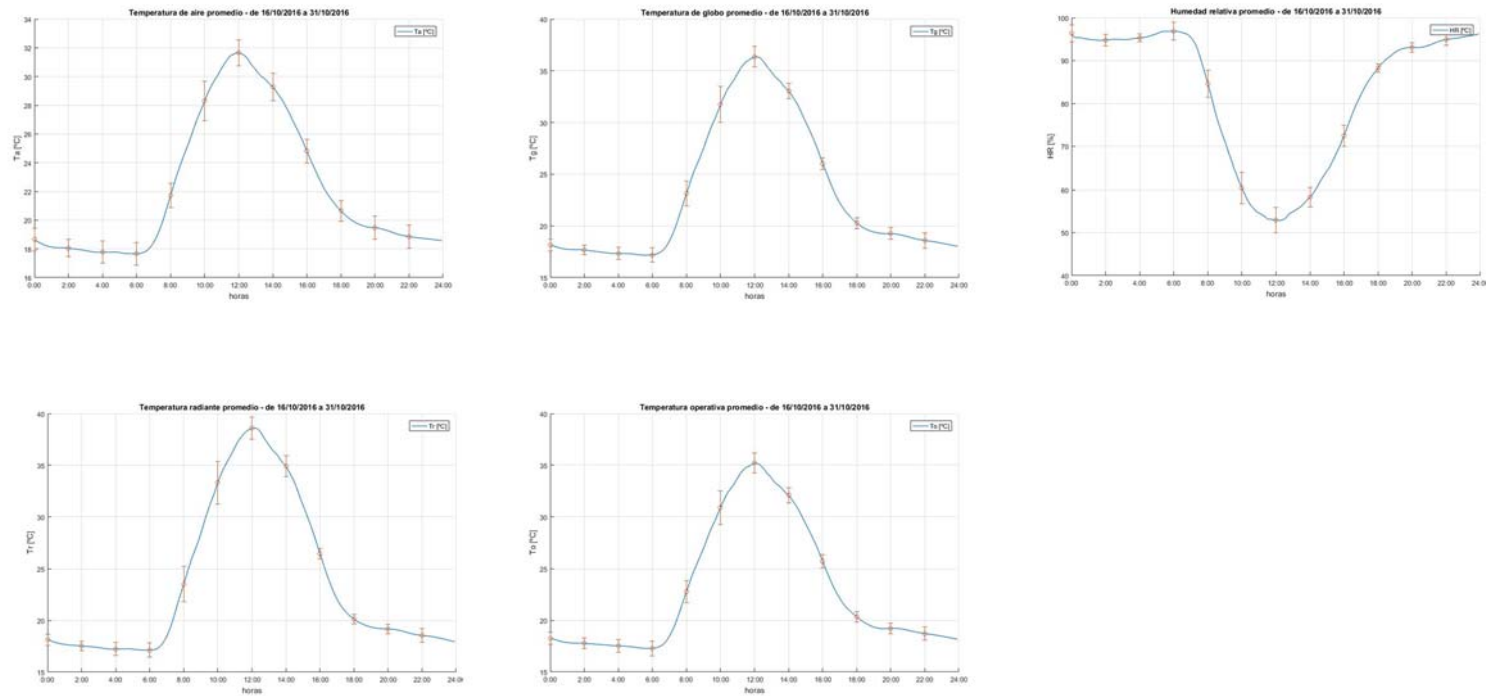


Figura 16. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 16 al 31/10/2016).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (32.5°), de globo (37.5°), radiante media (39.5°) y operativa (36°) máxima sobre las 12 h. Igualmente, pero referido a temperatura de aire (17°), de globo (17°), radiante media (17°) y operativa (17°) mínima, sobre las 6 h. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 6 h con más del 100% y mínima sobre las 12 h con el 56% (Figura 16).

DEL 1 AL 15 DE NOVIEMBRE DE 2016

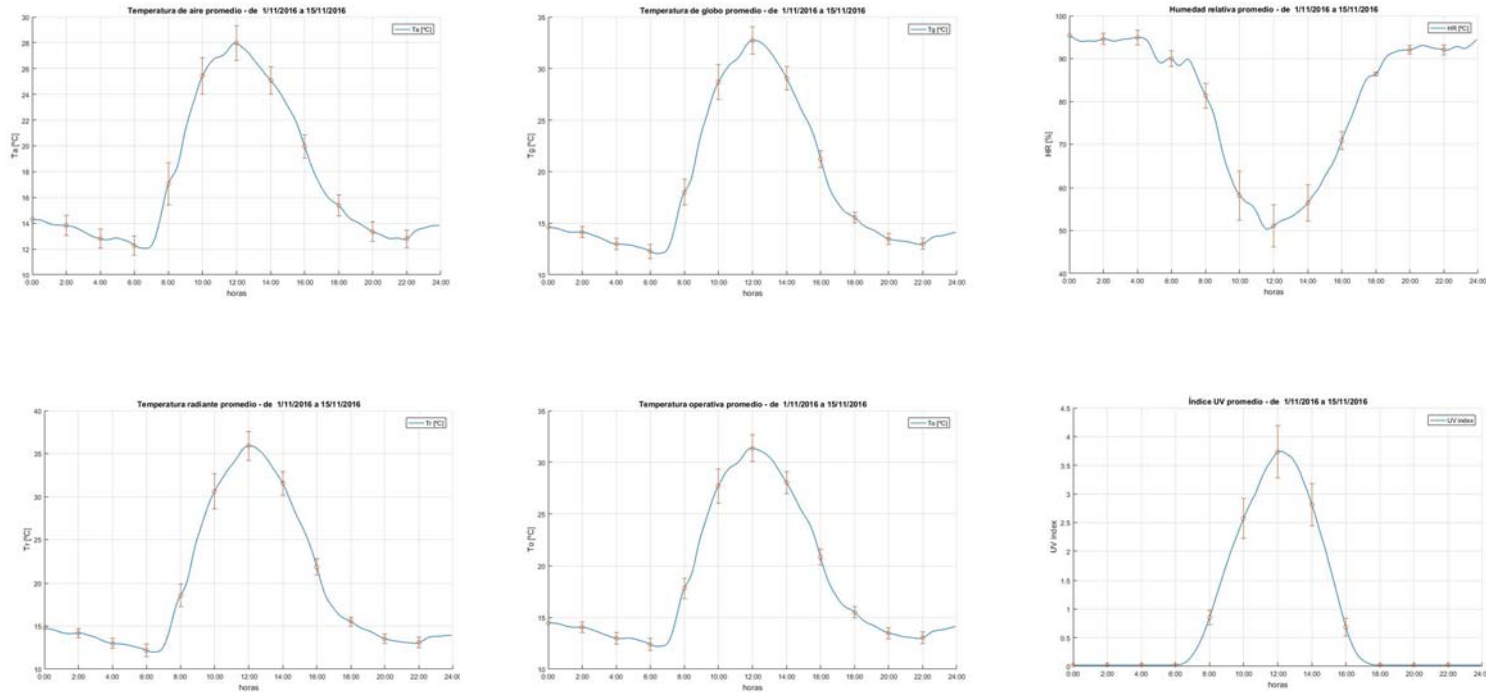


Figura 17. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 1 al 15/11/2016).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (29°), de globo (34°), radiante media (37.5°) y operativa (33.5°) máxima sobre las 12 h. Igualmente, pero referido a temperatura de aire (12°), de globo (12°), radiante media (12°) y operativa (12°) mínima, sobre las 6 h. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 4 h con un 96% y mínima sobre las 12 h con un 45%. Por último, el índice UV alcanzó valores superiores a 4 sobre las 12 h (Figura 17).

DEL 16 AL 30 DE NOVIEMBRE DE 2016

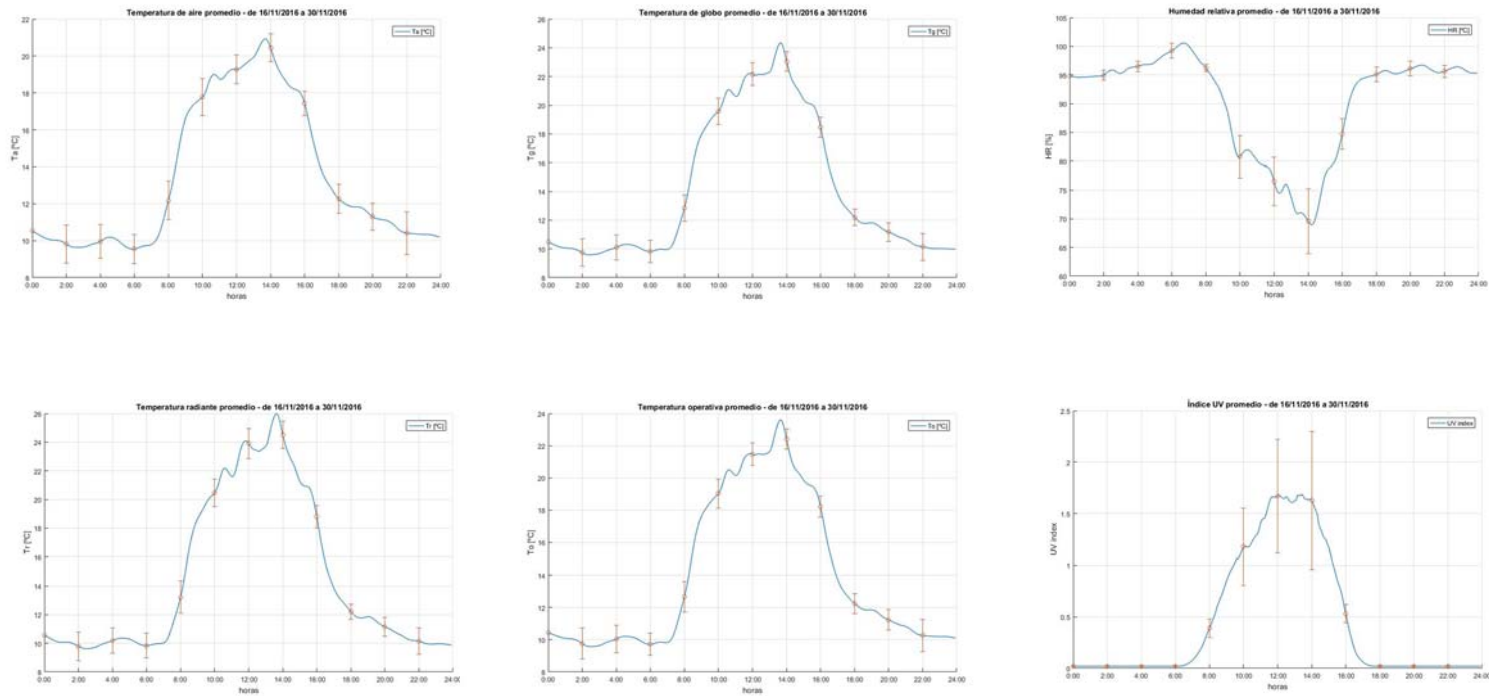


Figura 18. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 16 al 30/11/2016).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (21°), de globo (24.5°), radiante media (26°) y operativa (23.5°) máxima sobre las 14 h. Igualmente, pero referido a temperatura de aire (8.5°), de globo (8.5°), radiante media (8.5°) y operativa (8.5°) mínima, entre las 2 y las 6 h. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 6 h con más del 100% y mínima sobre las 14 h con un 64%. Por último, el índice UV alcanzó valores superiores a 2.25 sobre las 14 h (Figura 18).

DEL 1 AL 15 DE DICIEMBRE DE 2016

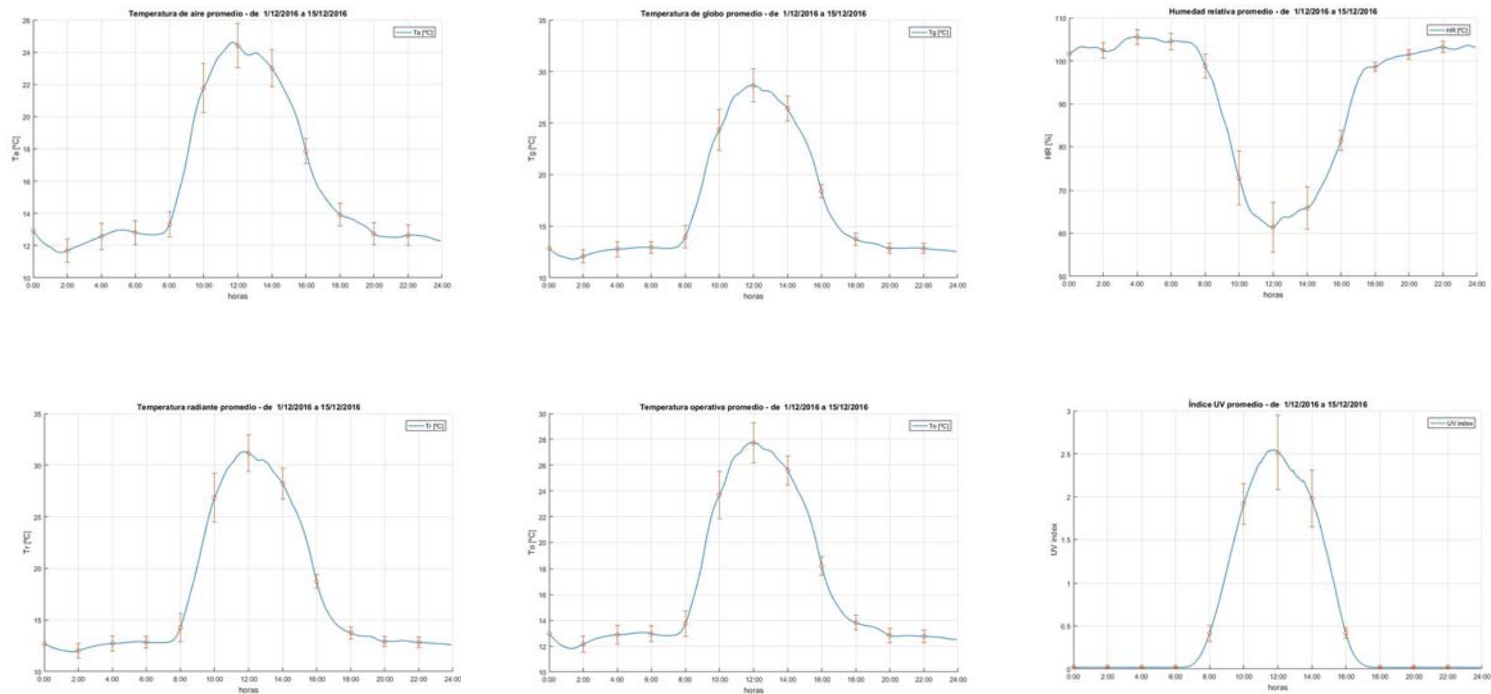


Figura 19. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 1 al 15/12/2016).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (26°), de globo (30.5°), radiante media (32.5°) y operativa (29°) máxima sobre las 12 h. Igualmente, pero referido a temperatura de aire (11.5°), de globo (11.5°), radiante media (11.5°) y operativa (11.5°) mínima, sobre las 2 h. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 4 h con más del 100% y mínima sobre las 12 h con un 55%. Por último, el índice UV alcanzó valores cercanos a 3 sobre las 12 h (Figura 19).

DEL 16 AL 31 DE DICIEMBRE DE 2016

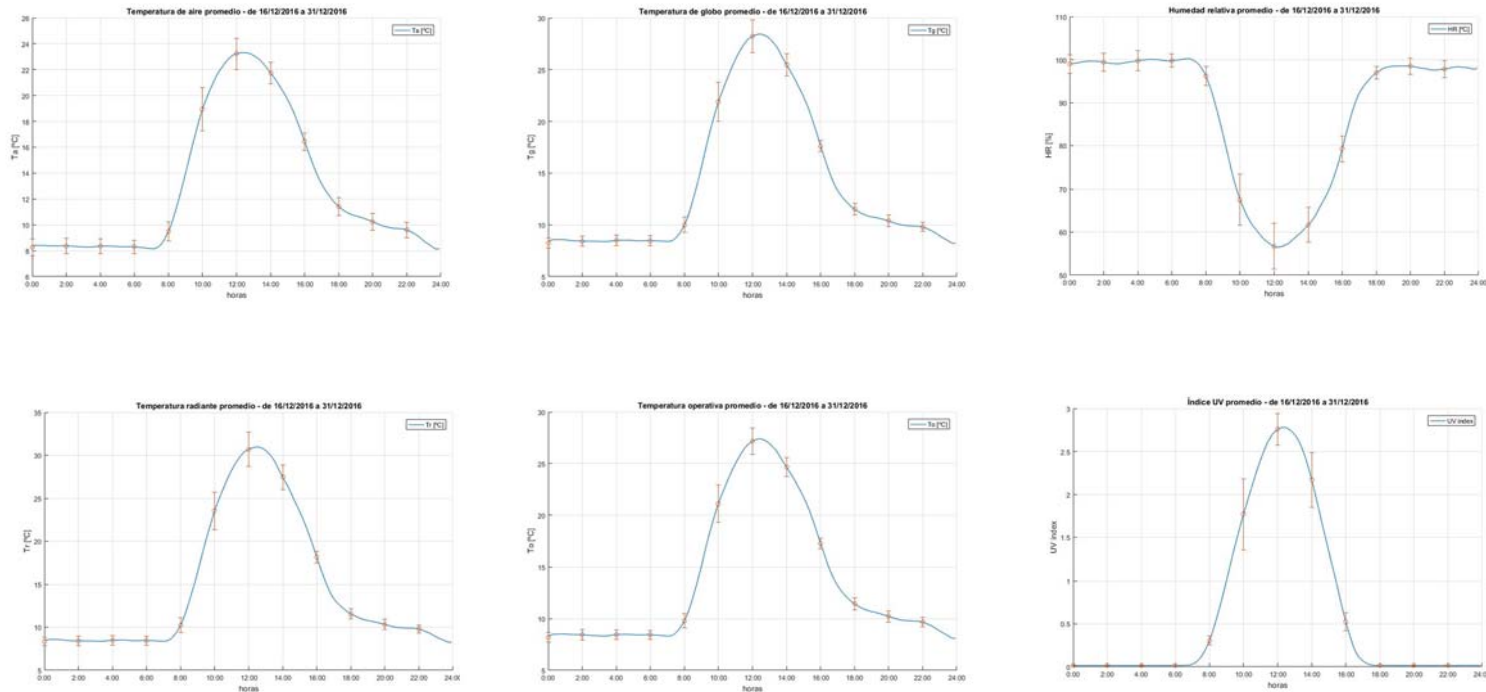


Figura 20. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 16 al 31/12/2016).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (24.5°), de globo (30°), radiante media (32.5°) y operativa (28°) máxima sobre las 12 h. Igualmente, pero referido a temperatura de aire (7.5°), de globo (7.5°), radiante media (7.5°) y operativa (7.5°) mínima, sobre las 6 h. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 4 h con más del 100% y mínima sobre las 12 h con un 55%. Por último, el índice UV alcanzó valores cercanos a 3 sobre las 12 h (Figura 20).

DEL 1 AL 15 DE ENERO DE 2017

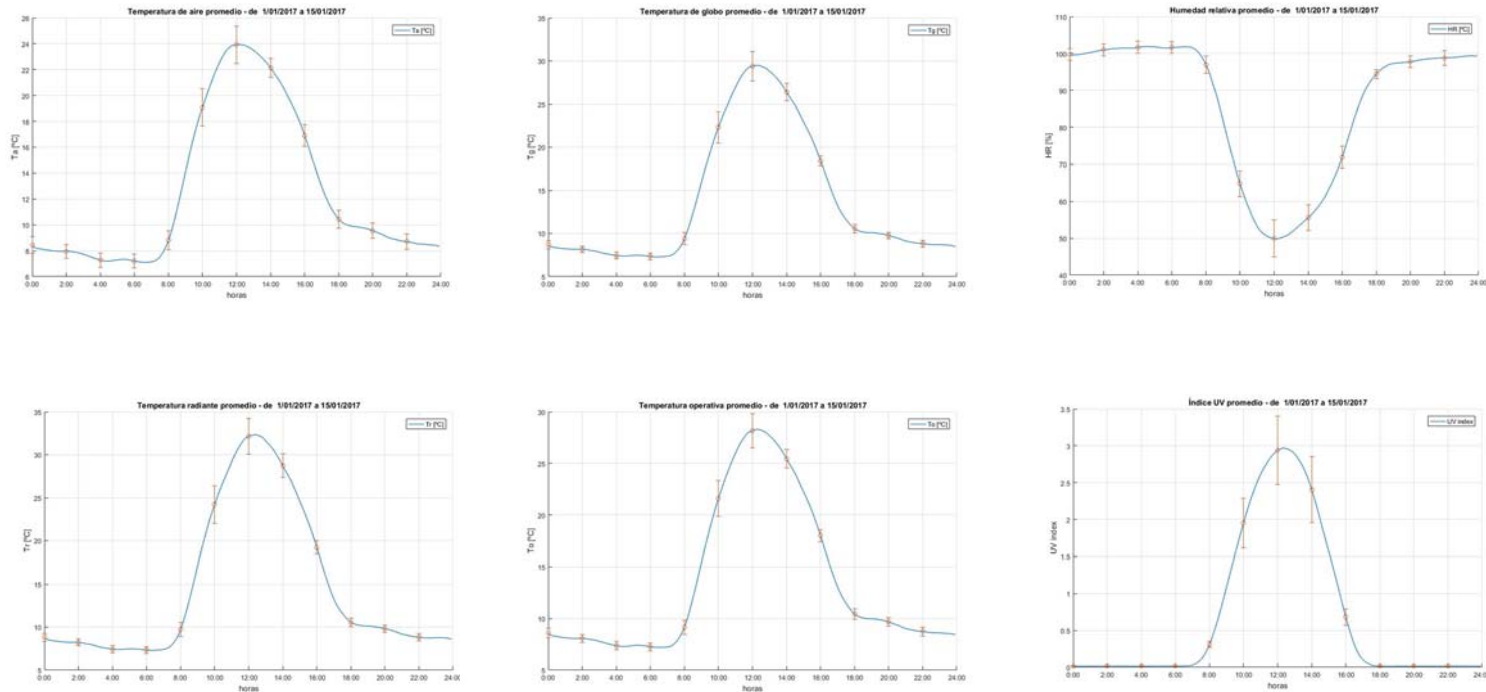


Figura 21. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 1 al 15/01/2017).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (25.5°), de globo (31.5°), radiante media (34.5°) y operativa (30°) máxima sobre las 12 h. Igualmente, pero referido a temperatura de aire (7.5°), de globo (7.5°), radiante media (7.5°) y operativa (7.5°) mínima, sobre las 6 h. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 2-4 h con más del 100% y mínima sobre las 12 h con un 45%. Por último, el índice UV alcanzó valores cercanos a 3.5 sobre las 12 h.

DEL 16 AL 31 DE ENERO DE 2017

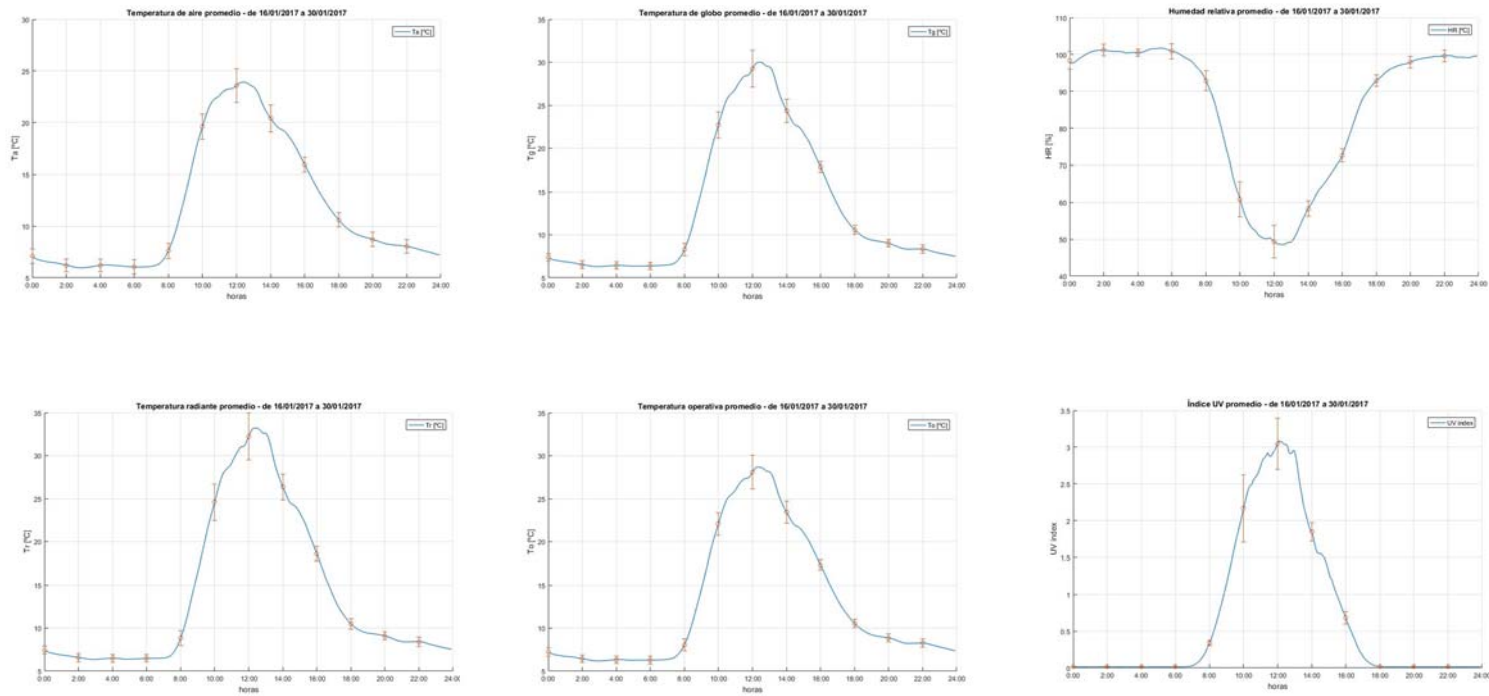


Figura 22. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 16 al 31/01/2017).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (25.5°), de globo (32°), radiante media (35°) y operativa (30°) máxima sobre las 12 h. Igualmente, pero referido a temperatura de aire (5.5°), de globo (5.5°), radiante media (5.5°) y operativa (5.5°) mínima, sobre las 2-6 h. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 2-6 h con más del 100% y mínima sobre las 12 h con un 45%. Por último, el índice UV alcanzó valores cercanos a 3.5 sobre las 12 h (Figura 22).

DEL 1 AL 28 DE FEBRERO DE 2017

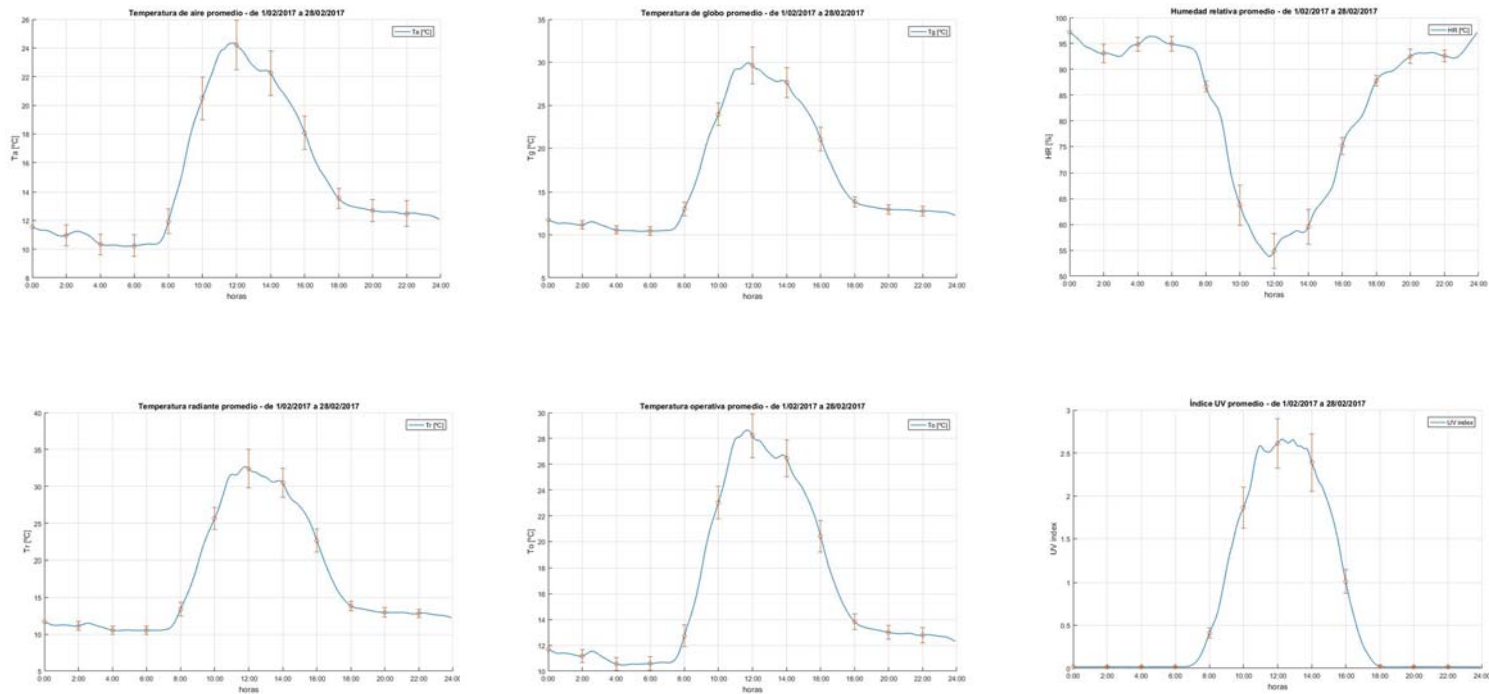


Figura 23. Gráficas de parámetros ambientales en el interior del invernadero (del 1 al 28/02/2017).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (26°), de globo (32°), radiante media (35°) y operativa (30°) máxima sobre las 12 h. Igualmente, pero referido a temperatura de aire (9°), de globo (9°), radiante media (9°) y operativa (9°) mínima, sobre las 4-6 h. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 0-6 h con más del 95% y mínima sobre las 12 h con un 51%. Por último, el índice UV alcanzó valores cercanos a 3 sobre las 12 h (Figura 23).

4.1.3 Gráficas del día medio quincenal/mensual de cada parámetro en el exterior del invernadero (ta, tg, hr y ultravioleta)

DEL 16 AL 30 DE SEPTIEMBRE DE 2016

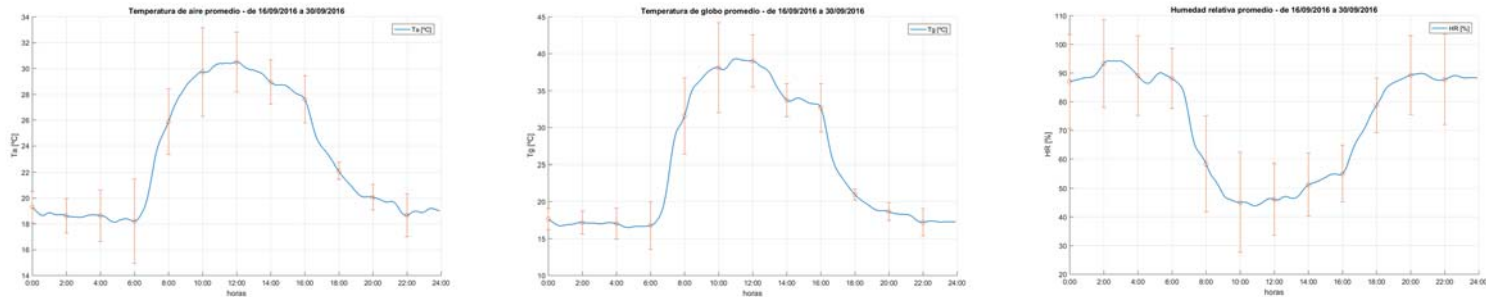


Figura 24. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 16 al 30/09/2016).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (33°) y de globo (44°) máximas entre las 10-12 h. Igualmente, pero referido a temperatura de aire y de globo mínima, se llega alrededor de los 15° sobre las 6 h. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 2-4 h con más del 100% y mínima sobre las 10 h con un 29% (Figura 24).

DEL 1 AL 15 DE OCTUBRE DE 2016

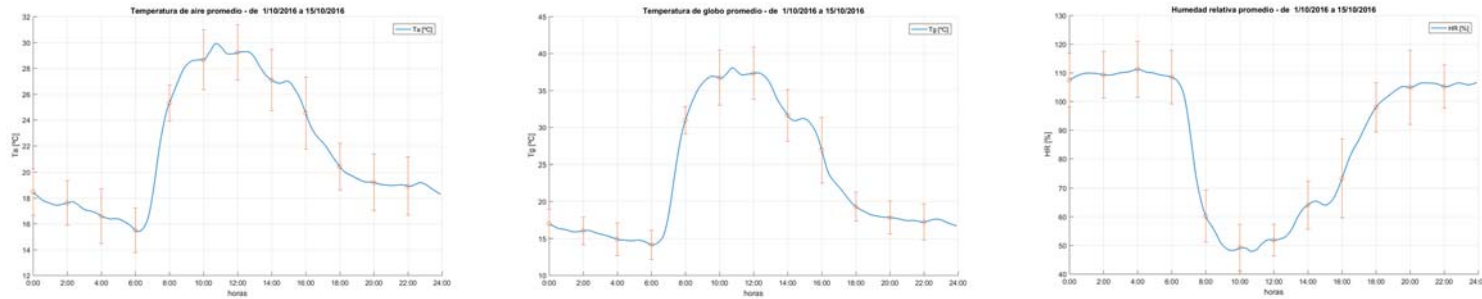


Figura 25. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 16 al 15/10/2016).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (31.5°) y de globo (41.5°) máximas a las 12 h. Igualmente, pero referido a temperatura de aire (13.9°) y de globo (12.5°) mínima, se produce sobre las 6 h. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 0-7 h con más del 100% y mínima sobre las 10 h con un 40% (Figura 25).

DEL 16 AL 31 DE OCTUBRE DE 2016

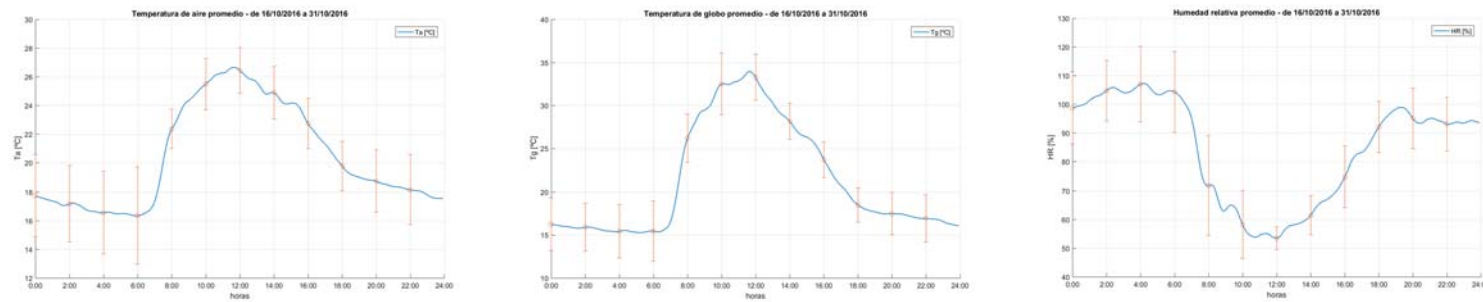


Figura 26. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 16 al 31/10/2016).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (28°) y de globo (36°) máximas a las 10-12 h. Igualmente, pero referido a temperatura de aire (13°) y de globo (12°) mínima, se produce sobre las 6 h. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 0-7 h con más del 100% y mínima sobre las 10 h con un 45.5% (Figura 26).

DEL 1 AL 15 DE NOVIEMBRE DE 2016

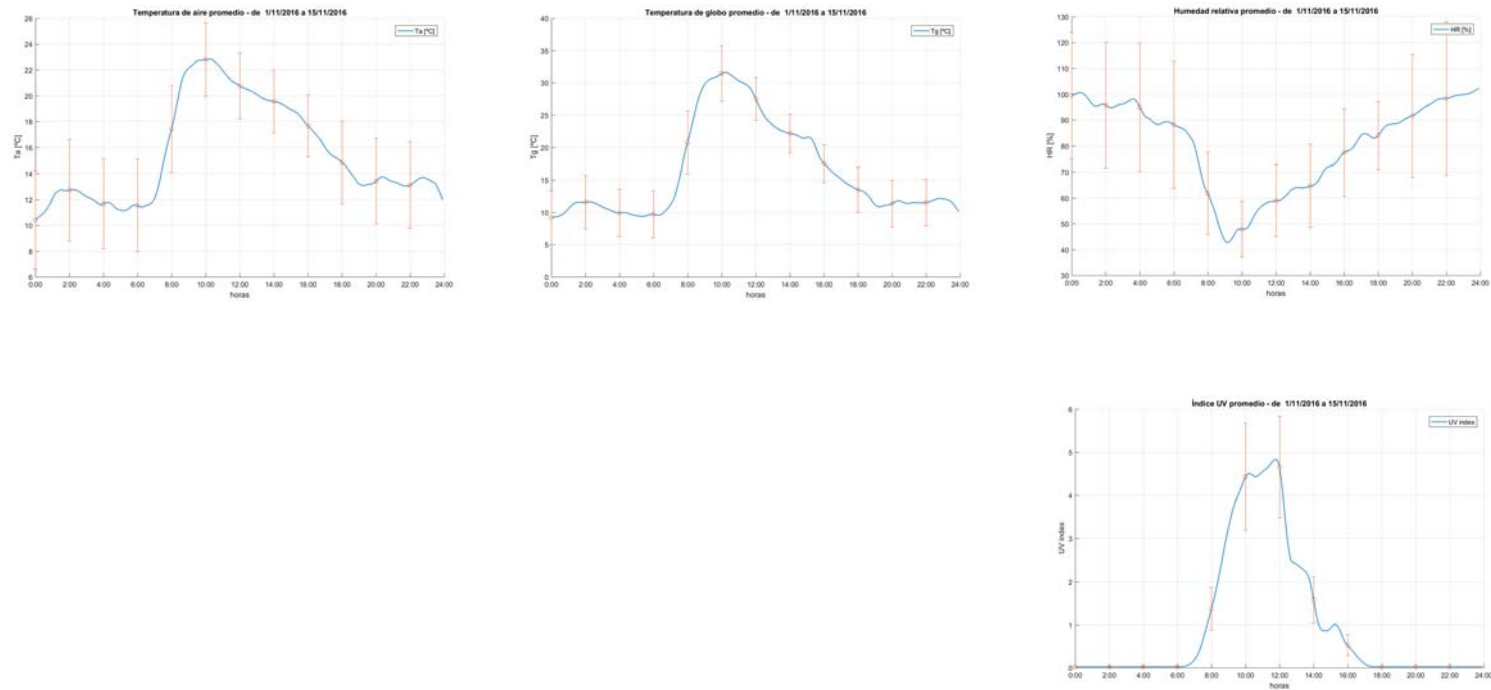


Figura 27. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 1 al 15/11/2016).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (25.9°) y de globo (35.5°) máximas a las 10 h. Igualmente, pero referido a temperatura de aire (8°) y de globo (6°) mínima, se produce sobre las 6 h. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 0-6 h con más del 100% y mínima sobre las 10 h con un 39%. Por último, el índice UV alcanzó valores cercanos a 6 sobre las 12 h (Figura 27).

DEL 16 AL 30 DE NOVIEMBRE DE 2016

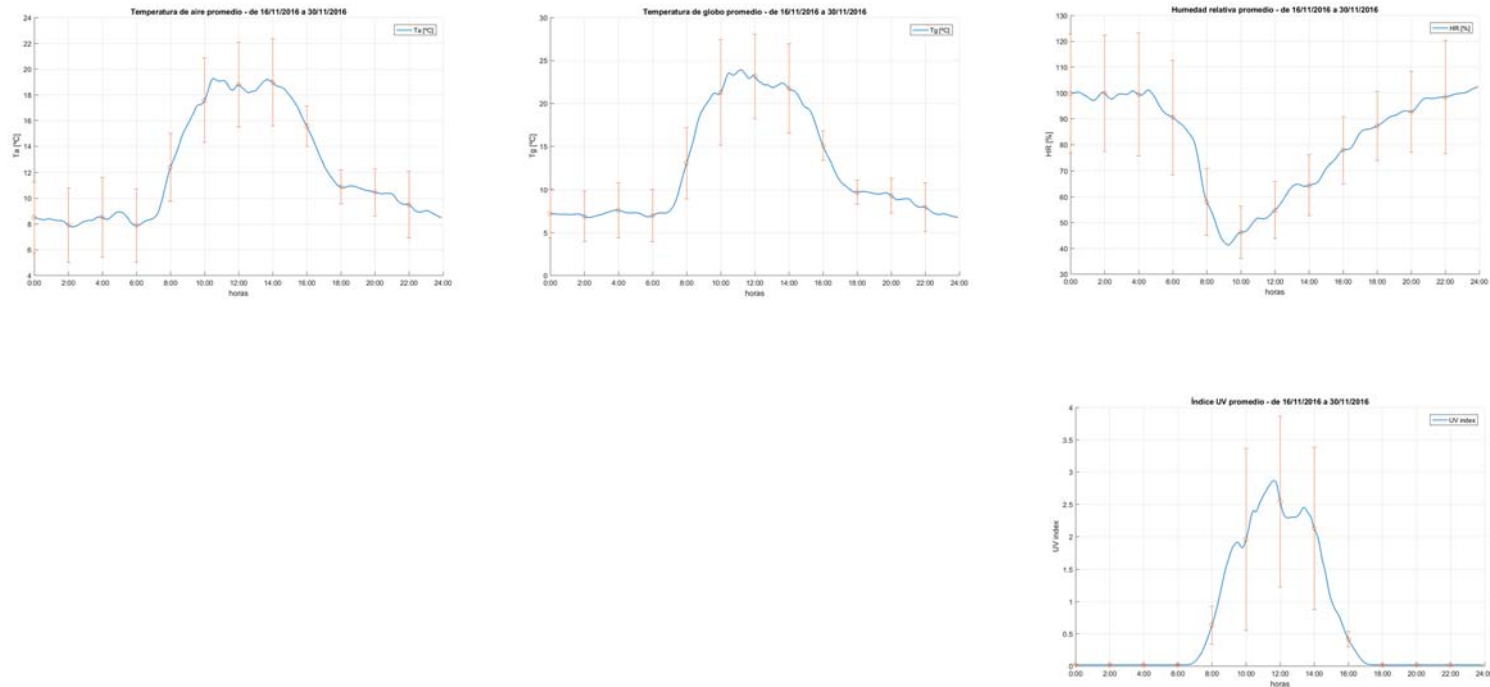


Figura 28. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 16 al 30/11/2016).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (22.5°) y de globo (28°) máximas a las 12-14 h. Igualmente, pero referido a temperatura de aire (5°) y de globo (4°) mínima, se produce sobre las 6 h. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 0-7 h con más del 100% y mínima sobre las 10 h con un 36%. Por último, el índice UV alcanzó valores cercanos a 4 sobre las 12 h (Figura 28).

DEL 1 AL 15 DE DICIEMBRE DE 2016

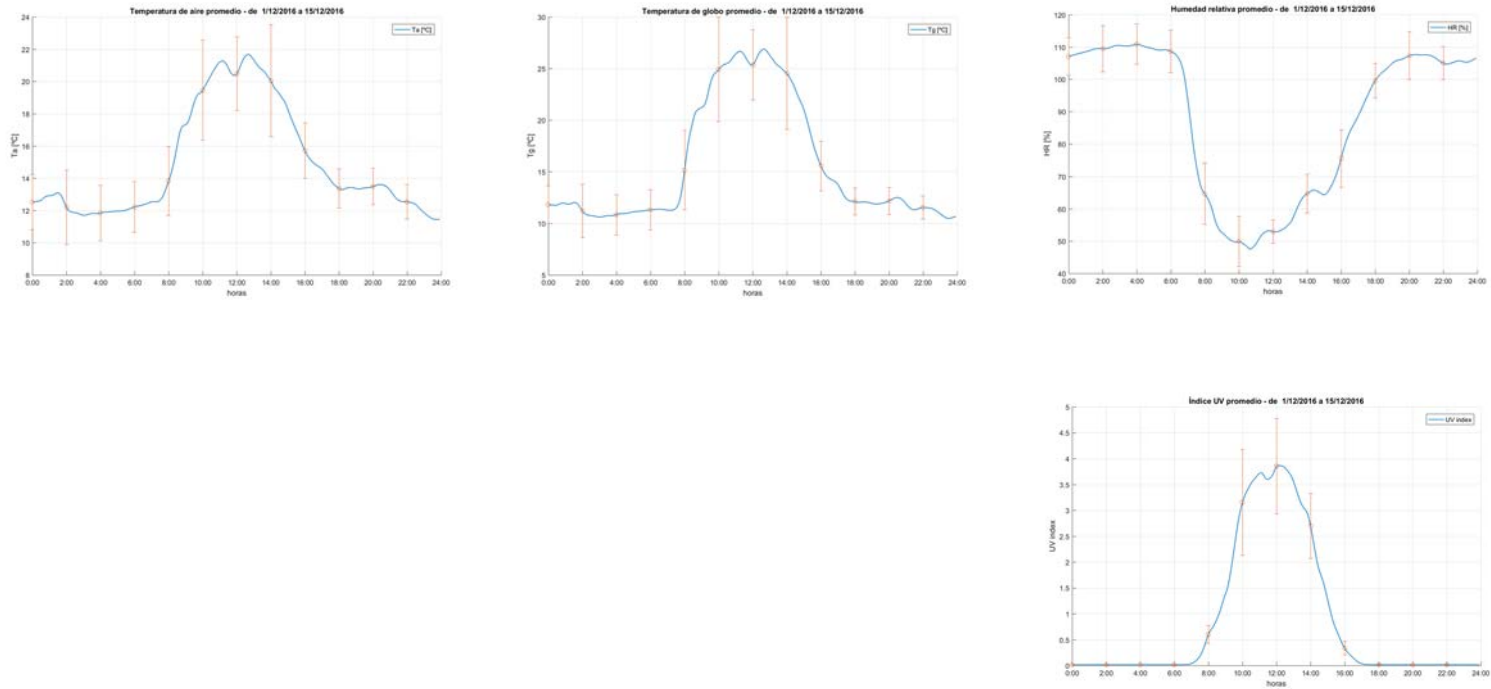


Figura 29. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 1 al 15/12/2016).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (23.5°) y de globo (30°) máximas a las 14 h y 10-14 h, respectivamente. Igualmente, pero referido a temperatura de aire (10°) y de globo (9°) mínima, se produce sobre las 2 h. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 0-7 h con más del 100% y mínima sobre las 10 h con un 41%. Por último, el índice UV alcanzó valores cercanos a 5 sobre las 12 h (Figura 29).

DEL 16 AL 31 DE DICIEMBRE DE 2016

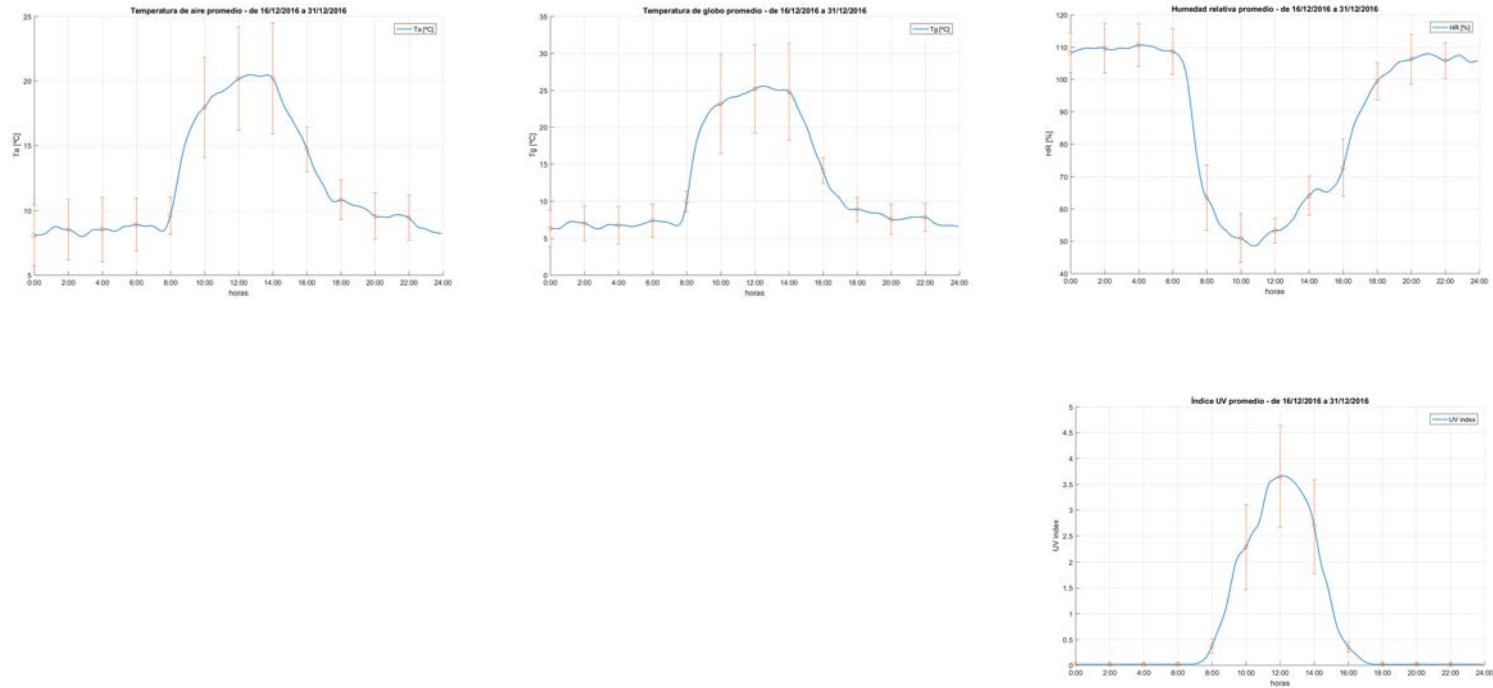


Figura 30. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 16 al 31/12/2016).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (24.5°) y de globo (31.5°) máximas a las 14. Igualmente, pero referido a temperatura de aire (6.5°) y de globo (4.5°) mínima, se produce sobre las 4 h. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 0-7 h con más del 100% y mínima sobre las 10 h con un 41%. Por último, el índice UV alcanzó valores cercanos a 4.5 sobre las 12 h (Figura 30).

DEL 1 AL 15 DE ENERO DE 2017

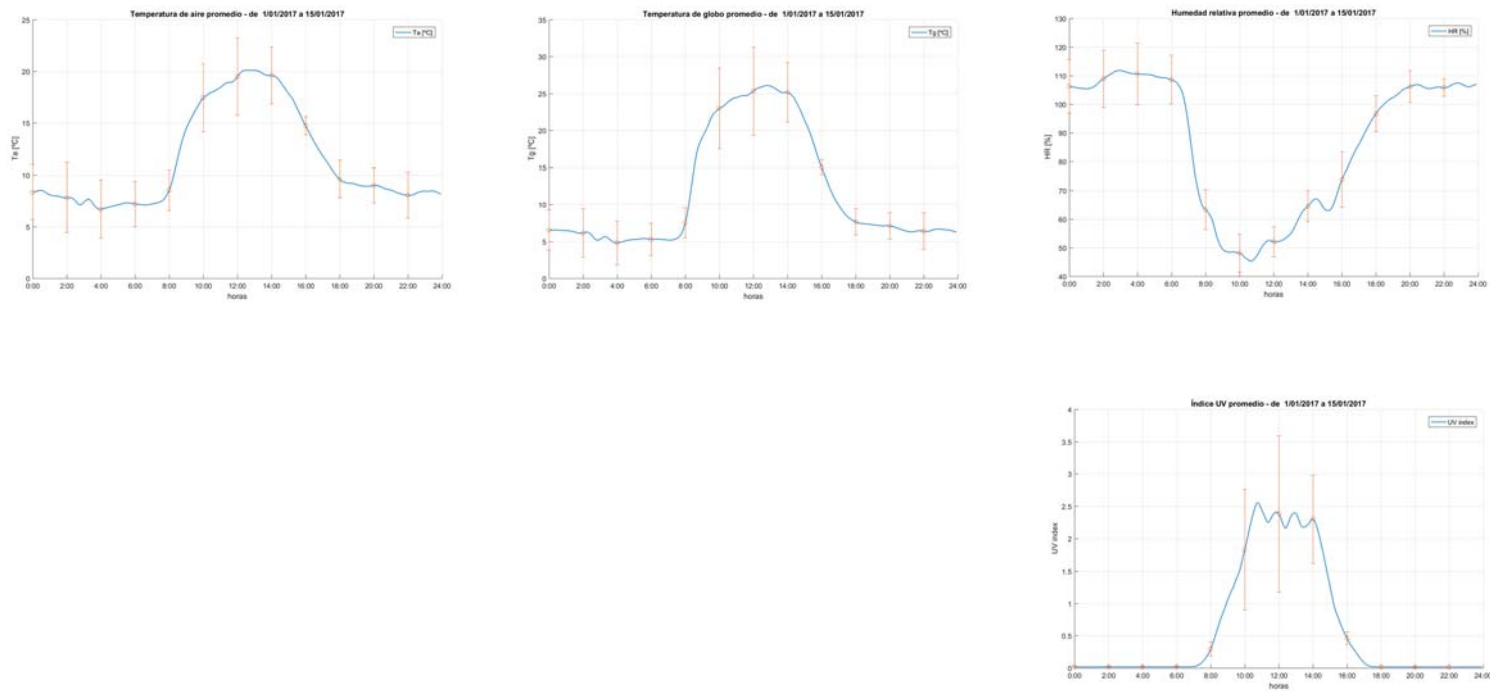


Figura 31. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 1 al 15/01/2017).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (23º) y de globo (31º) máximas a las 12 h. Igualmente, pero referido a temperatura de aire (4º) y de globo (2º) mínima, se produce sobre las 4 h. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 0-7 h con más del 100% y mínima sobre las 10 h con un 41%. Por último, el índice UV alcanzó valores cercanos a 3.5 sobre las 12 h (Figura 31).

DEL 16 AL 31 DE ENERO DE 2017

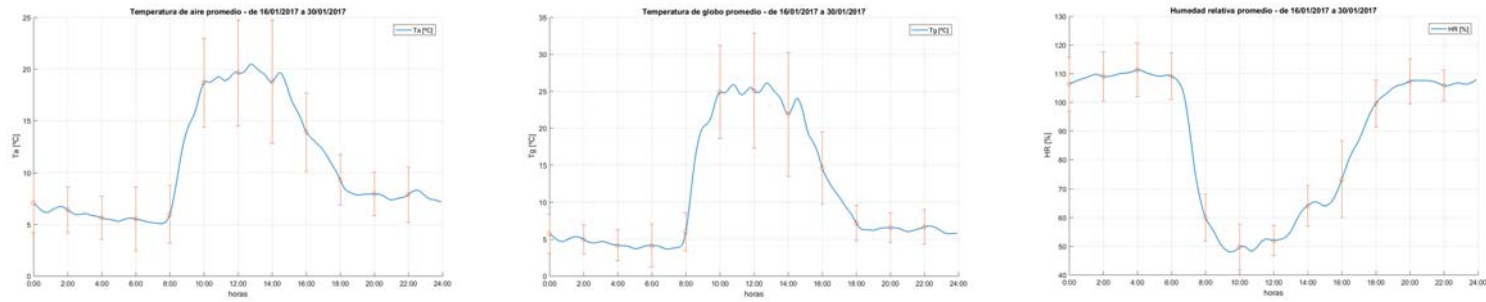


Figura 32. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 16 al 31/01/2017).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (24.9°) y de globo (32.5°) máximas a las 12 h. Igualmente, pero referido a temperatura de aire (2.5°) y de globo (1°) mínima, se produce sobre las 6 h. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 0-7 h con más del 100% y mínima sobre las 10 h con un 41%. A partir de este periodo los sensores externos de UVI dejaron de funcionar, posiblemente a las condiciones meteorológicas tan duras (Figura 32).

DEL 1 AL 28 DE FEBRERO DE 2017

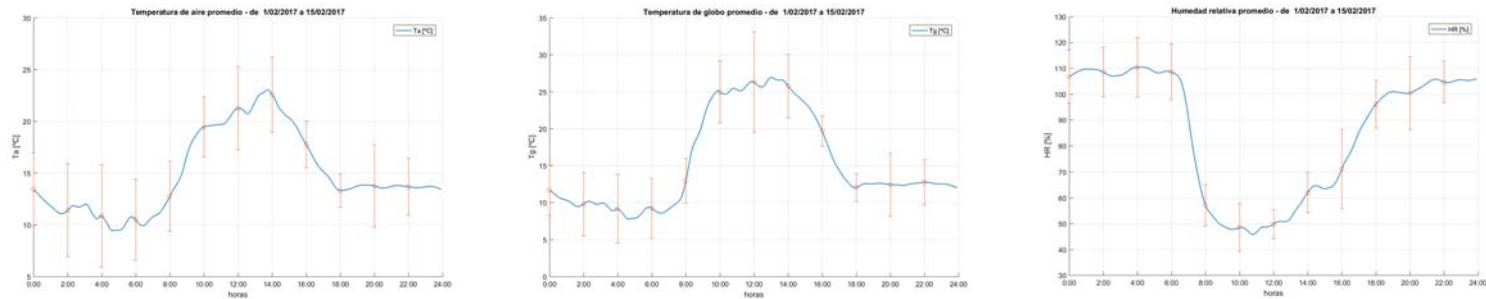


Figura 33. Gráficas de parámetros ambientales en el exterior (del 1 al 28/02/2017).

El día medio de este intervalo se caracteriza por alcanzar la temperatura de aire (26°) y de globo (33°) máximas a las 14 y 12 h, respectivamente. Igualmente, pero referido a temperatura de aire (6°) y de globo (4.9°) mínima, se produce sobre las 6 y 4 h, respectivamente. Respecto a la humedad relativa, fue máxima sobre las 0-7 h con más del 100% y mínima sobre las 10 h con un 40%. No se registraron datos de UVI (Figura 33).

4.1.4 Vídeos 3D desde el 15/09/2016 hasta el 28/02/2017

En el anexo IV se encuentra un “DVD” con los siguientes vídeos del interior del invernadero:

- a) Temperatura de aire.
- b) Temperatura de globo.
- c) Temperatura radiante media.
- d) Temperatura operativa.

Todos estos vídeos constan de 700000 datos por estación, es decir, unos ocho millones cuatrocientos mil datos ($700000 \times 12 = 8400000$).

Los videos siguen las indicaciones de ISO 7726 (ISO, 1998) en un invernadero comercial respecto al estudio de la heterogeneidad vertical y horizontal de la temperatura de aire, temperatura de globo, temperatura radiante media y temperatura operativa.

4.1.5 Homogeneidad o heterogeneidad del ambiente

Las Figuras 34 a 37 muestran los valores de los parámetros climáticos medidos por una única estación (estación de medida nº 5) a lo largo de una semana, del 27 de noviembre al 3 de diciembre de 2016.

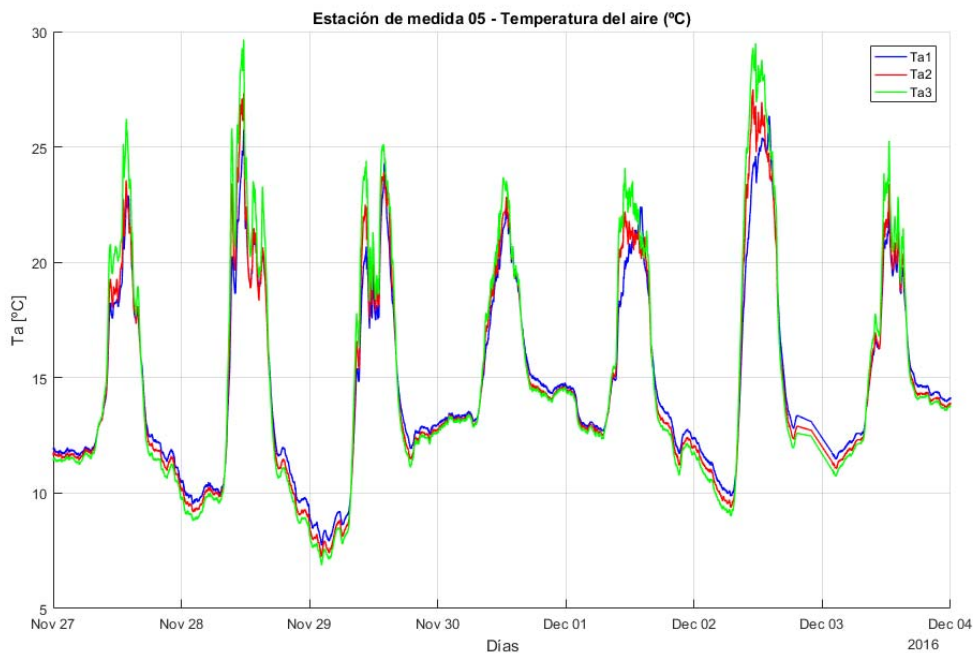


Figura 34. Temperatura del aire medida a tres alturas por la estación de medida nº 5, del 27 de noviembre al 3 de diciembre de 2016.

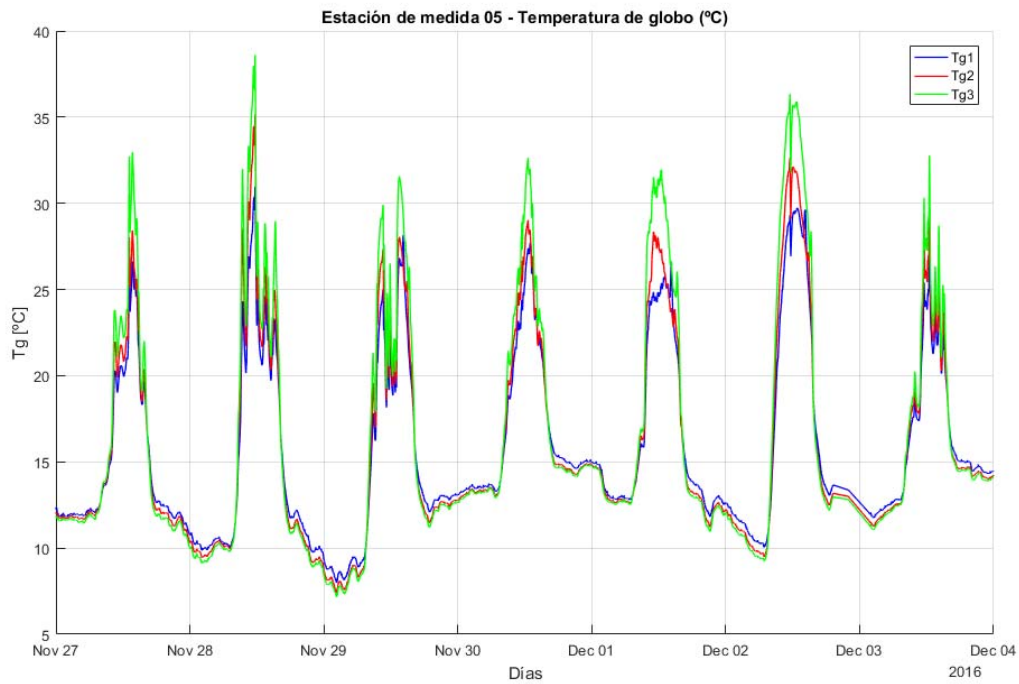


Figura 35. Temperatura de globo medida a tres alturas por la estación de medida nº 5, del 27 de noviembre al 3 de diciembre de 2016.

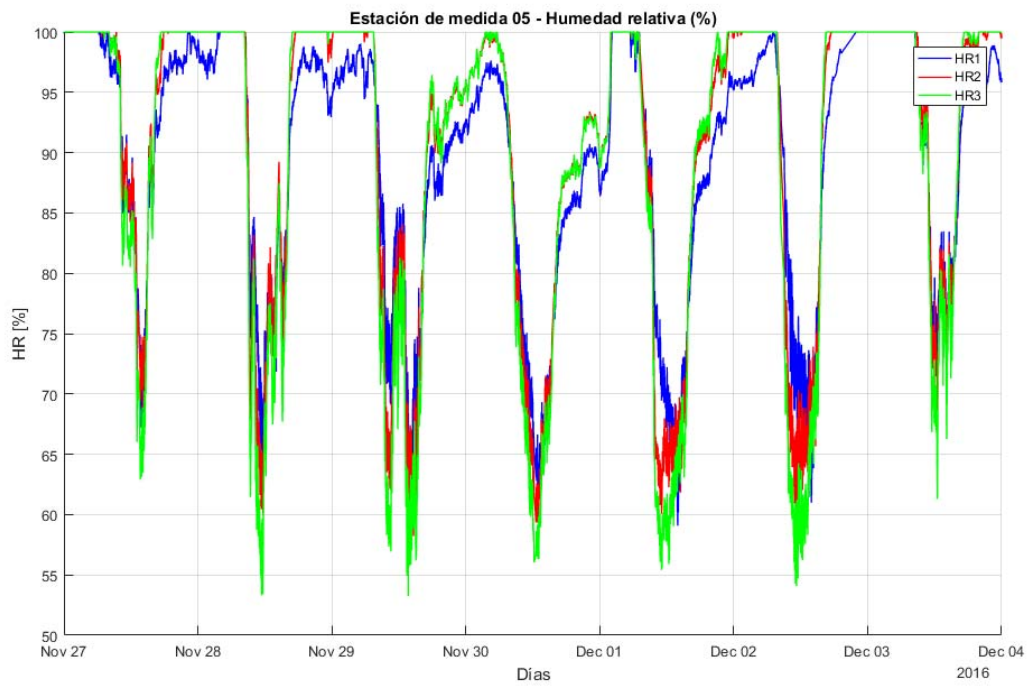


Figura 36. Humedad relativa del aire medida a tres alturas por la estación de medida nº 5, del 27 de noviembre al 3 de diciembre de 2016.

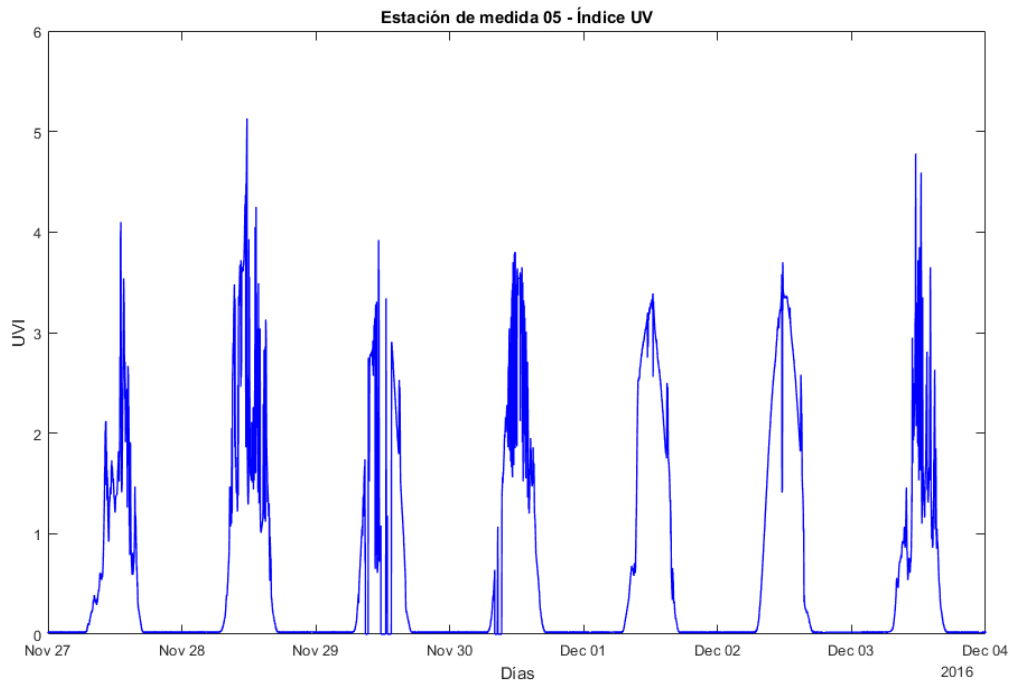


Figura 37. Radiación ultravioleta medida por la estación de medida nº 5, del 27 de noviembre al 3 de diciembre de 2016.

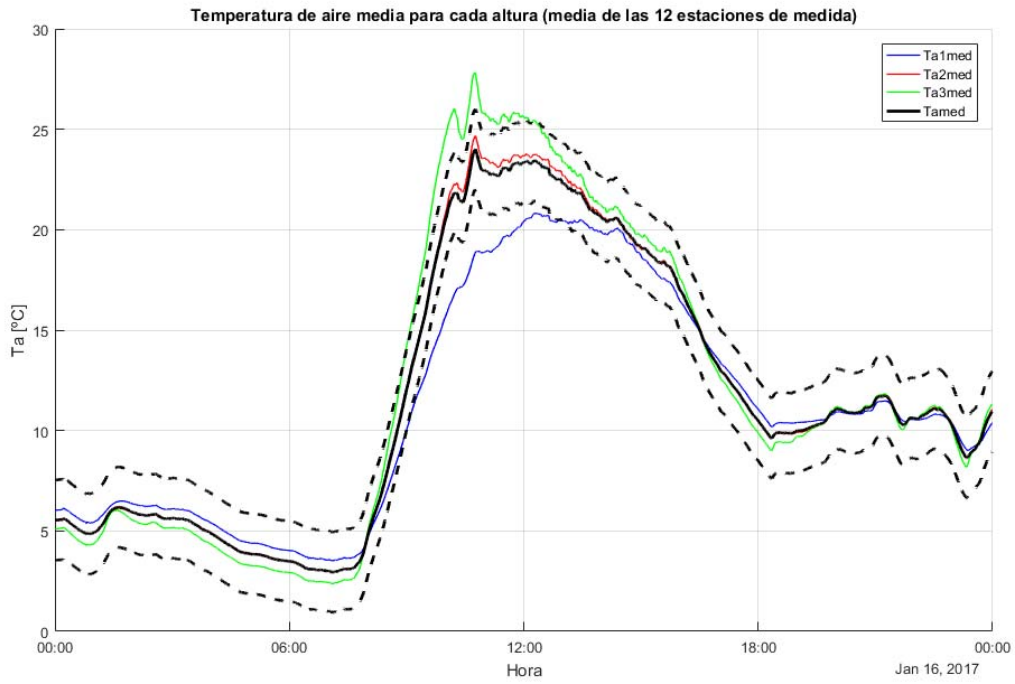
A pesar de que es invierno, la temperatura del aire sobre los 25°C se alcanzó a mediodía en días soleados (Figura 34). En contraste, las temperaturas máximas alrededor de 15°C se midieron en días nublados. También es relevante la diferencia en la temperatura del aire para cada altura de medición, con diferencias de hasta 10°C en días soleados entre el sensor superior y el inferior. La temperatura del globo muestra el mismo comportamiento que la temperatura del aire pero, como se esperaba, alcanza valores más altos con presencia de radiación solar, mientras que en la noche es igual a la temperatura del aire (Figura 35).

La Humedad Relativa normalmente alcanza el valor del 100% durante las noches, mientras que cae a valores alrededor del 60% al mediodía (Figura 36). De la misma manera, las diferencias en los valores de humedad medidos para cada una de las tres alturas para una misma estación de medida son apreciables.

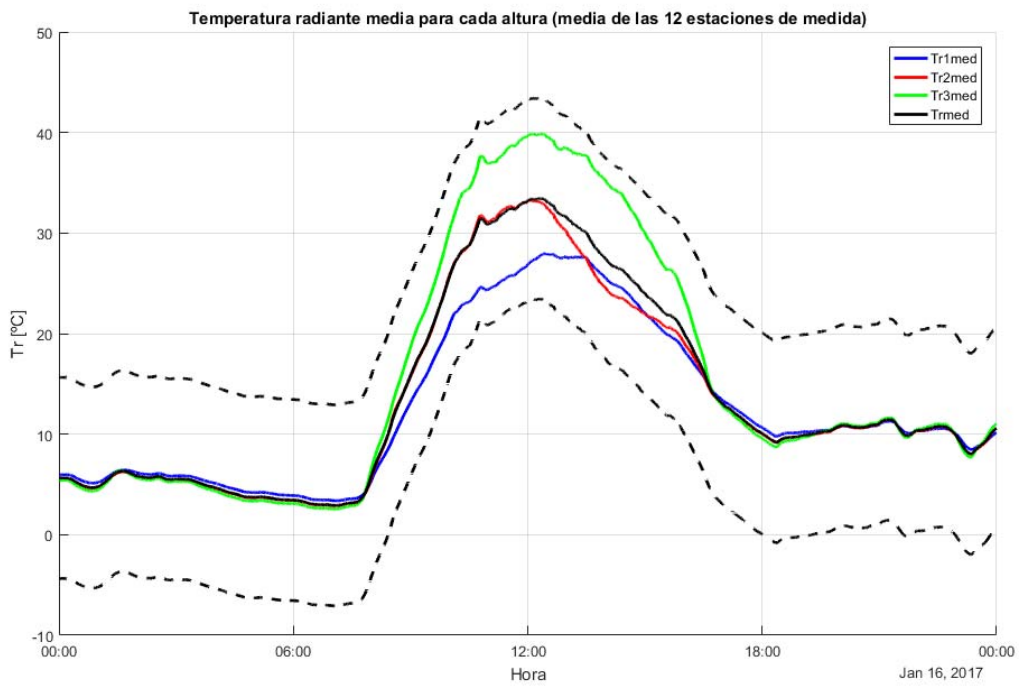
La Figura 37 representa los datos recogidos por el sensor UV situado en la barra superior de la estación de medición. La Figura 37 representa los datos recogidos por el sensor UV situado en la barra superior de la estación de medición. Las medidas del sensor UV

muestran rápidos cambios en la lectura seguramente por días de claros y nubes, alcanzando valores superiores a dos (Figura 37).

La Figura 38.a representa la heterogeneidad de la temperatura del aire en dirección vertical (16/01/2017). Cada una de las tres líneas de color representa el valor medio de las doce estaciones de medida para cada una de las tres alturas de medición, respectivamente. Las líneas de color negro representan la temperatura media global del aire del invernadero (línea de trazo continuo) y los límites para el ambiente homogéneo (línea de trazo discontinuo). Se puede observar **que el invernadero debe ser considerado como un ambiente heterogéneo entre las 9:00 am y las 13:00 horas**, cuando las temperaturas del aire en las alturas de medición superior e inferior superan los **límites de homogeneidad ($\pm 2.0^{\circ}\text{C}$; Tabla 3)**. Las mismas curvas se han obtenido para la temperatura radiante media (Figura 38.b). En este caso el invernadero puede ser tratado como un **ambiente homogéneo con respecto a la temperatura radiante media**; no obstante, siendo muy estrictos los resultados de la heterogeneidad vertical del invernadero a lo largo de los meses de septiembre a enero muestran que **la temperatura radiante media sobrepasa los límites sólo unos pocos días y por períodos de tiempo cortos ($\pm 10^{\circ}\text{C}$; Figura 39)**; mientras que la temperatura del aire suele mostrar periodos de heterogeneidad entre 2 y 5 horas de duración en las horas centrales del día. A modo de ejemplo, la Figura 40 muestra la heterogeneidad vertical para la temperatura del aire entre los días 23 y 27 de enero; donde en días 23, 24 y 25 se observa heterogeneidad vertical, el día 26 está cerca de los límites de homogeneidad y el día 27 el ambiente puede ser tratado como homogéneo.



a)



b)

Figura 38. Medida de la heterogeneidad vertical para los parámetros: a) temperatura del aire; b) temperatura radiante media (día 16 de enero de 2017).

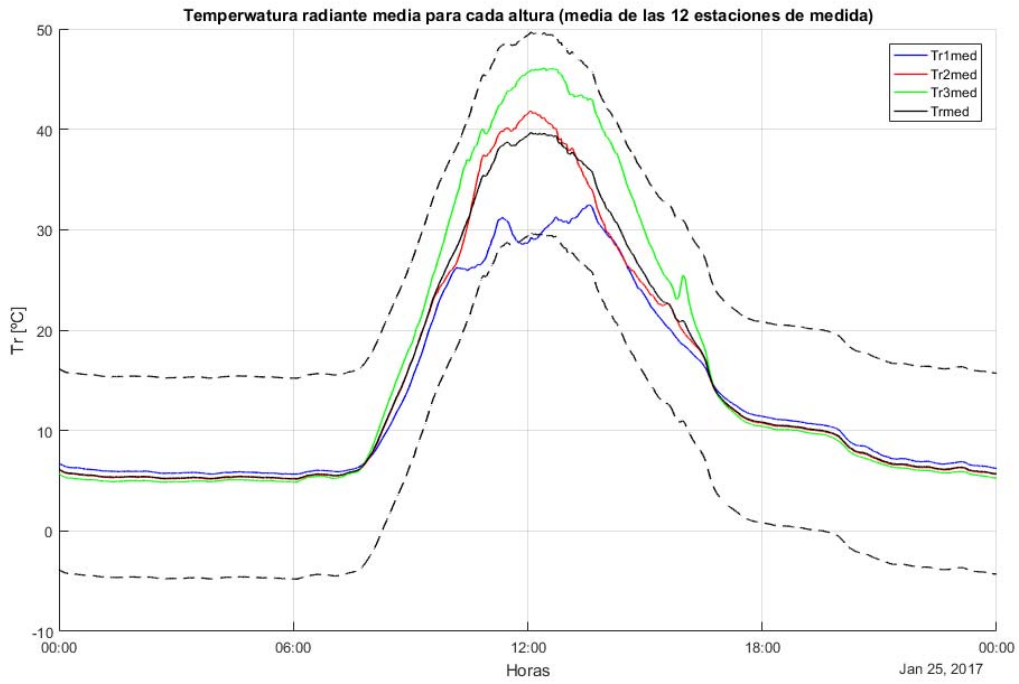


Figura 39. Medida de la heterogeneidad vertical para temperatura radiante media (día 25 de enero de 2017).

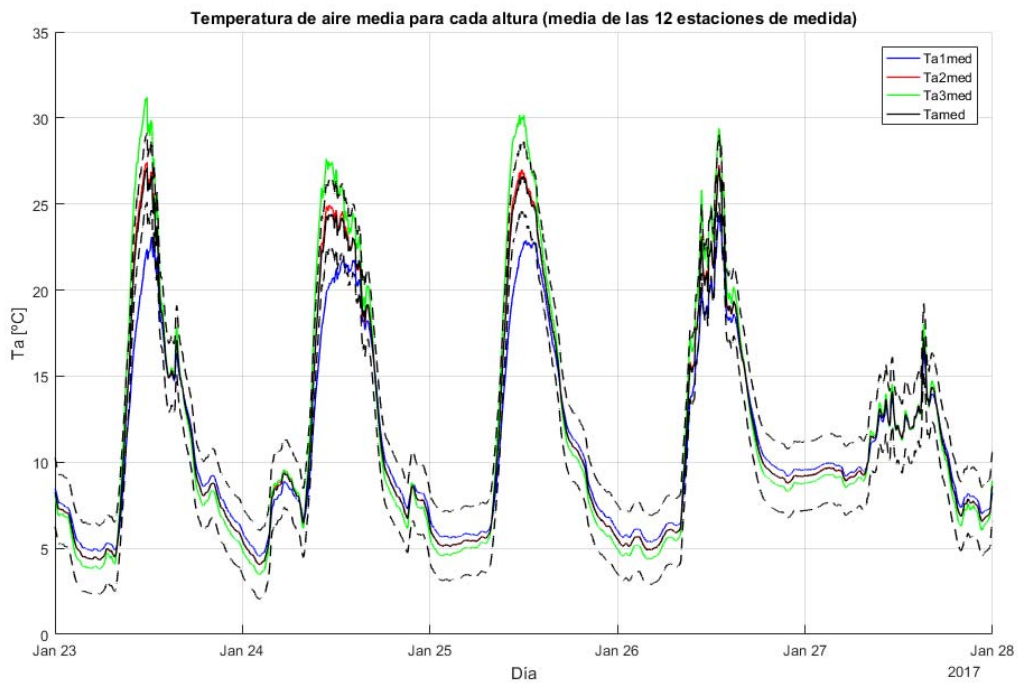
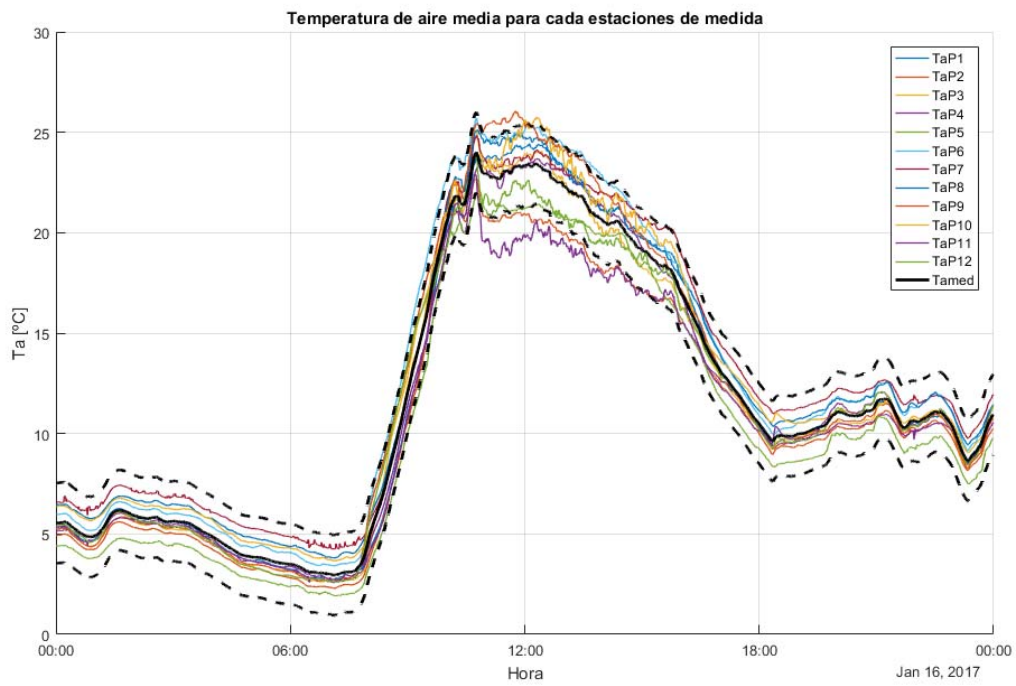
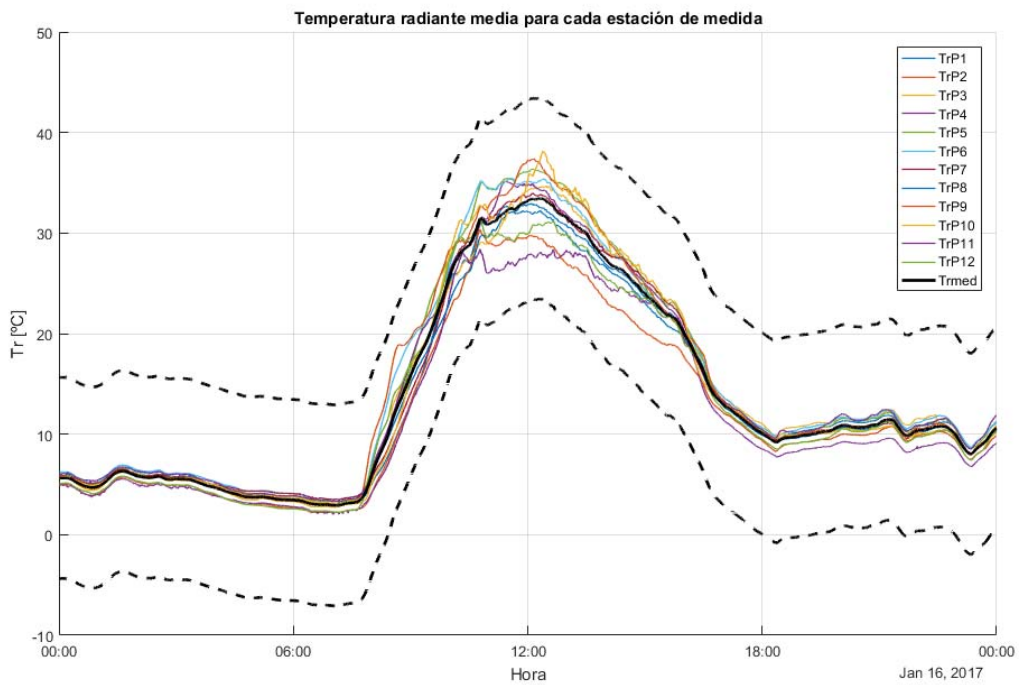


Figura 40. Medida de la heterogeneidad vertical para temperatura del aire durante los días del 23 al 27 de enero de 2017.

En relación a la heterogeneidad horizontal, la Figura 41 muestra los resultados obtenidos para la temperatura del aire y temperatura radiante media (16/01/2017).



a)



b)

Figura 41. Medida de la heterogeneidad horizontal para los parámetros: a) temperatura del aire; b) temperatura radiante media (día 16 de enero de 2017).

Se ha trazado una curva para cada una de las doce estaciones de medida (líneas de color; Figura 41). El valor medio global, tomando las doce estaciones de medida, se representa mediante una línea negra de trazo continuo, mientras que los límites de homogeneidad se marcan mediante líneas negras de trazo discontinuo. De forma similar a los resultados obtenidos según la dirección vertical, **el invernadero muestra heterogeneidad horizontal sólo respecto de la temperatura del aire, y tiene lugar con aproximadamente dos horas de retraso respecto de la heterogeneidad vertical.**

La Figura 41.a muestra que la estación de medida nº 11 se encuentra bajo el límite inferior que marca la entrada en heterogeneidad entre las 11:00 a.m. a 15:00 a.m. Otras dos estaciones de medida (nº 2 y nº 9) superan también los límites de homogeneidad pero durante un período más corto. La Figura 42 muestra la heterogeneidad horizontal de la temperatura del aire entre el 23 y el 27 de enero, donde se aprecian condiciones de heterogeneidad los días 23, 24 y 25 de enero. Los resultados de la heterogeneidad horizontal del invernadero a lo largo de los meses de septiembre a enero muestran el mismo comportamiento, donde sólo la temperatura del aire supera los límites de homogeneidad horizontal.

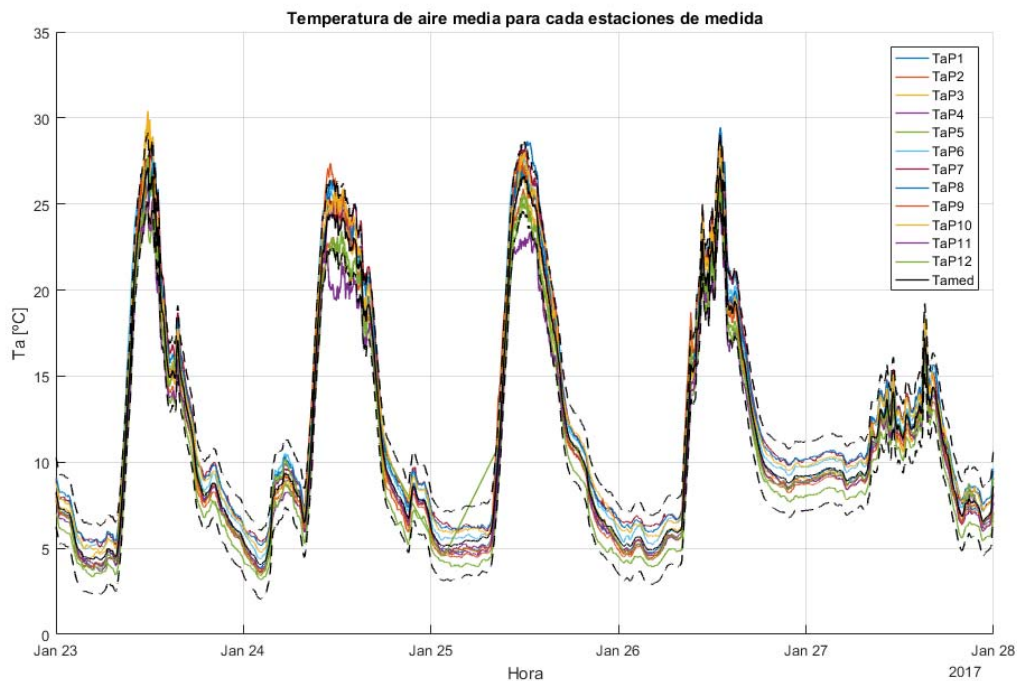


Figura 42. Medida de la heterogeneidad horizontal para temperatura del aire durante los días del 23 al 27 de enero de 2017.

Estos resultados confirman que las condiciones térmicas dentro del invernadero comercial estudiado son heterogéneas en dirección horizontal y vertical de acuerdo con la norma ISO 7726.

4.2 DISCUSIÓN

El invernadero donde se realiza la presente investigación es tipo Almería (raspa y amagado; Figura 8) siendo el más representativo (alrededor del 90%; Fernández y Pérez, 2004) de las 30000 ha de cultivos bajo plástico (Cabrera-Sánchez et al., 2016). Este hecho justificaría su elección por afectar a la inmensa mayoría de los trabajadores de los invernaderos de Almería.

Las estaciones de medida a tres alturas diseñadas, fabricadas y puestas en funcionamiento han cumplido con los requisitos de servicio esperados (Anexos II y III). Su desarrollo ha requerido de muchas horas de trabajo en los talleres del Área de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Almería siguiendo las indicaciones de la norma ISO 7726 (ISO, 1998). Una leve modificación respecto al tamaño de los globos o el tipo de pintura empleado (negro mate) invalidarían el experimento, de ahí que se puede considerar un éxito la fase de fabricación mediante recursos propios (perfiles metálicos, soldaduras, taladros, montaje, mano de obra, etc.).

La alimentación eléctrica, no ha dado muchos problemas debido a que en el diseño, previendo cortes de suministro en zonas rurales, se instaló una fuente de alimentación ininterrumpida (batería; Figura 12).

La intensidad de radio se ha visto perjudicada por obstáculos físicos entre los emisores de cada estación y el receptor ubicado en la Unidad Central de datos (Figura 8). Las plantas del invernadero, en este caso de tomate, han actuado como obstáculo en la señal de radio progresivamente según su crecimiento. Por esta razón, se han colocado los emisores de radio en la parte superior de cada estación de medida, incluso, en algunos casos se han utilizado antenas anexas situadas en el emparrillado del invernadero (Anexo III).

También, la ubicación de las estaciones de medida (Figura 8) no ha supuesto problema alguno para el desempeño de las labores habituales del cultivo, tan sólo se ha requerido la protección de las estaciones de medida mediante lámina de plástico durante la realización de tratamientos fitosanitarios.

Una estación comercial parecida a las fabricadas oscilaría alrededor de los 6000 € sin red comunicación de datos (Krüger et al., 2017; ALMEMO, 2017; Delta-OHM, 2017). Este hecho pone de manifiesto que la inversión mínima requerida (sin red de telecomunicaciones) hubiese ascendido hasta los 73000 €, por lo que quedaría más que acreditada la optimización de los recursos obtenidos (17999 €) por parte del Instituto de Prevención de Riesgos Laborales de Andalucía.

Por lo general, las estaciones comerciales están diseñadas para evaluación de interiores. Su uso en exteriores con meteoros adversos continuados no se recomienda (lluvia, nieve, etc.; ALMEMO, 2017). El invernadero objeto de estudio es un lugar de trabajo muy peculiar ya que sería un interior con radiación solar (Callejón-Ferre et al, 2011a), ventilación natural (leves corrientes de aire $<0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; López et al., 2012;2013) y una cubierta de plástico no impermeable al 100%. Estas características implican altas labores de mantenimiento debido a que los sensores están expuestos (ver Anexo III) a polvo, carbonato cálcico procedente del blanqueo de la cubierta, humedades superiores al 100% (rocío) y, a veces, pequeñas gotas de agua (lluvia). Por todo ello, han sido necesarias visitas semanales para limpieza y puesta a punto de equipos, sin ellas el experimento hubiera fracasado. De hecho, la estación externa ha soportado lluvia, agua nieve, radiación solar directa, vientos de hasta $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ y temperaturas cercanas a los cero grados. Estos hechos han limitado los resultados esperados, sobre todo en horario no laboral (19.00-10.00 hora UTC; Figuras 24-33), y deberían hacer reflexionar a las autoridades laborales sobre los ambientes de trabajo que pueden llegar a soportar en horario laboral profesionales de sectores como agricultura al aire libre, silvicultura (actividades forestales), ganadería extensiva, pesca y construcción, fundamentalmente.

En el exterior, resulta significativo que la temperatura mínima del aire sea superior a la temperatura mínima del globo (Figuras 24 a 33). Seguramente esto es debido a la condensación del agua en su superficie del globo (Anexo III) y la inercia térmica del latón.

Las estaciones del interior se han comportado mejor, ya que han estado expuestas mucho menos que la estación exterior; no obstante, también se han detectado fallos, aunque muchos menos, debidos a los saltos tan grandes de temperatura y humedad entre las horas laborales y las no laborales (Figuras 14 a 23). Esta variabilidad puede verse claramente en los videos del anexo IV. En ellos y en las Figuras 14 a 23, si se observan las horas laborales (10.00-19.00 hora UTC), las condiciones ambientales en los meses estudiados (septiembre-febrero)

son razonables para el trabajo en el invernadero tomando **como referencia/aproximación** valores de Temperatura Operativa (Tabla A.5 norma ISO 7730 del Anexo I; ISO, 2005). Sí es cierto que durante los meses de septiembre y octubre dichos valores sobrepasan los 40°C en las horas (UTC) centrales del día y en ellas se podría producir malestar térmico, lo que coincide plenamente con las investigaciones previas llevadas a cabo por Callejón-Ferre et al. (2011a) mediante un índice empírico denominado Humidex Index (HI; Figura 6).

Hay que destacar, que la referencia/aproximación de la temperatura operativa es cuestionable ya que según los resultados obtenidos y su heterogeneidad no es posible aplicar estrictamente durante toda la jornada laboral ninguna de las normas del Anexo I (ISO, 1989; 2004a; 2004b; 2005; 2007; ASHRAE-55, 2013). Esto nos lleva a pensar en la necesidad de adaptación de dichas normas para lugares interiores con radiación solar como el que nos ocupa.

Las diferencias de temperatura del aire (de hasta 10°C; Figura 34) que demuestran la heterogeneidad vertical y horizontal respecto a este parámetro parecen excesivas y posiblemente lo sean para este cultivo por un deficiente funcionamiento de la ventilación cenital y lateral del invernadero; no obstante, se producen en situaciones normales de cultivo. Esto quiere decir, que las condiciones climáticas de un invernadero están directamente relacionadas con las condiciones climáticas exteriores/labores de cultivo y en condiciones reales de funcionamiento estos saltos de temperatura pueden suceder de forma habitual, si bien no tan altos en tomate, pero sí superiores a $\pm 2^{\circ}\text{C}$ (ISO, 1998). Un ejemplo claro sería un cultivo de sandía o melón bajo invernadero y su operación de polinización (Callejón-Ferre et al., 2009; 2011b). En dicha situación se cierra la ventilación para favorecer altas humedades y elevadas temperaturas durante el día, alcanzándose probablemente situaciones parecidas o superiores a las encontradas en la Figura 34.

Los datos de UVI demuestran que durante las horas centrales del día (Figuras 17 a 23; 10.30-14.00 UTC) se pueden sobrepasar en el interior del invernadero valores umbrales de riesgo ($\text{UVI} > 2$; Figura 7); no obstante, si se tiene en cuenta la precisión ± 1 de los sensores de medida (Tabla 5) el periodo se acortaría sólo a tres quincenas de observación: de 10.30-13.45 h desde el 1 al 15/11/2017, de 12-14 h desde el 1 al 15/01/2017 y de 11.45-12.15 h desde el 16 al 31/01/2017. En cualquier caso, estos periodos son mínimos durante la jornada laboral invernal y podrían ser evitables gestionando las horas de trabajo (Callejón-Ferre et al. 2011a), aunque sí parece claro que en meses venideros de primavera y verano sean más elevados,

fundamentalmente por climatología más benigna (menos nubes) y sobre todo por la degradación progresiva del plástico de cubierta (López-Hernández, 2003).

Todos estos hechos sobre la incidencia de la radiación solar difusa en el interior del invernadero requieren de un estudio más preciso, respecto a sensores de medida, y pronunciado en el tiempo para poder determinar fehacientemente los riesgos de exposición solar de los trabajadores. Mientras tanto, ante los resultados mostrados, sería necesario implantar medidas preventivas como el uso de crema de protección solar con factor superior a 15, prendas de protección, sombrero de ala ancha (OMD, 2003) y gestión de tiempos para evitar las horas centrales del día. Evidentemente, dichas medidas han estar adaptadas al medio de trabajo, es decir, las prendas deberían permitir cómodamente la realización de las labores al igual que los sombreros. Respecto a las cremas, éstas pueden ser inútiles si se combinan con el factor fisiológico de la sudoración.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

5.1 CONCLUSIONES

Se ha diseñado, fabricado y puesto en funcionamiento 13 estaciones de medida de parámetros climáticos para evaluar a tres alturas el bienestar de los trabajadores de los invernaderos raspa y amagado.

Se ha demostrado la heterogeneidad horizontal y vertical de la temperatura del aire y radiante media de un invernadero raspa y amagado por lo que para cualquier estudio laboral del ambiente térmico serán necesarias medidas a tres alturas y en varias zonas del invernadero.

Se ha modelizado mediante videos 3D los parámetros de temperatura de aire, temperatura de globo, temperatura radiante media y temperatura operativa desde el 15/09/2016 hasta el 28/02/2017 de un invernadero raspa y amagado.

Se han detectado problemas de UVI en el interior del invernadero durante la jornada laboral y recomendado medidas preventivas adaptadas: crema de protección solar con factor superior a 15, prendas de protección, sombrero de ala ancha y gestión de tiempos para evitar las horas centrales del día.

CAPÍTULO 6. REFERENCIAS

- ALMEMO. 2017. Innovative measuring instruments and sensors. Ahlborn comfortmeters Model 2690. <http://www.ahlborn.com/en_UK/products/room-air-conditions>, (disponible 26.03.2017).
- Anastasi G, Farruggia O, Lo Re G, Ortolani M. 2009. Monitoring high-quality wine production using wireless sensor networks. In 42st Hawaii International International Conference on Systems Science (HICSS-42 2009): Waikoloa, Big Island, HI, USA.
- ASHRAE-55. 2013. Norma ANSI/ASHRAE 55-2013. Condiciones de Ambiente Térmico para Ocupación Humana [Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy]. Atlanta, USA.
- Baronti P, Pillai P, Chook VWC, Chessa S, Gotta A, Hu YF. 2007. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards. *Computer Communications*, 30, 1655-1695. doi:10.1016/j.comcom.2006.12.020
- Cabrera-Sánchez A, Uclés-Aguilera D, Agüera-Camacho T, De la Cruz-Fernández E. 2016. Análisis de la Campaña Hortofrutícola de Almería. Campaña 2015-16. Ed. Cajamar-Cajarural. Servicio de Estudios – Innovación Agroalimentaria. Almería, Spain. <<http://www.publicacionescajamar.es/pdf/series-tematicas/informes-coyuntura-analisis-de-campana/analisis-de-la-campana-hortofruticola-17.pdf>>, (disponible 26.02.17).
- Carmona-Benjumea A. 2001. Datos antropométricos de la población laboral española. Informe de resultados. *Seguridad y Salud en el Trabajo* 14, 22-35. <<http://www.insht.es/portal/site/Insht/menuitem.1f1a3bc79ab34c578c2e8884060961ca/?vgnextoid=b56aaddc77d77110VgnVCM100000b80ca8c0RCRD&vgnnextchannel=9f164a7f8a651110VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD>>, (disponible 28.02.2017).
- Budd GM. 2008. Wet-bulb globe temperature (WBGT) - its history and its limitations. *Journal of Science and Medicine in Sport* 11, 20-32. doi:10.1016/j.jsams.2007.07.003
- Callejón-Ferre AJ, Pérez-Alonso J, Sánchez-Hermosilla J, Carreño-Ortega A. 2009. Ergonomics and psycho-sociological quality indices in greenhouses Almería (Spain). *Spanish Journal of Agricultural Research* 7, 50–58.
- Callejón-Ferre AJ, Manzano-Agugliaro F, Díaz-Perez M, Carreño-Sánchez J. 2011a. Improving the climate safety of workers in Almería-type greenhouses in Spain by predicting the periods when they are most likely to suffer thermal stress. *Applied Ergonomics* 42, 391-396. doi:10.1016/j.apergo.2010.08.014

- Callejón-Ferre AJ, Pérez-Alonso J, Carreño-Ortega A, Velázquez-Martí B. 2011b. Indices of ergonomic-psychosociological workplace quality in the greenhouses of Almería (Spain): crops of cucumbers, peppers, aubergines and melons. *Safety Science* 49, 746-750. doi:10.1016/j.ssci.2010.12.009
- Castilla N. 2005. Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, Spain.
- Cecchini M, Colantoni A, Massantini R, Monarca D. 2010. Estimation of the risks of thermal stress due to the microclimate for manual fruit and vegetable harvesters in central Italy. *Journal of Agricultural Safety and Health* 16, 141-159.
- D'Ambrosio-Alfano FR, Palella BI, Riccio G. 2011. Thermal environment assessment reliability using temperature -Humidity indices. *Industrial Health* 49, 95-106.
- D'Ambrosio-Alfano FR, Malchaire J, Palella BI, Riccio G. 2004. WBGT index revisited after 60 years of use. *Annals of Occupational Hygiene* 58, 955-970. doi:10.1093/annhyg/meu050.
- Delta-OHM. GHM Group. 2017. Instrumentos. Microclima WBGT. Model HD 32.1 <http://www.deltaohm.com/ver2012/index.php?main_page=product_info&cPath=1_16&products_id=78>, (disponible 26.03.2017).
- Diano M, Valentini M, Samele P, Di Gesu I. 2016. Exposure to hot environments of horticultural greenhouses workers of the center of Calabria: evaluative comparison methods. *Italian Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 7, 56-114.
- Dursch A, Yen DC, Shih DH. 2004. Bluetooth technology: an exploratory study of the analysis and implementation frameworks. *Computer Standards and Interfaces*, 26, 263-277. doi: 10.1016/j.csi.2003.12.005
- Environment Canada. 2001. Canada's New Wind Chill Index [on line]. <<http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=En&n=5FBF816A-1#table1>>, (disponible 27.02.2017).
- Epstein Y, Moran DS. 2006. Thermal Comfort and the Heat Stress Indices. *Industrial Health* 44, 388-398.
- Fernández C, Pérez J.J. 2004. Caracterización de los invernaderos de la provincia de Almería. [Characterisation of Almeria Province greenhouses]. Ed. Cajamar. Almería, Spain.
- Guélaud F, Roustang G, Beauchessne M, Gautrat J. 1975. Pour une analyse des conditions du travail ouvrier dans l'entreprise. LEST methode. Laboratoire d'Économie et de Sociologie de travail. Aix en Provence. France.

- Hamrita TK, Hoffacker EC. 2005. Development of a "smart" wireless soil monitoring sensor prototype using RFID technology. *Applied Engineering in Agriculture*, 21, 139-143.
- IEEE. 2009. IEEE802.15: "Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)", IEEE Std 802.15.4d-2009. <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4d-2009.pdf>>, (disponible 13.03.2017).
- IEEE. 2012. IEEE 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications". IEEE-SA. doi:10.1109/IEEESTD.2012.6178212.
- ILO (International Labour Office). 1985. R171-Occupational Health Services Recommendation. Adoption: Geneva, 71st ILC session (26 Jun 1985). <http://www.ilo.org/dyn/normlex/en/f?p=1000:12100:0::NO::P12100_INSTRUMENT_ID,P12100_LANG_CODE:312509,es:NO>, (disponible 26.02.17).
- ILO (International Labour Office). 2010. Code of practice on safety and health in agriculture. Sectoral Activities Programme. Meeting of Experts to Adopt a Code of Practice on Safety and Health in Agriculture. Geneva, Switzerland. <http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/---publ/documents/publication/wcms_159457.pdf>, (disponible 26.02.17).
- ISO 17166:1999. 1999. Erythema reference action spectrum and standard erythema dose. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO 7933:2004. 2004a. Ergonomics of the thermal environment: Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO 7730:2005. 2005. Ergonomics of the thermal environment – analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort. International Standardization Organization, Geneva, Switzerland.
- ISO 7243:1989. 1989. Hot environments - estimation of the heat stress on working man based on the WBGT-index (Wet Bulb Globe Temperature). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO 8996:2004. 2004b. Ergonomics of the thermal environment -- Determination of metabolic rate, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

- ISO 9920:2007. 2007. Ergonomics of the thermal environment -- Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO 7726:1998. 1998. Ergonomics of the thermal environment e instruments for measuring physical quantities. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Krüger EL, Tamura CA, Bröde P, Schweiker M, Wagner A. 2017. Short- and long-term acclimatization in outdoor spaces: Exposure time, seasonal and heatwave adaptation effects. *Building and Environment* 116, 17-29. doi:10.1016/j.buildenv.2017.02.001
- López A, Valera DL, Molina-Aiz FD, Peña A. 2012. Sonic anemometry to evaluate airflow characteristics and temperature distribution in empty Mediterranean greenhouses equipped with pad-fan and fog systems. *Biosystem Engineering* 113, 334-350. doi: 10.13031/2013.30077
- López A, Valera DL, Molina-Aiz FD, Peña A. 2013. Effectiveness of horizontal air flow fans supporting natural ventilation in a Mediterranean multi-span greenhouse. *Scientia Agricola* 70, 219-228. doi: 10.1590/S0103-90162013000400001
- López-Hernández JC. 2003. Evolución de estructuras y cubiertas de invernadero del sureste de español. *Técnicas de producción en cultivos protegidos. Tomo I. Ed. Cajamar. Almería, Spain.*
- Marucci A, Pagnello B, Monarca D, Cecchini M, Colantoni A, Biondi P. 2012. Heat stress suffered by workers employed in vegetable grafting in greenhouses. *Journal of Food Agriculture and Environment* 10, 1117-1121.
- Masterton J, Richardson FA. 1979. *Humidex, a Method of Quantifying Human Discomfort Due to Excessive Heat and Humidity. Environment Canada, Downsview, Ontario, Canada.*
- Nijskens J, Deltour J, Coutisse S, Nisen A. 1985. Radiation transfer through covering materials, solar and thermal screens of greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology* 35, 229-242. doi:10.1016/0168-1923(85)90086-3
- Okushima L, Sase S, Lee IB, Bailey BJ. 2001. Thermal environment and stress of workers in naturally ventilated greenhouses under mild climate. *Acta Horticulturae* 559, 793-798. doi:10.17660/ActaHortic.2001.559.118
- OMD. 2003. Índice UV solar mundial: guía práctica. Recomendación conjunta de: Organización Mundial de la Salud, Organización Meteorológica Mundial, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no

Ionizante. Organización Mundial de la Salud (OMS), Ginebra, Suiza.
<<http://www.who.int/uv/publications/en/uvispa.pdf> >, (disponible 12.03.17).

Parsons K. 2013. Occupational health impacts of climate change: Current and future ISO standards for the assessment of heat stress. *Industrial Health* 51, 86-100.

Pérez-Alonso J, Callejón-Ferre AJ, Carreño-Ortega A, Sánchez-Hermosilla J. 2011. Approach to the evaluation of the thermal work environment in the greenhouse-construction industry of SE Spain. *Building and Environment* 46, 1725-1734. doi: 10.1016/j.buildenv.2011.02.014

Rohles FH. 1985. Environmental ergonomics in agricultural systems. *Applied Ergonomics* 16, 163-166. doi: 10.1016/0003-6870(85)900002-X

Ruiz-García L, Lunadei L, Barreiro P, Robla JI. 2009. A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: state of the art and current trends. *Sensors* 9, 4728-4750. doi:10.3390/s90604728

WCED (World Commission on Environment and Development). 1987. *Our Common Future*. University Press, Oxford.

Zink KJ. 2014. Designing sustainable work systems: The need for a systems approach. *Applied Ergonomics* 45, 126-132. doi: 10.1016/j.apergo.2013.03.023

CAPÍTULO 7. ANEXOS

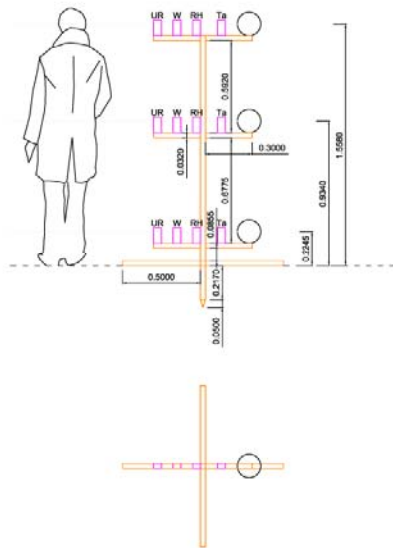
ANEXO I

- UNE-EN ISO 7726**
- UNE-EN ISO 7730**
- UNE-EN ISO 8996**
- UNE-EN 27243**
- UNE-EN ISO 7933**
- UNE-EN ISO 9920**
- NORMA ANSI/ASHRAE 55-2013**
- ÍNDICE UV SOLAR MUNDIAL: GUÍA PRÁCTICA**

ANEXO II

(DISEÑO)

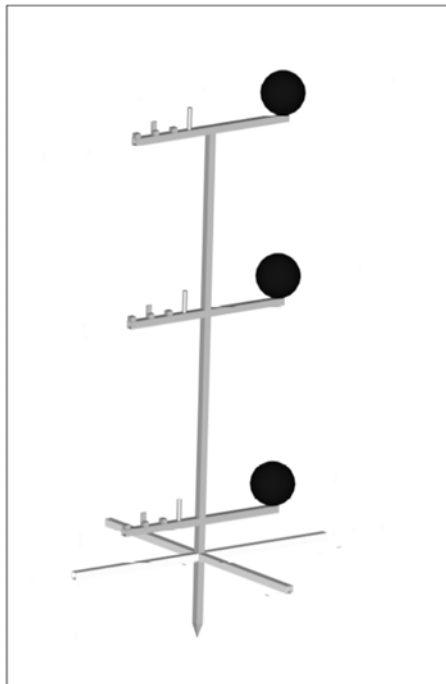
SOPORTE A TRES ALTURAS PARA EQUIPOS DE MEDIDA DE PARÁMETROS AMBIENTALES



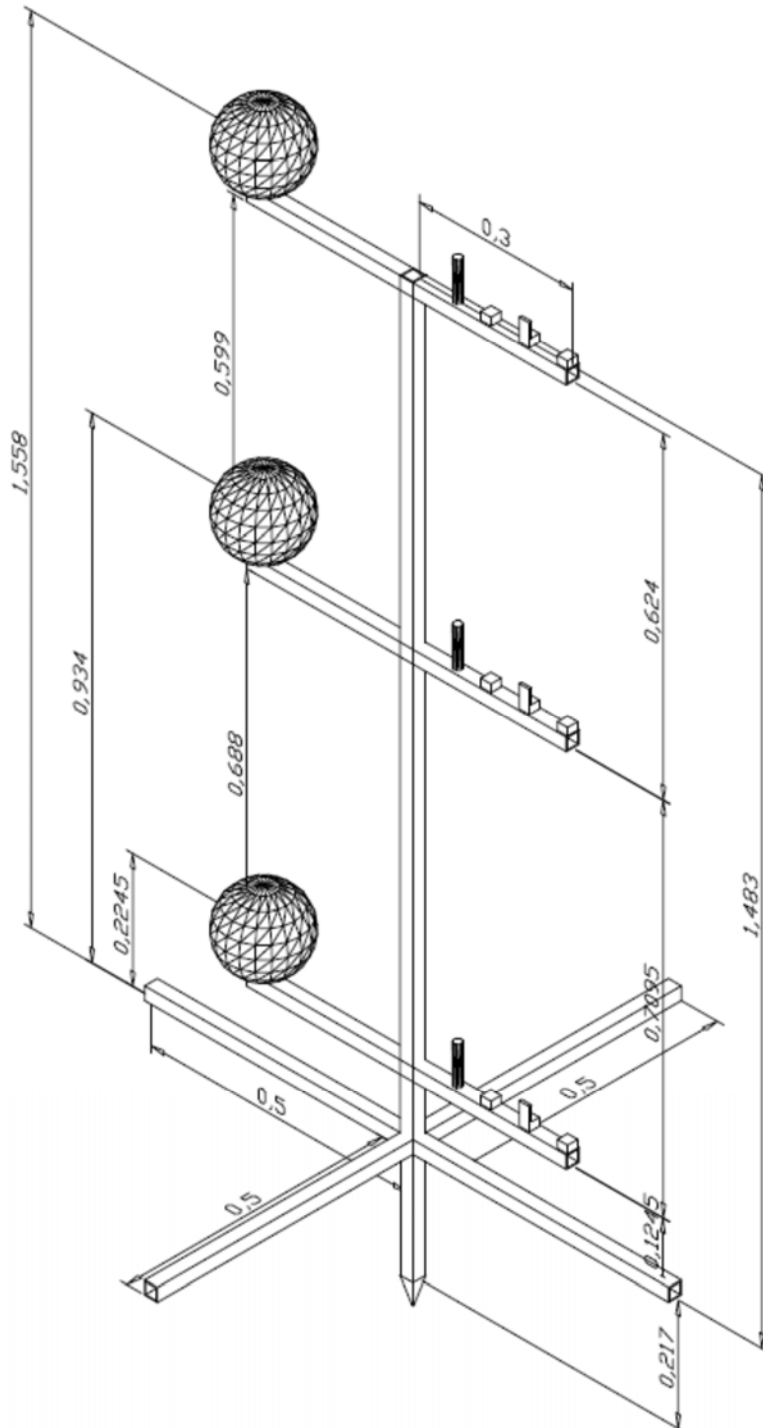
Datos antropométricos de la población laboral española (diciembre 1996 - corregidos octubre 1999): población conjunta y percentil 50 (Carmona-Benjumea, 2001):

- Altura de los ojos (equivalente con altura de la cabeza): 1.588 m
- Altura de la espina ilíaca (equivalente con altura del tronco): 0.934 m
- Altura de la líbia / 2 (equivalente con la altura de pies): $0.449 \text{ m} / 2 = 0.2245$

| | |
|----------------------|---|
| <i>W</i> | wind speed (m/s) |
| <i>T_a</i> | air temperature (°C) |
| <i>RH</i> | relative humidity (%) |
| <i>T_g</i> | globe temperature (°C) |
| <i>U_R</i> | ultraviolet radiation (W/m ²) |



PROTOTIPO



ANEXO III

(CONSTRUCCIÓN)

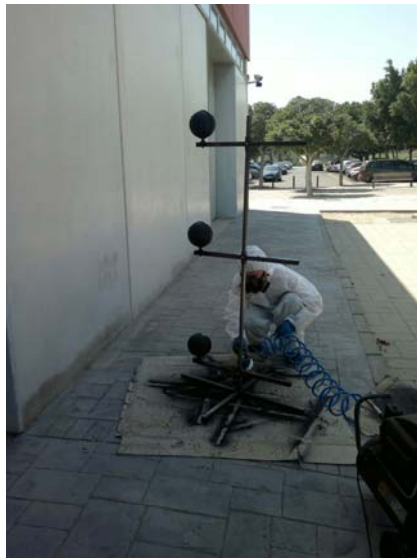




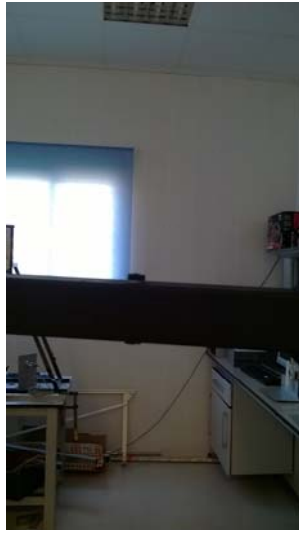








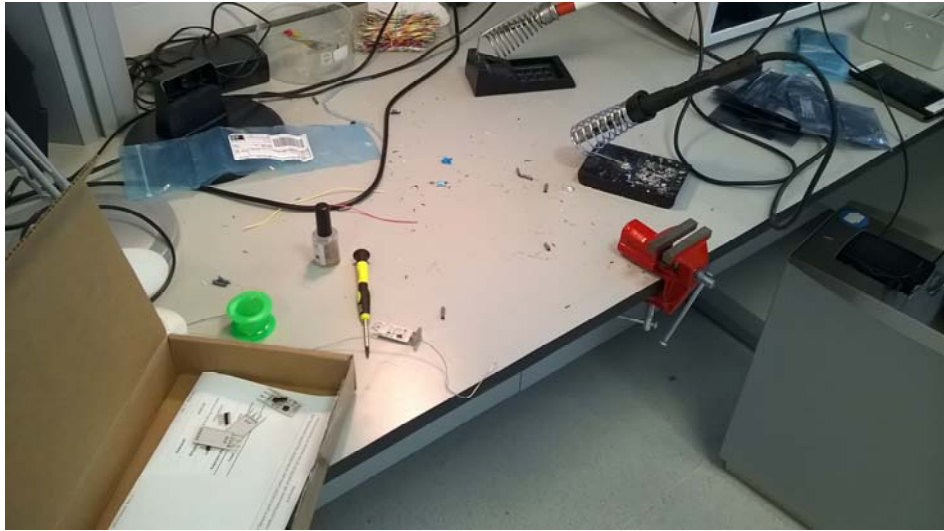


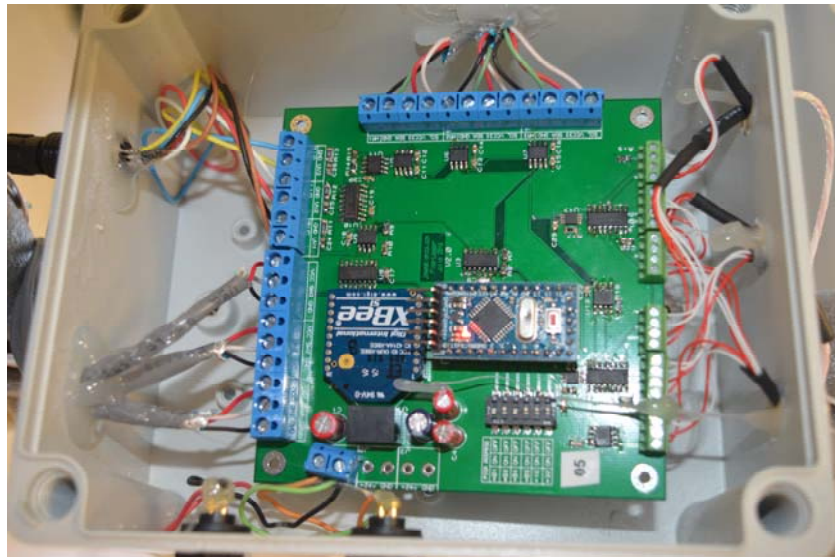
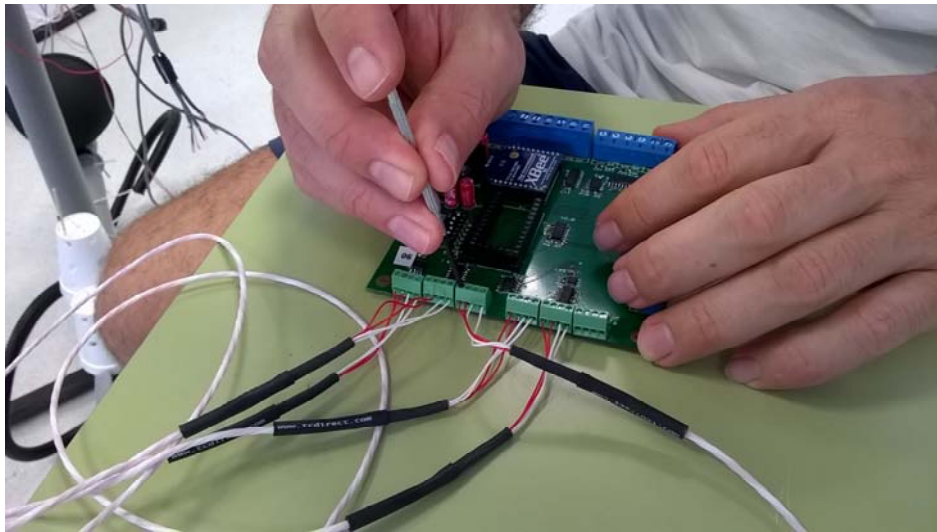


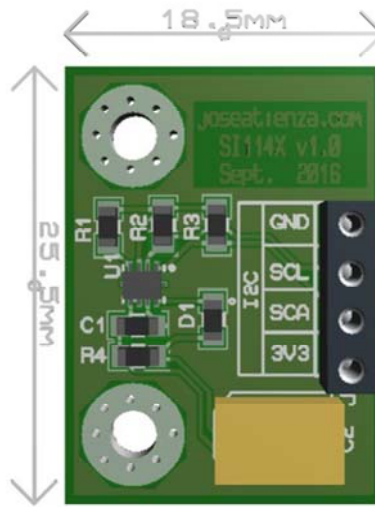
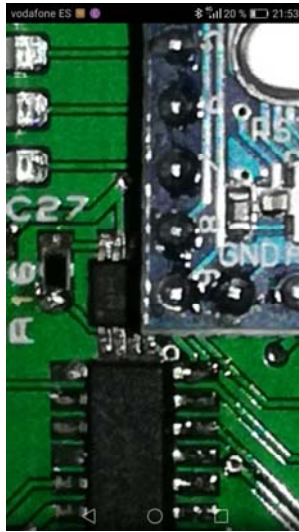




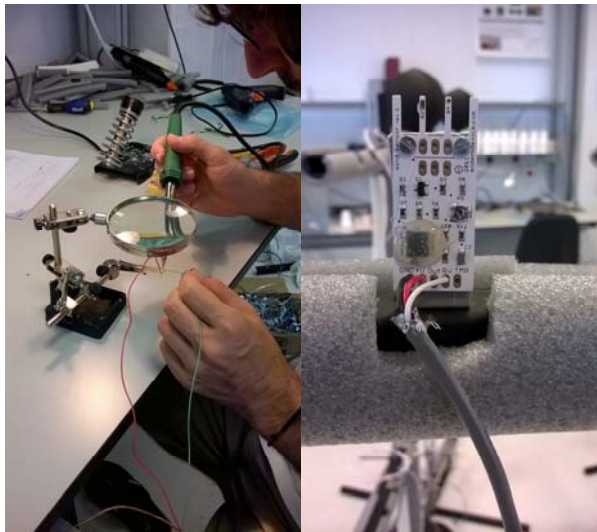


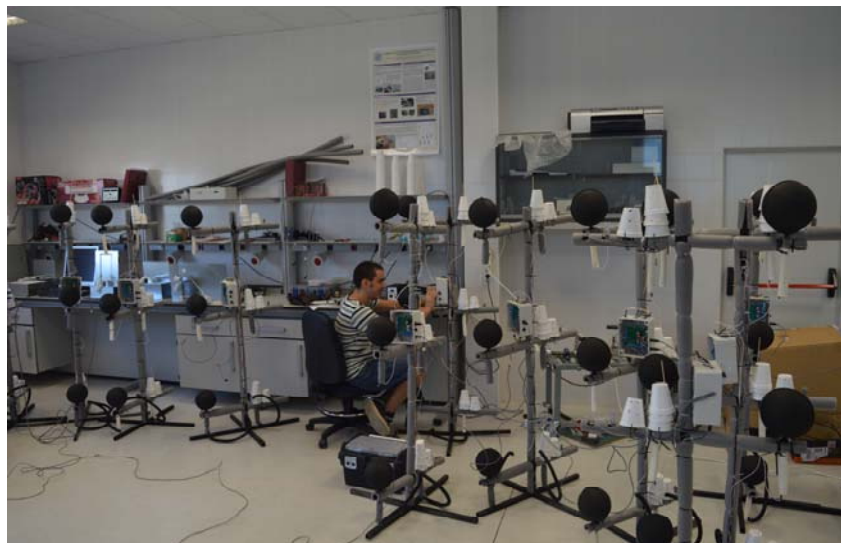


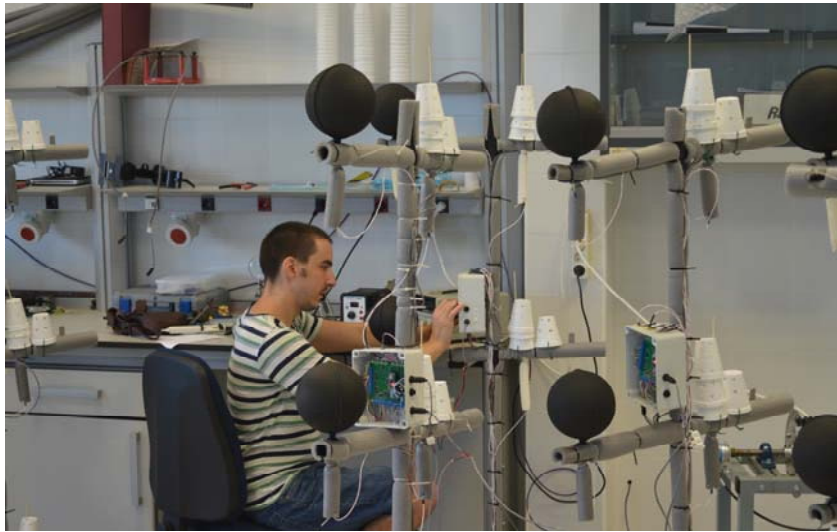








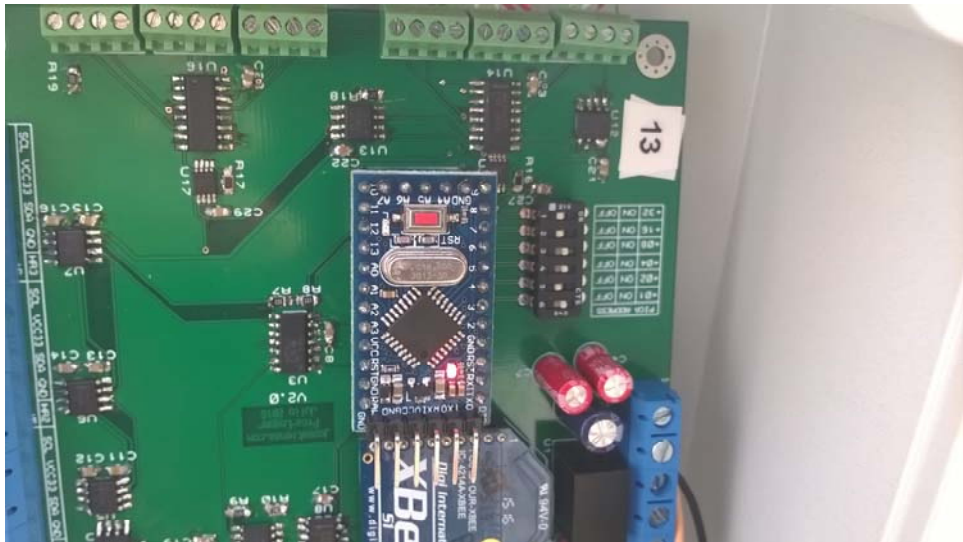














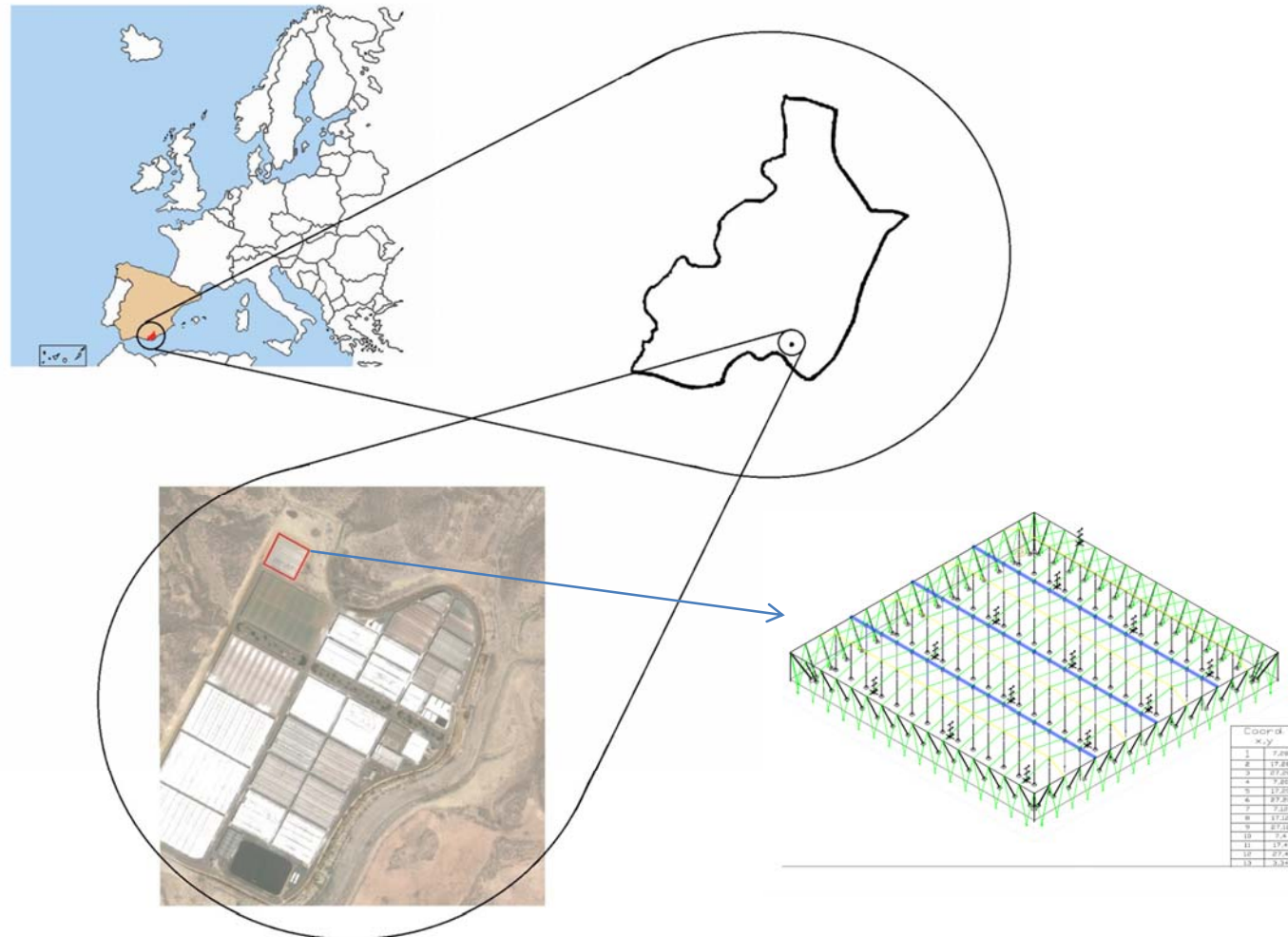
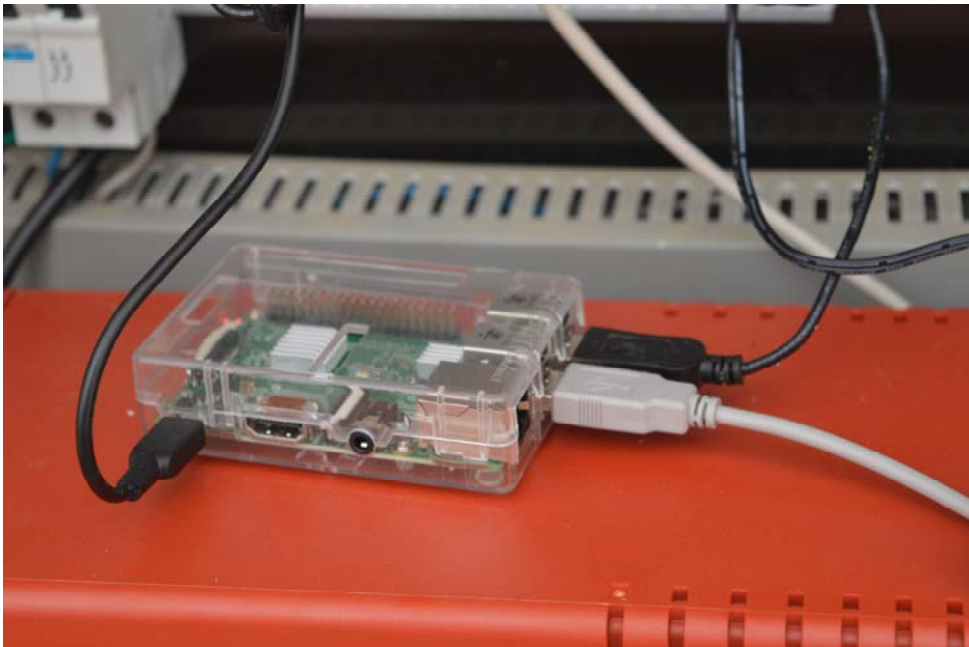
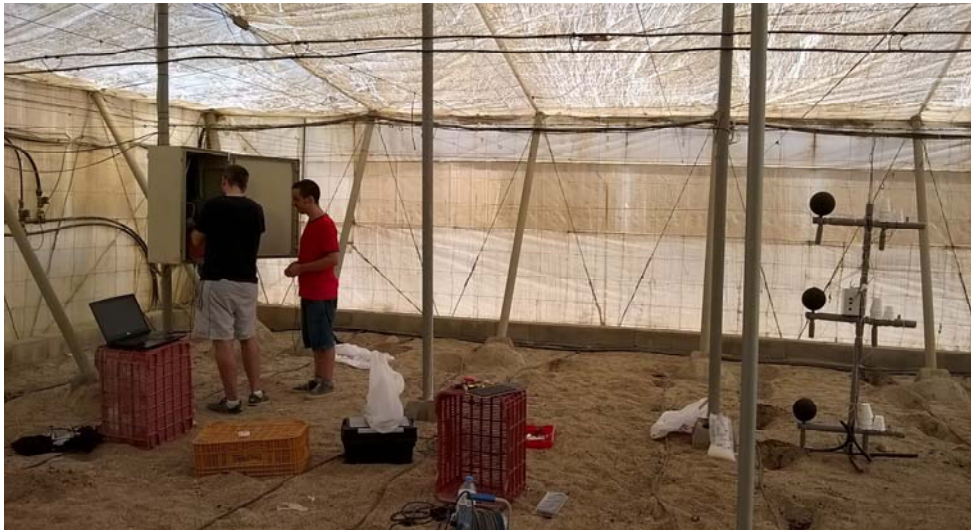


Figura 1. Emplazamiento del invernadero (finca experimental UAL-ANECOOP)



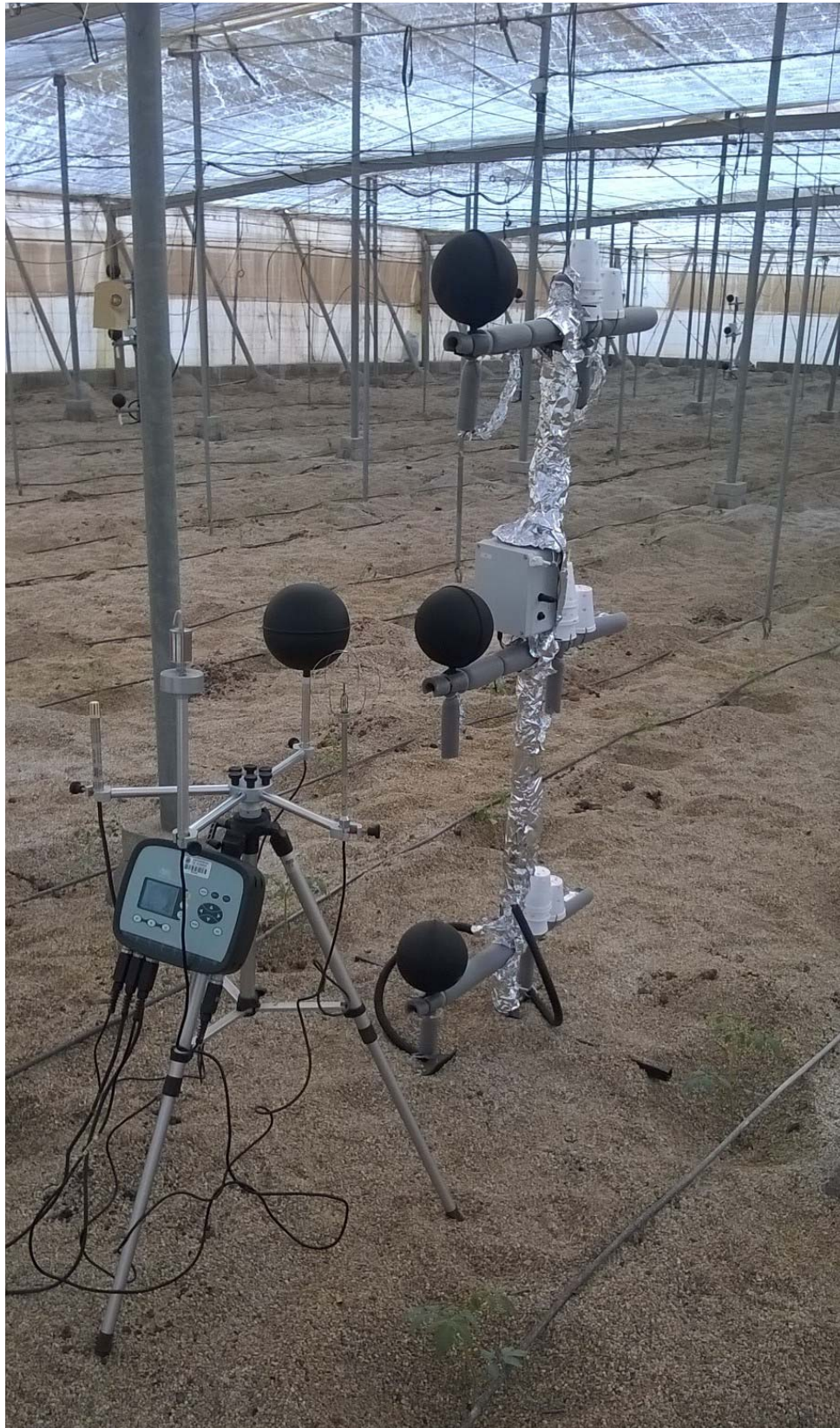


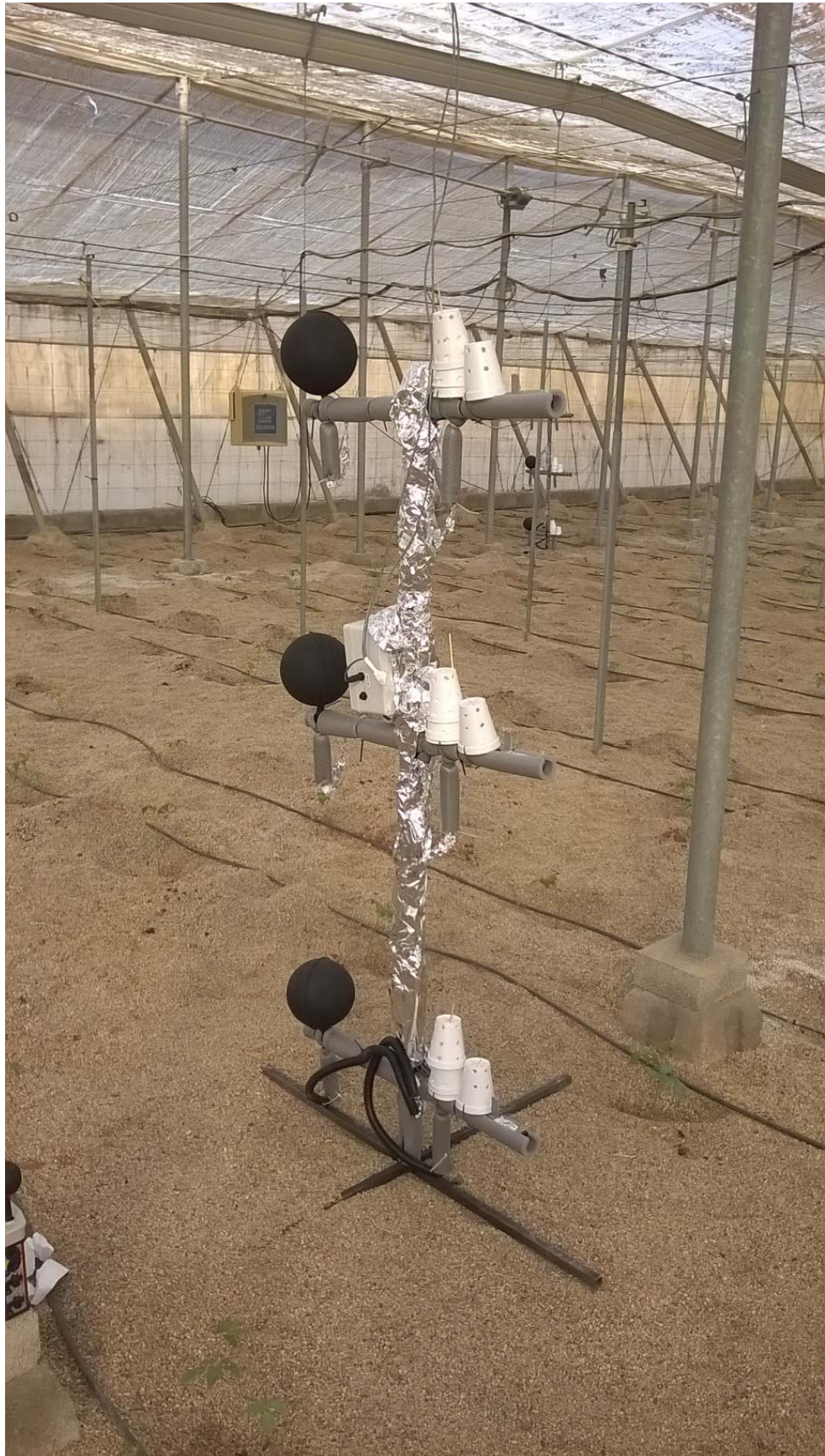


















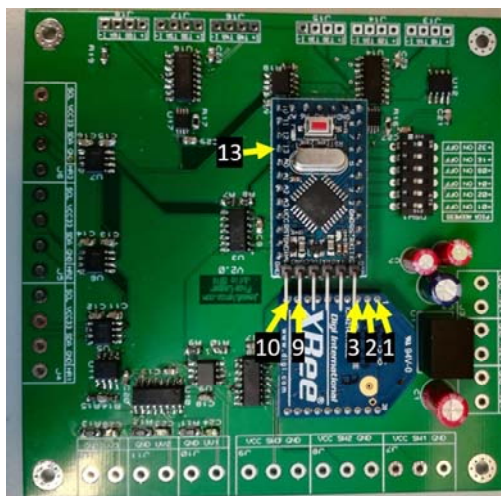












| Señal / cable | Dentro de la caja de la pica | Caja exterior de módulo XBee |
|---------------|--|------------------------------|
| 1 (VCC, 3.3V) | Pin 1 del zócalo Xbee | Pin 1 del XBee |
| 2 (DOUT) | Pin 2 del zócalo Xbee | Pin 2 del Xbee |
| 3 (DIN) | Pin 3 del Zócalo Xbee | Pin 3 del Xbee |
| 9 (SLEEP_RQ) | Directamente al pin "número 13" del microcontrolador (éste es el latiguillo que ahora mismo está por ahí colgando) | Pin 9 del Xbee |
| 10 (GND, 0V) | Al pin 10 del zócalo, o (más fácil) al GND de algún UVI de abajo | Pin 10 del Xbee |

Hecho: 13/DIC/2016



















ANEXO IV

