

# **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO  
FACULTAD DE INGENIERIA, ARQUITECTURA Y DISEÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y TECNOLOGIA

**DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO**



## **SISTEMA PASIVO PARA REDUCIR LOS EFECTOS DE HUMEDAD EN VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL EN CLIMA MEDITERRÁNEO**

***T E S I S***

que para obtener el grado de

**DOCTORA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO**

Presenta

**ELIZABETH MARTÍNEZ BERMÚDEZ**

Director de Tesis

**DR. JULIO CÉSAR RINCÓN MARTÍNEZ**

**ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, JUNIO 2022**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y LA TECNOLOGÍA



**DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO**

SISTEMA PASIVO PARA REDUCIR LOS EFECTOS DE HUMEDAD  
EN VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL  
EN CLIMA MEDITERRÁNEO

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO  
DE DOCTORA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO PRESENTA

**ELIZABETH MARTÍNEZ BERMÚDEZ**

Correo electrónico: [elizabeth.martinez.bermudez@uabc.edu.mx](mailto:elizabeth.martinez.bermudez@uabc.edu.mx)  
Identificador ORCID: 0000-0002-7116-5668

Director de tesis: Dr. Julio César Rincón Martínez  
Identificador ORCID: 0000-0002-1946-3609

Co-Director de tesis: Dra. Karen Estrella Martínez Torres  
Identificador ORCID: 0000-0002-6744-8622

Revisor de tesis: Dra. Ivett Zavala Guillén

Revisor de tesis: Dr. Aníbal Luna León

Revisor de tesis: Dr. Francisco Fernández Melchor

**Ensenada, B.C. Junio de 2022**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

**SISTEMA PASIVO PARA REDUCIR LOS EFECTOS DE HUMEDAD  
EN VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL  
EN CLIMA MEDITERRÁNEO**

**TESIS**

Que para obtener el grado de Doctorado en Arquitectura, Urbanismo y Diseño presenta:

**Elizabeth Martínez Bermúdez**

Aprobada por:

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Julio César Rincón Martínez**

Director de tesis

  
\_\_\_\_\_  
**Dra. Karen Estrella Martínez Torres**

Co-directora de tesis

  
\_\_\_\_\_  
**Dra. Ivett Zavala Guillén**

Miembro del comité tutorial

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Aníbal Luna León**

Miembro del comité tutorial

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Francisco Fernández Melchor**

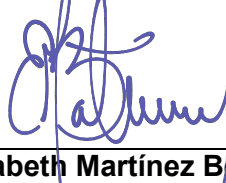
Miembro del comité tutorial

Ensenada, Baja California, México. Junio 2022

## DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Declaro que la tesis que se presenta contiene material original que no ha sido presentado para la obtención de un grado académico o diploma en esta u otra institución de educación superior. Asimismo, declaro que hasta donde yo sé no contiene material previamente publicado o escrito por otra persona excepto donde se reconoce como tal a través de las citas.

Ensenada, B.C., Junio de 2022



---

**Elizabeth Martínez Bermúdez**

## AVAL DE TERMINACIÓN DE TESIS

Fecha: Junio de 2022

DR. MIGUEL ENRÍQUE MARTÍNEZ ROSAS  
Director de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
Presente.-

Para dar cumplimiento al artículo 106 del ESTATUTO ESCOLAR DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, en su TÍTULO CUARTO DE LOS TÍTULOS PROFESIONALES, GRADOS ACADÉMICOS Y DIPLOMAS, CAPÍTULO ÚNICO, sobre los requisitos para la obtención del grado de **Doctor en Arquitectura, Urbanismo y Diseño**, como director de tesis en la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento de Arquitectura y Medio Ambiente, de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, se emite la presente acta que avala que la estudiante:

**ELIZABETH MARTÍNEZ BERMÚDEZ**

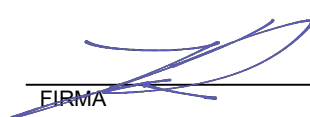
ha concluido su tesis de grado titulada:

**SISTEMA PASIVO PARA REDUCIR LOS EFECTOS DE HUMEDAD EN VIVIENDAS DE  
INTERÉS SOCIAL EN CLIMA MEDITERRÁNEO**

Lo anterior, en virtud de que se realizaron las correcciones y recomendaciones del comité tutorial, por lo que ha sido aprobada para el proceso de presentación de examen de grado.

DIRECTOR DE TESIS

**DR. JULIO CÉSAR RINCÓN MARTÍNEZ**

  
FIRMA

## DEDICATORIA

A Dios, por todas las bendiciones dadas.

A mis tres amores: Alex, Oscar y Diego, porque sin su amor, sus palabras de aliento, sus abrazos reconfortantes en momentos de flaqueza, pero sobre todo su paciencia (y la ayuda en casa), no lo hubiera logrado.

A mis padres, que aún desde el cielo siguen cuidando de mí; en especial a mi madre, pilar de la familia, que siempre velaste por mi bienestar y el de mi familia.

A mis hermanos: Oscar, Erika y Carlos, por alegrarse por mis logros y hacerlos suyos.

## AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, Dr. Julio Cesar Rincón Martínez, profesor de la Universidad Autónoma de Baja California, por el apoyo y guía brindados durante estos tres años, los cuales fueron de gran ayuda para llevar a término la investigación.

A mi co-tutora, Dra. Karen Estrella Martínez Torres, profesora de la Universidad Autónoma de Baja California, por sus asesorías y consejos acertados que fueron de gran ayuda.

A todos mis maestros que, a lo largo de estos tres años, brindaron su tiempo y conocimientos con los que pude nutrir el desarrollo de la investigación, en especial al Dr. Aníbal Luna León que, con su asesoría externa, además de las materias propias del curso, pude dar cuerpo al diseño de la investigación.

Al Dr. Víctor Armando Fuentes Freixanet, profesor-investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, por su disponibilidad y amabilidad para compartir su amplia experiencia, y por lo cual pude lograr un gran avance en el proceso de análisis de los resultados y resolver situaciones críticas que se presentaron durante el desarrollo de la investigación.

Al Dr. Felipe Noh Pat, profesor investigador de la Universidad Autónoma de Campeche, ya que al compartirme sus conocimientos pude entender mucho mejor los procesos que se requerían para desarrollar el objeto de estudio.

Al Dr. Arq. Gonzalo Bojórquez Morales que, con sus palabras de motivación en momentos difíciles de sobrellevar, me dieron el ánimo y la confianza para continuar, además de su gestión oportuna y atenta para los trámites ante CONACYT.

Al Comité de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño de la Universidad Autónoma de Baja California, por aceptarme en el Programa de Doctorado en Arquitectura, Urbanismo y Diseño.

Por último, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico que me permitió llevar a cabo los estudios de doctorado, sin descuidar a mi familia.

## RESUMEN

La humedad en espacios interiores es un factor de riesgo para la habitabilidad de los espacios, ya que puede causar daños en las superficies, malos olores y moho; y, a su vez, generar problemas en la salud de los usuarios, ya que se relaciona con diversas enfermedades respiratorias. Ambientes por encima del 60 % de humedad relativa son más propensos a desarrollar problemas de humedad, los cuales suelen presentarse en viviendas con poco o nulo mantenimiento, que resultan ser frecuentemente las de bajos recursos.

Las recomendaciones generales para reducir dichos problemas señalan el control de la humedad y la ventilación como las estrategias más adecuadas. Por ello, esta investigación desarrolló un sistema pasivo, enfocado a la vivienda de interés social, que regule la humedad, temperatura y ventilación para propiciar la reducción de humedad en interiores, sin desfavorecer la habitabilidad de la vivienda de interés social, al generar la pérdida de humedad del aire por condensación fuera de la vivienda e introducirlo mediante ventilación por estratificación térmica.

Por lo tanto, se desarrolló el experimento en una vivienda existente y en uso, ubicada en la ciudad de Ensenada, Baja California, caracterizada por un clima mediterráneo. El sistema propuesto se conformó de un intercambiador de calor tierra-aire, para reducir la humedad del aire antes de ingresar al espacio; una chimenea solar, para promover la succión del aire por medio de la estratificación térmica; y el doble acristalamiento y sellado de vanos, para propiciar la hermeticidad del espacio de análisis, y, con ello, evaluar de manera efectiva la influencia del sistema en el espacio habitado.

El proceso metodológico consistió en la previa selección del sitio de estudio, la caracterización de la vivienda, para el posterior desarrollo del sistema, el cual consistió en el diseño y dimensionamiento, su construcción y posterior monitoreo, por el periodo de un año, de abril de 2021 a marzo de 2022, atendiendo los cuatro periodos higrotérmicos característicos del sitio.

El análisis y la interpretación de los datos se realizó mediante gráficas lineales, tablas comparativas y cartas psicrométricas, del comportamiento de la humedad, la temperatura y la velocidad del aire en los diferentes puntos de análisis.

Los resultados obtenidos muestran que el sistema deshumidifica en promedio el 12,9 % de HR con un desempeño del 25,0 % de HR en el año, y de 26,2 % de HR en el periodo frío; mantiene los niveles por debajo del 60 % de HR. Se obtiene la estabilización térmica a la profundidad de 2,5 m, de 21,9 °C en promedio; y se propicia un intercambio de aire constante durante todo el día, con una velocidad del aire promedio de 0,18 m/s. Por lo tanto, el sistema propuesto tiene un desempeño favorable para el control de la humedad y contribuye con la habitabilidad del espacio.

**Palabras clave:** control de humedad, deshumidificación, estabilización higrotérmica, intercambiador de calor, chimenea solar.

## ABSTRACT

Indoor moisture is a risk factor for indoor habitability, it can cause damage to surfaces, odors and mold; this can turn out to be a health problem for users since it is related to some respiratory diseases. Environments above 60 % of relative humidity are more feasible to develop moisture problems, which usually occur in homes with low or no maintenance, usually low-income dwellings.

In order to reduce these problems, it has been recommended to apply humidity control and ventilation as the most appropriate strategies. Therefore, this research aims to develop a passive system focused on low-income dwellings that can regulate humidity, temperature and ventilation, to reduce the moisture damage without impairing the habitability through the loss of air humidity by condensation outdoor introducing it through stack effect ventilation.

Therefore, the experiment was develop in a habited house located in Ensenada, Baja California, characterized by a Mediterranean climate. The proposed system includes an earth-air heat exchanger to reduce air humidity before introducing into the living space; a solar chimney to allow air suction by thermal stratification, and a double pane glass and gap sealing to promote the airtightness of the analysis space. The objective was to evaluate the influence of the system on the habited space.

The methodological process consisted in the selection of study site, the characterization of the dwelling, for the subsequent system development, which consisted on the design and sizing, its construction and subsequent monitoring, for one year, from April 2021 to March 2022, covering the four different hygrothermal periods of the area.

The analysis and data interpretation was carried out using linear graphs, comparative tables and psychrometric charts of the humidity, temperature and air velocity behavior at the different points of analysis.

Results obtained show average dehumidification of 12.9% RH with an effective performance of 25.0% RH in the year and 26.2% RH in the cold period, keeps levels below 60 % HR. Thermal stabilization was achieved at a depth of 2.5 m, with 21.9 °C



## DEDICATORIA

A Dios, por todas las bendiciones dadas.

A mis tres amores: Alex, Oscar y Diego, porque sin su amor, sus palabras de aliento, sus abrazos reconfortantes en momentos de flaqueza, pero sobre todo su paciencia (y la ayuda en casa), no lo hubiera logrado.

A mis padres, que aún desde el cielo siguen cuidando de mí; en especial a mi madre, pilar de la familia, que siempre velaste por mi bienestar y el de mi familia.

A mis hermanos: Oscar, Erika y Carlos, por alegrarse por mis logros y hacerlos suyos.

## AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, Dr. Julio Cesar Rincón Martínez, profesor de la Universidad Autónoma de Baja California, por el apoyo y guía brindados durante estos tres años, los cuales fueron de gran ayuda para llevar a término la investigación.

A mi co-tutora, Dra. Karen Estrella Martínez Torres, profesora de la Universidad Autónoma de Baja California, por sus asesorías y consejos acertados que fueron de gran ayuda.

A todos mis maestros que, a lo largo de estos tres años, brindaron su tiempo y conocimientos con los que pude nutrir el desarrollo de la investigación, en especial al Dr. Aníbal Luna León que, con su asesoría externa, además de las materias propias del curso, pude dar cuerpo al diseño de la investigación.

Al Dr. Víctor Armando Fuentes Freixanet, profesor-investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, por su disponibilidad y amabilidad para compartir su amplia experiencia, y por lo cual pude lograr un gran avance en el proceso de análisis de los resultados y resolver situaciones críticas que se presentaron durante el desarrollo de la investigación.

Al Dr. Felipe Noh Pat, profesor investigador de la Universidad Autónoma de Campeche, ya que al compartirme sus conocimientos pude entender mucho mejor los procesos que se requerían para desarrollar el objeto de estudio.

Al Dr. Arq. Gonzalo Bojórquez Morales que, con sus palabras de motivación en momentos difíciles de sobrellevar, me dieron el ánimo y la confianza para continuar, además de su gestión oportuna y atenta para los trámites ante CONACYT.

Al Comité de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño de la Universidad Autónoma de Baja California, por aceptarme en el Programa de Doctorado en Arquitectura, Urbanismo y Diseño.

Por último, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico que me permitió llevar a cabo los estudios de doctorado, sin descuidar a mi familia.

## RESUMEN

La humedad en espacios interiores es un factor de riesgo para la habitabilidad de los espacios, ya que puede causar daños en las superficies, malos olores y moho; y, a su vez, generar problemas en la salud de los usuarios, ya que se relaciona con diversas enfermedades respiratorias. Ambientes por encima del 60 % de humedad relativa son más propensos a desarrollar problemas de humedad, los cuales suelen presentarse en viviendas con poco o nulo mantenimiento, que resultan ser frecuentemente las de bajos recursos.

Las recomendaciones generales para reducir dichos problemas señalan el control de la humedad y la ventilación como las estrategias más adecuadas. Por ello, esta investigación desarrolló un sistema pasivo, enfocado a la vivienda de interés social, que regule la humedad, temperatura y ventilación para propiciar la reducción de humedad en interiores, sin desfavorecer la habitabilidad de la vivienda de interés social, al generar la pérdida de humedad del aire por condensación fuera de la vivienda e introducirlo mediante ventilación por estratificación térmica.

Por lo tanto, se desarrolló el experimento en una vivienda existente y en uso, ubicada en la ciudad de Ensenada, Baja California, caracterizada por un clima mediterráneo. El sistema propuesto se conformó de un intercambiador de calor tierra-aire, para reducir la humedad del aire antes de ingresar al espacio; una chimenea solar, para promover la succión del aire por medio de la estratificación térmica; y el doble acristalamiento y sellado de vanos, para propiciar la hermeticidad del espacio de análisis, y, con ello, evaluar de manera efectiva la influencia del sistema en el espacio habitado.

El proceso metodológico consistió en la previa selección del sitio de estudio, la caracterización de la vivienda, para el posterior desarrollo del sistema, el cual consistió en el diseño y dimensionamiento, su construcción y posterior monitoreo, por el periodo de un año, de abril de 2021 a marzo de 2022, atendiendo los cuatro periodos higrotérmicos característicos del sitio.

El análisis y la interpretación de los datos se realizó mediante gráficas lineales, tablas comparativas y cartas psicrométricas, del comportamiento de la humedad, la temperatura y la velocidad del aire en los diferentes puntos de análisis.

Los resultados obtenidos muestran que el sistema deshumidifica en promedio el 12,9 % de HR con un desempeño del 25,0 % de HR en el año, y de 26,2 % de HR en el periodo frío; mantiene los niveles por debajo del 60 % de HR. Se obtiene la estabilización térmica a la profundidad de 2,5 m, de 21,9 °C en promedio; y se propicia un intercambio de aire constante durante todo el día, con una velocidad del aire promedio de 0,18 m/s. Por lo tanto, el sistema propuesto tiene un desempeño favorable para el control de la humedad y contribuye con la habitabilidad del espacio.

**Palabras clave:** control de humedad, deshumidificación, estabilización higrotérmica, intercambiador de calor, chimenea solar.

## ABSTRACT

Indoor moisture is a risk factor for indoor habitability, it can cause damage to surfaces, odors and mold; this can turn out to be a health problem for users since it is related to some respiratory diseases. Environments above 60 % of relative humidity are more feasible to develop moisture problems, which usually occur in homes with low or no maintenance, usually low-income dwellings.

In order to reduce these problems, it has been recommended to apply humidity control and ventilation as the most appropriate strategies. Therefore, this research aims to develop a passive system focused on low-income dwellings that can regulate humidity, temperature and ventilation, to reduce the moisture damage without impairing the habitability through the loss of air humidity by condensation outdoor introducing it through stack effect ventilation.

Therefore, the experiment was develop in a habited house located in Ensenada, Baja California, characterized by a Mediterranean climate. The proposed system includes an earth-air heat exchanger to reduce air humidity before introducing into the living space; a solar chimney to allow air suction by thermal stratification, and a double pane glass and gap sealing to promote the airtightness of the analysis space. The objective was to evaluate the influence of the system on the habited space.

The methodological process consisted in the selection of study site, the characterization of the dwelling, for the subsequent system development, which consisted on the design and sizing, its construction and subsequent monitoring, for one year, from April 2021 to March 2022, covering the four different hygrothermal periods of the area.

The analysis and data interpretation was carried out using linear graphs, comparative tables and psychrometric charts of the humidity, temperature and air velocity behavior at the different points of analysis.

Results obtained show average dehumidification of 12.9% RH with an effective performance of 25.0% RH in the year and 26.2% RH in the cold period, keeps levels below 60 % HR. Thermal stabilization was achieved at a depth of 2.5 m, with 21.9 °C

on average; and a constant air velocity of 0.18 m/s. The proposed system has a favorable performance for humidity control and the indoor habitability.

**Keywords:** moisture control, dehumidification, hygrothermal stabilization, earth-air heat exchanger, solar chimney.

## ÍNDICE GENERAL

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| DEDICATORIA.....                                                       | I   |
| AGRADECIMIENTOS .....                                                  | II  |
| RESUMEN .....                                                          | III |
| ABSTRACT .....                                                         | V   |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                                | X   |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                                                 | XV  |
| INTRODUCCIÓN .....                                                     | 1   |
| 1 PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN .....                              | 3   |
| 1.1 Planteamiento del problema .....                                   | 3   |
| 1.1.1 Clima Mediterráneo .....                                         | 4   |
| 1.1.2 Características generales de la vivienda de interés social. .... | 5   |
| 1.2 Justificación .....                                                | 7   |
| 1.3 Pregunta de Investigación .....                                    | 9   |
| 1.4 Hipótesis.....                                                     | 9   |
| 1.4.1 General.....                                                     | 9   |
| 1.4.2 Específicas .....                                                | 9   |
| 1.5 Objetivos.....                                                     | 10  |
| 1.5.1 General.....                                                     | 10  |
| 1.5.2 Específicos .....                                                | 11  |
| 1.6 Alcances.....                                                      | 11  |
| 1.7 Limitaciones.....                                                  | 12  |
| 2 MARCO TEORICO .....                                                  | 13  |
| 2.1 Conceptual .....                                                   | 13  |
| 2.1.1 Daños físicos a la edificación .....                             | 13  |
| 2.1.2 Moho en espacios interiores.....                                 | 14  |
| 2.1.3 Proceso psicrométrico de la humedad. ....                        | 20  |
| 2.1.4 Sistemas Pasivos .....                                           | 23  |
| 2.2 Antecedentes.....                                                  | 29  |
| 2.2.1 Estudios sobre Moho.....                                         | 29  |
| 2.2.2 Estudios Sistemas Pasivos .....                                  | 31  |

|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| 3 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....                             | 49  |
| 3.1 Selección del sitio .....                                  | 50  |
| 3.1.1 Descripción climática .....                              | 51  |
| 3.2 Características generales de la vivienda en Ensenada ..... | 55  |
| 3.2.1 Caracterización de condiciones de la vivienda .....      | 57  |
| 3.3 Periodo de Evaluación .....                                | 61  |
| 3.4 Variables, instrumentos y equipo de medición .....         | 62  |
| 3.5 Diseño del sistema .....                                   | 63  |
| 3.6 Modelo .....                                               | 68  |
| 3.6.1 Emplazamiento .....                                      | 71  |
| 3.6.2 Características de viviendas y usuarios .....            | 71  |
| 3.7 Construcción del sistema .....                             | 73  |
| 3.7.1 Proceso constructivo .....                               | 77  |
| 4 MONITOREO, REGISTRO Y PROCESAMIENTO DE DATOS .....           | 83  |
| 4.1 Monitoreo de variables .....                               | 84  |
| 4.1.1 Instrumentos de referencia .....                         | 84  |
| 4.1.2 Etiquetado de sensores y data loggers .....              | 89  |
| 4.1.3 Ubicación y fijación de sensores .....                   | 89  |
| 4.2 Registro y obtención de datos .....                        | 97  |
| 4.2.1 Conformación de la base de datos .....                   | 99  |
| 4.3 Procesamiento de la base de datos .....                    | 101 |
| 4.4 Interpretación de la base de datos .....                   | 104 |
| 5 RESULTADOS .....                                             | 110 |
| 5.1 Desempeño del sistema por variable .....                   | 110 |
| 5.1.1 Desempeño hídrico .....                                  | 111 |
| 5.1.2 Desempeño térmico .....                                  | 117 |
| 5.1.3 Desempeño de ventilación .....                           | 124 |
| 5.2 Día representativo .....                                   | 128 |
| DISCUSION .....                                                | 138 |
| CONCLUSIONES .....                                             | 142 |
| LINEAS DE INVESTIGACION FUTURA .....                           | 147 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                               | 148 |



|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| APÉNDICE A. Desempeño hídrico mensual.....        | 154 |
| APÉNDICE B. Desempeño térmico mensual.....        | 218 |
| APÉNDICE C. Desempeño mensual de ventilación..... | 278 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 <i>Regiones con Clima Mediterráneo</i> .....                                             | 5  |
| Figura 2 <i>Causas del síndrome del edificio enfermo</i> .....                                    | 18 |
| Figura 3 <i>Ejemplo típico de carta psicrométrica</i> .....                                       | 21 |
| Figura 4 <i>Estrategias de diseño bioclimático en carta psicrométrica</i> .....                   | 22 |
| Figura 5 <i>Principios de la concepción bioclimática</i> .....                                    | 23 |
| Figura 6 <i>Clasificación de estrategias de diseño pasivo</i> .....                               | 24 |
| Figura 7 <i>Esquema general de un intercambiador de calor</i> .....                               | 26 |
| Figura 8 <i>Esquema general de una chimenea solar</i> .....                                       | 28 |
| Figura 9 <i>Esquema de sistema de enfriamiento y deshumidificación</i> .....                      | 31 |
| Figura 10 <i>Esquema de sistema cuasi-pasivo de deshumidificación</i> .....                       | 33 |
| Figura 11 <i>Esquema de sistema pasivo automatizado para acondicionamiento</i> .....              | 33 |
| Figura 12 <i>Esquema intercambiador de calor en clima semi-árido</i> .....                        | 36 |
| Figura 13 <i>Esquema de intercambiador de tipo serpentín en Egipto</i> .....                      | 37 |
| Figura 14 <i>Intercambiador de calor en clima mediterráneo</i> .....                              | 39 |
| Figura 15 <i>Esquema de intercambiador cercano a superficie de suelo</i> .....                    | 40 |
| Figura 16 <i>Esquema de intercambiador de calor tierra aire de circuito abierto</i> .....         | 41 |
| Figura 17 <i>Esquema de intercambiador de calor en clima árido</i> .....                          | 42 |
| Figura 18 <i>Esquema de chimenea solar para ventilación natural</i> .....                         | 43 |
| Figura 19 <i>Esquema de chimenea solar sobre cubierta en clima cálido</i> .....                   | 44 |
| Figura 20 <i>Esquema de sistema combinado de tres dispositivos</i> .....                          | 45 |
| Figura 21 <i>Esquema de intercambiador de calor y chimenea solar combinados</i> .....             | 45 |
| Figura 22 <i>Metodología de experimento</i> .....                                                 | 50 |
| Figura 23 <i>Localización del experimento</i> .....                                               | 51 |
| Figura 24 <i>Tipos de clima en México</i> .....                                                   | 52 |
| Figura 25 <i>Estimación de humedad relativa en Ensenada, B.C.</i> .....                           | 53 |
| Figura 26 <i>Estimación de temperatura y radiación solar en Ensenada, B.C.</i> .....              | 54 |
| Figura 27 <i>Daños por humedad identificados en la vivienda</i> .....                             | 58 |
| Figura 28 <i>Equipo de monitoreo. Datalogger</i> .....                                            | 59 |
| Figura 29 <i>Ubicación de sensores</i> .....                                                      | 59 |
| Figura 30 <i>Comportamiento higrotérmico en un día específico</i> .....                           | 60 |
| Figura 31 <i>Comportamiento higrotérmico en una semana específica</i> .....                       | 61 |
| Figura 32 <i>Instrumentos de medición utilizados en el arreglo experimental</i> .....             | 62 |
| Figura 33 <i>Estimación de la temperatura de subsuelo y el punto de rocío</i> .....               | 65 |
| Figura 34 <i>Análisis de temperaturas del suelo en las tres profundidades seleccionadas</i> ..... | 66 |
| Figura 35 <i>Método simplificado de cálculo para intercambiadores de calor tierra aire</i> .....  | 67 |
| Figura 36 <i>Viviendas de estudio</i> .....                                                       | 69 |
| Figura 37 <i>Esquema de prototipo IC/CS-01</i> .....                                              | 70 |
| Figura 38 <i>Emplazamiento del estudio</i> .....                                                  | 72 |
| Figura 39 <i>Áreas de estudio en vivienda prototipo IC/CS-01</i> .....                            | 73 |
| Figura 40 <i>Sección transversal del sistema IC/CS-01</i> .....                                   | 74 |
| Figura 41 <i>Dimensionamiento de chimenea solar del IC/CS-01</i> .....                            | 75 |
| Figura 42 <i>Proceso de excavación</i> .....                                                      | 78 |

|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 43 Construcción de intercambiador. ....                                                  | 78  |
| Figura 44 Sistema de dren. ....                                                                 | 79  |
| Figura 45 Entrada y salida de intercambiador. ....                                              | 80  |
| Figura 46 Intercambiador de calor - trayecto vertical. ....                                     | 80  |
| Figura 47 Construcción de chimenea solar. ....                                                  | 81  |
| Figura 48 Aislamiento de chimenea solar. ....                                                   | 82  |
| Figura 49 Esquema del proceso de evaluación del sistema. ....                                   | 83  |
| Figura 50 Proceso de diagnóstico de instrumentos. ....                                          | 84  |
| Figura 51 Gráfica de sensores de temperatura. ....                                              | 86  |
| Figura 52 Gráfica de sensores de humedad relativa. ....                                         | 87  |
| Figura 53 Gráfica de sensores de velocidad de aire. ....                                        | 88  |
| Figura 54 Ubicación de los instrumentos de monitoreo. ....                                      | 93  |
| Figura 55 Distribución de sensores en IC. ....                                                  | 94  |
| Figura 56 Detalles de instalación de sensores. ....                                             | 94  |
| Figura 57 Detalles de instalación de sensores de velocidad de aire. ....                        | 95  |
| Figura 58 Detalle de sensores en espacios habitados. ....                                       | 95  |
| Figura 59 Detalles de protección de sensores. ....                                              | 96  |
| Figura 60 Software para obtención de datos. ....                                                | 97  |
| Figura 61 Gráfica que refleja problemas con sensor TS-1. ....                                   | 98  |
| Figura 62 Gráfica de sensor TS corregido. ....                                                  | 99  |
| Figura 63 Diagrama de proceso del procesamiento de datos. ....                                  | 101 |
| Figura 64 Relación de puntos de análisis por variable. ....                                     | 102 |
| Figura 65 Ejemplo de gráfica psicrométrica del 10 de marzo 12:00 h. ....                        | 105 |
| Figura 66 Gráficas diarias de comparación de temperatura. ....                                  | 107 |
| Figura 67 Gráficas diarias de comparación de humedad relativa. ....                             | 109 |
| Figura 68 Resumen del desempeño higríco anual. ....                                             | 113 |
| Figura 69 Resumen de condiciones hígricas propiciadas por el sistema. ....                      | 114 |
| Figura 70 Desempeño higríco del sistema. ....                                                   | 116 |
| Figura 71 Resumen del desempeño térmico anual. ....                                             | 119 |
| Figura 72 Resumen de condiciones térmicas propiciadas por el sistema. ....                      | 120 |
| Figura 73 Desempeño térmico del sistema. ....                                                   | 123 |
| Figura 74 Resumen del desempeño de ventilación anual. ....                                      | 125 |
| Figura 75 Desempeño de ventilación del sistema. ....                                            | 127 |
| Figura 76 Carta psicrométrica del punto de rocío de un día representativo. ....                 | 129 |
| Figura 77 Temperaturas de suelo estimadas-registradas. ....                                     | 130 |
| Figura 78 Desempeño integral del sistema. ....                                                  | 131 |
| Figura 79 Desempeño integral del sistema respecto al espacio experimental. ....                 | 134 |
| Figura 80 Desempeño integral del sistema respecto a los espacios habitados. ....                | 135 |
| Figura 81 Carta psicrométrica del comportamiento del sistema a las 6:00 h. ....                 | 136 |
| Figura 82 Carta psicrométrica del comportamiento del sistema a las 9:00 h. ....                 | 137 |
| Figura A 1 Humedades relativas registradas en el mes de abril. ....                             | 155 |
| Figura A 2 Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de abril. .... | 157 |
| Figura A 3 Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados – Abril. ....          | 159 |

|                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura A 4 <i>Humedades relativas registradas el mes de mayo</i> .....                                        | 161 |
| Figura A 5 <i>Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de mayo</i> .....         | 163 |
| Figura A 6 <i>Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de mayo</i> .....        | 165 |
| Figura A 7 <i>Humedades relativas registradas el mes de junio</i> .....                                       | 166 |
| Figura A 8 <i>Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de junio</i> .....        | 168 |
| Figura A 9 <i>Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de junio</i> .....       | 170 |
| Figura A 10 <i>Humedades relativas registradas el mes de julio</i> .....                                      | 172 |
| Figura A 11 <i>Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de julio</i> .....       | 173 |
| Figura A 12 <i>Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de julio</i> .....      | 175 |
| Figura A 13 <i>Humedades relativas registradas el mes de agosto</i> .....                                     | 177 |
| Figura A 14 <i>Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de agosto</i> .....      | 178 |
| Figura A 15 <i>Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de agosto</i> .....     | 180 |
| Figura A 16 <i>Humedades relativas registradas el mes de septiembre</i> .....                                 | 182 |
| Figura A 17 <i>Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de septiembre</i> .....  | 184 |
| Figura A 18 <i>Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de septiembre</i> ..... | 185 |
| Figura A 19 <i>Humedades relativas registradas el mes de octubre</i> .....                                    | 187 |
| Figura A 20 <i>Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de octubre</i> .....     | 189 |
| Figura A 21 <i>Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de octubre</i> .....    | 190 |
| Figura A 22 <i>Humedades relativas registradas el mes de noviembre</i> .....                                  | 192 |
| Figura A 23 <i>Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de noviembre</i> .....   | 193 |
| Figura A 24 <i>Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de noviembre</i> .....  | 195 |
| Figura A 25 <i>Humedades relativas registradas el mes de diciembre</i> .....                                  | 197 |
| Figura A 26 <i>Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de diciembre</i> .....   | 199 |
| Figura A 27 <i>Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de diciembre</i> .....  | 200 |
| Figura A 28 <i>Humedades relativas registradas el mes de enero</i> .....                                      | 202 |
| Figura A 29 <i>Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de enero</i> .....       | 204 |
| Figura A 30 <i>Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de enero</i> .....      | 206 |
| Figura A 31 <i>Humedades relativas registradas el mes de febrero</i> .....                                    | 207 |

|                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura A 32 <i>Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de febrero</i> .....        | 209 |
| Figura A 33 <i>Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de febrero</i> .....       | 211 |
| Figura A 34 <i>Humedades relativas registradas el mes de marzo</i> .....                                         | 213 |
| Figura A 35 <i>Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de marzo</i> .....          | 214 |
| Figura A 36 <i>Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de marzo</i> .....         | 216 |
| <br>                                                                                                             |     |
| Figura B 1 <i>Temperaturas registradas en el mes de abril</i> .....                                              | 219 |
| Figura B 2 <i>Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de abril</i> .....       | 220 |
| Figura B 3 <i>Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de abril</i> .....       | 222 |
| Figura B 4 <i>Temperaturas registradas en el mes de mayo</i> .....                                               | 224 |
| Figura B 5 <i>Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de mayo</i> .....        | 226 |
| Figura B 6 <i>Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de mayo</i> .....        | 227 |
| Figura B 7 <i>Temperaturas registradas en el mes de junio</i> .....                                              | 229 |
| Figura B 8 <i>Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de junio</i> .....       | 230 |
| Figura B 9 <i>Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de junio</i> .....       | 232 |
| Figura B 10 <i>Temperaturas registradas en el mes de julio</i> .....                                             | 233 |
| Figura B 11 <i>Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de julio</i> .....      | 235 |
| Figura B 12 <i>Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de julio</i> .....      | 237 |
| Figura B 13 <i>Temperaturas registradas en el mes de agosto</i> .....                                            | 238 |
| Figura B 14 <i>Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de agosto</i> .....     | 240 |
| Figura B 15 <i>Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de agosto</i> .....     | 242 |
| Figura B 16 <i>Temperaturas registradas en el mes de septiembre</i> .....                                        | 243 |
| Figura B 17 <i>Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de septiembre</i> ..... | 245 |
| Figura B 18 <i>Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de septiembre</i> ..... | 247 |
| Figura B 19 <i>Temperaturas registradas en el mes de octubre</i> .....                                           | 248 |
| Figura B 20 <i>Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de octubre</i> .....    | 250 |
| Figura B 21 <i>Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de octubre</i> .....    | 252 |
| Figura B 22 <i>Temperaturas registradas en el mes de noviembre</i> .....                                         | 253 |



|                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura B 23 <i>Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de noviembre.</i> | 255 |
| Figura B 24 <i>Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de octubre.</i>   | 257 |
| Figura B 25 <i>Temperaturas registradas en el mes de diciembre.</i>                                        | 258 |
| Figura B 26 <i>Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de diciembre.</i> | 260 |
| Figura B 27 <i>Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de diciembre.</i> | 262 |
| Figura B 28 <i>Temperaturas registradas en el mes de enero.</i>                                            | 263 |
| Figura B 29 <i>Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de enero.</i>     | 265 |
| Figura B 30 <i>Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de enero.</i>     | 267 |
| Figura B 31 <i>Temperaturas registradas en el mes de febrero.</i>                                          | 268 |
| Figura B 32 <i>Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de febrero.</i>   | 270 |
| Figura B 33 <i>Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de febrero.</i>   | 272 |
| Figura B 34 <i>Temperaturas registradas en el mes de marzo.</i>                                            | 273 |
| Figura B 35 <i>Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de marzo.</i>     | 275 |
| Figura B 36 <i>Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de marzo.</i>     | 277 |
|                                                                                                            |     |
| Figura C 1 <i>Comportamiento de la velocidad del aire en abril.</i>                                        | 279 |
| Figura C 2 <i>Velocidad del aire en un día específico (3 de abril).</i>                                    | 280 |
| Figura C 3 <i>Comportamiento de la velocidad del aire en mayo.</i>                                         | 281 |
| Figura C 4 <i>Velocidad del aire en un día (2 de mayo).</i>                                                | 283 |
| Figura C 5 <i>Comportamiento de la velocidad del aire en junio.</i>                                        | 284 |
| Figura C 6 <i>Comportamiento de la velocidad del aire en julio.</i>                                        | 285 |
| Figura C 7 <i>Comportamiento de la velocidad del aire en agosto.</i>                                       | 287 |
| Figura C 8 <i>Comportamiento de la velocidad del aire en septiembre.</i>                                   | 288 |
| Figura C 9 <i>Comportamiento de la velocidad del aire en octubre.</i>                                      | 290 |
| Figura C 10 <i>Comportamiento de la velocidad del aire en noviembre.</i>                                   | 291 |
| Figura C 11 <i>Comportamiento de la velocidad del aire en diciembre.</i>                                   | 293 |
| Figura C 12 <i>Comportamiento de la velocidad del aire en enero.</i>                                       | 294 |
| Figura C 13 <i>Comportamiento de la velocidad del aire en febrero.</i>                                     | 296 |
| Figura C 14 <i>Comportamiento de la velocidad del aire en marzo.</i>                                       | 298 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1 <i>Niveles de umbral sugeridos para esporas de hongos en el aire interior.</i> | 29  |
| Tabla 2 <i>Resultados de la inspección visual por humedad en un departamento</i>       | 30  |
| Tabla 3 <i>Proyectos donde se utiliza el sistema EATHE</i>                             | 34  |
| Tabla 4 <i>Comparación de dimensiones de intercambiadores de calor</i>                 | 47  |
| Tabla 5 <i>Comparación de dimensiones de chimeneas solares</i>                         | 48  |
| Tabla 6 <i>Características de la Investigación</i>                                     | 49  |
| Tabla 7 <i>Clasificación del tipo de vivienda por precio</i>                           | 55  |
| Tabla 8 <i>Especificaciones de intercambiador de calor propuesto.</i>                  | 67  |
| Tabla 9 <i>Especificaciones de chimenea solar propuesta.</i>                           | 68  |
| Tabla 10 <i>Especificaciones técnicas de instrumentos de medición.</i>                 | 85  |
| Tabla 11 <i>Valores de corrección para sensores de temperatura.</i>                    | 86  |
| Tabla 12 <i>Valores de corrección para sensores de humedad relativa.</i>               | 87  |
| Tabla 13 <i>Valores de corrección para sensores de velocidad de aire</i>               | 89  |
| Tabla 14 <i>Etiquetado de sensores y data loggers</i>                                  | 90  |
| Tabla 15 <i>Organización de base de datos (Sección 1)</i>                              | 99  |
| Tabla 16 <i>Organización de base de datos (Sección 2)</i>                              | 100 |
| Tabla 17 <i>Organización de base de datos (Sección 3)</i>                              | 100 |

## INTRODUCCIÓN

En la presente investigación, se realiza la propuesta y evaluación de un sistema pasivo con el objetivo de reducir los problemas de humedad en espacios interiores de la vivienda de interés social y que contribuya a la habitabilidad del espacio, al regular las condiciones de humedad, temperatura y ventilación, para propiciar la pérdida de humedad del aire por condensación fuera de la vivienda e introducir dicho aire a través de ventilación por estratificación térmica; esto, mediante la previa identificación del conjunto de técnicas de diseño pasivo adecuadas para ello, así como el dimensionamiento óptimo del sistema, para su posterior construcción, monitoreo y evaluación del desempeño para reducir la humedad.

Lo anterior, se debe a que los problemas de humedad en los espacios interiores representan un factor de riesgo para la salud de las personas, ya que la exposición prolongada a estos, puede ocasionar afecciones respiratorias graves. Por lo que la OMS, sugiere realizar investigaciones que permitan dar soluciones a dicha problemática, que sean adecuadas a las características del sitio donde se presenta, y señala que el control de la humedad y la ventilación son las estrategias más adecuadas para reducir dichos problemas.

Por otra parte, actualmente se busca implementar estrategias que favorezcan la reducción del consumo energético, como parte de los Objetivos de Desarrollo Sustentable, ODS, promovidos por la Organización de las Naciones Unidas, por lo que las investigaciones en torno al beneficio de los sistemas pasivos para promover el uso de los recursos naturales y evitar el consumo de energía, va en aumento.

La investigación se desarrolla en Ensenada, Baja California, una ciudad costera que se caracteriza por condiciones de humedad elevada. La evaluación del desempeño del sistema se llevó a cabo por un periodo de un año, mediante el monitoreo de los factores físicos ambientales de humedad relativa, temperatura y velocidad de aire, a través de diversos instrumentos de medición, en puntos específicos: a) los dispositivos que conformaron el sistema propuesto: un intercambiador de calor tierra-aire, para reducir la humedad del aire antes de ingresar al espacio; y una



chimenea solar, para promover la succión del aire por medio de estratificación térmica; b) el ambiente exterior; c) en los espacios habitados; y, d) la temperatura del suelo; para comparar la influencia del sistema en la vivienda existente. El análisis y la interpretación de los datos se realizó mediante gráficas lineales, tablas comparativas del aumento y/o reducción de humedad, temperatura y velocidad del aire en los diferentes puntos de análisis, y gráficas psicrométricas del funcionamiento del sistema.

El presente documento consta de cinco capítulos; el primero, se refiere al planteamiento de la investigación, en el que se presenta la problemática detectada, así como los fundamentos que motivan a la posible solución y los objetivos que persigue. El segundo capítulo, presenta los conceptos generales indispensables para la comprensión del tema, así como las investigaciones previas que se relacionan de alguna u otra manera con la presente. En el tercero, se desarrolla la metodología implementada para llevar a cabo la investigación y se describen los elementos necesarios para su desarrollo. En el cuarto, se describe el procesamiento de los datos obtenidos durante el monitoreo del sistema propuesto; y, en el quinto, se presentan, a través de gráficas lineales y tablas comparativas, los resultados obtenidos, los cuales se organizan por periodos higrotérmicos.

Por último, se muestran las discusiones que se generan al contrastar los resultados obtenidos con los antecedentes consultados, y, posteriormente, las conclusiones a las que se llegó, si el sistema propuesto logra o no el objetivo de la investigación. Además, se presentan posibles alternativas de investigación que pueden derivar de la presente, de acuerdo con diferentes enfoques o intereses. Al final, se muestran las fuentes de información en la que se sustentan los conocimientos de esta investigación.

## 1 PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1 Planteamiento del problema

La humedad en los espacios interiores genera impactos negativos en toda edificación; ellos se encuentran catalogados dentro de las patologías de la edificación y pueden producir efectos adversos en la salud de los usuarios, ya que existe un fuerte vínculo entre la humedad en los edificios y el crecimiento de moho y las enfermedades respiratorias asociadas en relación con la calidad del aire interior en los hogares (Singh *et al.*, 2010).

El exceso de humedad, causado por la condensación, las fugas, los derrames o los procesos de construcción, es la causa generalizada y perjudicial de deterioro que afecta a los edificios (Watt, 2007).

Los efectos que la humedad genera sobre las edificaciones son un problema que se puede observar en diferentes países y tipologías de la edificación. Una de las consecuencias de la presencia de humedad en los espacios interiores es el desarrollo de moho, que es un tipo de hongo; la mayoría de estos se originan en el ambiente exterior. Ciertos contaminantes fúngicos de interior representan un riesgo potencial para la salud de los ocupantes del edificio y pueden provocar el síndrome del edificio enfermo (Li & Yang, 2004).

En países como Estados Unidos, los problemas relacionados con la proliferación de moho en edificios son temas de interés; en Corea, Reino Unido y Hong Kong, la infestación de moho en edificios residenciales se ha convertido en una preocupación importante (Singh *et al.*, 2011). En Europa, América del Norte, Corea y el Norte de China, las condiciones térmicas en espacios interiores son ideales para el crecimiento de moho; además, se identificó que la exposición insuficiente a la luz solar puede ser un factor para el crecimiento de moho (Singh *et al.*, 2010).

Algunos factores físicos ambientales están estrechamente relacionados con el crecimiento de hongos y las poblaciones de esporas (Li & Yang, 2004). La combinación de dichos microorganismos con diversos factores ambientales como

la humedad, la temperatura y la luz, generan en la edificación lo que se denomina *biodeterioro*, que es el “cambio no deseado en las propiedades de un material ocasionado por la actividad vital de organismos y/o microorganismos” (Restrepo *et al.*, 2007). De igual manera, diversos tipos de hongos generan micotoxinas, que son compuestos tóxicos producidos de manera natural, las cuales constituyen un problema severo para la salud humana, ya que algunas de ellas se consideran carcinógenos potentes (World Health Organization, 2009).

El estudio del impacto que tienen las edificaciones en la salud humana, ha tenido un crecimiento a través de los años; sin embargo, las investigaciones se enfocan a la prevención de los factores que causan dicho impacto principalmente en áreas de trabajo; no se ha profundizado en el aspecto de corregir o prevenir problemas que se presentan en las viviendas.

Las condiciones climáticas de cada ciudad, pueden propiciar el aumento en los problemas de humedad en los espacios interiores, al generarse las condiciones antes mencionadas; por ello es necesario identificar y considerar cuáles son los factores climáticos que pueden afectar las condiciones internas. De igual manera, las características propias de la edificación, como dimensiones, materiales y acabados, son agentes potenciales de problemas de humedad.

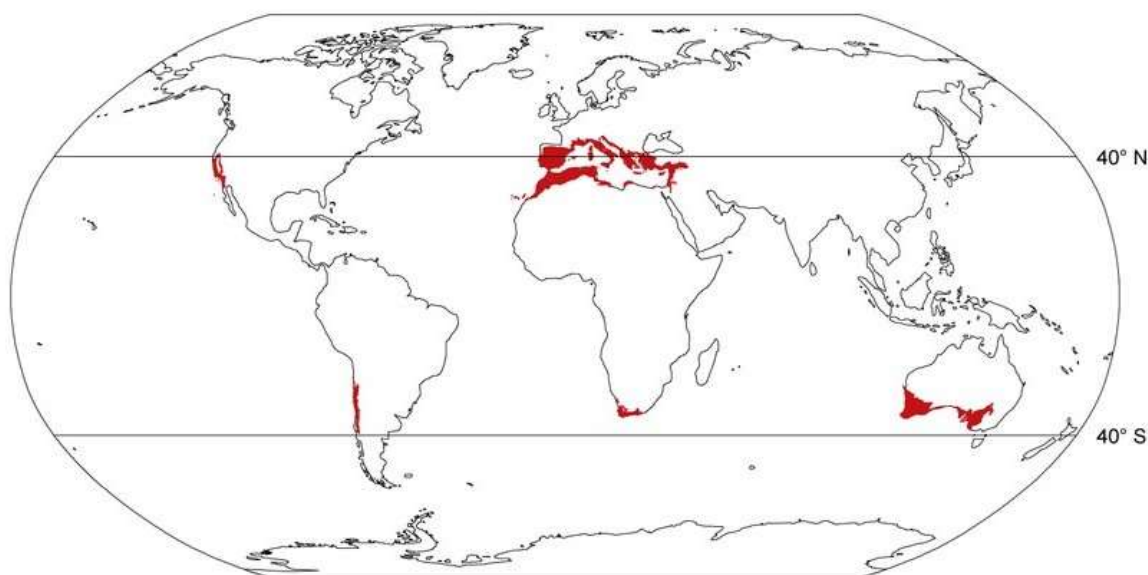
A continuación, se exponen las características generales del clima Mediterráneo, así como las características de la vivienda de interés social, con el fin de obtener una aplicación de la problemática general.

### 1.1.1 Clima Mediterráneo

El clima mediterráneo se caracteriza por tener veranos calurosos y secos e inviernos fríos y húmedos. Este tipo de clima se encuentra entre las latitudes 30° y 45° Norte y Sur del ecuador, y en los lados occidentales de los continentes.

**Figura 1**

*Regiones con Clima Mediterráneo*



*Nota.* Reproducido de "Strategies for greenhouse gas emissions mitigation in Mediterranean agriculture: a review" (p. 6) por Sanz-Cobena *et al.*, 2017, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 238.

Se localiza solo en cinco regiones en todo el mundo. Polade et al. (2017) las catalogan como Cuenca del Mediterráneo en Europa (MED), Sudamérica (SAA), California en Norteamérica (CAL), Sudáfrica (SAF) y Australia (Figura 1).

La temporada de invierno (Hemisferio Norte-HN: Diciembre-Enero-Febrero; Hemisferio Sur-HS: Junio-Julio-Agosto) es el pico de la época húmeda en las regiones con clima mediterráneo (Polade et al., 2017).

### 1.1.2 Características generales de la vivienda de interés social.

Es probable que la humedad se presente con mayor frecuencia en casas con hacinamiento o en aquellas que carecen de calefacción, ventilación y aislamientos adecuados (World Health Organization, 2009); al tener mayor concentración de

personas en un espacio determinado se genera un aumento en la temperatura y mayor aportación de humedad al ambiente, lo que propicia condiciones para el desarrollo de moho y diversos problemas de humedad. Por ello es que las comunidades de bajos recursos son propensas a presentar problemas de humedad, debido que es común que tengan mayor número de habitantes por m<sup>2</sup>, además de tener pocos incentivos para que los propietarios mejoren las viviendas; aunado a ello, los costos que significan tanto las soluciones temporales cuando se presentan los problemas de humedad como el mejoramiento de las viviendas, no pueden ser cubiertos a consecuencia de los bajos recursos económicos que caracteriza a dicho sector de la población. La presencia de humedad en interiores se estima que prevalece de un 10 al 50 %, principalmente en barrios desfavorecidos (World Health Organization, 2009).

Como parte de los requisitos sanitarios mínimos que debe reunir una vivienda, la OPS (Organización Panamericana de la Salud, 2001), señala que el diseño constructivo, junto con los materiales, mobiliario y equipamiento, “no deben comportar factores de riesgo por producción o transmisión de tóxicos ambientales, alojamiento y reproducción de vectores de enfermedades, transmisión o generación de fenómenos físicos, químicos, microbiológicos e inducción de estilos de vida insanos en la familia.” ( p.158). Por lo tanto, un diseño constructivo deficiente, puede ser una causa de problemas de humedad en espacios interiores.

Por ello, es fundamental evitar los problemas de humedad desde el diseño de la vivienda, al considerar la ubicación y el dimensionamiento adecuado de las ventanas para propiciar la ventilación necesaria tanto para confort como para el intercambio de aire necesario para una buena calidad del aire interior; de igual manera, considerar los materiales a utilizar, los sistemas constructivos y las estrategias de diseño adecuados para que se cubran tanto aspectos de confort como de higiene en las viviendas, principalmente en las de interés social.

## 1.2 Justificación

La OMS establece que el medio más importante para evitar efectos adversos en la salud es la prevención o minimización de la humedad constante y el crecimiento microbiano en superficies interiores y estructuras de edificios (World Health Organization, 2009).

La importancia del tema, radica en que los seres humanos pasan una gran cantidad de tiempo dentro de las edificaciones, independientemente del uso o destino que ésta tenga.

Como parte de los lineamientos que la OMS propone en el tema de la calidad del aire interior y su relación con la humedad y el moho, se encuentra el actualizar recomendaciones locales por regiones climáticas, para controlar el crecimiento microbiano por humedad y garantizar la calidad del aire interior en un nivel deseable.

El enfocar la investigación en la vivienda, específicamente en la de interés social, responde a la necesidad de solucionar la problemática antes mencionada en uno de los sectores con mayor vulnerabilidad, ya que debido a las características de diseño de la vivienda, enfocada a solucionar el tema de espacio y no de la calidad del mismo, las soluciones comunes a los problemas de humedad son mecánicas, como extractores o deshumidificadores, lo que representan costos elevados tanto para adquisición como en consumo de energía y/o mantenimiento, costos que difícilmente el propietario puede solventar; por ello, al proponer el uso de sistemas pasivos se fomenta evitar el consumo innecesario de energía.

La OMS, señala que tanto la humedad como el crecimiento del moho pueden ser particularmente frecuentes en viviendas con deficiente mantenimiento, que se caracterizan por ser las de bajos recursos. Indica que se debe dar prioridad a remediar "las condiciones que conducen a la exposición adversa para evitar una contribución adicional a la mala salud en las poblaciones que ya viven con una mayor carga de enfermedad" (World Health Organization, 2009).

La presencia de hongos o moho en los espacios interiores es un problema común de las edificaciones. Las repercusiones o daños que estos generan en las diversas superficies y materiales interiores, así como en la salud de los ocupantes, resalta la importancia de resolver dicha situación.

Los estudios existentes que tratan sobre las condiciones ambientales y la relación con la edificación, se enfocan en aspectos de eficiencia energética y confort térmico, es por ello que la presente investigación aborda el tema de humedad en la edificación, en relación con los efectos negativos que ésta genera, con un enfoque preventivo. Con el desarrollo de esta tesis, se propone un sistema pasivo que permita regular las condiciones hígricas al interior de la vivienda, para prevenir las condiciones de humedad en las que se desarrolla el moho y diversos problemas de humedad.

La finalidad de dicha investigación es generar el conocimiento necesario para futuras investigaciones, contribuir a la solución de los problemas existentes en condiciones ambientales similares, y promover el uso de sistemas pasivos para evitar el consumo energético.

Por lo anterior, los resultados obtenidos se pueden utilizar en el ámbito de la política pública, proponiendo la implementación del sistema, principalmente por parte de los desarrolladores de vivienda de interés social, en los futuros proyectos, así como en viviendas de los diferentes estratos socioeconómicos; para el mejoramiento de la habitabilidad del espacio y la calidad del aire al interior; lo que conlleva a un beneficio social. La presente investigación puede servir, además, como guía para investigaciones similares en cualquiera de las regiones que forman parte del clima Mediterráneo.



### 1.3 Pregunta de Investigación

¿Cuál es la configuración de un sistema pasivo de acondicionamiento para clima mediterráneo que favorece la reducción de los problemas de humedad en espacios interiores y contribuye a las condiciones de habitabilidad, mediante la regulación de las condiciones de humedad, temperatura y ventilación, de la vivienda de interés social?

### 1.4 Hipótesis

#### 1.4.1 General

La combinación de un intercambiador de calor tierra-aire y chimenea solar, que permite regular las condiciones de humedad, temperatura y ventilación, es la configuración de un sistema pasivo de acondicionamiento para clima mediterráneo que favorece la reducción de los problemas de humedad en espacios interiores y contribuye con las condiciones de habitabilidad de la vivienda de interés social.

#### 1.4.2 Específicas

- a) Los niveles elevados de humedad en las viviendas de interés social producen un deterioro constructivo permanente en éstas, y desfavorecen las condiciones de habitabilidad de quienes las ocupan.
- b) El clima en la ciudad de Ensenada es predominantemente húmedo y frío a lo largo del año, por lo que da lugar a la presencia de niveles altos de humedad al interior de los espacios y la proliferación constante de moho.
- c) Un sistema pasivo de acondicionamiento, donde predomine el flujo de ventilación seca, permite reducir los niveles de humedad al interior de los espacios y, con ello, la proliferación de moho.



- d) La implementación de un sistema pasivo de acondicionamiento permite operar, de manera conjunta, las diferentes estrategias de diseño bioclimático convenientes para reducir los niveles de humedad al interior de los espacios.
- e) El funcionamiento conjunto de las diferentes estrategias de diseño pasivo implementadas en el sistema, crea un microclima al interior del espacio, completamente ajeno a las condiciones del exterior, estable a lo largo del año.
- f) El sistema pasivo de acondicionamiento permite crear condiciones de temperatura, humedad y ventilación, que trabajan de forma conjunta en pro de reducir los niveles que fomentan la reproducción de moho.
- g) La implementación de este sistema pasivo de acondicionamiento en las tipologías próximas de vivienda de interés social a construirse en la ciudad de Ensenada, contribuirá en la reducción de la presencia de humedad en el interior de los espacios, en mejorar las condiciones de habitabilidad de los usuarios, en la eficiencia energética de las viviendas y en la integración armónica al medio donde se emplazan.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 General

Desarrollar un sistema pasivo de acondicionamiento para clima mediterráneo que, al generar la pérdida de humedad del aire por condensación fuera de la vivienda e introducirlo mediante ventilación por estratificación térmica, que permita regular las condiciones de humedad, temperatura y ventilación, y mantener el nivel de humedad relativa por debajo del 60% para reducir los daños por humedad en interiores, y que contribuya a la habitabilidad de la vivienda de interés social.

### 1.5.2 Específicos

- a) Identificar los periodos higrotérmicos extremos de un año típico a partir de un análisis climático de la ciudad de Ensenada.
- b) Analizar el comportamiento higrotérmico en el interior de viviendas existentes que presentan daños por humedad, en la ciudad de Ensenada, B.C.
- c) Identificar el conjunto de técnicas de diseño pasivo adecuadas para desarrollar un sistema pasivo, que no afecte la habitabilidad de la vivienda de interés social, en bioclima mediterráneo.
- d) Determinar el dimensionamiento óptimo de un sistema pasivo de acondicionamiento que contribuya con el control de la humedad al interior de los espacios.
- e) Construir un sistema pasivo de acondicionamiento que contribuya con el control de la humedad que permita mermar los problemas de humedad.
- f) Monitorear las condiciones ambientales al interior y al exterior del sistema pasivo de acondicionamiento.
- g) Evaluar el desempeño del sistema pasivo de acondicionamiento a partir de la comparación de las condiciones exteriores e interiores de éste, para mantener por debajo del 60 % de HR al interior de los espacios.

### 1.6 Alcances

La investigación se enfoca a vivienda de interés social de tipo unifamiliar. Debido a las características de las viviendas multifamiliares, varias viviendas en varios niveles, el sistema propuesto no cumple con las características para suministrar a todas ellas de la cantidad de aire necesario para regular los niveles de humedad en cada uno de los espacios.

## 1.7 Limitaciones

Las limitaciones que se tuvieron para el desarrollo de la investigación fueron económicas, de tiempo y administrativas.

Como parte de las recomendaciones de la OMS, uno de los objetivos específicos de la investigación era el identificar el tipo de hongos, específicos para la región, que se generan en las viviendas con problemas de humedad, y determinar los rangos de humedad, temperatura, ventilación e iluminación en los que los organismos se desarrollan, para que el sistema propuesto regulara dichos rangos y evitar la proliferación de dichos organismos. Sin embargo, al acercarnos a instituciones que pudieran ayudar en la identificación y determinación de los rangos, tales como CICESE y el Departamento de Nanotecnología de la Universidad Autónoma de Baja California, indicaron que dicho proceso de trabajo excedía el tiempo estimado para poder desarrollarlo, de igual manera se requerían recursos económicos con los que no se contaban, ya que la presente investigación no está siendo financiada por ningún organismo público o privado; todos los recursos económicos utilizados para el desarrollo de la investigación son propios del autor.

Otro factor que limitó en cierta medida el desarrollo de la investigación, fue la crisis mundial de la pandemia por COVID-19, ya que frenó actividades en diferentes ámbitos y niveles, al cerrar diversos negocios y empresas no se pudieron realizar cotizaciones necesarias; de igual manera, no se pudo contactar en tiempo y forma con oficinas gubernamentales y/o del sector privado para obtener información relevante para la investigación.

La falta de apoyo por parte de la institución educativa en dar facilidades para utilizar las instalaciones para el desarrollo de la investigación, así como en la gestión administrativa para solicitar apoyos de diversas organizaciones, relacionadas con la investigación, para solventar los gastos, esto debido a procesos burocráticos que afectarían los tiempos en la investigación.

## 2 MARCO TEORICO

### 2.1 Conceptual

#### 2.1.1 Daños físicos a la edificación

La patología de la edificación se define como “el estudio científico de las anomalías en la estructura y el funcionamiento de la envoltura del edificio y sus partes, que podrían provocar la mala salud de los ocupantes y un hábitat deficiente para vivir” (Singh *et al.*, 2010, p.40)

Por su parte, la OMS define problemas de humedad como “cualquier consecuencia visible, medible o percibida por exceso de humedad” (World Health Organization, 2009, p. 9).

Watt (2007), establece que el estudio de las patologías de la edificación requiere un conocimiento detallado de cómo se diseñan, construyen, usan y cambian los edificios, y los diversos mecanismos por los cuales sus condiciones materiales ambientales pueden verse afectadas.

La OMS (2009), estima que la presencia de humedad en interiores afecta del 10-50% de los ambientes interiores en Europa, América del Norte, Australia, India y Japón; indica, además, que hay ciertos entornos, como valles o zonas costeras, en los que las condiciones de humedad son más severas que los promedios nacionales.

La mayor parte de la humedad ingresa a las edificaciones por medio del aire o como resultado de las actividades de los ocupantes (World Health Organization, 2009); tanto la transpiración regular de los seres humanos como el desarrollo de sus diversas actividades dentro del espacio, como cocinar o bañarse, generan una aportación de humedad al ambiente.

Permitir que las superficies sean más frías que el aire circundante puede resultar en condensación no deseada. Los puentes térmicos, un aislamiento deficiente e infiltraciones de aire, pueden dar como resultado temperaturas superficiales por debajo del punto de rocío y, por lo tanto, humedad.

La humedad trae diversas afectaciones principalmente en la calidad del aire, al generar contaminantes en el ambiente, y en el deterioro de los materiales de construcción, ambas afectaciones tienen repercusiones graves en la salud de los usuarios, por lo que la humedad se convierte en un factor de riesgo de asma y síntomas respiratorios (World Health Organization, 2009).

Singh *et al.* (2010) refiere que la degradación inducida por la humedad podría deteriorar la resistencia térmica, la resistencia y la rigidez de los materiales y la corrosión de los componentes del edificio (por ejemplo, refuerzo de mortero y acero).

Por su parte, Singh (2004) establece que el agua, la humedad, la temperatura y la falta de ventilación son los principales parámetros ambientales que afectan la descomposición o deterioro de los materiales; y señala como signos y síntomas de deterioro la eflorescencia salina severa, manchas, ampollas de acabados y la descomposición de la madera.

La OMS (2009) indica que la humedad es un indicador de mala ventilación, lo que puede dar como resultado niveles aumentados de una amplia gama de otros contaminantes potencialmente dañinos en el interior como ácaros, moho, bacterias y protozoas; genera contaminantes de diversos tipos los cuales tienen repercusiones en aspectos de salud. Además, señala que los materiales húmedos pueden aumentar su degradación química, dando como resultado mayores emisiones de compuestos orgánicos volátiles, incluyendo el formaldehído; mayor deterioro de los materiales de construcción y la integridad estructural. Incluso el uso posterior de sustancias químicas potencialmente peligrosas.

### 2.1.2 Moho en espacios interiores

El Centro de Control y Prevención de Enfermedades (CDC, 2019), establece que “el moho es un hongo que se encuentra tanto al aire libre como en interiores”. La OMS (2009), por su parte, define a los hongos como organismos eucariontes ubicuos que comprenden una gran cantidad de especies, que ingresan a las

edificaciones en superficies de nuevos materiales o en la ropa, incluso pueden penetrar a través de la ventilación activa o pasiva. Por lo tanto, los hongos se encuentran en el polvo y en las superficies de todas las casas, incluso aunque no presenten problemas de humedad; la presencia de éstos en espacios interiores se debe a la humedad y a una ventilación inadecuada.

Singh *et al.* (2011) menciona que la falta de mantenimiento, negligencia crónica, infestación de insectos, inundaciones y deterioro de los materiales constructivos causados por humedad, y defectos en la edificación que conducen a la filtración o entrada de agua, la condensación y la humedad en tejidos, a menudo producen la proliferación de moho, que son patógenos para los humanos y conducen a edificios enfermos. Señala, además, que la humedad y la ventilación inadecuada son las claves para la proliferación de mohos tóxicos y la dispersión de esporas de moho en el aire. Por lo tanto, la humedad de la casa contribuye significativamente al desarrollo de esporas de hongos, fragmentos y alérgenos (World Health Organization, 2009).

Diversos autores (Beguin & Nolard, 1994; Rolle-Kampczyk *et al.*, 2000; Senkpiel *et al.*, 2000; Vesper *et al.*, 2005; CDC, 2019) señalan que los cuatro tipos de moho más comunes o predominantes en espacios interiores son: *Cladosporium*, *Penicillium*, *Alternaria* y *Aspergillus*. Por su parte, Beguin & Nolard (1994) indican que el *Cladosporium sphaerospermum* es el responsable de la alta contaminación en recámaras y baños.

El moho crece mejor en condiciones cálidas, mojadas y húmedas, y se propaga y reproduce mediante esporas que pueden sobrevivir en condiciones ambientales, como la sequedad, que no favorecen el crecimiento normal del moho (CDC, 2019).

La OMS (2009), establece que el agua es el factor más crítico para el crecimiento de hongos en interiores; y uno de los principales indicadores de la presencia de agua son las condiciones de humedad relativa (HR) en el interior del espacio. Singh *et al.* (2011) mencionan que una HR alrededor del 65 % sería ideal para que el moho proliferara, especialmente en un ambiente con poca ventilación o luz solar directa.

Por su parte, Optis *et al.* (2012) señalan que una humedad relativa entre el 70% y 80% es adecuada para el crecimiento de la mayoría de las especies de moho; sin embargo, la OMS (2009) indica que el crecimiento de los hongos en interiores ocurre sólo en presencia de humedad, la mayoría crece rápidamente en cualquier superficie mojada o húmeda; prácticamente crecen en cualquier sustrato en equilibrio con una humedad relativa por debajo de la saturación (debajo del 100 % de HR).

Aunque la OMS (2009) indica que la temperatura no se considera como factor limitante para el crecimiento de los hongos, ya que el rango de desarrollo se encuentra entre 10 °C y 35 °C; Optis *et al.* (2012) establece, además del rango de crecimiento de la mayoría de las especies de entre 0 °C a 50 °C, que la temperatura tiene un impacto directo en la humedad relativa en la cual el moho se desarrolla. Por lo tanto, es donde radica la importancia de considerar la temperatura como factor de crecimiento del moho.

Singh *et al.* (2010) mencionan que en Europa, América del Norte, Corea y el Norte de China, las temperaturas entre 15 °C a 32 °C en espacios interiores son ideales para el crecimiento de moho e indican que una exposición insuficiente a la luz solar también puede ser un factor para el crecimiento de moho.

Otro factor predominante, se refiere a las características de los sustratos en el que se desarrollan. El crecimiento de las especies en un sustrato determinado, depende del comportamiento hídrico<sup>1</sup>. Con base en los requerimientos de agua, los hongos se dividen en colonizadores primarios, secundarios, que requieren altos niveles de humedad y algo de condensación superficial e intersticial; y los terciarios, que se requieren serios problemas de condensación para que se presenten, tales como fallas en la construcción como aislamiento inadecuado combinado con una

---

<sup>1</sup> Actividad del agua que se refiere a la medida de la disponibilidad de agua en un sustrato como una fracción decimal de la cantidad presente cuando el sustrato esta en equilibrio con una atmosfera saturada” Kendrick, 2000 citado en (D. W. Li & Yang, 2004) y se define como la relación de la presión de vapor sobre un sustrato en relación con la del agua pura medida a la misma temperatura y presión (World Health Organization, 2009) .



ventilación escasa o deficiente, o daños por fugas, inundaciones o filtraciones subterráneas (World Health Organization, 2009).

De acuerdo con Optis *et al.* (2012), el sustrato en el que los hongos se desarrollan, también tiene influencia en la tasa de crecimiento de los mismos; ya que proveen los nutrientes que ellos necesitan, los cuales varían de acuerdo al tipo de sustrato. Sin embargo, la OMS (2009) indica que los nutrientes no son un factor limitante para el crecimiento de hongo en interiores, ya que crecen incluso en materiales inertes como azulejo y pueden obtener suficientes nutrientes de las partículas de polvo y componentes solubles del agua.

Los hongos se pueden encontrar en marcos de ventanas mojadas y paredes húmedas de recamaras, salas y cocinas. Las concentraciones de éstos en un espacio determinado son muy variables y dependen de factores como el clima y la estación, tipo de hongo, de construcción, edad y uso de la edificación y la tasa de ventilación. También dependen del muestreo y los métodos analíticos utilizados, lo que dificulta las comparaciones entre los estudios (World Health Organization, 2009).

#### ➤ Afectaciones en la salud

Singh *et al.* (2010) presentan diversos estudios que analizan las anomalías en la estructura y el funcionamiento de la envoltura del edificio y sus partes, que podrían provocar la mala salud de los ocupantes y un hábitat deficiente para vivir.

De acuerdo con la OMS (2009), el moho produce alérgenos asociados con alergias y asma; muchos también producen toxinas e irritantes con presuntos efectos sobre la salud respiratoria. La elevada humedad del aire, la condensación y el daño por agua, promueven la supervivencia y el crecimiento de los ácaros de polvo y hongos, lo que genera una mayor exposición a los alérgenos de los ácaros y hongos y las toxinas e irritantes fúngicos; las toxinas naturales producidas por algunas especies de hongos se les llama micotoxinas (OMS, 2018). Terr (2009), señala que las micotoxinas y demás partículas que se generan en los espacios interiores tienen

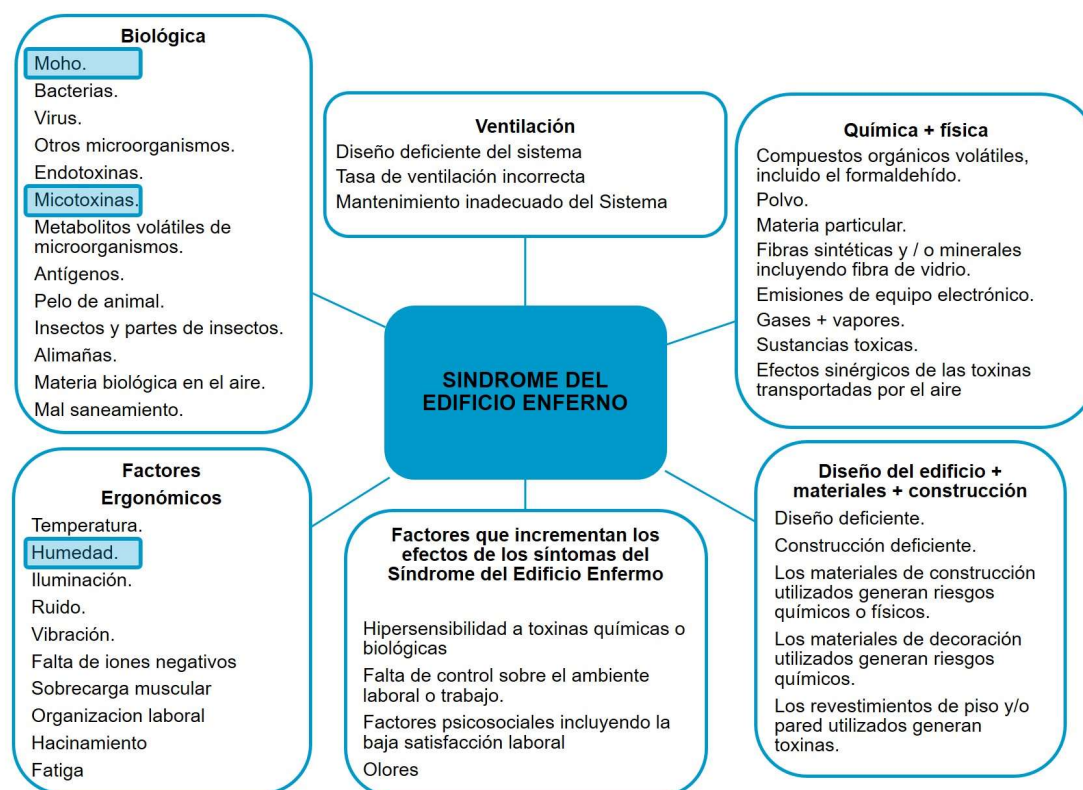


diversos efectos en la salud, tienen tres mecanismos patogénicos: infección, alergia y toxicidad

Los hongos no solo tienen efectos negativos en la salud, también generan considerables daños a las edificaciones; la condensación en superficies o en la estructura, moho visible, la percepción de olor a moho y antecedentes de daños, fugas o penetración de agua, son indicadores de humedad y crecimiento microbiano (World Health Organization, 2009). El moho y la humedad, son parte de las causas que originan el síndrome del edificio enfermo (Figura 2), el primero como parte de los aspectos biológicos y que a su vez generan las micotoxinas, y la segunda como uno de los factores ergonómicos (Jansz, 2017).

**Figura 2**

*Causas del síndrome del edificio enfermo.*



*Nota.* Adaptado de "Sick Building Syndrome" (p. 504), por Jansz, 2017, *International Encyclopedia of Public Health*, 6.

### ➤ Recomendaciones generales

La OMS (2009), recomienda que para controlar la humedad, garantizar una larga vida útil del edificio y una buena calidad del aire interior, se deben establecer y cumplir tres objetivos: controlar el agua líquida, gestionar los niveles de humedad interior y la condensación, y seleccionar materiales y diseños de ensamblaje higrotérmicos que minimicen el crecimiento de moho y otros problemas de humedad. Señala, además, que la efectividad de las acciones para controlar la humedad depende de si son para edificios nuevos o existentes; cuando son construcciones nuevas, se puede aplicar una variedad más amplia de métodos de control que en los edificios existentes.

Un buen diseño, así como una buena construcción y el mantenimiento posterior de la envolvente son cruciales para prevenir y controlar el exceso de humedad y el crecimiento microbiano, mediante la prevención de puentes térmicos y la entrada de agua ya sea en su fase líquida o vapor. De manera específica, el manejo de la humedad requiere un control adecuado de la temperatura y la ventilación, para evitar humedad en exceso, condensación en superficies y exceso de humedad en los materiales. La ventilación debe distribuirse de manera efectiva a través del espacio y debe evitarse las zonas de estancamiento (World Health Organization, 2009).

Al señalar anteriormente la relación entre la humedad y las actividades de los usuarios, es necesario recalcar la importancia que éstos tienen en la prevención de problemas de humedad. La OMS (2009), señala que se requiere la participación activa de los usuarios para un uso y mantenimiento adecuado de la edificación para evitar los problemas de humedad y crecimiento de moho.

Por lo anterior, es necesario analizar cuáles son las estrategias adecuadas para implementarse, de manera que controlen la humedad y la condensación, así como la temperatura y ventilación, para evitar la proliferación de moho; considerando que su manejo o mantenimiento, por parte del usuario, sea fácil o incluso que no requiera su participación.

### 2.1.3 Proceso psicrométrico de la humedad.

La Psicrometría se define como el estudio de la medición del contenido de humedad en el aire atmosférico; esta definición se relaciona comúnmente con los efectos en edificios y sistemas constructivos (Kreider *et al.*, 2010). Por su parte, Brant (2016) define la psicrométrica como “una herramienta utilizada por diseñadores de sistemas de aire acondicionado para determinar la cantidad de humedad en el aire y proporcionar soluciones para el confort de los usuarios” (Brant, 2016). Por ello, es fundamental recurrir a ella en busca de una solución adecuada para el control de la humedad en los espacios interiores.

Al ser la humedad en el aire el concepto central de la psicrometría, se consideran como parte esencial las principales propiedades termodinámicas relacionadas con ella, como lo son la temperatura de bulbo seco (TBS), la humedad relativa (HR), la humedad absoluta (HA), la temperatura de punto de rocío (DP por su nombre en inglés Dew Point), presión parcial (P) y temperatura de bulbo húmedo (TBH) (Kreider *et al.*, 2010). La investigación se enfocará en las primeras cuatro.

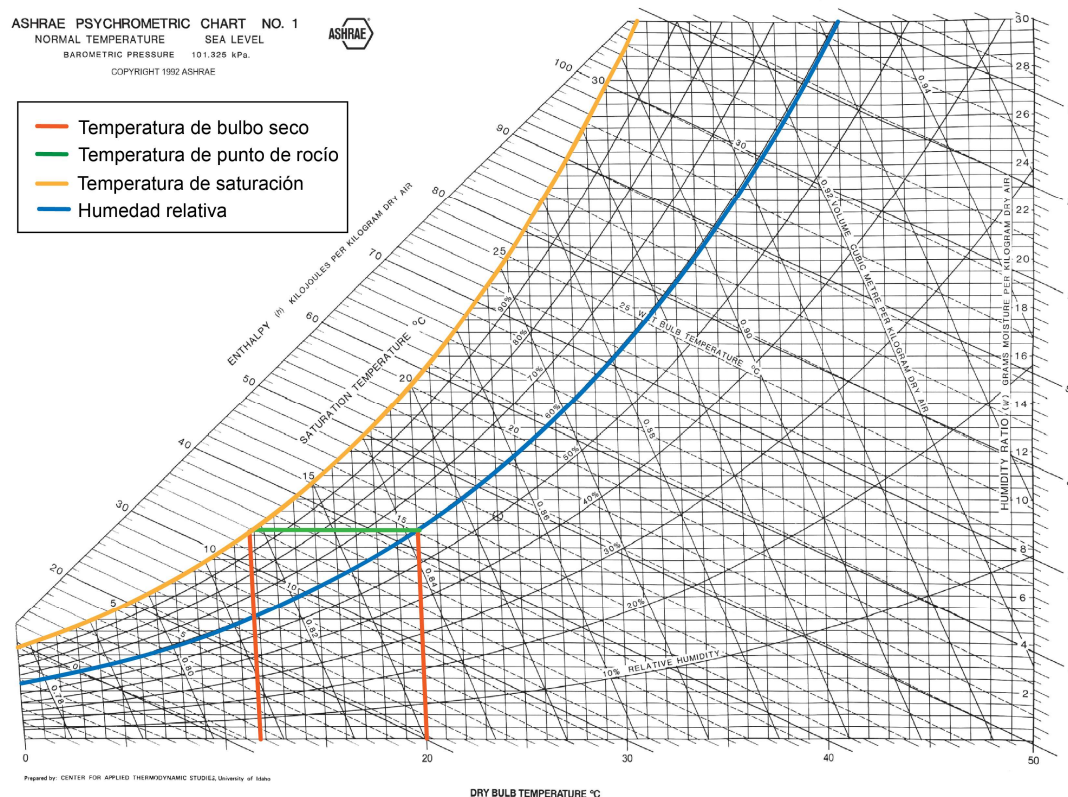
La carta psicrométrica permite graficar, en un sistema de abscisas y ordenadas (x,y), las propiedades del aire húmedo (humedad relativa, temperatura de bulbo húmedo, presión de vapor, volumen específico y entalpía) como funciones de las dos variables termodinámicas independientes de temperatura de bulbo seco (abscisa) y la humedad absoluta (ordenada); de igual manera se pueden trazar los procesos psicrométricos como calentamiento, enfriamiento, secado o humidificación de las corrientes de aire (Kreider *et al.*, 2010).

Es importante definir dos procesos de transferencia de calor que se relacionan directamente con la carta psicrométrica: transferencia de calor sensible y transferencia de calor latente. En la transferencia de calor sensible se presentan cambios solo en la temperatura de bulbo seco, por lo que se percibe un enfriamiento o calentamiento por descenso o aumento respectivamente de la temperatura. Mientras la transferencia de calor latente se da por el cambio en el contenido de humedad en el aire o la proporción de humedad en el aire (Brant, 2016).

En la carta psicrométrica, se pueden observar los cuatro procesos principales relacionados al acondicionamiento del aire. En ella es posible visualizar que, para poder lograr una reducción de humedad relativa, el aumento de temperatura es la acción que se debe seguir. Otro aspecto que se analiza en la carta psicrométrica es la temperatura de punto de rocío, también conocida como punto de condensación, que se define como la medida de la temperatura de bulbo seco en el punto donde el vapor de agua contenido el aire comienza a condensarse a líquido (Brant, 2016; Kreider *et al.*, 2010). Esta se determina al trazar una línea horizontal desde la intersección de la temperatura de bulbo seco con la humedad relativa hasta la curva de temperatura de saturación (Figura 3).

**Figura 3**

*Ejemplo típico de carta psicrométrica*



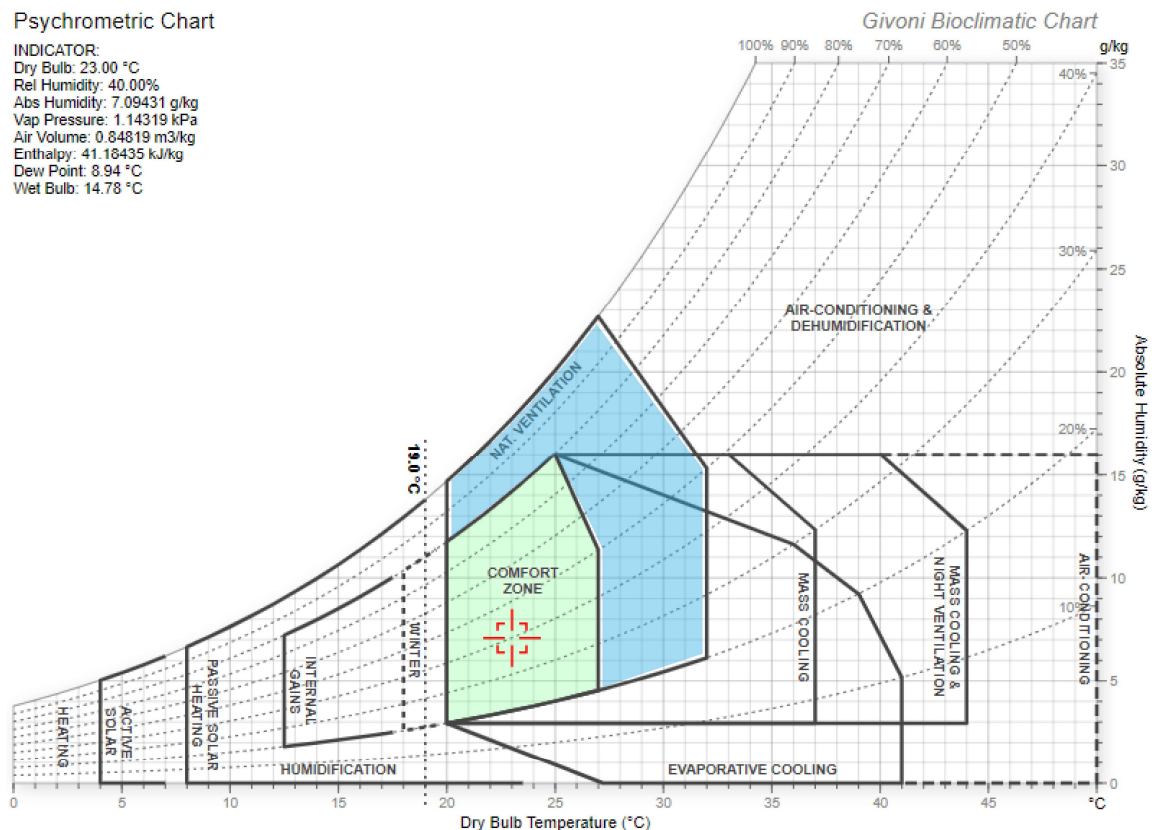
**Nota.** Trazo general para identificación de temperatura de punto de rocío. Elaboración propia

basado en ASHRAE, 1992.

Al observar que el proceso psicrométrico de reducción de humedad se logra con el aumento de la temperatura y que la ventilación natural es una estrategia sugerida para control de humedad relativa y temperatura (Figura 4), se comprenden las recomendaciones que hace la WHO (2009) para el control de la humedad. Por ello, para regular los niveles de humedad relativa en el ambiente, es necesario considerar estrategias de ventilación y/o control de temperatura.

**Figura 4**

*Estrategias de diseño bioclimático en carta psicrométrica*



Nota. Adaptado de Psychrometric Chart/Givoni Bioclimatic Chart por Marsh, 2020,

AndrewMarsh.com (<https://drajmarsh.bitbucket.io/psychro-chart2d.html>) ©



## 2.1.4 Sistemas Pasivos

Utilizar sistemas pasivos juega un papel importante en la reducción de la demanda de energía de las edificaciones, representan una reducción de costos ya que requieren un mantenimiento mínimo, y reducen el impacto al entorno (Duraković, 2020).

Es importante señalar que el diseño bioclimático se relaciona directamente con los mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección, radiación, evaporación), ya que los principios de la concepción bioclimática (Figura 5) se basan en ellos para establecer las técnicas para favorecer las ganancias o pérdidas de calor dependiendo del periodo climático (Camous & Watson, 1983).

**Figura 5**

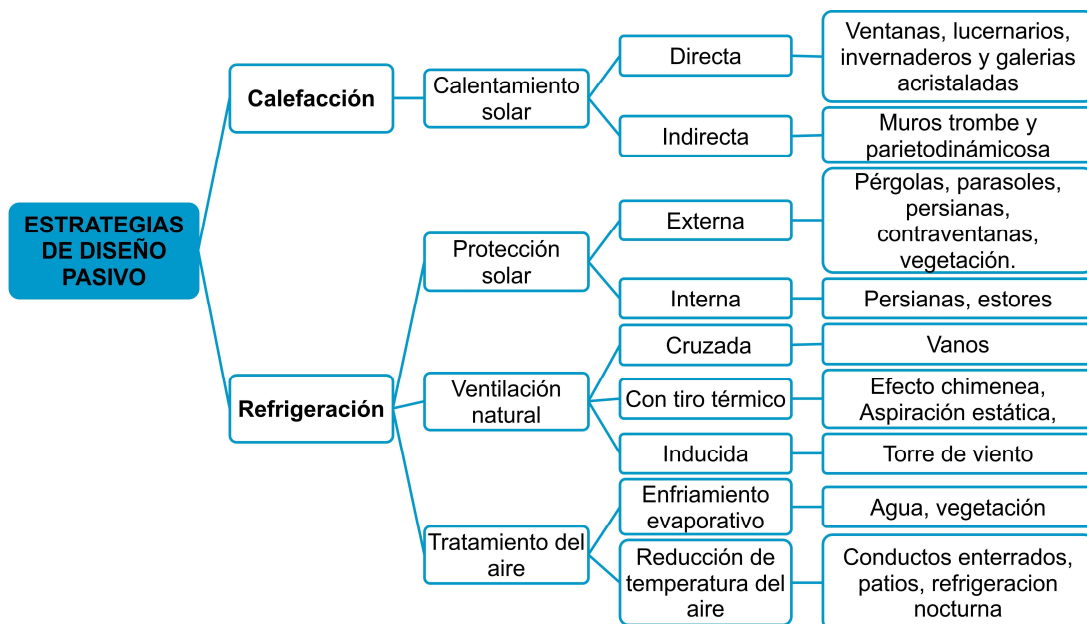
*Principios de la concepción bioclimática*

| Objetivo | Conducción                        | Convección                                         | Radiación                                        | Evaporación                               |
|----------|-----------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Invierno | Favorecer las ganancias de calor  | Desfasar las variaciones periodicas de temperatura | Favorecer las ganancias de calor                 |                                           |
|          | Oponerse a las pérdidas de calor  | Limitar las trasnferencias de calor por conducción | Limitar los movimientos del aire exterior        | Limitar las infiltraciones de aire        |
| Verano   | Oponerse a las ganancias de calor | Limitar las trasnferencias de calor por conducción | Limitar las ganancias solares                    |                                           |
|          | Favorecer las pérdidas de calor   | Desfasar las variaciones periodicas de temperatura | Favorecer el enfriamiento por radiacion nocturna | Favorecer el enfriamiento por evaporación |

*Nota.* Adaptado de *El Hábitat Bioclimático. De la concepción a la construcción* (p. 12), por Camous & Watson, 1983, G G/México Colección Alternativas.

**Figura 6**

*Clasificación de estrategias de diseño pasivo*



*Nota.* Adaptado *Guía de Estrategias de Diseño Pasivo para la Edificación* (p. 66), por Alonso Monterde, 2014, Instituto Valenciano de la Edificación.

Las estrategias de diseño se clasifican en estrategias de calefacción o calentamiento y estrategias de refrigeración o enfriamiento, estas a su vez se clasifican en sistemas activos y pasivos, que se basan en aprovechar las fuentes de energías naturales (Alonso Monterde, 2014). En la

Figura 6 se muestran las estrategias de calentamiento y enfriamiento pasivos.

Como tal, no existen sistemas pasivos de deshumidificación. La mayoría de los artículos relacionados con el tema de humedad, coinciden en que la clave para desarrollar estrategias de prevención y control del crecimiento de moho es el limitar la humedad y la fuente de los nutrientes que los desarrolla, y toman como referencia la norma ASHRAE 62.2-2019 para la calidad de aire al interior de edificios residenciales de baja altura.



Es importante recordar que tanto la clasificación como las características de las estrategias se basan en la relación o influencia que tienen para lograr el confort; sin embargo, para condiciones específicas de salud, los criterios pueden llegar a variar.

Al analizar de manera general las diversas estrategias existentes en busca de estrategias que permitan controlar la humedad el interior del espacio mediante el control de la temperatura del aire y que a su vez propicie una adecuada ventilación natural sin aportar mayor humedad al mismo, se identificaron dos de ellas las cuales en conjunto favorecen la ventilación natural y pueden llegar a regular la temperatura del aire en el espacio interior; la aspiración estática, que se identificó la chimenea solar como el dispositivo característico utilizado; y los ductos enterrados que son conocidos como intercambiadores de calor tierra-aire.

#### ➤ Intercambiador de calor tierra-aire

Los intercambiadores de calor tierra-aire (EAHE por su nombre en inglés: earth-to-air heat exchanger) se han utilizado a lo largo de la historia, remontándose hasta el año 3000 a.C., donde los arquitectos iraníes utilizaban túneles de aire subterráneos para la climatización de las edificaciones (Bordoloi *et al.*, 2018); un concepto similar se empleó por los persas y griegos en la era precristiana, y en el siglo XVI se reportaron construcciones que utilizaban cavidades naturales (Santamouris & Asimakopolus, 1996).

Actualmente el uso de intercambiadores ha tomado auge debido a la búsqueda de soluciones para evitar el alto consumo de energías convencionales por parte de los equipos de climatización, así como a la contaminación en general que genera la industria de la construcción, la cual representa del 30 al 45% de la demanda global de energía (Santamouris & Kolokotsa, 2013).

Este sistema consiste en utilizar la energía geotérmica al enterrar a cierta profundidad una red de tuberías, con diferentes combinaciones instalada en espacios abiertos o debajo de la edificación (Bordoloi *et al.*, 2018), por donde circula aire mediante ventiladores eléctricos (Santamouris & Asimakopolus, 1996). Son

utilizados como estrategias de enfriamiento y/o calentamiento pasivo en las edificaciones.

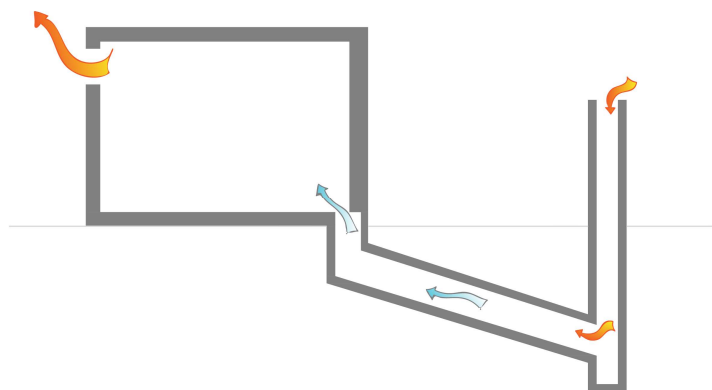
Duraković (2020) cataloga el intercambiador de calor dentro de los sistemas pasivos de enfriamiento evaporativo, el cual se da por medio de la tierra. El suelo se utiliza como disipador de calor, tiene una temperatura promedio de 12 °C aproximadamente durante el año, por lo que tiene el potencial de enfriarse en verano y precalentar el aire durante el invierno, debido a que en el invierno la tierra es más cálida que la temperatura exterior y viceversa en verano (Figura 7).

El funcionamiento del intercambiador se basa en los mecanismos de transferencia de calor que se presentan en el suelo, siendo la conductividad térmica y la capacidad calorífica los parámetros principales que influyen el comportamiento térmico del suelo (Santamouris & Asimakopolus, 1996).

El principio básico es aprovechar la temperatura de la tierra a cierta profundidad, ya que ésta se mantiene constante durante el año; Santamouris & Kolokotsa (2013).establecen el rango de profundidad de 2,5 a 3,0 m, mientras que Duraković (2020) lo establece de 1,0 a 3,0 m.

### Figura 7

*Esquema general de un intercambiador de calor*



*Nota.* Adaptado de *PCM-Based Building Envelope Systems. Innovative Energy Solutions for Passive Design* (p. 51), por Duraković, 2020, Springer.

Sin embargo, la profundidad de un EAHE dependerá de las características propias del sitio donde se ubique, tanto de las características del suelo como de las del clima, así como por el objetivo mismo del intercambiador.

En los sistemas modernos el aire es aspirado desde el ambiente por medio de un ventilador y entra en la edificación a través de los tubos enterrados; los materiales más comunes utilizados para la tubería son el plástico, concreto o metal (Santamouris & Asimakopolus, 1996).

Bordoloi *et al.* (2018) clasifican los intercambiadores por su configuración, como de circuito abierto, de circuito cerrado o mixto; por el diseño de la tubería, en sistema de serpentín horizontal o vertical, sistema de espiral o sistema de estanque; y, por el tipo de arreglo, en sistema de un solo tubo o sistema de tubos paralelos. Explican, además, que este tipo de sistemas tiene una gran variedad de aplicaciones tanto en edificaciones residenciales con o sin aire acondicionado, invernaderos o edificios comerciales.

El funcionamiento adecuado del intercambiador dependerá de varios factores: la temperatura de entrada, la temperatura del suelo a la profundidad establecida, la conductividad térmica del tubo, la difusividad térmica del suelo, la velocidad del aire y las dimensiones de la tubería (Santamouris & Asimakopolus, 1996).

A pesar de que los intercambiadores son sistemas relativamente sencillos y de bajo costo, es necesario considerar posibles problemas de condensación dentro de ellos, lo que puede afectar su eficiencia. Dicha condensación se puede prevenir, al colocar la tubería con una pendiente mínima de 1% y realizar una pequeña perforación en la parte baja del codo que permita evacuar el agua acumulada y esta sea absorbida por el suelo por fuerzas capilares (Santamouris & Asimakopolus, 1996).

### ➤ Chimenea solar

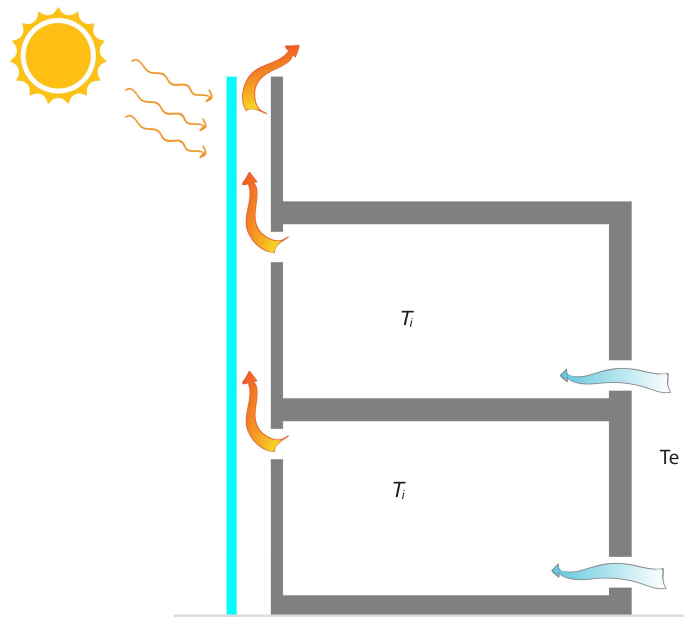
La chimenea solar se considera dentro de los sistemas pasivos de enfriamiento, Duraković (2020) la clasifica como disipador de calor por enfriamiento convectivo. Usan el calor solar para generar la convección natural del aire. La superficie de la

chimenea se calienta durante el día por lo que el aire en su interior se calienta, se expande y se eleva, generando el movimiento del aire interior hacia afuera, siendo el exterior una zona de presión negativa; a esto se le conoce como ventilación por efecto Stack, la cual se da debido a las diferencias de temperatura que provocan diferencias de presión entre el interior y el exterior (Yarke, 2005).

Hinz *et al.* (1986) explican que la forma, el área y la altura determinará el tipo de flujo de aire en la chimenea solar, la temperatura de la chimenea propiciará el movimiento del aire, este será más rápido cuanto más se caliente la chimenea, señalan, además, que se aumenta la eficiencia de la chimenea con el uso de masa térmica detrás de un vidrio, ya que funciona como almacenador de calor en el día y actúa como ventilador nocturno al extraer el aire caliente durante la noche (Hinz *et al.*, 1986). Pueden estar ubicadas adosadas al muro, sobre la cubierta o combinadas (Duraković, 2020) (Figura 8).

**Figura 8**

*Esquema general de una chimenea solar*



*Nota.* Adaptado de *PCM-Based Building Envelope Systems. Innovative Energy Solutions for Passive Design* (p. 48), por Duraković, 2020, Springer.

## 2.2 Antecedentes

### 2.2.1 Estudios sobre Moho

Singh *et al.* (2010) realiza una investigación sobre edificios enfermos, enfocándose en las pautas para la evaluación de riesgos por exposición a la humedad, la proliferación de moho y la dispersión de esporas en espacios interiores. Como resultado proporciona una guía general para la evaluación ambiental de mohos en ambientes interiores, relacionada con muestras micológicas (Tabla 1).

Por otra parte, un experimento in-situ realizado por Delgado *et al.* (2013) en el espacio de arrastre de una casa museo en Portugal, muestra que los valores elevados de humedad relativa implican degradación biológica del piso de madera. Resalta la importancia de los espacios de arrastre con una buena ventilación para evitar el crecimiento de moho y sugiere ventilación mecánica constante para este tipo de espacios; sin embargo, indica que un sistema continuo de ventilación en el espacio de arrastre, puede conducir a la aparición de condensación en el interior, por lo que proponen un sistema higo-regulador con un adecuado criterio de funcionamiento.

**Tabla 1**

*Niveles de umbral sugeridos para esporas de hongos en el aire interior.*

| Categoría  | Hongo cfu · m <sup>-3</sup> |
|------------|-----------------------------|
| Muy bajo   | Menos de 50                 |
| Bajo       | Menos de 200                |
| Intermedio | Menos de 1 000              |
| Alto       | Menos de 10 000             |
| Muy alto   | Más                         |

*Nota.* Adaptada de "Building Pahtology, Investigation of Sick Buildings – Toxic Moulds" (p. 46) por Singh *et al.*, 2010, *Indoor and Built Environment*, 19(1).

Gonzalez-Caceres *et al.* (2019) realizan una evaluación post-ocupación en un complejo de viviendas sociales de 400 apartamentos, en la que se investigan los síntomas y daños producidos por los altos niveles de humedad. Utilizaron cuestionarios y entrevistas para recabar la información, así como la inspección visual de las viviendas (Tabla 2) para diagnósticos *in-situ* y análisis de laboratorios.

Los resultados obtenidos muestran que los daños por humedad se deben principalmente a los espacios hacinados, una regulación térmica inadecuada para el clima local y al diseño y calidad de construcción deficiente.

**Tabla 2**

*Resultados de la inspección visual por humedad en un departamento*

| Orientación de la pared | Síntoma                                                       | Área afectada                                 | Causa probable                                     | Imagen                                                                                |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Sur</b>              | Hongo en marcos de ventana y en muro debajo de ella.          | 30% del muro es afectado (recámara principal) | Falta de mantenimiento en ventanas, y condensación |   |
| <b>Sureste</b>          | Hongos y manchas de humedad en la pared.                      | 30% del muro es afectado                      | Condensación y agua de lluvia                      |  |
| <b>Noreste</b>          | Hongo y humedad en ventanas y muro. Humedad en línea vertical | 40% de muros (recámaras) y esquinas           | Condensación y agua de lluvia                      |  |

*Nota.* Adaptada de "Implementing post-occupancy evaluation in social housing complemented with BIM: A case study in Chile" (p. 267), por Gonzalez-Caceres et al., 2019, *Building and Environment*, 158.

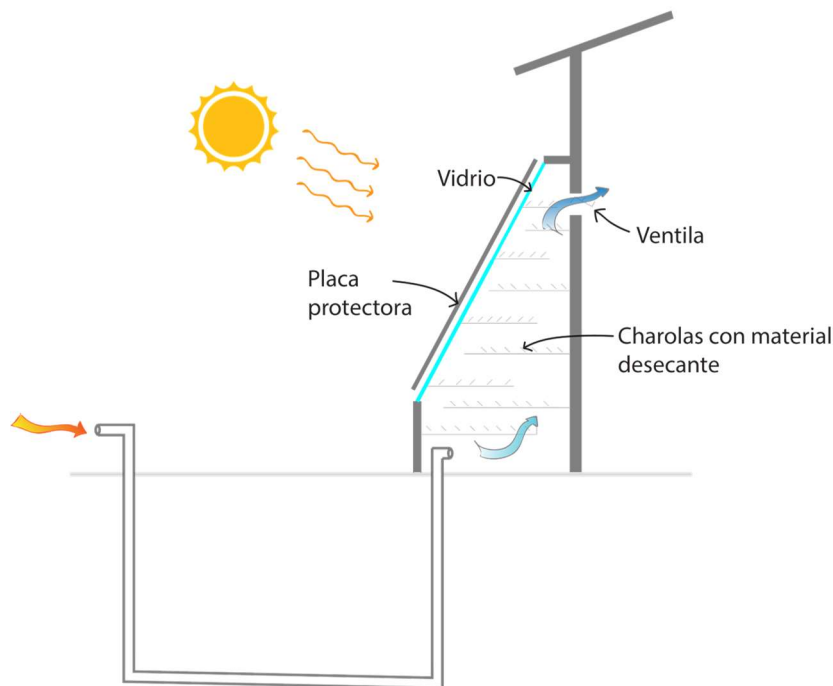
## 2.2.2 Estudios Sistemas Pasivos

### ➤ Deshumidificación

Existen estudios enfocados a desarrollar sistemas pasivos que implementan material desecante para generar la pérdida de humedad. Cruz *et al.* (2006) realizan una propuesta de sistema de enfriamiento y deshumidificación pasiva para una casa habitación, mediante la combinación de tres estrategias de diseño: inyección de aire por tubo enterrado, uso de material desecante y muro trombe (Figura 9). El diseño propuesto consta de una toma de aire a 0,50 m sobre el nivel de suelo, tubo de cemento de cuatro pulgadas de diámetro a 2,0 m de profundidad y 3,0 m de longitud. Sin embargo, no se muestran resultados posteriores a la propuesta.

**Figura 9**

*Esquema de sistema de enfriamiento y deshumidificación*



*Nota. Adaptado de Enfriamiento y deshumidificación pasiva de una casa habitación para la localidad de Bahía de Banderas, Jalisco (p. s/n), por Cruz et al., 2006, UNAM.*



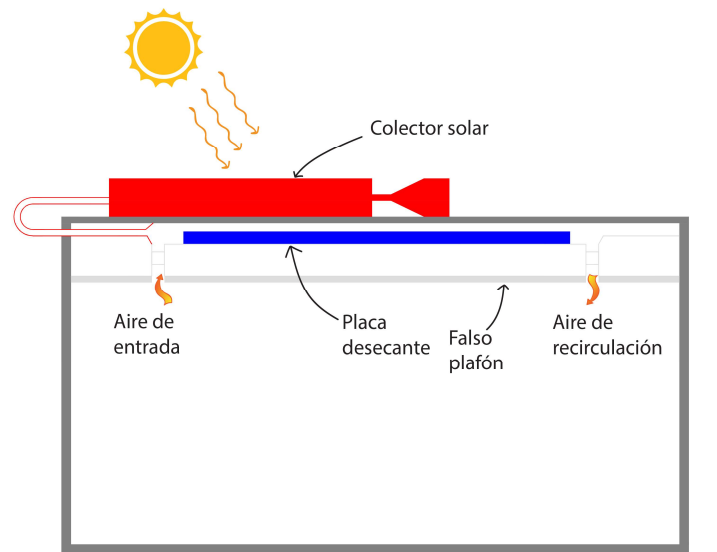
Ríos (2013), por su parte, crea un sistema cuasi-pasivo de deshumidificación, mediante la utilización de un colector solar, placa con material desecante y la inducción de aire a la vivienda (Figura 10), en un clima cálido. Para la validación del sistema, desarrolla un modelo experimental y uno analítico, los cuales muestran un decremento de la humedad en el aire interior de la habitación, manteniéndose un 13%, en el caso experimental, y 4% en el caso de la habitación, encima del valor de confort de 50 %HR.

Hernández-Gómez *et al.* (2018) proponen un sistema pasivo automatizado para el acondicionamiento del aire en casa habitación, mediante el uso de muro trombe y material desecante para deshumidificar (Figura 11). El sistema consiste en el uso de compuertas, controladas por arduinos que, mediante una red inalámbrica de sensores, realiza el monitoreo de las condiciones de temperatura y humedad lo que permite el flujo de aire hacia el contenedor del material desecante, con la finalidad de automatizar la regulación de la temperatura y humedad en el interior a lo largo del año. Los resultados se enfocan en la reducción del consumo de energía eléctrica, manteniendo condiciones higrotérmicas cercanas al confort.

Sin embargo, en la revisión de antecedentes no se identificaron estudios sobre sistemas pasivos para deshumidificación sin la utilización de material desecante. Como se menciona en el capítulo anterior, la regulación de la temperatura y la ventilación natural son las estrategias sugeridas para reducir la humedad en los espacios. Por lo tanto, se identificaron estudios dedicados a regular la temperatura mediante el uso de intercambiadores de calor, así como el favorecer la ventilación natural por diferencia de temperatura, mediante el uso de chimenea solar.

**Figura 10**

*Esquema de sistema cuasi-pasivo de deshumidificación*



*Nota.* Adaptado de *Diseño y análisis de un sistema cuasi-pasivo para la deshumidificación de espacios* (p. 41), por Ríos, 2013, UNAM.

**Figura 11**

*Esquema de sistema pasivo automatizado para acondicionamiento*



*Nota.* Adaptado de "Propuesta de sistema pasivo automatizado para el acondicionamiento del aire en casa habitación" (p. 13), por Hernández-Gómez *et al.*, 2018, *Revista de Ingeniería Innovativa*, 2(5).

### ➤ Intercambiador de calor

El estudio de los EAHE se ha desarrollado en diferentes partes del mundo desde diferentes aspectos: por el tipo de clima, predominando los climas cálidos; por temporada: invierno o verano; por tipo de análisis: eficiencia energética, capacidad de enfriamiento y/o calentamiento, confort térmico o por tasa de ventilación; por tipo de enfoque: simulación o experimental; además, también existen estudios por tipo de edificación en la que se emplea el intercambiador: de uso habitacional, comercial, educativo, administrativo y de salud, incluso en invernaderos agrícolas.

Santamouris & Kolokotsa (2013) realizan una revisión de diversas investigaciones efectuadas entre 1991 y 2011 con relación a la aplicación de los intercambiadores de calor en edificios de uso habitacional, comercial, educativo, administrativo y de salud, e invernaderos agrícolas. De dicha revisión, se rescata en la Tabla 3, la comparación que hacen de los estudios aplicados en viviendas en diferentes países. Se indican características generales del EAHE como: profundidad, longitud y cantidad de tubos; así mismo, se presentan los resultados respecto a la capacidad de enfriamiento del intercambiador, mediante la diferencia de temperatura que se logra entre el exterior y el interior, lo que refleja que los estudios analizados se enfocaron en los resultados obtenidos durante los periodos cálidos.

**Tabla 3**

*Proyectos donde se utiliza el sistema EATHE*

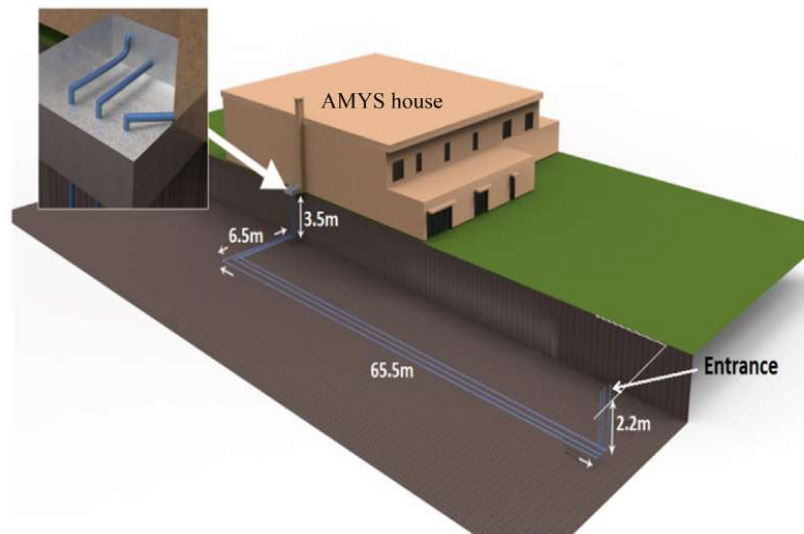
| Referencia                   | País/<br>región | Superficie<br>de constr. | Características del<br>EATHE                                                                                      | Resultados                                                                                                    |
|------------------------------|-----------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Badescu & Isvoranu (2011)    | Rumania         | -                        | Dos tambores paralelos enterrados a 3,5 m de profundidad. Conectados por 8 tubos de 30,8 m y 5 m, respectivamente | Cuando la temperatura ambiente es de 32°C la temperatura a la salida del tubo se acercó a los 26°C.           |
| Sawhney <i>et al.</i> (1998) | India           | -                        | Dos intercambiadores de calor tierra-aire de 74 m de longitud, enterrados a 2,5 m                                 | Cuando la temperatura ambiente es de 42°C la temperatura de salida en el intercambiador se acercó a los 27°C. |

| Referencia                  | País/<br>región | Superficie<br>de constr. | Características del<br>EATHE                                                       | Resultados                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------|-----------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Thiers & Peuportier (2008)  | Francia         | 132 m <sup>2</sup>       | Enterrado a 1,6 m y 30 m de longitud                                               | Los resultados por simulación muestran que el uso de EATHE reduce los grados día de enfriamiento de 56 a 22.                                                                                          |
| Trombe <i>et al.</i> (1991) | Francia         |                          | Enterrado a 2,5 m y casi 40 m de longitud                                          | Temperatura ambiente de 37 °C, la temperatura de salida del intercambiador fue de 24                                                                                                                  |
| Trombe & Serres (1994)      | Francia         | 39 m <sup>2</sup>        | Enterrado a 2 m y casi 39 m de longitud                                            | El intercambiador mejora considerablemente las condiciones de confort durante el verano, mantiene la temperatura al interior de la casa debajo de los 27 °C sin uso de sistemas de aire acondicionado |
| Grosso & Raimondo (2008)    | Italia          | -                        | 48 m de longitud enterrado de 2,6 a 3,2 m de profundidad.                          | La diferencia de temperatura entre la entrada y salida de aire del tubo fue cercana a los 10 °C durante el periodo de verano.                                                                         |
| Burton (2004)               | Portugal        | -                        | 2 tubos de 25 m de longitud                                                        | Durante el periodo de verano, la temperatura del aire dentro del tubo se redujo por 8 °C.                                                                                                             |
| Vaz <i>et al.</i> (2011)    | Brasil          | 30 m <sup>2</sup>        | Dos tipos a 2 m y uno a 0,5 m de profundidad.                                      | Los intercambiadores a 2 m de profundidad tuvieron el potencial de reducir la temperatura interior hasta 3 K durante el periodo de verano.                                                            |
| Chel & G.N.Tiwari (2009)    | India           | -                        | Un ducto de 6 líneas paralelas de 11m cada una, enterradas a 1,5 m de profundidad. | El potencial de conservación de energía anual fue cerca de 10 320 kWh, mientras que el porcentaje de eficiencia energética estacional para enfriamiento fue de 2,9.                                   |

*Nota.* Adaptada de "Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art" (p. 80-81), por Santamouris & Kolokotsa, 2013, *Energy and Buildings*, 57.

## Figura 12

### Esquema intercambiador de calor en clima semi-árido



*Nota.* Reproducido de “Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger for air cooling in a residential building in hot semi-arid climate” (p. 111), por Khabbaz et al., 2016, *Energy and Buildings*, 125.

En un estudio de intercambiador de calor tierra-aire para enfriamiento de aire, Khabbaz et al. (2016), proponen un sistema, conectado a un edificio residencial ubicado en Marruecos, caracterizado por un clima semi árido, que consistió en 3 tuberías paralelas de PVC de 72 m de longitud cada una, 15cm de diámetro, y enterrado de 2,2 a 3,2 m de profundidad, las cuales contaban con equipo mecánico para proveer la velocidad de aire necesario (Figura 12). Los resultados mostraron que es un buen sistema semipasivo de enfriamiento de aire, al mantener una temperatura casi constante de 25 °C con una humedad alrededor del 40 %.

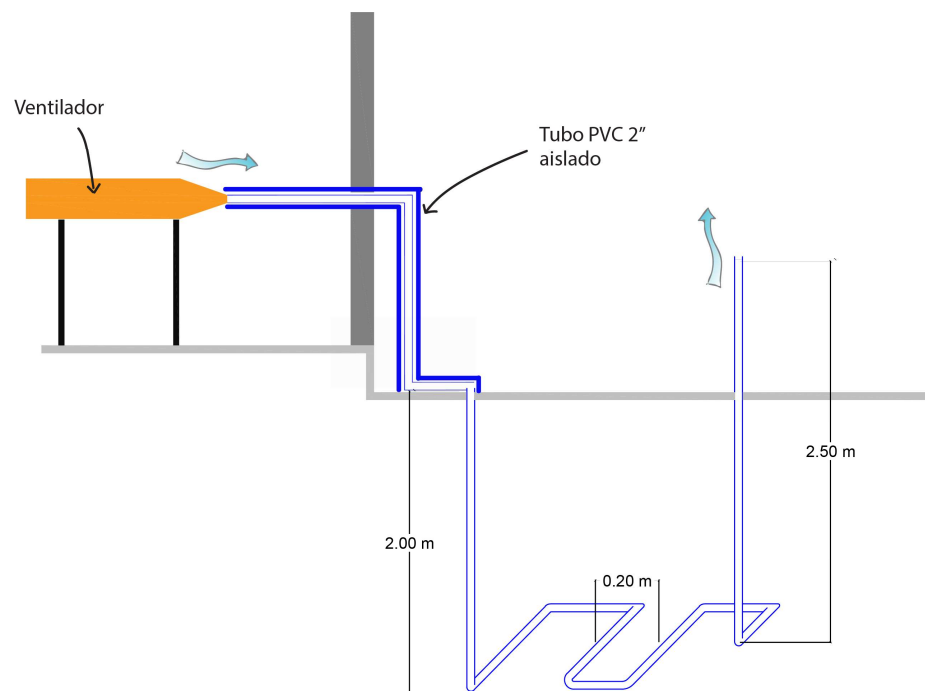
Serageldin *et al.* (2016) llevan a cabo el análisis del desempeño térmico de un intercambiador de calor, en Egipto, para el cual desarrollan un experimento, un modelo matemático y un estudio paramétrico. El intercambiador, empleado para climatización, tanto para calentamiento como enfriamiento, consiste en un serpentín horizontal, con una longitud de 5,5 m, a 2,0 m de profundidad en terreno plano,

fabricado con tubería de PVC de 5 cm de diámetro, y emplea un dispositivo mecánico para propiciar la velocidad de aire entre 1,0 m/s y 3,9 m/s (Figura 13).

Como resultado del proceso experimental, se tuvo que la temperatura de salida es 1,1 °C menor a la temperatura del suelo a 2,0 m de profundidad. Concluyen que la transferencia de calor por convección entre la superficie externa del ducto y el suelo circundante tiene mayor influencia en la temperatura del aire a la salida del intercambiador, que la que se da por convección entre el aire que fluye desde la entrada y la superficie interna del ducto, por lo que existe una relación directa entre la temperatura del suelo y la temperatura del aire a la salida, si la primera incrementa, la segunda de igual manera, y viceversa.

**Figura 13**

*Esquema de intercambiador de tipo serpentín en Egipto*



*Nota.* Adaptado de "Earth-Air Heat Exchanger thermal performance in Egyptian conditions: Experimental results, mathematical model, and Computational Fluid Dynamics simulation" (p. 28), por Serageldin *et al.*, 2016, *Energy Conversion and Management*, 122.

La mayor transferencia de calor se da en los ductos horizontales, sin embargo, la longitud del ducto vertical, para la salida del aire, afecta el desempeño ya que se presenta un intercambio térmico negativo, por lo que recomiendan el aislamiento de los ductos a la salida del suelo, para mantener el desempeño logrado en la profundidad del intercambiador.

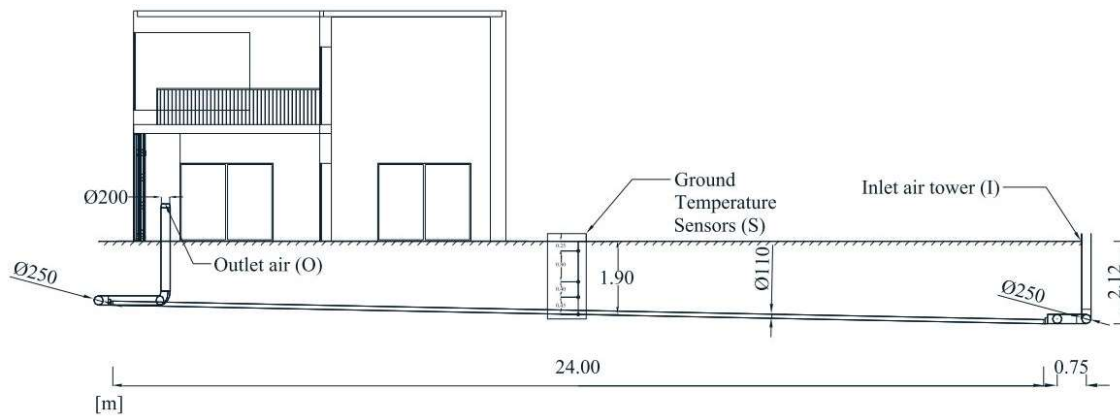
En cuanto a resultados del estudio paramétrico, obtienen que conforme la longitud del ducto aumenta, la temperatura del aire a la salida también; sin embargo, concluyen que el incremento de 0,2 °C que se da en la temperatura del aire a la salida no es proporcional al incremento de la longitud del ducto, de 5,45 m a 7,0 m. Con respecto a la velocidad del aire, obtienen una reducción en la temperatura del aire a la salida de 1,2 °C cuando la velocidad del fluido aumenta de 1,0 m/s a 3,0 m/s; por lo tanto, la tasa de transferencia de calor del suelo hacia el aire disminuye cuando la velocidad del fluido se incrementa, ya que se reduce el tiempo que se requiere para el intercambio térmico.

En Rosa *et al.* (2018) se evalúa el coeficiente de desempeño, durante un año, de un intercambiador de calor instalado en una vivienda residencial en Coímbra, Portugal, la cual tiene una clasificación climática Csb. Consiste en un sistema intercambiador de circuito abierto, para reducir la demanda de energía para calefacción y refrigeración, proporcionando un pre-acondicionamiento térmico del aire de ventilación. El intercambiador, consta de ductos de PVC paralelos entre sí con una separación de 1,0 m entre cada uno, a una profundidad de 1,9 m, una pendiente mínima de 2 % para drenaje y longitud de 24,0 m, con un filtro de aire a la entrada y un sistema de recuperación de calor a la salida, con ventilador de doble entrada (Figura 14). Como resultados, en cuanto al aspecto térmico, obtuvieron que para diciembre la diferencia promedio entre la temperatura del suelo y la temperatura de bulbo seco fue de 5,7 °C para todo el periodo y de 2,9 °C solo en los periodos de operación del sistema; la diferencia mayor se da en el periodo de calentamiento.



**Figura 14**

*Intercambiador de calor en clima mediterráneo*



*Nota.* Reproducido de "Modelling and performance analysis of an earth-to-air heat exchanger in a pilot installation" (p. 262), por Rosa *et al.*, 2018, *Journal of Building Physics*, 42(3)

Con respecto a la velocidad del aire, la temperatura del aire a la salida disminuye conforme se incrementa la velocidad del aire durante el periodo de enfriamiento, sin embargo, es inverso durante el periodo de calentamiento, la temperatura del aire incrementa con la reducción de la velocidad del aire; con el aumento de la velocidad de aire de 1 m/s a 5,0 m/s, obtuvieron un incremento en la temperatura del aire a la salida de 1,6 °C durante el periodo de calentamiento. Para enfriamiento, la diferencia entre la temperatura del aire a la entrada y salida incrementa cuando la temperatura ambiente aumenta, la diferencia aumenta de 8,1 °C a 18,5 °C con temperatura de 26,4 °C y 37,2 °C. Concluyen que el intercambiador tiene mayor eficiencia en el periodo de enfriamiento y que se debe optimizar para el periodo de calentamiento, en relación al consumo de energía.

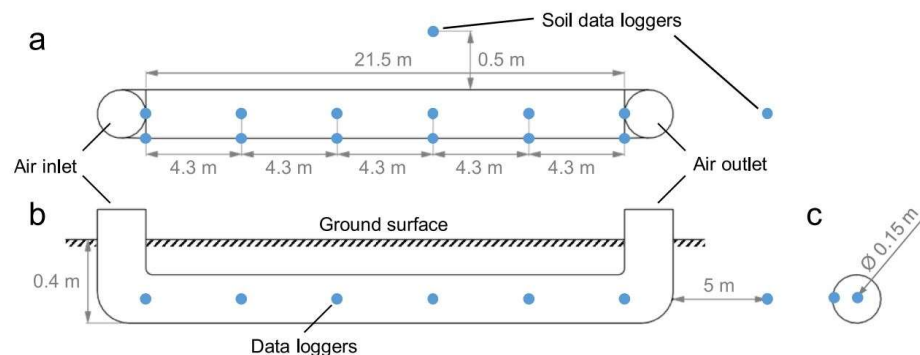
La mayor eficiencia se logra con una longitud de ducto de 100,0 m. El COP aumenta cuando el diámetro de tubería aumenta de 104,6 mm a 190,2 mm; pero reduce si el diámetro aumenta de 190,2 mm a 380,4 mm ya que se producen pérdidas de presión y se reduce el desempeño del intercambiador.

Por su parte, Pakari & Ghani (2019) se enfocan en la evaluación del desempeño de un intercambiador de calor tierra-aire cercano a la superficie con una cubierta de suelo de hierba corta (Figura 15); el recubrimiento de pasto reduce la temperatura del suelo y elimina la necesidad de dar una mayor profundidad al sistema; para la tasa de flujo de aire de 607,0 m<sup>3</sup>/h que equivale a 9,24 m/s, la temperatura de entrada se redujo en lo que corresponde a un coeficiente de rendimiento de 13,4. La temperatura del suelo a 0,5 m de profundidad no se ve afectada por su funcionamiento. El sistema consume un 76,5% menos energía en comparación con sistemas convencionales de aire acondicionado.

Posteriormente, Rosa *et al.* (2020) llevan a cabo la evaluación del sistema de intercambiador de calor tierra-aire de circuito abierto (Figura 16), en vivienda residencial en clima mediterráneo, ahora enfocado en el periodo cálido de verano para reducir la demanda de energía para calefacción y refrigeración al proporcionar un pre-acondicionamiento térmico del aire de ventilación

**Figura 15**

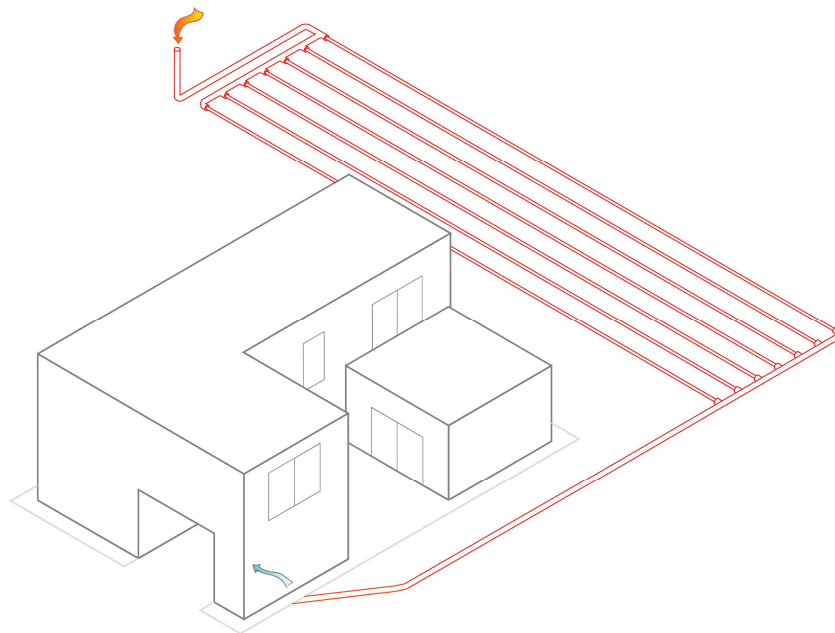
*Esquema de intercambiador cercano a superficie de suelo*



*Nota.* Reproducido de "Performance evaluation of a near-surface earth-to-air heat exchanger with short-grass ground cover: an experimental study" (p. 3), por Pakari & Ghani (2019), *Energy Conversion and Management*, 201.

**Figura 16**

*Esquema de intercambiador de calor tierra aire de circuito abierto*



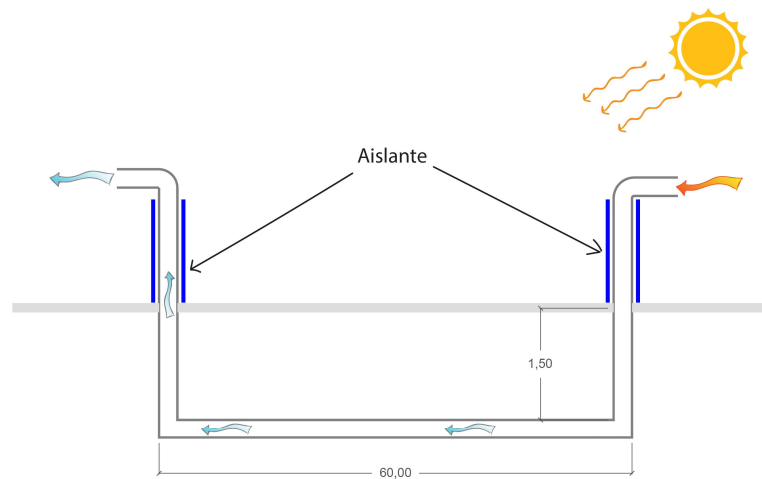
*Nota.* Adaptado de "Assessment of an earth-air heat exchanger (EAHE) system for residential buildings in warm-summer Mediterranean climate" (p. 3), por Rosa *et al.*, 2020, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 38.

Evalúa los parámetros de distancia entre ductos, diámetro de tuberías y la velocidad del aire. Uno de los resultados obtenidos es el reducir la distancia entre tuberías de 1,0 m a 0,5 m sin comprometer el rendimiento del sistema, reduciendo el área de tierra necesaria para las instalaciones.

Otros estudios se enfocan al desempeño de los sistemas intercambiadores de calor desde otros factores, como Sakhri *et al.* (2020) que evalúan el comportamiento higrotérmico de un intercambiador tierra-aire en el sur de Argelia, que se caracteriza por tener clima árido. El sistema se construyó con tubería de PVC de 0,11 m de diámetro, con una longitud de 66 m, a una profundidad de 1,5 m con una temperatura de subsuelo de 28 °C (Figura 17).

**Figura 17**

*Esquema de intercambiador de calor en clima árido*



*Nota.* Adaptado de "Experimental investigation of the performance of earth-to-air heat exchangers in arid environments" (p. 2), por Sakhri *et al.*, 2020, *Journal of Arid Environments*, 180.

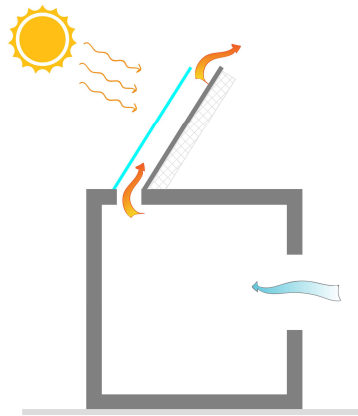
Como resultado, se observó un aumento del 19 % de humedad relativa en el régimen de humidificación, y un decremento del 27 % de humedad relativa en el régimen de deshumidificación. Se concluyó que el sistema intercambiador de calor tierra-aire puede mejorar las condiciones higrotérmicas de edificios en climas áridos.

### ➤ Chimenea solar

Con respecto a los estudios sobre chimenea solar, Saleem *et al.* (2016) analizan la propuesta de una chimenea solar sobre una habitación individual para lograr una tasa de ventilación natural óptima en un clima cálido, mediante el desarrollo de un modelo matemático. Las dimensiones de la chimenea solar propuesta son de 1,4 m de largo, 0,6 m de ancho y 0,20 m de espesor, con una inclinación de 45° (Figura 18). Los resultados analíticos mostraron que se logró un flujo de aire óptimo de 0,019 a 0,033 m<sup>3</sup>/s en un 88,2% durante el día.

**Figura 18**

*Esquema de chimenea solar para ventilación natural*



*Nota.* Adaptado de "Achieving standard natural ventilation rate of dwellings in a hot-arid climate using solar chimney" (p. 362), por Saleem *et al.*, 2016, *Energy and Buildings*, 133.

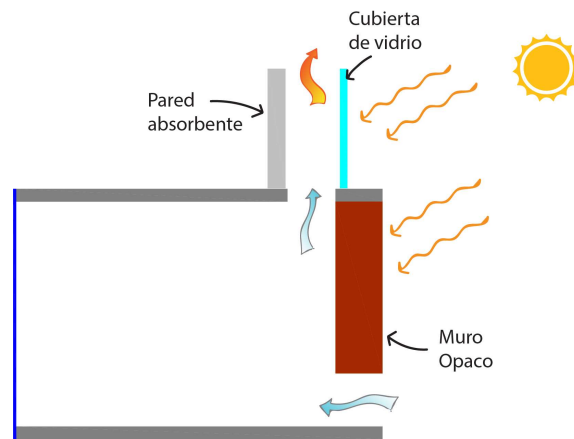
Jiménez-Xamán *et al.* (2020), por su parte, realizaron una evaluación del desempeño térmico de una chimenea solar colocada en la azotea de una vivienda en clima cálido (Figura 19); ésta, mejoró la tasa de ventilación hasta un 45 % durante el verano y un 24,89 % durante el invierno.

### ➤ Mixtos

Otros estudios analizan la combinación de un intercambiador de calor tierra-aire y chimenea solar para diversos objetivos; un ejemplo son Li *et al.* (2014), que llevan a cabo el desarrollo de un sistema de acondicionamiento pasivo, mediante la combinación de un intercambiador de calor tierra-aire, un captador solar y una chimenea solar; sin embargo, debido a las características de los dispositivos, se revisan los resultados obtenidos por el captador solar, ya que lo que los autores consideran la chimenea solar, consiste en un ducto de acero de 12,2 m de altura lo que difiere de los dispositivos analizados por autores mencionados anteriormente.

**Figura 19**

*Esquema de chimenea solar sobre cubierta en clima cálido*



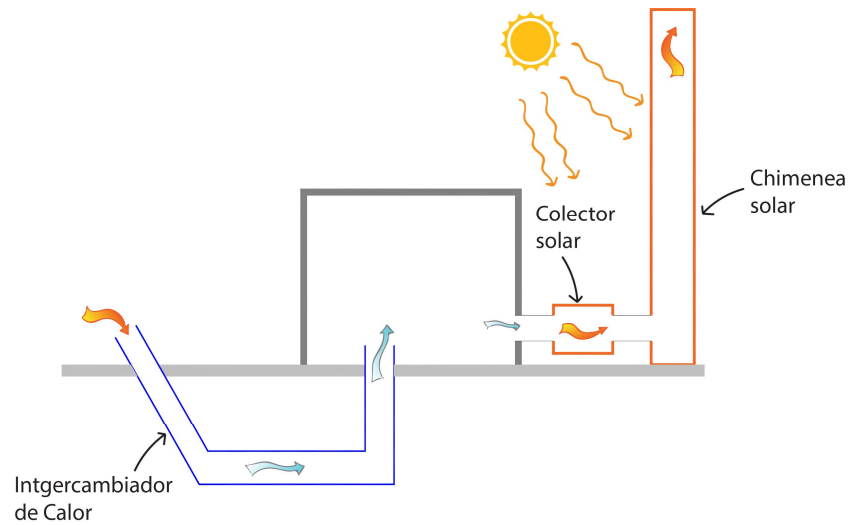
*Nota.* Adaptado de "Assessing the thermal performance of a rooftop solar chimney attached to a single room" (p. 5), por Jiménez-Xamán *et al.*, 2020, *Journal of Building Engineering*, 31.

El intercambiador consiste en un ducto de acero de 45,0 cm de diámetro, con una longitud de 57,0 m, colocado a una profundidad de 3,0 m posicionado de SE-a NO. Por otra parte, diseñaron el colector solar con una superficie absorbente de 20,0 m<sup>2</sup> orientada al sur, construido con madera y un tipo especial de vidrio solar; sellado y con una capa de aislante en la parte baja del lector, recubierto con contrachapado y pintado de negro (Figura 20). El captador se conecta, por un lado, al espacio de análisis y, por el otro, al ducto de la chimenea solar. Como resultados, obtuvieron el sistema es capaz de mantener condiciones ambientales dentro del rango de confort, la temperatura del aire se mantiene entre 21,3 °C y 25,1 °C mientras que la humedad lo hace en un rango entre 50 a 70 %.

Por su parte, Elghamry & Hassan (2020) realizan una investigación experimental sobre calefacción y ventilación en una sala de una edificación en Alejandría, Egipto, mediante la combinación de dichos sistemas, utilizando el intercambiador de calor con tubo geotérmico como suministro de aire fresco, y la chimenea solar en la cubierta a manera de extractor del aire; en la que incluyen en la propuesta un panel fotovoltaico (Figura 21).

**Figura 20**

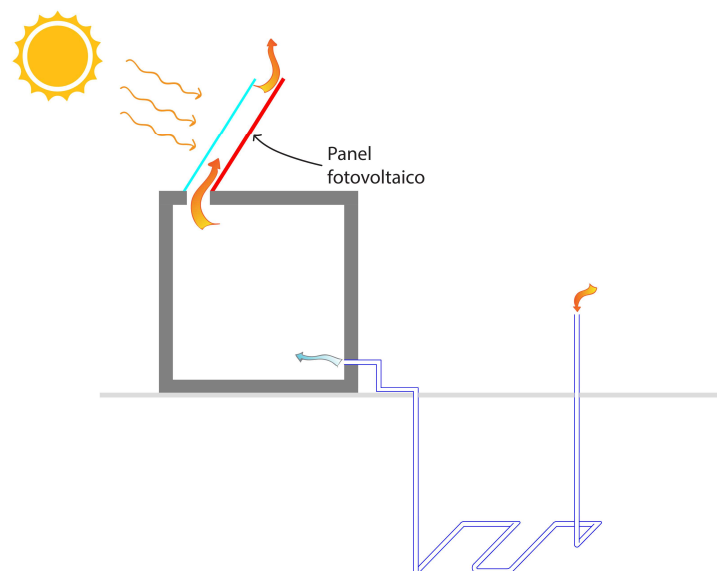
*Esquema de sistema combinado de tres dispositivos*



*Nota.* Adaptado de "Performance of a coupled cooling system with earth-to-air heat exchanger and solar chimney" (p. 469), por Li *et al.*, 2014, *Renewable Energy*, 62.

**Figura 21**

*Esquema de intercambiador de calor y chimenea solar combinados*



*Nota.* Adaptado de "Impact a combination of geothermal and solar energy systems on building ventilation, heating and output power: Experimental study" (p. 1405), por Elghamry & Hassan, 2020, *Renewable Energy*, 152.



Se comparó el rendimiento entre tres arreglos: #1-intercambiador de calor, chimenea solar a 30° y panel solar; #2-intercambiador de calor, chimenea solar a 45° y panel solar; por último, #3-intercambiador de calor, chimenea solar a 30° sin panel solar. El estudio indicó que la calefacción natural diaria máxima total y el aire ventilado se logran en el caso de una chimenea solar sin PV, mientras que sus valores mínimos diarios se producen en el caso de una chimenea solar que incluye PV en un ángulo de inclinación de 30°. El aire ventilado diario representó 374,2 m<sup>3</sup> (46 veces el volumen de la habitación) en el arreglo #3, el cual fue el mayor de los tres. Demostrando que la combinación de los sistemas pasivos tiene la capacidad de calentar y ventilar la sala.

Al hacer una comparación sobre los sistemas analizados, en la Tabla 4 y Tabla 5 se puede observar que las dimensiones tanto para intercambiadores como para chimenea solar son similares; en el caso de los intercambiadores, se mantienen en el rango de profundidad señalados por Santamouris & Kolokotsa (2013).y Duraković (2020); con respecto al clima, principalmente se desarrollan en climas cálidos, y el objetivo o uso principal es para el enfriamiento para confort; el diámetro de la tubería predomina los 0,10 m y, en cuanto al material, el PVC. En relación a la chimenea solar, se utilizan en climas cálidos, con una longitud promedio de 1,60 m, el ancho presenta una diferencia de 0,10 m entre los dispositivos analizados, la inclinación predominante es 45° con orientación al Sur, y con vidrio claro; el material de la superficie absorbente, es la que varía entre cada uno de los dispositivos.

**Tabla 4**

*Comparación de dimensiones de intercambiadores de calor*

| Autor                              | Ubicación            | Clima                    | Objetivo                                  | Long.<br>(m) | Prof.<br>(m) | Diámetro<br>(m) | Separación<br>(m) | Altura de<br>entrada<br>(m) | Uso de<br>Ventila-<br>dor | Material                          |
|------------------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------------------------|--------------|--------------|-----------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Cruz <i>et al.</i><br>(2006)       | Jalisco,<br>México   | Tropical                 | deshumidificador                          | 3,0          | 2,0          | 0,10            | n/a               | 0,5                         | no                        | cemento                           |
| Khabbaz <i>et al.</i><br>(2016)    | Marruecos            | Cálido<br>semi-árido     | Enfriamiento                              | 3 de<br>77,7 | 2,2 – 3,5    | 0,15            | 0,14              | 0,15                        | si                        | tubo PVC                          |
| Serageldin <i>et al.</i><br>(2016) | Egipto               | Árido                    | Enfriamiento y<br>calentamiento           | 5,5          | 2,0          | 0,05            | 0,20 – 0,50       | 1,20                        | si                        | tubo PVC                          |
| Rosa <i>et al.</i><br>(2018)       | Coimbra,<br>Portugal | Mediterráneo             | Enfriamiento y<br>calentamiento           | 45,0         | 1,9          | 7 x 0,1         | 1,0               | n/a                         | si                        | tubo PVC                          |
| Pakari & Ghani<br>(2019)           | Doha,<br>Qatar       | Desértico<br>cálido-seco | Enfriamiento<br>pasivo                    | 21,5         | 0,4          | 0,15            | n/a               | n/a                         | si                        | Aluminio,<br>cubierta<br>de pasto |
| Elghamry &<br>Hassan (2020)        | Alejandro,<br>Egipto | Cálido<br>semi-árido     | Calentamiento y<br>ventilación<br>natural | 5,0          | 2,0          | 0,05            | n/a               | n/a                         | no                        | tubo PVC                          |
| Rosa <i>et al.</i><br>(2020)       | Coimbra,<br>Portugal | Mediterráneo             | Enfriamiento y<br>calentamiento           | 45,0         | 1,9          | 7 x 0,1         | 0,5               | n/a                         | n/a                       | tubo PVC                          |
| Sakhri <i>et al.</i><br>(2020)     | Argelia              | Árido                    | Eficiencia                                | 60,0         | 1,5          | 0,1             | n/a               | 3,0                         | no                        | tubo PVC                          |

**Tabla 5**

*Comparación de dimensiones de chimeneas solares*

| <b>Autor</b>                       | <b>Ubicación</b>  | <b>Clima</b>            | <b>Objetivo</b>                     | <b>Longitud<br/>(m)</b> | <b>Ancho<br/>(m)</b> | <b>Separación<br/>(m)</b> | <b>Inclinación<br/>(°)</b> | <b>Orientación</b> | <b>Material</b>                                         |
|------------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------|
| Saleem <i>et al.</i><br>(2016)     | Alejandro, Egipto | Cálido semi-árido       | Ventilación natural                 | 1,40                    | 0,60                 | 0,20                      | 45                         | Sur                | aluminio de 1 mm acabado negro mate y vidrio opaco 4 mm |
| Elghamry & Hassan (2020)           | Alejandro, Egipto | Cálido semi-árido       | Calentamiento y ventilación natural | 1,60                    | 0,70                 | 0,30                      | 45                         | Sur                | vidrio 4 mm                                             |
| Jiménez-Xamán <i>et al.</i> (2020) | Merida, México    | Tropical de sabana (As) | Desempeño térmico y ventilación     | 2,0                     | ----                 | 0,12                      | 90                         | Sur                | Vidrio claro Ladrillo rojo 15 cm                        |

### 3 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El trabajo de investigación se consideró del tipo cuantitativo, con un alcance explicativo y correlacional, proponiendo un diseño de investigación de tipo cuasi-experimental. Las características de la investigación se presentan en la Tabla 6.

**Tabla 6**

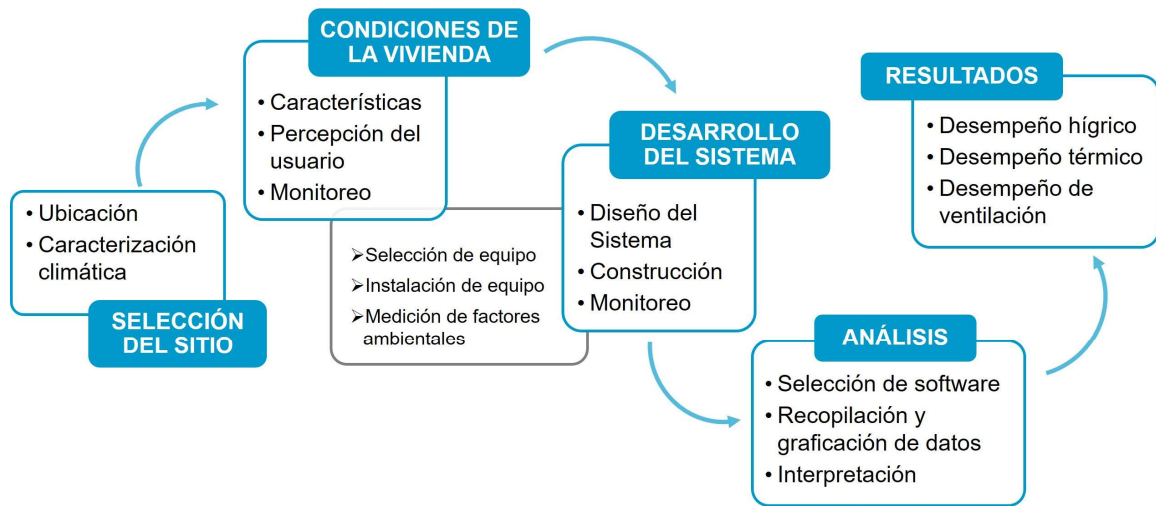
*Características de la Investigación*

| Característica     | Definición                  |
|--------------------|-----------------------------|
| Enfoque            | Cuantitativo                |
| Alcance            | Explicativo – correlacional |
| Diseño             | Cuasi experimental          |
| Unidad de análisis | Vivienda existente          |
| Temporalidad       | Anual                       |

Consistió en la construcción y evaluación de un sistema pasivo de acondicionamiento que permitiera mitigar los problemas de humedad en la vivienda de interés social. Para ello, primero se llevó a cabo la selección del sitio, en el cual se estableció la ubicación específica de la vivienda a la cual se le implementó el sistema pasivo y la caracterización climática de la ciudad donde se desarrolla la investigación; posteriormente, se establecieron las condiciones de la vivienda a la cual se le implementó el sistema propuesto, definiendo las características específicas y la percepción del usuario respecto a la presencia de problemas humedad, así como el monitoreo de las condiciones ambientales en las que se presentan dichos problemas. Después, siguió el desarrollo del sistema pasivo, que consistió en el diseño de los dispositivos que conformaron el sistema, y su posterior construcción y monitoreo del funcionamiento, con la selección de los instrumentos adecuados para ello, para su posterior análisis de desempeño, mediante la selección del software y el diseño de las bases de datos para el procesamiento y representación gráfica de los datos para facilitar la interpretación de los datos obtenidos y establecer los resultados del desempeño hídrico, térmico y de ventilación.

**Figura 22**

*Metodología de experimento*



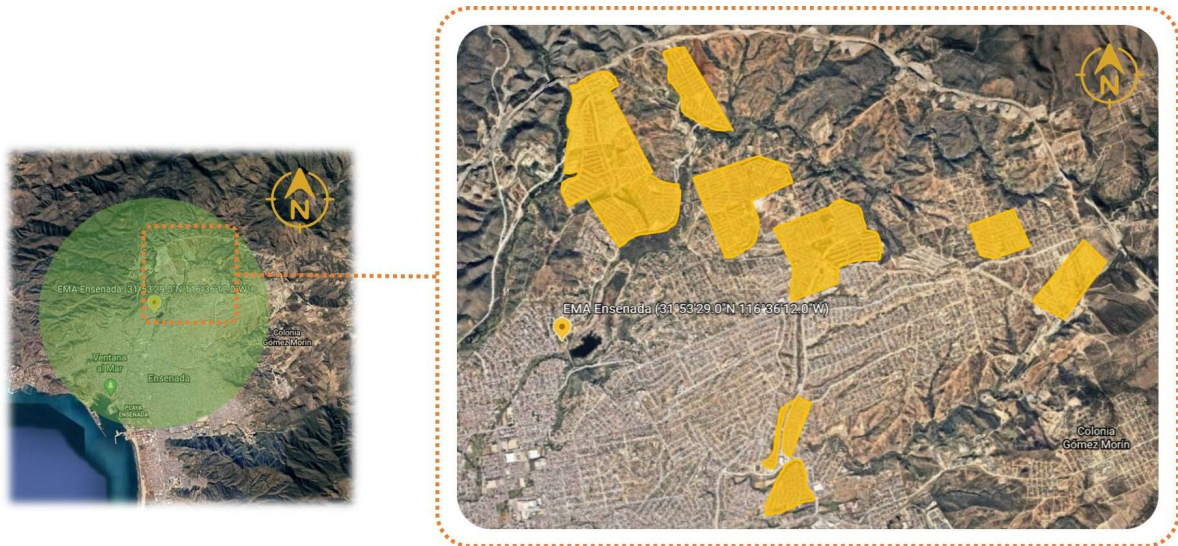
De manera más específica, el desarrollo de la metodología aplicada para el experimento se realizó en 5 puntos principales: selección del sitio, condiciones de la vivienda, desarrollo del sistema, análisis y resultados (Figura 22).

### 3.1 Selección del sitio

El universo de estudio se enfoca en la vivienda de interés social de los fraccionamientos ubicados en el sector noreste de la ciudad de Ensenada, ya que este sector se localiza dentro del área representativa (5 km aprox.) de la única Estación Meteorológica Automática (EMA) de la ciudad; lo que permite que los resultados obtenidos tengan mayor validez ya que son apegados a la realidad. Además, es de los sectores con un alto número de fraccionamientos de vivienda de interés social, 17 aproximadamente (Figura 23), los cuales cuentan con diversas tipologías de vivienda; contruidos con sistemas constructivos predominantemente de block y de concreto colado, también conocido como de molde o meccano.

**Figura 23**

*Localización del experimento*



*Nota.* Localización de EMA Ensenada y radio de acción (*Izq.*); fraccionamientos de interés social en sector noreste (*der*).

### 3.1.1 Descripción climática

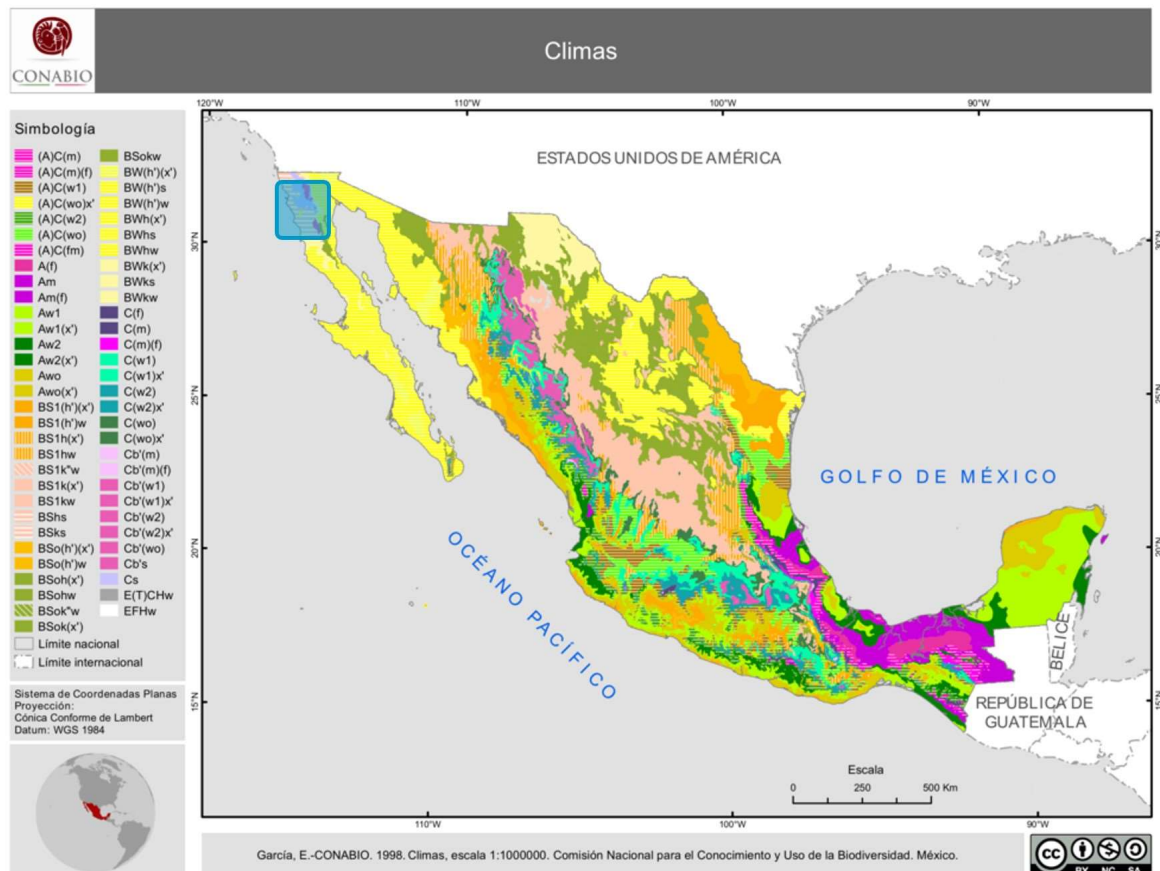
La ciudad de Ensenada en el estado de Baja California, único en la República Mexicana que cuenta con clima mediterráneo, presenta según García (2004), una clasificación climática tipo BSKs (Figura 24) que se describe como seco templado con lluvias en invierno y que se caracteriza por tener verano seco y cálido e invierno húmedo, lluvioso y frío (IMIP, 2009).

Una de las características del clima de la ciudad es la humedad relativa elevada a lo largo del año (Figura 25), tanto la media y la máxima se encuentran por encima del 60 %; esto se debe a la cercanía con el mar, ya que es una ciudad litoral de México.



**Figura 24**

*Tipos de clima en México*



*Nota.* Adaptado de *Climas*, por García, 2001, CONABIO

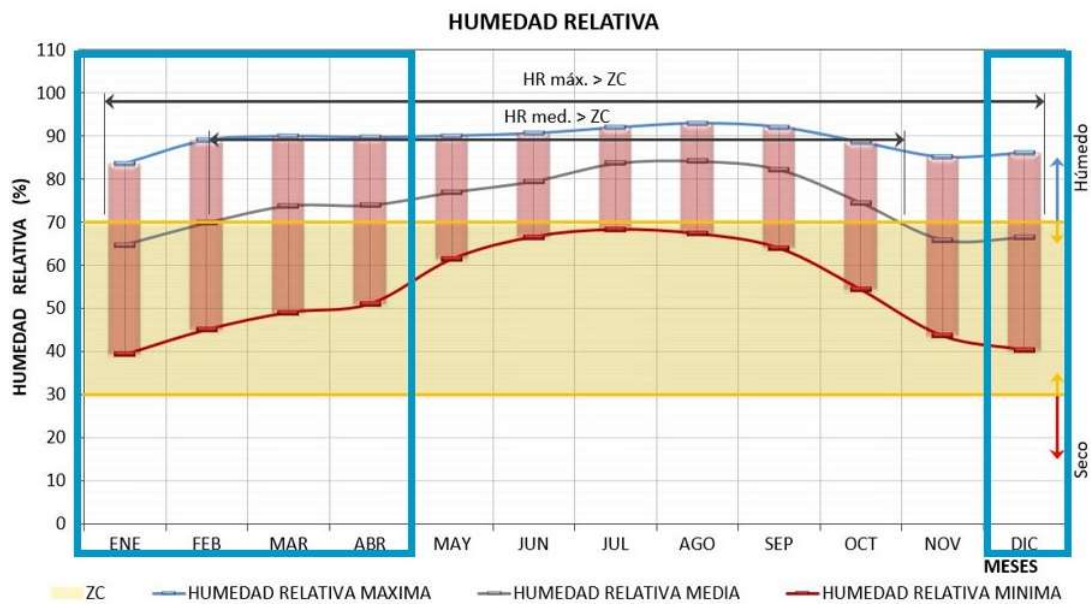
(<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/layouts/clima1mgw.png>)

Durante los meses de Julio a Septiembre se presentan los niveles más elevados de humedad, sin embargo, son los niveles que se presentan durante el invierno, de Diciembre a Marzo, junto con las condiciones de temperatura y menor radiación solar (Figura 26), así como el no ventilar los espacios debido a las mismas condiciones climáticas invernales, lo que representa un agravante para las edificaciones en lo relacionado a las patologías por humedad, ya que se considera que ambientes por encima del 60 % de HR son más propensos a desarrollar problemas de humedad así como la presencia de moho.



**Figura 25**

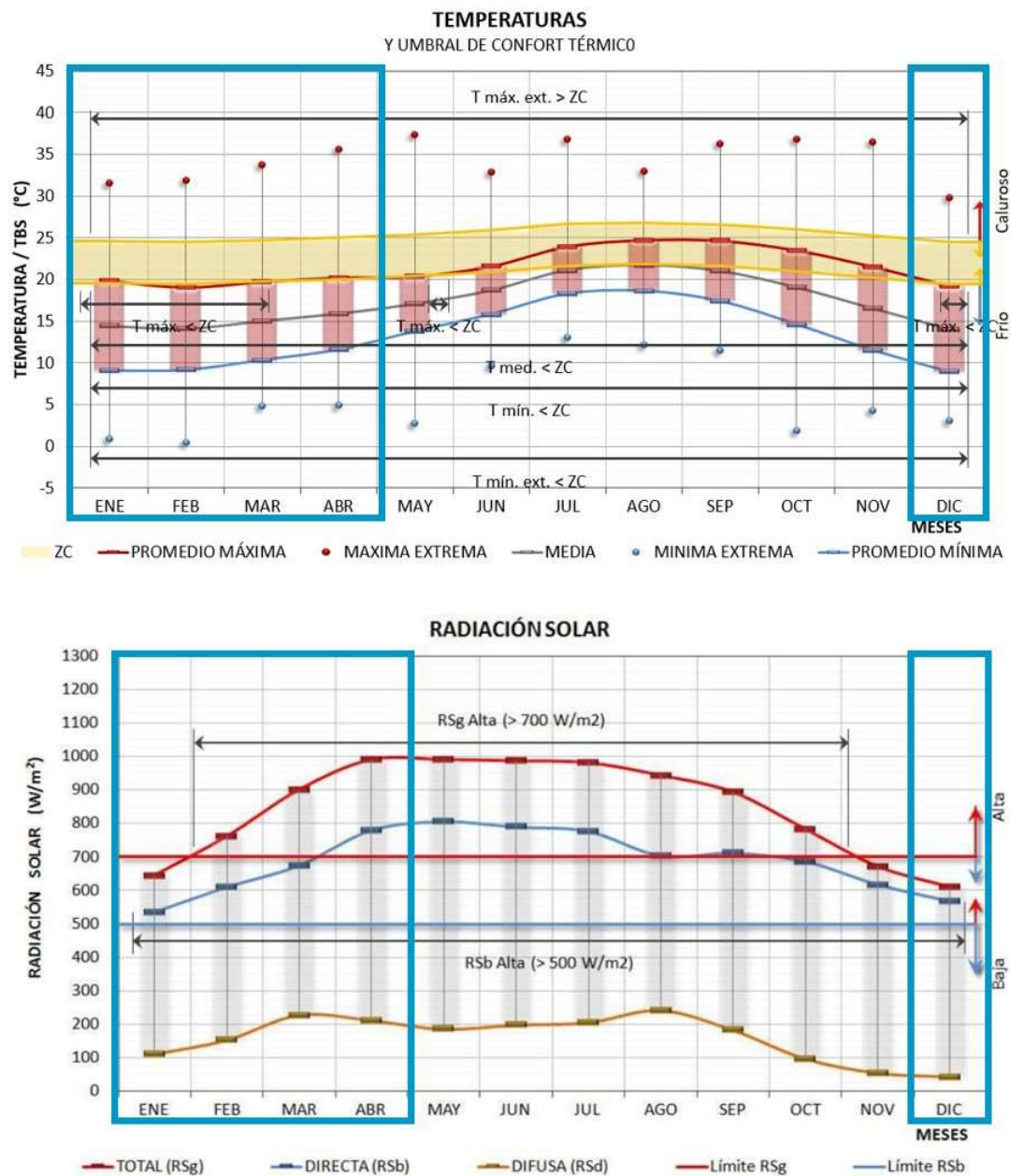
*Estimación de humedad relativa en Ensenada, B.C.*



*Nota.* Periodo térmico frío indicado por recuadro azul. Adaptado de *Manual de diseño pasivo para el arquitecto: un reflejo del análisis climático y bioclimático de Ensenada, Baja California* (p. 42), por Huerta, 2018, UABC.

**Figura 26**

*Estimación de temperatura y radiación solar en Ensenada, B.C.*



*Nota.* Periodo térmico frío indicado por recuadro azul. Adaptado de *Manual de diseño pasivo para el arquitecto: un reflejo del análisis climático y bioclimático de Ensenada, Baja California* (p. 37 y 47), por Huerta, 2018, UABC.

### 3.2 Características generales de la vivienda en Ensenada.

En todos los municipios de Baja California, la mayor cantidad de vivienda nueva vigente se concentra en la popular y tradicional (SIDUE B.C., 2009), ambas integran lo que se conoce como vivienda de interés social (CONAVI, 2017), que se caracterizan por tener entre 40 m<sup>2</sup> a 71 m<sup>2</sup> dependiendo de la clasificación, con un máximo de 3 recámaras y un espacio de cocina y estancia-comedor (Tabla 7). En Ensenada, la mayor parte de la distribución de la vivienda se ubica dentro del PCU U1, lo que permite acceder a mayor cantidad de subsidios y financiamientos.

**Tabla 7**

#### Clasificación del tipo de vivienda por precio

| Promedios                                           | Económica                                  | Popular                                                                                   | Tradicional                                                                                     | Media                                                                                                                | Residencial                                                                                                                                  | Residencial plus                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Superficie construida promedio (en m <sup>2</sup> ) | 40                                         | 50                                                                                        | 71                                                                                              | 102                                                                                                                  | 156                                                                                                                                          | Más de 188                                                                                                                                                                                           |
| Costo promedio:                                     |                                            |                                                                                           |                                                                                                 |                                                                                                                      |                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                      |
| Unidad de medida de actualización (UMA)             | hasta 118                                  | de 118.1 a 200                                                                            | de 200.1 a 350                                                                                  | de 350.1 a 750                                                                                                       | de 750.1 a 1,500                                                                                                                             | mayor de 1,500                                                                                                                                                                                       |
| Numero de cuartos y cajones de estacionamiento      | 1 Baño<br>Cocina<br>Área de usos múltiples | 1 Baño<br>Cocina<br>Estancia -comedor<br>De 1 a 2 recámaras<br>1 cajón de estacionamiento | 1 y ½ Baños<br>Cocina<br>Estancia – comedor<br>De 2 a 3 recámaras<br>1 cajón de estacionamiento | 2 Baños<br>Cocina<br>Sala<br>Comedor<br>De 2 a 3 recámaras<br>Cuarto de servicio<br>1 a 2 cajones de estacionamiento | De 3 a 4 baños<br>Cocina<br>Sala<br>Comedor<br>De 3 a 4 recámaras<br>Cuarto de servicio<br>Sala familiar<br>2 a 3 cajones de estacionamiento | De 3 a 5 baños<br>Cocina<br>Sala<br>Comedor<br>De 3 a más recámaras<br>De 1 a 2 cuartos de servicio<br>Sala familiar<br>Más de 3 cajones de estacionamiento<br>Gimnasio<br>Salón de Juegos<br>Jardín |

*Nota.* Adaptado de *Código de Edificación de Vivienda* (p. 61), por CONAVI, 2017, CONAVI.

De acuerdo con el Programa Sectorial de Vivienda de Baja California 2014-2019 (SIDUE B.C., 2009) los materiales de construcción de las 870 310 viviendas particulares habitadas en Baja California, de un total de 28 607 568 a nivel nacional, se consideran de la siguiente manera:

- Material durable en pisos: Con recubrimiento en los pisos que puede ser firme o cemento, mosaico, madera u otro material.
- Material durable en paredes: Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto.
- Material durable en techo: Losa de concreto o viguetas con bovedilla.  
(SIDUE B.C., 2009, p. 17)

Sin embargo, la CONAVI (2017), dentro de los requisitos para estructuras de concreto reforzado, señala que: "Se catalogan como ambientes exteriores agresivos las zonas costeras, zonas con humedad relativa promedio superior al 60 % y regiones con altas velocidades de viento correspondientes a las zonas III y IV establecidas en la Sección 1202.7" (CONAVI, 2017, p. 168).

Además, dentro del diseño de estructuras prefabricadas, indica que:

Los muros estructurales y no estructurales prefabricados, ubicados hacia el exterior del edificio, deben modelarse de acuerdo con la zona climática de la localidad donde éste se ubique, de tal manera que los materiales que los constituyan garanticen el confort térmico de los habitantes del edificio y eviten ganancias y pérdidas excesivas de calor y transmisión de humedades que pongan en riesgo la salud de los residentes, así como su economía por posibles gastos extraordinarios debidos al alto consumo de energía por el uso de ventiladores y aparatos de clima artificial. (CONAVI, 2017, p. 269-270)

Por tanto, la vivienda de interés social en la ciudad de Ensenada, se ha desarrollado con materiales que, al buscar la durabilidad, se generan deficiencias en sus características debido a la exposición a ambientes agresivos, dadas por las condiciones climáticas de humedad elevada que predominan en la región, generando problemas de humedad en los espacios interiores, y con ello, riesgos en la salud de los ocupantes.

### 3.2.1 Caracterización de condiciones de la vivienda.

La primera parte de la investigación consistió en el monitoreo de una vivienda existente que presentara daños por humedad, con el fin de analizar e identificar el comportamiento higrotérmico de la vivienda, con respecto a las condiciones climáticas externas y considerando la cantidad de habitantes, así como las características de uso de los espacios, esto de acuerdo con los objetivos establecidos (sección 1.5.2 inciso b), pág.11).

#### ➤ Características

La vivienda seleccionada se encuentra ubicada en el fraccionamiento Residencial del Prado II, situado en el sector noreste de la ciudad de Ensenada. La selección del sitio se debió a las facilidades para poder llevarlo a cabo y a que pertenece al sector de la ciudad propuesto para la investigación general, dando validez para poder utilizar los resultados. Los usuarios consistieron en dos adultos, hombre y mujer de 42 y 37 años, respectivamente; y dos menores de edad, de 12 y 10 años.

Dentro de la inspección visual, se observó que la afectación por humedad en la vivienda, era la presencia de moho principalmente en las esquinas de las paredes de las recámaras, en el techo tanto del baño así como en las zonas de los closets; de igual manera, se distingue la presencia de olor a humedad, además del deterioro y desprendimiento del emplaste tanto en cubierta como en muros, principalmente en baño y recámaras, por lo que constantemente se aplican soluciones químicas para eliminarlas (Figura 27). El periodo de monitoreo fue de 5 meses, del 16 de marzo al 15 de agosto de 2020, lo que permitió observar el comportamiento de la

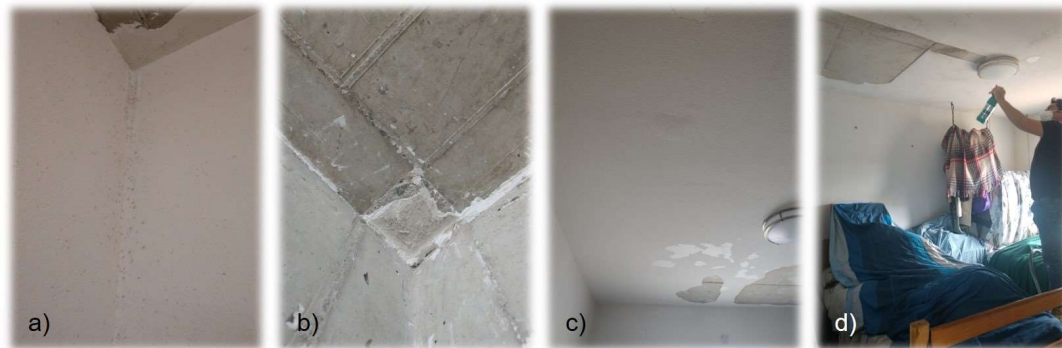
vivienda durante la última semana invierno, durante el periodo de transición frío calor (mayo), y parte del periodo cálido (agosto), esto se debió a la disponibilidad del equipo de monitoreo.

#### ➤ Instrumentos de medición.

El equipo utilizado para monitorear las condiciones ambientales consistió en sensores marca ONSET modelo HOB0 U12-012 (Figura 28) que permiten medir variables requeridas para el experimento como humedad relativa, temperatura e intensidad de luz. Los sensores se ubicaron en los espacios críticos respecto a la humedad: cocina, baño y recámara, y uno externo para control (Figura 29). Para la colocación se consideró que los dispositivos quedaran fuera del alcance de los usuarios, para que no interfirieran con sus actividades cotidianas y con el uso regular del espacio. Además, se tomó en cuenta la inspección visual, para determinar las áreas de mayor afectación por moho, siendo estas las cercanas a la cubierta y el muro hacia el exterior.

**Figura 27**

*Daños por humedad identificados en la vivienda*



**Nota.** a) Manchas negras en esquina; b) manchas negras y desprendimiento de recubrimientos gruesos; c) desprendimiento ligero de recubrimiento y d) aplicación de solución química en Rec. #2.



**Figura 28**

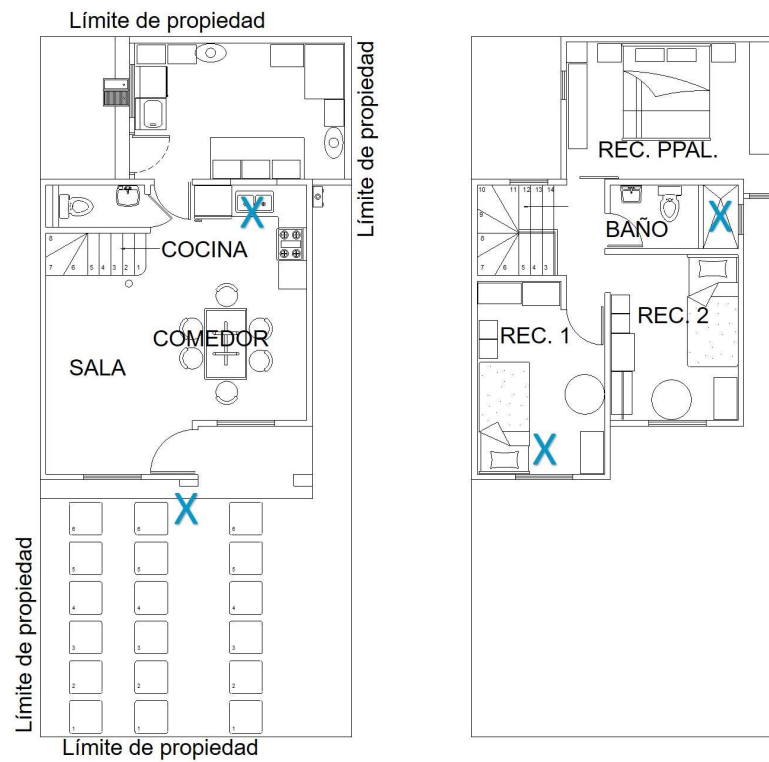
*Equipo de monitoreo. Datalogger*



*Nota.* Reproducido de U12-012, ONSET (<https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u12-012>)

**Figura 29**

*Ubicación de sensores*



*Nota.* Distribución de sensores en la vivienda: exterior, cocina, rec.1 y baño.



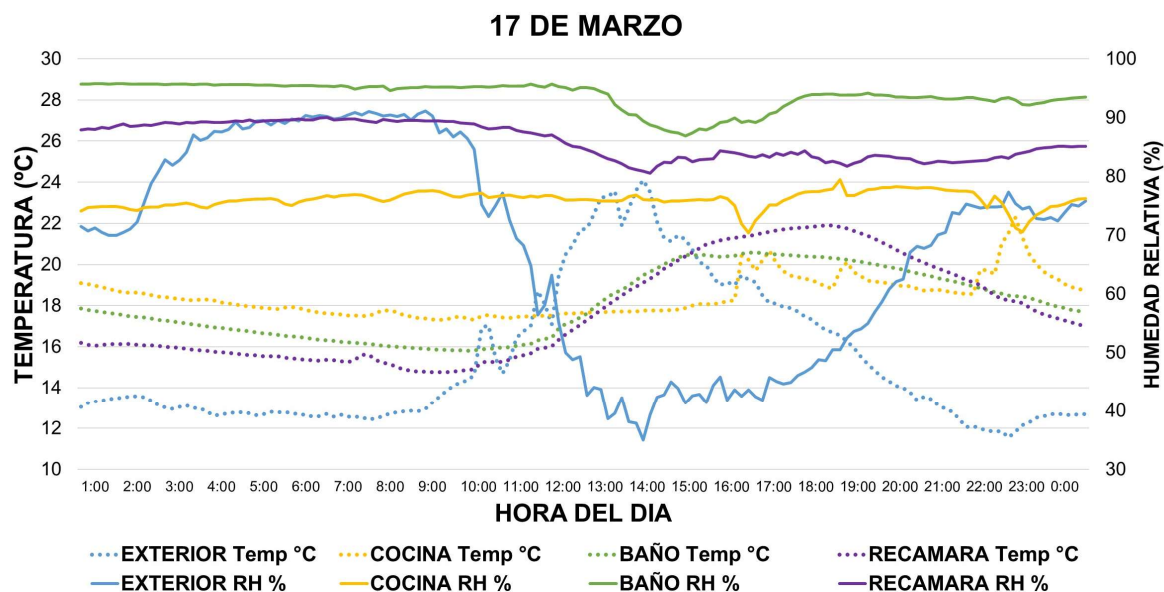
## ➤ Caracterización

El comportamiento observado en un día (Figura 30), indica que los niveles tanto de temperatura como de humedad relativa dentro de los espacios se mantienen casi constantes, por encima del 60% de HR, independientemente que la humedad relativa al exterior disminuya durante el día; siendo el baño el espacio con mayor humedad, por encima del 90%, y la cocina la de menor porcentaje, alrededor del 70%.

Incluso, el comportamiento se mantuvo similar en el análisis por semana (Figura 31), presentando ligeros cambios en los niveles de humedad en los días que se podía abrir las ventanas o se realizaban actividades que implican aumento de humedad, como ducharse o cocinar por más horas de lo común. Las variaciones en la humedad relativa exterior, se debió a condiciones de lluvia durante algunos días.

**Figura 30**

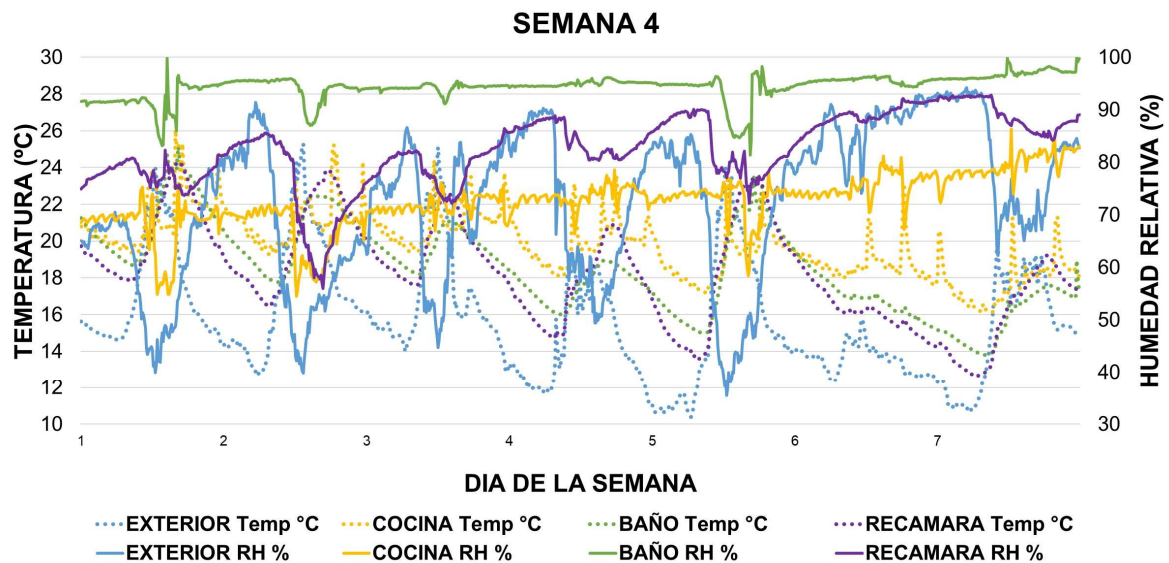
*Comportamiento higrotérmico en un día específico.*



*Nota.* Comparación de humedad relativa y temperatura registrados en los cuatro puntos de análisis, en un día específico (17 de marzo de 2020).

**Figura 31**

*Comportamiento higrotérmico en una semana específica.*



*Nota.* Comparación de humedad relativa y temperatura registrados en los cuatro puntos de análisis, en una semana (del 05 al 11 de abril de 2020).

### 3.3 Periodo de Evaluación

El proceso de evaluación del sistema pasivo se llevó a cabo durante un año, de abril de 2021 a marzo de 2022, en periodos mensuales enfocándose a los cuatro periodos térmicos principales: calor (agosto), transición calor a frío (noviembre), frío (febrero) y transición de frío a calor (mayo). Sin embargo, la investigación se centra en el periodo frío, ya que es cuando se agravan los daños o efectos por humedad en los espacios interiores, debido a las características climáticas de bajas temperatura y lluvias, lo que ocasiona que los espacios no se ventilen de manera adecuada.

### 3.4 Variables, instrumentos y equipo de medición

Como variables de la investigación se consideraron variables dependientes las condiciones de humedad relativa, temperatura, ventilación e iluminación natural en los espacios interiores; y como variables independientes, las dimensiones correspondientes al sistema pasivo: longitud, profundidad y diámetro, para el caso del intercambiador de calor, y longitud, ancho, espesor e inclinación, para la chimenea solar. La recolección de información se realizó mediante instrumentos cualitativos y cuantitativos; cuestionarios, para determinar los síntomas visibles que se relacionan con las variables establecidas, conocer las condiciones de uso del objeto de estudio y los factores que pueden afectar la validez de la investigación. Los instrumentos cuantitativos, se refieren a los equipos de monitoreo de las variables ambientales, los cuales consisten en los llamados datalogger o registradores de datos, se utilizó el sensor marca Onset modelo U12-012 y U12-013 para medir las variables de humedad relativa, temperatura del aire e intensidad de luz; también se utilizaron sensores de velocidad de aire marca Onset modelo T-DCI-F300-1A3, sensores T-DCI-F300-1A3MCx-HD para medir la temperatura de suelo, sondas marca Onset modelo S-THB-M002/008 para medir temperatura y humedad relativa en ductos y la micro-estación marca Onset modelo H21-USB para registrar la información (Figura 32).

**Figura 32**

*Instrumentos de medición utilizados en el arreglo experimental.*



Nota. Adaptado de ONSET (<https://www.onsetcomp.com/products>)

### 3.5 Diseño del sistema

El sistema propuesto reúne varias estrategias de diseño pasivo, las cuales son utilizadas principalmente como estrategias de climatización, tanto de calentamiento como de enfriamiento, por una parte, el intercambiador de calor aire-tierra; y por el otro, la chimenea solar.

El uso tradicional de los pozos canadienses o intercambiadores de calor tierra-aire, consiste principalmente en utilizar la tierra como disipador de calor, empleado comúnmente en lugares cálidos; sin embargo, el uso propuesto del sistema al que se refiere la presente investigación, consiste en utilizar el intercambiador como dispositivo de pérdida de humedad del aire, de manera que el que ingrese al espacio sea aire seco.

Si bien este método permite conocer la temperatura de entrada y salida del aire del sistema, la intención de su uso en esta investigación está enfocada a, además de promover una estabilidad térmica del entorno inmediato acondicionado, promover la temperatura de rocío al interior de los ductos a efecto de condensar cierto porcentaje de humedad relativa del aire entrante. Esto, a partir de métodos empíricos traducidos en una etapa experimental exploratoria que combina diferentes técnicas pasivas de acondicionamiento: Intercambiador térmico aire-tierra, chimenea solar, aislamiento y hermeticidad.

Para el diseño del sistema pasivo, primero se desarrolló una propuesta tomando en consideración el dimensionamiento consultado en la bibliografía, la comparación de dimensiones por tipo de sistema se muestra en la Tabla 4 y Tabla 5 (p. 47 y 48).

Para establecer la profundidad que el intercambiador de calor debía tener, de manera que fuera adecuado a las características climáticas de la ciudad, se realizó un análisis a través de TRNSYS<sup>2</sup> para determinar las temperaturas del suelo a cada 0,5 m de 0,0 a 10,0 metros de profundidad, mediante la utilización de los datos climáticos obtenidos de dos fuentes: una por METEONORM<sup>3</sup> y otra por

---

<sup>2</sup> <http://www.trnsys.com/>

<sup>3</sup> <https://meteonorm.com/en/>

Climate.OneBuilding<sup>4</sup>; además, se realizó la normalización horaria de la temperatura, humedad relativa y radiación solar, registrados por la EMA 2072 Presa Emilio López Zamora, durante el periodo 2000-2019, administrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN-CONAGUA), para poder utilizar información más precisa.

Como el objetivo del sistema es reducir la humedad del aire previo a ingresar al espacio interior, se realizó el análisis de la temperatura del suelo con respecto a la temperatura ambiente, para determinar el punto de rocío el cual debe generar el intercambiador, de manera que se provoque la pérdida de la humedad del aire al ingresar al ducto, y posteriormente regular la temperatura del aire para que al ingresar al espacio no afecte las condiciones de confort. Se obtuvo que para los meses correspondientes al periodo frío, el punto de rocío necesario es de 8,0 °C en diciembre y febrero, y de 7,0 °C en enero, cuando la temperatura ambiente promedio es de 12,0 °C y 11,0 °C, respectivamente (Figura 33).

Al analizar los datos climáticos, se observó que el punto de rocío se logra a una profundidad de 1,5 m, a partir de mediados de diciembre, mientras que a una profundidad de 2,5 m la temperatura del suelo está por encima de los 12,0 °C. Como resultado del análisis anterior, se determinó que el intercambiador de calor consistiera en un serpentín de dos niveles, el primero de ellos a 1,5 m para generar el punto de rocío, provocando condensación en el tubo y por ende pérdida de humedad del aire; y el segundo nivel del serpentín, a una profundidad de 2,5 m para generar un aumento de temperatura del aire dentro del intercambiador (Figura 34).

---

<sup>4</sup> <http://climate.onebuilding.org/>



**Figura 33**

*Estimación de la temperatura de subsuelo y el punto de rocío.*

Climate Consultant 6.0 (Build 16, Jan 23, 2020)

FileCriteriaChartsHelp

WEATHER DATA SUMMARY

LOCATION:

Ensenada, BCN, MEX

Latitude/Longitude:

31.667° North, 116.567° West, Time Zone from Greenwich -8

Data Source:

ISD-TMYx 760500 WMO Station Number, Elevation 10 m

| MONTHLY MEANS                                | JAN   | FEB   | MAR   | APR   | MAY   | JUN   | JUL   | AUG   | SEP   | OCT   | NOV   | DEC   |           |
|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Global Horiz Radiation (Avg Hourly)          | 297   | 368   | 408   | 446   | 453   | 455   | 421   | 390   | 412   | 333   | 317   | 282   | Wh/sq.m   |
| Direct Normal Radiation (Avg Hourly)         | 332   | 372   | 321   | 283   | 265   | 255   | 213   | 178   | 270   | 207   | 343   | 334   | Wh/sq.m   |
| Diffuse Radiation (Avg Hourly)               | 135   | 158   | 198   | 233   | 243   | 249   | 256   | 252   | 216   | 207   | 142   | 126   | Wh/sq.m   |
| Global Horiz Radiation (Max Hourly)          | 653   | 781   | 844   | 941   | 971   | 964   | 925   | 912   | 917   | 756   | 685   | 595   | Wh/sq.m   |
| Direct Normal Radiation (Max Hourly)         | 853   | 869   | 871   | 796   | 844   | 761   | 618   | 704   | 848   | 761   | 845   | 846   | Wh/sq.m   |
| Diffuse Radiation (Max Hourly)               | 310   | 365   | 438   | 554   | 561   | 573   | 565   | 546   | 463   | 414   | 348   | 309   | Wh/sq.m   |
| Global Horiz Radiation (Avg Daily Total)     | 3024  | 3990  | 4836  | 5720  | 6184  | 6386  | 5829  | 5120  | 5034  | 3737  | 3294  | 2813  | Wh/sq.m   |
| Direct Normal Radiation (Avg Daily Total)    | 3381  | 4034  | 3793  | 3625  | 3617  | 3582  | 2950  | 2343  | 3299  | 2322  | 3548  | 3336  | Wh/sq.m   |
| Diffuse Radiation (Avg Daily Total)          | 1380  | 1717  | 2354  | 2987  | 3322  | 3494  | 3542  | 3316  | 2637  | 2325  | 1483  | 1263  | Wh/sq.m   |
| Global Horiz Illumination (Avg Hourly)       | 34152 | 42649 | 47436 | 51783 | 52668 | 52773 | 48618 | 44781 | 47584 | 37941 | 36647 | 32363 | lux       |
| Direct Normal Illumination (Avg Hourly)      | 21107 | 24773 | 22973 | 21624 | 20135 | 19620 | 16090 | 13483 | 18878 | 14918 | 21791 | 20675 | lux       |
| Dry Bulb Temperature (Avg Monthly)           | 11    | 12    | 13    | 14    | 16    | 17    | 19    | 19    | 20    | 17    | 15    | 12    | degrees C |
| Dew Point Temperature (Avg Monthly)          | 7     | 8     | 9     | 11    | 12    | 14    | 15    | 16    | 17    | 14    | 10    | 8     | degrees C |
| Relative Humidity (Avg Monthly)              | 77    | 74    | 76    | 82    | 81    | 81    | 79    | 83    | 83    | 80    | 73    | 75    | percent   |
| Wind Direction (Monthly Mode)                | 40    | 40    | 140   | 220   | 220   | 220   | 140   | 220   | 220   | 200   | 140   | 40    | degrees   |
| Wind Speed (Avg Monthly)                     | 0     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 0     | 0     | 1     | 1     | m/s       |
| Ground Temperature (Avg Monthly of 3 Depths) | 13    | 13    | 13    | 13    | 15    | 16    | 18    | 18    | 17    | 17    | 15    | 14    | degrees C |

Back

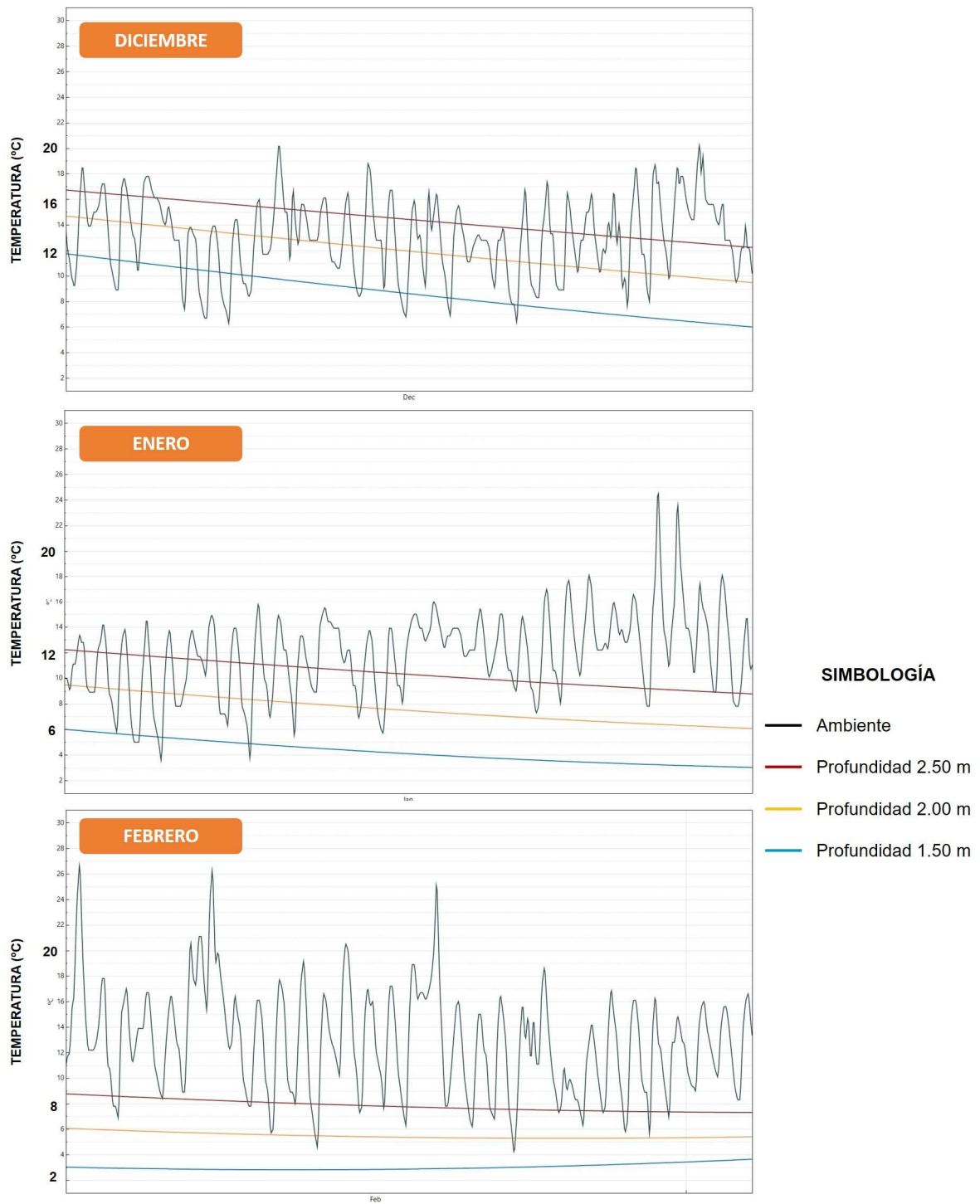
Next

*Nota.* Identificación promedios mensuales de la temperatura de bulbo seco, del punto de rocío y la temperatura del suelo, mediante el programa Climate Consultant © con datos interpolados obtenidos de Meteonorm ©.

Se utilizó, además, el método simplificado para el pre-dimensionamiento del intercambiador de calor tierra-aire desarrollado por Santamouris & Asimakopoulus (1996) (Figura 35), para determinar la temperatura del aire en la salida del intercambiador, de manera que permitió estimar si la profundidad y longitud propuestas para el intercambiador de calor modifican la temperatura del aire, para posteriormente construir el sistema intercambiador de calor más adecuado a las necesidades de la investigación, de acuerdo con las especificaciones técnicas del suelo.

**Figura 34**

*Análisis de temperaturas del suelo en las tres profundidades seleccionadas.*



**Nota.** Análisis de temperaturas del suelo durante el periodo de diciembre a febrero (frío).



**Figura 35**

*Método simplificado de cálculo para intercambiadores de calor tierra aire.*

| ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR TIERRA-A-AIRE |                                                        |                 |     |  |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------|-----|--|
| Método Simplificado de acuerdo con M. Santamouris *             |                                                        |                 |     |  |
| 1                                                               | dar la longitud del tubo                               | L               | m   |  |
| 2                                                               | dar el radio interior del tubo                         | r               | m   |  |
| 3                                                               | dar la profundidad del tubo                            | z               | m   |  |
| 4                                                               | dar la velocidad del aire dentro del tubo              | v               | m/s |  |
| 5                                                               | dar la temperatura del aire a la entrada               | T <sub>in</sub> | °C  |  |
| 6                                                               | dar la temperatura del suelo a la profundidad del tubo | T <sub>g</sub>  | °C  |  |

*Nota.* Reproducido de hoja de cálculo diseñada por Dr. Víctor Fuentes Freixanet<sup>5</sup> con base en modelo desarrollado por Santamouris & Asimakopolus, 1996.

El dimensionamiento de la chimenea solar obedece a las medidas propuestas en los estudios analizados en la Tabla 5 (p. 48), sin embargo, el ángulo de inclinación se definió por la incidencia solar del principal periodo térmico de estudio (frío), de manera que se aprovechara al máximo en dicho periodo. Las especificaciones del intercambiador de calor determinados en el pre-dimensionamiento: longitud, diámetro y profundidad, así como los materiales y acabados utilizados, se encuentran definidos en la Tabla 8.

**Tabla 8**

*Especificaciones de intercambiador de calor propuesto.*

| Dispositivo                | Long.<br>(m) | Prof.<br>(m) | Diám.<br>(m) | Sep.<br>(m) | Altura<br>entrada<br>(m) | Uso de<br>ventilador | Material    |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------------------|----------------------|-------------|
| Intercambiador<br>de calor | 50,00        | 1,5 - 2,5    | 0,10         | 0,50        | 1,0                      | No                   | Tubo<br>PVC |

<sup>5</sup> Profesor-investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, [ffva@azc.uam.mx](mailto:ffva@azc.uam.mx)  
<https://www.researchgate.net/profile/Victor-Fuentes-Freixanet>

Lo referente a la chimenea solar: el ancho, el largo, espesor y la inclinación, los materiales y acabados se definen en la Tabla 9. Variables como la humedad relativa, dentro del tubo y en el espacio interior, así como la velocidad del viento en el ducto, en el espacio interior y en la chimenea solar, se analizaron directamente durante el proceso experimental.

**Tabla 9**

*Especificaciones de chimenea solar propuesta.*

| Dispositivo    | Long.<br>(m) | Ancho<br>(m) | Espesor<br>(m) | Inclinación<br>(°) | Orientación | Material                                                                    |
|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Chimenea solar | 1,60         | 0,60         | 0,20           | 55                 | Sur         | Vidrio claro de 4mm<br>Lámina negra Ca.18<br>Pintura negro mate<br>Aislante |

### 3.6 Modelo

Para el análisis y evaluación del sistema pasivo propuesto, al cual se le denominó Prototipo IC/CS-01 (Inter-Cambiador/Chimenea-Solar), en un inicio se consideró la construcción de dos módulos, uno de control y el prototipo, a escala 1:1; de 3 m x 3 m, fabricados con el sistema constructivo de molde o concreto colado, predominante en las viviendas de interés social ubicados en la zona de estudio, sin embargo, derivado de las limitantes encontradas durante el proceso administrativo requerido para la gestión individual de recursos económicos y facilidades de terreno para la construcción de los módulos experimentales que permitieran favorecer el desarrollo y desempeño de la investigación, (ver 1.7), se definió desarrollar la investigación en un modelo experimental vivo, que se encuentra construido y habitado, operando de forma regular desde el año 2008; para ello, se seleccionó un conjunto habitacional ubicado al noreste de la ciudad de Ensenada, a 10 000 metros del litoral y a 73,0 metros sobre el nivel del mar.

**Figura 36**

*Viviendas de estudio.*



*Nota.* Ubicación de la vivienda de control respecto a la vivienda prototipo.

De éste, a partir de las facilidades de acceso y la proximidad con la autora de este documento para el control, vigilancia y resguardo del sistema propuesto, se eligieron dos viviendas con características físicas y de operación similares: orientación, altitud, colindancias, volumetría, sistema constructivo, color, alturas, superficie construida, distribución de espacios, funcionalidad, acabados, cantidad de usuarios, horario ocupacional, etc. a fin de emplear una de ellas como prototipo de control y otra como prototipo experimental (Figura 36).

De manera específica, el estudio se enfocó a un espacio habitado de la vivienda, siendo una de las recámaras el espacio idóneo para llevarlo a cabo, considerando la ubicación con respecto al terreno de manera que permitiera un fácil acceso para la implementación del prototipo, el número de usuarios, horas de uso, actividades similares, a los cuales se les denominó espacio experimental y espacio de control, respectivamente.

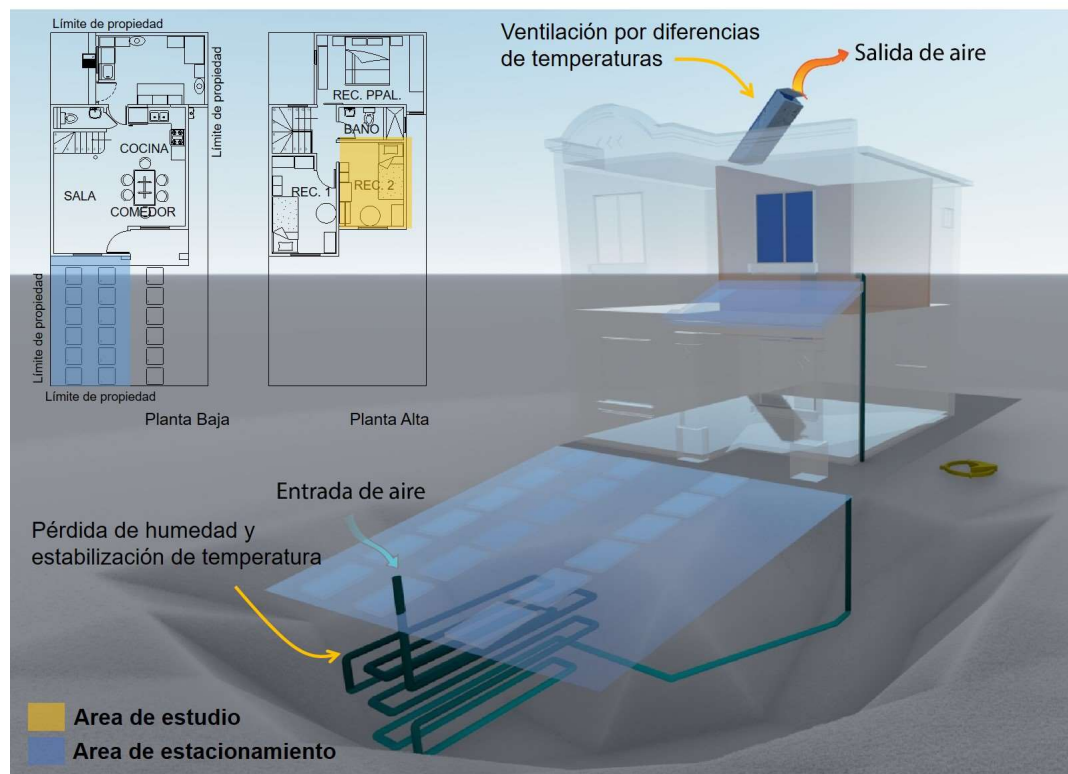
En la vivienda prototipo IC/CS-01 (Figura 37) se colocó el sistema intercambiador de calor aire-tierra, en el área destinada para estacionamiento, regularmente despejada en horario diurno (a efecto de contar con incidencia solar diaria), por el cual ingresará aire del exterior, en el recorrido del tubo se presentará pérdida de

humedad, mediante condensación, debido a la diferencia de temperatura entre el aire y la temperatura del suelo, logrando el punto de rocío, por lo que, el aire presentará un incremento en la temperatura y una disminución de humedad relativa al momento de ingresar al módulo. La inyección del aire al interior se logró por medio de ventilación por diferencia de temperaturas a través de la chimenea solar, la cual se colocó sobre la cubierta del espacio experimental, en ella se eleva la temperatura del aire entre la superficie de vidrio y la lámina, lo que generó diferencias de temperaturas necesarias para la extracción de masas de aire.

Es importante señalar que, para lograr el funcionamiento óptimo del experimento vivo, fue necesario considerar la hermeticidad del espacio en la medida de lo posible durante el periodo de invierno principalmente.

**Figura 37**

*Esquema de prototipo IC/CS-01.*



*Nota.* Ubicación del sistema respecto al módulo habitacional de estudio.

El diseño se propone de tal manera que el sistema pueda ser implementado tanto en vivienda nueva como en vivienda existente. Las especificaciones técnicas tanto de las viviendas como del sistema se indican en el apartado 3.6.2

Otra de las funciones del sistema que se analizó en la investigación, es la capacidad de mantener una ventilación constante durante el periodo frío, de manera que favorezca la reducción de los efectos dañinos de la humedad en el espacio interior, mediante el movimiento de masa ocasionado por la chimenea solar del sistema pasivo.

### 3.6.1 Emplazamiento

Las viviendas analizadas se encuentran en el fraccionamiento Residencial del Prado II, ubicado dentro del sector noreste de la ciudad (Figura 38). Se procuró que ambas contaran con las mismas características de entorno, por lo que, debido a las facilidades obtenidas en la vivienda prototipo, la vivienda control debía mantener la misma orientación y de igual manera, contar con colindancias en las fachadas Norte, Sur y Oeste, y no tener ningún tipo de afectación en la fachada Este.

### 3.6.2 Características de viviendas y usuarios

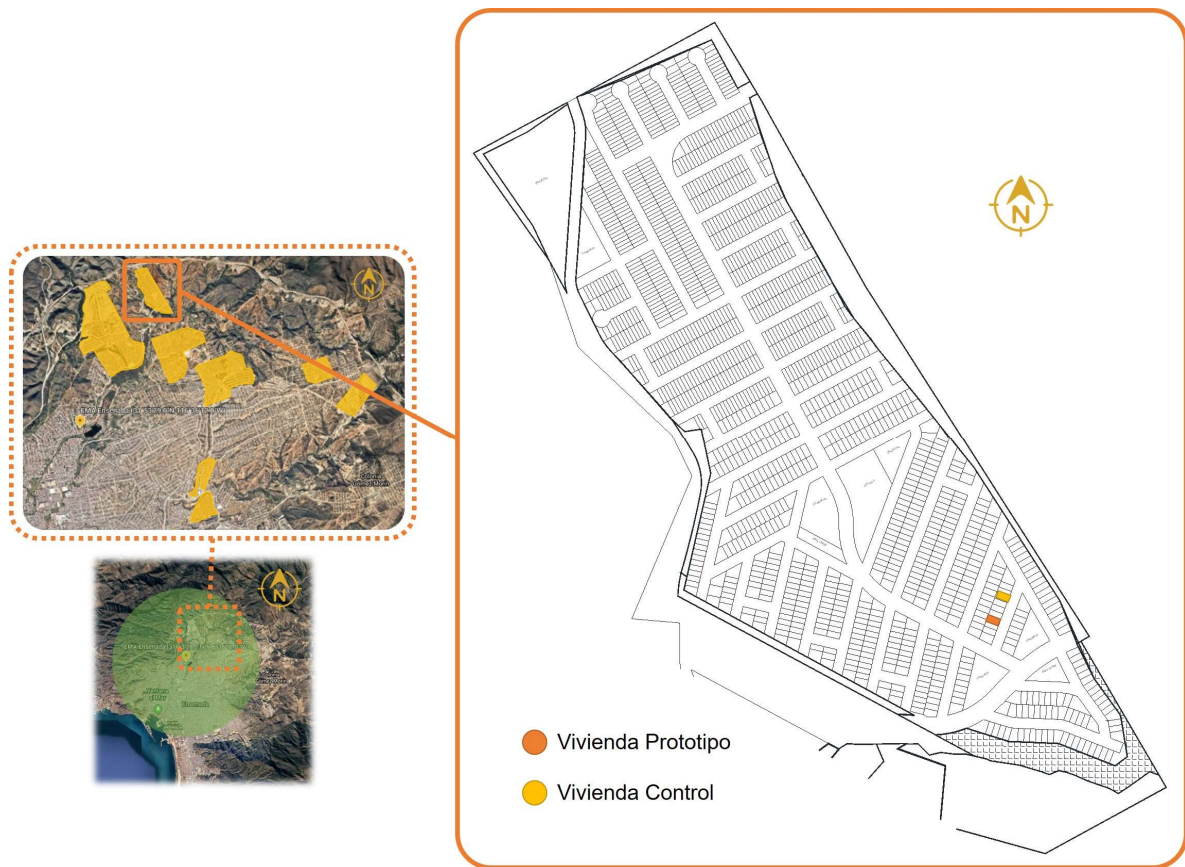
Ambas viviendas son de 2 niveles, construcción de 68,98 m<sup>2</sup> en una superficie de terreno de 100,0 m<sup>2</sup>. La vivienda prototipo tiene una ampliación en la parte posterior, sin embargo, no afectó para el desarrollo de la investigación.

La estructura de las viviendas es mediante el sistema constructivo de molde o concreto colado: losa de cimentación, entrepiso, muros y cubierta de concreto armado de 10 cm de espesor, con resistencia  $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$  y refuerzo con malla electrosoldada 6-6/6-6; acabados interiores en muros y techos a base de yeso con redimix, estuco con sellador en exterior de muros, pintura vinílica en interiores y exteriores, e impermeabilización a base de brea, cartón de fibra de vidrio mineralizado y pintura elastomérica.



**Figura 38**

*Emplazamiento del estudio.*



*Nota.* Ubicación respecto a la ciudad (izq.); ubicación de las viviendas prototipo y de control respecto al fraccionamiento seleccionado (der.).

En el caso de la vivienda prototipo, y como se mencionó en la caracterización de la vivienda, los habitantes, consisten en dos adultos, hombre y mujer de 42 y 37 años, respectivamente; y dos niños, de 12 y 10 años. En la vivienda de control, los usuarios consisten en dos adultos de 39 años de edad, hombre y mujer, y una niña de 10 años. Por lo tanto, como las características de los usuarios son similares, el uso de ambas viviendas es factible para la investigación.

### 3.7 Construcción del sistema

El intercambiador de calor del prototipo IC/CS-1 consistió en tubería de PVC de 0,10 m de diámetro, con una longitud de 50,00 m, el espacio considerado para su desarrollo fue de 18,61 m<sup>2</sup> que corresponde al área destinada para estacionamiento en una vivienda de interés social (Figura 39), sin embargo, debido a que una de las características del tipo de vivienda es la cantidad de metros cuadrados de terreno limitadas, se propuso un área de trabajo de 2,00 m de ancho y 3,50 m de largo, con un sistema de serpentín en tres niveles a una profundidad de 1,5 m, 2,0 m y 2,5 m, con una separación de 0,50 m entre cada nivel (Figura 40).

**Figura 39**

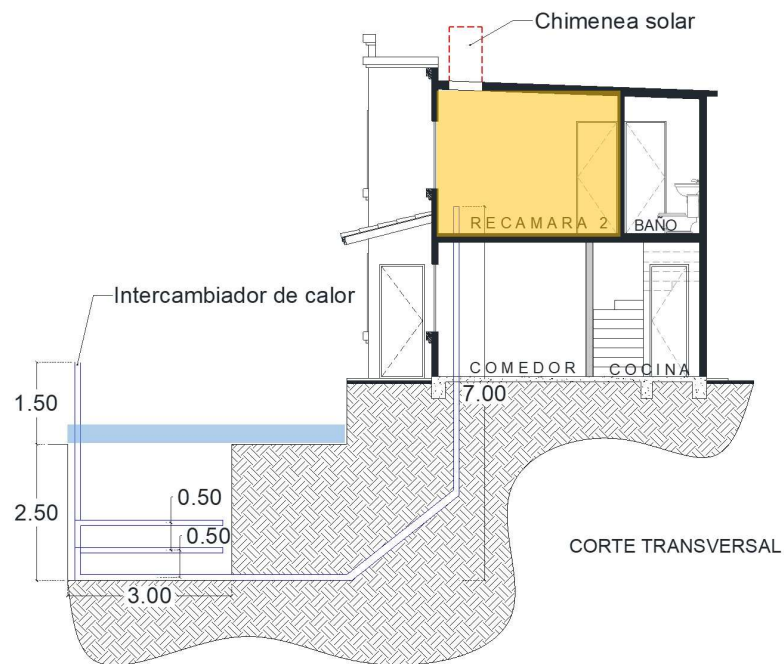
*Áreas de estudio en vivienda prototipo IC/CS-01.*





**Figura 40**

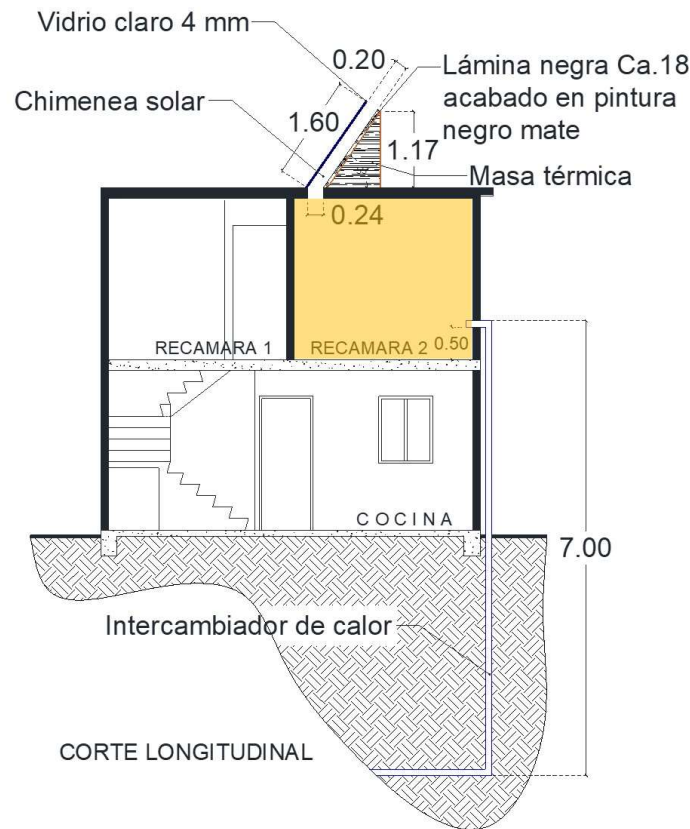
*Sección transversal del sistema IC/CS-01.*



Por su parte, la chimenea solar consiste en una superficie de vidrio claro de 4 mm de espesor y un elemento de 3 caras de lámina negra Ca.18, con dos funciones: aumentar la temperatura del aire para propiciar la ventilación por estratificación térmica, y la otra, aportación de iluminación natural al espacio interior; las dimensiones consideradas fueron 1,60 de longitud, 0,60 m de ancho y 0,20 m de espesor entre el vidrio y la lámina; todo el dispositivo se orientó al Sur, (Figura 41) con una inclinación de 55°, para el máximo aprovechamiento de la incidencia solar a lo largo del año, y en particular, en invierno, que es cuando se acentúa con mayor frecuencia las condiciones de sobrehumedad en el ambiente.

## Figura 41

### Dimensionamiento de chimenea solar del IC/CS-01.



La disposición de la chimenea solar se realizó en la cubierta del espacio experimental y atendió los siguientes criterios para su ubicación:

- Inclinación: Característica definida por el ángulo de altura solar alcanzada al mediodía solar durante invierno. Para ello, la ecuación lineal empleada para definir la inclinación de la superficie acristalada, es la siguiente:

$$\text{Invierno:} \quad 90^\circ - \text{Latitud} - 23,45^\circ$$

Donde:

$90^\circ$  = Constante de la perpendicularidad del Sol, respecto a la superficie incidente

Latitud= Latitud del sitio de estudio expresado en decimales y con el signo correspondiente: Norte (+), Sur (-)

$23,45^\circ$  = Valor constante que representa la inclinación de la Tierra, el cual se da a partir del ángulo formado entre el Ecuador y el plano de la eclíptica

En este caso, el ángulo de inclinación obtenido para la superficie acristalada fue:

$$\text{Invierno:} \quad 90^\circ - 31,91^\circ - 23,45^\circ = 34.66^\circ$$

$$90^\circ - 34,64^\circ = 55,36^\circ \rightarrow 55^\circ$$

- b) Orientación: Característica dada por el ángulo de azimut que logra la posición del Sol al mediodía solar. Este es equivalente a  $0^\circ$  y define la dirección franca al Sur verdadero (en el hemisferio Norte), con el fin de exponer la mayor cantidad de tiempo a la superficie acristalada durante el recorrido aparente del Sol diario.

Para un máximo aprovechamiento de la incidencia solar en la chimenea solar y evitar pérdidas por la noche, se colocó un sistema aislante en la parte posterior de la chimenea solar, el cual consistió en una capa de Foamular de 2" forrada por un cajón de madera el cual, a su vez, cumplió la función de darle rigidez a la estructura de lámina negra. La selección de estos materiales se debió a su inercia térmica y a su fácil adquisición.

Con respecto al criterio de hermeticidad que se consideró durante el diseño del sistema, ésta se logró por medio de diversas acciones: el cambio de ventana de aluminio natural y vidrio claro existente por una de vinil con doble acristalamiento, la colocación de cinta aislante alrededor del marco de la puerta y un guardapolvo en la parte inferior de la puerta para evitar infiltraciones y exfiltraciones, y una operación restringida de la puerta de acceso al espacio (sólo se abría y cerraba durante los momentos de acceso y salida del usuario, el resto del tiempo permaneció cerrada para favorecer la hermeticidad esperada en cuanto a humedad relativa y temperatura), así como una nula operación de la ventana. Con respecto a la operación restringida de la puerta, se llevó a cabo el registro de aperturas a través de una bitácora mensual para tener una relación de las variaciones en los datos registrados y una posible afectación en el funcionamiento del sistema.

### 3.7.1 Proceso constructivo

La excavación se realizó mediante equipo mecánico con retroexcavadora con pala de 0,60 m; el material excavado fue granito. Por limitaciones en el terreno y el alcance máximo de la retroexcavadora, la excavación llegó hasta el límite de la vivienda, antes del pasillo de servicio. El fondo de la excavación se compactó con bailarina, mientras que el relleno cada 20 cm se hizo de manera manual, así como la compactación de cada capa hasta llegar a un nivel de 1,00 m lo que permitió utilizar bailarina sin dañar la tubería instalada (Figura 42).

El intercambiador de calor es un sistema de serpentín, en tres niveles, de circuito abierto, construido a base de tubería de PVC de 0,10 m. Los tres niveles del intercambiador se encuentran a cada 0,50 m de separación entre cada uno, ubicando el primer nivel a 1,50 m de profundidad, por lo que los dos niveles restantes quedaron a la profundidad de 2,00 y 2,50 m, respectivamente (Figura 43).

A la tubería se le dio la pendiente mínima de 2% para dirigir el agua generada por condensación mediante un sistema de dren, mediante puntos de desagüe en la parte más baja en cada una de las profundidades; el sistema de dren fue hecho a base de manguera de plástico de 1/4" con un hule en el punto de salida y un cedazo de tela en el otro extremo para evitar que se obstruya con la tierra, colocado en una porción de grava por debajo del nivel de la tubería (

Figura 44).

## Figura 42

*Proceso de excavación.*



*Nota. Izquierda. Excavación por medios mecánicos. Centro. Excavación en zona de pasillo. Derecha.*

Proceso de compactación mecánica

## Figura 43

*Construcción de intercambiador.*

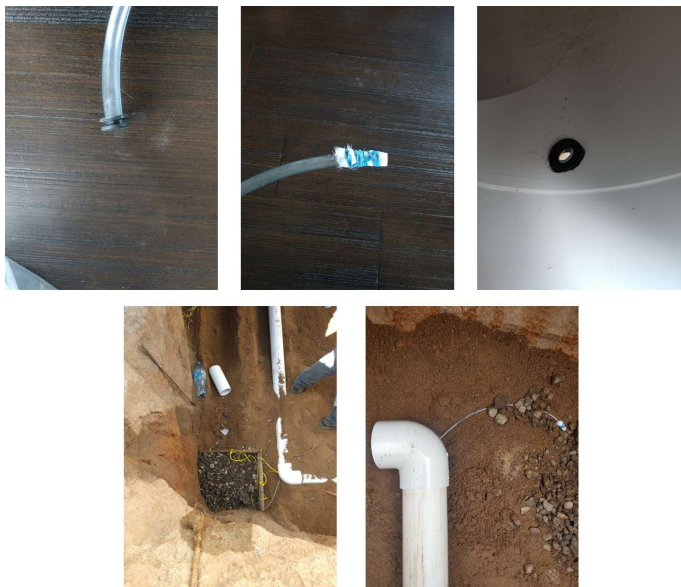


*Nota. Intercambiador a tres profundidades: izq. A 2,50 m. centro. A 2,00 m. der. A 1,50 m.*



## Figura 44

### Sistema de dren.



*Nota. Arriba izq. Conexión de hule. Arriba centro. Cedazo. Arriba der. Conexión de manguera en lecho bajo de ducto de PVC. Abajo izq. Porción de grava para absorción de agua. Abajo der. Vista aérea del sistema de dren.*

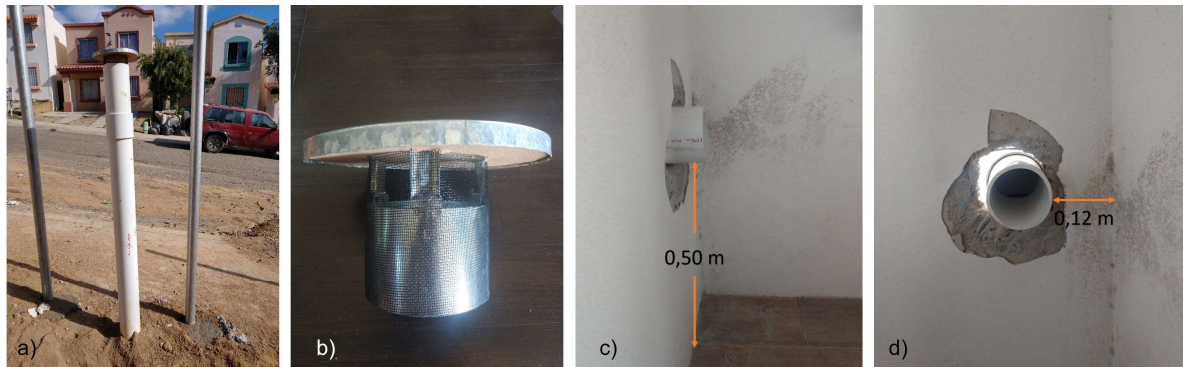
La entrada del intercambiador se ubicó a 1,40 m sobre el nivel de banquetta, y se le colocó un dispositivo para protección contra la lluvia, hecho de lámina galvanizada. Para evitar el ruido originado por la lluvia al caer sobre el dispositivo de lámina, se colocó aislante a base de corcho por debajo de la cubierta, además se consideró protección contra insectos, al colocar tela mosquitera alrededor del protector; de igual manera, la tela mosquitera se colocó a la salida del intercambiador para asegurar la protección contra insectos dentro del intercambiador desde ambos sentidos. La salida del intercambiador se ubicó en la pared norte de la recámara de estudio a 0,50 m del nivel de piso terminado y a 0,20 m de la pared este, debido a la disponibilidad de espacio y accesibilidad (Figura 45)

El trayecto de la tubería entre la salida del sistema al nivel de suelo y la entrada en la recámara, fue aislado por medio de un cajillo de tres caras con hoja de poliestireno extruido Marca Owens Corning Modelo Foamular 250 de 2" y espuma de poliuretano

expandido, con el fin de mantener, en la medida de lo posible, las características higrotérmicas logradas con el sistema. Adicionalmente, el asilamiento se reforzó con un cajillo de triplay marino de  $\frac{3}{4}$ " para proteger el material aislante de aves y animales detectados en la zona (Figura 46).

**Figura 45**

*Entrada y salida de intercambiador.*



*Nota.* a) Entrada del intercambiador. b) Dispositivo para lluvia y protección contra insectos. c) Altura de la salida con respecto a nivel de piso terminado. d) Separación de salida con respecto al muro este.

**Figura 46**

*Intercambiador de calor - trayecto vertical.*



*Nota.* Izquierda. Ducto vertical sin aislar. Centro. Ducto con sistema de aislamiento. Derecha. Cajillo de triplay para protección



La chimenea solar se fabricó con lámina negra calibre 18 doblada para evitar, en la medida de lo posible, puntos de infiltración. La finalidad de utilizar dicho material se debió a que tiene la facilidad de ser pintado, acabado necesario para el funcionamiento de la chimenea. En la parte inferior de la chimenea se le colocaron cuatro cejas para poder fijarla a la cubierta, además, la parte superior se diseñó de tal manera, que tuviera protección contra la lluvia, dejando la abertura de salida en posición vertical. La abertura se generó lo más céntrico posible de la cubierta, con el fin de evitar dañar elementos estructurales e instalaciones eléctricas, y se realizó con bafer con una dimensión de 0,20 x 0,60 m (Figura 47).

El dispositivo se fijó a la cubierta mediante taquete expansor, tornillo de 2" y rondana con hule. Se aplicó una capa de impermeabilizante Zahori Adhecold al momento de unir el dispositivo a la cubierta y otra sobre las cejas del dispositivo, con el fin de evitar infiltraciones pluviales. Como acabado se le colocó primer anticorrosivo color transparente y pintura negro mate.

**Figura 47**

*Construcción de chimenea solar.*



*Nota. Izquierda. Construcción de chimenea solar. Centro. Instalación de chimenea solar en cubierta.*

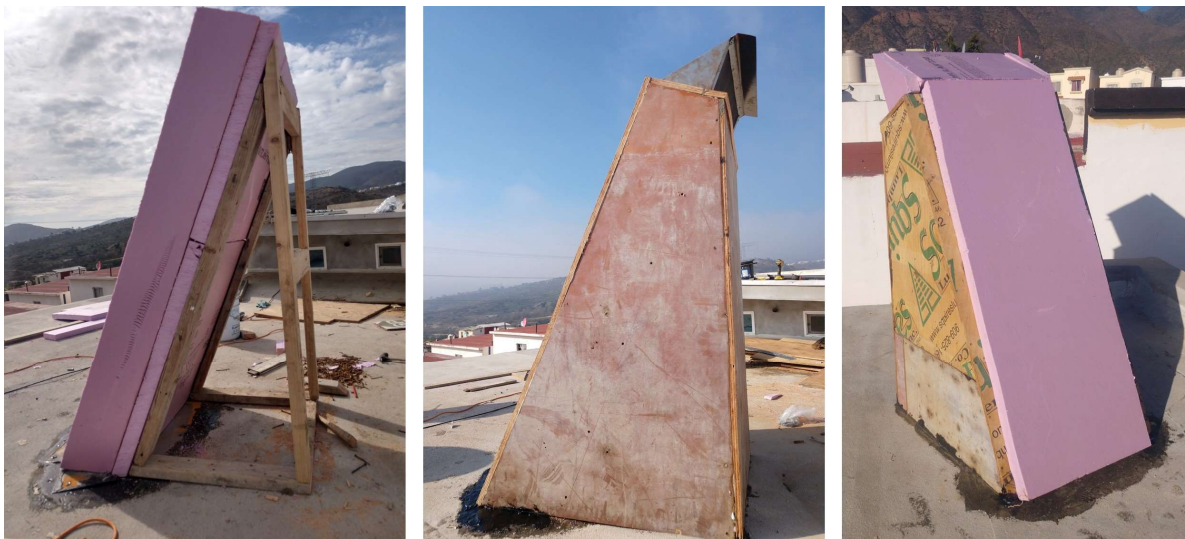
*Derecha. Abertura en cubierta.*

Como parte de las recomendaciones analizadas en investigaciones similares, a la chimenea solar se le colocó una capa de aislamiento a base de poliuretano expandido de 2" de espesor y se cubrió todo el dispositivo con triplay marino de  $\frac{3}{4}$ " de espesor, lo que permitió crear una cámara de aire entre el triplay y el aislante para que permitiera mantener mayor tiempo la temperatura de la lámina negra alcanzada durante el día (Figura 48).

Con el fin de verificar el funcionamiento individual del intercambiador de calor, se cubrió, por un periodo de una semana, la chimenea solar en su superficie acristalada y sus zonas de lámina expuestas directamente a la radiación solar, con el fin de evitar cualquier tipo de ganancia térmica que generara el efecto termosifón que, por convección, promoviera el movimiento de las masas de aire interiores del espacio.

**Figura 48**

*Aislamiento de chimenea solar.*



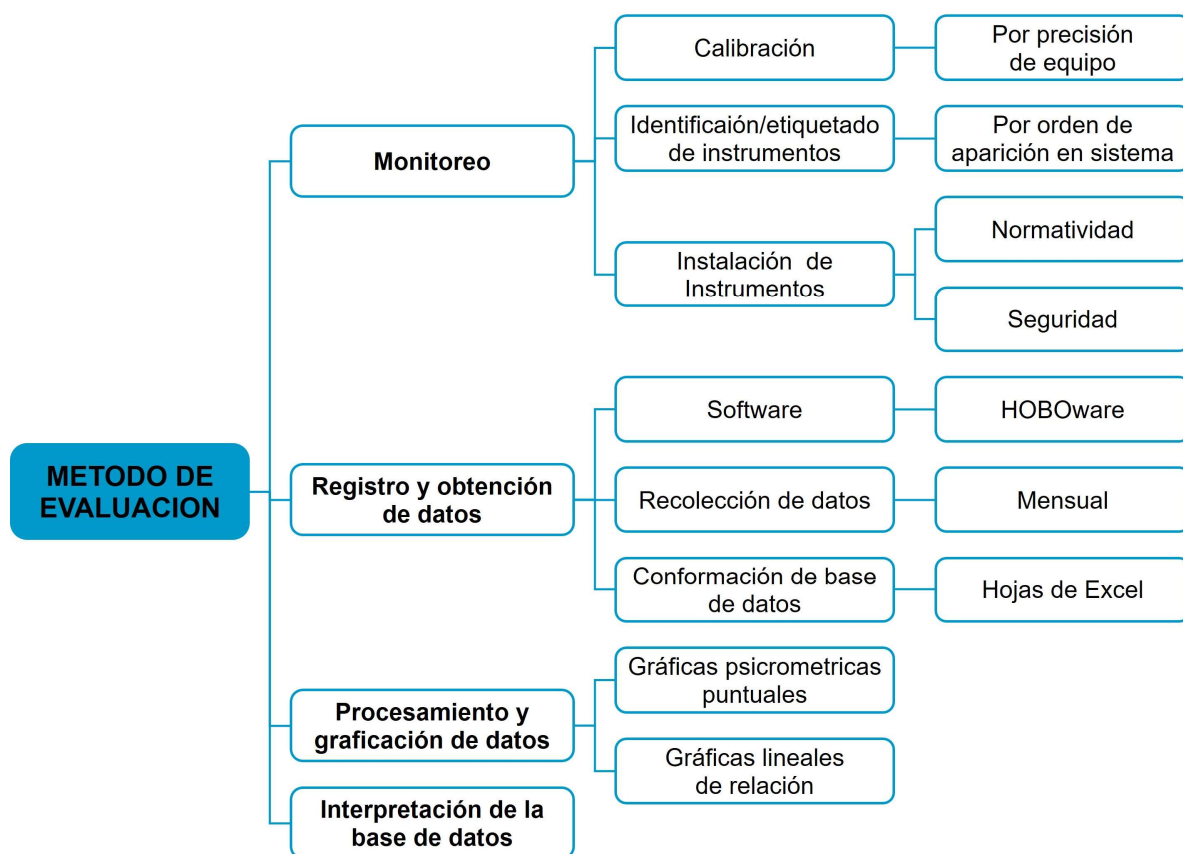
*Nota. Izquierda. Capa de poliuretano y armazón de madera. Centro. Recubrimiento de chimenea solar a base de madera. Derecha Aislamiento para prueba de funcionamiento.*

## 4 MONITOREO, REGISTRO Y PROCESAMIENTO DE DATOS

A continuación, se presenta el método que se utilizó para la evaluación del sistema, el cual inicia en el proceso de monitoreo y concluye con la interpretación de la base de datos (Figura 49), posteriormente se describe de manera detallada todo el proceso.

**Figura 49**

*Esquema del proceso de evaluación del sistema.*



## 4.1 Monitoreo de variables

### 4.1.1 Instrumentos de referencia

Para identificar y establecer los instrumentos de referencia, con el objetivo de contar con una base de datos Clase 1, al considerar las características técnicas de los instrumentos para el procesamiento de datos con el fin de dar solidez a la base de datos, se llevó a cabo la identificación de los valores de corrección de los sensores respecto al sensor de referencia.

El proceso consistió en la colocación de los sensores en un mismo espacio y con las mismas condiciones ambientales; por las características del espacio disponible para realizar dicho proceso, los instrumentos no se pudieron colocar al centro geométrico del espacio, sin embargo, se procuró que quedaran separados de las superficies de muro por lo menos 1,0 m. La distancia de los sensores S-TBH, TMCx-HD y los data loggers HOBO U-12-012 y 013 al nivel de piso terminado fue de 2,15 m y al techo fue de 1,15 m, y para los sensores T-DCI-F300-1A3 la altura con respecto al nivel de piso terminado fue de 1,35 m, la separación del primer sensor con respecto al muro fue de 1,0 m y la separación entre ellos de 8,5 cm (Figura 50). El periodo de registro se programó a cada diez minutos y se llevó a cabo por 24 horas. Con dichas especificaciones se cumplió con la normativa ISO 7726 referente a las características de instalación de instrumentos de medición.

**Figura 50**

*Proceso de diagnóstico de instrumentos.*



*Nota. Izquierda. Separación y alturas de sensores. Derecha. Separación entre sensores de viento*

Para determinar los valores de corrección, se consideró al sensor S-TBH-002 como sensor de referencia para las variables de temperatura y humedad relativa ya que, al analizar las especificaciones técnicas de cada tipo de sensor, las cuales se muestran en la Tabla 10, este modelo contó con la mayor precisión de las mediciones, siendo de  $\pm 0,21$  °C para la temperatura y de  $\pm 2,5$  % para humedad relativa.

**Tabla 10**

*Especificaciones técnicas de instrumentos de medición.*

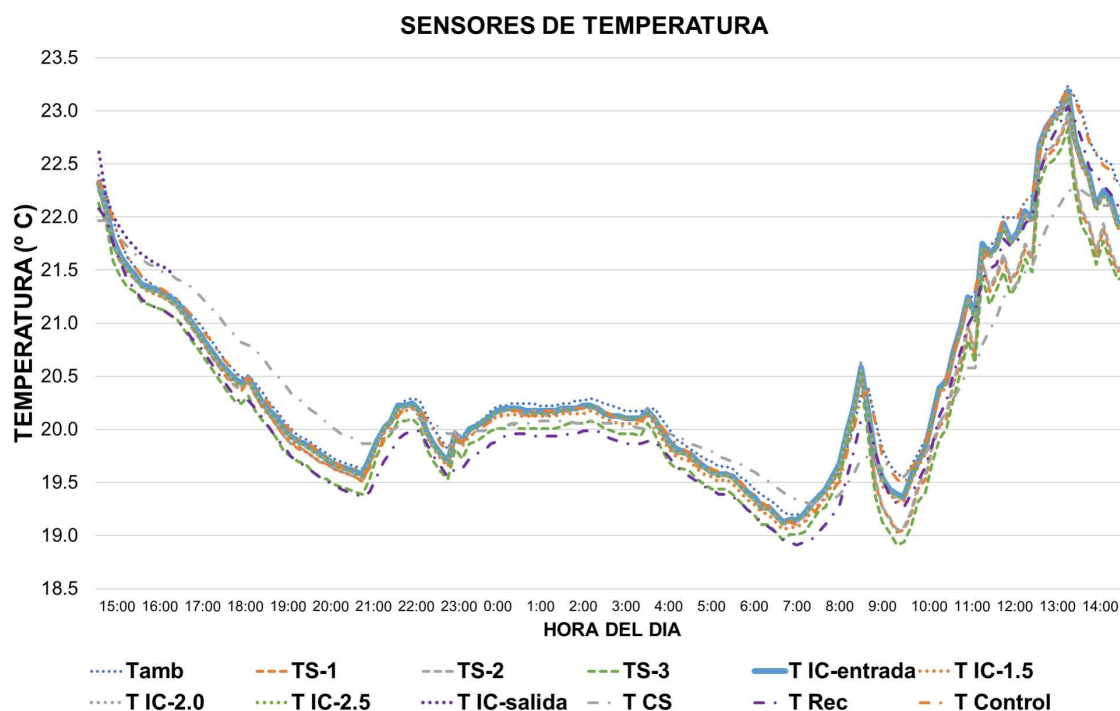
| Instrumento                  | Variable                         | Rango                                             | Precisión                                                                  | Resolución      |
|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| HOBO Onset<br>U12-012 / -013 | Temperatura                      | -20 °C a 70 °C                                    | $\pm 0,35$ °C en rango de 0 °C a 50 °C                                     | 0,03 °C a 25 °C |
|                              | Humedad relativa                 | 5 % a 95 %                                        | $\pm 2,5$ % en rango del 10 % al 90 %, $\pm 5$ % en rangos <10 % o > 90 %  | 0,05 %          |
|                              | Intensidad lumínica              | 1 a 3,000 lumens/ft <sup>2</sup>                  | n/a                                                                        | n/a             |
| T-DCI-F300-1A3               | Velocidad de viento              | 0,15 a 1,0 m/s                                    | $\pm 1$ % en lecturas + 0.05 m/s                                           | n/a             |
| TMCx-HD                      | Temperatura de aire/ agua/ suelo | -40 °C a 50 °C en agua<br>-40 °C a 100 °C en aire | $\pm 0,25$ °C de 0 °C a 50 °C<br>sonda 2,3 cm (0,9 pulgadas)               | 0,03 °C a 20 °C |
| S-THB-M002/008               | Temperatura                      | -40 °C a 75 °C                                    | $\pm 0,21$ °C en rango de 0 °C a 50 °C                                     | 0,02 °C a 25 °C |
|                              | Humedad relativa                 | 0 % a 100 %                                       | $\pm 2,5$ % en rango del 10 % al 90 %, $\pm 5$ % en rangos < 10 % o > 90 % | 0.1 %           |
| Micro-estación H21-USB       | Registrador                      |                                                   | 0 a 2 s para primer dato<br>$\pm 5$ s por semana a 25 °C                   | n/a             |

Como resultado del proceso de diagnóstico, en la variable de temperatura se observó que el periodo de estabilización de los sensores tuvo una duración de 20 minutos y la diferencia de registro con respecto al sensor de referencia, denominado T-IC-Entrada, fue menor a 0,24 °C en todos los sensores (Figura 51); en la Tabla 11 se muestran los valores de corrección por sensor.



**Figura 51**

*Gráfica de sensores de temperatura.*



**Tabla 11**

*Valores de corrección para sensores de temperatura.*

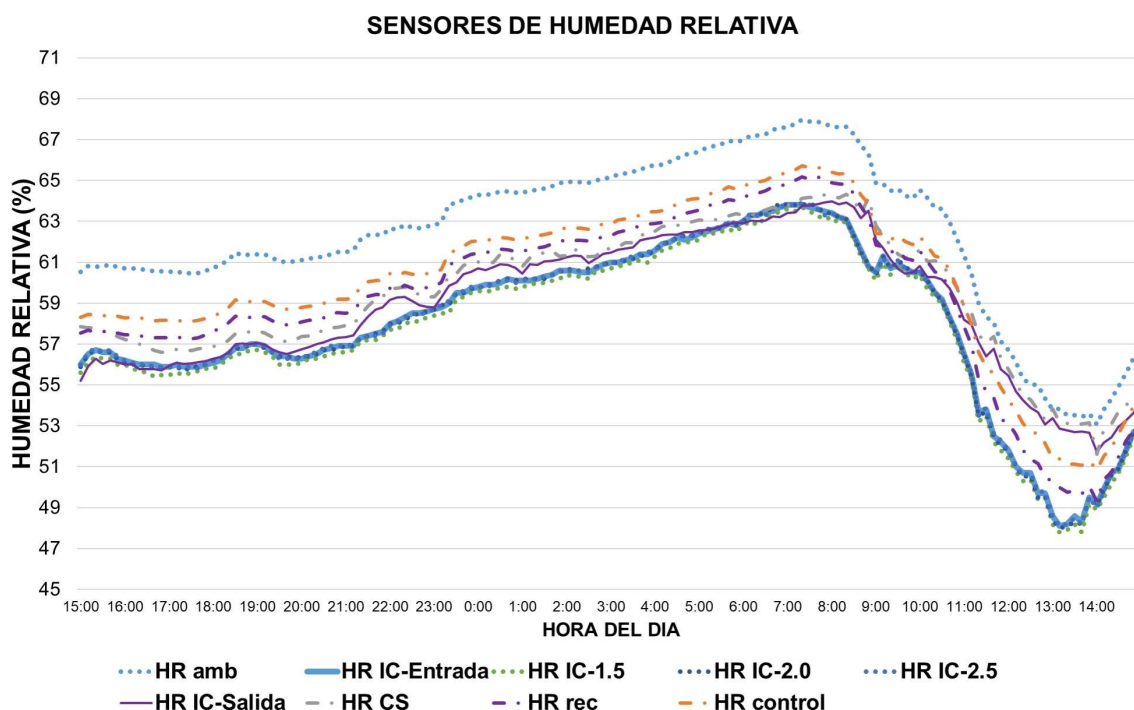
| Sensor      | Corrección |
|-------------|------------|
| Tamb        | -0,0771    |
| TS-1        | 0,1070     |
| TS-2        | 0,0953     |
| TS-3        | 0,2372     |
| T IC-1.5    | 0,0500     |
| T IC-2.0    | 0,0188     |
| T IC-2.5    | 0,0192     |
| T IC-salida | 0,0149     |
| T CS        | 0,0270     |
| T Exp       | 0,1804     |
| T Control   | -0,0345    |



Respecto a los sensores de humedad relativa, la estabilización se presentó de igual manera a los 20 minutos, con un rango máximo de diferencia de 4,40 % entre el de HR del ambiente y el sensor de referencia HR-IC-entrada (Figura 52); en la Tabla 12 se muestran los valores de corrección para cada sensor de HR.

**Figura 52**

*Gráfica de sensores de humedad relativa.*



**Tabla 12**

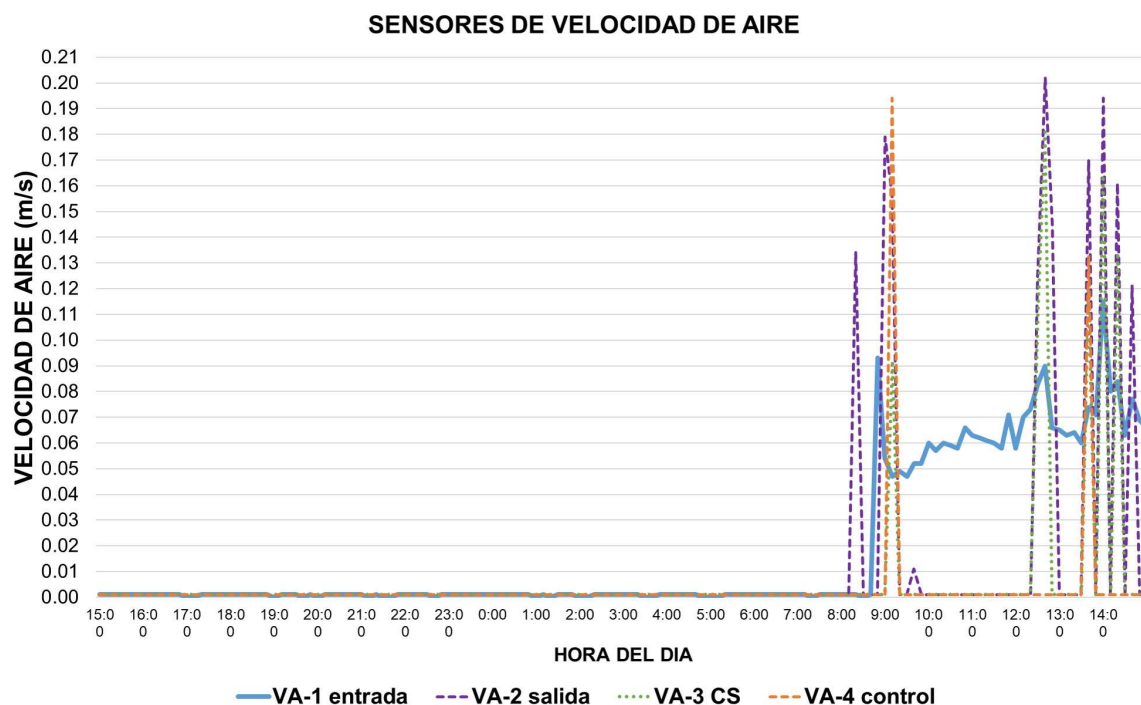
*Valores de corrección para sensores de humedad relativa.*

| Sensor       | Corrección |
|--------------|------------|
| HR amb       | -4,4066    |
| HR IC-1.5    | 0,2832     |
| HR IC-2.0    | 0,0126     |
| HR IC-2.5    | -0,0133    |
| HR IC-salida | -0,8704    |
| HR CS        | -1,3940    |
| HR Rec       | -1,3290    |
| HR Control   | -2,0954    |

En el caso de los sensores de velocidad de aire, al ser todos del mismo modelo se consideró el sensor designado VA-2 como el de referencia, ya que al momento de analizar la gráfica de diagnóstico se observó que el sensor VA-1 presentó variaciones con respecto a los otros tres, debido probablemente a la ubicación de las ventanas en el espacio utilizado lo que causó mayores turbulencias en el sensor próximo a la pared (Figura 53). Por lo tanto, se llevó a cabo un nuevo proceso de con el equipo instalado, en el que se comparó la velocidad registrada por el sensor VA-1 ubicado a la entrada del IC con el sensor VA-2 ubicado a la salida del mismo, para determinar la proporción entre ellos, ya que entre el sensor VA-2 y los otros dos, la gráfica si presentó un comportamiento regular por lo que se pudo determinar los valores de corrección de dichos sensores, los cuales quedaron por debajo de 0,0087; en la Tabla 13 se muestran los valores para cada sensor de velocidad de aire.

**Figura 53**

*Gráfica de sensores de velocidad de aire.*



**Tabla 13**

*Valores de corrección para sensores de velocidad de aire*

| Sensor       | Corrección |
|--------------|------------|
| VA-1 entrada | -0,0060    |
| VA-3 CS      | 0,0065     |
| VA-4 control | 0,0087     |

#### 4.1.2 Etiquetado de sensores y data loggers

La identificación de los sensores se dio por el orden de aparición con respecto al recorrido del sistema y por el tipo de mediciones. Los registradores se etiquetaron con la clave del sistema y un número de identificación IC-CS-# (Intercambiador de Calor-Chimenea Solar-número de identificación). Cada sensor se identificó por el tipo de variable, zona de medición y orden de aparición. Los sensores de temperatura de suelo se etiquetaron con TS-# (Temperatura de Suelo-número de identificación); los sensores S-TBH ubicados en el intercambiador de calor, se etiquetaron con IC-TEMP/HR-#-POSICION (Intercambiador de Calor-Temperatura o Humedad Relativa-orden dentro del intercambiador-posición o profundidad en el intercambiador); la organización se muestra en la Tabla 14.

Debido a que la variable de la velocidad del aire es la de mayor intermitencia, el intervalo de registro se programó a cada cinco minutos, siendo en el caso de las variables higrotérmicas, valores puntuales, mientras que la velocidad del aire se consideró un promedio de las mediciones a cada segundo.

#### 4.1.3 Ubicación y fijación de sensores.

En la vivienda prototipo se colocaron sensores de viento en la entrada y salida del intercambiador, así como en la salida de la chimenea solar. Los sensores de temperatura y humedad relativa se colocaron en la entrada y salida del intercambiador, tres más a las profundidades de 1,5 m, 2,0 m y 2,5 m, para observar la variación de dichos rangos en cada nivel del serpentín; en el centro de la recámara, y un sensor de temperatura en la chimenea solar.

**Tabla 14**

*Etiquetado de sensores y data loggers*

| Equipo       | Clave de registrador | Ubicación            | Sensor         | Variable                | Clave de variable | Intervalo           | Posición en sistema |
|--------------|----------------------|----------------------|----------------|-------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| Hobo U12-013 | IC-CS-1              | Patio exterior       | T-DCI-F300-1X3 | Velocidad de aire (m/s) | VA-1              | 5 min – prom. @ 1 s | Entrada IC          |
|              |                      |                      | TMC20-HD       | Temperatura (°C)        | TS-2              | 5 min               | Suelo - 2,0         |
| Hobo U12-013 | IC-CS-2              | Patio exterior       | TMC20-HD       | Temperatura (°C)        | TS-1              | 5 min               | Suelo - 1,5         |
|              |                      |                      | TMC20-HD       | Temperatura (°C)        | TS-1              | 5 min               | Suelo - 2,5         |
| Hobo U12-012 | IC-CS-3              | Espacio experimental | T-DCI-F300-1X3 | Velocidad de aire (m/s) | VA-2              | 5 min – prom. @ 1 s | Salida IC           |
|              |                      |                      | Integrado      | Temperatura (°C)        | IC-TEMP-05-SALIDA | 5 min               |                     |
|              |                      |                      | Integrado      | Humedad Relativa (%)    | IC-HR-05-SALIDA   | 5 min               |                     |
| Hobo U12-012 | IC-CS-4              | Espacio experimental | T-DCI-F300-1X3 | Velocidad de aire (m/s) | VA-3              | 5 min – prom. @ 1 s | Chimenea solar      |
|              |                      |                      | Integrado      | Temperatura (°C)        | CS-TEMP-01        | 5 min               |                     |
|              |                      |                      | Integrado      | Humedad Relativa (%)    | CS-HR-01          | 5 min               |                     |
| Hobo U12-012 | IC-CS-5              | Espacio de control   | T-DCI-F300-1X3 | Velocidad de aire (m/s) | VA-4              | 5 min – prom. @ 1 s | Control             |
|              |                      |                      | Integrado      | Temperatura (°C)        | TEMP INT-02       | 5 min               |                     |
|              |                      |                      | Integrado      | Humedad Relativa (%)    | HR INT-02         | 5 min               |                     |

| Equipo                 | Clave de registrador | Ubicación            | Sensor        | Variable             | Clave de variable  | Intervalo | Posición en sistema |
|------------------------|----------------------|----------------------|---------------|----------------------|--------------------|-----------|---------------------|
| Hobo U12-012           | IC-CS-6              | Exterior             | Integrado     | Temperatura (°C)     | TEMP EXT-01        | 5 min     | Ambiente exterior   |
|                        |                      |                      | Integrado     | Humedad Relativa (%) | HR EXT-01          | 5 min     |                     |
| Hobo U12-012           | IC-CS-7              | Espacio experimental | Integrado     | Temperatura (°C)     | TEMP INT-01        | 5 min     | Ambiente interior   |
|                        |                      |                      | Integrado     | Humedad Relativa (%) | HR INT-01          | 5 min     |                     |
| Micro Estación H21 USB | IC-CS-8-MicroE       | Patio exterior       | S-TBH-002/008 | Temperatura (°C)     | IC-TEMP-01-Entrada | 5 min     | Entrada IC          |
|                        |                      |                      |               |                      | IC-TEMP-02-1,5     | 5 min     | IC - 1,5            |
|                        |                      |                      |               |                      | IC-TEMP-03-2,0     | 5 min     | IC - 2,0            |
|                        |                      |                      |               |                      | IC-TEMP-03-2,5     | 5 min     | IC - 2,5            |
|                        |                      |                      |               | Humedad Relativa (%) | IC-HR-01-Entrada   | 5 min     | Entrada IC          |
|                        |                      |                      |               |                      | IC-HR-02-1,5       | 5 min     | IC - 1,5            |
|                        |                      |                      |               |                      | IC-HR-03-2,0       | 5 min     | IC - 2,0            |
|                        |                      |                      |               |                      | IC-HR-03-2,5       | 5 min     | IC - 2,5            |

Además, se colocaron sensores de temperatura de suelo en las tres profundidades analizadas, para corroborar los datos generados por medio de TRNSYS. Mientras que en la vivienda de control se colocó un sensor de temperatura y humedad y uno de velocidad de aire al centro del espacio habitado (Figura 54).

Los sensores de temperatura y humedad del aire dentro del intercambiador, se colocaron en cinco puntos estratégicos (Figura 55):

- En la entrada del sistema;
- al terminar el primer nivel del intercambiador (para observar si hay pérdida de humedad en dicho nivel);
- al terminar el segundo nivel (para observar si hay aumento de temperatura en el primer recorrido);
- en el tercer nivel, antes de empezar a subir a la recámara; y
- a la salida del intercambiador, dentro de la recámara a analizar.

En todos los casos, los sensores se ubicaron al centro geométrico de la sección transversal del tubo de 4".

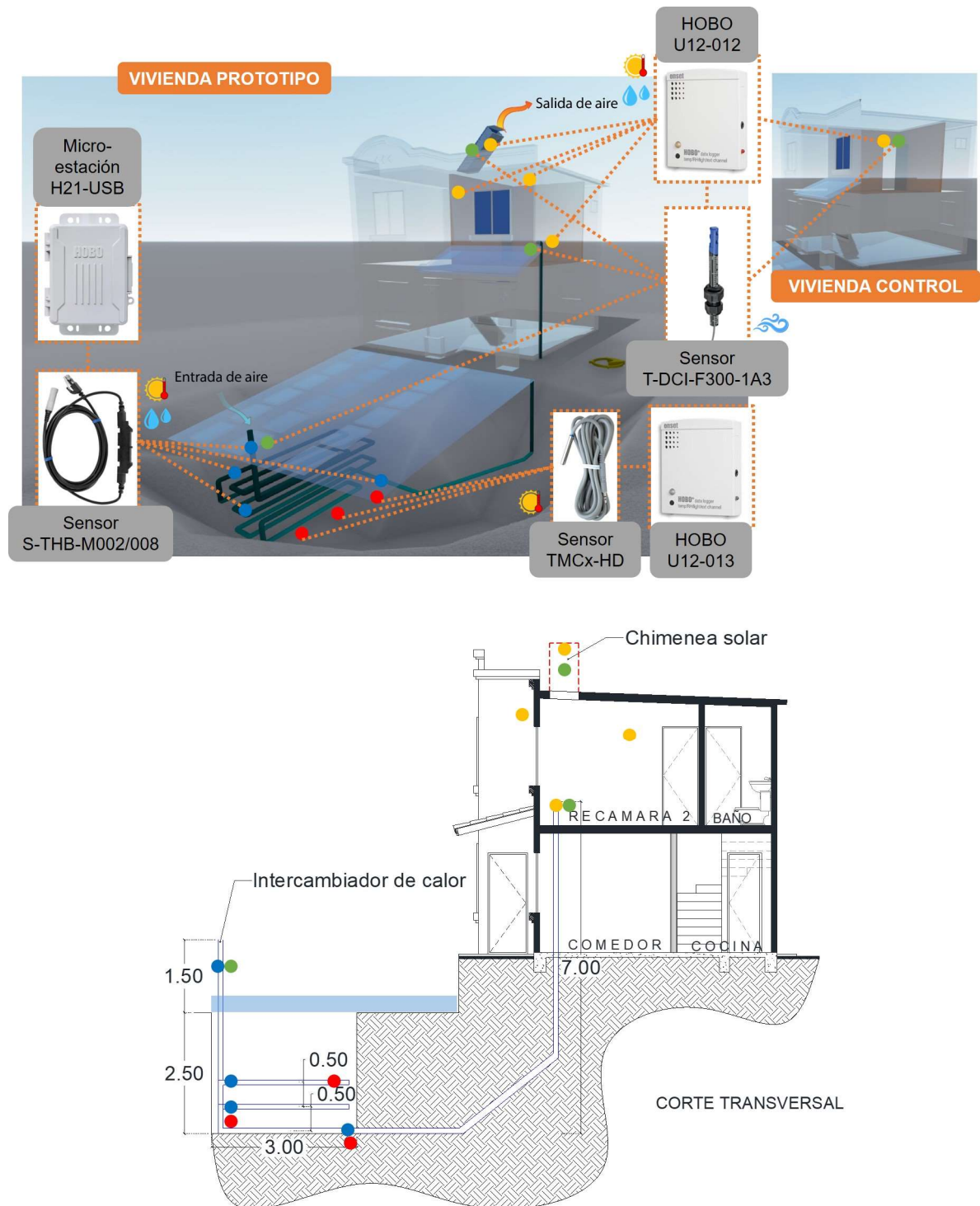
Por su parte, los sensores de temperatura de suelo se colocaron próximos a los sensores higrotérmicos del ducto (Figura 56), a efecto de contar con un referente asertivo respecto a ambas lecturas, con excepción del correspondiente a la profundidad de 1,5 m, el cual, por criterios de longitud del cable, se colocó en el mismo eje que los otros dos sensores.

Para la instalación de los sensores de velocidad de aire en la entrada y salida del intercambiador, se perforó la pared del tubo de PVC con sierra corta-círculos; el sensor se colocó, utilizando el sistema de sujeción integrado en el sensor, de manera que la punta del sensor quedara al centro de la tubería en dirección al flujo de aire.



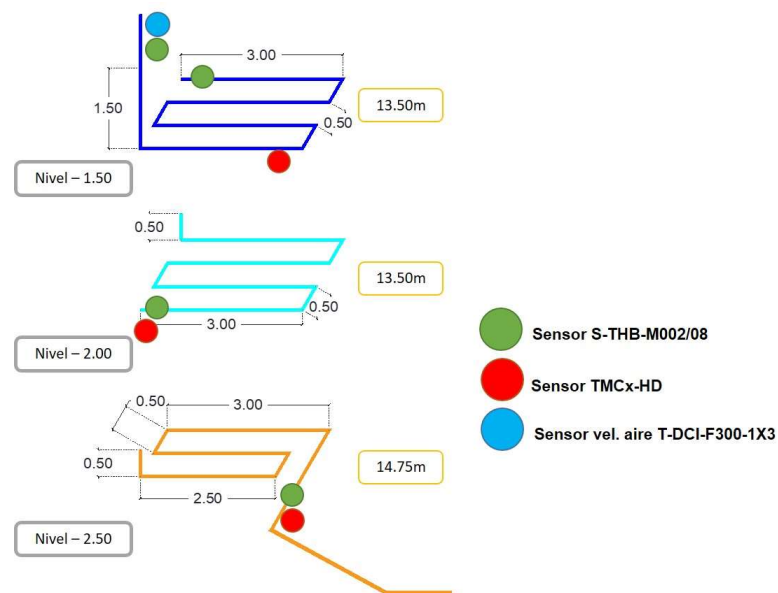
**Figura 54**

*Ubicación de los instrumentos de monitoreo*



**Figura 55**

*Distribución de sensores en IC*



**Figura 56**

*Detalles de instalación de sensores.*

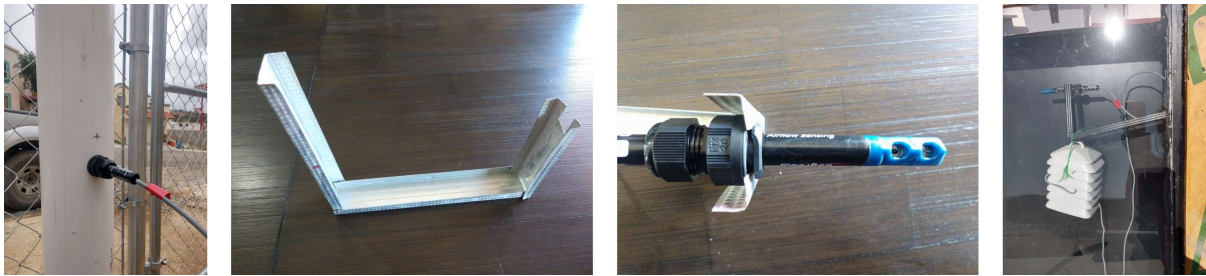


*Nota.* Izquierda. Instalación de sensor de temperatura de suelo. Derecha. Sensor higrótérmico en ducto y de temperatura de suelo.

En el caso del sensor de la chimenea solar, se realizó un soporte de metal que permitió colocarlo en la salida de la chimenea, al centro del espacio, sin que éste genere algún tipo de afectación al mismo sensor. Al igual que con los otros, se utilizó el sistema de sujeción propio del sensor para fijarlo al soporte, y ubicarlo en dirección al flujo del aire (Figura 57).

**Figura 57**

*Detalles de instalación de sensores de velocidad de aire*



*Nota. De izquierda a derecha. Conexión de sensor de aire en entrada de intercambiador. Adaptador para instalación en chimenea solar. Sistema de sujeción del instrumento sujeto al adaptador. Adaptador instalado en chimenea solar.*

Los sensores utilizados para monitorear las condiciones ambientales internas de los espacios, tanto de la vivienda prototipo como la de control, se colocaron al centro de la superficie del espacio y a una altura de 2,00 m sobre nivel de piso terminado, con el fin de promover seguridad a los sensores a partir de la circulación de los usuarios y, a su vez, para que no se percibiera como invasivo a las actividades cotidianas (Figura 58).

**Figura 58**

*Detalle de sensores en espacios habitados*

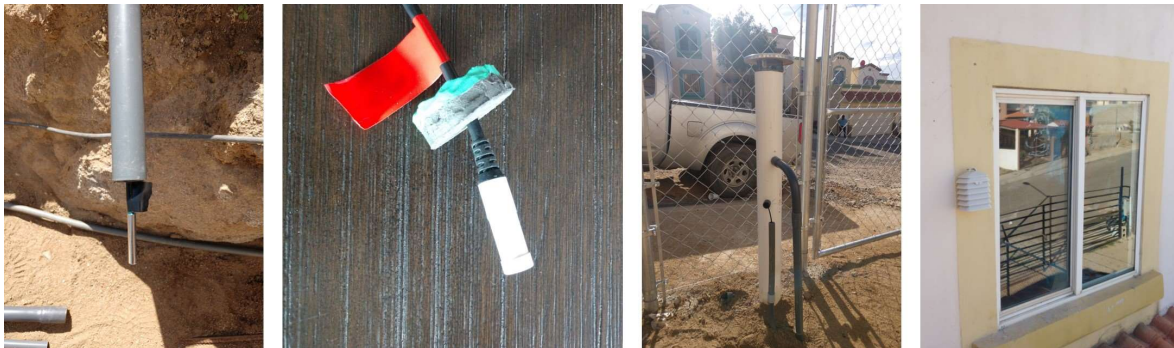


*Nota. Vivienda control. Derecha. Vivienda prototipo.*

Es importante señalar que los sensores higrotérmicos de los ductos, los de temperatura de suelo, y el de velocidad de aire colocado a la entrada del intercambiador, se instalaron en tubería de PVC gris de 1" y ½", para evitar afectaciones al cableado enterrado. Se les colocó, para el caso de los sensores de temperatura y humedad relativa y temperatura de suelo, aislante a base de foam y sellador acrílico siliconizado en la entrada de la tubería para evitar movimientos dentro del tubo e infiltración de aire; y en el caso del sensor de velocidad de aire, solo se aplicó el silicón en la junta de la tubería de PVC gris de 1" con la tubería de PVC de 0,10 m. Además, al datalogger utilizado para monitorear las condiciones exteriores, se le colocó una protección contra radiación solar directa, ya que, de acuerdo con las especificaciones técnicas, podría afectarse el funcionamiento del instrumento (Figura 59).

**Figura 59**

*Detalles de protección de sensores*



*Nota. De izquierda a derecha.* Sensor de temperatura de suelo en tubo de PVC eléctrico. Sensor higrotérmico con aislante. Ubicación de sensor higrotérmico y de aire en entrada de intercambiador. Sensor higrotérmico con protección de radiación solar.

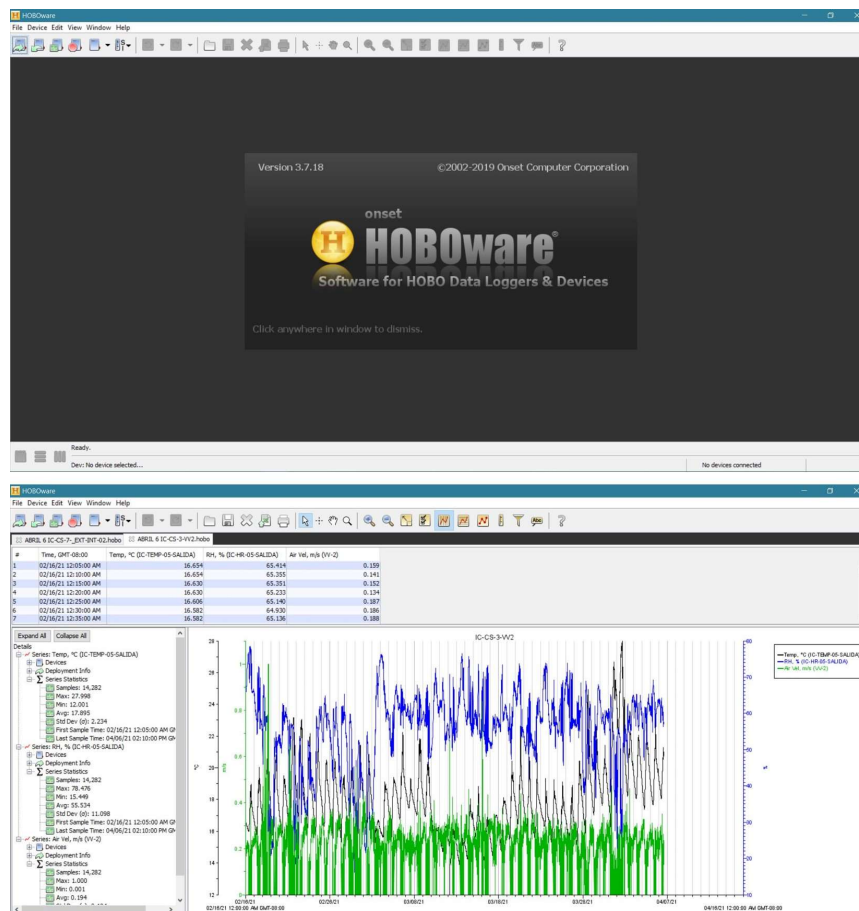


## 4.2 Registro y obtención de datos

El periodo de monitoreo inició el 16 de febrero de 2021. La recolección de datos se efectuó a fin de cada mes. Para ello, se utilizó el software HOBOWare (Onset Computer Corporation, 2019) versión 3.7.18, desarrollado para dispositivos y data loggers de la misma marca (Figura 60), el cual permitió descargar los datos registrados y graficarlos de manera inmediata para observar el comportamiento y funcionamiento de los sensores. Con el software se pueden obtener datos estadísticos de los registros obtenidos, como valores máximos, mínimos o promedios.

**Figura 60**

*Software para obtención de datos*

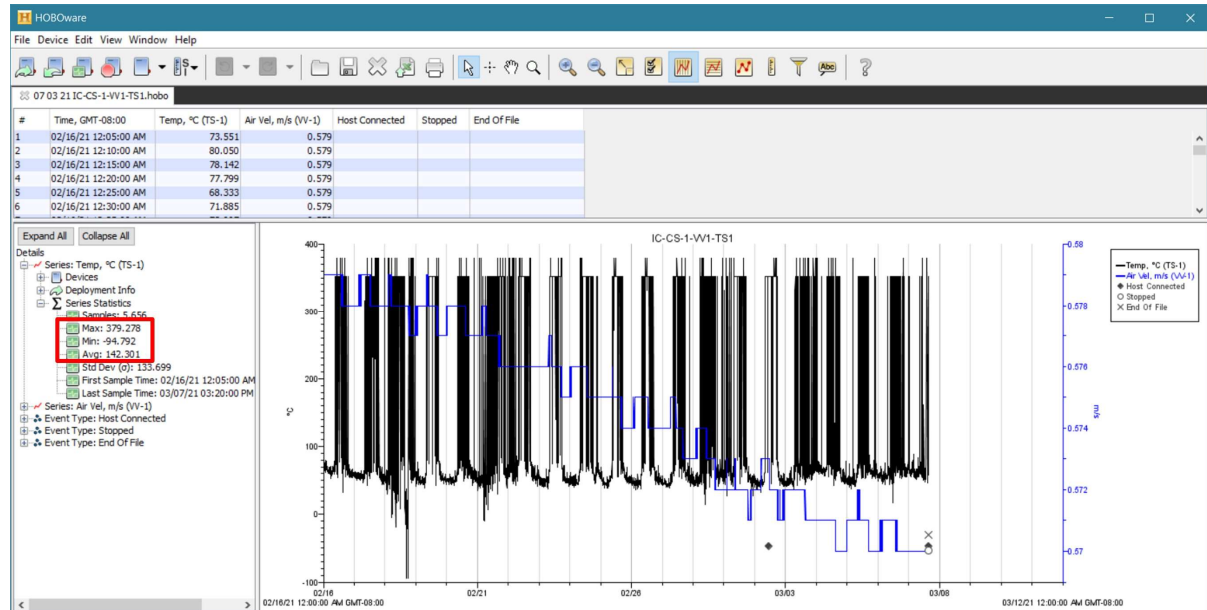


*Nota.* Reproducido de Onset Computer Corporation, 2019 ©. *Arriba.* Pantalla de inicio. *Abajo.* Gráfica preliminar de datos obtenidos

Esto permitió identificar errores como el que se observó con respecto a los sensores de temperatura de suelo, en donde el Sensor TS-1, que corresponde a la temperatura de suelo a profundidad de 1,50 m, registró valores de temperaturas inciertos, máximas de 379,28 °C y mínimas de -94,79 °C (Figura 61). Con dichas revisiones preliminares se pudo llevar a cabo un proceso para determinar las posibles causas del mal funcionamiento: el primer paso fue revisar el estado de las baterías, el segundo fue cambiar las conexiones de los sensores a los data loggers; cada prueba llevo un periodo de un día para determinar si los problemas en el funcionamiento continuaban, cesando al intercambiar la conexión de los sensores TS-2 al data logger IC-CS-01 junto con el sensor VA-1, y los sensores TS-1 y TS-3 en el data logger IC-CS-02 (Figura 62). Por tal motivo, la Tabla 14 (pág. 90) se corrigió con los nuevas conexiones.

**Figura 61**

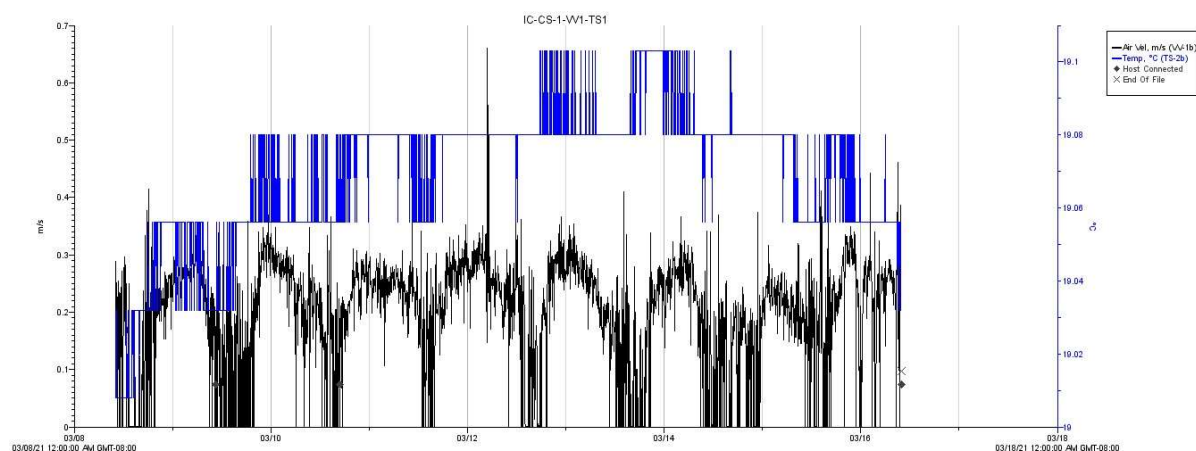
*Gráfica que refleja problemas con sensor TS-1*





**Figura 62**

*Gráfica de sensor TS corregido*



#### 4.2.1 Conformación de la base de datos

La base de datos se realizó en Microsoft Excel®, organizando la información por mes. En cada hoja de cálculo las columnas corresponden a las variables medidas y las filas a los registros obtenidos durante el mes. Las columnas se ordenaron por secciones, primero datos generales: número de registro, fecha y hora; seguido de las temperaturas del suelo (TS-1, TS-2, TS-3) y de los datos del ambiente exterior (Tamb, HR amb) (Tabla 15).

**Tabla 15**

*Organización de base de datos (Sección 1)*

| Reg. | Fecha/Hora | T-suelo |      |      | Ambiente |        |
|------|------------|---------|------|------|----------|--------|
| #    |            | TS-1    | TS-2 | TS-3 | Tamb     | HR amb |

Posteriormente, se presentaron los datos por punto de medición en orden de aparición según el recorrido del intercambiador de calor (IC), seguido de la chimenea solar (CS) (Tabla 16):

- IC-Entrada: T-Ent, HR-Ent, VA-Ent
- IC-1.5: T-1.5, HR 1.5
- IC-2.0: T-2,0, HR 2,0
- IC-2.5: T-2,5, HR 2,5
- IC-Salida: T-Sal, HR-Sal, VA-Sal
- CS: T-CS, HR-CS, VA-CS.

**Tabla 16**

*Organización de base de datos (Sección 2)*

| IC-ENTRADA |        |        | IC-1.5 |        | IC-2.0 |        | IC-2.5 |        | IC-SALIDA |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|--------|--------|
| T-Ent      | HR-Ent | VA-Ent | T 1.5  | HR 1.5 | T 2.0  | HR 2.0 | T 2.5  | HR 2.5 | T-Sal     | HR-Sal | VA-Sal |

Por último, se indicaron las variables correspondientes a las condiciones ambientales del área experimental a la cual se le asignó el tratamiento y del área de control (Tabla 17).

- Area experimental: T-Exp, HR-Exp.
- Control: T-Control, HR-Control, VA-Control

A las columnas correspondientes se les agregó el valor de corrección señalado de acuerdo con la calibración registrada en la Tabla 11 (pág. 86), Tabla 12 (pág. 87) y Tabla 13 (pág. 89) por cada tipo de variable..

**Tabla 17**

*Organización de base de datos (Sección 3)*

| CHIMENEA SOLAR |       |       | ESPACIO EXPERIMENTAL |        | ESPACIO DE CONTROL |            |            |
|----------------|-------|-------|----------------------|--------|--------------------|------------|------------|
| T-CS           | HR-CS | VA-CS | T-Exp                | HR-Exp | T-Control          | HR-Control | VA-Control |

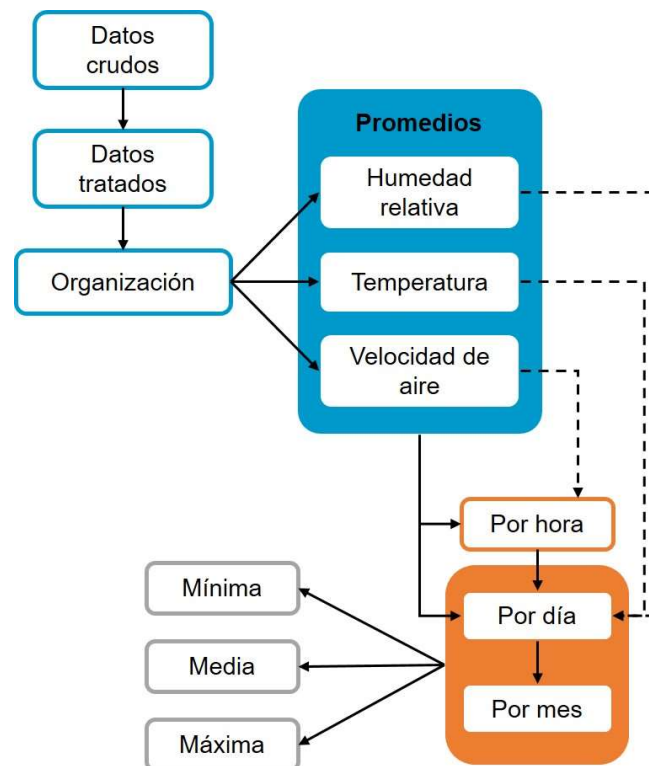
Se realizaron dos bases de datos generales: la primera, con los datos crudos obtenidos en cada mes; y, en la segunda, se le agregó el valor de corrección en cada sensor, obtenido durante el proceso de diagnóstico de los instrumentos.

#### 4.3 Procesamiento de la base de datos

Después de la elaboración de las bases de datos, se procedió a organizar los datos por variable físico-ambiental y calcular los promedios, ya sea por hora o por día de acuerdo al tipo de variable, siendo la HR y la temperatura, por día, y, la velocidad del aire, la única con la que se calcularon promedios por hora. Posteriormente los promedios por mes, de igual manera, se calcula la mínima, media y máxima correspondiente. En la Figura 63 se muestra el diagrama de proceso correspondiente al procesamiento de datos.

**Figura 63**

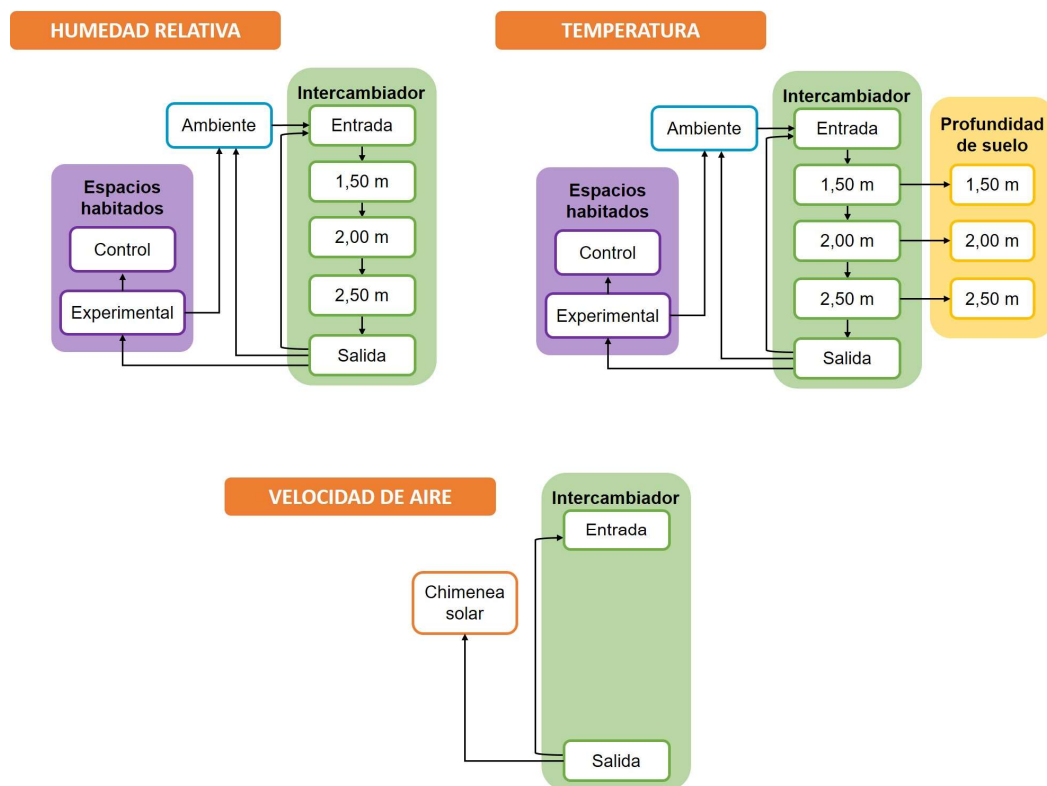
*Diagrama de proceso del procesamiento de datos*



Posteriormente se llevó a cabo el análisis de la relación entre diferentes puntos de análisis, por variable físico-ambiental; para la humedad relativa, se analizó la relación entre el ambiente y la entrada y salida del IC, además se analizó la relación en los cinco puntos principales del intercambiador (entrada, 1,5 m, 2,0 m, 2,5m y salida) así como la relación directa entre la entrada y salida del IC; se consideró, también, la relación entre la salida del IC y el espacio experimental, y de este con el espacio de control y con el ambiente; éstas cuatro últimas, permitieron determinar si el desempeño del sistema era efectivo. Para la variable de temperatura, se consideraron las mismas relaciones que con la humedad relativa, y se incluyeron las temperaturas de suelo a cada profundidad y la relación con las registradas al interior del ducto en las mismas profundidades. Por último, para la velocidad del aire, se consideraron solamente la relación entre la entrada y salida del IC y la relación de este último con la CS. En la Figura 64 se muestran los diagramas de relación por variable ambiental.

**Figura 64**

*Relación de puntos de análisis por variable.*



Con los datos procesados, se crearon gráficas lineales, las primeras se realizaron por variable de estudio, mediante el programa Microsoft Excel®, y, posteriormente, se realizaron gráficas multivariantes, mediante el programa Origin Lab®, con tres ejes verticales correspondientes a las variables de estudio previamente establecidas. Además, se graficaron los datos ambientales, de días y horarios específicos, en la carta psicrométrica, mediante la herramienta Psychrometric Chart de Dr. Andrew J. Marsh ©, esto con el objetivo de identificar si el sistema logra la reducción de humedad absoluta como aspecto fundamental de la deshumidificación.

El total de datos analizados por variable en cada mes son de 8 928 para los meses de enero, marzo, mayo, julio, agosto, octubre y diciembre (meses con 31 días); 8 640 para abril, junio, septiembre y noviembre (meses con 30 días); y de 8 064 para febrero (mes con 28 días), lo que corresponde a 288 mediciones por día.

Sin embargo, para el mes de abril, se consideraron solamente 7 016 mediciones por variable, que corresponden a 24 días del mes; y durante el mes de mayo, fueron 7 442 mediciones por variable, que corresponden a 26 días del mes, esto debido a la pérdida de datos en algunos de los sensores al momento de la recopilación. Además, durante el mes de junio, se tuvieron datos faltantes en el sensor ubicado en la salida del IC, por lo que, en los análisis que se relacionaron con las variables de dicho sensor, se consideraron solamente 5601 registros; sin embargo, todos los demás análisis del sistema se efectuaron con la totalidad de los registros, ya que, aún sin contar con los registros del sensor antes mencionado, el sistema continuó funcionando y, por ende, mantuvo su influencia en el espacio habitado; de igual manera, para el mes de marzo se consideraron 7 384 mediciones correspondientes a 26 días del mes.

La eventual pérdida de datos o la falta de ellos, pudo deberse a diversas situaciones, tales como fallas en el sistema eléctrico, problemas con el funcionamiento de los equipos, por conexiones o cambio de pilas, o por restricciones de acceso a los equipos. En los casos en los que la pérdida de datos corresponde a horas o minutos

de un solo día, se llevó a cabo el tratamiento de los datos mediante la obtención de un valor constante con respecto al valor previo y posterior inmediato.

#### 4.4 Interpretación de la base de datos

La interpretación de los datos obtenidos se llevó a cabo por tipo de variable, por periodos mensuales, para posteriormente realizar el análisis por los cuatro periodos térmicos: 1) frío, que comprende los meses de diciembre a abril; 2) de transición frío-cálido, de mayo a junio; 3) cálido, de julio a septiembre; y 4) de transición cálido-frío, octubre y noviembre; y concluir con el análisis general del desempeño del sistema.

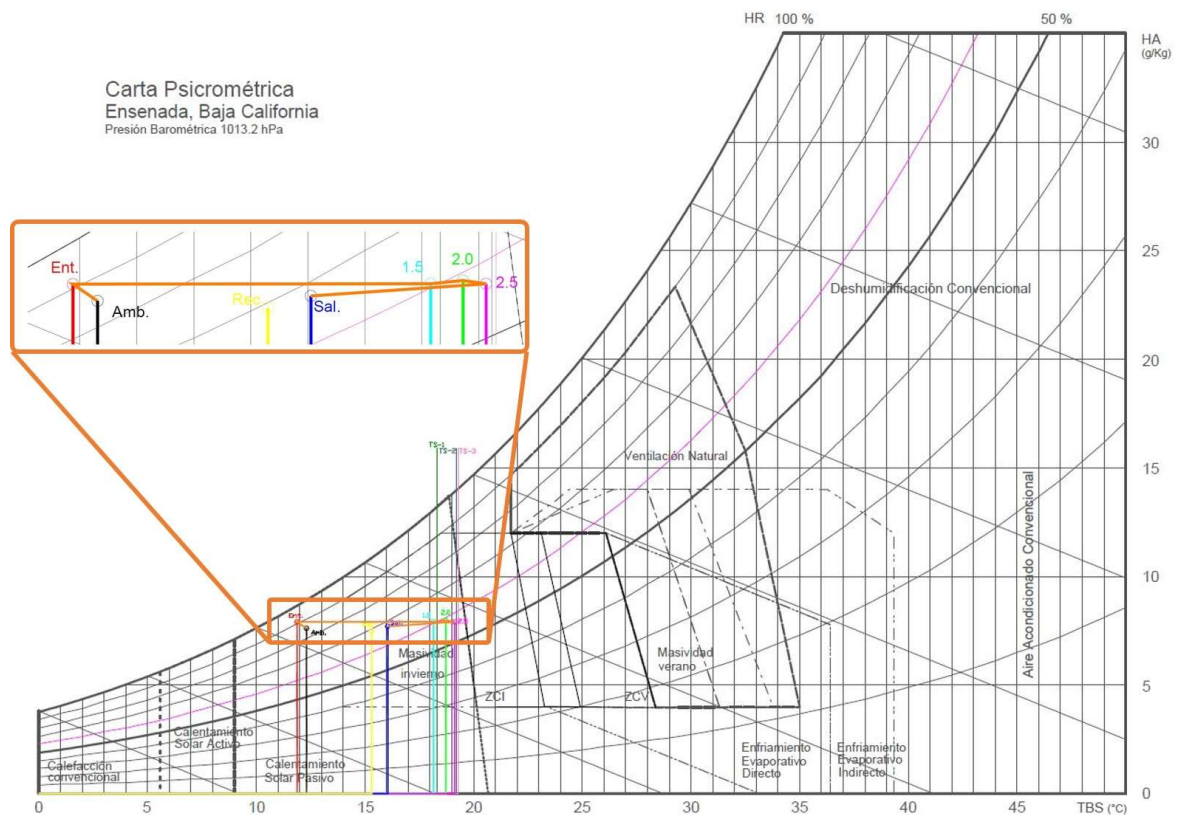
Como primera etapa de la interpretación, los datos obtenidos de temperatura de suelo, condiciones higrotérmicas del ambiente exterior y del intercambiador de calor se graficaron en la carta psicrométrica obtenida con base en la presión barométrica de la ciudad de Ensenada (1013,2 hPa), para observar y comprender el comportamiento del intercambiador. Para ello se seleccionaron diversos días del mes de marzo, que presentaron condiciones extremas o especiales, en tres horarios aleatorios: por la mañana, al mediodía y por la tarde (Figura 65).

Tanto en momentos fríos y cálidos de los días del periodo de análisis, la temperatura del suelo se mantuvo en un rango entre 17 °C y 20 °C. En los momentos fríos, la temperatura dentro del intercambiador a la profundidad de 1,5 m se mantuvo entre 3 °C y 10 °C por encima de la temperatura ambiente mientras que, en los momentos cálidos se mantuvo entre 2 °C y 5 °C por debajo de la misma. Dentro del comportamiento regular, a las profundidades de 2,0 y 2,5 m se presentó un ligero aumento de temperatura, de aproximadamente 0,5 °C por cada profundidad, con respecto a la profundidad 1,5 m.



**Figura 65**

*Ejemplo de gráfica psicrométrica del 10 de marzo 12:00 h*



En la salida del intercambiador, se presentó una pérdida de las condiciones logradas en la profundidad 2,5 m esto debido al proceso de ascensión del ducto, disminuyendo temperatura conforme se reduce la profundidad; sin embargo, se mantuvo mayor con respecto a la temperatura ambiente en los momentos fríos y menor con respecto a los momentos cálidos, es decir, si se logró una corrección de las condiciones térmicas que ingresaban al sistema.

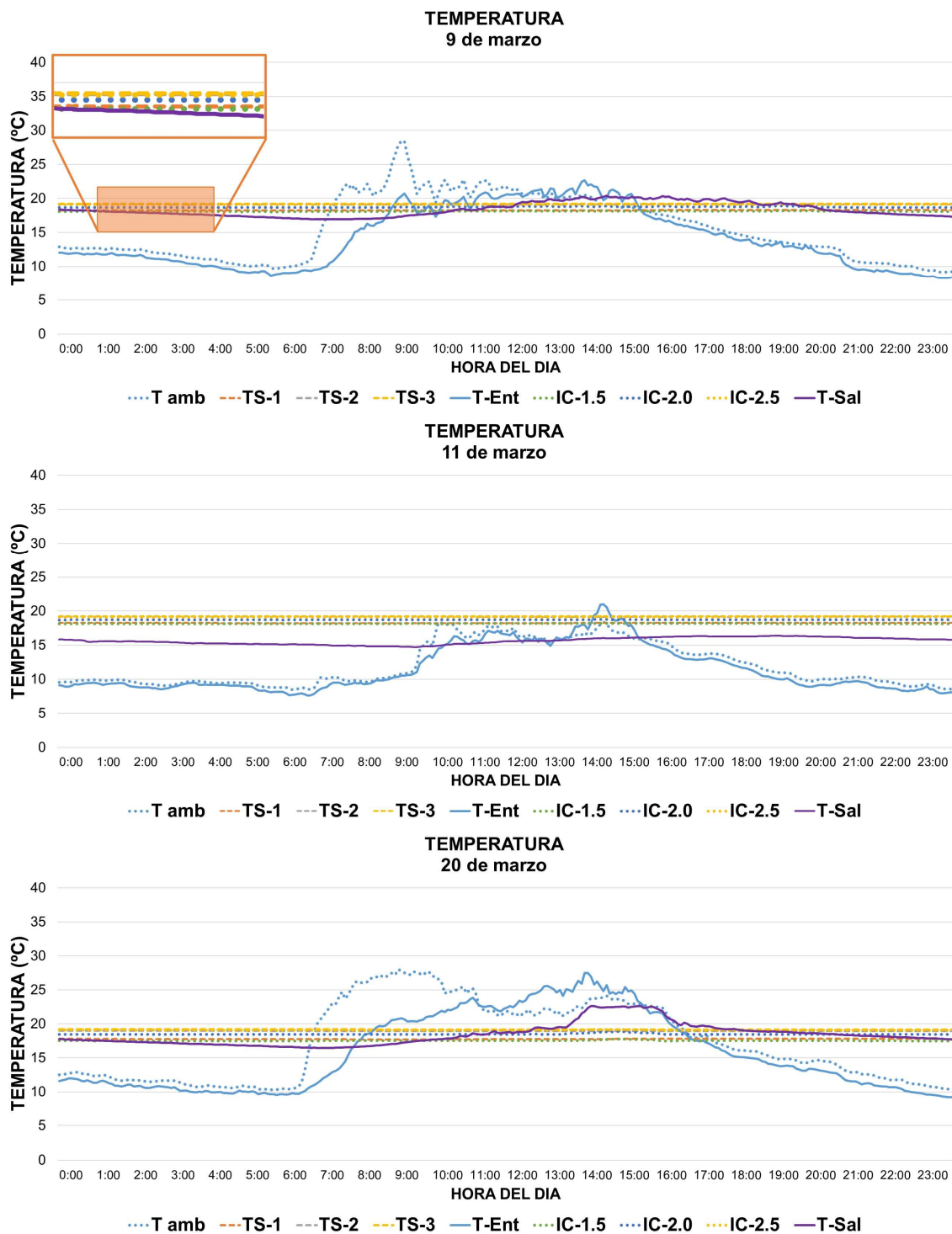
Respecto al porcentaje de humedad, en los momentos fríos se presentó una disminución del porcentaje entre la del ambiente y la de la salida del intercambiador, manteniéndose en un rango del 60 %; durante los momentos cálidos analizados, se presentó un ligero aumento en el porcentaje de humedad entre la del ambiente y la de la salida, sin embargo, en esta última se mantuvo de igual manera en un rango dentro del 60 %.

Como siguiente etapa del procesamiento de datos, se realizó la comparación de las variables de temperatura ambiente, temperaturas del suelo y temperaturas dentro del intercambiador en sus tres profundidades, así como de la entrada y salida del mismo. Por el momento no se incluyeron las demás variables de temperatura, ya que se pretende analizar el desempeño del intercambiador, posteriormente se integrarán las variables de temperatura restantes para efectuar la evaluación del sistema completo. La comparación se hizo por día, en escala de 24 horas. A la par, se llevaron a cabo las gráficas de comparación de humedad relativa (ambiente, entrada, salida y tres profundidades del intercambiador). En ambos casos se toma como referencia la variable correspondiente al ambiente exterior

Al analizar las gráficas de temperaturas de diferentes días (Figura 66), se pudo observar que la temperatura dentro del intercambiador en las tres diferentes profundidades son similares a las temperaturas del suelo por lo que se mantiene un rango entre los 18 °C y 20 °C, por lo tanto, se puede considerar como un comportamiento estable. Se observan condiciones similares entre el ambiente exterior y la entrada del intercambiador durante todo el día, mientras que en los momentos fríos se observa una diferencia de casi 10 °C entre el intercambiador, en sus tres profundidades, y la temperatura ambiente, presentó una menor diferencia en días con temperaturas más cálidas (20 de marzo). A la salida del intercambiador, se observa una variación con respecto a la profundidad 2,50 m, sin embargo, en los diferentes días, se puede considerar un comportamiento estable con respecto a la temperatura del ambiente exterior. A pesar de que las temperaturas a la salida del intercambiador se encuentran por debajo de la zona de confort, la cual se encuentra entre los 19 °C y 24 °C, esta se encuentra cercana al límite inferior de la misma, en los días con bajas temperaturas, y en días con temperaturas mayores, la temperatura de salida alcanza el rango de la zona de confort durante un periodo de tiempo.

**Figura 66**

*Gráficas diarias de comparación de temperatura*

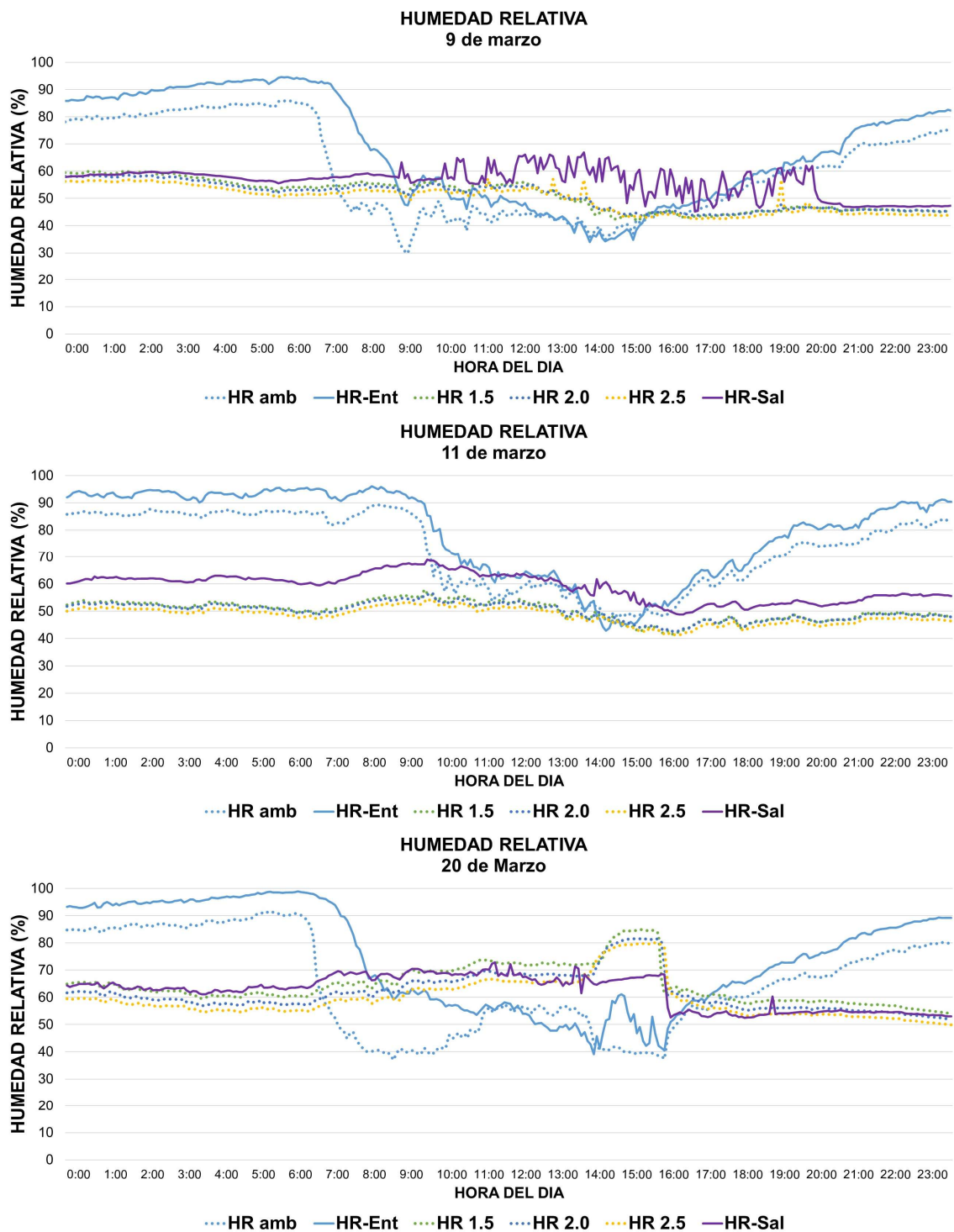


*Nota. Arriba: 9 de marzo; centro: 11 de marzo; abajo: 20 de marzo*

Respecto al análisis de la humedad relativa (Figura 67), se observa un comportamiento general similar al comportamiento de la temperatura; la humedad relativa del ambiente exterior y la entrada del intercambiador es similar, mientras que en las tres profundidades del intercambiador el comportamiento es relativamente estable durante todo el día. Y, de igual manera, se observa una variación entre la profundidad 2,50 m y la humedad relativa a la salida, sin embargo, mantiene un rango cercano al 65% en los diferentes días, siendo una diferencia significativa con respecto a la humedad relativa del ambiente exterior, principalmente durante el periodo nocturno de hasta 30%.

**Figura 67**

*Gráficas diarias de comparación de humedad relativa*



*Nota. Arriba: 9 de marzo; centro: 11 de marzo; abajo: 20 de marzo*

## 5 RESULTADOS

La interpretación de los datos registrados durante el proceso de monitoreo para obtener los resultados se llevó a cabo de manera mensual, se organizó por variable física ambiental de tal manera que, dado los objetivos de la presente investigación, se inicia con el análisis del desempeño del sistema con respecto a la humedad relativa, seguido de la temperatura del ambiente y se concluye con la velocidad del aire, considerando que estas tres variables tienen incidencia en la climatización lograda en el espacio experimental de forma pasiva, y éstas además ajustaron su comportamiento en función de la implementación de las estrategias que conformaron el sistema propuesto en la presente investigación, las cuales se mencionan en capítulos anteriores: intercambiador de calor tierra-aire (IC) como reductor de humedad relativa, chimenea solar (CS) como dispositivo para promover la succión del aire por medio de estratificación térmica, y doble acristalamiento y sellado de vanos para propiciar la hermeticidad del espacio de análisis.

En todas las variables, el análisis se inicia en el mes de abril, último mes del periodo frío, debido a que el monitoreo del experimento dio inicio formalmente en dicho mes, por lo que éste muestra la evolución del funcionamiento del sistema en su proceso regular, por cada periodo térmico. En los apéndices se muestra a detalle el desempeño mensual del sistema respecto a cada variable analizada, por cada periodo térmico.

A continuación, se muestra el análisis anual del desempeño del sistema por variable; posteriormente, se lleva a cabo el análisis del sistema por día representativo, para concluir con el análisis general del desempeño.

### 5.1 Desempeño del sistema por variable.

Con base en el desempeño mensual del sistema se describe el comportamiento anual del sistema por variable físico-ambiental, para posteriormente analizar el desempeño general del sistema.



### 5.1.1 Desempeño hídrico.

Se puede establecer que, en todo el año de evaluación, la mayor deshumidificación, a lo largo del sistema se llevó a cabo en el recorrido de la entrada a la profundidad de 1,5 m, con un 21,8 % de HR en promedio; durante el periodo cálido se presentaron los menores valores, siendo el mes de Julio el más bajo, con 17,9 % de HR; mientras que los mayores niveles se presentaron durante el periodo térmico frío, con 28,1 % de HR en diciembre. Con respecto a las dos profundidades restantes, de la 1,5 m a 2,0 m se presentó poca deshumidificación, con un promedio de 1,3 % de HR, siendo el periodo térmico de transición frío-calor, el que no presentó dicho fenómeno; mientras que en la de 2,0 m a 2,5 m, la deshumidificación fue en promedio de 0,5 % de HR, donde parte del periodo de transición térmico frío-calor y durante el cálido, dicho fenómeno no se presentó. Por lo que la profundidad que presenta menor deshumidificación es a los 2,5 m. La deshumidificación que se presenta en la salida del IC, es relativamente constante en cada mes, con un promedio de 12,9 % de HR.

Además, y como se mencionó anteriormente, el sistema también presentó el fenómeno de humidificación, en los periodos en los que la HR en el ambiente era baja. Éste lo hizo durante menos tiempo del periodo evaluado, sin embargo, permitió la estabilización del sistema. De la entrada a la profundidad de 1,5 m, el promedio fue de 6,6 % de HR; en la siguiente profundidad, fue de 3,0 % de HR y en la última profundidad fue 2,5 % de HR. Por lo tanto, se puede observar que en el primer recorrido predomina la deshumidificación.

La reducción de humedad en el espacio experimental con respecto al ambiente exterior fue de 12,5 % de HR en promedio anual, siendo en el periodo de transición de frío a calor, cuando presentó los mayores niveles, con 14,7 % de HR en el mes de junio, seguido por el periodo cálido, con un promedio de 13,2 % de HR.

Se condensa lo expuesto anteriormente, de manera gráfica en la Figura 68 en donde se muestra el porcentaje de tiempo en que se presentó deshumidificación o humidificación (expresado en % de tiempo), así como la deshumidificación y humidificación, tanto promedio como máximas promedio, y el desempeño efectivo

obtenido durante cada mes, en los diferentes puntos de análisis: a la salida del IC respecto al ambiente exterior, en las tres profundidades del IC, en el espacio experimental respecto al ambiente exterior, y la relación entre el espacio de control y el espacio experimental.

En la Figura 69 se pueden observar las condiciones de habitabilidad logradas en el espacio interior (tanto en la salida del IC como en el espacio experimental y en el de control) debido al desempeño higríco del sistema, en comparación con las condiciones ambientales del exterior, registradas durante el proceso de monitoreo; en el apartado de confort, se refiere al porcentaje de tiempo que cada punto de análisis se mantuvo dentro del rango de confort para el periodo térmico establecido.

A la salida del IC se logra en promedio anual el 55 % de HR, y de 51,5 % de HR durante el periodo térmico frío; mientras que, en el espacio experimental se logra un promedio anual de 58,3 % de HR, y de 61,7 % de HR, respectivamente.

En cuanto a confort, fue el periodo térmico cálido el que tuvo menor permanencia, a pesar de ello, el espacio experimental se mantuvo por encima del espacio de control. Solo en el periodo térmico de transición frío-calor y el periodo cálido, los valores de HR, tanto en la salida del IC, como en el espacio experimental y en el de control, se presentaron por debajo del rango de confort. Durante el periodo frío, los tres puntos de análisis se mantuvieron todo el tiempo en confort, por lo que se considera un desempeño adecuado para dicho periodo térmico.

El desempeño higríco efectivo del sistema fue de 24,8 % de HR en promedio, con un desempeño efectivo máximo de 28,4 % de HR, el cual se da en el mes de enero, que corresponde al periodo térmico frío (diciembre-abril). La deshumidificación se presenta cuando los niveles de HR en el ambiente son elevados, mientras que la humidificación se logra en condiciones de baja HR en el ambiente exterior, esto aplicado al comportamiento mensual y al diario, es decir, durante el día los niveles de humedad son bajos debido al aumento de la temperatura por la presencia de la radiación solar, mientras que, por las noches, debido al descenso de la temperatura la humedad relativa asciende, se presentaron los niveles más altos por la madrugada.

**Figura 68**

*Resumen del desempeño higrico anual.*

**DESEMPEÑO HÍGRICO ANUAL**

|                    | ABR  | MAY  | JUN  | JUL  | AGO  | SEP  | OCT  | NOV  | DIC  | ENE  | FEB  | MAR  | PROM. |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| % Des.             | 65%  | 66%  | 63%  | 63%  | 64%  | 66%  | 65%  | 66%  | 75%  | 61%  | 59%  | 58%  | 64%   |
| Des. prom.         | 13,8 | 12,6 | 10,5 | 9,5  | 10,8 | 11,9 | 14,6 | 14,8 | 17,4 | 15,0 | 11,7 | 12,8 | 12,9  |
| Des. max.          | 32,3 | 33,0 | 22,3 | 18,9 | 24,4 | 27,7 | 34,6 | 37,1 | 39,0 | 35,9 | 32,4 | 29,8 | 30,6  |
| % Hum.             | 35%  | 34%  | 37%  | 37%  | 36%  | 34%  | 35%  | 34%  | 25%  | 39%  | 41%  | 42%  | 36%   |
| Hum. prom.         | 12,7 | 12,1 | 12,0 | 12,7 | 12,5 | 12,0 | 11,4 | 11,2 | 6,2  | 13,4 | 13,9 | 14,3 | 12,0  |
| Hum. max.          | 51,5 | 38,1 | 28,4 | 29,6 | 37,6 | 36,6 | 45,5 | 53,9 | 30,7 | 58,9 | 49,1 | 57,0 | 43,1  |
| Desempeño efectivo | 26,5 | 24,7 | 22,5 | 22,2 | 23,3 | 23,9 | 26,0 | 26,0 | 23,6 | 28,4 | 25,6 | 27,1 | 25,0  |
| Ent - 1.5          | 21,6 | 21,0 | 20,8 | 17,9 | 19,8 | 22,5 | 23,7 | 22,6 | 28,1 | 21,3 | 18,5 | 23,5 | 21,8  |
| Hum. prom.         | 8,9  | 4,8  | 6,2  | 9,3  | 8,9  | 7,3  | 5,8  | 6,0  | 2,5  | 8,1  | 8,6  | 11,2 | 7,3   |
| Des. prom.         | 0,7  | 0,4  | 0,0  | 0,0  | 0,9  | 1,0  | 0,8  | 1,6  | 3,8  | 4,0  | 2,1  | 2,2  | 1,8   |
| Hum. prom.         | 2,1  | 2,8  | 4,1  | 4,9  | 4,5  | 3,4  | 1,2  | 2,1  | 1,8  | 2,7  | 2,4  | 1,7  | 2,8   |
| Des. prom.         | 0,3  | 0,1  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,3  | 0,5  | 1,9  | 2,4  | 1,1  | 1,4  | 1,0   |
| Hum. prom.         | 0,9  | 1,6  | 3,1  | 5,1  | 5,0  | 4,0  | 1,4  | 0,6  | 1,2  | 2,7  | 1,4  | 1,4  | 2,4   |
| % Des.             | 65%  | 75%  | 79%  | 76%  | 75%  | 76%  | 56%  | 48%  | 56%  | 35%  | 31%  | 44%  | 60%   |
| Des. prom.         | 11,8 | 12,6 | 14,7 | 13,0 | 13,3 | 13,3 | 13,7 | 11,7 | 8,5  | 7,0  | 8,4  | 6,4  | 11,2  |
| Des. max.          | 34,7 | 24,6 | 25,3 | 22,6 | 24,3 | 24,6 | 38,8 | 29,9 | 23,1 | 22,7 | 32,9 | 19,0 | 26,9  |
| % Hum.             | 35%  | 25%  | 21%  | 24%  | 25%  | 24%  | 44%  | 52%  | 44%  | 65%  | 69%  | 56%  | 40%   |
| Hum. prom.         | 14,7 | 12,5 | 9,9  | 10,7 | 11,0 | 10,7 | 13,3 | 15,2 | 13,5 | 21,1 | 19,7 | 16,1 | 14,0  |
| Hum. max.          | 50,0 | 31,9 | 26,8 | 23,0 | 31,8 | 32,6 | 43,9 | 48,9 | 53,5 | 54,5 | 48,9 | 56,3 | 41,8  |
| Desempeño efectivo | 26,4 | 25,1 | 24,6 | 23,7 | 24,3 | 24,0 | 26,9 | 26,9 | 22,0 | 28,1 | 28,2 | 22,5 | 25,2  |
| Menor HR           | 7,5  | 7,2  | 5,0  | 5,3  | 5,3  | 4,4  | 5,0  | 5,6  | 2,7  | 4,4  | 6,1  | 4,7  | 5,3   |
| Mayor HR           | 0,0  | 0,1  | 0,7  | 0,6  | 0,7  | 0,9  | 1,4  | 2,6  | 3,6  | 3,7  | 3,9  | 1,9  | 1,8   |

**ESCALA DE DESEMPEÑO**

Adecuado

Medio

Ligero

No presentó

**PERIODOS TÉRMICOS**

Frío

Transición Frío-Calor

Cálido

Transición Calor-Frío

**Figura 69**

*Resumen de condiciones hígricas propiciadas por el sistema*

**CONDICIONES HÍGRICAS AMBIENTALES**

|              | ABR  | MAY  | JUN  | JUL  | AGO  | SEP  | OCT  | NOV  | DIC  | ENE  | FEB  | MAR  | PROM. |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Exterior     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
| Máxima       | 80,4 | 77,4 | 79,7 | 79,4 | 79,0 | 79,5 | 76,0 | 72,1 | 84,5 | 76,5 | 62,1 | 75,1 | 76,8  |
| Media        | 60,2 | 61,4 | 64,4 | 64,4 | 62,3 | 63,6 | 54,8 | 54,3 | 68,0 | 54,6 | 40,6 | 54,4 | 58,6  |
| Mínima       | 31,4 | 34,8 | 40,3 | 40,7 | 36,4 | 38,3 | 28,6 | 31,0 | 42,2 | 27,8 | 18,2 | 27,0 | 33,1  |
| Interiores   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
| Salida IC    | 56,1 | 57,2 | 63,1 | 63,4 | 60,1 | 60,2 | 49,6 | 48,7 | 56,8 | 51,5 | 39,7 | 53,3 | 55,0  |
| Experimental | 57,9 | 54,9 | 55,2 | 57,2 | 55,3 | 56,4 | 53,9 | 58,4 | 69,4 | 67,4 | 52,7 | 61,3 | 58,3  |
| Control      | 50,4 | 47,7 | 50,4 | 52,1 | 50,3 | 52,3 | 50,2 | 55,2 | 71,1 | 67,5 | 51,7 | 58,6 | 54,8  |
| Confort      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
| Salida IC    | 99%  | 49%  | 93%  | 77%  | 51%  | 50%  | 78%  | 73%  | 98%  | 97%  | 72%  | 97%  | 78%   |
| Experimental | 100% | 42%  | 43%  | 38%  | 28%  | 34%  | 96%  | 85%  | 100% | 100% | 100% | 100% | 72%   |
| Control      | 99%  | 8%   | 21%  | 17%  | 10%  | 16%  | 81%  | 71%  | 100% | 100% | 93%  | 100% | 60%   |

**ESCALA AMBIENTAL**



**ESCALA DE DESEMPEÑO**



**PERIODOS TERMICOS**



La mayor deshumidificación se presenta, igualmente, en el periodo térmico frío, que corresponde a los niveles de mayor humedad en el ambiente exterior. En la salida del IC es de 13,0 % de HR, en promedio, respecto al ambiente exterior, presentándose la máxima promedio de 17,4 % de HR durante diciembre; así mismo, en este mes, en el recorrido de la entrada a la profundidad de 1,50 m se logra la mayor deshumidificación en todo el sistema de 21,6 % de HR en promedio, y una máxima promedio de 28,1 de HR.

Así mismo, es en este periodo térmico cuando la HR a la salida del intercambiador y en el espacio experimental se mantuvieron prácticamente todo el tiempo dentro del rango de confort, el cual es de 27,5 a 85,4 % de HR. Por lo tanto, el sistema contribuye con las condiciones de habitabilidad del espacio; incluso, en los periodos térmicos restantes, el sistema propició que el espacio se mantuviera en confort por más tiempo (37 % del tiempo) en comparación con el espacio de control (14,5 % del tiempo), a pesar de que, conforme se acerca al periodo térmico cálido (julio-septiembre) el rango de confort es más reducido.

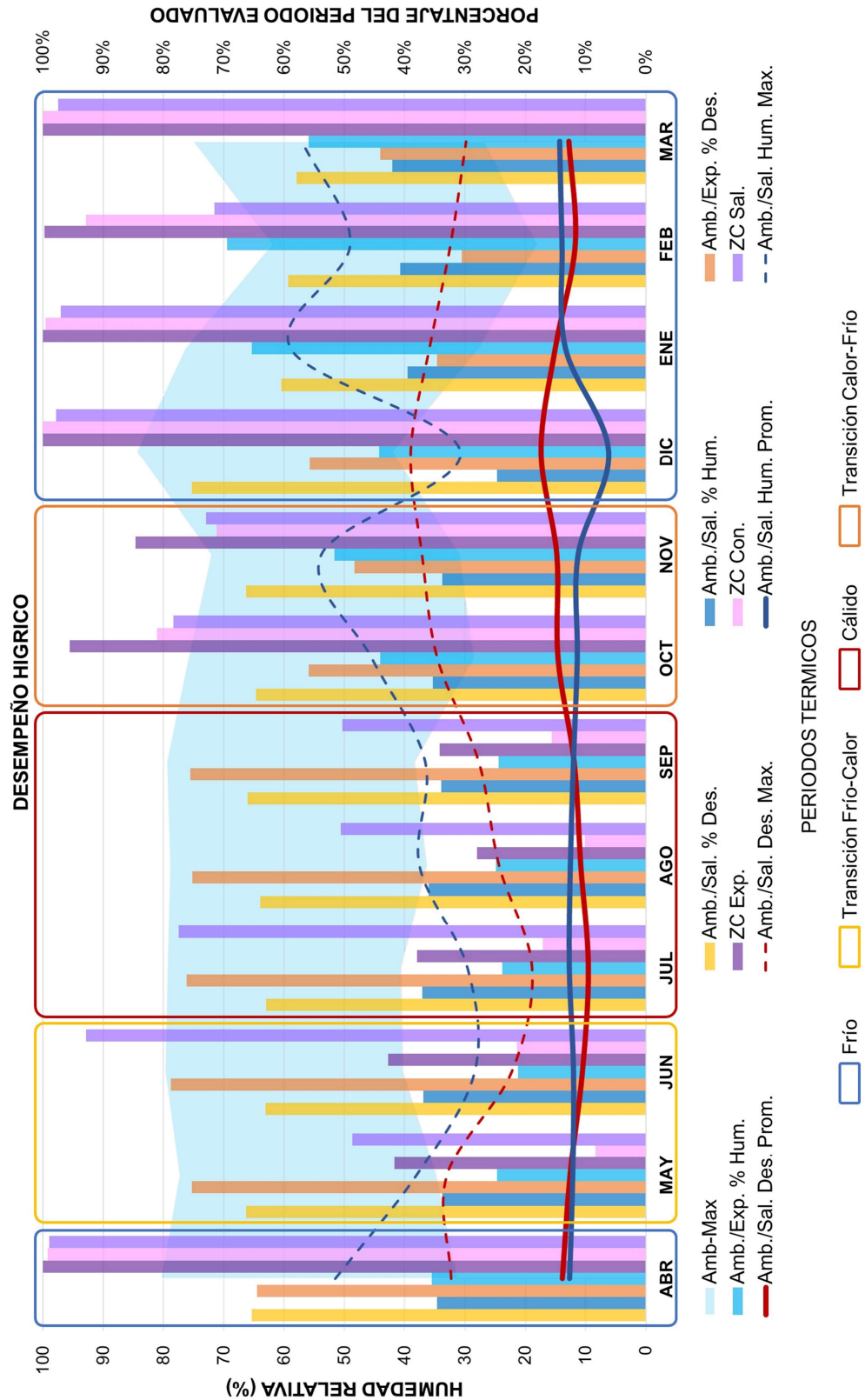
Lo mencionado anteriormente se puede observar en la gráfica de la Figura 70, que presenta los aspectos principales del desempeño higróico del sistema: la deshumidificación (rojo) y la humidificación (azul), tanto promedio (líneas continuas) como máximas promedio (líneas discontinuas), que mantuvo el sistema en la salida del IC respecto al ambiente exterior (franja azul), los cuales están expresados en porcentaje de humedad relativa (% HR).

Así mismo, presenta el porcentaje de dos criterios principales: del tiempo que cada una de las condiciones de deshumidificación y humidificación (barras naranjas y azules, respectivamente) se presentó durante el periodo evaluado, y del tiempo en que cada punto de análisis: salida del IC, espacio experimental y de control (barras moradas), se mantuvo dentro del rango de confort higróico establecido para el periodo térmico correspondiente.



**Figura 70**

*Desempeño higrico del sistema*





### 5.1.2 Desempeño térmico.

Se realizó la interpretación del comportamiento térmico en cada una de las etapas del sistema, enfocándose principalmente tres aspectos: la relación entre el ambiente y la salida del IC; la incidencia de la temperatura del suelo en las tres profundidades de estudio sobre el desempeño térmico del sistema en el segmento del IC, en las mismas profundidades; y la influencia del sistema respecto a las condiciones térmicas del espacio experimental, a partir de la comparación de los resultados obtenidos entre este último y el ambiente exterior, así como con las condiciones del espacio de control.

Al analizar los resultados mensuales, se obtiene que el promedio anual tanto de la reducción como el incremento de temperatura en la salida del IC es de 4,0 K respecto al ambiente exterior, mientras que, de igual manera, con relación a este último, en el espacio experimental la reducción promedio anual es de 3,8 K y el incremento de 5,1 K.

El promedio anual del desempeño efectivo entre la salida del IC y el ambiente es de 8,2 K, en donde los meses de febrero y marzo, correspondientes al periodo térmico frío, presentan los niveles más elevados de desempeño efectivo, de 9,9 y 9,6 K, respectivamente. En tanto, en el espacio experimental fue de 8,9 K respecto de igual manera al ambiente exterior, en donde marzo y abril (periodo térmico frío) presentan los máximos de 10,1 y 10,4 K, respectivamente. Por lo tanto, el sistema presentó un mejor desempeño durante el periodo térmico frío.

En lo que respecta a la temperatura de suelo y su influencia en el sistema, se tiene que en el IC a la profundidad de 1,5 m prevalece el incremento de la temperatura con un promedio anual de 0,5 K respecto a la del suelo TS-1 durante los meses que corresponden a los periodos térmicos de transición y al cálido, siendo hasta el periodo térmico frío, que los valores de la reducción de temperatura son superiores a la del incremento, sin embargo, solo se logra una diferencia promedio anual de 0,1 K, respecto a la temperatura del suelo. Por el contrario, en la profundidad 2,0 m del IC predomina la disminución de temperatura con un promedio anual 0,3 K, y nuevamente es en el periodo térmico frío donde se presentan las mayores

reducciones. En el caso de la profundidad 2,5 m el aumento de temperatura promedio anual es de 0,1 K, y predomina durante los periodos de transición y el cálido; mientras que, la reducción de temperatura con un promedio anual de 0,1 K predomina en el periodo térmico frío.

Se condensa lo expuesto anteriormente, de manera gráfica en la Figura 71 en donde se muestra el porcentaje de tiempo en que se presentaron condiciones de disminución e incremento de temperatura (enfriamiento o calentamiento) expresado en % de tiempo; la disminución e incremento, tanto promedio como máximas promedio, y el desempeño efectivo, es decir, la amplitud térmica obtenida durante cada mes, en los diferentes puntos de análisis: a la salida del IC respecto al ambiente exterior, en las tres profundidades del IC respecto a las temperaturas del suelo; en el espacio experimental respecto al ambiente exterior, y la relación entre el espacio de control y el espacio experimental.

En la Figura 72 se observan las condiciones de habitabilidad logradas en el espacio interior (tanto en la salida del IC como en el espacio experimental y en el de control) debido al desempeño térmico del sistema, en comparación con las condiciones ambientales del exterior, registradas durante el proceso de monitoreo; así como en las tres profundidades. Respecto al confort, presenta el porcentaje de tiempo que cada punto de análisis se mantuvo dentro del rango establecido para cada periodo térmico.

En ella se observa que, en el periodo térmico de transición calor-frío y en el frío, las temperaturas se mantuvieron dentro del rango de confort, con un promedio anual de 21,2 °C; 22,9 °C y 23,4 °C en la salida del IC, en el espacio experimental y de control, respectivamente; y en promedio durante el periodo térmico frío de 18,3 °C; 19,3 °C y 19,9 °C, respectivamente. Así mismo, se registraron temperaturas promedio anual de 22,1 °C tanto a 1,5 m como a los 2,0 m de profundidad, y de 21,9 °C a 2,5 m.

En cuanto al desempeño en confort, el porcentaje de tiempo en el que cada punto de análisis se mantiene dentro del rango de confort, se considera mayormente medio, solo la salida del IC presenta en seis meses un desempeño adecuado.

**Figura 71**

*Resumen del desempeño térmico anual.*



**Figura 72**

Resumen de condiciones térmicas propiciadas por el sistema.

**CONDICIONES TÉRMICAS AMBIENTALES**

|                       | ABR  | MAY  | JUN  | JUL  | AGO  | SEP  | OCT  | NOV  | DIC   | ENE   | FEB  | MAR  | PROM. |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|
| Exterior              |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |       |
| Máxima                | 28,3 | 29,1 | 30,5 | 33,3 | 34,4 | 33,5 | 30,4 | 27,4 | 21,1  | 24,6  | 27,7 | 28,4 | 29,1  |
| Media                 | 18,5 | 19,9 | 21,7 | 24,8 | 25,0 | 23,9 | 19,8 | 18,7 | 13,9  | 16,3  | 16,5 | 17,2 | 19,7  |
| Mínima                | 12,2 | 14,2 | 16,9 | 19,9 | 19,5 | 18,4 | 13,9 | 12,5 | 9,1   | 9,2   | 8,8  | 9,6  | 13,7  |
| Interiores            |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |       |
| Salida IC             | 19,7 | 20,8 | 23,1 | 25,2 | 25,6 | 24,8 | 21,9 | 20,9 | 17,3  | 17,8  | 18,3 | 18,6 | 21,2  |
| Experimental          | 22,2 | 24,1 | 25,8 | 28,5 | 28,3 | 27,1 | 22,8 | 21,5 | 16,4  | 18,5  | 19,0 | 20,4 | 22,9  |
| Control               | 22,9 | 24,7 | 26,4 | 28,7 | 29,0 | 27,6 | 23,0 | 21,5 | 17,3  | 18,7  | 19,4 | 21,4 | 23,4  |
| Temp. prom. del suelo |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |       |
| TS-1                  | 20,0 | 21,4 | 22,9 | 24,4 | 25,3 | 25,6 | 24,1 | 22,1 | 19,9  | 18,2  | 18,5 | 18,6 | 21,8  |
| TS-2                  | 20,3 | 21,4 | 22,9 | 24,4 | 25,4 | 25,7 | 24,8 | 23,3 | 21,5  | 19,7  | 19,7 | 19,7 | 22,4  |
| TS-3                  | 19,8 | 20,6 | 21,7 | 22,9 | 23,8 | 24,3 | 24,1 | 23,1 | 21,8  | 20,2  | 20,0 | 20,1 | 21,9  |
| Temp. 1,5             | 20,5 | 22,0 | 23,8 | 25,5 | 26,4 | 26,4 | 24,3 | 22,2 | 19,5  | 17,9  | 18,3 | 18,5 | 22,1  |
| prom. en IC           | 20,1 | 21,3 | 22,8 | 24,3 | 25,3 | 25,6 | 24,4 | 22,8 | 20,9  | 19,1  | 19,2 | 19,2 | 22,1  |
| 2,5                   | 19,8 | 20,8 | 21,9 | 23,1 | 24,0 | 24,6 | 24,2 | 23,1 | 21,7  | 20,0  | 19,8 | 19,7 | 21,9  |
| Confort               |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |       |
| Salida IC             | 96%  | 96%  | 23%  | 64%  | 50%  | 68%  | 88%  | 74%  | 55,6% | 63,7% | 62%  | 79%  | 68%   |
| Experimental          | 66%  | 40%  | 19%  | 22%  | 22%  | 34%  | 61%  | 58%  | 43,4% | 62,2% | 52%  | 59%  | 45%   |
| Control               | 58%  | 36%  | 18%  | 24%  | 21%  | 33%  | 51%  | 50%  | 55,1% | 61,5% | 48%  | 48%  | 42%   |

**ESCALA AMBIENTAL**



**ESCALA DE DESEMPEÑO**



**PERIODOS TÉRMICOS**





El desempeño efectivo promedio anual en el espacio experimental es de 8,9 °C, donde abril presenta el mayor desempeño mensual con 10,4 °C, ya que en este mes se presenta un desempeño efectivo similar del incremento y la reducción de temperatura, sin embargo, tanto febrero como marzo, presentan condiciones similares. Por otra parte, el desempeño efectivo promedio anual en la salida del IC es de 8,2 °C, en el que febrero es el mes con el mayor desempeño mensual con 9,9 °C, seguido de marzo con 9,6 °C.

En comparación con el desempeño efectivo que se presentó a la salida del IC, el espacio experimental mantuvo un desempeño promedio mayor en los meses correspondientes al periodo térmico de transición de frío a calor y en el periodo cálido, esto se relaciona con el hecho de que el incremento de temperatura, respecto al ambiente exterior, es el proceso que más se presentó en el espacio experimental (80 % del periodo evaluado) así como que el promedio de incremento (5,1 °C promedio anual) es mayor al promedio de reducción de temperatura (3,8 °C promedio anual). Esto, a causa de la exposición de dicho espacio a la radiación directa del Sol así como a la influencia que la convección pueda ejercer sobre la superficie de los muros del espacio experimental, al representar los meses en los que la temperatura del ambiente exterior es más elevada; sin embargo, es en el mes de febrero en el que ambos desempeños presentan similitud.

El desempeño térmico logrado por el sistema, favorece las condiciones de confort al interior del espacio, ya que se observa que las condiciones térmicas logradas en la salida del IC se mantuvieron dentro del rango de confort el 79% del periodo evaluado, mientras que el espacio experimental lo estuvo el 59 %, cuando el espacio de control solo lo estuvo el 48 % del tiempo.

Parte fundamental del desempeño del sistema, es la influencia que la temperatura del suelo ejerce en las paredes del ducto que conforma el IC. En este se presentan condiciones de incremento y disminución de la temperatura de + 0,5 °C a 1,5 m de profundidad; de -0,3 °C a 2,0 m y de  $\pm 0,1$  a 2,5 m, en promedio anual, respecto a la temperatura promedio del suelo en las mismas profundidades (21,8 °C; 22,4 °C y 21,9 °C, respectivamente). A partir de octubre, la estabilidad térmica refleja el

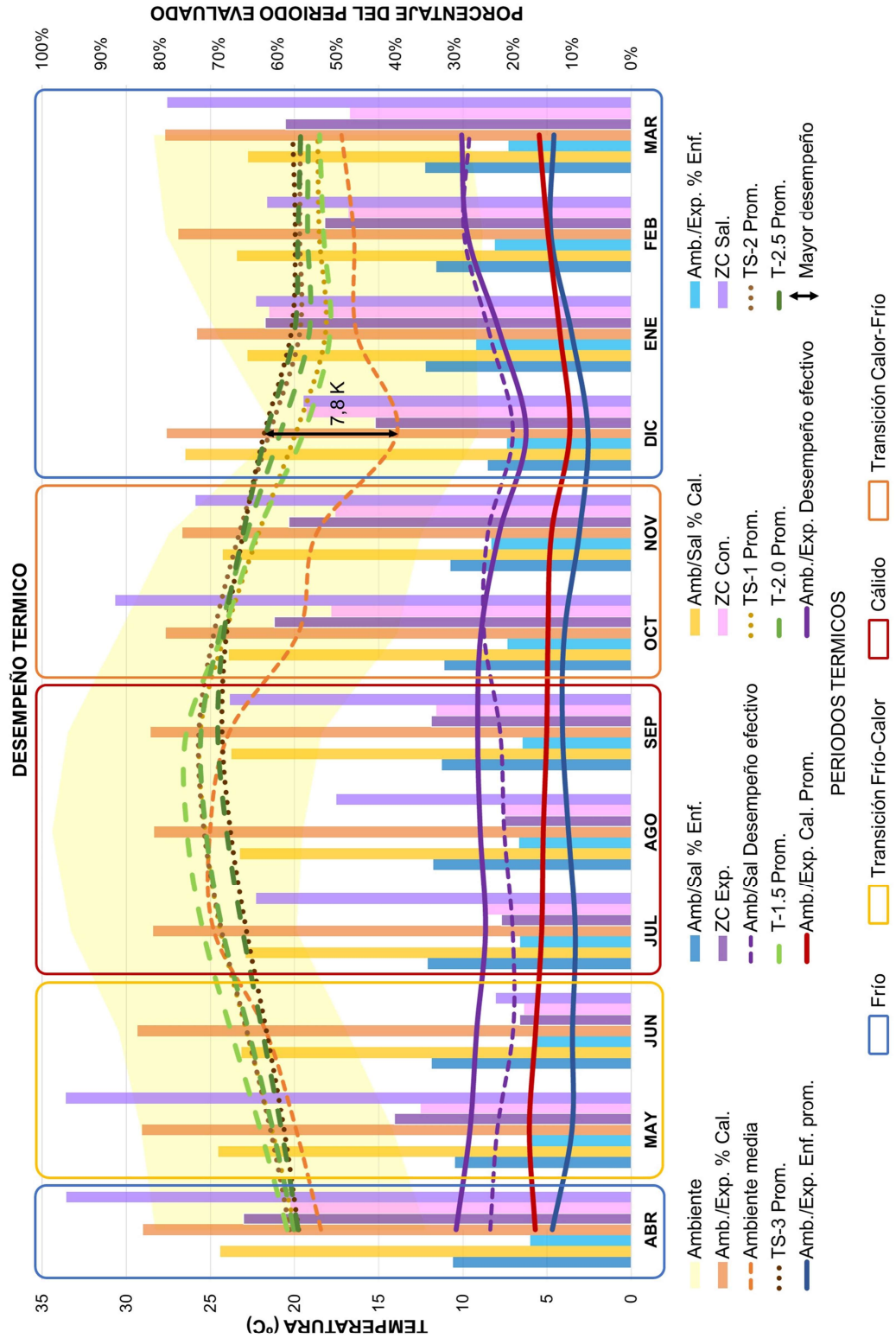
cambio de periodo térmico, ya que la TS-3 y por ende la Temp 2,5, presentan mayor temperatura en comparación con la del ambiente exterior, lo que representa mayor estabilidad térmica del suelo y del intercambiador durante el periodo frío.

Lo anterior se resume en la Figura 73, que presenta el desempeño efectivo del sistema (líneas moradas) tanto en la salida del IC (discontinua) como en el espacio experimental (continua), ya que son las áreas principales que determinan si el sistema ha funcionado. Así mismo, se presentan las condiciones de incremento y disminución de temperatura (rojo y azul, respectivamente) registradas en el espacio experimental con relación al ambiente exterior. Adicionalmente, se presentan las temperaturas del suelo (café punteadas) y las del IC (verdes discontinuas) en las tres profundidades analizadas, así como la temperatura ambiente (franja amarilla) destacando la temperatura promedio (naranja discontinua), expresadas en °C. También se presenta, al igual que la gráfica del desempeño hídrico, el tiempo que cada una de las condiciones, en este caso el incremento (barras amarillas) y reducción de la temperatura (barras azules), se presentaron, tanto en la salida del IC como en el espacio experimental; y del tiempo en que la salida del IC, el espacio experimental y el de control (barras moradas) se mantuvo dentro del rango de confort térmico establecido para el periodo térmico correspondiente; ambos casos expresados en porcentaje del periodo evaluado (%).



**Figura 73**

*Desempeño térmico del sistema*



### 5.1.3 Desempeño de ventilación.

La interpretación inició con la descripción de las condiciones de velocidad de aire registradas en el sistema, a la entrada y a la salida del IC y en la chimenea solar, durante el mes analizado; sin embargo, debido a complicaciones técnicas con el sensor de velocidad de aire en la entrada del IC, solo se presenta la descripción en dicho punto durante los meses de diciembre a abril, que corresponden al periodo térmico frío. Posterior a la descripción, se realizó el análisis del comportamiento del sistema, enfocándose principalmente en dos aspectos: la tasa de flujo de aire en la salida del IC y en la chimenea solar

Se puede observar en la Figura 74 que, durante el año de evaluación, en la salida del IC es donde se presentaron las velocidades promedio más elevadas; sin embargo, fue en la chimenea solar donde se presentaron las mayores velocidades máximas promedio y extremas. Mientras tanto, la mayor tasa promedio de ventilación se presenta en la salida de la CS, tanto en promedio como máximas.

Durante el periodo térmico frío, las velocidades registradas tanto en la entrada como en la salida del IC se mantuvieron similares, con una diferencia de 0,01 m/s, es importante señalarlo, al considerar el recorrido de 50,0 m del IC.

En la salida del IC se obtuvo una velocidad promedio anual de 0,18 m/s; máxima promedio de 0,36 m/s y extrema de 1,00 m/s; mientras, la CS presentó 0,07 m/s; 0,60 ms y 1,01 m/s, respectivamente.

En cuanto a flujo, el promedio anual en la salida del IC fue de 5,41 m<sup>3</sup>/h y de 28,97 m<sup>3</sup>/h en la CS; mientras que la máxima promedio y extremas fueron de 7,52 m<sup>3</sup>/h y 103,01 m<sup>3</sup>/h; y 15,42 m<sup>3</sup>/h y 281,09 m<sup>3</sup>/h, respectivamente.

Es importante señalar que, tanto por velocidad del aire como por flujo, los valores máximos anuales de la velocidad promedio en cada punto de análisis, se registran en el periodo térmico frío.

**Figura 74**

*Resumen del desempeño de ventilación anual.*

**DESEMPEÑO ANUAL DE VENTILACIÓN**

|                         | ABR    | MAY    | JUN   | JUL    | AGO    | SEP    | OCT    | NOV    | DIC    | ENE    | FEB    | MAR    | PROM.  |
|-------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Velocidad de aire (m/s) |        |        |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Entrada IC prom         | 0,08   | S/D    | S/D   | S/D    | S/D    | S/D    | S/D    | S/D    | 0,21   | 0,19   | 0,17   | 0,18   | 0,19   |
| Entrada IC max.         | 0,16   | S/D    | S/D   | S/D    | S/D    | S/D    | S/D    | S/D    | 0,37   | 0,41   | 0,51   | 0,45   | 0,44   |
| Entrada IC extr.        | 0,47   | S/D    | S/D   | S/D    | S/D    | S/D    | S/D    | S/D    | 0,69   | 0,99   | 0,99   | 0,92   | 0,90   |
| Salida IC prom          | 0,18   | 0,19   | 0,17  | 0,16   | 0,15   | 0,17   | 0,19   | 0,21   | 0,22   | 0,20   | 0,19   | 0,20   | 0,18   |
| Salida IC max           | 0,36   | 0,36   | 0,36  | 0,32   | 0,33   | 0,31   | 0,37   | 0,37   | 0,34   | 0,38   | 0,43   | 0,37   | 0,36   |
| Salida IC extr.         | 0,47   | 0,51   | 0,50  | 0,42   | 0,52   | 0,49   | 1,00   | 0,69   | 0,42   | 1,00   | 0,70   | 0,56   | 0,61   |
| CS prom                 | 0,07   | 0,07   | 0,06  | 0,05   | 0,06   | 0,07   | 0,08   | 0,08   | 0,06   | 0,07   | 0,08   | 0,07   | 0,07   |
| CS max                  | 0,77   | 0,75   | 0,58  | 0,58   | 0,70   | 0,62   | 0,64   | 0,47   | 0,47   | 0,49   | 0,53   | 0,55   | 0,60   |
| CS extr.                | 1,01   | 1,01   | 1,01  | 1,01   | 1,01   | 1,01   | 1,01   | 1,01   | 1,01   | 1,01   | 1,01   | 1,01   | 1,01   |
| Flujo de aire (m3/h)    |        |        |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Entrada IC prom         | 2,27   | S/D    | S/D   | S/D    | S/D    | S/D    | S/D    | S/D    | 6,04   | 5,47   | 5,05   | 5,35   | 5,47   |
| Entrada IC max.         | 3,37   | S/D    | S/D   | S/D    | S/D    | S/D    | S/D    | S/D    | 8,19   | 8,37   | 8,41   | 7,94   | 8,23   |
| Entrada IC extr.        | 8,83   | S/D    | S/D   | S/D    | S/D    | S/D    | S/D    | S/D    | 9,72   | 18,45  | 13,14  | 9,51   | 12,70  |
| Salida IC prom          | 5,33   | 5,58   | 5,06  | 4,56   | 4,51   | 4,90   | 5,53   | 6,08   | 6,43   | 5,76   | 5,46   | 5,73   | 5,41   |
| Salida IC max           | 7,58   | 7,37   | 6,72  | 6,16   | 6,24   | 6,54   | 8,06   | 8,32   | 8,35   | 8,28   | 8,41   | 8,17   | 7,52   |
| Salida IC extr.         | 8,94   | 9,44   | 7,88  | 7,06   | 7,22   | 8,15   | 9,61   | 10,71  | 9,51   | 15,42  | 9,98   | 9,48   | 9,45   |
| CS prom                 | 28,69  | 29,03  | 24,12 | 23,38  | 27,45  | 30,94  | 32,73  | 32,86  | 23,87  | 29,08  | 33,97  | 31,57  | 28,97  |
| CS max                  | 112,45 | 119,39 | 78,18 | 81,32  | 96,25  | 103,88 | 112,65 | 109,27 | 91,35  | 106,48 | 113,10 | 111,75 | 103,01 |
| CS extr.                | 217,99 | 281,09 | 91,48 | 106,46 | 137,49 | 170,61 | 159,70 | 153,44 | 133,21 | 142,21 | 152,52 | 129,07 | 156,27 |

**ESCALA DE DESEMPEÑO**

|          |       |        |             |           |
|----------|-------|--------|-------------|-----------|
| Adecuado | Medio | Ligero | No presentó | Sin datos |
|----------|-------|--------|-------------|-----------|

**PERIODOS TERMICOS**

|      |                       |        |                       |
|------|-----------------------|--------|-----------------------|
| Frío | Transición Frío-Calor | Cálido | Transición Calor-Frío |
|------|-----------------------|--------|-----------------------|

En las gráficas mensuales se observa que las mayores velocidades en la CS, se da en los momentos de menor velocidades en la salida del IC, esto se debe a que en la CS se alcanzan mayores velocidades cuando ésta presenta mayor temperatura por la radiación solar directa captada en la pared acumuladora, sin embargo, este incremento en las velocidades genera que sea más irregular en comparación con el desempeño nocturno, en el que las velocidades son más estables; que es lo observado en las gráficas diarias.

En el resumen se muestran los datos obtenidos en la entrada del IC durante los meses de diciembre a marzo, a causa de problemas técnicos que presentó el sensor ubicado en dicha posición; sin embargo, el análisis sólo considera los datos anuales en la salida del IC y en la CS.

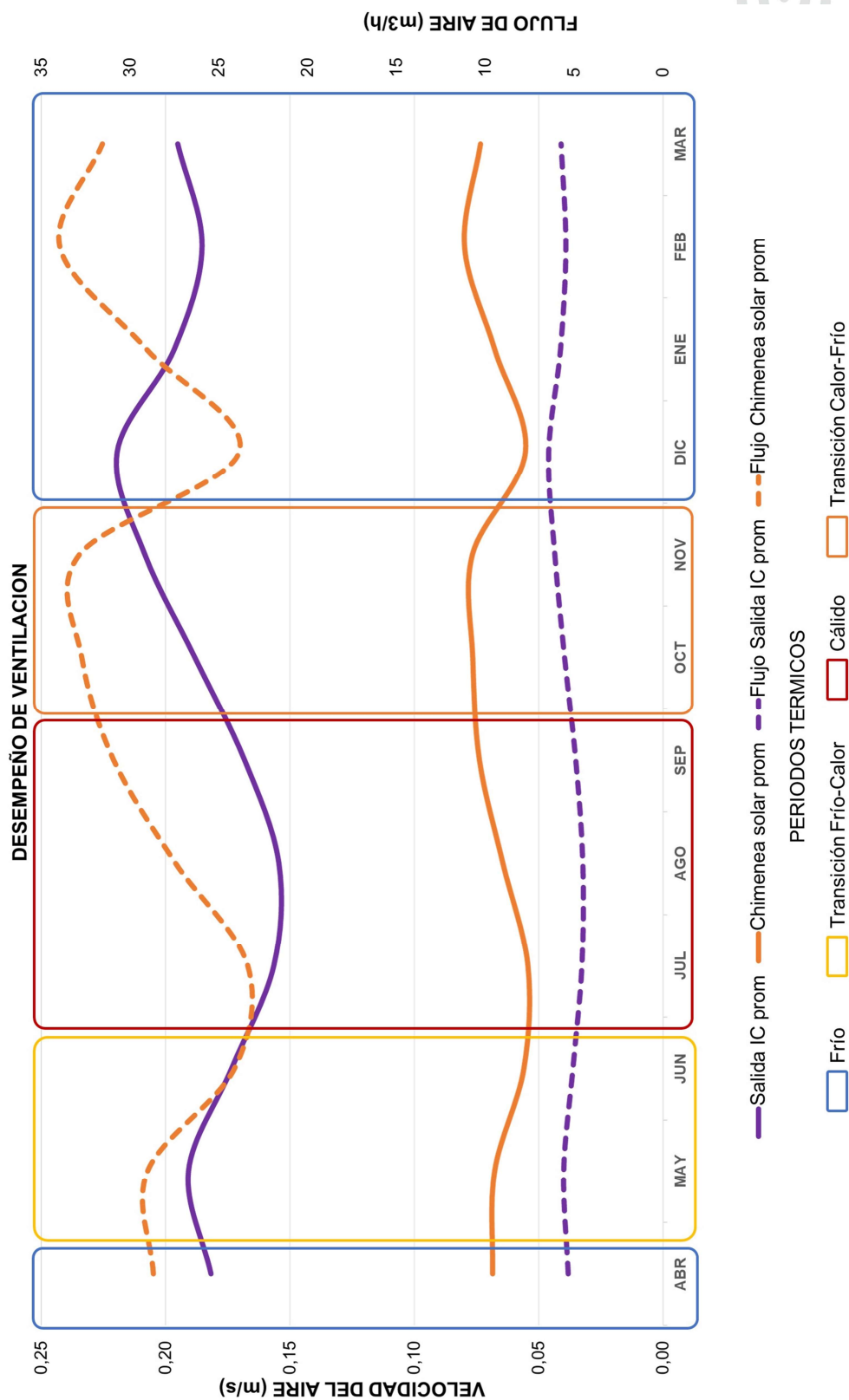
En cuanto al desempeño de la ventilación, se logra una ventilación constante durante las 24 horas, incluso estable durante las noches, con velocidad promedio anual de 0,18 m/s en la salida del IC, lo que favorece la renovación constante del aire para higiene y salud del espacio.

La chimenea solar, es el dispositivo clave para ello, ya que logra mantener la ventilación constante, con un flujo promedio anual de 28,97 m<sup>3</sup>/h, y máxima promedio de 103,01 m<sup>3</sup>/h. Incluso, se puede deducir que contribuye con la calidad del aire al interior.

Lo anterior, se ve reflejado en la Figura 75 que presenta el comportamiento de la ventilación en el sistema, reflejado en la salida del IC (morado) y en la CS (naranja), en aspectos de velocidad del aire (línea continua) y flujo de aire (línea discontinua).

**Figura 75**

*Desempeño de ventilación del sistema*





## 5.2 Día representativo

Como se pudo observar en el análisis de desempeño por variable, durante el mes de enero se presentó el mayor desempeño efectivo respecto a humidificación/deshumidificación (Figura 68, p. 113), por lo que se tomó un día representativo de dicho mes para analizar a fondo el comportamiento del sistema, con base en la relación de las tres variables estudiadas.

Al ser la humedad relativa la variable principal de la presente investigación y que ésta, a su vez, busca que el sistema pasivo favorezca la reducción de la humedad del ambiente exterior hacia el interior del espacio, la selección del día representativo se basó en identificar los valores máximos extremos de deshumidificación que se lograron entre la salida del IC y el ambiente exterior, por lo que se seleccionó el día 4 de enero, que presentó una deshumidificación máxima extrema de 35,9 % de HR. El utilizar los valores máximos para determinar el día representativo permite analizar y comprender cualquier día que se encuentre dentro de dichas condiciones ambientales.

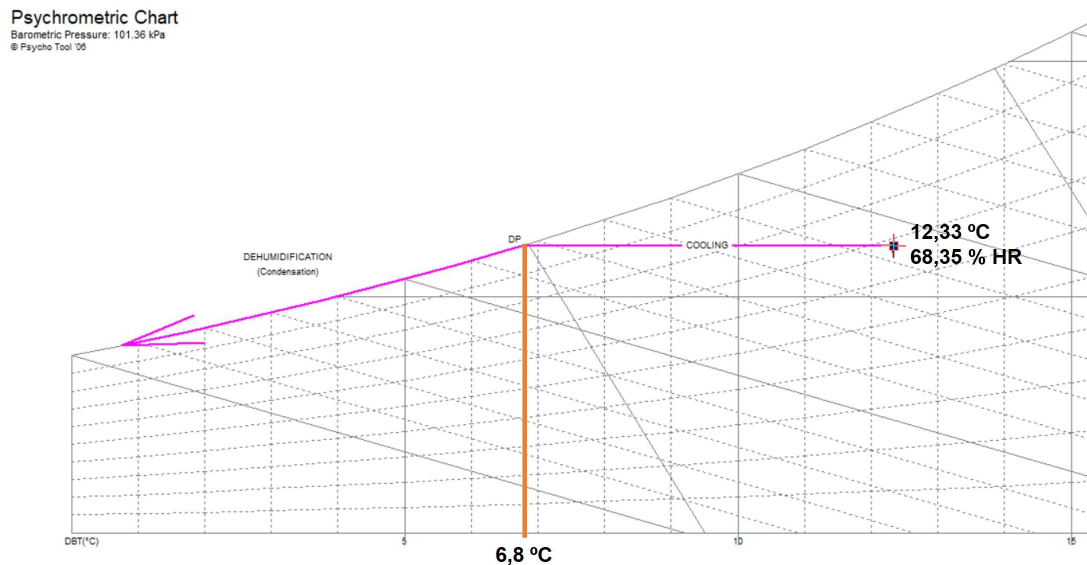
Al identificar en la carta psicrométrica la temperatura y humedad relativa promedio del día (12,33 °C y 68,35 %, respectivamente), se estableció la temperatura de punto de rocío en 6,8 °C (Figura 76), acorde con la estimada en el programa Climate Consultant © (Figura 33, p.65) para el mes de enero.

Sin embargo, se observó que, al comparar las temperaturas del suelo registradas durante el monitoreo del sistema con las estimadas mediante el programa TRNSYS© (Figura 77), en la primera se presentan promedios de 18,0°C; 20,0 °C y 21,0 °C para las profundidades de 1,5; 2,0 y 2,5 m, respectivamente; valores por encima de las estimadas en 12,0 K; 8,0 K y 5,0 K, respectivamente; por lo que, las temperaturas de suelo estimadas para el mes de enero, no corresponden con lo registrado, por lo tanto, no se logra el punto de rocío y, por ende, la condensación requerida en el primer nivel del intercambiador.



## Figura 76

### Carta psicrométrica del punto de rocío de un día representativo

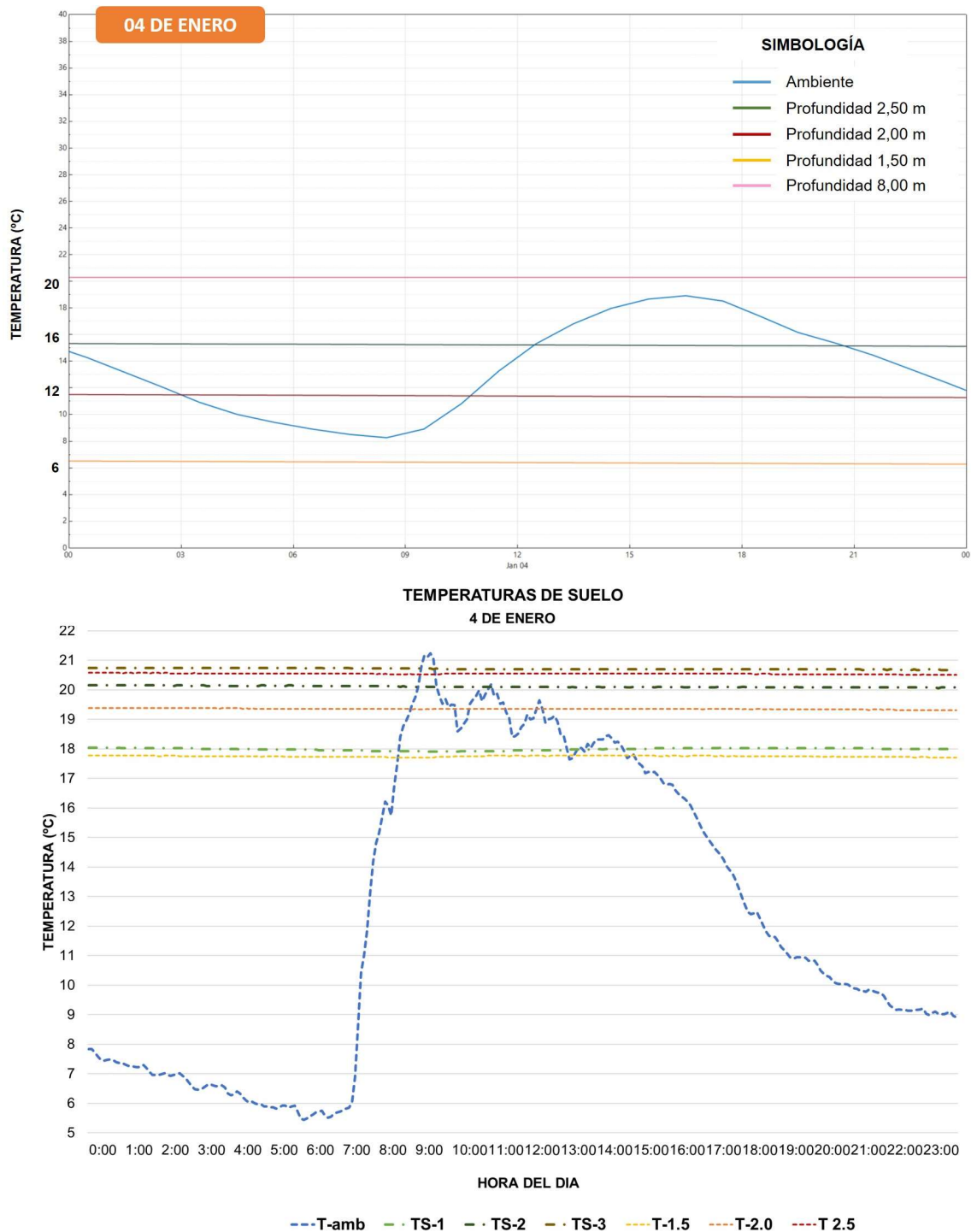


Además, al analizar el comportamiento de la temperatura de suelo de una profundidad a otra, se obtuvo que, en las estimadas, se presentó un incremento de 6,0 K entre la profundidad 1,5 m y la 2,0 m, y de 4,0 K, entre ésta y la profundidad 2,5 m; en tanto, en las temperaturas registradas, el incremento fue de 2,0 K y 0,6 K, respectivamente, por lo que el comportamiento térmico del suelo es diferente a lo esperado, se presenta una variación térmica estable con un promedio anual de 21,8 °C, similar a la estabilidad y temperatura promedio estimada para la profundidad de 8,0 m.

A pesar de ello, en esta misma comparación también se observó la influencia de la temperatura del suelo sobre la del interior de los ductos del IC en las profundidades analizadas, por lo que la transferencia de calor entre el suelo y las paredes del ducto permiten la estabilización térmica del aire al interior del ducto en dichas profundidades en comparación de la temperatura ambiente, ya que la diferencia promedio entre la temperatura de suelo y el interior del ducto fue de -0,24 K; -0,75 K y -0,17 K, respectivamente.

**Figura 77**

*Temperaturas de suelo estimadas-registradas*



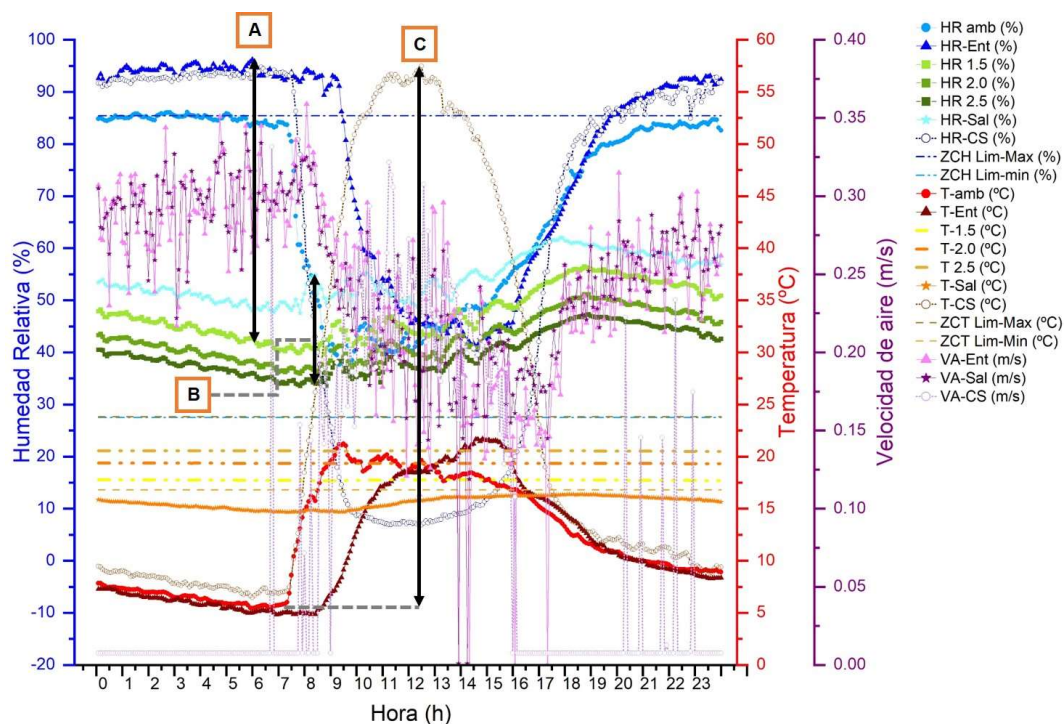
*Nota.* Arriba. Temperaturas de suelo estimadas Abajo. Temperaturas de suelo registradas y temperaturas del IC en las tres profundidades.

Con esta información, se realizó el análisis integral del sistema, que considera las tres variables de estudio y la relación entre ellas en tres aspectos principales: primero, la influencia térmica del suelo en el desempeño del sistema, al analizar el comportamiento higrotérmico y de ventilación, desde la entrada hasta la salida del IC respecto a las condiciones del ambiente exterior. Posteriormente, el impacto de las condiciones logradas por el sistema en el espacio experimental; y, por último, la comparación de las condiciones ambientales de este último con el espacio de control.

En la primer etapa del análisis, se obtuvo que la mayor deshumidificación se registró de la entrada a la profundidad 1,5 m con una reducción de 43,92 % de HR a las 6:00 h (Figura 78-A); de la entrada a las profundidades subsecuentes, se dio una reducción de HR como resultado del incremento de la temperatura observado en dichas profundidades, sin embargo, de la profundidad 2,5 m a la salida del IC, se presentó un incremento en la HR durante todo el día, el mayor se efectuó a las 7:00 h (Figura 78-B).

**Figura 78**

*Desempeño integral del sistema*



Es a las 8:00 h cuando se comienza a presentar condiciones de humidificación en la salida del IC respecto al ambiente (Figura 79-1), con una diferencia máxima de 16,82 % de HR a las 9:00 h; esta condición es debido a la presencia de la radiación directa del sol y por ende el incremento de la temperatura ambiente, la humedad relativa disminuye a 40% de HR; sin embargo, el sistema mantiene la HR por encima de la del ambiente durante el día, esto como resultado de la transferencia de masas que se da entre las paredes del ducto y el aire con menor HR, así como por la disminución de la temperatura del suelo y la transferencia de calor con el ducto, durante el trayecto vertical del ducto hacia el espacio experimental.

Debido, de igual manera, a la radiación solar, la temperatura en la chimenea solar incrementa hasta los 57,5 °C (Figura 78-C), por el calentamiento de las paredes de lámina de la chimenea, por lo que se crea una diferencia de presión entre el aire contenido en la chimenea y el del ambiente, lo que propicia la salida del aire caliente hacia el exterior, por lo tanto, se genera un incremento en la velocidad del aire a través de ella, sin embargo, ésta presentó mayor variación durante el día, tanto en la CS como en la entrada y salida del IC. Al observar el comportamiento de la velocidad del aire durante el periodo nocturno, se obtuvo una ventilación más continua y estable.

Otra característica observada es que, tanto la humedad relativa como la temperatura en las tres profundidades, se mantienen dentro del rango de confort establecido para el periodo frío, de 16,8 °C a 23,8 °C en el térmico y de 27,5 % a 85,4 % de HR en el higríco (Rincon *et al.*, 2017), por lo tanto, se logran condiciones de confort higrotérmico. Cabe mencionar que, a pesar de que se presentó un incremento de humedad relativa entre la profundidad 2,5 m y la salida del IC, este último se mantuvo dentro del rango de confort higríco; sin embargo, la temperatura a la salida del IC, resultado de la disminución desde la profundidad 2,5 m, se quedó por debajo del límite inferior de la zona de confort. A pesar de ello, se observa una estabilidad higrotérmica a la salida del IC respecto al ambiente exterior, ya que el ambiente presentó una amplitud térmica de 15,8 K e higríca de 48,47 %, mientras que en la salida del IC fue de 1,72 K. y 14,55 %, respectivamente.

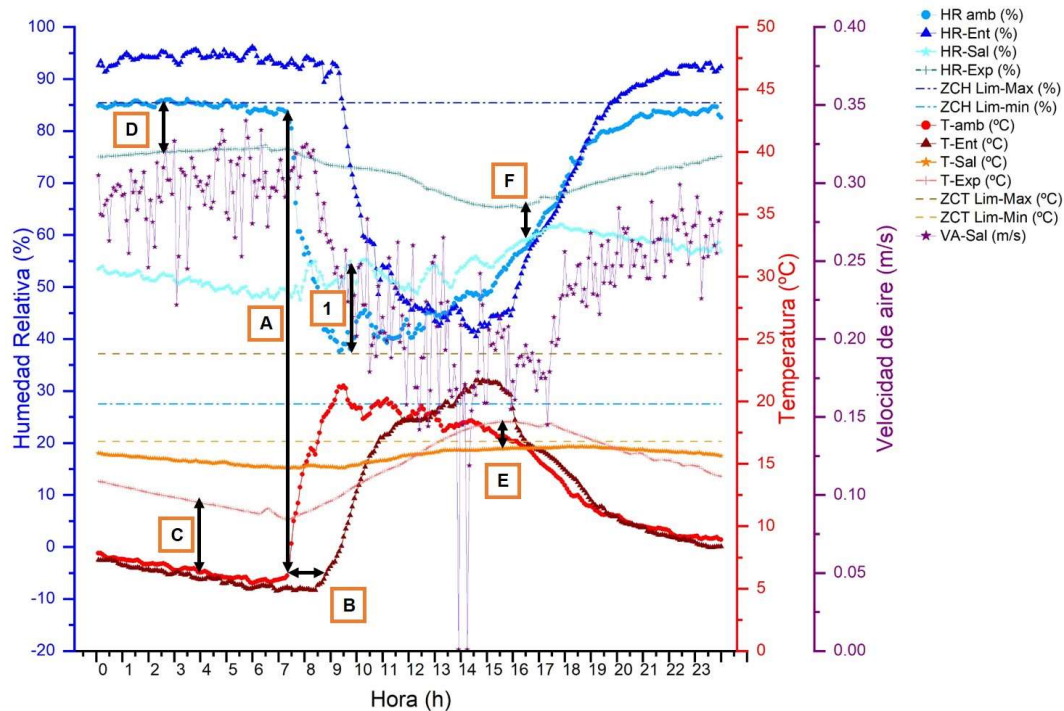
En la segunda etapa del análisis integral del sistema en un día representativo, se observó que hay una correspondencia en el comportamiento del sistema, en los momentos de elevada humedad relativa en el ambiente, que alcanzó el 85 % de HR, la temperatura es baja, alrededor de los 5,0 °C. El incremento de la temperatura y la respectiva reducción de humedad relativa en el ambiente se da alrededor de las 7:00 h (Figura 79-A) es en este momento, cuando la velocidad del aire disminuye y presenta un comportamiento con mayor amplitud, hasta las 16:00 h, momento en el que la humedad relativa se incrementa y la temperatura se reduce. Todo este comportamiento se relaciona con la presencia de la radiación solar, aspecto que se ve reflejado en la entrada del IC, en el que se observa un desfase de dos horas en la temperatura de entrada respecto al ambiente (Figura 79-B), debido al retardo térmico que ofrece el material del ducto; cabe señalar que el sensor de entrada se encuentra a 1,0 m de la boca del ducto. Además, la diferencia que se presentó entre la HR amb y HR-Ent se debe a que a partir del ingreso del ducto se presentan condiciones de transferencia de masas entre el aire ambiente, el aire dentro del ducto y las paredes internas del mismo.

En el espacio experimental se observó patrón de comportamiento similar a las condiciones del ambiente, con una diferencia de 5,5 K, en promedio, por encima de la temperatura ambiente (Figura 79-C), y de 8,8 % de HR por debajo de la humedad del ambiente (Figura 79-D), esto durante la noche, de las 17:00 h a las 7:00 h; mientras que, durante el día, con la presencia de la radiación solar, el patrón de comportamiento higrotérmico cambió radicalmente, el incremento de la temperatura y la directa reducción de humedad relativa se dio de manera paulatina en el espacio experimental en comparación con el cambio súbito del ambiente exterior; a partir de las 13:00 h se lograron condiciones térmicas por encima de la salida del IC, con una diferencia máxima de 2,14 K (Figura 79-E), en el caso de las condiciones hígricas, se mantuvieron todo el día por encima, sin embargo, con la reducción paulatina antes mencionada, se logra una diferencia mínima de 5.45% de HR a las 17:00 h (Figura 79-F). Por lo tanto, las condiciones logradas a la salida del IC, favorecen la estabilidad higrotérmica en el espacio experimental.



**Figura 79**

*Desempeño integral del sistema respecto al espacio experimental*

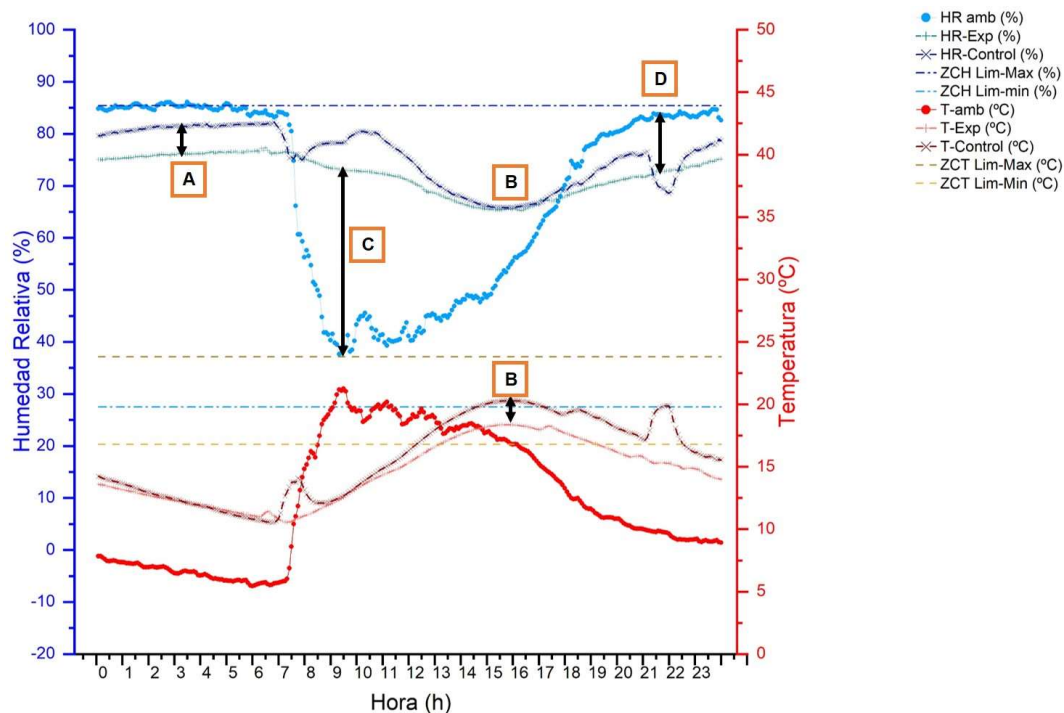


La comparación de las condiciones higrotérmicas entre el espacio experimental y el de control mostró que, durante la madrugada, la temperatura es casi igual, mientras que la HR se presentó, en el espacio experimental, 5 % de HR, en promedio, por debajo del espacio de control (Figura 80-A). Las condiciones térmicas en las que el espacio de control se encontró por encima del experimental, 1,6 °C en promedio, se dieron a partir de las 11:00 h y el máximo se alcanzó a las 16:00 h (Figura 80-B); sin embargo, las condiciones hígricas en el mismo momento, se presentaron iguales entre ambos espacios. Es necesario señalar en este punto que, en el espacio de control, por ser un espacio habitado y en uso regular, durante el periodo frío se implementaron acciones de adaptación térmica mediante el uso de equipos eléctricos; por lo tanto, el hecho de que ambos espacios mantengan condiciones de HR iguales por 3 horas, y estas presenten una diferencia de 5,45 % de HR respecto a la salida del IC (Figura 79-F), refiere que el sistema pasivo propicia condiciones similares al espacio que cuenta con dispositivos mecánicos para calefacción.



**Figura 80**

*Desempeño integral del sistema respecto a los espacios habitados*

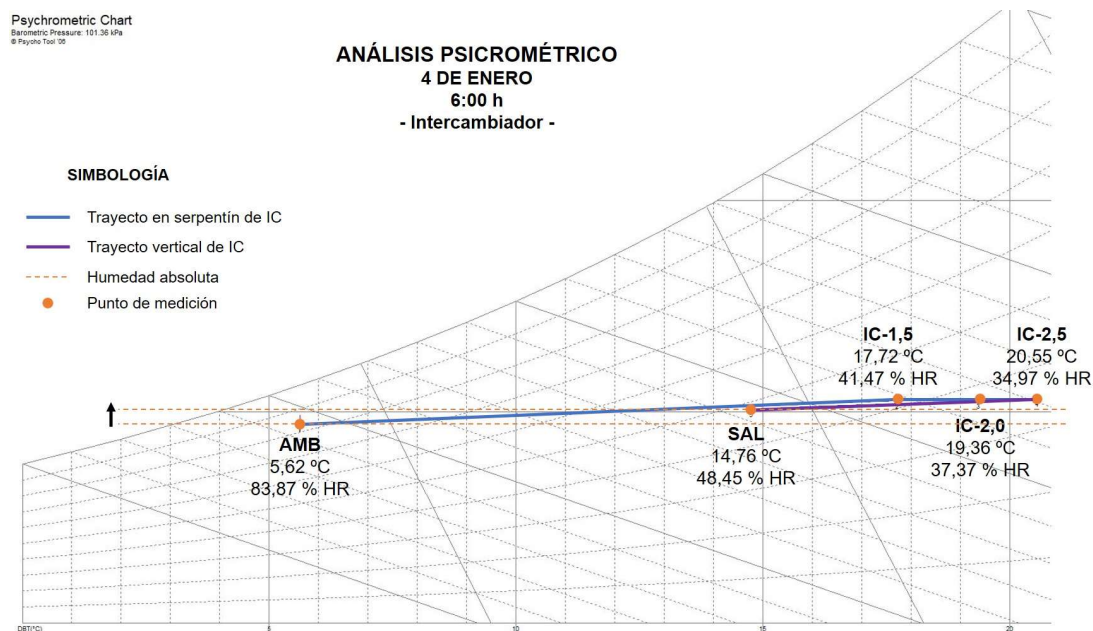


La mayor humidificación del espacio experimental respecto al ambiente (35,5 % de HR), se dio a las 9:00 h (Figura 80-C), mientras que la mayor deshumidificación, por la noche (11,6 % de HR), de las 17:00 a las 23:00 h (Figura 80-D); por lo que el sistema muestra mejor desempeño a la humidificación, sin embargo, la deshumidificación, aunque se da en valores más bajos, se presentó por mayor tiempo. Respecto al confort, ambos espacios se mantienen dentro del confort hídrico durante todo el día, mientras que, en relación al térmico, el espacio experimental se mantuvo por seis horas, de 13:00 a 18:00 h.

Al analizar el desempeño del sistema desde la carta psicrométrica, tomando como punto de análisis las 6:00 h, que es cuando se presentó la mayor reducción de HR en la profundidad 1,5 m respecto al ambiente exterior, se obtuvo que el desplazamiento entre cada uno de los puntos de análisis se dio principalmente de manera horizontal, con un incremento de la humedad absoluta entre el ambiente y la salida del IC de 4,70 g/kg a 5,07 g/kg (Figura 81).

**Figura 81**

*Carta psicrométrica del comportamiento del sistema a las 6:00 h*

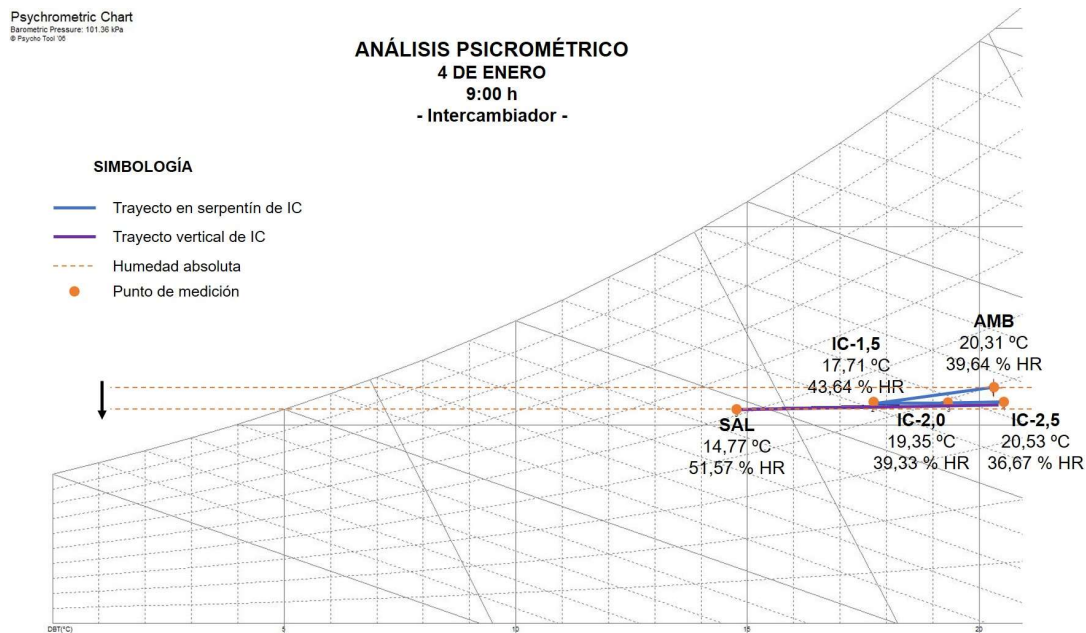


Al hacer el análisis a las 9:00 h (Figura 82), que es cuando se dio el mayor incremento de HR respecto al ambiente, tanto de la salida del IC como del espacio experimental (Figura 79 y Figura 80), se observó que la humedad absoluta se redujo de 5,94 g/kg en el ambiente a 5,40 g/kg en la salida del IC.

Por lo tanto, la reducción de humedad absoluta se dio cuando la humedad relativa a la salida del IC está por encima de la del ambiente, en este caso, con un incremento de 16,82 de HR la reducción de HA es de 0,54 g/kg, por ende, al tomar la humidificación promedio entre la salida del IC y el ambiente anual, la cual se muestra en la Figura 68 (p. 113), se tiene que, durante el año, el sistema logró la reducción de humedad absoluta.

**Figura 82**

*Carta psicrométrica del comportamiento del sistema a las 9:00 h*



Sin embargo, para efecto del objetivo principal del sistema, que es reducir los problemas de humedad, los cuales, establecen las condiciones de desarrollo del moho en rangos de humedad relativa, del 65 % al 80 % de HR (Singh *et al.*, 2011; Optis *et al.*, 2012); y temperatura, entre los 10 °C y 35 °C incluso hasta los 50 °C (OMS, 2009; Singh *et al.*, 2010; Optis *et al.*, 2012); el sistema logra condiciones de HR por debajo de los rangos de desarrollo del moho, un promedio anual de 55,0 % de HR en la salida del IC y de 58,3 % de HR en el espacio experimental, mientras que, en el periodo frío, los valores se mantienen por debajo del 60 % de HR. La temperatura en los mismos puntos, fue en promedio anual de 21,2 °C y 22,9 °C, respectivamente, y se mantuvo por debajo de los 20 °C en el periodo frío.

## DISCUSION

La investigación se centró principalmente en la evaluación del desempeño higríco del sistema, cuyo objetivo busca propiciar la reducción de la humedad del aire antes de ingresar al espacio interior; por lo tanto, la humedad es la variable física ambiental en la que se enfoca el análisis de los resultados y las conclusiones de esta investigación. La temperatura se analiza por la relación directa que ésta tiene sobre ella, así como por la influencia directa que tiene sobre el funcionamiento efectivo del intercambiador, debido a los mecanismos de transferencia de calor que se presentan entre este último y el suelo donde se coloca. En este mismo tenor, la velocidad del aire se analiza para determinar si el sistema funciona de manera adecuada en el aspecto de propiciar movimientos de aire en los dos dispositivos que conforman el sistema.

La eficiencia del sistema propuesto en relación al enfoque de control de humedad dado en esta investigación, como resultado de la combinación del intercambiador de calor y la chimenea solar, no es posible determinarla en función de otros autores, ya que no se encontró alguno con el mismo objetivo.

En los antecedentes analizados, diversos autores emplean intercambiadores de calor para climatizar térmicamente los espacios, enfocados principalmente al periodo de verano en climas cálidos. Si bien, el sistema pasivo abordado en esta investigación se concibió para atender los efectos de la humedad en el ambiente, de forma colateral se llevó a cabo la evaluación desde otros dos aspectos: el desempeño térmico y eólico que el sistema ofrece. En este sentido, es que los casos consultados en el estado del arte son contrastados en esta sección con los hallazgos obtenidos con el sistema propuesto.

Como se menciona, son pocos los estudios relacionados con la reducción de humedad de manera pasiva, la mayoría de ellos se enfocan a la implementación de materiales desecantes (Cruz *et al.*, 2006; Ríos, 2013; Hernández-Gómez *et al.*, 2018); sin embargo, al revisar diversos autores, se pudieron obtener algunas referencias de sistemas pasivos, como el de Li *et al.* (2014), que permiten establecer

un rango de 50 % a 70 % de humedad, observando que, en efecto, el sistema propuesto logra un rango de 53,7 % a 69,4 % de HR en el espacio experimental, durante el periodo térmico frío, y rangos menores, de entre 39,7 % y 56,8 % de HR justo en la salida del IC, a pesar de que el estudio realizado por Li *et al.* (2014) es para el periodo de verano en clima cálido-húmedo (Dfa).

En lo que respecta al desempeño higríco, el sistema propuesto logra una deshumidificación promedio anual a la salida del IC de 12,9 % de HR y de 14,1 % de HR durante el periodo frío, lo cual es una diferencia de 7,0 % de HR en comparación con los resultados obtenidos por Sakhri *et al.* (2020), quien presenta una reducción de 27,0 % de HR respecto al ambiente en un contexto de campo abierto durante el invierno en un clima árido cálido (BWh).

Los hallazgos logrados con la presente investigación concuerdan con Ghosal *et al.* (2004) citado en Rosa *et al.* (2018) en que el IC tiene mejor desempeño durante el periodo térmico frío (invierno) que en el resto de los que conforman el año.

En Rosa *et al.* (2018) y Rosa *et al.* (2020) se presenta un sistema de IC en condiciones similares al propuesto en esta investigación: clima mediterráneo (con clasificación Csb), en vivienda residencial. Como resultados de esta investigación, en la salida del IC se obtuvieron velocidades promedio de 0,18 m/s, con máximas extremas de 1,0 m/s en momentos específicos de octubre y enero, y una temperatura promedio anual de 21,2 °C, con un promedio en el periodo térmico frío de 18,3 °C, por lo que el desempeño del sistema, presenta un rendimiento similar al evaluado por Rosa *et al.* (2018) en el que, a pesar de que se enfoca a velocidades entre 1,0 m/s a 5,0 m/s con el uso de un dispositivo mecánico, al tomar de referencia la temperatura del aire a la velocidad de 1,0 m/s, ésta es próxima a 12,0 °C en periodo de calentamiento, y de 18,0 °C en periodo de enfriamiento. Por lo que, el dimensionamiento y materiales seleccionados para la chimenea solar, permiten que se de este desempeño favorable en el sistema, por lo tanto, el funcionamiento de la CS es adecuado conforme a lo planteado en el objetivo de la investigación, ya que favorece el movimiento de masas de aire y la consecuente succión de aire a través del IC.



Es importante señalar que las velocidades máximas extremas registradas se deben a que el sensor empleado para la presente investigación, tiene como límite de registro velocidades de 1 m/s, por ello, es necesario realizar un estudio más detallado acerca de las velocidades máximas que la CS puede lograr, mediante el cambio de sensor a uno que tenga mayor rango de medición. De igual manera, se puede llevar a cabo un análisis a fondo de la ventilación propiciada por el sistema en la CS, al integrar más puntos de análisis en el dispositivo: en la entrada, en el centro del recorrido y a la salida, y al cambiar el tipo de sensores a omnidireccional, para identificar si presenta flujo de aire en ambos sentidos.

El hecho de que el sistema pasivo propuesto presenta velocidades inferiores a 1,0 m/s, permite que el tiempo de permanencia del aire para favorecer la transferencia de calor sea adecuado para lograr el aumento en la temperatura del aire a la salida del IC, como lo mencionan Serageldin et al. (2016), en donde trabajan con ductos de menor diámetro y menor longitud. Por lo que, la longitud determinada para el sistema, es adecuada, ya que propicia que las velocidades dadas en combinación con el tiempo de permanencia favorezcan dicho aumento de temperatura.

En lo que respecta al flujo de aire, Khanal & Lei (2011) mencionan, en una comparativa de estudios, que la tasa de ventilación de 100 m<sup>3</sup>/h, equivalente a 4-5 ACH no es suficiente para satisfacer los niveles de confort para los usuarios, enfocados a un clima cálido. Por lo que 103,01 m<sup>3</sup>/h como máximo promedio son insuficientes para lograr criterios de confortabilidad, sin embargo, el sistema como tal, y la chimenea solar como dispositivo facilitador, permiten la ventilación constante en cuanto a flujo y velocidad.

Por otra parte, al observar los resultados obtenidos en la comparación de las temperaturas de suelo estimadas y registradas, a pesar de que estas últimas están por encima de lo esperado, las profundidades estimadas en la etapa de diseño del sistema, mediante la herramienta TRANSYS®, fueron adecuadas para propiciar la estabilidad térmica del aire, lo que conllevó a cumplir con el objetivo de la investigación, ya que se corrobora que a dichas profundidades se logra una estabilidad higrotérmica a la salida del IC en comparación con el ambiente exterior.



Sin embargo, al observar que el promedio anual de la temperatura de suelo registrada es similar a la estabilidad y temperatura promedio estimada para la profundidad de 8,0 m, es recomendable llevar a cabo un estudio exhaustivo de las temperaturas de suelo en diferentes profundidades en condiciones reales, para identificar en qué punto se logran las temperaturas necesarias para propiciar el punto de rocío y condensación.

Es necesario volver a señalar que la investigación se centró principalmente en el periodo térmico frío, por ello, el análisis por día representativo se hizo tomando un día del mes de enero; sin embargo, se puede hacer un análisis más exhaustivo, por día representativo de cada periodo térmico.

Cabe destacar que las condiciones ambientales del espacio experimental, están también influenciadas directamente por las condiciones ambientales externas, es decir, los mecanismos de transferencia de calor entre el ambiente y la envolvente del espacio, como el calentamiento de las superficies de muros y cubierta, debido a la radiación solar directa, así como por sus propiedades termofísicas; la transferencia de calor por convección entre el viento circundante y las superficies. Es por ello que el comportamiento higrotérmico del espacio experimental, no corresponde completamente al observado a la salida del IC, ni tampoco al observado en el ambiente exterior.

## CONCLUSIONES

Por lo anterior, como conclusiones generales se puede determinar que el sistema propuesto contribuye con el control de la humedad, parte de los objetivos específicos de la investigación (1.5.2 inciso e), pág.11), ya que logra una estabilidad hídrica y térmica respecto a las condiciones ambientales del exterior. Dicha estabilidad facilita que tanto la salida del IC como el espacio experimental se mantengan dentro de los rangos de confort higrotérmicos, por lo que se cumple con el requerimiento del sistema propuesto de no afectar de manera negativa las condiciones de habitabilidad de la vivienda de interés social (1.5.1, pág.10), sino que, por el contrario, las favorece. Y, cuando el nivel hídrico se mantiene por debajo de la zona de confort, se cumple el objetivo de lograr niveles de HR por debajo del 60 % (1.5.2 inciso g), pág.11), así como criterios de higiene y calidad del aire. Así mismo, al mantener un intercambio de aire constante durante todo el día, fenómeno adicional a los esperados y por lo que se considera un hallazgo dentro de la investigación, también contribuye a mejorar la calidad del aire en el espacio interior.

Es importante resaltar que el sistema funcionó de manera adecuada con base a las expectativas planteadas como propósito de la investigación, incluso cuando las condiciones hídricas exteriores se presentaron con magnitudes superiores o inferiores a las normalizadas ya que, como se mencionó en los apartados en los que se describe cada uno de los meses, las condiciones hídricas se presentaron por debajo y, las térmicas, por encima.

El desempeño del sistema fue favorable a lo largo del año, sin embargo, es pertinente resaltar que el mayor desempeño efectivo hídrico se presentó precisamente en el periodo térmico frío, analizado con mayor detalle a lo largo de este documento, ya que es en éste cuando las condiciones ambientales externas, aunadas a las características de uso de la vivienda, promueven el incremento de los problemas de humedad en interiores, mencionados al inicio de la investigación.

Se puede concluir, en consecuencia, que el conjunto de técnicas de diseño pasivas seleccionadas para conformar el sistema, así como el dimensionamiento

determinado para cada una (1.5.2 inciso c) y d), pág.11), son adecuados para lograr el objetivo principal de la investigación.

Además, a modo de complemento, durante el periodo frío (periodo más crítico en cuanto a humedad relativa se refiere en el sitio de estudio), se realizó un levantamiento visual del espacio experimental, identificándose que presenta condiciones favorables a la ausencia de daños por humedad (puntos o manchas negras), como los mostrados en la Figura 27 de la caracterización de las condiciones de la vivienda (cap. 3.2.1 pág. 57), y los cuales se observaban en años anteriores. Así mismo, al realizar la comparación respecto al espacio de control, tampoco se observaron daños en los materiales o la presencia de manchas negras o algún tipo de olor a humedad, por lo que, al recordar que en ésta se implementaron estrategias de adaptación térmica mediante el uso de dispositivos mecánicos tanto para calefacción como para refrigeración del espacio, la función del sistema propuesto es aceptable.

Aunado a lo anterior, se da una aceptación psicofisiológica por parte del ocupante del espacio intervenido, a partir de la apreciación subjetiva a lo largo del periodo de evaluación. Sin embargo, refiere que la CS ocasiona un incremento del ruido del exterior, que puede llegar a genera cierto grado de molestias en momentos específicos, por lo que esto puede ser un aspecto a mejorar.

Desarrollar un sistema pasivo para implementarse en viviendas de interés social, implica más aspectos que el simple funcionamiento adecuado del mismo ya que, debido a las características propias del nivel socioeconómico al que va dirigido este tipo de viviendas, es importante considerar que sea asequible, así como de instalación práctica o sencilla, que no represente una inversión excesiva o un impacto económico continuo para el usuario.

El construir el sistema, objeto de estudio de la presente investigación, e implementarlo en una vivienda existente y en uso, permitió analizar el desempeño del mismo en condiciones reales, estimar el impacto económico que implica directamente en el usuario y determinar la viabilidad técnica, económica y operativa,

principalmente, que la implementación del sistema representa en viviendas de interés social.

Dada la nula demanda energética que requirió la operatividad del sistema es posible vislumbrar una eficiencia energética en la vivienda, ya que elimina el uso de equipos mecánicos para su funcionamiento. Por lo tanto, el sistema puede ser utilizado como parte de proyectos net zero, tanto en su enfoque principal de control de humedad como para la estabilización térmica.

El costo de la implementación del sistema, como estrategia correctiva de acondicionamiento de viviendas construidas y habitadas, fue, en promedio, de \$40,000.00 mn (cuarenta mil pesos 00/100 moneda nacional) —para 2020, cuando se ejecutó el sistema—; por lo que se estima un periodo de amortización de entre 8 y 10 años, aproximadamente, a partir del ahorro económico que se estaría presentando con la reducción de la demanda energética si se emplearan sistemas convencionales de climatización para los espacios. Por lo anterior, se advierte una reducción del costo si el sistema se implementa desde la etapa de proyecto en viviendas de producción en serie, pues el precio del material se reduce por volumen, además los trabajos en campo (preparación, excavación e instalación) se pueden realizar a la par de la cimentación general de la vivienda. De igual manera, se evitan ciertos trabajos de demolición al ser una vivienda nueva.

Al realizar un comparativo de la viabilidad económica que implica la implementación del sistema de acuerdo con el nivel socioeconómico al que se enfoca, se podría concluir que al precio que actualmente se ofertan este tipo de viviendas, no se presenta un incremento significativo que perjudique la economía del usuario promedio que las adquiere. Cabe destacar que, además, es usual que para la adquisición de estas viviendas se empleen créditos hipotecarios de entre 20 y 25 años de financiamiento, por lo que, el pago diferido del sistema en estos periodos es simbólico, respecto a la implementación de sistemas activos de climatización.

Emplear la CS como dispositivo pasivo de succión del aire a través del IC, genera un ahorro energético anual de 144 kWh, aproximadamente, lo que le da al sistema la característica de super-eficiencia energética, ya que no requiere consumo alguno

de energía para su funcionamiento, en comparación con la implementación común de un IC, el cual utiliza extractores de bajo consumo. Aunado a ello, el evitar el uso de equipos de climatización mecánicos, representa un ahorro energético anual de 3 168 kWh. Por lo que, de forma acumulada, el sistema estudiado en esta investigación, se estima ahorra un total de 3 312 kWh respecto al uso de sistemas activos para el mismo fin.

Además, el mantenimiento es mínimo, ya que solo se requiere de limpieza general, en la CS, principalmente, para retirar partículas de polvo de la cubierta acristalada que contribuyan a un desempeño óptimo de la misma. Este mantenimiento puede darse junto con el mantenimiento común que se le da a la impermeabilización de una vivienda.

Hacer uso de un sistema completamente pasivo favorece la reducción de la demanda de energía de la vivienda, al eliminar el uso de equipos mecánicos para su funcionamiento. Por lo tanto, el sistema puede ser utilizado como parte de proyectos net zero, tanto en su enfoque principal de control de humedad como para la estabilización térmica.

Al implementar el sistema en una vivienda no afecta su morfología ni su estructura debido a sus dimensiones y peso, por lo tanto, las modificaciones o alteraciones que se realizan para su implementación en una vivienda existente, son mínimas y de bajo impacto. En el caso de vivienda nueva, no requiere algún tipo de estructura especial.

Así mismo, es fácil adaptarlo a la tipología típica de la vivienda de interés social, las cuales se caracterizan por terrenos pequeños con un área de estacionamiento al frente. Solo es necesario respetar los criterios básicos para la implementación del sistema: mantener radiación solar directa sobre la superficie donde se coloque el IC, para garantizar la influencia de la temperatura del suelo sobre el IC; el tipo de material de los dispositivos, el dimensionamiento tanto del IC (diámetro, longitud) y de la CS (espesor, separación, longitud, inclinación), cubierta disponible que permita orientar la CS al sur.

El precio del sistema es accesible debido a la facilidad de adquisición que presentan los materiales utilizados en su construcción, además de que no requiere de mano de obra especializada, excepto para el manejo de los materiales que conforman la CS, que regularmente se trabajan en talleres especializados.

Por lo tanto, se concluye que el sistema pasivo, objeto de esta investigación, es efectivo para reducir los problemas de humedad en espacios interiores, al propiciar las condiciones de humedad relativa y temperatura recomendadas por la OMS para la reducción de los problemas de humedad, y lograr la reducción de humedad absoluta; aunado a que favorece las condiciones de habitabilidad en la vivienda de interés social. Es necesario resaltar que la efectividad se da en un espacio habitado, por lo que las afectaciones que el uso del espacio podría significar en caso de haber realizado un experimento controlado al 100%, sí influyen directamente en el comportamiento y desempeño del sistema. Esto, en conjunto con la viabilidad técnica y económica mencionadas anteriormente, permite que la implementación en viviendas existentes y nuevas sea más asequible.



## LINEAS DE INVESTIGACION FUTURA

A continuación, se presentan alternativas de investigación futura, que podrían derivar de la continuidad de la presente investigación, en el ánimo de profundizar en los fenómenos termofísicos y energéticos que de ella puedan resultar:

- Análisis del costo-beneficio del consumo energético entre la vivienda experimental y la de control, respecto al uso de dispositivos eléctricos para la climatización del espacio habitado.
- Estudio del desempeño del sistema pasivo combinado con el uso de ventilación natural por medio de ventanas, específicamente en el periodo térmico cálido.
- Variación térmica en la profundidad del suelo por cambio de material en la superficie del sustrato en el que se ubica el IC.
- Evaluación de un sistema con las mismas características escalado para cubrir la totalidad de espacios habitables de la vivienda.
- Evaluación del comportamiento de la CS en diferentes niveles estratificados según el concepto del efecto Stack.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso Monterde, M. (2014). Guías de Sostenibilidad. Guía de Estrategias de Diseño Pasivo para la edificación. In M. Alonso Monterde (Ed.), *Foro para la Edificación Sostenible de la Comunitat Valenciana - Mesa de Estrategias de Diseño Sostenible* (1a ed.). Instituto Valenciano de la Edificación.
- American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers [ANSI/ASHRAE] 62.2. (2019). *Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings*.  
[https://ashrae.iwrapper.com/ASHRAE\\_PREVIEW\\_ONLY\\_STANDARDS/STD\\_62.2\\_2019](https://ashrae.iwrapper.com/ASHRAE_PREVIEW_ONLY_STANDARDS/STD_62.2_2019)
- ASHRAE. (1992). *ASHRAE PSYCHROMETRIC CHART NO. 1*.  
<https://www.ashrae.org/File Library/Technical Resources/Bookstore/UP3/SI-1.pdf>
- Badescu, V., & Isvoranu, D. (2011). Pneumatic and thermal design procedure and analysis of earth-to-air heat exchangers of registry type. *Applied Energy*, 88(4), 1266–1280. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.019>
- Beguín, H., & Nolard, N. (1994). Mould biodiversity in homes I. Air and surface analysis of 130 dwellings. *Aerobiologia*, 10(2–3), 157–166.  
<https://doi.org/10.1007/BF02459231>
- Bordoloi, N., Sharma, A., Nautiyal, H., & Goel, V. (2018). An intense review on the latest advancements of Earth Air Heat Exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89(March), 261–280.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.056>
- Brant, D. (2016). *Fundamentals of Psychrometrics (SI)* (2nd ed.). ASHRAE.
- Burton, S. (2004). *Coolhouse Final Technical Report. Energie Demonstration Project NNE5-1999-193*.
- Camous, R., & Watson, D. (1983). *El habitat bioclimático. De la concepción a la construcción*. GGili.
- CDC. (2019). *Datos básicos sobre el moho (hongos)*.  
<https://www.cdc.gov/mold/es/faqs.htm>
- Chel, A., & G.N.Tiwari. (2009). Performance evaluation and life cycle cost analysis of earth to air heat exchanger integrated with adobe building for New Delhi composite climate. *Energy and Buildings*, 41(1), 56–66.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.07.006>
- CONAVI. (2017). Código De Edificación De La Vivienda. In CONAVI.
- Cruz, A., Hernández, V., Bonifacio, H., & Morillón, D. (2006). Enfriamiento y Deshumidificación pasiva de una casa habitación para la localidad de Bahía de Banderas, Jalisco. In UNAM. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Delgado, J. M. P. Q., de Freitas, V. P., Guimarães, A. S., & Ferreira, C. (2013). Controlled relative humidity in crawl spaces: A new treatment methodology. *Structural Survey*, 31(2), 139–156.  
<https://doi.org/10.1108/02630801311317545>
- Duraković, B. (2020). *PCM-Based Building Envelope Systems*.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-38335-0>

- Elghamry, R., & Hassan, H. (2020). Impact a combination of geothermal and solar energy systems on building ventilation, heating and output power: Experimental study. *Renewable Energy*, 152, 1403–1413. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.107>
- García, E. (2001). *Climas de México*. CONABIO. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/layouts/clima1mgw.png>
- García, E. (2004). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen* (5ta ed.). Instituto de Geografía-UNAM. [http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo\\_siglo21/serie\\_lib/modific\\_al\\_sis.pdf](http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf)
- Ghosal, M. K., Tiwari, G. N., & Srivastava, N. S. L. (2004). Thermal modeling of a greenhouse with an integrated earth to air heat exchanger: An experimental validation. *Energy and Buildings*, 36(3), 219–227. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.10.006>
- Gonzalez-Caceres, A., Bobadilla, A., & Karlshøj, J. (2019). Implementing post-occupancy evaluation in social housing complemented with BIM: A case study in Chile. *Building and Environment*, 158(May), 260–280. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.05.019>
- Grosso, M., & Raimondo, L. (2008). Horizontal air to-earth heat exchangers in Northern Italy - Testing, design and monitoring. *International Journal of Ventilation*, 7(1), 1–10. <https://doi.org/10.1080/14733315.2008.11683794>
- Hernández-Gómez, V. H., OLVERA-GARCÍA, O., RINCÓN-MALTOS, G., & SANDOVAL-CURMINA, V. (2018). Propuesta de sistema pasivo automatizado para el acondicionamiento del aire en casa habitación. *Revista de Ingeniería Innovativa*, 2(5), 9–17. [http://www.ecorfan.org/republicofperu/research\\_journals/Revista\\_de\\_Ingenieria\\_a\\_Innovativa/vol2num5/Revista\\_de\\_Ingenieria\\_Innovativa\\_V2\\_N5\\_2.pdf](http://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Ingenieria_a_Innovativa/vol2num5/Revista_de_Ingenieria_Innovativa_V2_N5_2.pdf)
- Hinz, E., González, E., De Oteiza, P., & Quiros, C. (1986). Proyecto Clima y Arquitectura - Vol. 3. In *Proyecto Clima y Arquitectura*.
- Huerta, Y. (2018). *Manual de diseño pasivo para el arquitecto: Un reflejo del análisis climático y bioclimático de Ensenada, Baja California*. Universidad Autónoma de Baja California.
- IMIP. (2009). *Programa de desarrollo urbano de centro de población de Ensenada 2008-2030*. <http://imipens.org/wp-content/uploads/2012/04/PDUCEP-E-2030-Ene-2009.pdf>
- International Organization for Standardization [ISO] 7726. (1998). *Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities*.
- Jansz, J. (2017). Sick Building Syndrome. In *International Encyclopedia of Public Health* (2a ed., Vol. 6). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803678-5.00407-0>
- Jiménez-Xamán, C., Xamán, J., Gijón-Rivera, M., Zavala-Guillén, I., Noh-Pat, F., & Simá, E. (2020). Assessing the thermal performance of a rooftop solar chimney attached to a single room. *Journal of Building Engineering*, 31(February). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101380>
- Khabbaz, M., Benhamou, B., Limam, K., Hollmuller, P., Hamdi, H., & Bennouna, A. (2016). Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger for

- air cooling in a residential building in hot semi-arid climate. *Energy and Buildings*, 125, 109–121. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.071>
- Khanal, R., & Lei, C. (2011). Solar chimney-A passive strategy for natural ventilation. *Energy and Buildings*, 43(8), 1811–1819. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.035>
- Kreider, J., Curtiss, P., & Rabl, A. (2010). Psychrometrics, Comfort and Health. In *Heating and cooling of buildings. Design for Efficiency* (2nd ed., pp. 111–181). CRC Press Taylor & Francis Group.
- Li, D. W., & Yang, C. S. (2004). Fungal contamination as a major contributor to sick building syndrome. *Advances in Applied Microbiology*, 55(February 2004), 31–112. [https://doi.org/10.1016/S0065-2164\(04\)55002-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2164(04)55002-5)
- Li, H., Yu, Y., Niu, F., Shafik, M., & Chen, B. (2014). Performance of a coupled cooling system with earth-to-air heat exchanger and solar chimney. *Renewable Energy*, 62, 468–477. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.08.008>
- Marsh, A. (2020). *Givoni Bioclimatic Chart*. <https://drajmarsh.bitbucket.io/psychro-chart2d.html>
- OMS. (2018). *Micotoxinas*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mycotoxins>
- Onset Computer Corporation. (2019). *HOBOWare* (3.7.18).
- Optis, M., Shaw, K., Stephenson, P., & Wild, P. (2012). Mold growth in on-reserve homes in Canada: The need for research, education, policy, and funding. *Journal of Environmental Health*, 74(6), 14–21.
- Organización Panamericana de la Salud. (2001). Vivienda saludable. Calidad de las condiciones de la vivienda y calidad de vida. *Posición OPS Sobre Políticas de Salud En La Vivienda*, 82, 16.
- Pakari, A., & Ghani, S. (2019). Performance evaluation of a near-surface earth-to-air heat exchanger with short-grass ground cover: an experimental study. *Energy Conversion and Management*, 201(July), 112163. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112163>
- Polade, S. D., Gershunov, A., Cayan, D. R., Dettinger, M. D., & Pierce, D. W. (2017). Precipitation in a warming world: Assessing projected hydro-climate changes in California and other Mediterranean climate regions. *Scientific Reports*, 7(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11285-y>
- Restrepo, A., Alberto, C., Echeverri, L., Andres, C., Rosero, V., & Angel, M. (2007). Pathologies by humidity in the materials for construction. *Scientia Et Technica Scientia et Technica Año XIII*, 36(36), 343–347. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84903661>
- Rincón-Martínez, J. C., Bojórquez, G., Calderón Aguilera, C., & Fuentes Freixanet, V. (2017). Confort térmico adaptativo: Un estudio en la transición térmica del periodo frío al cálido en la ciudad de Ensenada. *Memorias IX-2017 Congreso de La Red Latinoamericana de Ciencias Ambientales*, 28.
- Rincón-Martínez, J. C., Martínez-Torres, K. E., González-Trevizo, M. E., & Fernández-Melchor, F. (2020). Modelos matemáticos para estimar el confort térmico adaptativo en espacios interiores: Un estudio en la transición térmica de Ensenada, B.C. *Ingeniería Revista Académica de La Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán*, 24(1), 1–17.

- <http://www.revista.ingenieria.uady.mx/ojs/index.php/ingenieria/article/view/186>
- Rincon, J., Bojorquez, G., Fuentes, V., & Calderon, C. (2017). Adaptive Thermal Comfort in Learning Spaces: A Study of the Cold Period in Ensenada, Baja California. *Journal of Natural Resources and Development*, 96–107. <https://doi.org/10.5027/jnrd.v7i0.12>
- Rincón Martínez, J. C., Martínez Torres, K. E., Rivera Torres, C., & Fernández Melchor, F. (2021). Influencia de la actividad metabólica en la sensación y la preferencia térmicas de las personas en espacios interiores. *Memorias Del Congreso Internacional de Arquitectura y Diseño ( CIAD )*, 22–26.
- Ríos, E. (2013). *Diseño y Análisis de un sistema cuasi-pasivo para la deshumidificación de espacios* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/6410/Tesis.pdf?sequence=1>
- Rolle-Kampczyk, U., Müller, A., Diez, U., Rehwagen, M., Schwenke, A., Metzner, G., & Herbarth, O. (2000). Mycotoxins in house dust- an underestimated problem ? Rolle-Kampczyk ~ U , M ( iller I A , Diez I U , Rehwagen ~ M , Schwenke2A , Metzner 3 G , Herbarth I 0 1 UFZ Centre for Environmental Research Leipzig-Halle , Department of Human Exposure Research and. *Mycotoxin Research*, 16, 100–104.
- Rosa, N., Santos, P., Costa, J. J., & Gervásio, H. (2018). Modelling and performance analysis of an earth-to-air heat exchanger in a pilot installation. *Journal of Building Physics*, 42(3), 259–287. <https://doi.org/10.1177/1744259117754298>
- Rosa, N., Soares, N., Costa, J. J., Santos, P., & Gervásio, H. (2020). Assessment of an earth-air heat exchanger (EAHE) system for residential buildings in warm-summer Mediterranean climate. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 38(January), 100649. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100649>
- Sakhri, N., Menni, Y., & Ameer, H. (2020). Experimental investigation of the performance of earth-to-air heat exchangers in arid environments. *Journal of Arid Environments*, 180(March), 104215. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104215>
- Saleem, A. A., Bady, M., Ookawara, S., & Abdel-Rahman, A. K. (2016). Achieving standard natural ventilation rate of dwellings in a hot-arid climate using solar chimney. *Energy and Buildings*, 133, 360–370. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.001>
- Santamouris, M., & Asimakopoulus, D. (1996). *Passive Cooling of Buildings*. James & James.
- Santamouris, M., & Kolokotsa, D. (2013). Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. *Energy and Buildings*, 57, 74–94. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.002>
- Sanz-Cobena, A., Lassaletta, L., Aguilera, E., Prado, A. del, Garnier, J., Billen, G., Iglesias, A., Sánchez, B., Guardia, G., Abalos, D., Plaza-Bonilla, D., Puigdueta-Bartolomé, I., Moral, R., Galán, E., Arriaga, H., Merino, P., Infante-Amate, J., Meijide, A., Pardo, G., ... Smith, P. (2017). Strategies for greenhouse gas emissions mitigation in Mediterranean agriculture: A review.



- Agriculture, Ecosystems and Environment*, 238(January 2017), 5–24.  
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.038>
- Sawhney, R. L., Buddhi, D., & Thanu, N. M. (1998). An experimental study of summer performance of a recirculation type underground airpipe air conditioning system. *Building and Environment*, 34(2), 189–196.  
[https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(98\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(98)00009-2)
- Senkpiel, K., Sassenberg, D., Keller, R., & Ohgke, H. (2000). Content of mycotoxins in conidiospores from mould in buildings. *Mycotoxin Research*, 16, 88–93. <https://doi.org/10.1007/BF02942990>
- Serageldin, A. A., Abdelrahman, A. K., & Ookawara, S. (2016). Earth-Air Heat Exchanger thermal performance in Egyptian conditions: Experimental results, mathematical model, and Computational Fluid Dynamics simulation. *Energy Conversion and Management*, 122, 25–38.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.053>
- SIDUE B.C. (2009). *Programa Sectorial de Vivienda de Baja California 2014-2019*.
- Singh, J. (2004). Environmental monitoring and the development of holistic sustainable conservation solutions - An Over view Key Words. *Environmental Monitoring of Our Cultural Heritage Sustainable Conservation Solutions*, 1–25.
- Singh, J., Yu, C., & Jeong, T. K. (2011). Building pathology - Toxic mould remediation. *Indoor and Built Environment*, 20(1), 36–46.  
<https://doi.org/10.1177/1420326X10392056>
- Singh, J., Yu, C. W. F., & Kim, J. T. (2010). Building pathology, investigation of sick buildings - Toxic moulds. *Indoor and Built Environment*, 19(1), 40–47.  
<https://doi.org/10.1177/1420326X09358808>
- Terr, A. I. (2009). Sick building syndrome: Is mould the cause? *Medical Mycology*, 47(SUPPL. 1), 217–222. <https://doi.org/10.1080/13693780802510216>
- Thiers, S., & Peuportier, B. (2008). Thermal and environmental assessment of a passive building equipped with an earth-to-air heat exchanger in France. *Solar Energy*, 82(9), 820–831. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.014>
- Trombe, A., Pettit, M., & Bourret, B. (1991). Air cooling by earth tube heat exchanger: Experimental approach. *Renewable Energy*, 1(5–6), 699–707.  
[https://doi.org/10.1016/0960-1481\(91\)90016-I](https://doi.org/10.1016/0960-1481(91)90016-I)
- Trombe, A., & Serres, L. (1994). Air-earth exchanger study in real site experimentation and simulation. *Energy and Buildings*, 21(2), 155–162.  
[https://doi.org/10.1016/0378-7788\(94\)90008-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(94)90008-6)
- Vaz, J., Sattler, M. A., Dos Santos, E. D., & Isoldi, L. A. (2011). Experimental and numerical analysis of an earth-air heat exchanger. *Energy and Buildings*, 43(9), 2476–2482. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.003>
- Vesper, S. J., Wymer, L. J., Meklin, T., Varma, M., Stott, R., Richardson, M., & Haugland, R. A. (2005). Comparison of populations of mould species in homes in the UK and USA using mould-specific quantitative PCR. *Letters in Applied Microbiology*, 41(4), 367–373. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2005.01764.x>
- Watt, D. S. (2007). *Building Pathology Principles and Practice* (Second). Blackwell.
- World Health Organization. (2009). *Who guidelines for indoor air quality: dampness and mould* (E. Heseltine & J. Rosen (eds.)). WHO Regional Office for Europe.



<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/164348/E92645.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Yarke, E. (2005). *Ventilación natural de edificios*. (E. Yarke (ed.)). nobuko.

## APÉNDICE A.

### Desempeño higrico mensual.

La interpretación inició con la caracterización higrica del mes de estudio presentada por Huerta (2018); posteriormente, se describen las condiciones de humedad registradas durante el periodo de evaluación para el mismo mes; por último, se realizó la interpretación del comportamiento higrico en cada una de las etapas del sistema, enfocándose principalmente en la relación entre el ambiente y la salida del IC, y su influencia respecto a las condiciones de humedad del espacio experimental. Esto último, a partir de la comparación de los resultados obtenidos entre el espacio experimental, el espacio de control y el ambiente exterior.

#### Periodo frío

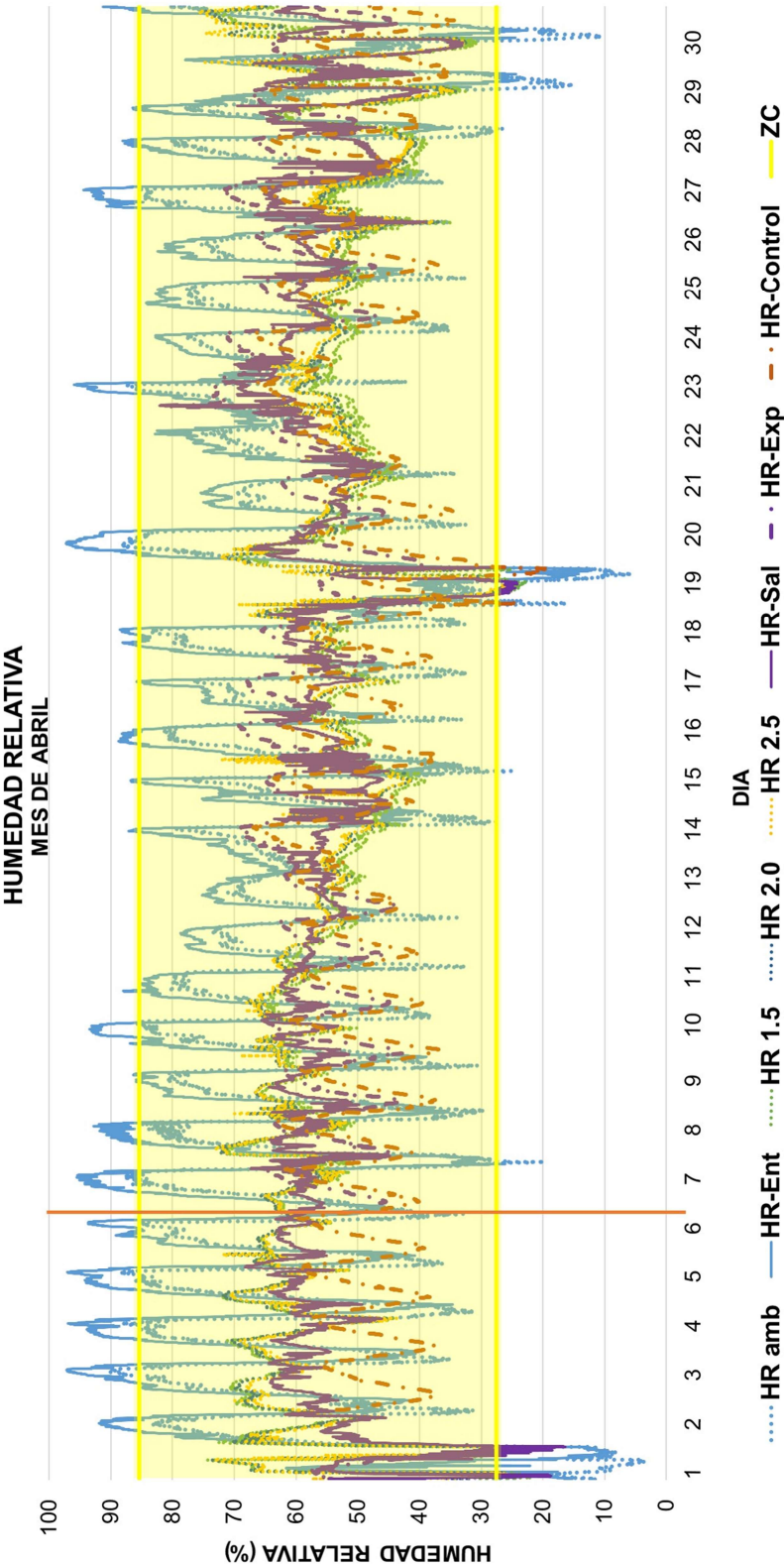
##### Abril

Con base en el análisis climático desarrollado por Huerta (2018), la ciudad de Ensenada presenta, durante este mes, una humedad relativa máxima promedio, una media y una mínima promedio de 90,5 %, 75,1 % y 52,4 %, respectivamente. Sin embargo, durante el periodo de evaluación del sistema, este mes presentó las magnitudes de 80,4 %, 60,2 % y 31,4 %, respectivamente. Lo anterior, permite advertir que los valores recabados durante el periodo de evaluación se presentaron por debajo de las humedades obtenidas en la caracterización climática presentada, con una diferencia de 10,1 % de HR, de 14,9 % de HR y de 21 % de HR, respectivamente (Figura A 1).

Los momentos en los cuales se registraron niveles de HR denominados altos (HA), por encima del 70 %, representaron el 34 % del periodo evaluado, los cuales se presentaron principalmente de las 18:00 h a las 06:00 h. Por su parte, los momentos de baja humedad (HB), por debajo del 30% (Huerta, 2018), se presentaron entre las 07:00 h y las 12:00 h principalmente, el 5 % del periodo evaluado.

Figura A 1

Humedades relativas registradas en el mes de abril



Nota. La línea vertical naranja indica el inicio del periodo de análisis.

### ➤ Intercambiador

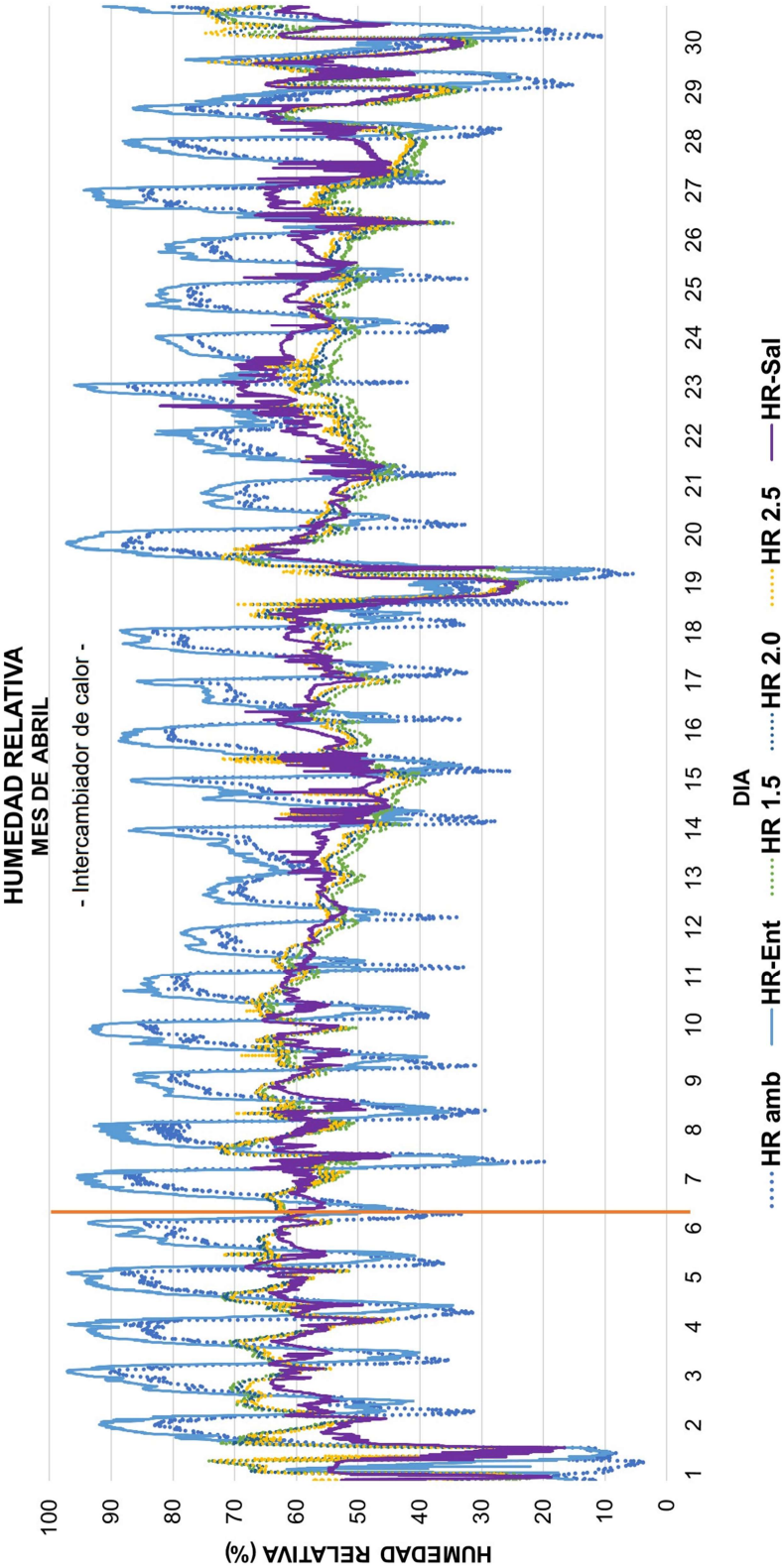
Al comparar la HR del ambiente con la de la salida del IC se observó que, durante los horarios en los que la HR en el ambiente es más elevada, el IC presentó condiciones de deshumidificación de 13,8 % de HR en promedio, las cuales representaron el 65,3 % del periodo evaluado. Por su parte, en los horarios de baja HR en el ambiente, el IC presentó condiciones de humidificación de 12,7 % de HR en promedio, las cuales representaron el 34,7 % de dicho periodo (Figura A 2).

En este sentido, es posible presumir que el desempeño efectivo del sistema en este mes osciló en un rango de 26,5 % de HR en promedio. No obstante, el promedio máximo de deshumidificación logrado fue de 19,4 % de HR (5,6 % de HR por encima del promedio) con un valor máximo extremo de 32,3 % de HR (18,5 % de HR por encima del promedio); por su parte, el promedio máximo de humidificación registrado fue de 26,3 % de HR (13,6 % de HR por encima del promedio), con un valor máximo extremo de 51,5 % de HR (38,8 % de HR por encima del promedio). Es posible advertir que, en este periodo, el sistema manifestó un mejor desempeño promedio a la deshumidificación, mientras que, al mismo tiempo observó un mejor desempeño extremo a la humidificación. Así mismo, la deshumidificación se presentó la mayor cantidad del tiempo evaluado.

Además, se logró una deshumidificación efectiva promedio del 21,6 % de HR, desde la entrada del IC a la profundidad de 1,5 m, con un promedio máximo de 28,8 % de HR; de esta primera profundidad a la de 2,0 m la HR aumentó 2,1 % en promedio; mientras que, durante el recorrido de la segunda profundidad a la de 2,5 m lo hizo con un valor promedio de 0,9 % de HR. Por lo anterior, se pudo apreciar que la máxima deshumidificación en esta etapa del sistema, se presentó de la entrada a la primera profundidad del IC.

Figura A 2

Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de abril



Nota. La línea vertical naranja indica que inicia el periodo de análisis.

### ➤ Espacio habitado

Al analizar la influencia del sistema sobre el espacio experimental mediante la comparación de las características hídricas respecto al ambiente exterior (Figura A 3), se observó que, durante los horarios en los que dió lugar la mayor HR en el ambiente, el espacio experimental presentó condiciones de deshumidificación de 11,8 % de HR en promedio, lo cual representa el 64,5 % del tiempo, así como una magnitud máxima extrema de 34,7 % de HR (22,9 % de HR por encima del promedio). Mientras tanto, en los horarios en los que el ambiente registró la HR más baja, el espacio experimental presentó condiciones de humidificación de 14,7 % de HR en promedio el 35,5 % del tiempo, con una magnitud máxima extrema de 50,0 % de HR (35,3 % de HR por encima del promedio).

Ahora bien, al comparar estos resultados con los del espacio de control, se puede observar que, en este último, las condiciones de humedad se presentaron con menores valores respecto al espacio experimental; en promedio un 7,8 % de HR.

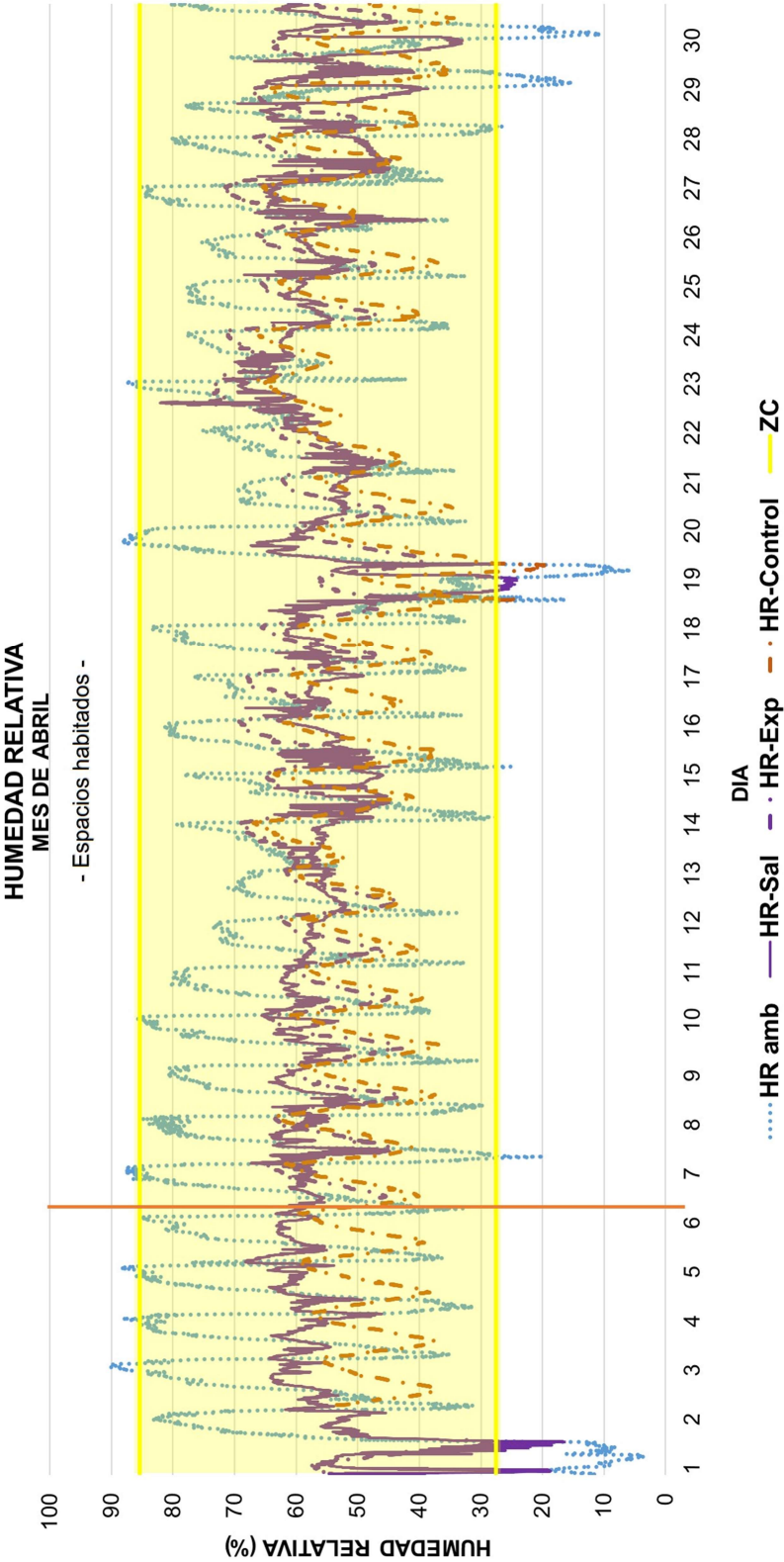
Lo anterior, debido a que el espacio de control estuvo habitado permanentemente durante el monitoreo del experimento y, por ende, influenciado directamente por las condiciones exteriores del ambiente, pues no se le aplicó algún tipo de modificación que alterara el uso común o típico de las viviendas analizadas en su estado natural (condiciones como las entregan las desarrolladoras de vivienda); además, que al ser un espacio habitado estuvo expuesto a acciones comunes de adaptación térmica como apertura de puertas y ventanas e, incluso, uso de dispositivos mecánicos, como ventiladores eléctricos.

Las condiciones de humidificación y deshumidificación, antes mencionadas, permitieron que el espacio experimental lograra una estabilidad dentro del rango de confort hídrico para el periodo frío, establecido en investigaciones en curso desarrolladas por Rincon *et al.* (2017), de 27,5 % a 85,4 % de HR, durante todo el periodo evaluado. De igual manera, el porcentaje de HR registrada a la salida del IC, se mantuvo en dicho rango, el 99 % de dicho periodo. Mientras que, el espacio experimental, presentó niveles de HR dentro del rango de confort el 98,9 % del tiempo.



Figura A 3

Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados – Abril



Nota. La línea vertical naranja indica que inicia el periodo de análisis.

## Periodo de transición frío-cálido

### Mayo

En el mes de mayo, de acuerdo a la caracterización climática presentada por Huerta (2018), la ciudad de Ensenada presenta una humedad relativa máxima promedio, una media y una mínima promedio de 90,9 %, 78,1 % y 63,0 %, respectivamente.

Sin embargo, para el mismo mes, la evaluación del sistema presentó magnitudes de 77,4 %, 61,4 % y 34,8 %, respectivamente. Lo anterior, permite advertir que nuevamente los valores recabados se presentaron por debajo de las humedades obtenidas en la caracterización climática (Figura A 4).

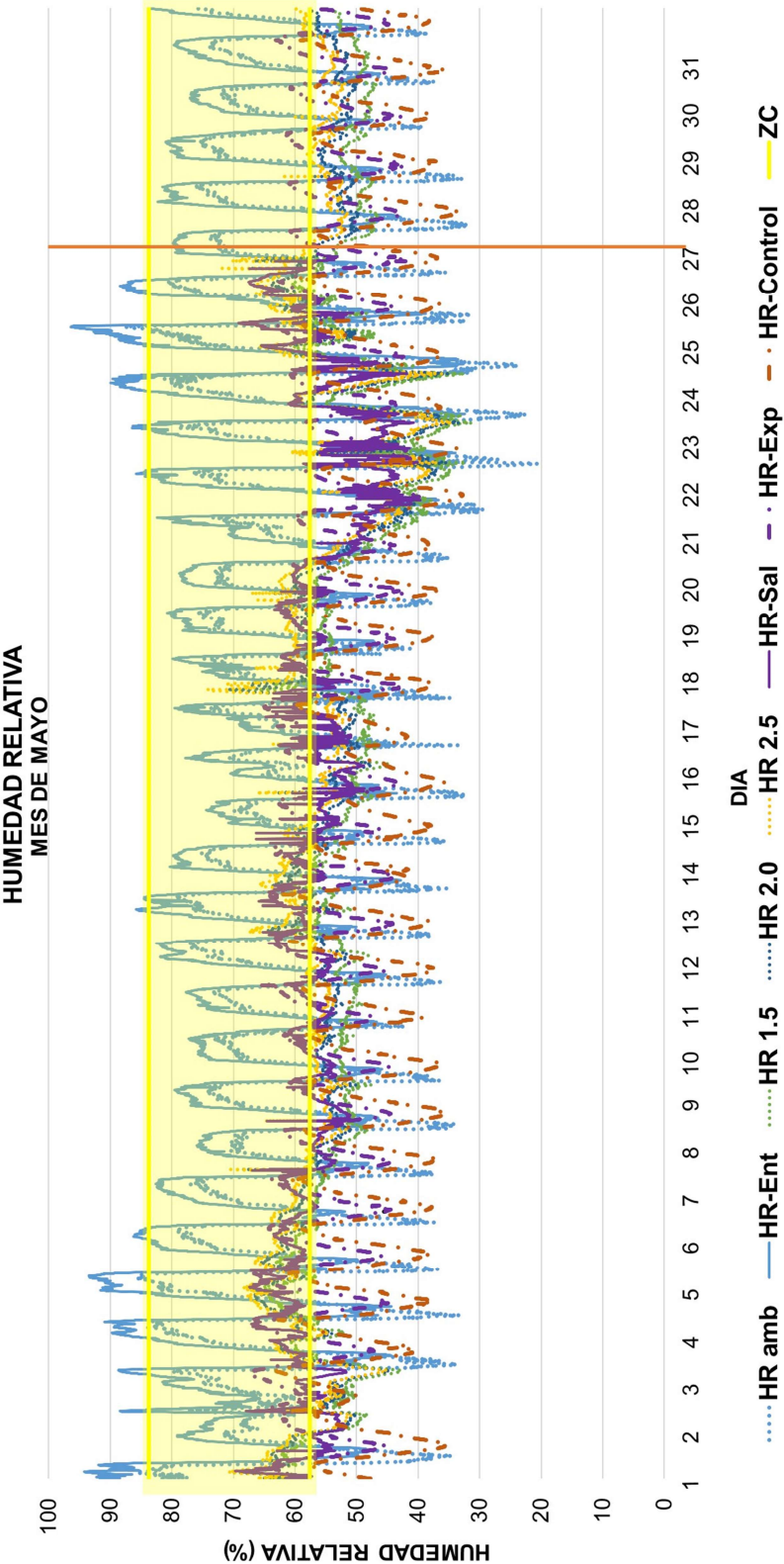
Durante dicho mes, las condiciones de elevada HR representaron el 34,2 % del periodo evaluado, las cuales se presentaron entre las 19:00 h y las 07:00 h, principalmente; mientras que las condiciones de baja HR, se presentaron el 1,6 % del periodo evaluado, entre las 08:00 h y las 10:00 h.

### ➤ Intercambiador

Al comparar la HR del ambiente con la de la salida del IC, en esta última se observaron condiciones de deshumidificación de 12,6 % de HR en promedio, las cuales representaron el 66,3 % del periodo evaluado; por su parte, las condiciones de humidificación fueron del 12,1 % de HR, en promedio; representando el 33,7 % de dicho periodo. Por lo tanto, el desempeño efectivo del sistema durante este mes osciló en un rango de 24,7 % de HR en promedio. No obstante, el promedio máximo de deshumidificación logrado fue de 20,3 % de HR (7,7 % de HR por encima del promedio) con un valor máximo extremo de 33,0 % de HR (20,4 % de HR por encima del promedio); por su parte, el promedio máximo de humidificación registrado fue de 16,1 % de HR (4,0 % de HR por encima del promedio), con un valor máximo extremo de 38,1 % de HR (26,0 % de HR por encima del promedio).

Figura A 4

Humedades relativas registradas el mes de mayo



Nota. La línea vertical naranja indica que concluye el periodo de análisis mensual

Al igual que en el mes de abril, se observó que el sistema, durante el mes de mayo, presentó un mejor desempeño promedio a la deshumidificación y un mejor desempeño extremo a la humidificación. Así mismo, la deshumidificación fue el proceso predominante la mayor parte del tiempo (Figura A 5).

Además, el sistema logró una deshumidificación efectiva promedio del 21,0 % de HR, desde la entrada a la profundidad de 1,5 m, con un valor promedio máximo de 30,8 % de HR. Se observó que, de esta primera profundidad a la de 2,0 m, la HR aumentó 2,8 % en promedio; mientras que, durante el recorrido de la segunda profundidad a la de 2,5 m, aumentó un promedio de 1,6 % de HR. Por lo tanto, nuevamente se observó que la máxima deshumidificación en esta etapa del sistema, se presentó de la entrada a la primera profundidad del IC.

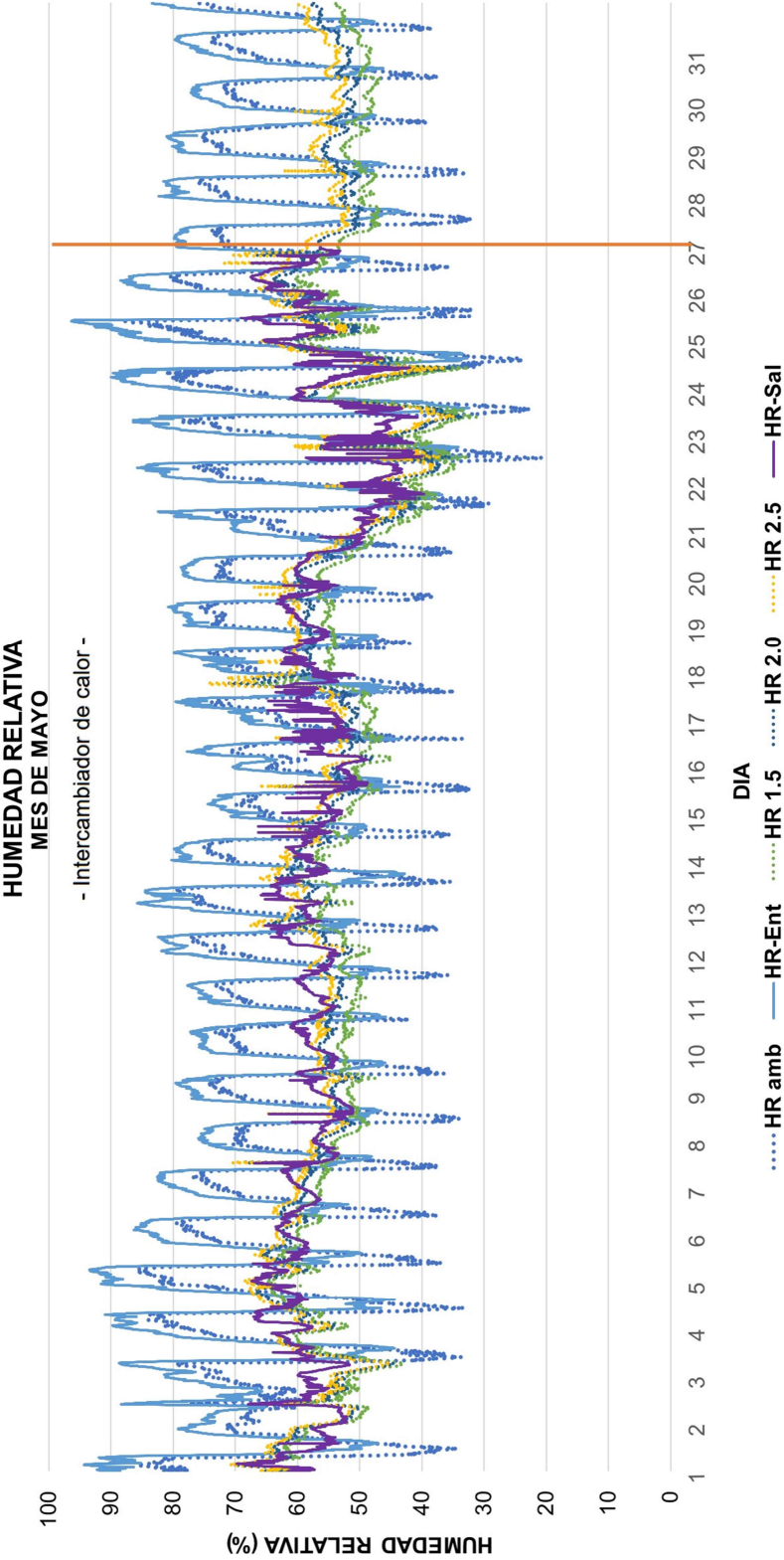
En los horarios de HR elevada en el ambiente, en el espacio experimental se presentaron condiciones de deshumidificación de 12,6 % de HR, en promedio, el 75,3 % del tiempo evaluado, y se registró un valor máximo extremo de 24,6 % de HR (12,0 % de HR por encima del promedio); mientras, el 24,7 % del tiempo restante, se desarrollaron condiciones de humidificación fueron de 12,5 % de HR en promedio, con una magnitud máxima extrema de 31,9 % de HR (19,4 % de HR por encima del promedio)

#### ➤ Espacio habitado

Al comparar los datos obtenidos con los del espacio de control se observó que, en este último, se presentaron condiciones de humedad menores, en promedio un 7,2 % de HR, esto debido a que, al igual que en el mes de abril, se tuvo influencia directa del ambiente exterior y se realizaron acciones de regulación térmica generales.

**Figura A 5**

*Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de mayo*



*Nota. La línea vertical naranja indica que concluye el periodo de análisis mensual*



En la Figura A 6 se puede observar que, el 41,7 % del periodo evaluado, el porcentaje de humedad relativa del espacio experimental se presentó por debajo del límite inferior de la zona de confort establecida para el periodo de transición frío-calor, la cual se encuentra en el rango de 57,6 % a 83,7 % de HR; mientras que, el espacio de control, lo estuvo el 8,3 % de dicho periodo. Por su parte, la salida del IC se mantuvo en dicho rango el 48,7 % del tiempo. Lo anterior, permitió advertir que el sistema propició una estabilidad hídrica en el espacio experimental.

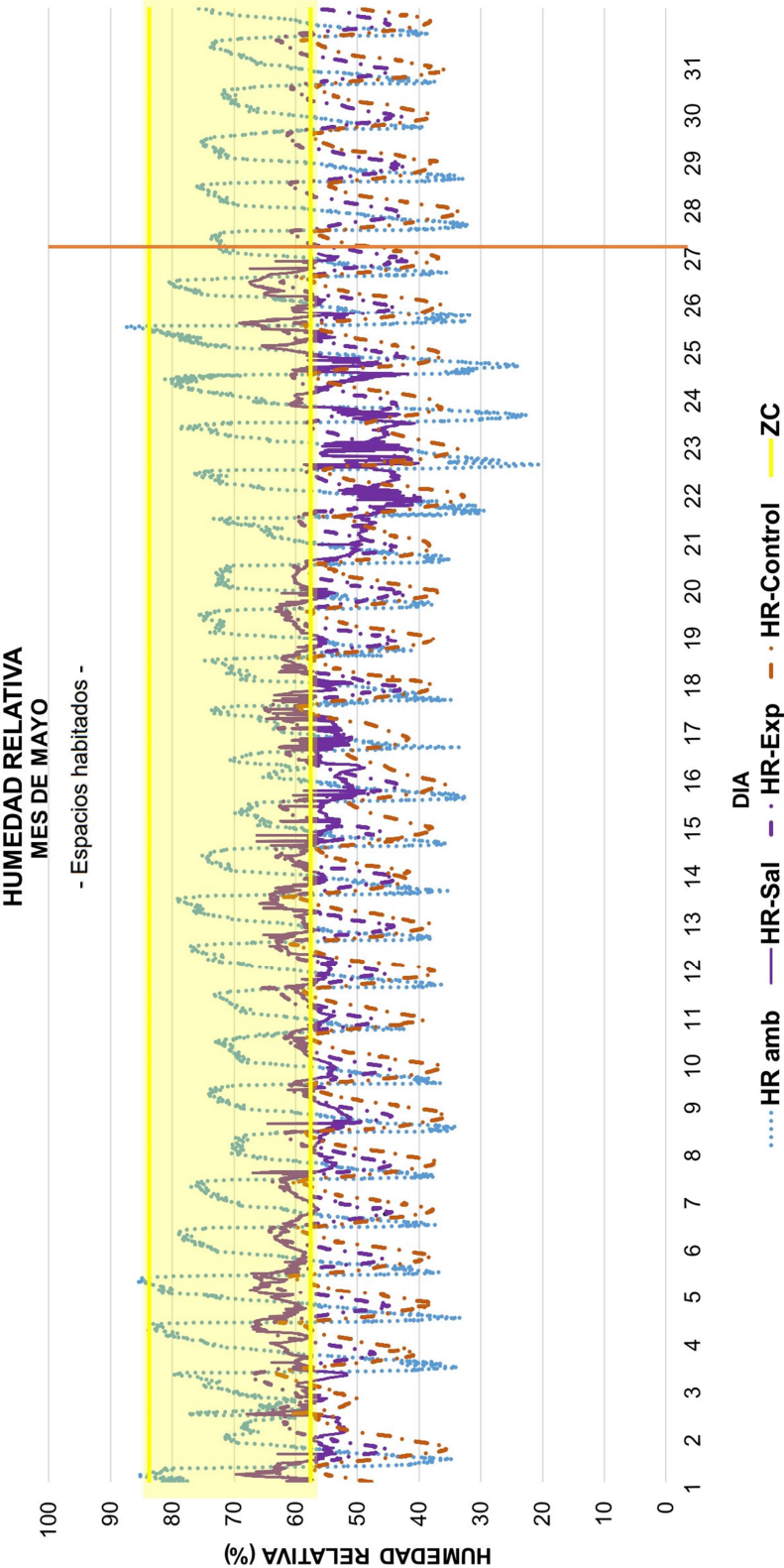
## Junio

De acuerdo a la caracterización climática de Huerta (2018), el mes de junio presenta una humedad relativa máxima promedio, una media y una mínima promedio, de 91,2 %, 80,1 % y 67,7 %, respectivamente. Sin embargo, durante el periodo de evaluación del sistema, este mes presentó las siguientes magnitudes respectivamente, 79,7 %, 64,4 % y 40,3 %. Lo anterior, permite advertir que, al igual que los meses anteriores, los valores recabados durante el periodo de evaluación se presentaron por debajo de las humedades obtenidas en la caracterización climática (Figura A 7).



Figura A 6

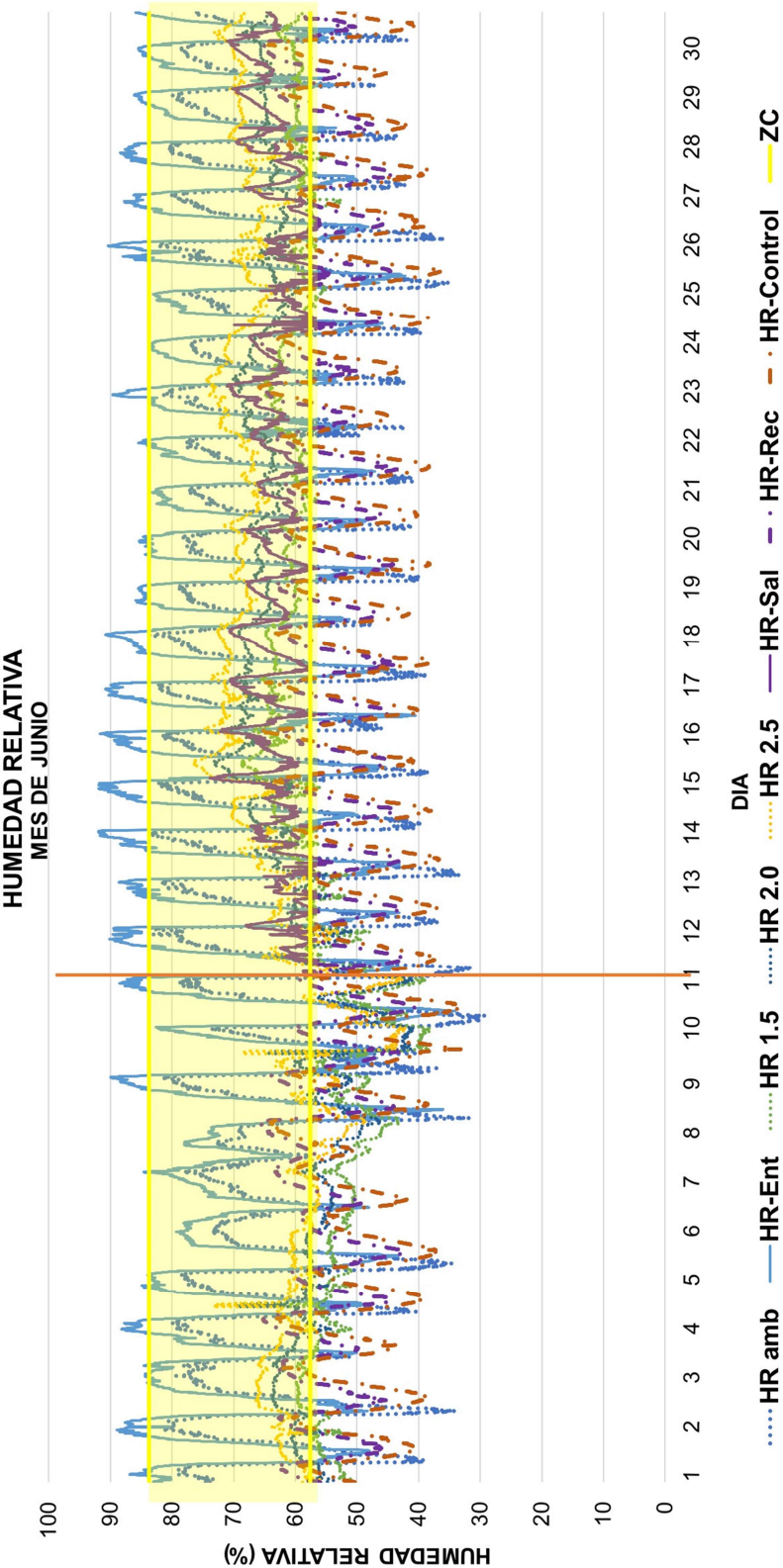
Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de mayo



Nota. La línea vertical naranja indica que concluye el periodo de análisis mensual

Figura A 7

Humedades relativas registradas el mes de junio.



Nota. La línea vertical naranja indica que inicia el periodo de análisis.

Además, durante este mes, no se presentaron condiciones de baja HR; sin embargo, las condiciones de elevada HR representaron un 51,4 % del periodo, las cuales se presentaron entre las 20:00 h y las 08:00 h, principalmente.

### ➤ Intercambiador

En la comparación de la HR del ambiente con la de la salida del IC se observó que, en esta última, el 63,1 % del periodo, se presentaron condiciones de deshumidificación de 10,5 % de HR, en promedio, durante los horarios de elevada HR en el ambiente. Mientras que, el 36,9 % del periodo, se registraron condiciones de humidificación de 12,0 % de HR, en promedio, esto en los horarios de baja HR en el ambiente. Por lo que, en este mes, el desempeño efectivo del sistema osciló en un rango de 22,5 % de HR en promedio. Sin embargo, el promedio máximo de deshumidificación logrado durante este periodo correspondió a 15,4 % de HR (4,9 % de HR por encima del promedio), con un valor máximo extremo de 22,3,0 % de HR (11,8 % de HR encima del promedio); por su parte, el promedio máximo de humidificación registrado fue de 15,0 % de HR (3,0 % de HR encima del promedio), con un valor máximo extremo de 28,4 % de HR (16,4 % de HR encima del promedio) (Figura A 8).

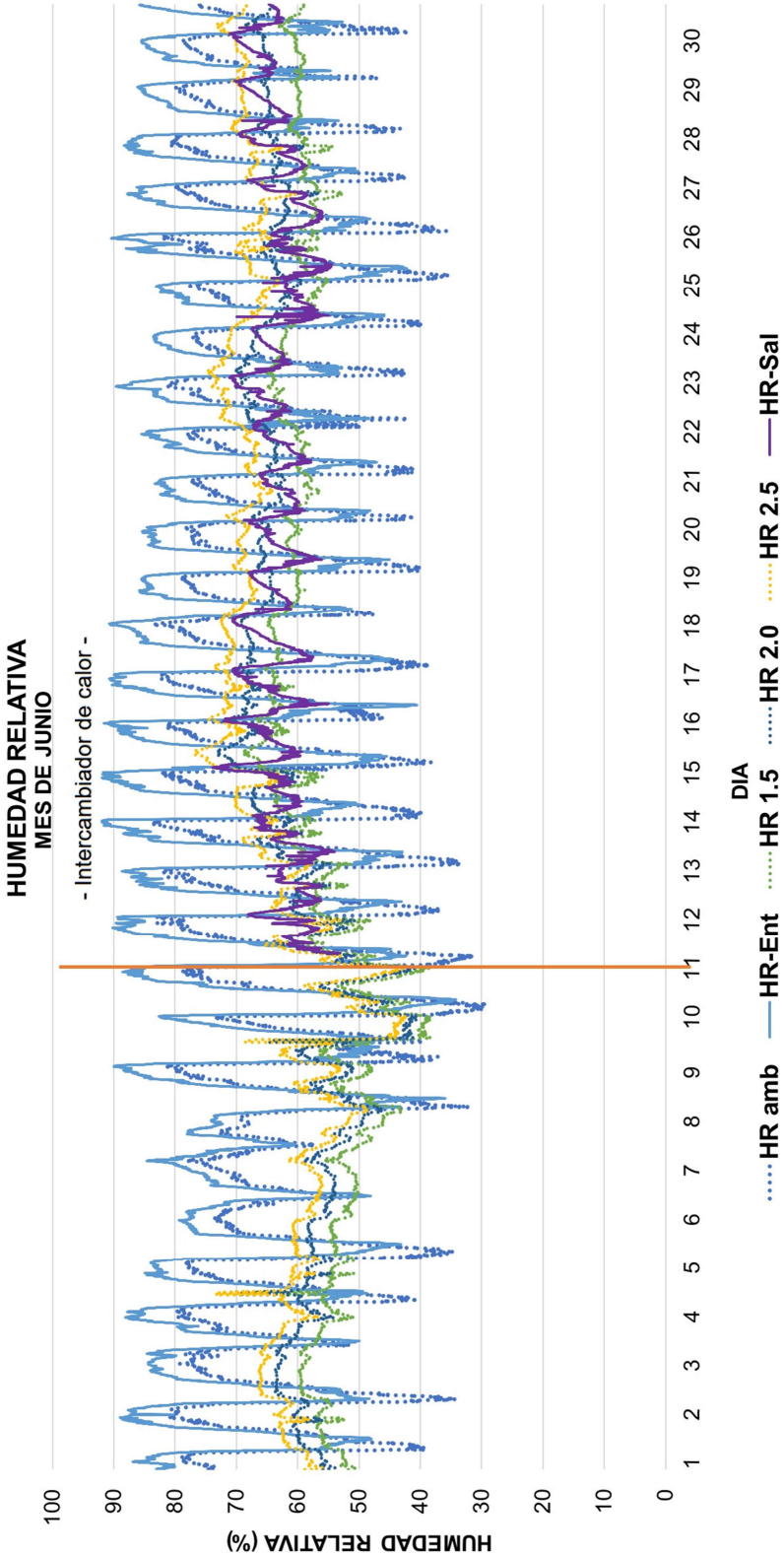
Por lo anterior, fue posible advertir que, al igual que en los meses anteriores, el sistema presentó un mejor desempeño promedio a la deshumidificación, mientras que observó un mejor desempeño extremo a la humidificación. Así mismo, durante el periodo evaluado, el proceso de deshumidificación fue el que predominó.

Así mismo, el sistema logró una deshumidificación efectiva promedio de 20,8 % de HR de la entrada del IC hasta la profundidad de 1,5 m, con un promedio máximo de 27,1 % de HR. De esta primera profundidad a la de 2,0 m, la humedad aumenta 4,1 % de HR en promedio; mientras que, durante el recorrido de la segunda profundidad a la de 2,5 m, aumenta 3,1 % de HR, en promedio.

Por lo anterior, se advirtió que la máxima deshumidificación en esta etapa del sistema, se presentó de la entrada a la primera profundidad del IC.

Figura A 8

Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de junio



Nota. La línea vertical naranja indica que inicia el periodo de análisis.

### ➤ Espacio habitado

Al comparar la HR del ambiente con la del espacio experimental, se observó que, en este último, se presentaron condiciones de deshumidificación de 14,7 % de HR, en promedio, el 78,8 % del mes, con un valor máximo extremo de 25,3 % de HR (10,6 % por encima del promedio); esto sucedió durante los horarios de elevada HR en el ambiente. Mientras, el tiempo restante, se desarrollaron condiciones de humidificación de 9,9 % de HR, en promedio, con un valor máximo extremo de 26,8 % de HR (16,9 % de HR encima del promedio); esto, en los horarios de baja HR en el ambiente.

Ahora bien, al comparar los datos obtenidos del espacio experimental con los del espacio de control, se observó que, en este último, las condiciones de humedad relativa siguen presentándose, al igual que los meses anteriores, por debajo del primero; durante este mes, la diferencia fue de 5,0 % de HR, en promedio. Esto, debido a las mismas causas mencionadas en meses anteriores: la influencia del ambiente exterior sobre el espacio de control por acciones de adaptación térmica por parte de los usuarios.

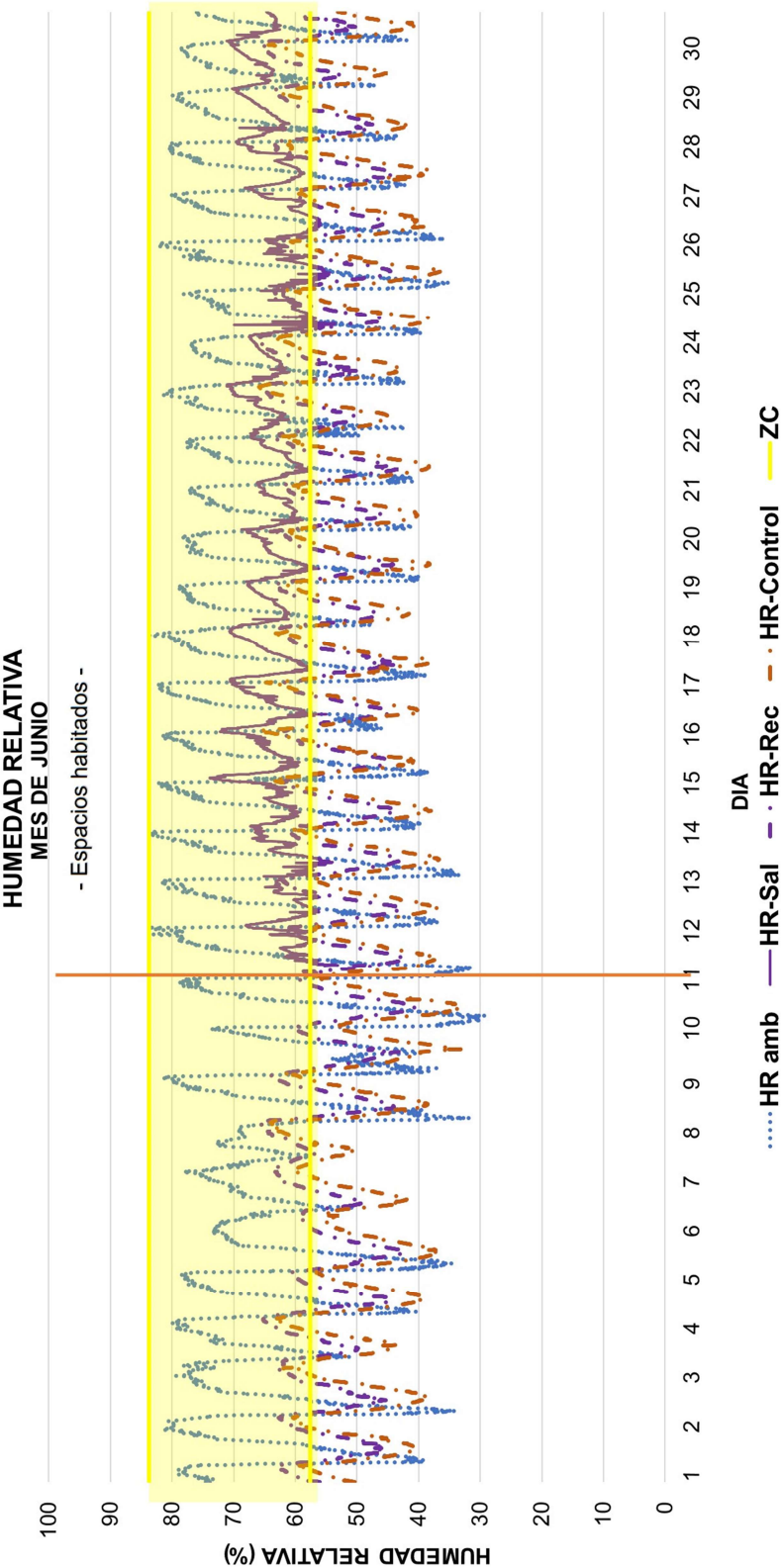
Al analizar la gráfica de la Figura A 9, se puede observar que, el 57,3 % del periodo evaluado, la humedad relativa en el espacio experimental se presentó por debajo del límite inferior de la zona de confort establecida para el periodo térmico cálido, la cual se encuentra en el rango de 57,6 % a 83,7 % de HR. Mientras, el espacio de control, se mantuvo por debajo de la zona de confort el 78,7 % del mismo periodo. Por su parte, la salida del IC se mantuvo en dicho rango el 92,9 % del periodo de evaluación correspondiente.

Es importante señalar que, a pesar de que el espacio de control contó con acciones de adaptación térmica (ventilación natural común y ventilación mecánica), fue el espacio experimental el que se mantuvo mayor tiempo dentro de la zona de confort hídrica, el 42,7 % del periodo evaluado. Por lo anterior, se advierte que el sistema propició una estabilidad hídrica en el espacio experimental.



Figura A 9

Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de junio



Nota. La línea vertical naranja indica que inicia el periodo de análisis.



## Periodo cálido

### Julio

El mes de julio, de acuerdo a la caracterización climática presentada por Huerta (2018), presenta una humedad relativa máxima promedio, una media y una mínima promedio, de 92,6 %, 85,2 % y 70,1 %, respectivamente. Sin embargo, durante el periodo de evaluación del sistema, este mes presentó las siguientes magnitudes respectivamente, 79,4 %, 64,4 % y 40,7 %. Por lo anterior, se advierte que los valores recabados durante el periodo de evaluación continúan presentándose por debajo de las obtenidas en la caracterización climática.

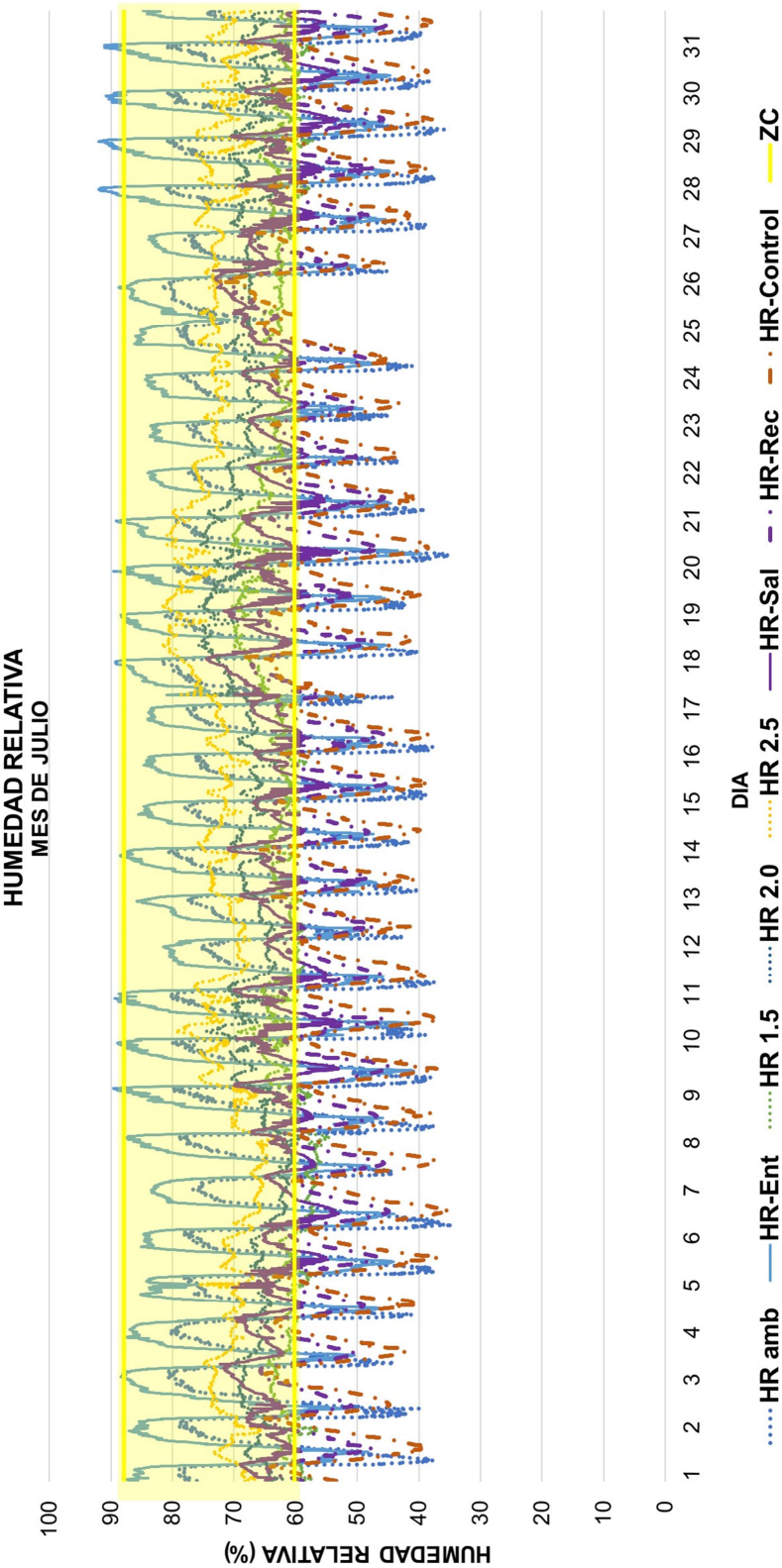
Al igual que en el mes de junio, durante el mes de julio no se presentaron condiciones de baja HR; mientras que las condiciones de elevada HR representaron el 50,0 % del periodo, las cuales se presentaron entre las 20:00 h y las 08:00 h, principalmente (Figura A 10).

#### ➤ Intercambiador

Al comparar la HR del ambiente con la de la salida del IC se observó que se presentaron condiciones de deshumidificación de 9,5 % de HR en promedio, las cuales representaron el 63,0 % del periodo evaluado; mientras, las condiciones de humidificación fueron de 12,7 % de HR en promedio, y representaron el 37,0 % del periodo evaluado, lo que significa un desempeño efectivo del sistema con una oscilación de 22,2 % de HR en promedio. Sin embargo, el promedio máximo de deshumidificación logrado durante este periodo correspondió a 12,6 % de HR (3,1 % de HR por encima del promedio), con un valor máximo extremo de 18,9 % de HR (9,4 % de HR encima del promedio). Y, por su parte, el promedio máximo de humidificación registrado fue de 16,2 % de HR (3,5 % de HR por encima del promedio), con un valor máximo extremo de 29,6 % de HR (16,9 % de HR encima del promedio). Por lo anterior, se observó que, a diferencia de los meses anteriores, el sistema presentó un mejor desempeño, tanto promedio como extremo, a la humidificación; sin embargo, la deshumidificación continuó siendo el proceso predominante durante el periodo evaluado (Figura A 11).

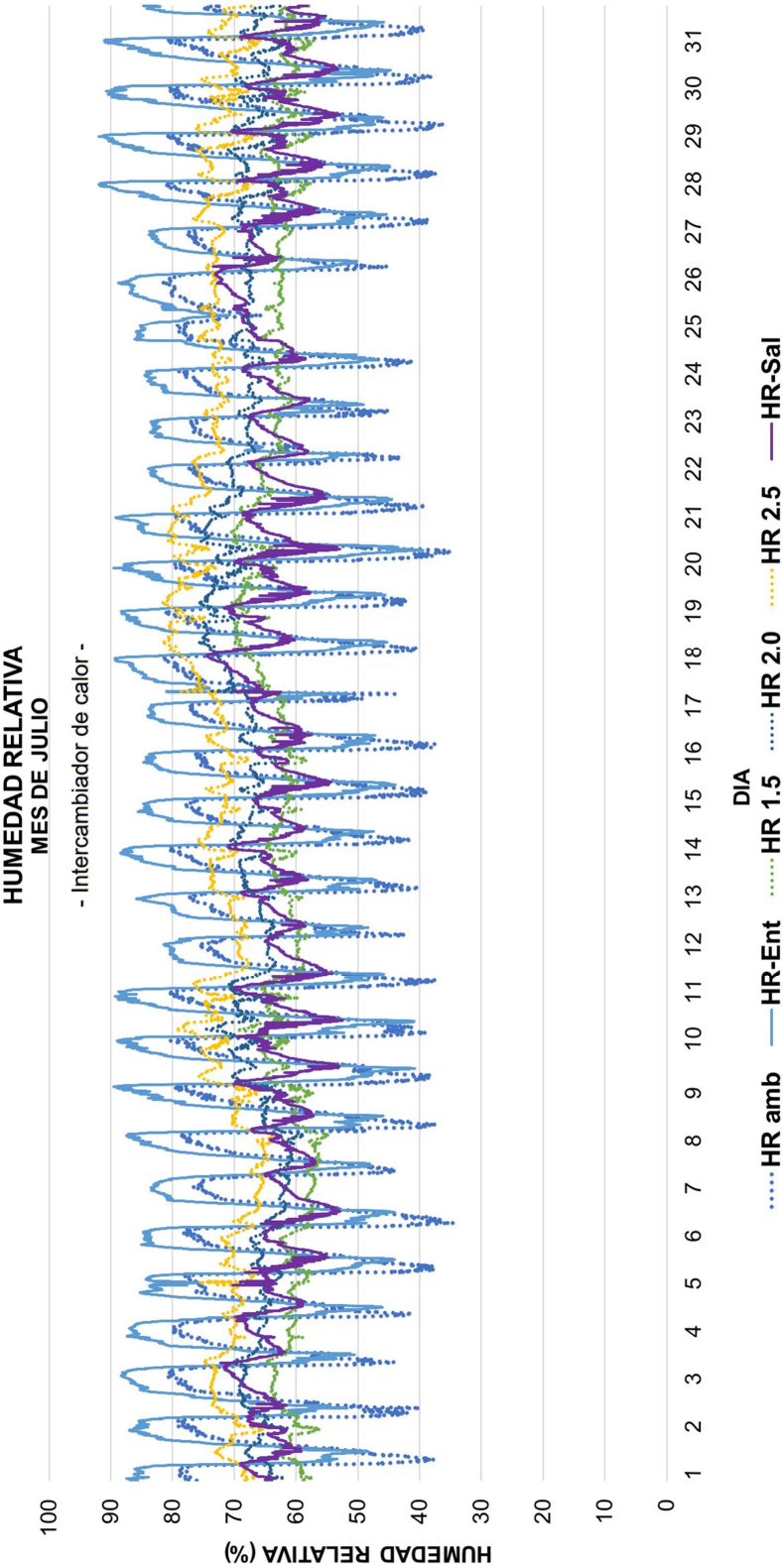
Figura A 10

Humedades relativas registradas el mes de julio.



**Figura A 11**

*Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de julio*



El sistema, además, logró una deshumidificación efectiva promedio del 17,9 %, desde la entrada del IC hasta la profundidad de 1,5 m, con un valor promedio máximo de 17,9 % de HR. Se observó, además, que de esta primera profundidad a la de 2,0 m, la HR aumentó 4,9 % en promedio; de igual manera, durante el recorrido de la segunda profundidad a la de 2,5 m, aumentó 5,1 % de HR en promedio.

### ➤ Espacio habitado

En los horarios de HR elevada en el ambiente, el espacio experimental presentó condiciones de deshumidificación de 13,0 % de HR en promedio, el 76,2 % del periodo evaluado, con un valor máximo extremo de 22,6 % de HR (9,6 % de HR encima del promedio); mientras, en los horarios de baja HR en el ambiente, las condiciones de humidificación en el espacio experimental fueron de 10,7 % de HR en promedio, las cuales representaron el 23,8 % del tiempo restante, con un valor máximo extremo de 23,0 % de HR (12,3 % de HR por encima del promedio).

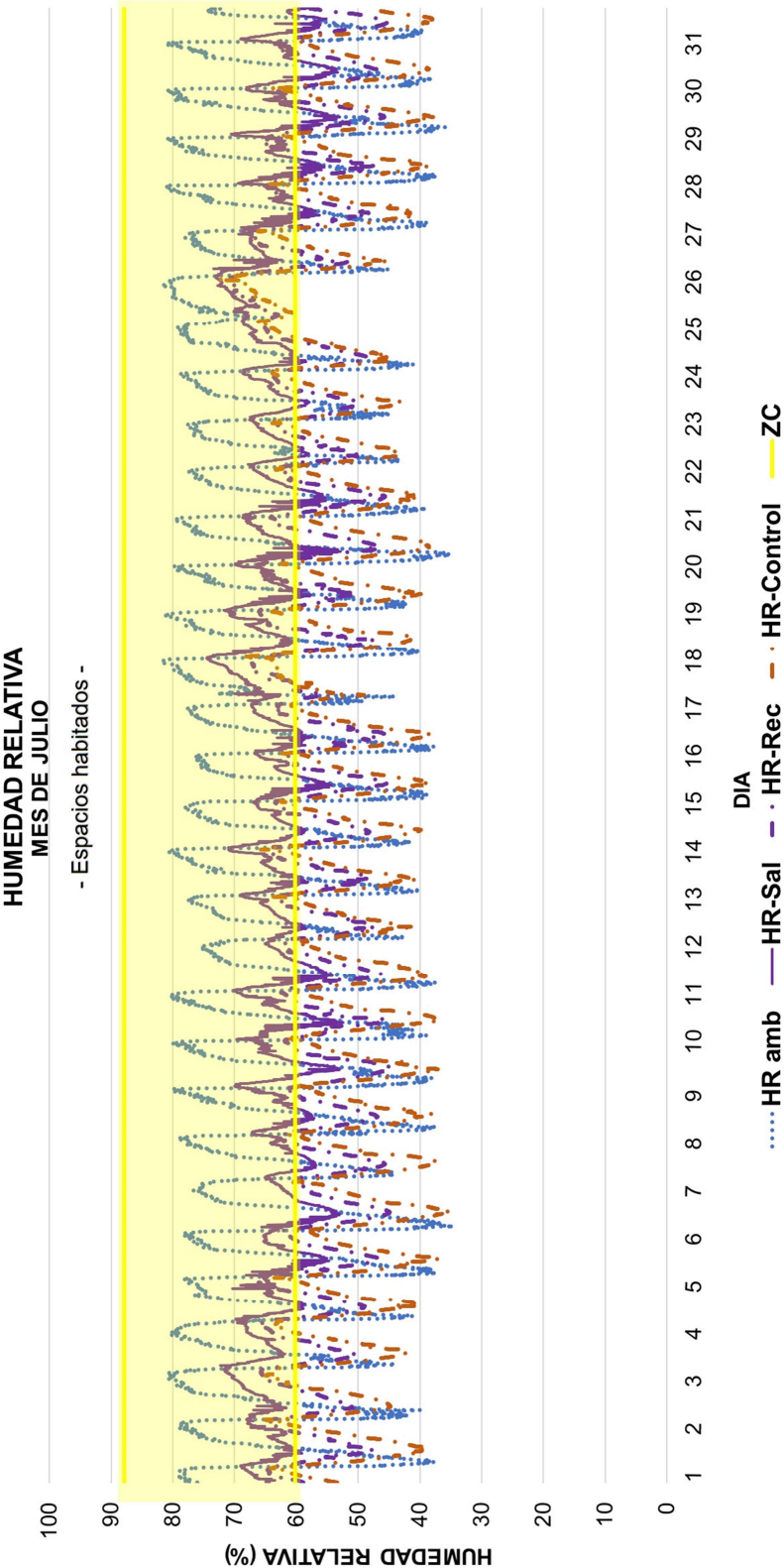
Ahora bien, al comparar ahora los datos obtenidos del espacio experimental con los del espacio de control, se observó que, en este último, las condiciones de humedad relativa siguen presentándose, al igual que los meses anteriores, por debajo del primero; durante este mes, la diferencia, en esta ocasión fue de 5,3 % de HR, en promedio.

Así mismo, en la comparación de ambos espacios, se observó que, tanto en el espacio experimental como en el de control, la humedad relativa se mantuvo, la mayor parte del tiempo, por debajo de la zona de confort establecida para el periodo cálido, en un rango de 60,2 % a 87,9 % de HR. Sin embargo, el primero se mantuvo en rango el 38,0 % del periodo evaluado, mientras el segundo lo hace solo el 17,1 % del mismo periodo (Figura A 12).

Por lo anterior, y al igual que el mes anterior, se puede advertir que el sistema propició una mayor estabilidad hídrica en el espacio experimental, en comparación con el espacio de control, el cual cuenta con acciones de adaptación térmica, lo que significa una influencia directa del ambiente exterior.

Figura A 12

Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de julio





## Agosto

De acuerdo a la caracterización climática de Huerta (2018), en la ciudad de Ensenada, en agosto se presenta una humedad relativa máxima promedio, una media y una mínima promedio, de 94,2 %, 86,1 % y 69,3 %, respectivamente. Sin embargo, durante el periodo de evaluación del sistema, este mes presentó las siguientes magnitudes respectivamente, 79,0 %, 62,3 % y 36,4 %. Por lo tanto, los valores recabados durante el periodo de evaluación siguen por debajo de las humedades obtenidas en la caracterización climática (Figura A 13).

En este mes, las condiciones de elevada HR se presentaron el 40,8 % del periodo, las cuales se presentaron entre las 20:00 h y las 08:00 h, principalmente; mientras que las condiciones de baja HR, se presentaron el 1,7 % del periodo evaluado, entre las 09:00 h y las 12:00 h.

### ➤ Intercambiador

En la comparación de la HR del ambiente con la de la salida del IC se observó que, en esta última, el 64,0 % del periodo, se presentaron condiciones de deshumidificación de 10,8 % de HR, en promedio. Mientras, el 36,0 % del periodo, se registraron condiciones de humidificación de 12,5 % de HR, en promedio. Por lo que, en este mes, el desempeño efectivo del sistema osciló en un rango de 23,3 % de HR en promedio. Sin embargo, el promedio máximo de deshumidificación logrado durante este periodo correspondió a 17,7 % de HR (3,9 % de HR por encima del promedio), con un valor máximo extremo de 24,4,0 % de HR (13,6 % de HR encima del promedio); por su parte, el promedio máximo de humidificación registrado fue de 24,4 % de HR (11,9 % de HR encima del promedio), con un valor máximo extremo de 37,6 % de HR (25,1 % de HR encima del promedio).

Por lo anterior, fue posible advertir que, al igual que el mes anterior, el sistema presentó un mejor desempeño, tanto promedio como extremo, a la humidificación; sin embargo, la deshumidificación continuó siendo el proceso predominante durante el periodo evaluado (Figura A 14).



Figura A 13

Humedades relativas registradas el mes de agosto.

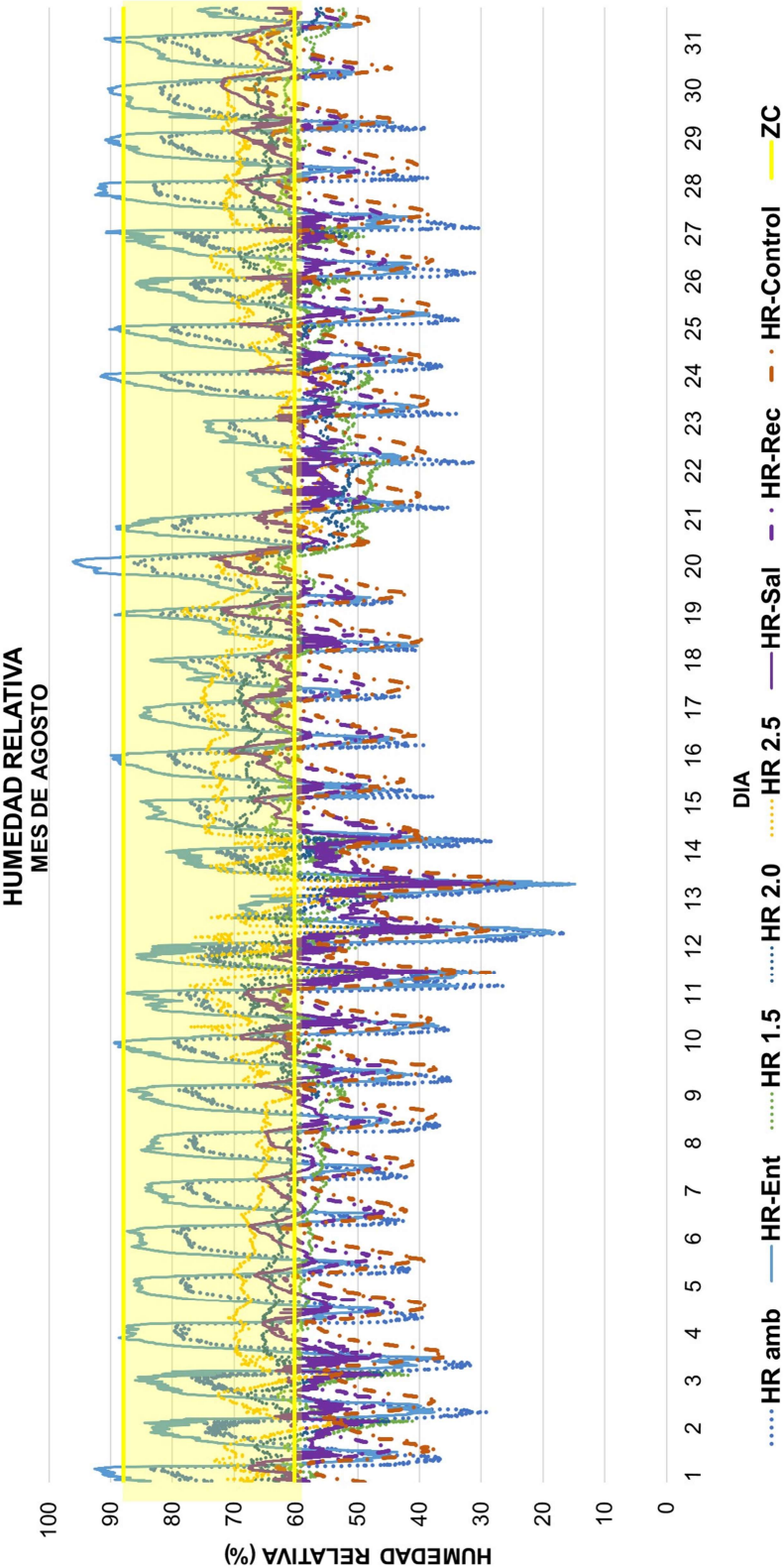
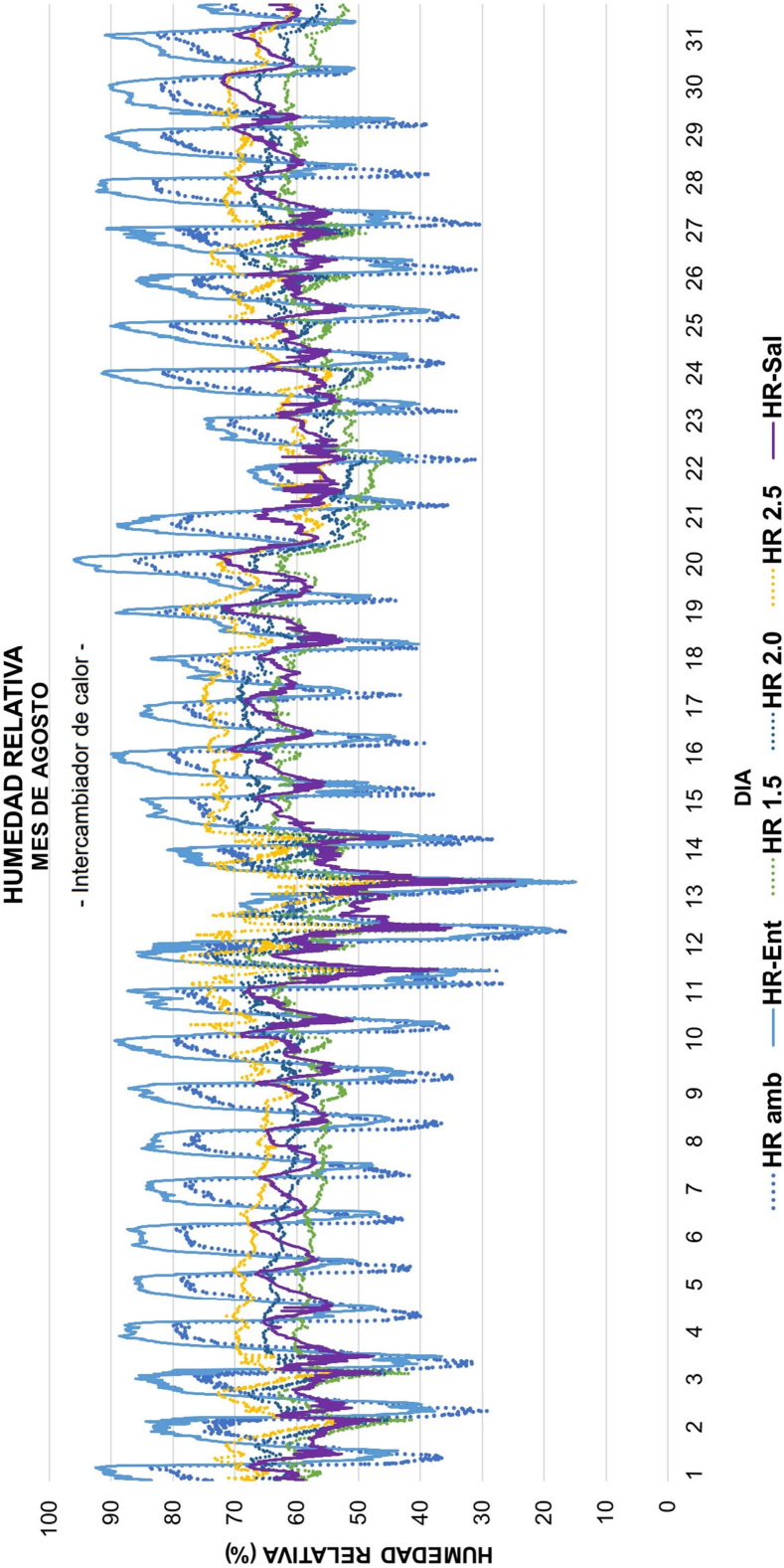


Figura A 14

Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de agosto



Así mismo, el sistema logró una deshumidificación efectiva promedio de 19,8 % de HR de la entrada del IC hasta la profundidad de 1,5 m, con un promedio máximo de 26,0 % de HR. De esta primera profundidad a la de 2,0 m, la humedad aumenta 4,5 % de HR en promedio; mientras que, durante el recorrido de la segunda profundidad a la de 2,5 m, aumenta 5,0 % de HR, en promedio. Por lo anterior, la máxima deshumidificación en esta etapa del sistema, continuó presentándose de la entrada a la primera profundidad del IC.

### ➤ Espacio habitado

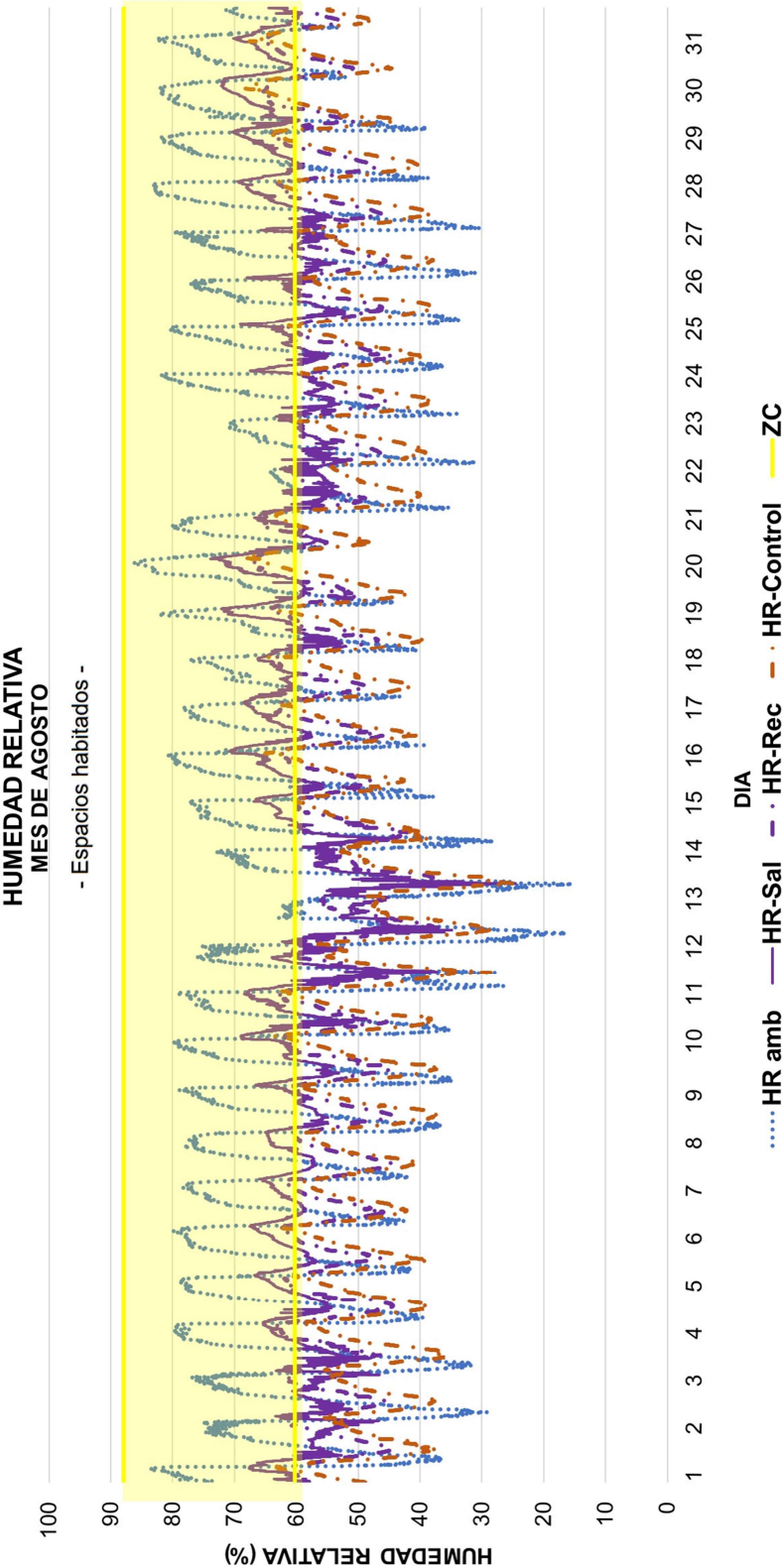
Al comparar la HR del ambiente con la del espacio experimental, se observó que, en este último, se presentaron condiciones de deshumidificación de 13,3 % de HR, en promedio, el 75,2 % del mes, con un valor máximo extremo de 24,3 % de HR (11,0 % por encima del promedio); esto sucedió durante los horarios de elevada HR en el ambiente. Mientras, el tiempo restante, se desarrollaron condiciones de humidificación de 11,0 % de HR, en promedio, con un valor máximo extremo de 31,8 % de HR (20,8 % de HR encima del promedio); esto, en los horarios de baja HR en el ambiente.

Ahora bien, al comparar los datos obtenidos con los del espacio de control, se observó que, en este, las condiciones de humedad relativa siguen presentándose, al igual que los meses anteriores, por debajo del espacio experimental; durante este mes, la diferencia fue de 5,3 % de HR, en promedio. Esto, debido a la influencia del ambiente exterior sobre el espacio de control por acciones de adaptación térmica por parte de los usuarios.

Se puede observar que, el 72,0 % del periodo evaluado, la humedad relativa en el espacio experimental se presentó por debajo del límite inferior de la zona de confort establecida para el periodo térmico cálido. Mientras, el espacio de control, se mantuvo por debajo de la zona de confort el 89,9 % del mismo periodo. Por su parte, la salida del IC se mantuvo en dicho rango el 50,6 % del dicho periodo. Por lo anterior, se advierte que el sistema propició una estabilidad hídrica en el espacio experimental (Figura A 15).

Figura A 15

Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de agosto



## Septiembre

En el mes de septiembre, de acuerdo a la caracterización climática presentada por Huerta (2018), la ciudad de Ensenada presenta una humedad relativa máxima promedio, una media y una mínima promedio de 92,8 %, 83,4 % y 65,3 %, respectivamente. Sin embargo, para el mismo mes, la evaluación del sistema presentó magnitudes de 79,5 %, 63,4 % y 38,3 %, respectivamente. Lo anterior, permite advertir que los valores recabados continuaron por debajo de las humedades obtenidas en la caracterización climática.

Durante dicho mes, las condiciones de elevada HR representaron el 45,3 % del periodo evaluado, las cuales se presentaron entre las 19:00 h y las 07:00 h, principalmente; mientras que las condiciones de baja HR, tuvieron poca presencia con el 1,3 % del periodo evaluado, entre las 08:00 h y las 10:00 h (Figura A 16).

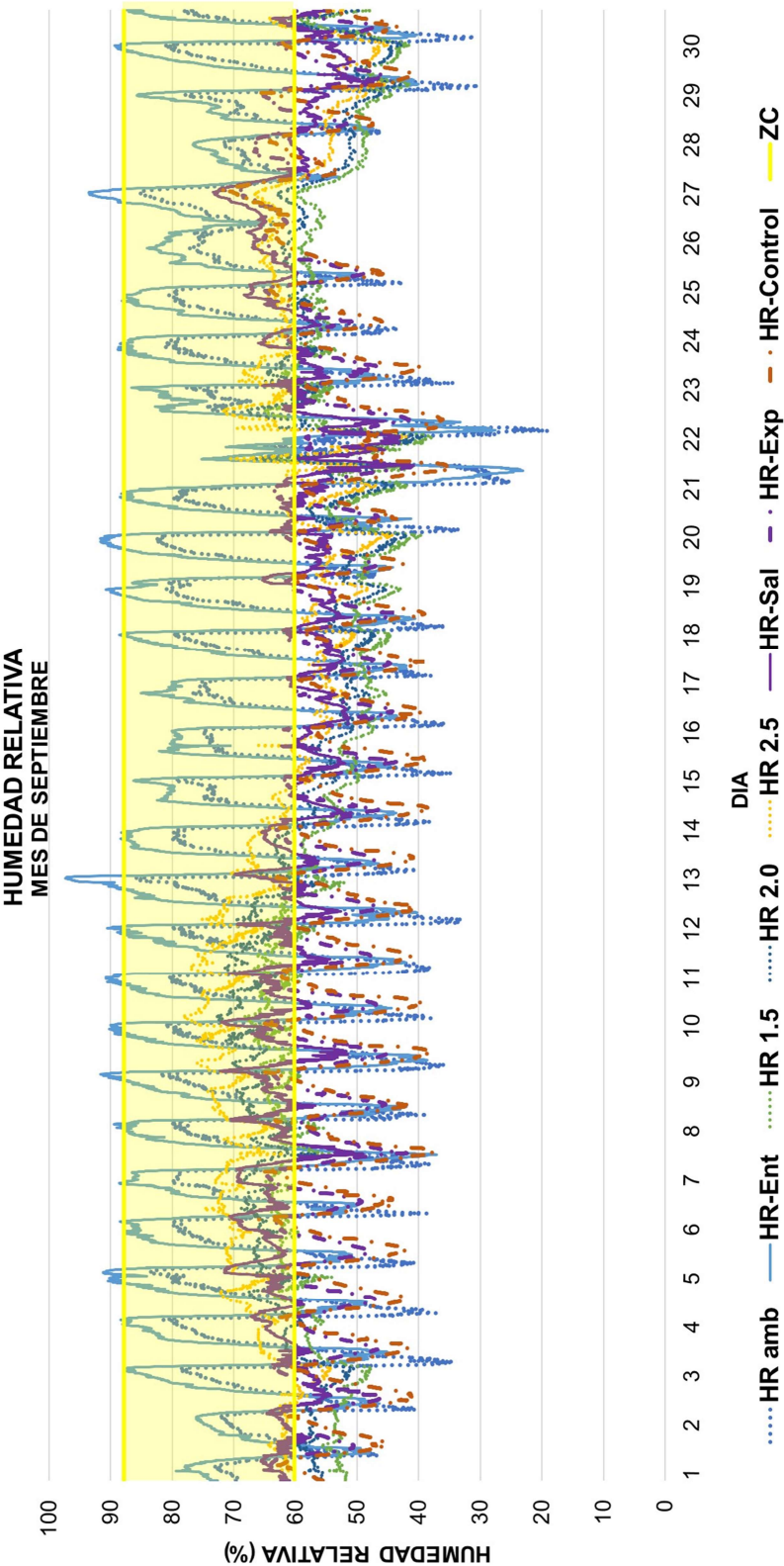
### ➤ Intercambiador

Al comparar la HR del ambiente con la de la salida del IC se observó que, durante los horarios en los que la HR en el ambiente es más elevada, el IC presentó condiciones de deshumidificación de 11,9 % de HR en promedio, las cuales representaron el 66,0 % del periodo evaluado. Por su parte, en los horarios de baja HR en el ambiente, el IC presentó condiciones de humidificación de 12,0 % de HR en promedio, las cuales representaron el 34,0 % de dicho periodo. En este sentido, es posible presumir que el desempeño efectivo del sistema en este mes osciló en un rango de 23,9 % de HR en promedio. No obstante, el promedio máximo de deshumidificación logrado fue de 18,8 % de HR (6,9 % de HR por encima del promedio) con un valor máximo extremo de 27,7 % de HR (15,8 % de HR por encima del promedio); por su parte, el promedio máximo de humidificación registrado fue de 25,1 % de HR (13,1 % de HR por encima del promedio), con un valor máximo extremo de 36,6 % de HR (24,6 % de HR por encima del promedio).



Figura A 16

Humedades relativas registradas el mes de septiembre.





Por lo anterior, el sistema en este periodo manifestó un desempeño promedio similar tanto a la deshumidificación como a la humidificación; sin embargo, se observó un mejor desempeño extremo a la humidificación. Así mismo, la deshumidificación continuó como el proceso más constante durante el periodo evaluado (Figura A 17).

Además, se logró una deshumidificación efectiva promedio del 22,5 % de HR, desde la entrada del IC a la profundidad de 1,5 m, con un promedio máximo de 31,9 % de HR; de esta primera profundidad a la de 2,0 m la HR aumentó 3,4 % en promedio; mientras que, durante el recorrido de la segunda profundidad a la de 2,5 m lo hizo con un promedio de 4,0 % de HR. Por lo tanto, la máxima deshumidificación en esta etapa del sistema, se presentó de la entrada a la primera profundidad del IC.

#### ➤ Espacio habitado

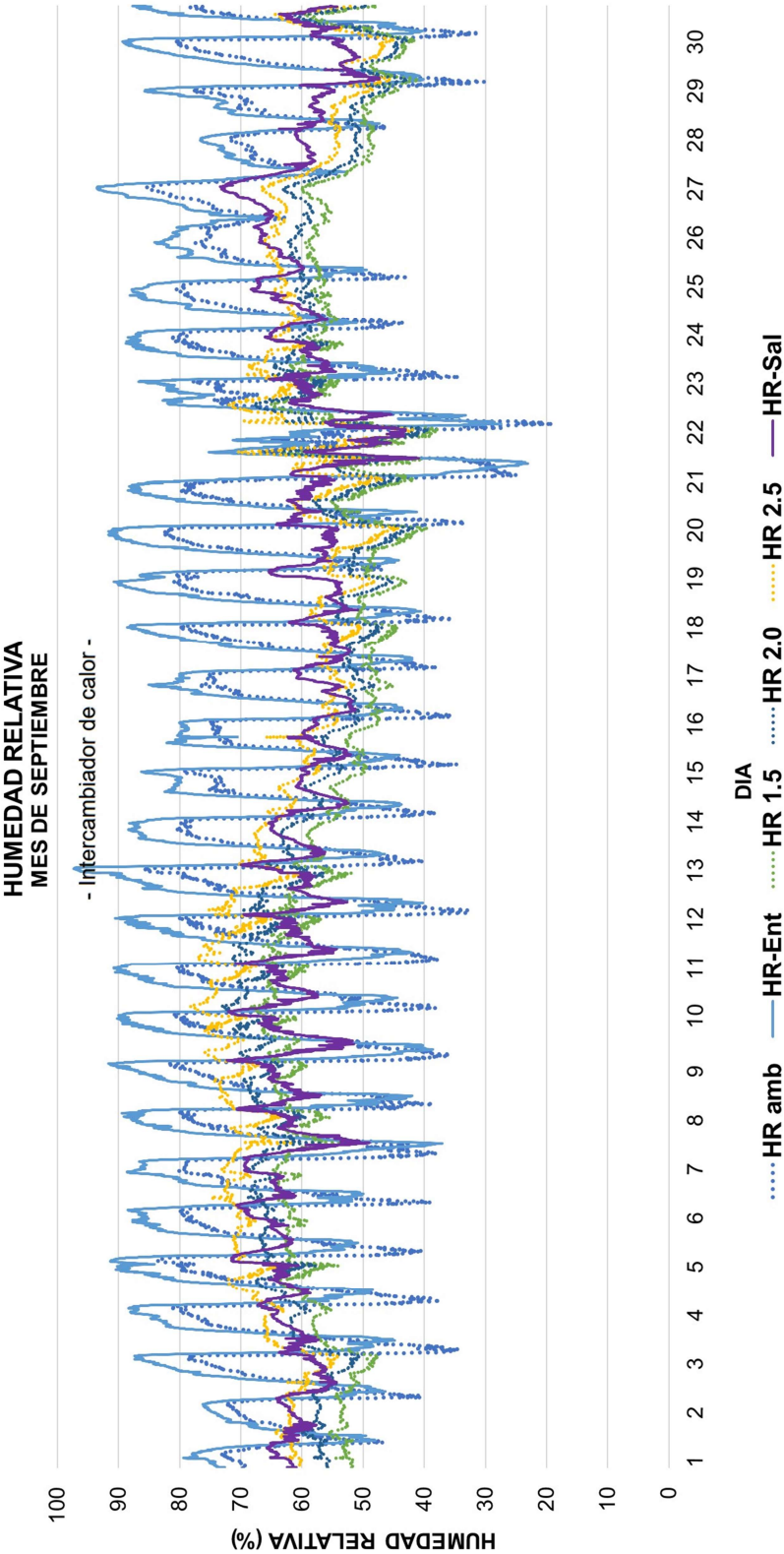
Al analizar la influencia del sistema sobre el espacio experimental se observó que, durante los horarios en los que dió lugar la mayor HR en el ambiente, el espacio experimental presentó condiciones de deshumidificación de 13,3 % de HR en promedio, lo cual representó el 75,6 % del tiempo, así como una magnitud máxima extrema de 24,7 % de HR (11,3 % de HR por encima del promedio). Mientras tanto, en los horarios en los que el ambiente registró la HR más baja, el espacio experimental presentó condiciones de humidificación de 10,7 % de HR en promedio el tiempo restante, con una magnitud máxima extrema de 32,6 % de HR (21,9 % de HR por encima del promedio).

Ahora bien, al comparar estos resultados con los del espacio de control, se puede observar que, en este último, las condiciones de humedad se presentaron con menores valores respecto al espacio experimental; en promedio un 4,4 % de HR.

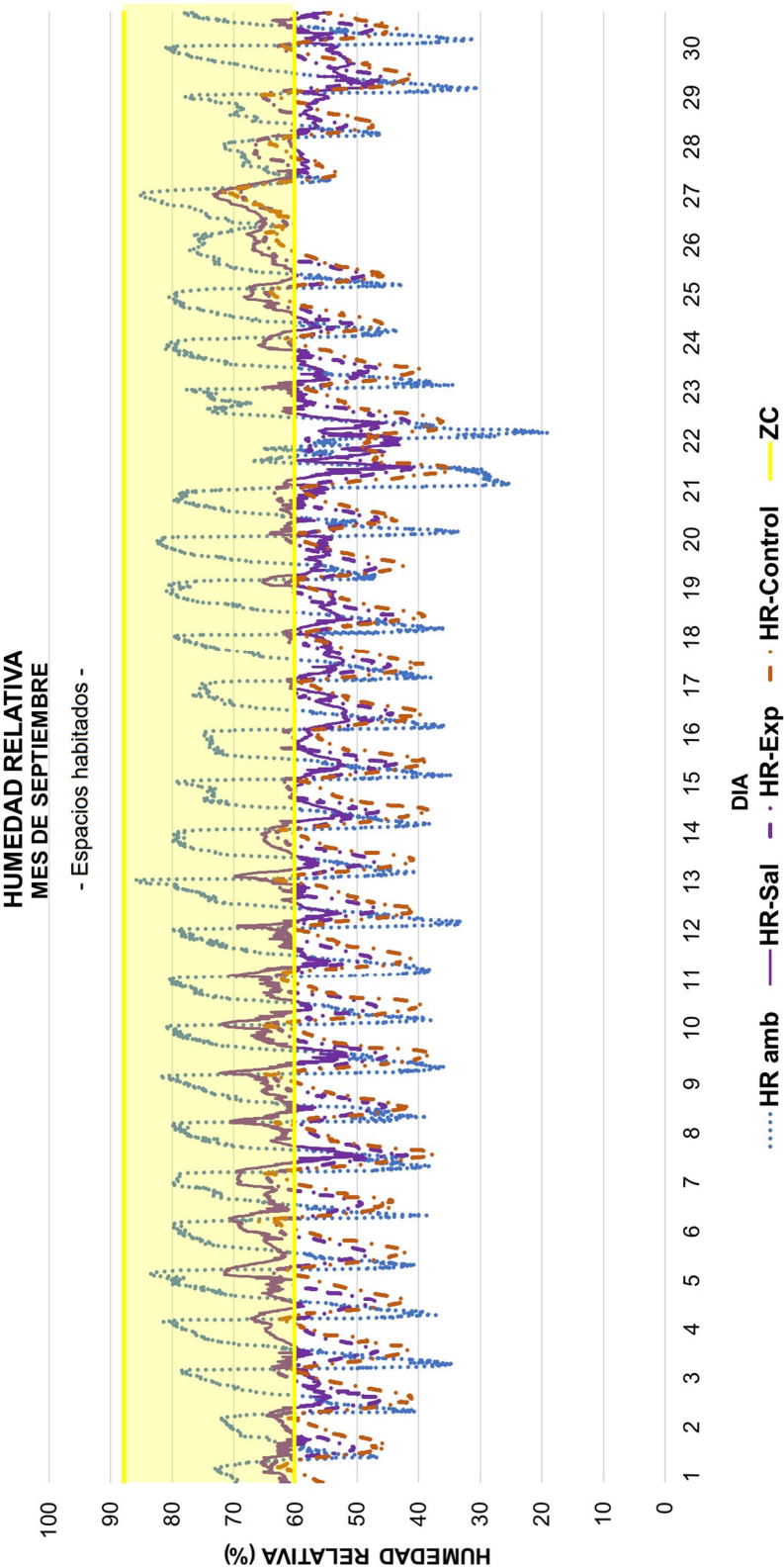
Se pudo observar que el 34,2 % del periodo evaluado, la humedad relativa en el espacio experimental se presentó por dentro rango de la zona de confort establecida para el periodo térmico cálido; mientras, el espacio de control, estuvo dentro de la zona de confort el 15,6 % del mismo periodo. Por su parte, la salida del IC se mantuvo en dicho rango el 50,4 % de dicho periodo (Figura A 18).

Figura A 17

Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de septiembre



**Figura A 18**  
*Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de septiembre*



## Periodo de transición cálido-frío

### Octubre

En este mes, la caracterización climática presentada por Huerta (2018), indica que la ciudad de Ensenada presenta una humedad relativa máxima promedio, una media y una mínima promedio de 89,5 %, 76,0 % y 56,1 %, respectivamente. Sin embargo, para el mismo mes, la evaluación del sistema presentó magnitudes de 76,0 %, 54,8 % y 28,6 %, respectivamente. Lo anterior, permite advertir que los valores recabados continuaron por debajo de las humedades obtenidas en la caracterización climática (Figura A 19).

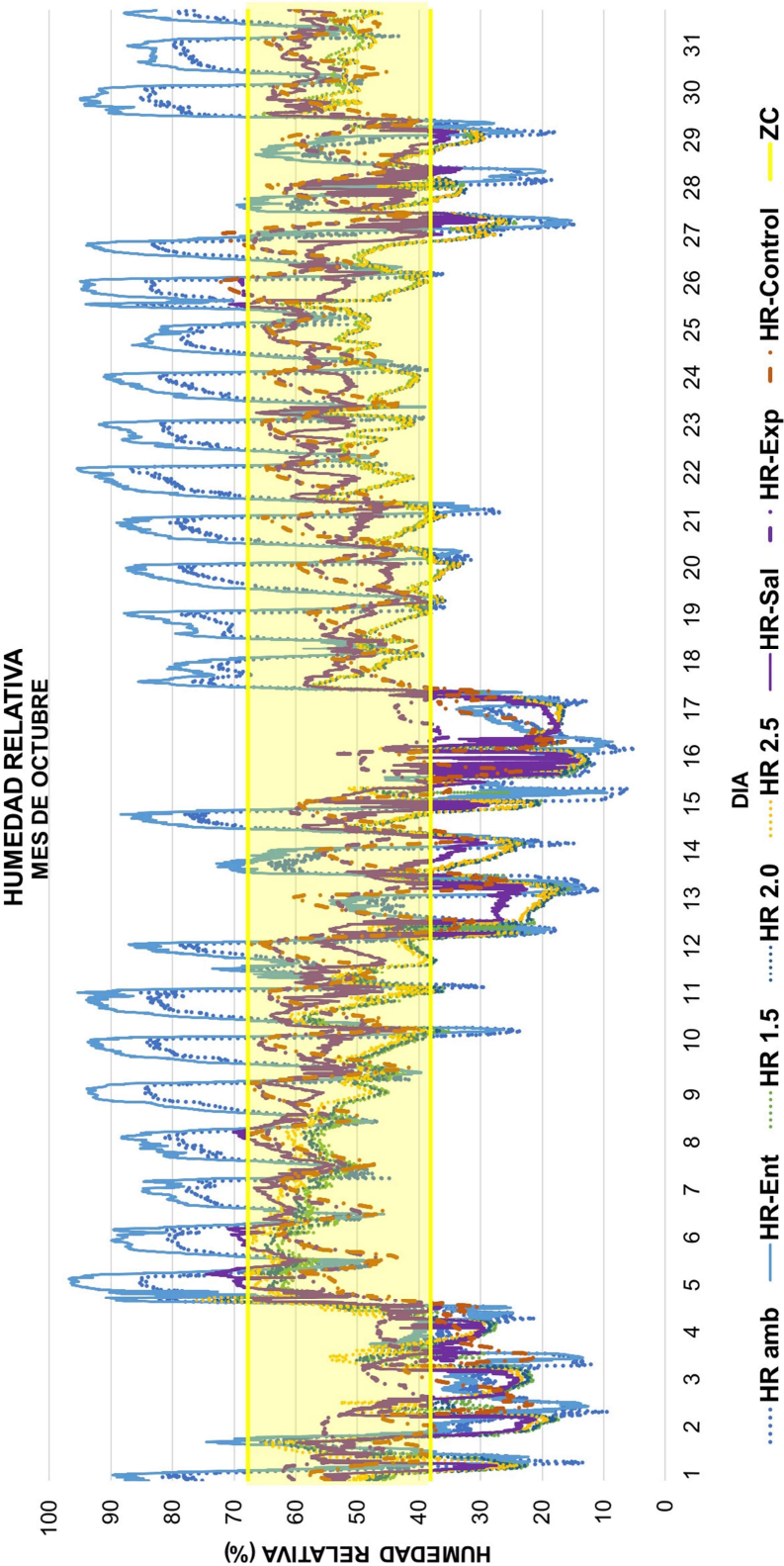
Durante dicho mes, las condiciones de elevada HR representaron el 35,6 % del periodo evaluado, las cuales se presentaron entre las 19:00 h y las 07:00 h, principalmente; mientras que las condiciones de baja HR, tuvieron poca presencia con el 18,5 % del periodo evaluado, entre las 08:00 h y las 10:00 h.

#### ➤ Intercambiador

Al comparar la HR del ambiente con la de la salida del IC se observó que, durante los horarios en los que la HR en el ambiente es más elevada, el IC presentó condiciones de deshumidificación de 14,6 % de HR en promedio, las cuales representaron el 64,7 % del periodo evaluado. Por su parte, en los horarios de baja HR en el ambiente, el IC presentó condiciones de humidificación de 11,4 % de HR en promedio, las cuales representaron el 35,3 % de dicho periodo. En este sentido, es posible presumir que el desempeño efectivo del sistema en este mes osciló en un rango de 26,0 % de HR en promedio. No obstante, el promedio máximo de deshumidificación logrado fue de 22,1 % de HR (7,5 % de HR por encima del promedio) con un valor máximo extremo de 34,6 % de HR (20,0 % de HR por encima del promedio); por su parte, el promedio máximo de humidificación registrado fue de 24,4 % de HR (13,0 % de HR por encima del promedio), con un valor máximo extremo de 45,5 % de HR (34,6 % de HR por encima del promedio).

Figura A 19

Humedades relativas registradas el mes de octubre.





Por lo anterior, el sistema en este periodo manifestó un mejor desempeño promedio en la deshumidificación; sin embargo, se observó un mejor desempeño extremo a la humidificación. Así mismo, la deshumidificación continuó como el proceso más constante durante el periodo evaluado (Figura A 20).

Además, se logró una deshumidificación efectiva promedio del 23,7 % de HR, desde la entrada del IC a la profundidad de 1,5 m, con un promedio máximo de 34,7 % de HR; de esta primera profundidad a la de 2,0 m la HR aumentó 1,2 % en promedio; mientras que, durante el recorrido de la segunda profundidad a la de 2,5 m lo hizo con un promedio de 1,4 % de HR. Por lo tanto, la máxima deshumidificación en esta etapa del sistema, se presentó de la entrada a la primera profundidad del IC.

### ➤ Espacio habitado

Con respecto a la influencia que el sistema tiene sobre el espacio experimental se observó que, durante los horarios en los que dio lugar la mayor HR en el ambiente, el espacio experimental presentó condiciones de deshumidificación de 13,7 % de HR en promedio, lo cual representó el 55,9 % del tiempo, así como una magnitud máxima extrema de 38,8 % de HR (25,1 % de HR por encima del promedio). Mientras tanto, en los horarios en los que el ambiente registró la HR baja, el espacio experimental presentó condiciones de humidificación de 13,3 % de HR en promedio el tiempo restante, con una magnitud máxima extrema de 43,9 % de HR (30,6 % de HR por encima del promedio).

Ahora bien, al comparar estos resultados con los del espacio de control, se puede observar que, en este último, las condiciones de humedad se presentaron en promedio un 5,0 % de HR menor con respecto al espacio experimental (Figura A 21). Se observó que el 95,6 % del periodo evaluado, la humedad relativa en el espacio experimental se mantuvo dentro del rango de confort, de 19,7 °C a 25,7 °C, para el periodo térmico de transición cálido-frío (Rincón-Martínez *et al.*, 2020); mientras, el espacio de control, estuvo dentro de la zona de confort el 81,1 % del mismo periodo. Por su parte, la salida del IC se mantuvo en dicho rango el 78,3 % de dicho periodo.



Figura A 20

Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de octubre

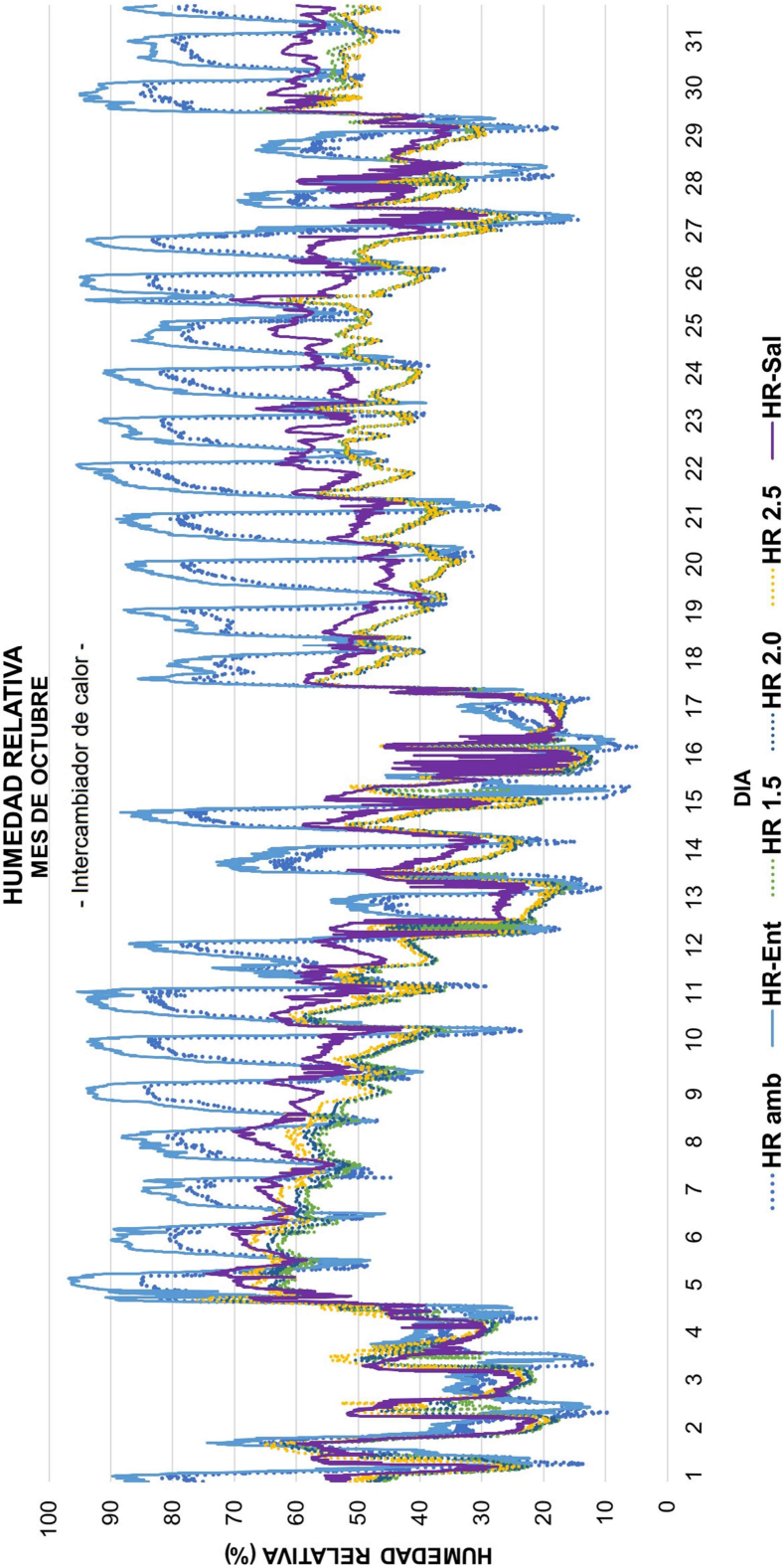
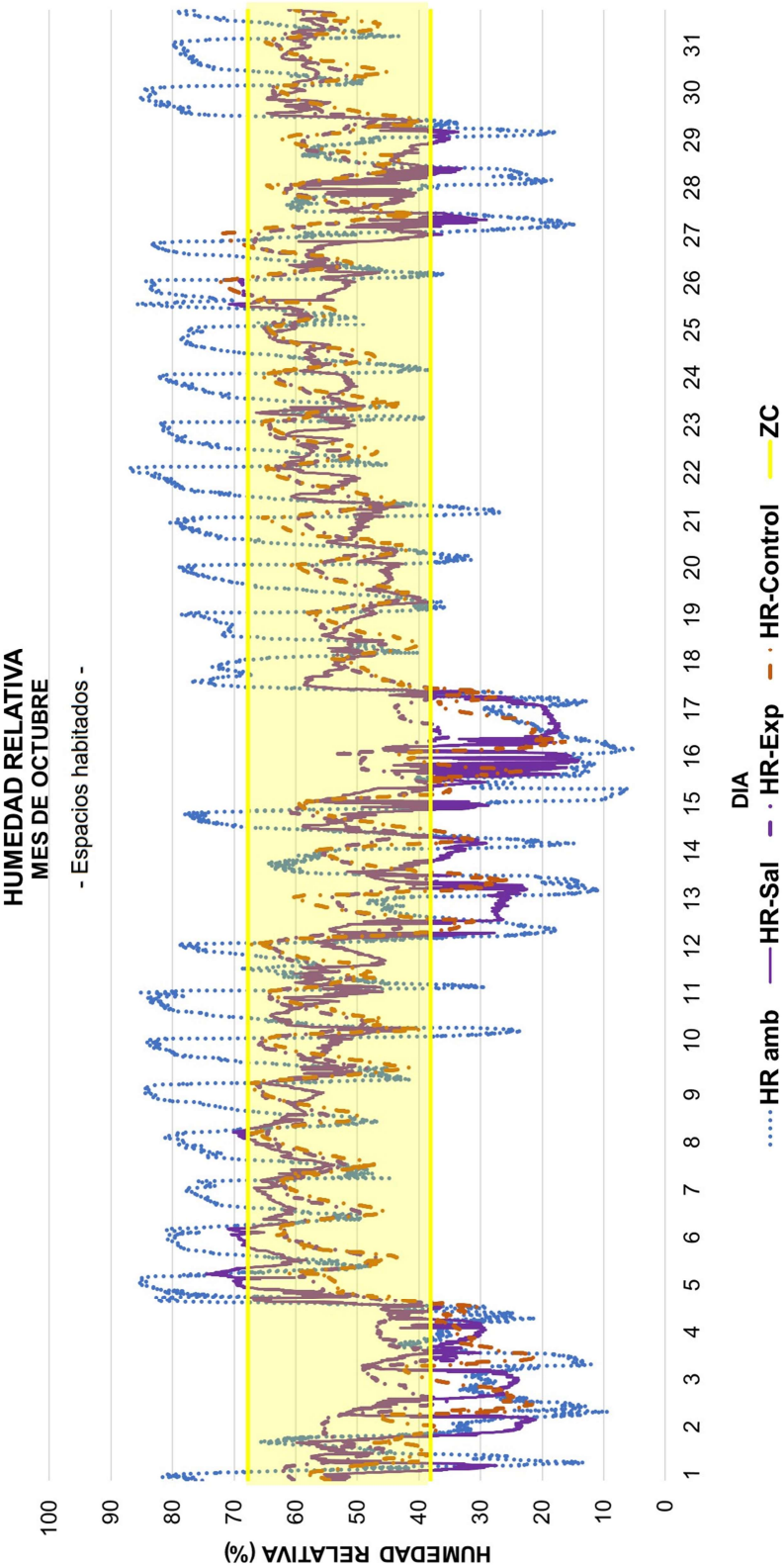


Figura A 21

Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de octubre



## Noviembre

De acuerdo a la caracterización climática de Huerta (2018), en la ciudad de Ensenada, en noviembre se presenta una humedad relativa máxima promedio, una media y una mínima promedio, de 86,0 %, 67,0 % y 44,8 %, respectivamente. Sin embargo, durante el periodo de evaluación del sistema, este mes presentó las siguientes magnitudes respectivamente, 72,1 %, 54,3 % y 31,0 %. Por lo tanto, los valores recabados durante el periodo de evaluación siguen por debajo de las humedades obtenidas en la caracterización climática.

En este mes, las condiciones de elevada HR se presentaron el 36,9 % del periodo, mientras que las condiciones de baja HR, se presentaron el 22,9 % del periodo evaluado (Figura A 22).

### ➤ Intercambiador

En la comparación de la HR del ambiente con la de la salida del IC se observó que, en esta última, el 66,3 % del periodo, se presentaron condiciones de deshumidificación de 14,8 % de HR, en promedio. Mientras, el 33,7 % del periodo, se registraron condiciones de humidificación de 11,2 % de HR, en promedio. Por lo que, en este mes, el desempeño efectivo del sistema osciló en un rango de 26,0 % de HR en promedio. Sin embargo, el promedio máximo de deshumidificación logrado durante este periodo correspondió a 23,5 % de HR (8,7 % de HR por encima del promedio), con un valor máximo extremo de 37,1 % de HR (22,3 % de HR encima del promedio); por su parte, el promedio máximo de humidificación registrado fue de 34,7 % de HR (23,5 % de HR encima del promedio), con un valor máximo extremo de 53,9 % de HR (42,7 % de HR encima del promedio).

Por lo anterior, fue posible advertir que, al igual que el mes anterior, el sistema presentó un mejor desempeño, tanto promedio como extremo, a la humidificación; sin embargo, la deshumidificación continuó siendo el proceso predominante durante el periodo evaluado (Figura A 23).

Figura A 22

Humedades relativas registradas el mes de noviembre.

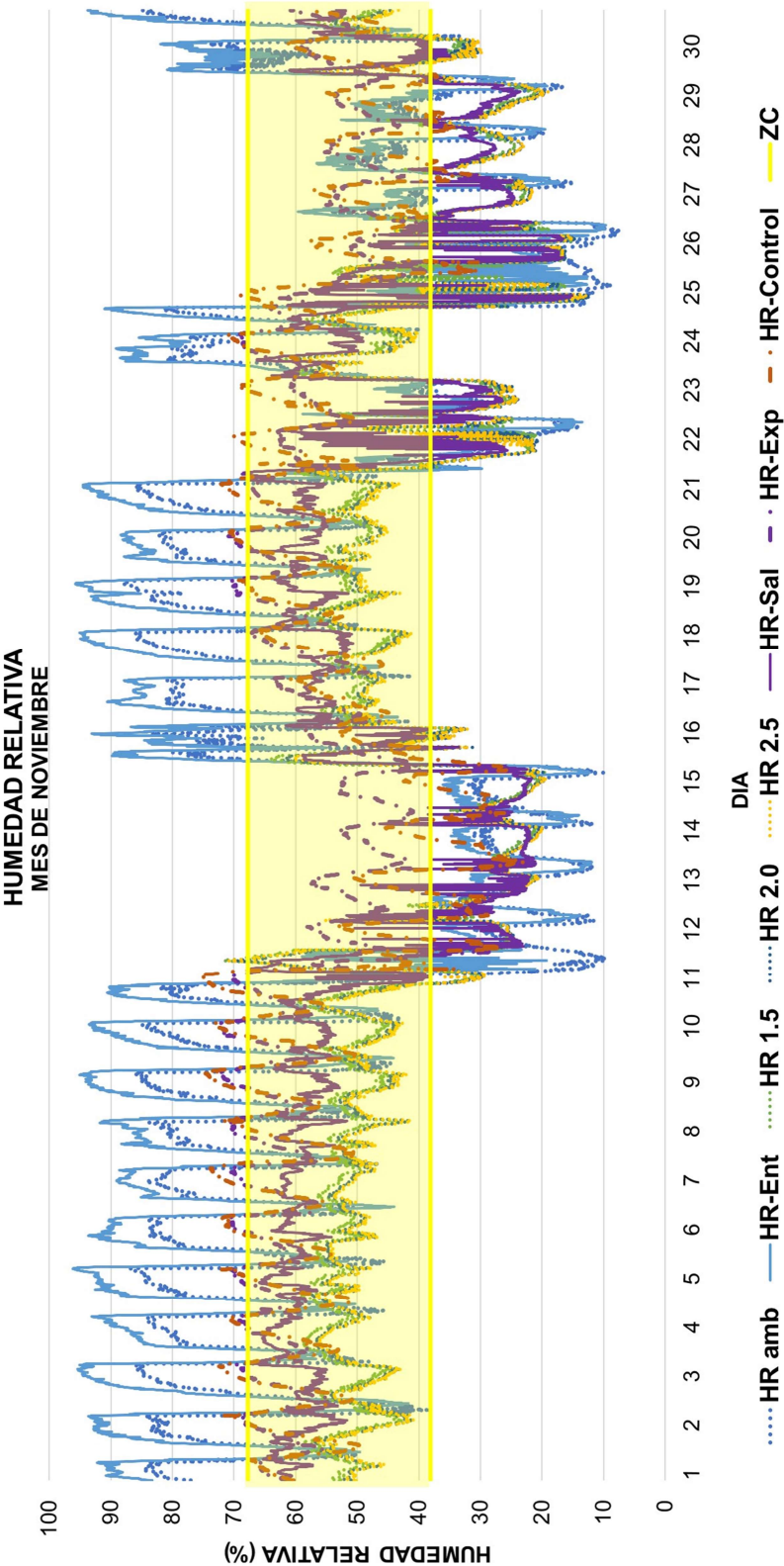
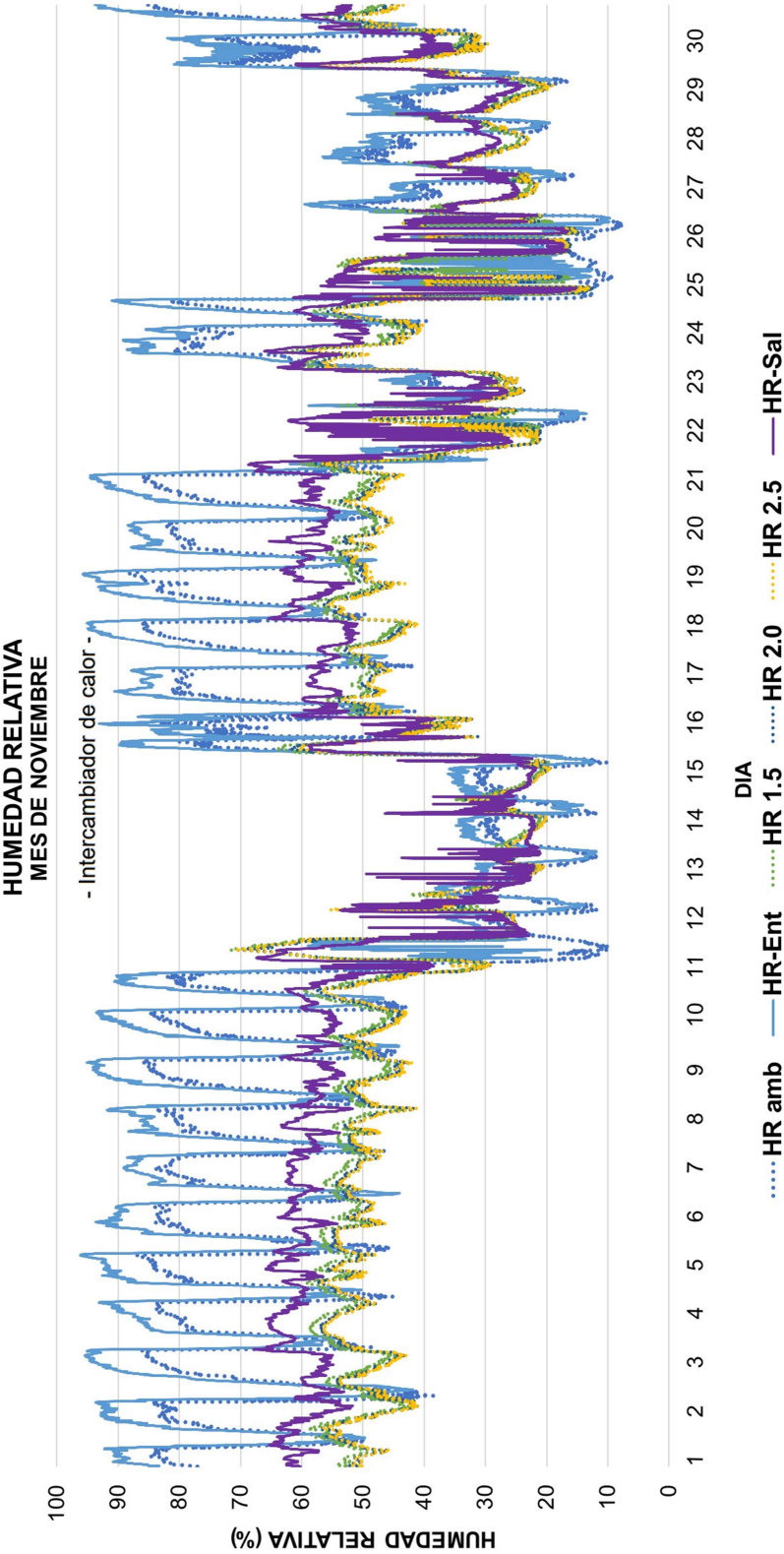




Figura A 23

Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de noviembre



Así mismo, el sistema logró una deshumidificación efectiva promedio de 22,6 % de HR de la entrada del IC hasta la profundidad de 1,5 m, con un promedio máximo de 32,9 % de HR. De esta primera profundidad a la de 2,0 m, la humedad aumenta 2,1 % de HR en promedio, sin embargo, presenta deshumidificación mayor parte del tiempo, con un 1,6 % de HR en promedio, y máxima promedio de 2,0 % de HR. Durante el recorrido de la segunda profundidad a la de 2,5 m, se presentan ambas condiciones, tanto de humidificación y deshumidificación con un 0,6 % de HR y 0,5 % de HR en promedio, respectivamente, siendo esta última la que se presenta por más constantemente. Por lo anterior, la máxima deshumidificación en esta etapa del sistema, continuó presentándose de la entrada a la primera profundidad del IC.

#### ➤ Espacio habitado

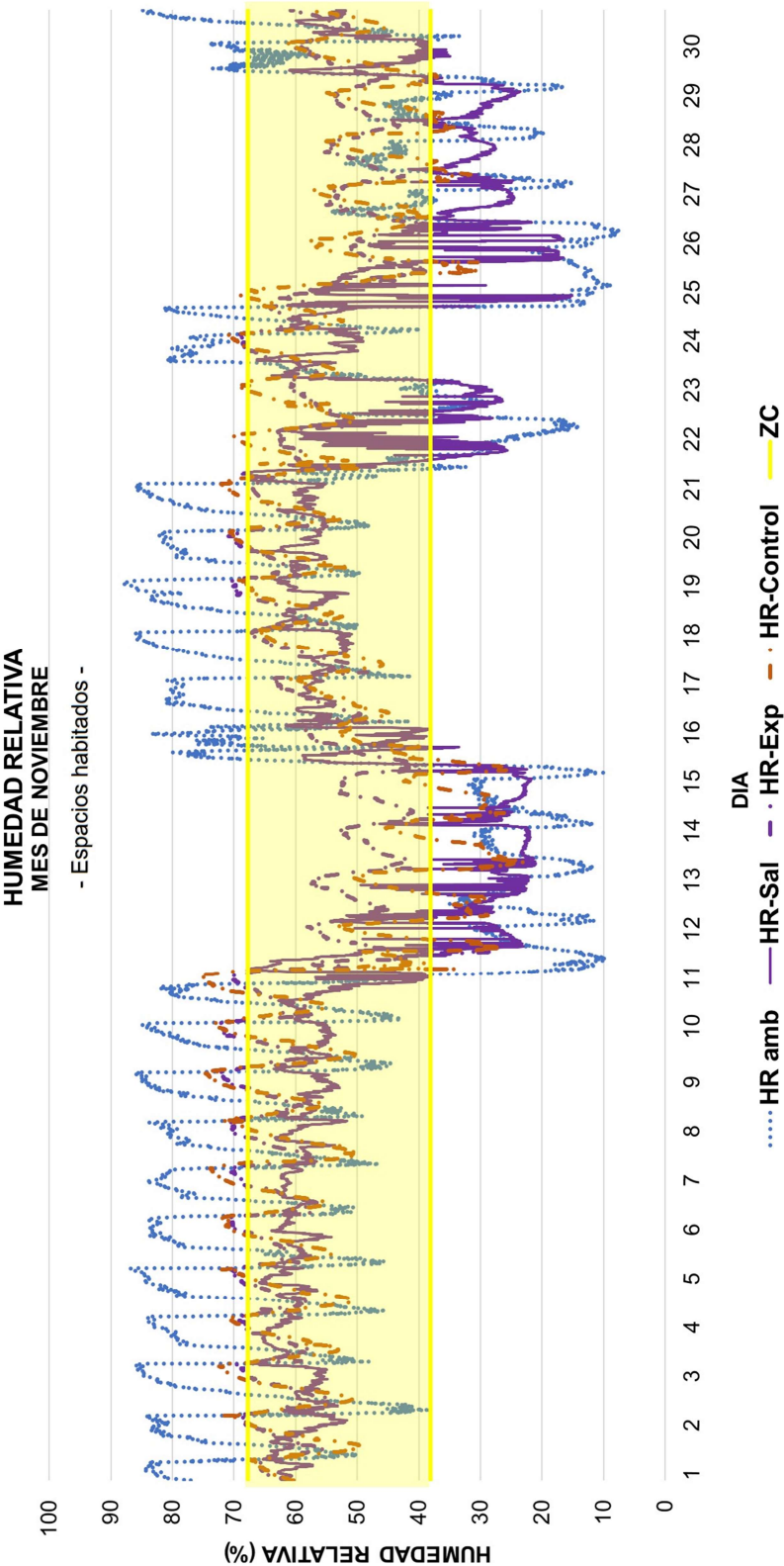
Al comparar la HR del ambiente con la del espacio experimental, se observó que, en este último, se presentaron condiciones de deshumidificación de 11,7 % de HR, en promedio, el 48,3 % del mes, con un valor máximo extremo de 29,9 % de HR (18,2 % por encima del promedio); esto sucedió durante los horarios de elevada HR en el ambiente. Mientras, el tiempo restante, se desarrollaron condiciones de humidificación de 15,2 % de HR, en promedio, con un valor máximo extremo de 48,9 % de HR (33,7 % de HR encima del promedio); esto, en los horarios de baja HR en el ambiente. Por lo tanto, se estima un desempeño efectivo de 26,9 % de HR en el espacio experimental con respecto al ambiente exterior.

Ahora bien, al comparar los datos obtenidos con los del espacio de control, se observó que, en este, las condiciones de humedad relativa siguen presentándose, al igual que los meses anteriores, por debajo del espacio experimental; durante este mes, la diferencia fue de 5,6 % de HR, en promedio. Sin embargo, también se observan condiciones en las que el espacio de control presenta mayor humedad, 2,6 % de HR en promedio (Figura A 24).



Figura A 24

Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de noviembre



En lo que respecta a confort, el 84,7 % del periodo evaluado, la humedad relativa en el espacio experimental se mantuvo dentro de la zona de confort establecida para el periodo térmico de transición cálido-frío. Mientras, el espacio de control, lo hizo el 71,2 % del periodo. Por su parte, la salida del IC se mantuvo en dicho rango el 72,9 % del mismo.

### Periodo frío (segunda parte)

#### Diciembre

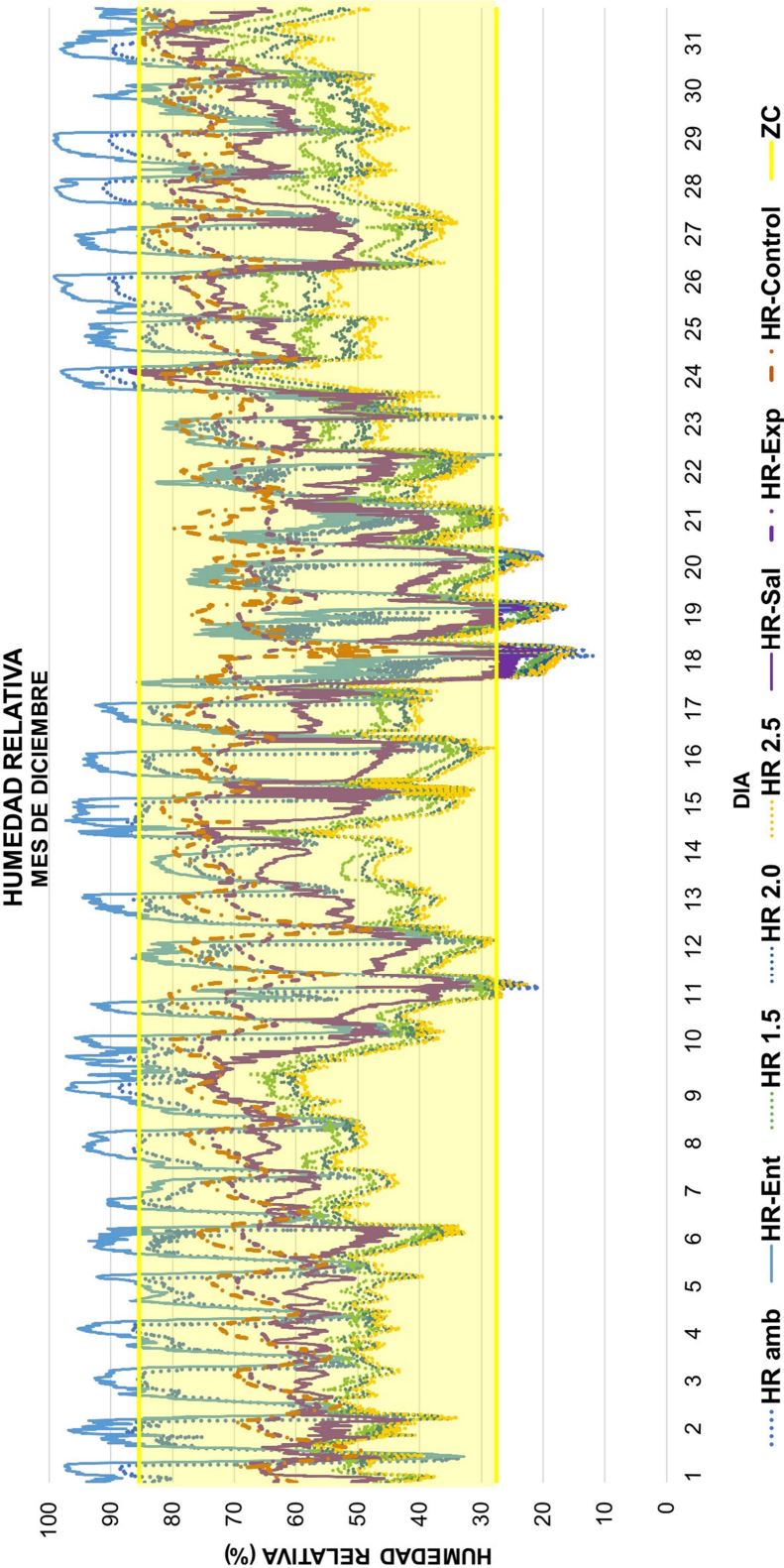
De acuerdo a la caracterización climática de Huerta (2018), en la ciudad de Ensenada, en diciembre se presenta una humedad relativa máxima promedio, una media y una mínima promedio, de 86,8 %, 67,8 % y 41,8 %, respectivamente. Sin embargo, durante el periodo de evaluación del sistema, este mes presentó las siguientes magnitudes respectivamente, 84,5 %, 68,0 % y 42,2 %. Por lo tanto, los valores recabados durante el periodo de evaluación son similares a las establecidas en la caracterización climática, con una diferencia máxima de 2,3 % de HR. En este mes, las condiciones de elevada HR se presentaron el 55,0 % del periodo, mientras que las condiciones de baja HR, se presentaron el 3,2 % del periodo evaluado (Figura A 25).

#### ➤ Intercambiador

Al comparar la HR del ambiente con la de la salida del IC se observó que, en esta última, el 75,3 % del periodo, se presentaron condiciones de deshumidificación de 17,4 % de HR, en promedio. Mientras, el 24,7 % del periodo, se registraron condiciones de humidificación de 6,2 % de HR, en promedio. Por lo que, en este mes, el desempeño efectivo del sistema osciló en un rango de 23,6 % de HR en promedio. Sin embargo, el promedio máximo de deshumidificación logrado durante este periodo correspondió a 29,4 % de HR (12,0 % de HR por encima del promedio), con un valor máximo extremo de 39,0 % de HR (21,6 % de HR encima del promedio); por su parte, el promedio máximo de humidificación registrado fue de 14,4 % de HR (8,2 % de HR encima del promedio), con un valor máximo extremo de 30,7 % de HR (24,5 % de HR encima del promedio).

Figura A 25

Humedades relativas registradas el mes de diciembre.



Por lo anterior, fue posible advertir que el sistema presentó un mejor desempeño en la deshumidificación, refiriéndose a valores promedio, sin embargo, en valores extremos, la humidificación fue la que presentó mejor desempeño. No obstante, la deshumidificación continuó siendo el proceso predominante durante el periodo evaluado (Figura A 26).

Así mismo, el sistema logró una deshumidificación efectiva promedio de 28,1 % de HR de la entrada del IC hasta la profundidad de 1,5 m, con un promedio máximo de 36,2 % de HR. De esta primera profundidad a la de 2,0 m, la humedad aumenta 1,8 % de HR en promedio, sin embargo, presenta deshumidificación la mayor parte del tiempo, con un 3,8 % de HR en promedio, y máxima promedio de 7,2 % de HR. Durante el recorrido de la segunda profundidad a la de 2,5 m, se presentan ambas condiciones, tanto de humidificación y deshumidificación con un 1,2 % de HR y 1,9 % de HR en promedio, respectivamente, siendo esta última la que se presenta constantemente. Por lo anterior, la máxima deshumidificación en esta etapa del sistema, continuó presentándose de la entrada a la primera profundidad del IC. Además, se puede observar que, en este mes, la deshumidificación que se presenta en la segunda profundidad es del doble en comparación con el mes de noviembre y más del triple con respecto a los meses anteriores.

#### ➤ Espacio habitado

Al comparar la HR del ambiente con la del espacio experimental, se observó que, en este último, se presentaron condiciones de deshumidificación de 8,5 % de HR, en promedio, el 55,8 % del mes, con un valor máximo extremo de 23,1 % de HR (14,6 % por encima del promedio). Mientras tanto, el tiempo restante, se desarrollaron condiciones de humidificación de 13,5 % de HR, en promedio, con un valor máximo extremo de 53,5 % de HR (40,0 % de HR encima del promedio). Por lo tanto, se estima un desempeño efectivo de 22,0 % de HR en el espacio experimental con respecto al ambiente exterior (Figura A 27).



Figura A 26

Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de diciembre

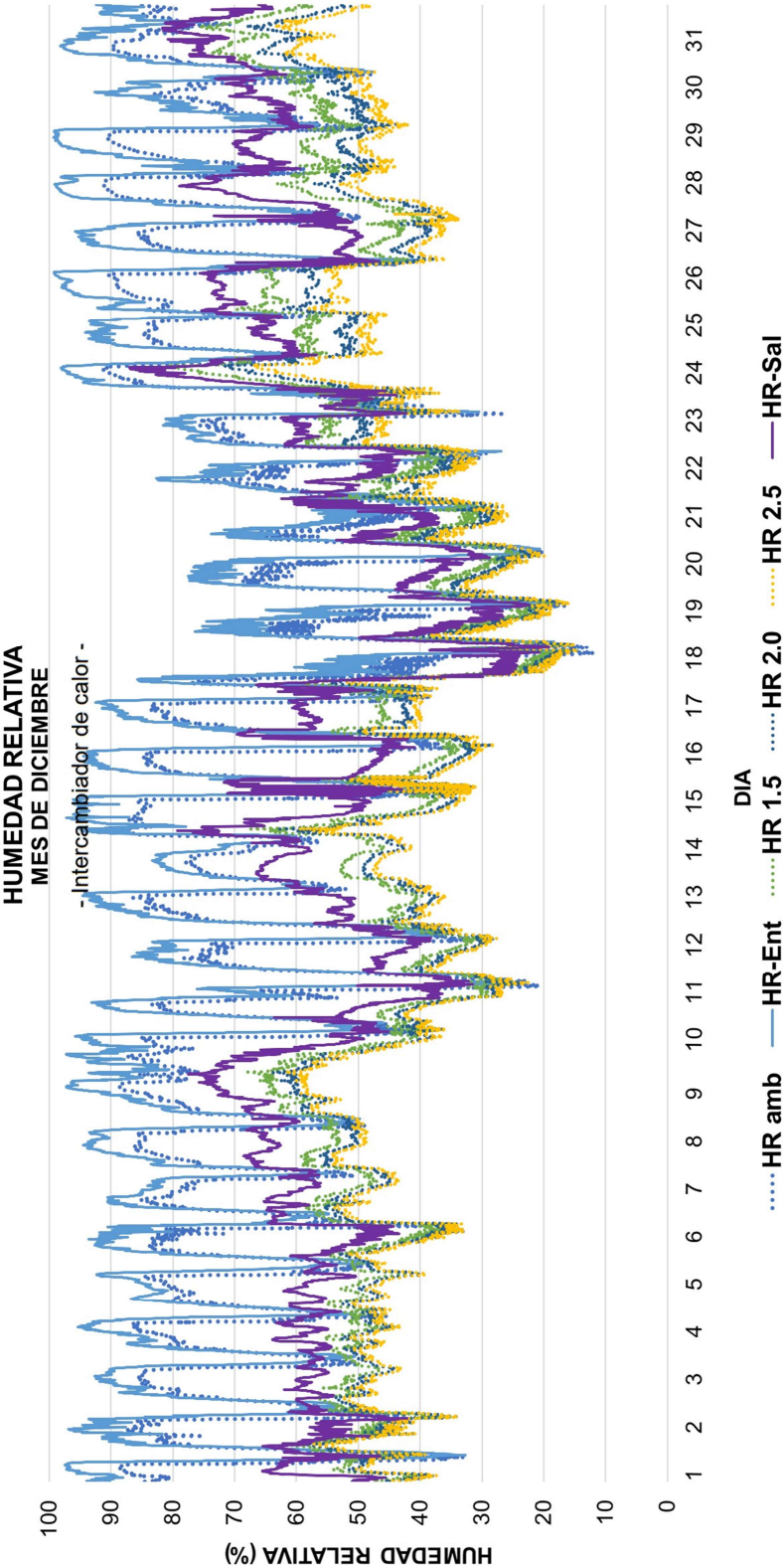
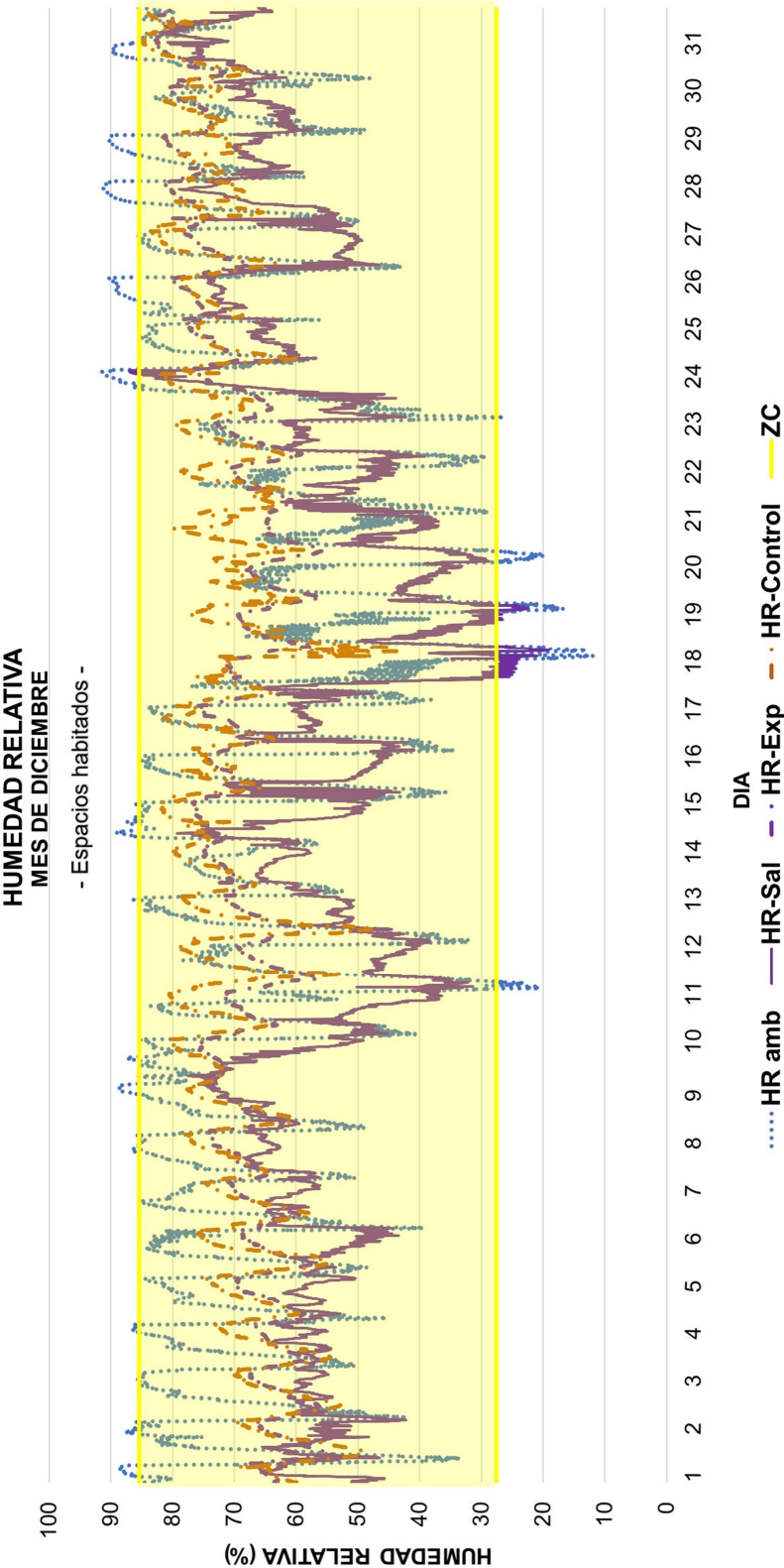


Figura A 27

Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de diciembre





Ahora bien, al comparar los datos obtenidos con los del espacio de control, se observó que, en este, las condiciones de humedad relativa siguen presentándose, al igual que los meses anteriores, por debajo del espacio experimental; durante este mes, la diferencia fue de 2,7 % de HR, en promedio. Sin embargo, también se observan condiciones en las que el espacio de control presenta mayor humedad, 3,6 % de HR en promedio, siendo esta última condición la que se presenta constantemente durante el periodo evaluado.

En lo que respecta a confort, tanto el espacio experimental como el de control se mantuvieron dentro de la zona de confort establecida para el periodo térmico frío, de 27,5 % a 85,4 % de HR, ya mencionado en el mes de abril. Por su parte, la salida del IC se mantuvo en dicho rango el 97,8 % del mismo.

## Enero

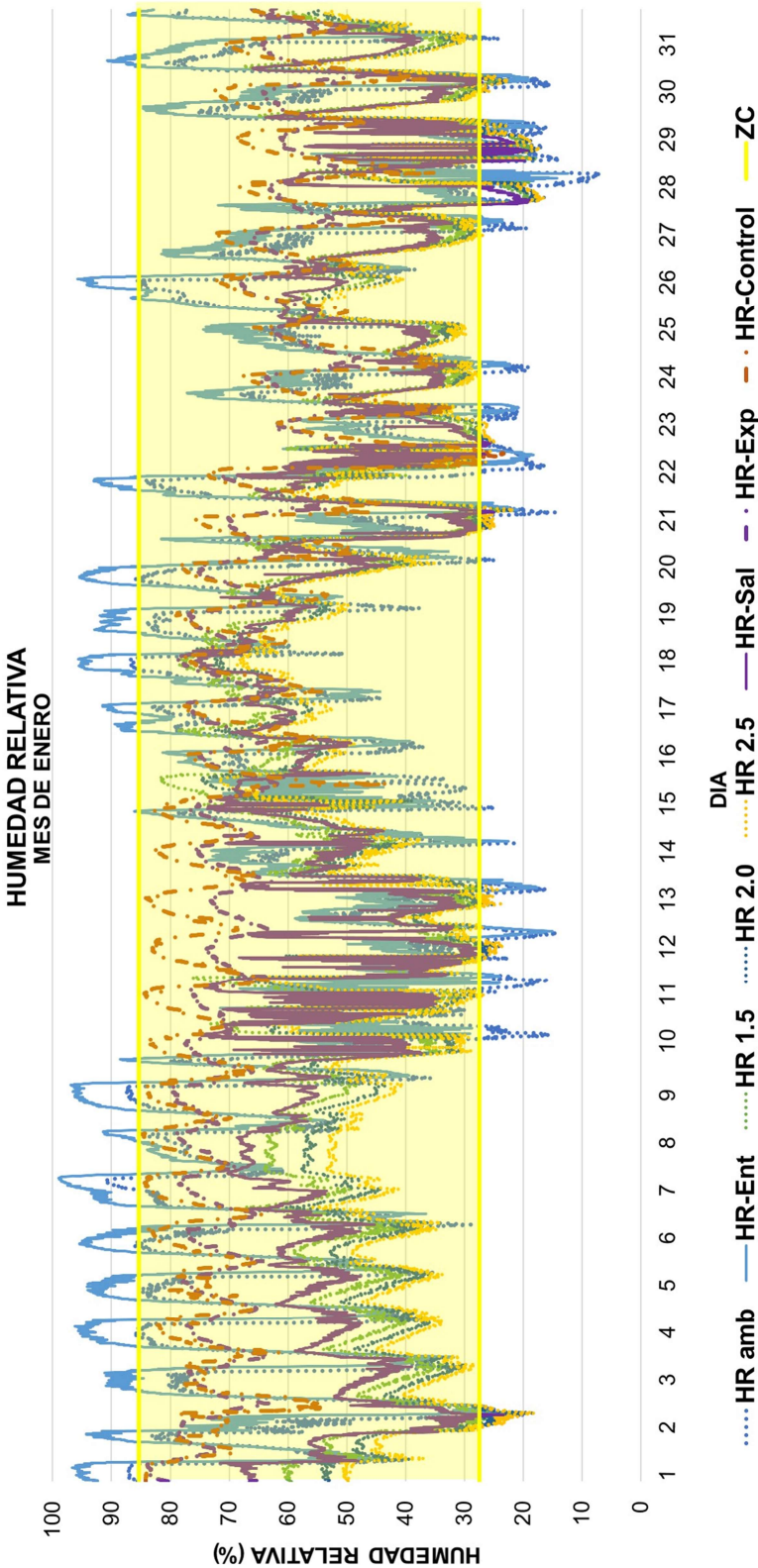
De acuerdo a la caracterización climática de Huerta (2018), en la ciudad de Ensenada, enero presenta una humedad relativa máxima promedio, una media y una mínima promedio, de 83,9 %, 65,4 % y 40,2 %, respectivamente. Sin embargo, durante el periodo de evaluación del sistema, este mes presentó las siguientes magnitudes respectivamente, 76,5 %, 54,6 % y 27,8 %. Por lo tanto, los valores recabados durante el periodo de evaluación estuvieron por debajo de los establecidos en la caracterización climática, con una diferencia significativa de 7,4 % de HR en la máxima, 10,8 % de HR en la media y 12,4 % de HR en la mínima.

En este mes, las condiciones de elevada HR se presentaron el 30,8 % del periodo, mientras que las condiciones de baja HR, se presentaron el 16,0 % del periodo evaluado (Figura A 28).

Es importante señalar que las condiciones hígricas ambientales de este mes se pueden considerar como atípicas, ya que el promedio de precipitación estuvo por debajo de lo establecido en las normales climatológicas, de 50,1 mm solo se presentaron 0,8 mm.

Figura A 28

Humedades relativas registradas el mes de enero.



### ➤ Intercambiador

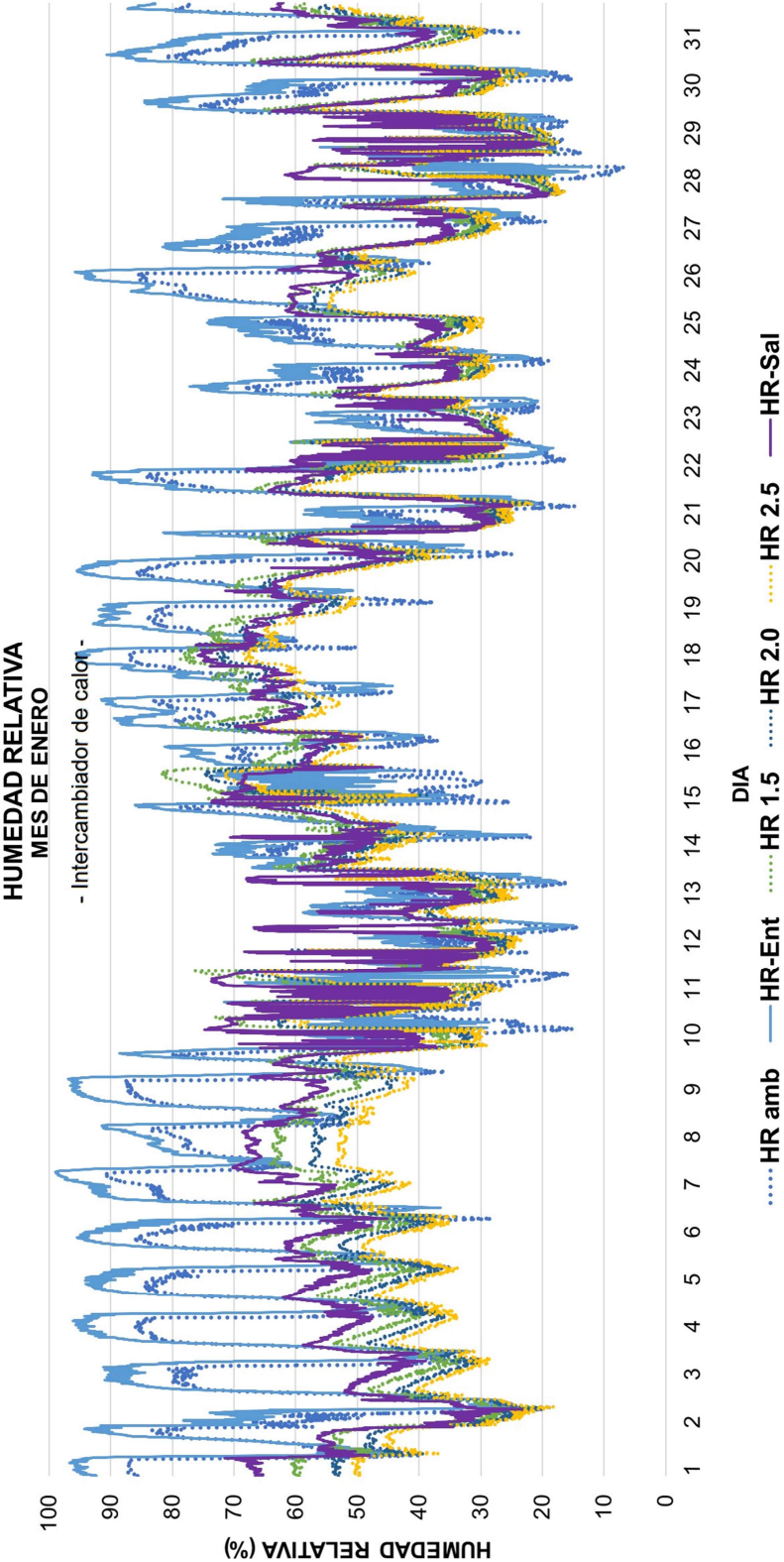
Al comparar la HR del ambiente con la de la salida del IC se observó que, en esta última, el 60,5 % del periodo se presentaron condiciones de deshumidificación de 15,0 % de HR, en promedio. Mientras tanto, el 39,5 % del periodo, se registraron condiciones de humidificación de 13,4 % de HR, en promedio. Por lo que, en este mes, el desempeño efectivo del sistema osciló en un rango de 28,4 % de HR en promedio. Sin embargo, el promedio máximo de deshumidificación logrado durante este periodo correspondió a 25,8 % de HR (10,8 % de HR encima del promedio), con un valor máximo extremo de 35,9 % de HR (20,9 % de HR arriba del promedio); por su parte, el promedio máximo de humidificación registrado fue de 32,5 % de HR (19,1 % de HR arriba del promedio), con un valor máximo extremo de 58,9 % de HR (45,5 % de HR por encima del promedio).

Por lo anterior, fue posible advertir que el sistema presentó un mejor desempeño en la humidificación, tanto en valores promedio como extremos; no obstante, la deshumidificación continuó siendo el proceso predominante durante el periodo evaluado (Figura A 29).

Así mismo, el sistema logró una deshumidificación efectiva promedio de 21,3 % de HR de la entrada del IC hasta la profundidad de 1,5 m, con un promedio máximo de 34,1 % de HR, sin embargo, también se presentaron condiciones de humidificación con un promedio de 8,1 % de HR y máxima promedio de 17,5 % de HR. De esta primera profundidad a la de 2,0 m, la humedad aumenta 2,7 % de HR en promedio, sin embargo, la mayor parte del tiempo presenta deshumidificación con un 4,0 % de HR en promedio, y máxima promedio de 6,1 % de HR. Durante el recorrido de la segunda profundidad a la de 2,5 m se presentan ambas condiciones, tanto de humidificación y deshumidificación con un 2,7 % de HR y 2,4 % de HR en promedio, respectivamente, siendo esta última la que se presenta constantemente. Por lo anterior, la máxima deshumidificación en esta etapa del sistema, continuó presentándose de la entrada a la primera profundidad del IC.

Figura A 29

Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de enero



### ➤ Espacio habitado

Al comparar la HR del ambiente con la del espacio experimental, se observó que, en este último, se presentaron condiciones de deshumidificación de 7,0 % de HR, en promedio, el 34,6 % del mes, con un valor máximo extremo de 22,7 % de HR (15,7 % por encima del promedio). El tiempo restante, se desarrollaron condiciones de humidificación de 21,1 % de HR, en promedio, con un valor máximo extremo de 54,4 % de HR (33,3 % de HR encima del promedio). Por lo tanto, se estima un desempeño efectivo de 28,1 % de HR en el espacio experimental con respecto al ambiente exterior. Ahora bien, al comparar los datos obtenidos con los del espacio de control, se observó que, en este, las condiciones de humedad relativa siguen presentándose, al igual que los meses anteriores, por debajo del espacio experimental; durante este mes, la diferencia fue de 4,4 % de HR, en promedio. Sin embargo, también se observan condiciones en las que el espacio de control presenta mayor humedad, 3,7 % de HR en promedio, siendo esta última la condición que se presenta la mayor parte del periodo evaluado.

Con respecto al rango de confort, el espacio experimental se mantuvo dentro del establecido para el periodo térmico frío, el 100% del periodo evaluado; el espacio de control lo hizo el 99,6 % del periodo, mientras que la salida del IC se mantuvo en dicho rango el 97,0 % del mismo (Figura A 30).

### Febrero

De acuerdo a la caracterización climática de Huerta (2018), en la ciudad de Ensenada, febrero presenta una humedad relativa máxima promedio, una media y una mínima promedio, de 89,5 %, 70,7 % y 46,2 %, respectivamente. Sin embargo, durante el periodo de evaluación del sistema, este mes presentó las siguientes magnitudes respectivamente, 62,1 %, 40,6 % y 18,2 %. Por lo tanto, los valores recabados durante el periodo de evaluación estuvieron por debajo de los establecidos en la caracterización climática, con una diferencia significativa de 27,4 % de HR en la máxima, 30,1 % de HR en la media y 28,0 % de HR en la mínima (Figura A 31).



Figura A 30

Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de enero

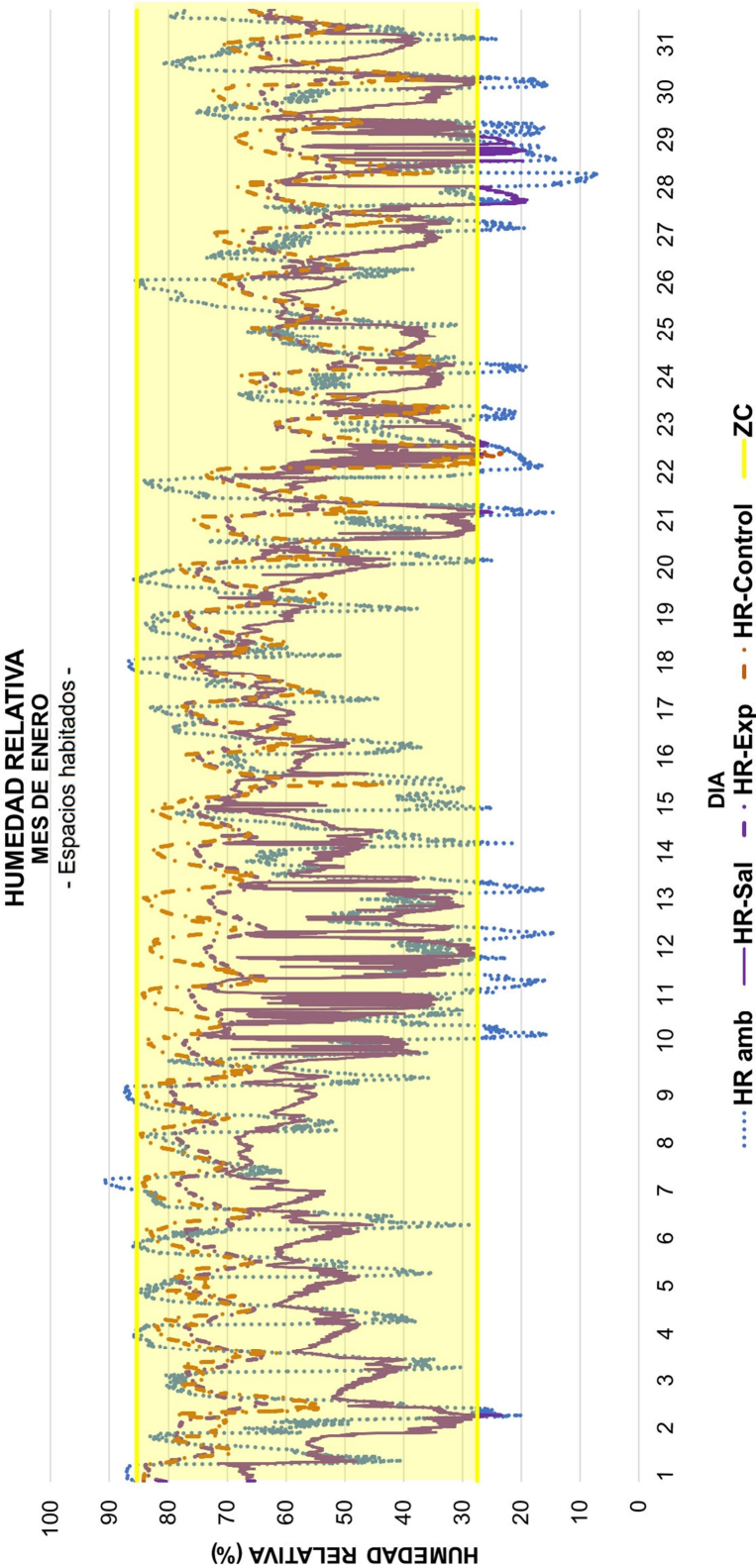
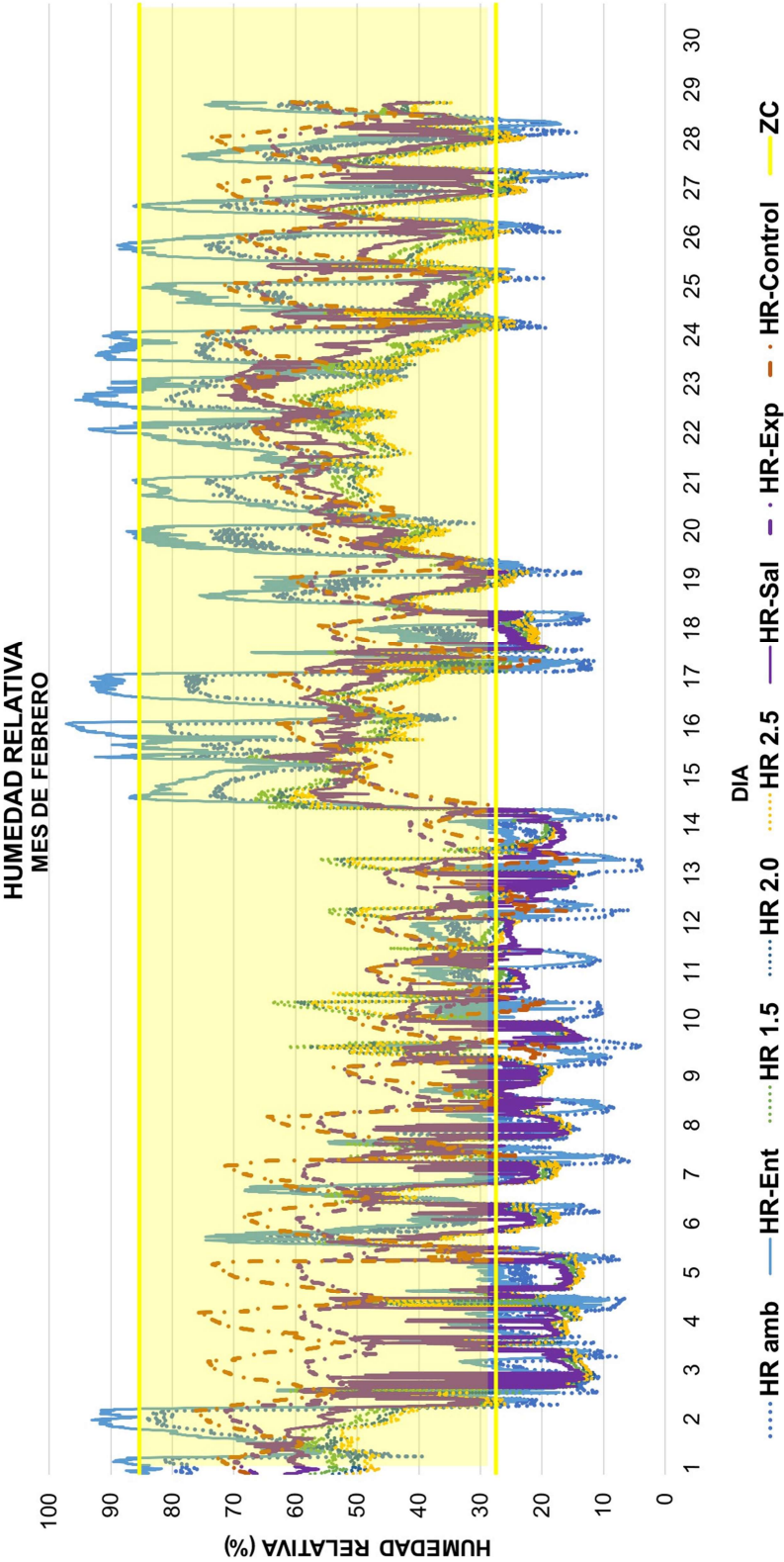




Figura A 31

Humedades relativas registradas el mes de febrero.



En este mes, las condiciones de elevada HR se presentaron el 16,1 % del periodo, mientras que las condiciones de baja HR, se presentaron el 43,2 % del periodo evaluado.

### ➤ Intercambiador

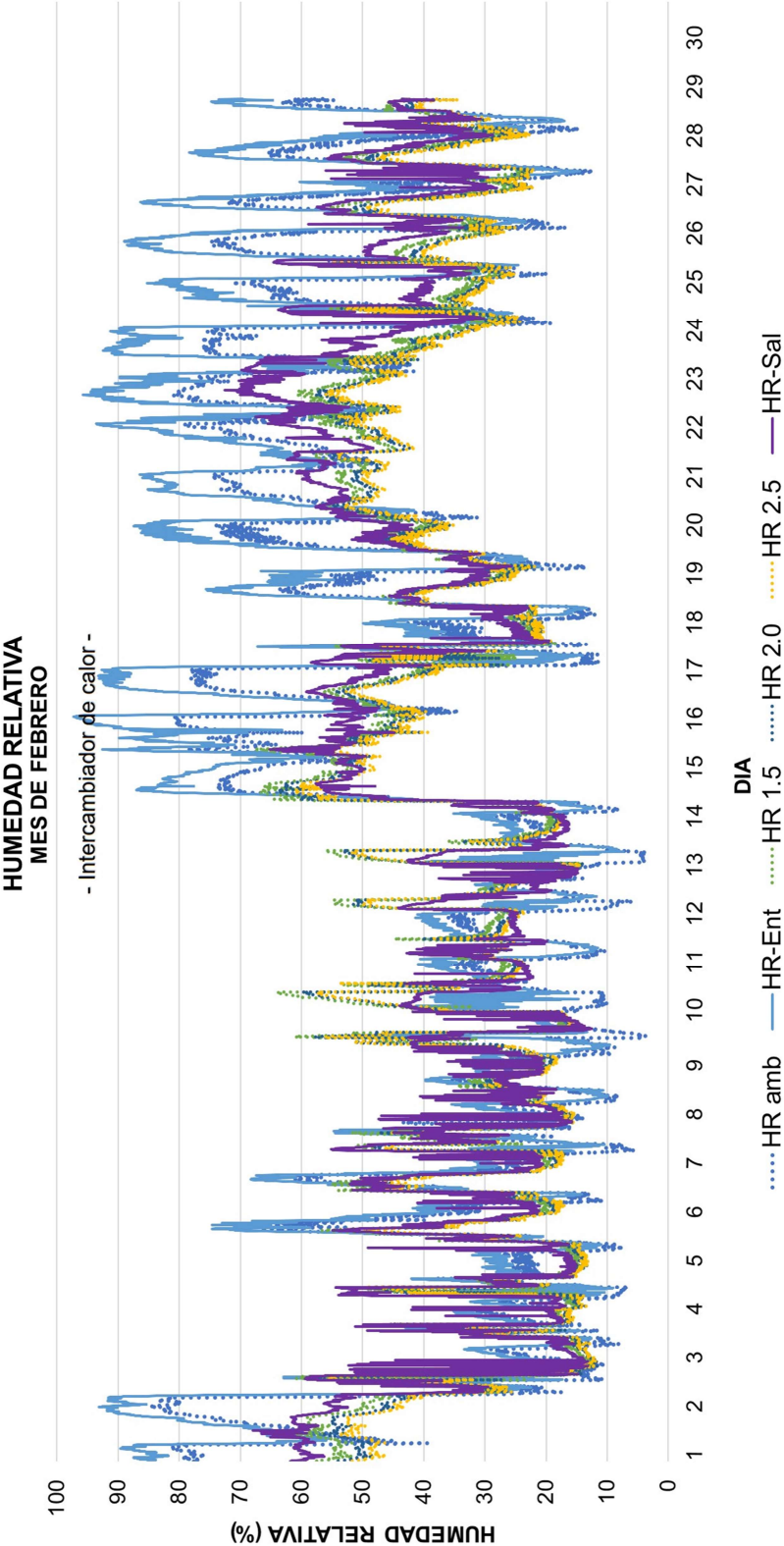
Al comparar la HR del ambiente con la de la salida del IC se observó que, en esta última, el 59,3 % del periodo se presentaron condiciones de deshumidificación de 11,7 % de HR, en promedio. Mientras tanto, el 40,7 % del periodo, se registraron condiciones de humidificación de 13,9 % de HR, en promedio. Por lo que, en este mes, el desempeño efectivo del sistema osciló en un rango de 25,6 % de HR en promedio. Sin embargo, el promedio máximo de deshumidificación logrado durante este periodo correspondió a 24,0 % de HR (12,3 % de HR encima del promedio), con un valor máximo extremo de 32,4 % de HR (20,7 % de HR arriba del promedio); por su parte, el promedio máximo de humidificación registrado fue de 28,0 % de HR (14,1 % de HR arriba del promedio), con un valor máximo extremo de 49,1 % de HR (35,2 % de HR por encima del promedio).

Por lo anterior, fue posible advertir que el sistema presentó un mejor desempeño en la humidificación, tanto en valores promedio como extremos; no obstante, la deshumidificación continuó siendo el proceso predominante durante el periodo evaluado (Figura A 32).

Así mismo, el sistema logró una deshumidificación efectiva promedio de 18,5 % de HR de la entrada del IC hasta la profundidad de 1,5 m, con un promedio máximo de 31,9 % de HR; también se presentaron condiciones de aumento de HR de 8,6 % de HR en promedio y máxima promedio de 17,3 % de HR. De esta primera profundidad a la de 2,0 m, la humedad incrementa 2,4 % de HR en promedio y promedio máxima de 6,1 % de HR; sin embargo, la mayor parte del tiempo presenta deshumidificación con una reducción de 2,1 % de HR en promedio, y máxima promedio de 3,7 % de HR.

Figura A 32

Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de febrero



Durante el recorrido de la segunda profundidad a la de 2,5 m se presentan ambas condiciones, tanto de humidificación y deshumidificación con un 1,4 % de HR y 1,1 % de HR en promedio, tanto en incremento como en reducción respectivamente. Por lo anterior, la máxima deshumidificación en esta etapa del sistema, continuó presentándose de la entrada a la primera profundidad del IC.

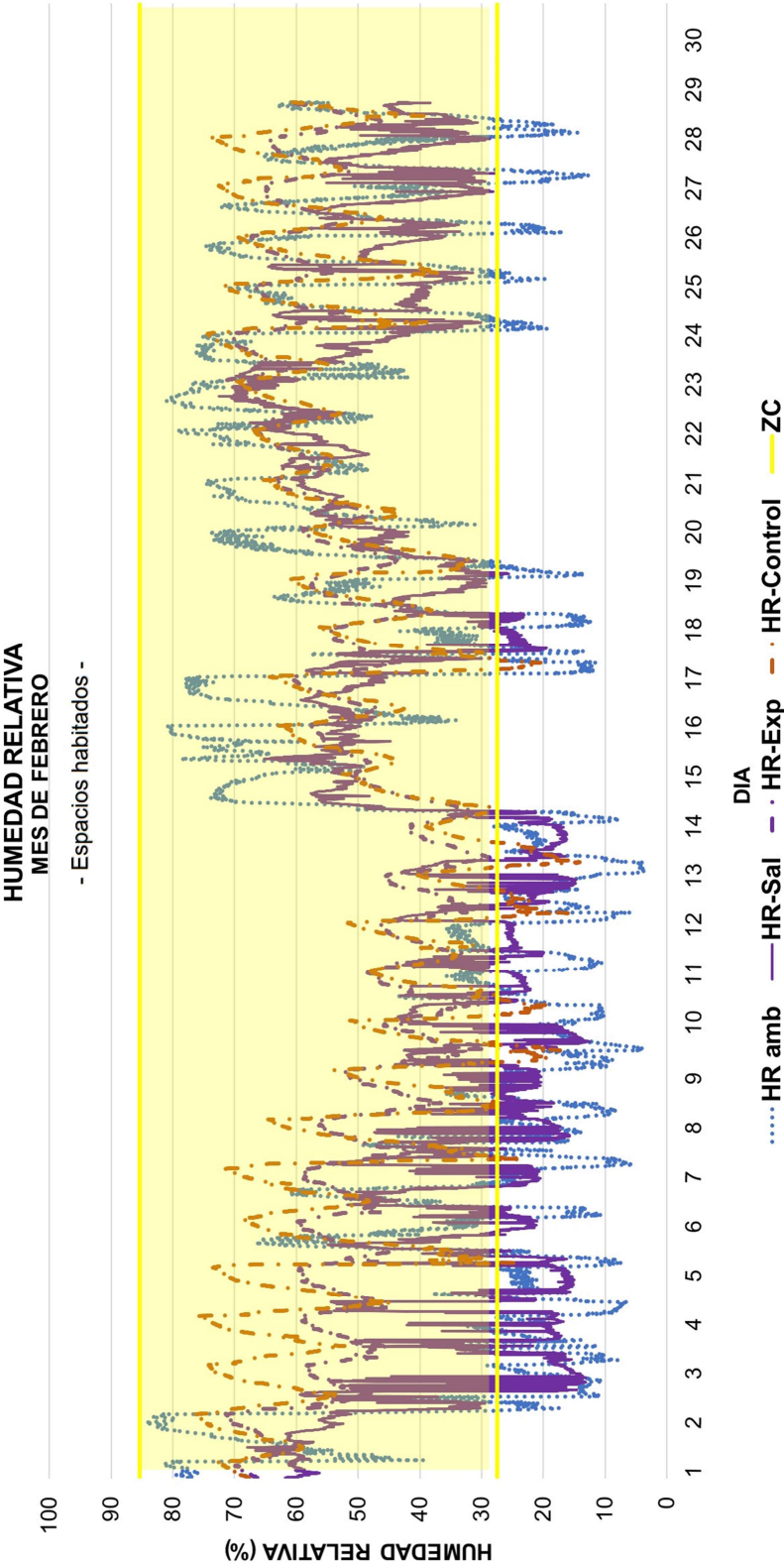
### ➤ Espacio habitado

Al comparar la HR del ambiente con la del espacio experimental, se observó que, en este último, se presentaron condiciones de deshumidificación de 8,4 % de HR, en promedio, el 30,5 % del mes, con un valor máximo extremo de 24,5 % de HR (16,1 % por encima del promedio). El tiempo restante, se desarrollaron condiciones de humidificación de 19,7 % de HR, en promedio, con un valor máximo extremo de 33,4 % de HR (13,7 % de HR encima del promedio). Por lo tanto, se estima un desempeño efectivo de 28,2 % de HR en el espacio experimental con respecto al ambiente exterior. Ahora bien, al comparar los datos obtenidos con los del espacio de control, se observó que, en este, las condiciones de humedad relativa siguen presentándose, al igual que los meses anteriores, por debajo del espacio experimental; durante este mes, la diferencia fue de 6,1 % de HR, en promedio. Sin embargo, también se observan condiciones en las que el espacio de control presenta mayor humedad, 3,9 % de HR en promedio, siendo esta última la condición que se presenta la mayor parte del periodo evaluado (Figura A 33).

Con respecto al rango de confort, el espacio experimental se mantuvo dentro del establecido para el periodo térmico frío, el 99,8% del periodo evaluado; el espacio de control lo hizo el 92,8 % del periodo, mientras que la salida del IC se mantuvo en dicho rango el 71,6 % del mismo.

Figura A 33

Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de febrero





## Marzo

De acuerdo a la caracterización climática de Huerta (2018), en la ciudad de Ensenada se presenta una humedad relativa máxima promedio, una media y una mínima promedio, de 90,2 %, 74,9 % y 50,2 %, respectivamente. Sin embargo, durante el periodo de evaluación del sistema, este mes presentó las siguientes magnitudes respectivamente, 75,1 %, 54,4 % y 27,0 %. Por lo tanto, los valores recabados durante el periodo de evaluación estuvieron por debajo de los establecidos en la caracterización climática, con una diferencia significativa de 15,1 % de HR en la máxima, 20,5 % de HR en la media y 23,2 % de HR en la mínima (Figura A 34).

En este mes, las condiciones de elevada HR se presentaron el 28,2 % del periodo, mientras que las condiciones de baja HR, se presentaron el 13,4 % del periodo evaluado.

### ➤ Intercambiador

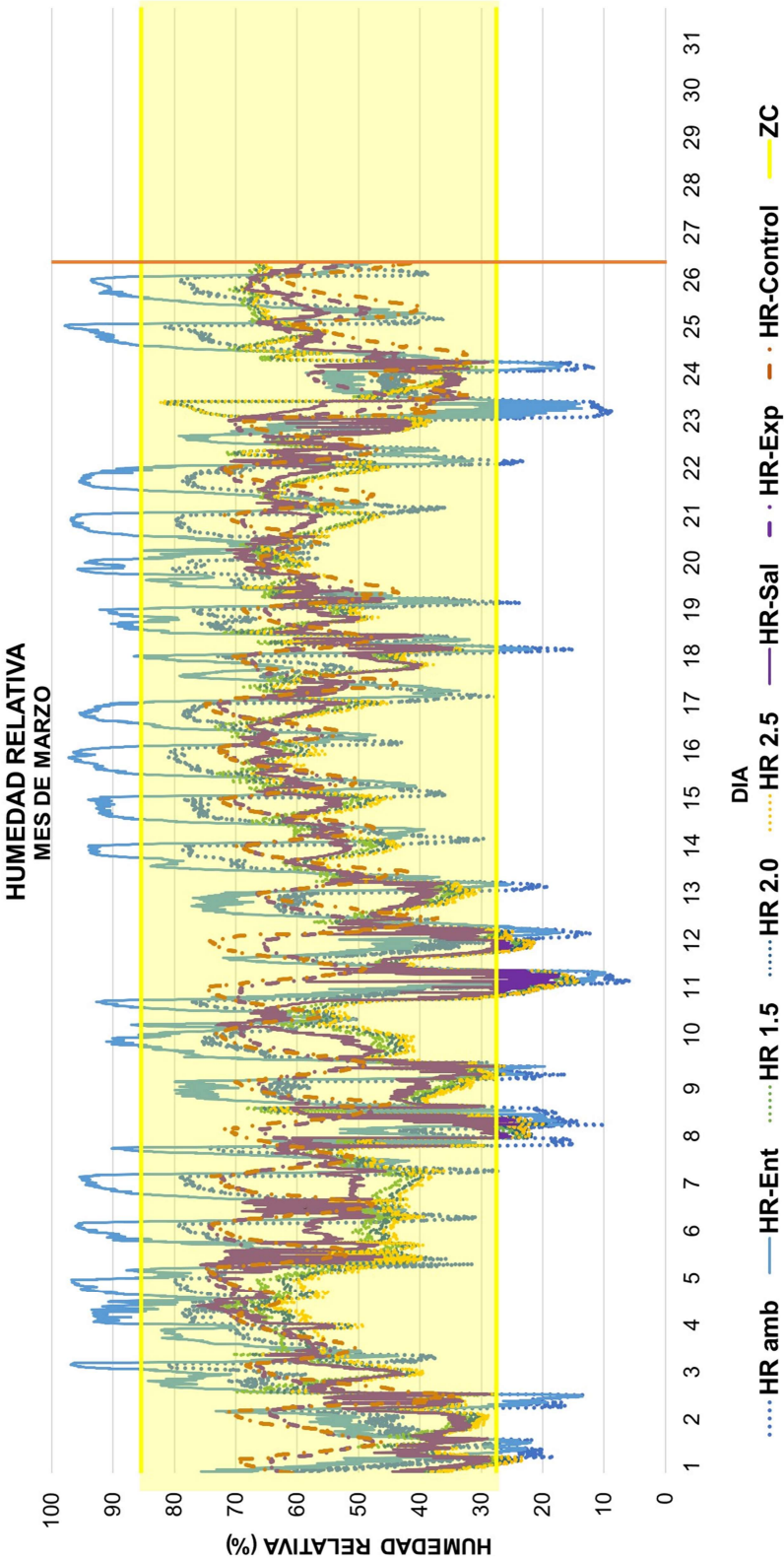
Al comparar la HR del ambiente con la de la salida del IC se observó que, en esta última, el 57,9 % del periodo se presentaron condiciones de deshumidificación de 12,8 % de HR, en promedio. Mientras tanto, el 42,1 % del periodo, se registraron condiciones de humidificación de 14,3 % de HR, en promedio. Por lo que, en este mes, el desempeño efectivo del sistema osciló en un rango de 27,1 % de HR en promedio. Sin embargo, el promedio máximo de deshumidificación logrado durante este periodo correspondió a 19,1 % de HR (6,3 % de HR encima del promedio), con un valor máximo extremo de 29,8 % de HR (17,0 % de HR arriba del promedio); por su parte, el promedio máximo de humidificación registrado fue de 40,2 % de HR (25,9 % de HR arriba del promedio), con un valor máximo extremo de 57,0 % de HR (42,7 % de HR por encima del promedio).

Por lo anterior, fue posible advertir que el sistema presentó un mejor desempeño en la humidificación, tanto en valores promedio como extremos; no obstante, la deshumidificación continuó siendo el proceso predominante durante el periodo evaluado (Figura A 35).



Figura A 34

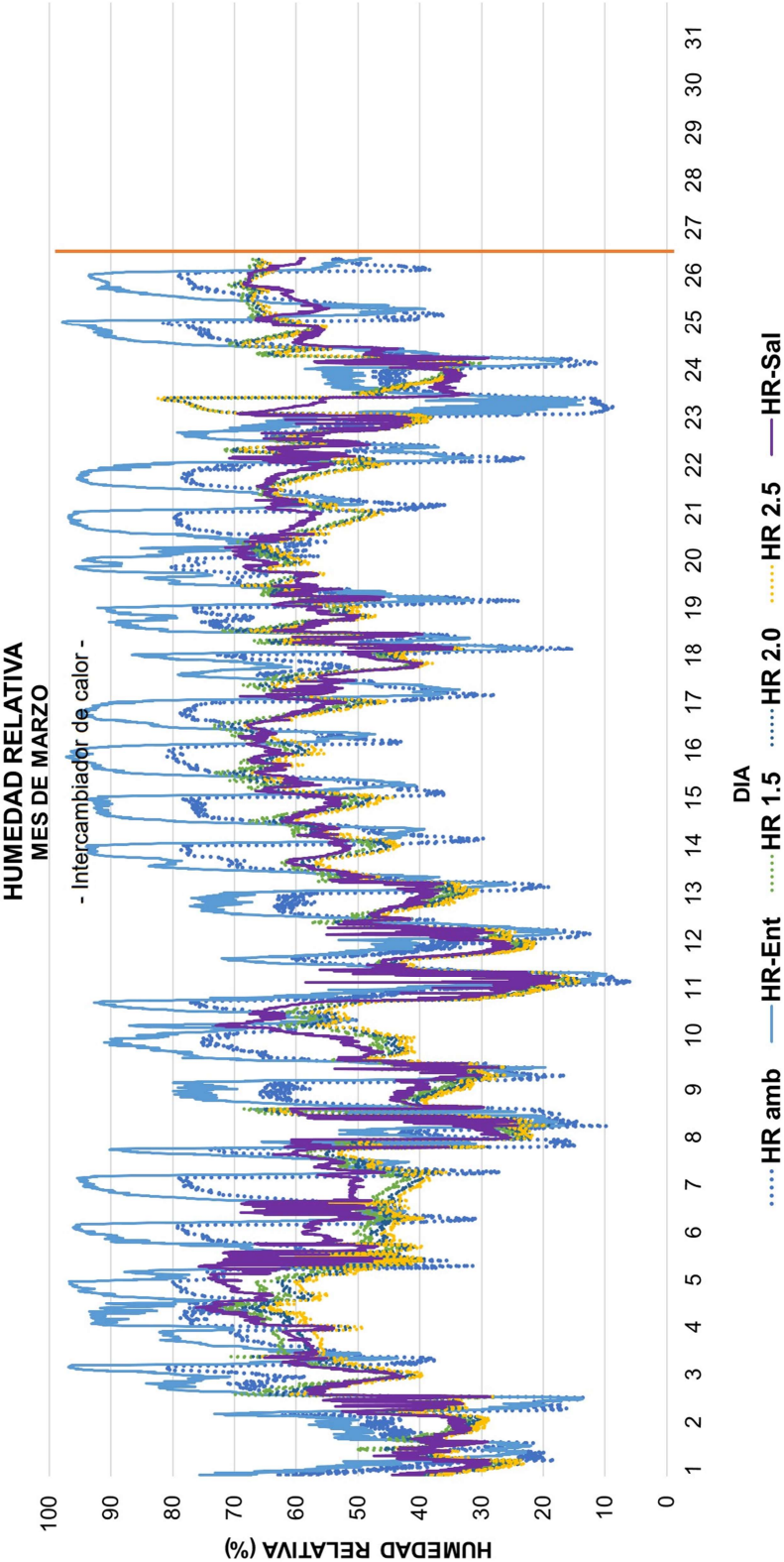
Humedades relativas registradas el mes de marzo.



Nota. La línea vertical naranja indica que concluye el periodo de análisis mensual

Figura A 35

Relación de HR del ambiente y la HR del sistema (segmento IC) del mes de marzo



Nota. La línea vertical naranja indica que concluye el periodo de análisis mensual

Así mismo, el sistema logró una deshumidificación efectiva promedio de 23,5 % de HR de la entrada del IC hasta la profundidad de 1,5 m, con un promedio máximo de 30,9 % de HR; también se presentaron condiciones de aumento de HR de 11,2 % de HR en promedio y máxima promedio de 34,1 % de HR. De esta primera profundidad a la de 2,0 m, la humedad incrementa 1,7 % de HR en promedio y promedio máxima de 5,1 % de HR; sin embargo, la mayor parte del tiempo presenta deshumidificación con una reducción de 2,2 % de HR en promedio, y máxima promedio de 3,9 % de HR. Durante el recorrido de la segunda profundidad a la de 2,5 m se presentan ambas condiciones, tanto de humidificación y deshumidificación con un 1,4 % de HR en promedio para ambos casos, sin embargo, la deshumidificación fue el proceso que predominó la mayor parte del tiempo. Por lo anterior, la máxima deshumidificación en esta etapa del sistema, continuó presentándose de la entrada a la primera profundidad del IC.

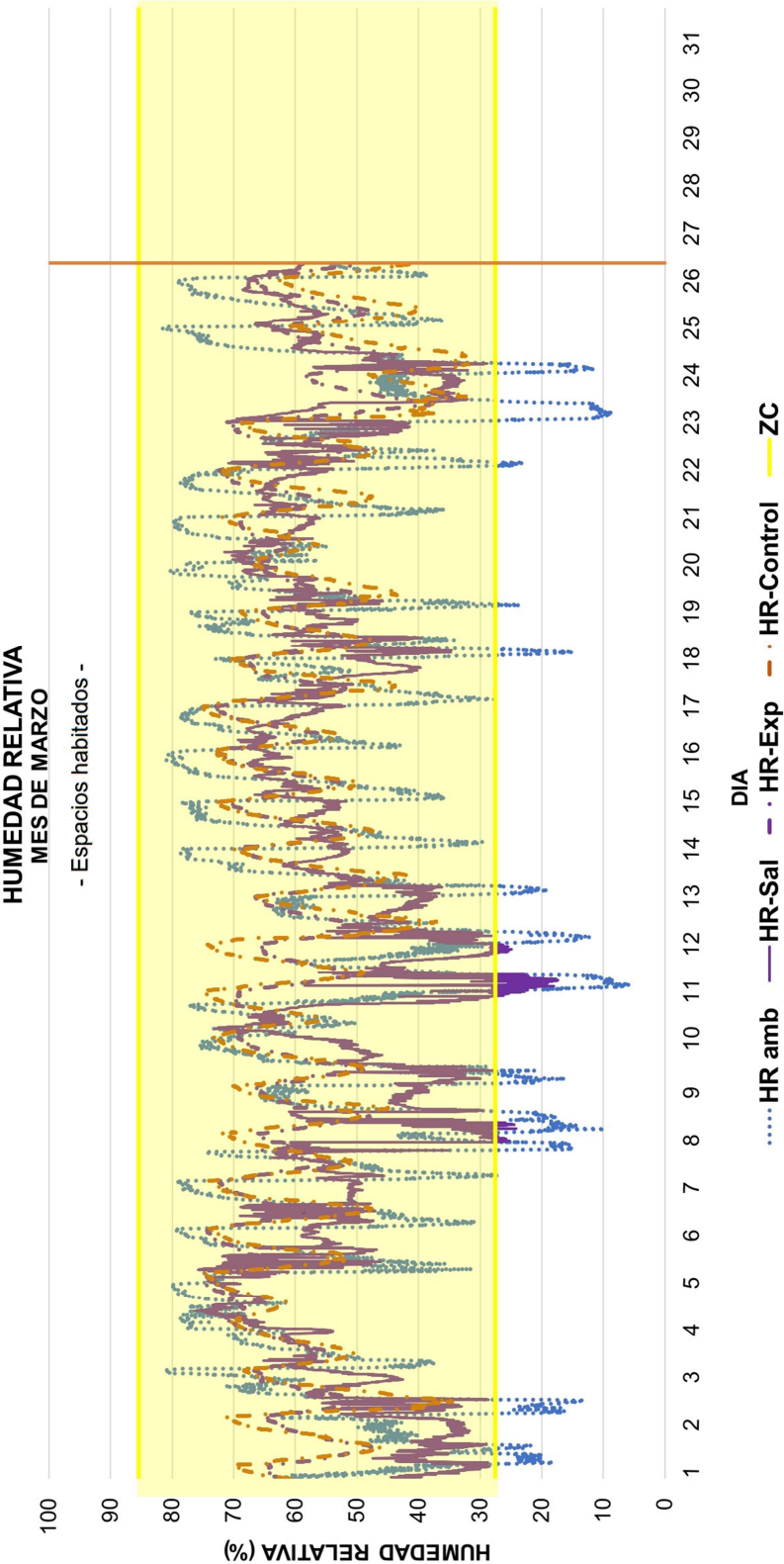
#### ➤ Espacio habitado

Al comparar la HR del ambiente con la del espacio experimental, se observó que, en este último, se presentaron condiciones de deshumidificación de 6,4 % de HR, en promedio, el 44,0% del mes, con un valor máximo extremo de 19,0 % de HR (12,6 % por encima del promedio). El tiempo restante, se desarrollaron condiciones de humidificación de 16,1 % de HR, en promedio, con un valor máximo extremo de 29,5 % de HR (13,4 % de HR encima del promedio). Por lo tanto, se estima un desempeño efectivo de 22,5 % de HR en el espacio experimental con respecto al ambiente exterior.

Ahora bien, al comparar los datos obtenidos con los del espacio de control, se observó que, en este, las condiciones de humedad relativa siguen presentándose, al igual que los meses anteriores, por debajo del espacio experimental; durante este mes, la diferencia fue de 6,1 % de HR, en promedio. Sin embargo, también se observan condiciones en las que el espacio de control presenta mayor humedad, 1,9 % de HR en promedio (Figura A 36).

Figura A 36

Relación de HR del ambiente y la HR de los espacios habitados, del mes de marzo



Nota. La línea vertical naranja indica que concluye el periodo de análisis mensual

Con respecto al rango de confort, tanto el espacio experimental como el espacio de control se mantuvieron dentro del establecido para el periodo térmico frío, mientras que la salida del IC se mantuvo en dicho rango el 97,56 % del mismo.



## APÉNDICE B.

### Desempeño térmico mensual.

#### Periodo frío

##### Abril

Huerta (2018), en su caracterización climática de la ciudad de Ensenada, indica que en este mes se presenta una temperatura máxima promedio, una media y una mínima promedio de 20,0 °C, 15,7 °C y 11,4 °C, respectivamente. Sin embargo, en la evaluación del sistema se registraron, durante dicho mes, magnitudes de 28,3 °C, 18,5 °C y 12,2 °C, respectivamente (Figura B 1). Con ello, se puede observar que las temperaturas registradas son mayores a las establecidas por el autor.

#### ➤ Intercambiador

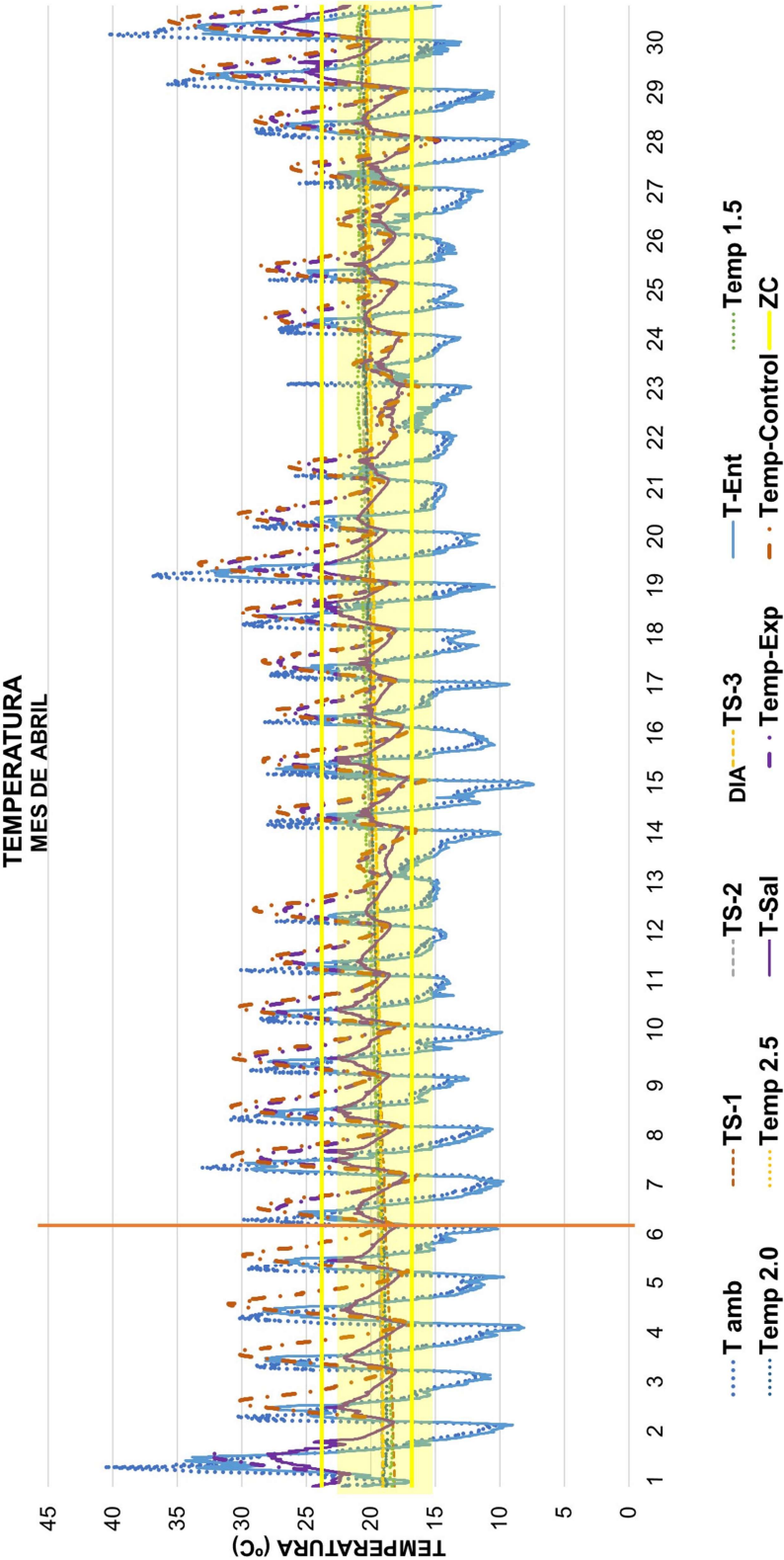
Con respecto a la temperatura ambiente y la del sistema en la salida del IC, se observó la presencia de dos situaciones: condiciones de incremento y disminución en este último. La primera, representó el 70 % del periodo evaluado, con una diferencia promedio de 3,9 °C, y un valor máximo extremo de calentamiento de 9,2 °C.

Mientras, la disminución de la temperatura se presentó el 30 % restante del periodo, con una diferencia promedio de 4,4 % y valor máximo extremo de 17,6 °C. La temperatura promedio que se registró en la salida del IC fue de 19,7 °C. No obstante, el promedio máximo del incremento de la temperatura fue de 5,3 °C (1,4 °C encima del promedio), mientras que la disminución fue de 9,2 °C (4,8 °C encima del promedio). Por lo tanto, el sistema observó un mejor desempeño a la reducción de temperatura, tanto promedio como extremo, a pesar de que el incremento de la temperatura prevaleció por más tiempo durante el periodo evaluado (Figura B 2).



Figura B 1

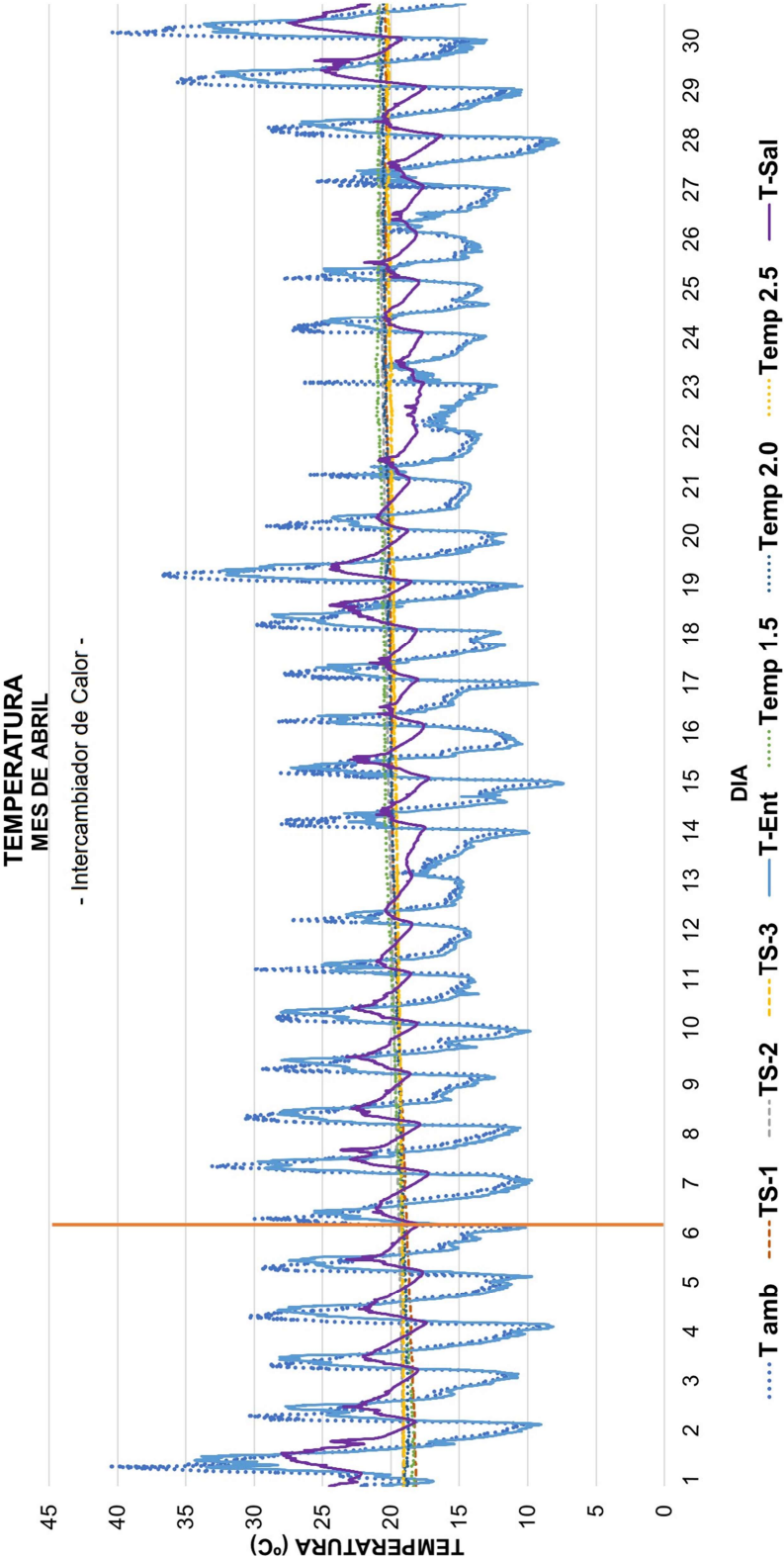
Temperaturas registradas en el mes de abril



Nota. La línea vertical naranja indica el inicio del periodo de análisis.

Figura B 2

Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de abril



Nota. La línea vertical naranja indica el inicio del periodo de análisis.

Con respecto a la influencia que la temperatura del suelo tiene sobre el sistema en el segmento del IC, se observó un aumento de temperatura de 0,5 °C en promedio en el interior del IC a 1,5 m de profundidad con respecto a la temperatura del suelo (TS-1); por el contrario, en la profundidad 2,5 m se observó una reducción de temperatura de 0,2 °C en el interior del IC con respecto a la temperatura del suelo (TS-2); mientras que en la profundidad 2,5 m, se da un aumento de 0,1 °C de la temperatura de suelo (TS-3) hacia el interior del IC. Por lo anterior, y al analizar las temperaturas promedio en las tres profundidades, tanto de las temperaturas del suelo (20,0 °C, 20,3 °C y 19,8 °C, respectivamente) como las del IC (20,5 °C, 20,1 °C y 19,8 °C, respectivamente), se advierte que el sistema logró una estabilidad térmica en el IC.

#### ➤ Espacio habitado

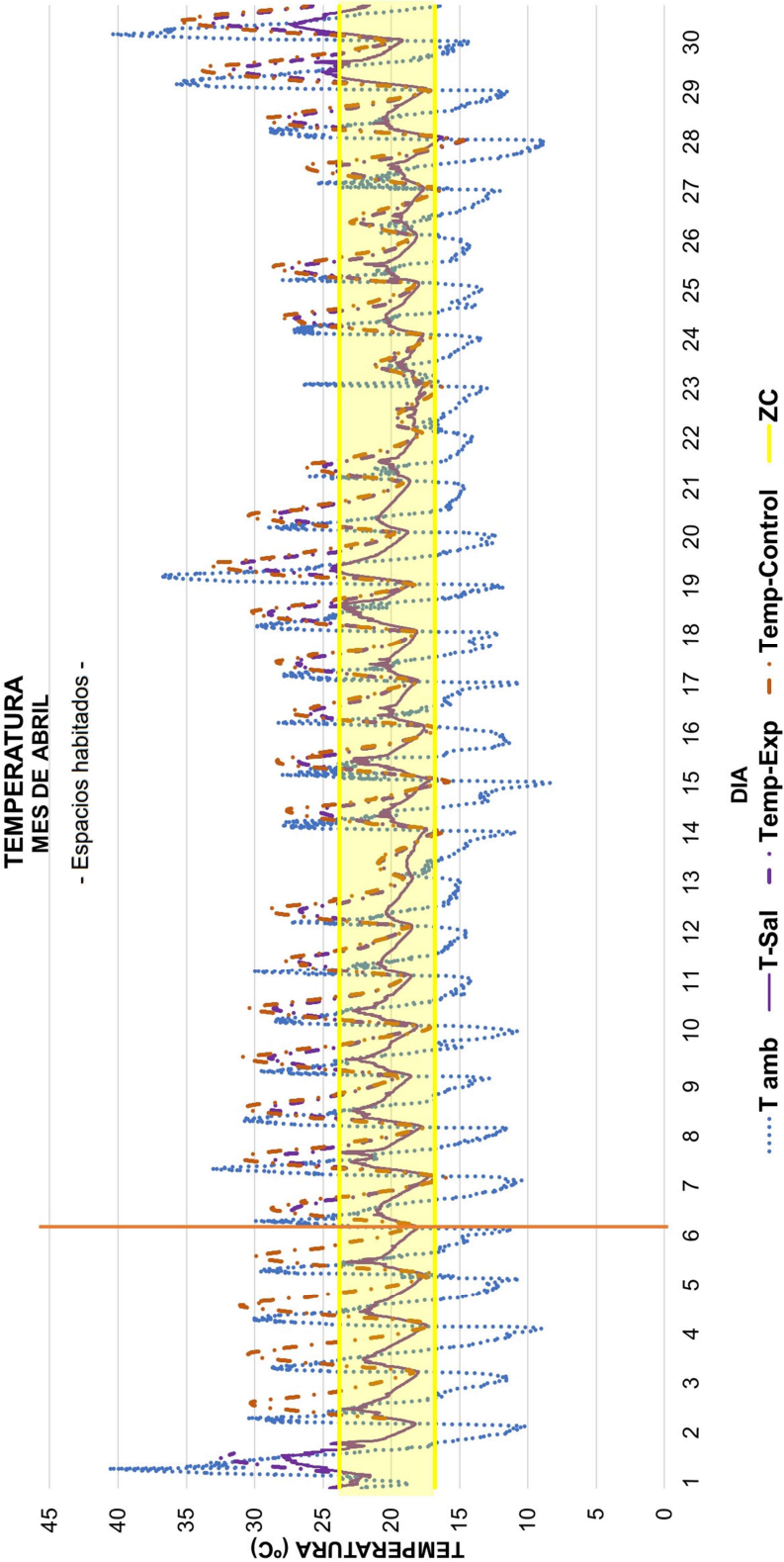
Durante el mes de abril, el espacio experimental presentó, el 82,9 % del periodo evaluado, mayor temperatura con respecto al ambiente, con un valor promedio de 5,7 °C, mientras que las condiciones de menor temperatura representaron el 17,1 % del tiempo, con una reducción promedio de 4,7 °C, presentando valores extremos de 10,8 °C y 16,1 °C, respectivamente (Figura B 3).

Por otra parte, la oscilación térmica promedio en el espacio experimental fue de 8,9 K, mientras que en el ambiente ésta fue de 16,1 K y de 10,7 K en el espacio de control, lo que significa una mayor estabilidad térmica en el primero.

Además, las condiciones de temperatura se mantuvieron, la mayor parte del tiempo, dentro del rango de confort establecido para el periodo térmico frío de 16,8 °C a 23,8 °C (Rincon *et al.*, 2017); el espacio experimental se mantuvo en dicho rango el 65,9 % del tiempo mientras que el espacio de control lo hizo el 57,9 %; sin embargo, la temperatura a la salida del IC presentó el mayor porcentaje de tiempo con el 95,9 % del periodo.

Figura B 3

Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de abril.



Nota. La línea vertical naranja indica el inicio del periodo de análisis.

## Periodo de transición frío-cálido

### Mayo

En el mes de mayo, Ensenada presenta una temperatura máxima promedio, una media y una mínima promedio de 20,4 °C, 17,1 °C y 13,7 °C, respectivamente (Huerta, 2018). Sin embargo, la evaluación del sistema en el mismo mes presentó magnitudes de 29,1 °C, 19,9 °C y 14,2 °C, respectivamente. Lo anterior, permite advertir que los valores recabados, tanto en la máxima como la media, nuevamente se presentaron por encima de las temperaturas dadas en la caracterización climática; siendo la mínima registrada, la que se presentó 0,5 °C por encima de la establecida en la caracterización (Figura B 4).

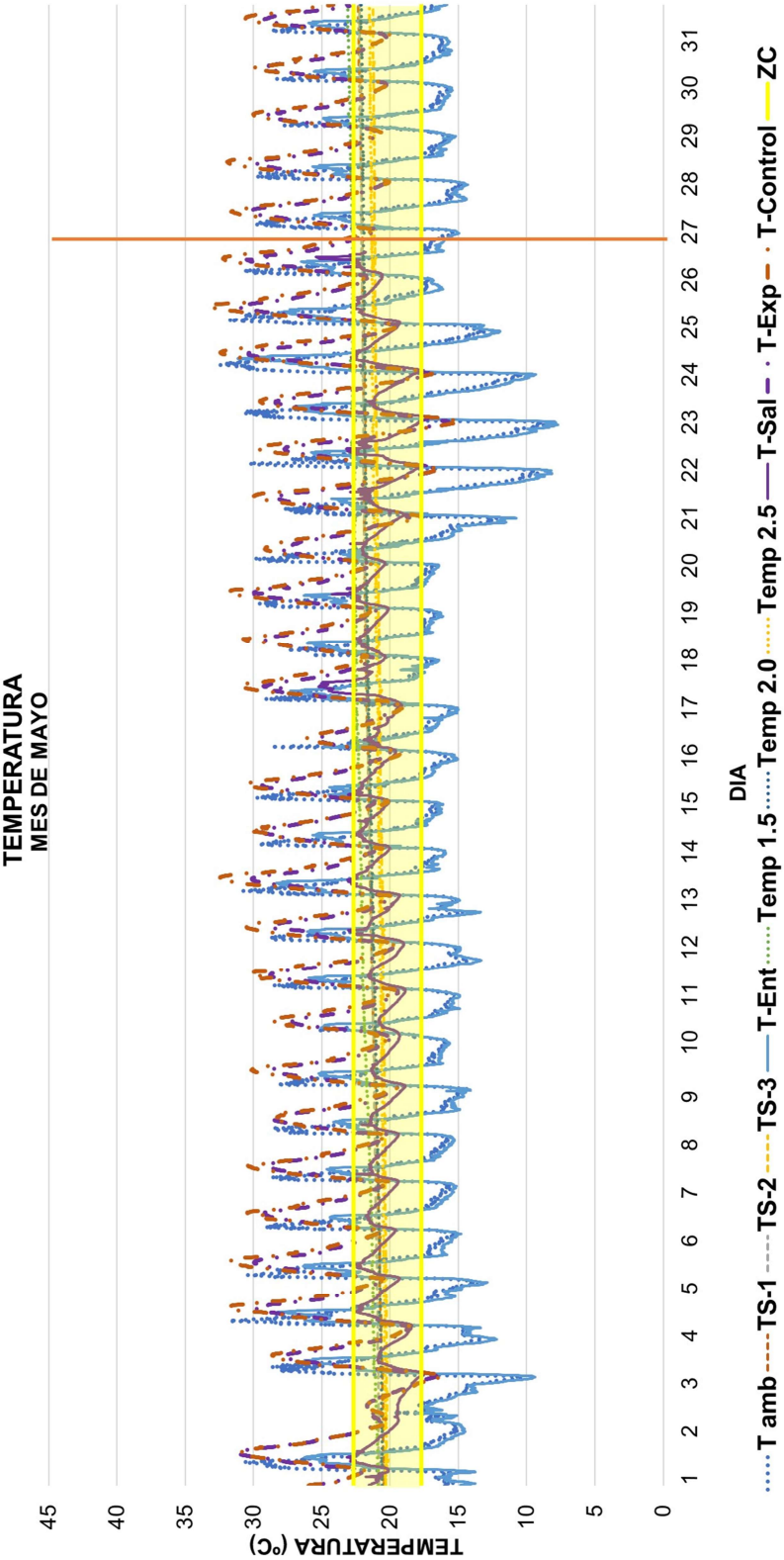
#### ➤ Intercambiador

Al comparar la temperatura ambiente con la del sistema en la salida del IC, se observó que el calentamiento representó el 70,1 % del periodo evaluado, con una diferencia promedio de 3,6 °C y un valor máximo extremo de calentamiento de 9,5 °C. Mientras tanto, el enfriamiento se presentó el 29,9 % restante del periodo, con una diferencia promedio de 4,3 °C y valor máximo extremo de 12,4 °C. Por lo tanto, el desempeño térmico efectivo del sistema osciló en el rango de 7,9 °C con una temperatura promedio de 20,8 °C en la salida del IC. No obstante, el promedio máximo de calentamiento fue de 6,0 °C (1,4 °C encima del promedio), mientras que el de enfriamiento fue de 7,1 °C (2,8 °C encima del promedio). Por lo tanto, el sistema observó un mejor desempeño de enfriamiento, tanto promedio como extremo, a pesar de que el calentamiento prevaleció por más tiempo durante el periodo evaluado.



Figura B 4

Temperaturas registradas en el mes de mayo



Nota. La línea vertical naranja indica el final del periodo de análisis.



Al analizar la influencia que la temperatura del suelo tiene en el sistema, se observó un aumento de temperatura de 0,7 °C en promedio de la TS-1 al interior del IC a la misma profundidad, mientras que en la profundidad 2,5, se observó una reducción de temperatura de 0,1 °C en el interior del IC con respecto a la temperatura del suelo; mientras que en la profundidad 2,5 m, se da un aumento de 0,2 °C de la TS-3 hacia el interior del IC, manteniendo una temperatura promedio, al interior del IC, de 22,0 °C, 21,3 °C y 20,8 °C en las profundidades de 1,5 m, 2,0 m y 2,5 m respectivamente.

Por lo anterior, y al comparar estas últimas temperaturas promedio con las del suelo en sus tres profundidades (21,4 °C, 21,4 °C y 20,6 °C, respectivamente) se advierte que el sistema logró una estabilidad térmica en el segmento del IC (Figura B 5).

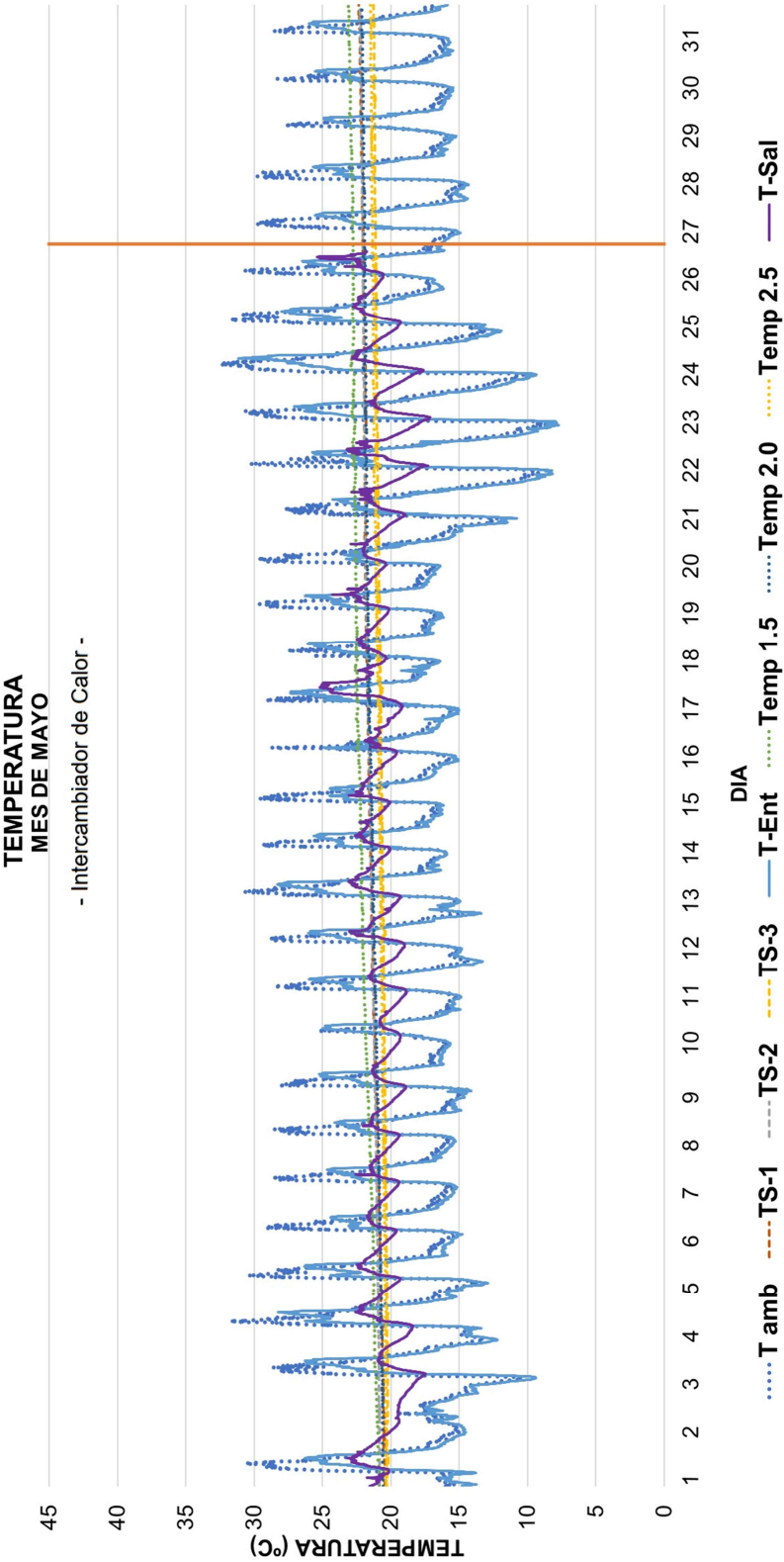
#### ➤ Espacio habitado

En el mes de mayo, el espacio experimental presentó, el 83,1 % del periodo evaluado, condiciones de aumento de temperatura con respecto al ambiente, con un valor promedio de 6,0 °C, mientras que las condiciones de disminución de temperatura representaron el 16,9 % del tiempo, con una reducción promedio de 3,5 °C, presentando valores promedios máximos de 7,8 °C y 7,4 °C, y extremos de 11,1 °C y 11,2 °C, respectivamente.

Por otra parte, la oscilación térmica promedio en el espacio experimental fue de 9,3 K, mientras que en el ambiente fue de 15,0 K y de 10,8 K en el espacio de control, lo que significa que la mayor estabilidad térmica continuó siendo la del espacio experimental. Además, las condiciones de temperatura se mantuvieron, la mayor parte del tiempo, dentro del rango de confort establecido para el periodo térmico de transición de frío-calor, de 17,7 °C a 22,7 °C (Rincón-Martínez *et al.*, 2017); el espacio experimental se mantuvo el 40,2 % del tiempo, mientras que el espacio de control lo hizo el 35,7 %; siendo la temperatura a la salida del IC la que se presentó la mayor cantidad de tiempo, con el 96,0 % del periodo (Figura B 6).

Figura B 5

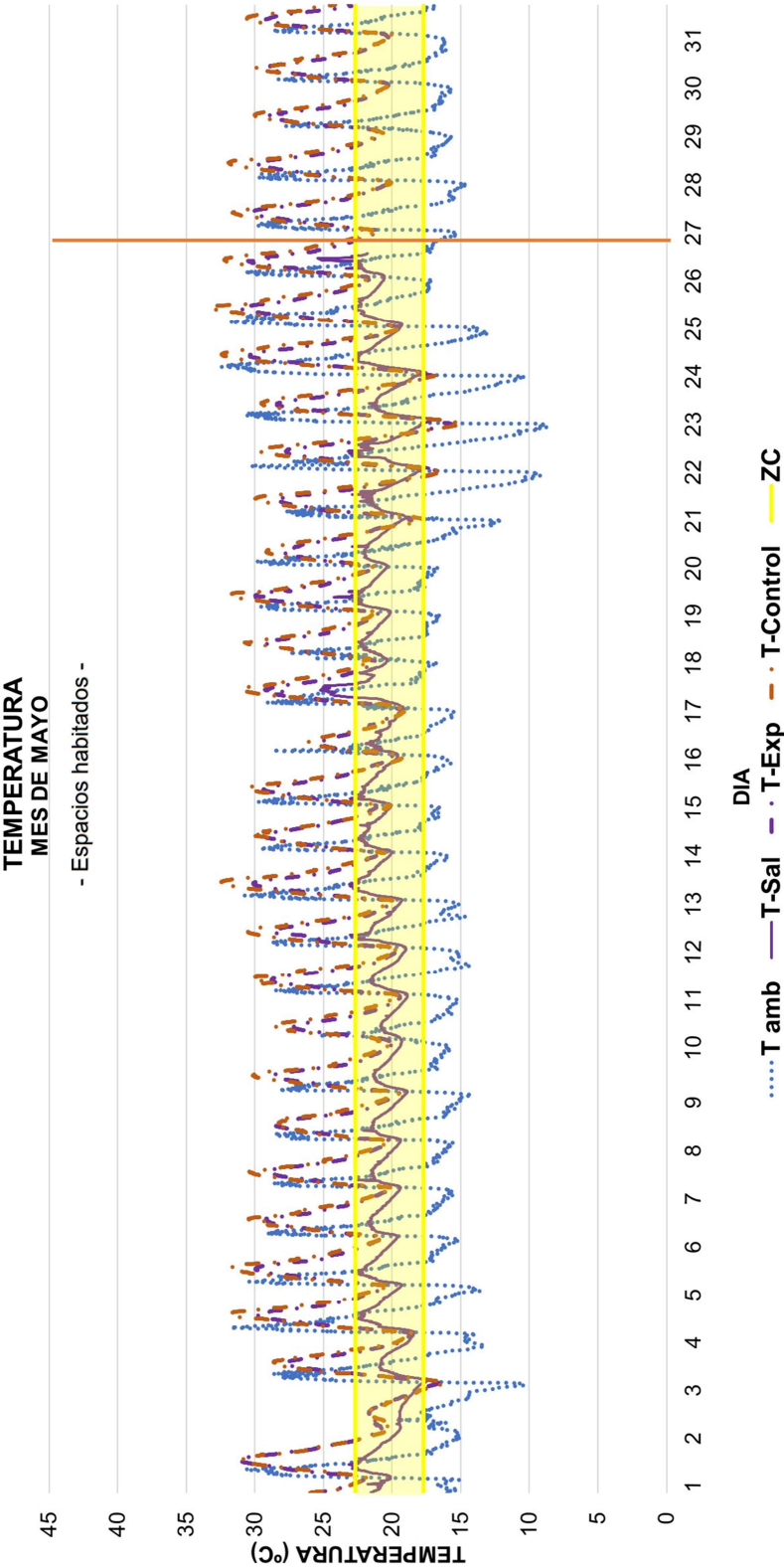
Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de mayo.



Nota. La línea vertical naranja indica el final del periodo de análisis.

Figura B 6

Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de mayo.



Nota. La línea vertical naranja indica el final del periodo de análisis.

## Junio

El mes de junio presenta una temperatura máxima promedio, una media y una mínima promedio de 21,4 °C, 18,5 °C y 15,6 °C, respectivamente (Huerta, 2018). Sin embargo, la evaluación del sistema en el mismo mes presentó magnitudes de 30,5 °C, 21,1 % y 16,9 %, respectivamente (Figura B 7). Lo anterior, permite advertir que los valores recabados continúan por encima de las temperaturas obtenidas en la caracterización climática.

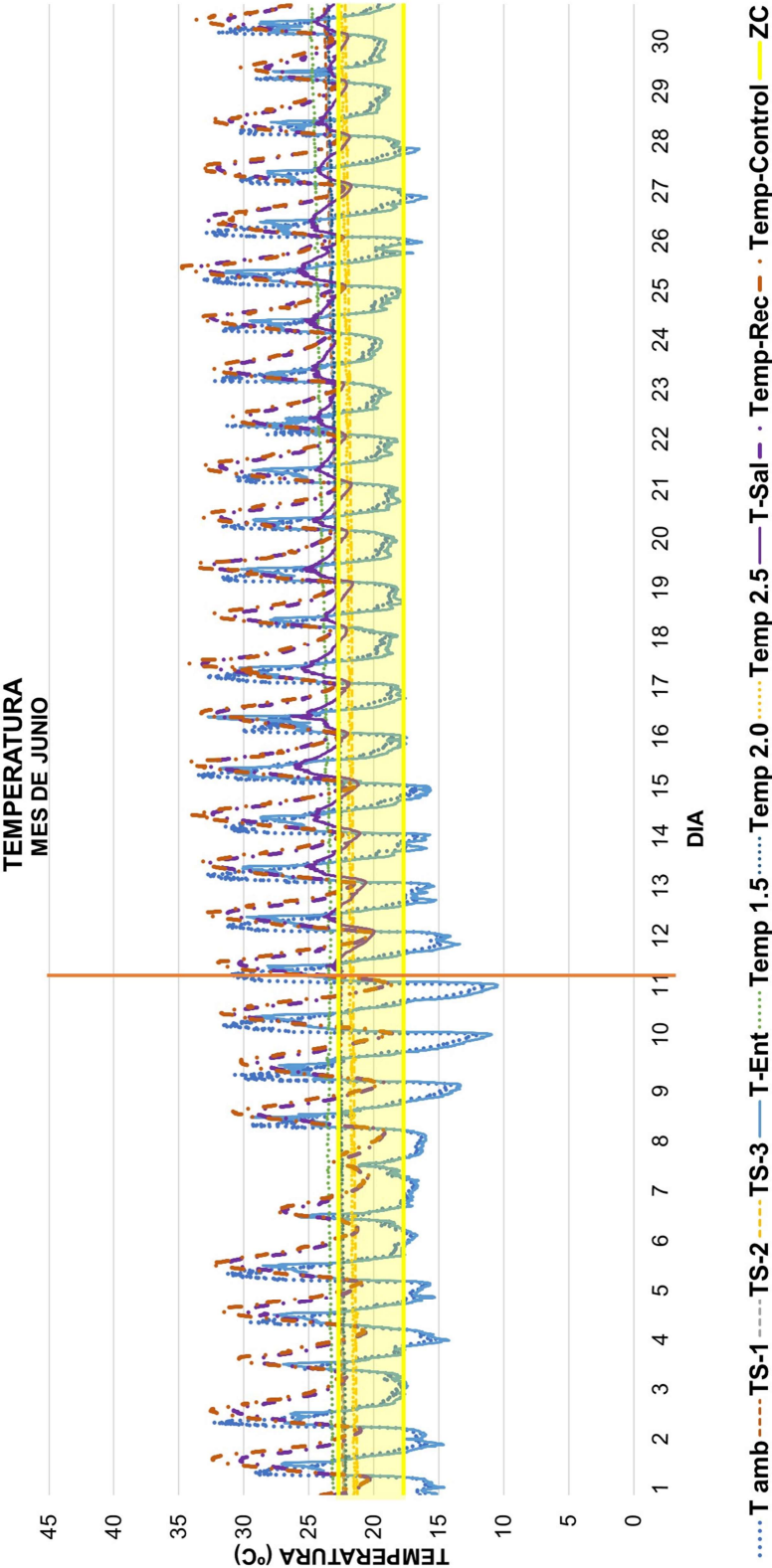
### ➤ Intercambiador

Al comparar la temperatura ambiente con la temperatura de la salida del IC, se observó que el calentamiento representó el 66,2 % del periodo evaluado, con una diferencia promedio de 3,0 °C y un valor máximo extremo de calentamiento de 6,1 °C. Mientras tanto, el enfriamiento se presentó el 33,8 % restante del periodo, con una diferencia promedio de 4,0 °C y valor máximo extremo de 10,3 °C. Por lo tanto, el desempeño térmico efectivo del sistema osciló en el rango de 7,0 °C con una temperatura promedio de 23,1 °C en la salida del IC. No obstante, el promedio máximo de calentamiento fue de 4,2 °C (1,2 °C encima del promedio), mientras que el de enfriamiento fue de 5,2 °C (1,2 °C encima del promedio). Por lo tanto, el sistema observó, al igual que en el mes de mayo, un mejor desempeño de enfriamiento, tanto en promedio como en máximas, a pesar de que el calentamiento prevaleció por más tiempo durante el periodo evaluado.

Al analizar la influencia que la temperatura del suelo tiene en el sistema, se observó un aumento de temperatura de 0,9 °C en promedio de la TS-1 al interior del IC a la misma profundidad, mientras que en la profundidad 2,5, se observó una reducción de temperatura de 0,1 °C en el interior del IC con respecto a la temperatura del suelo; mientras que en la profundidad 2,5 m, se da un aumento de 0,2 °C de la TS- 3 hacia el interior del IC, manteniendo una temperatura promedio, al interior del IC, de 23,8 °C, 22,8 °C y 21,9 °C en las profundidades de 1,5 m, 2,0 m y 2,5 m respectivamente (Figura B 8).

Figura B 7

Temperaturas registradas en el mes de junio

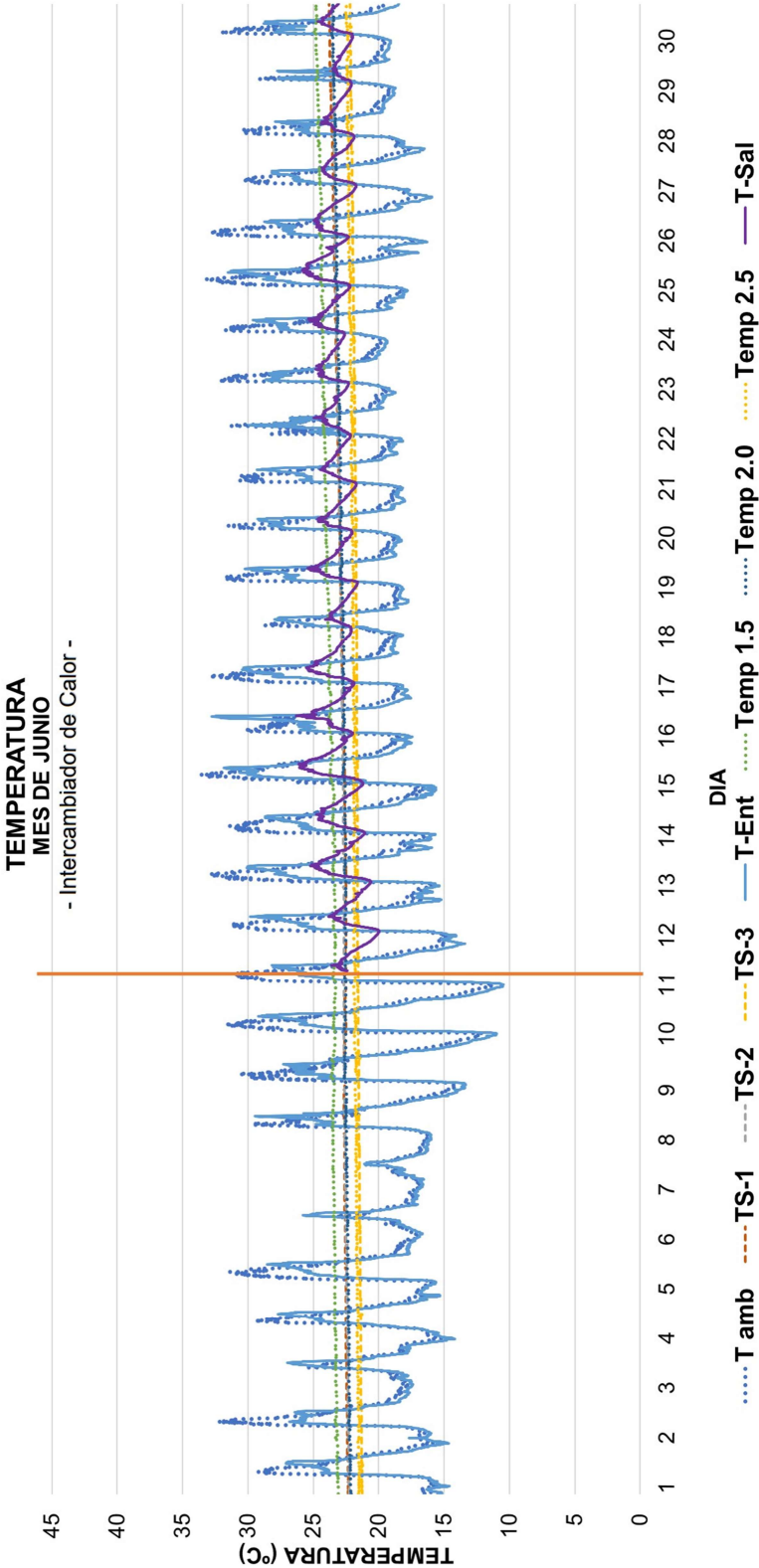


Nota. La línea vertical naranja indica el inicio del periodo de análisis.



Figura B 8

Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de junio.



Nota. La línea vertical naranja indica el inicio del periodo de análisis.



Por lo anterior, y al comparar estas últimas temperaturas promedio con las del suelo en sus tres profundidades (22,9 °C, 22,9 °C y 21,7 °C, respectivamente) se advierte que el sistema logró una estabilidad térmica en el segmento del IC.

### ➤ Espacio habitado

Al comparar la temperatura del ambiente con la del espacio experimental, este último presentó, el 83,8 % del periodo evaluado, condiciones de aumento de temperatura con respecto al primero, con un valor promedio de 5,7 °C, por su parte, la disminución de temperatura representó el 16,2 % del tiempo, con una reducción promedio de 3,5 °C, presentando valores promedios máximos de 7,2 °C y 6,0 °C, y extremos de 9,8 °C y 9,4 °C, respectivamente.

Por otra parte, la oscilación térmica promedio en el espacio experimental fue de 9,1 K, mientras que en el ambiente fue de 13,6 K y de 10,5 K en el espacio de control, lo que significa que el espacio experimental continúa siendo el que presenta mayor estabilidad térmica. Sin embargo, en este mes, las condiciones de temperatura se mantuvieron, la mayor parte del tiempo, por encima del rango de confort establecido para el periodo térmico de transición de frío-calor; el espacio experimental se mantuvo dentro del rango el 18,9 % del tiempo, mientras que el espacio de control lo hizo el 18,2 % y a la salida del IC, la temperatura se mantuvo el 23 % del periodo evaluado (Figura B 9).

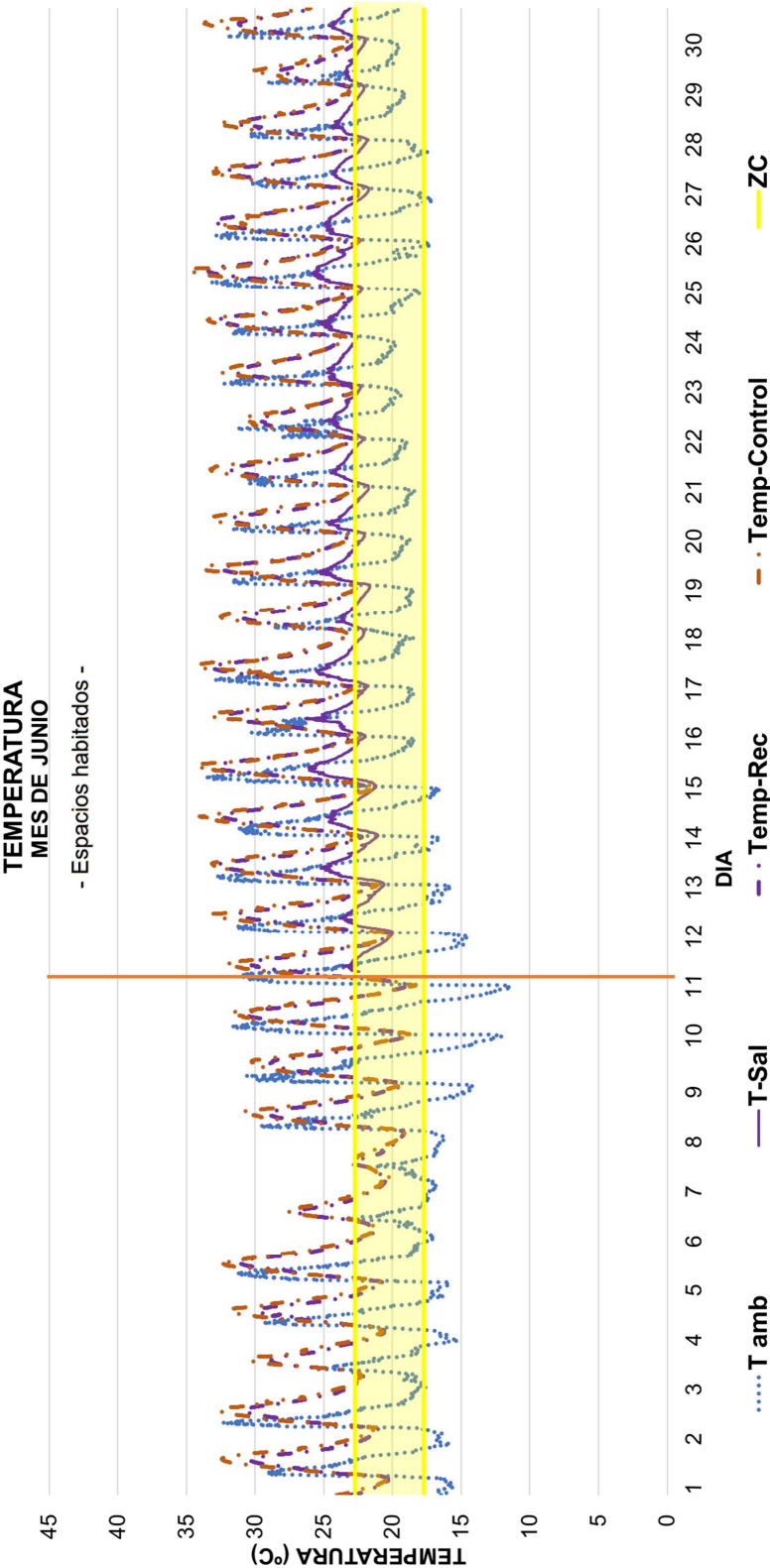
## Periodo cálido

### Julio

El mes de julio, de acuerdo a la caracterización climática realizada por Huerta (2018), presenta una temperatura máxima promedio, una media y una mínima promedio, de 23,7 °C, 20,9 °C y 18,0 °C, respectivamente. Sin embargo, durante la evaluación del sistema, este mes presentó las siguientes magnitudes respectivamente, 33,3 °C, 24,8 °C y 19,9 °C. Por lo anterior, se advierte que los valores recabados durante el periodo de evaluación continúan presentándose por encima de las establecidas en la caracterización climática (Figura B 10).

Figura B 9

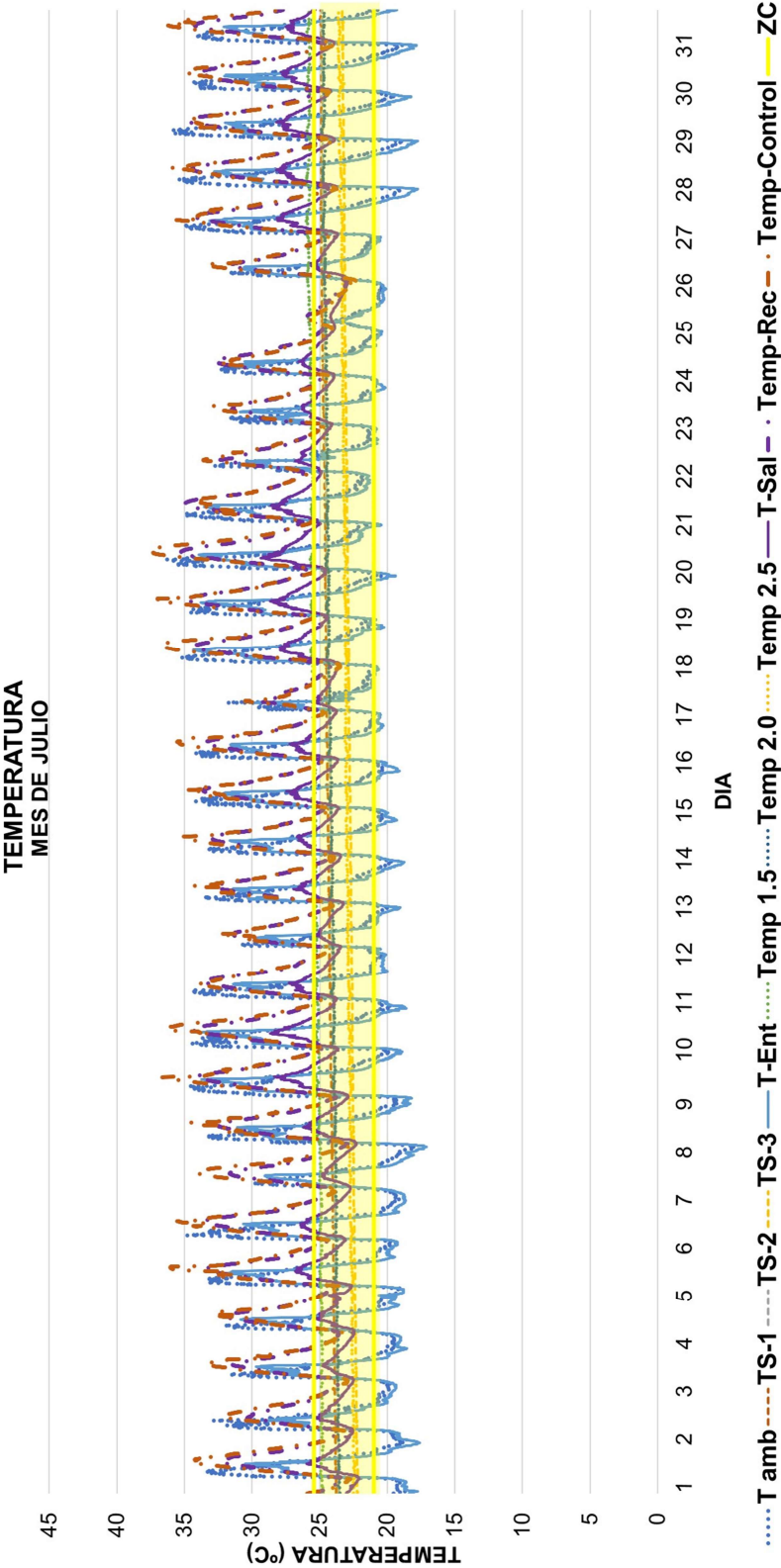
Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de junio.



Nota. La línea vertical naranja indica el inicio del periodo de análisis.

Figura B 10

Temperaturas registradas en el mes de julio



### ➤ Intercambiador

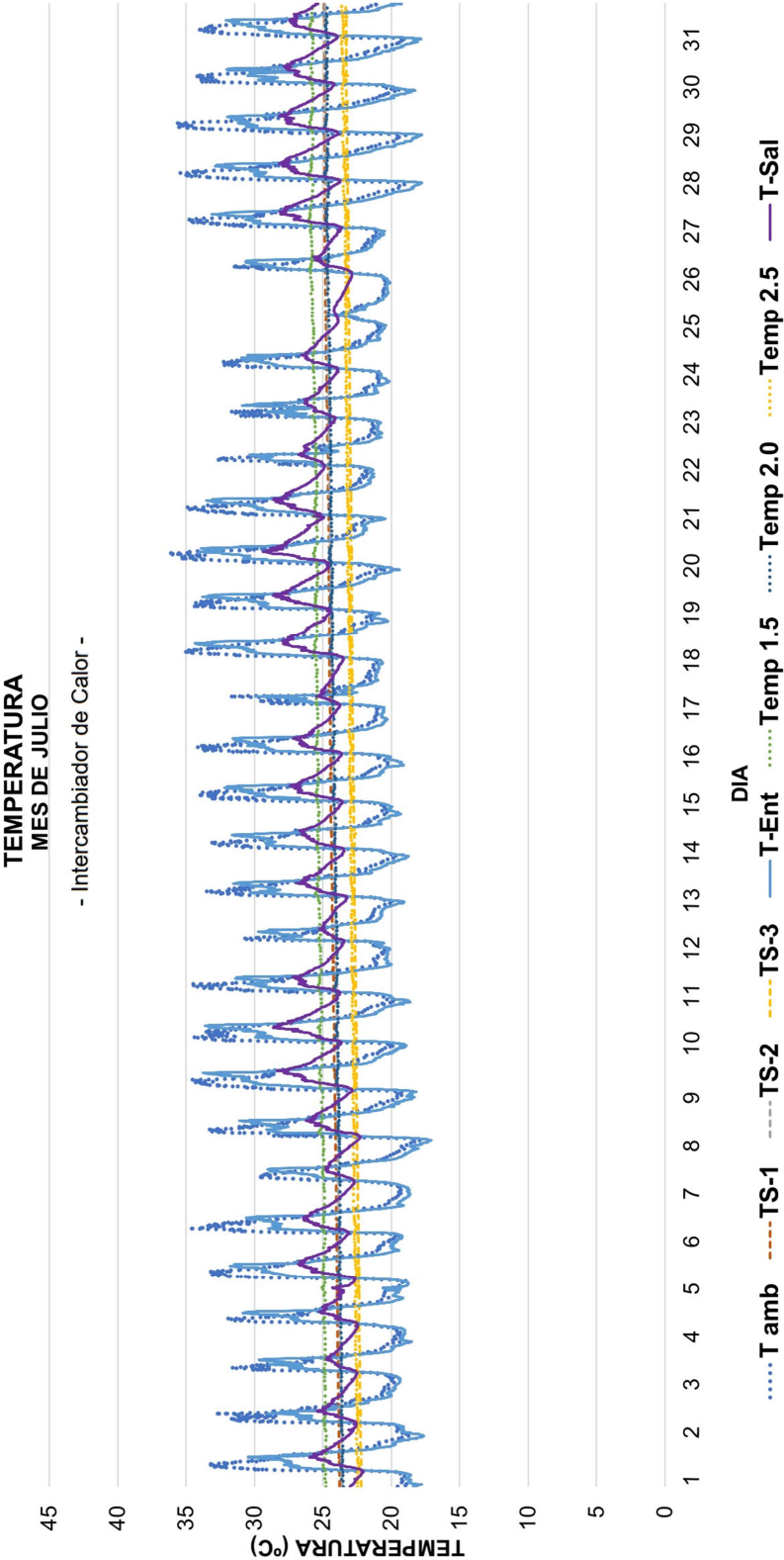
Al comparar la temperatura ambiente con la temperatura del sistema en la salida del IC, se observó que el calentamiento representó el 65,4 % del periodo evaluado, con una diferencia promedio de 2,9 °C y un valor máximo extremo de calentamiento de 5,2 °C. Mientras tanto, el enfriamiento se presentó el 34,6 % restante del periodo, con una diferencia promedio de 4,2 % y valor máximo extremo de 10,3 °C. Por lo tanto, el desempeño térmico efectivo del sistema osciló en el rango de 7,1 °C con una temperatura promedio de 25,2 °C en la salida del IC. No obstante, el promedio máximo de calentamiento fue de 3,7 °C (0,6 °C encima del promedio), mientras que el de enfriamiento fue de 5,3 °C (1,1 °C encima del promedio). Por lo tanto, el sistema continúa presentando un mejor desempeño de enfriamiento, tanto promedio como extremo, a pesar de que el calentamiento prevaleció por más tiempo durante el periodo evaluado.

Al analizar la influencia que la temperatura del suelo tiene en el sistema, se observó un aumento de temperatura de 1,0 °C en promedio de la TS-1 al interior del IC a la misma profundidad, mientras que en la profundidad 2,5, se observó una reducción de temperatura de 0,1 °C en el interior del IC con respecto a la temperatura del suelo; mientras que en la profundidad 2,5 m, se da un aumento de 0,2 °C de la TS- 3 hacia el interior del IC, manteniendo una temperatura promedio, al interior del IC, de 25,5 °C, 24,3 °C y 23,1 °C en las profundidades de 1,5 m, 2,0 m y 2,5 m respectivamente (Figura B 11).

Por lo anterior, y al comparar estas últimas temperaturas promedio con las del suelo en sus tres profundidades (24,4 °C, 24,4 °C y 22,9 °C, respectivamente) se advierte que el sistema logró una estabilidad térmica en el segmento del IC.

Figura B 11

Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de julio.



### ➤ Espacio habitado

Al comparar la temperatura del ambiente con la del espacio experimental, este último presentó, el 81,2 % del periodo evaluado, condiciones de aumento de temperatura con respecto al primero, con un valor promedio de 5,3 °C, mientras, la disminución de temperatura representó el 18,8 % del tiempo, con una reducción promedio de 3,3 °C, presentando valores promedios máximos de 6,2 °C y 4,8 °C, y extremos de 8,9 °C y 7,7 °C, respectivamente.

Por otra parte, la oscilación térmica promedio en el espacio experimental fue de 8,4 K, mientras que en el ambiente fue de 13,4 K y de 10,3 K en el espacio de control, lo que significa que el espacio experimental continúa siendo el que presenta mayor estabilidad térmica. Sin embargo, el espacio experimental se mantuvo dentro del rango de confort, establecido para el periodo térmico cálido de 21,0 °C a 25,4 °C (Rincón Martínez *et al.*, 2021), el 22,1 % del tiempo, mientras que el espacio de control lo hizo el 24,5 %, y a la salida del IC, la temperatura se mantuvo dentro del rango el 63,7 % del periodo evaluado (Figura B 12).

### Agosto

De acuerdo a la caracterización climática de Huerta (2018), en la ciudad de Ensenada, en agosto se presenta una temperatura máxima promedio, una media y una mínima promedio de 24,6 °C, 21,5 °C y 18,4 °C, respectivamente. Sin embargo, en la evaluación del sistema se registraron, durante dicho mes, magnitudes de 34,4 °C, 25,0 °C y 19,5 °C, respectivamente. Con ello, se puede observar que las temperaturas registradas son mayores a las establecidas por el autor (Figura B 13).



Figura B 12

Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de julio.

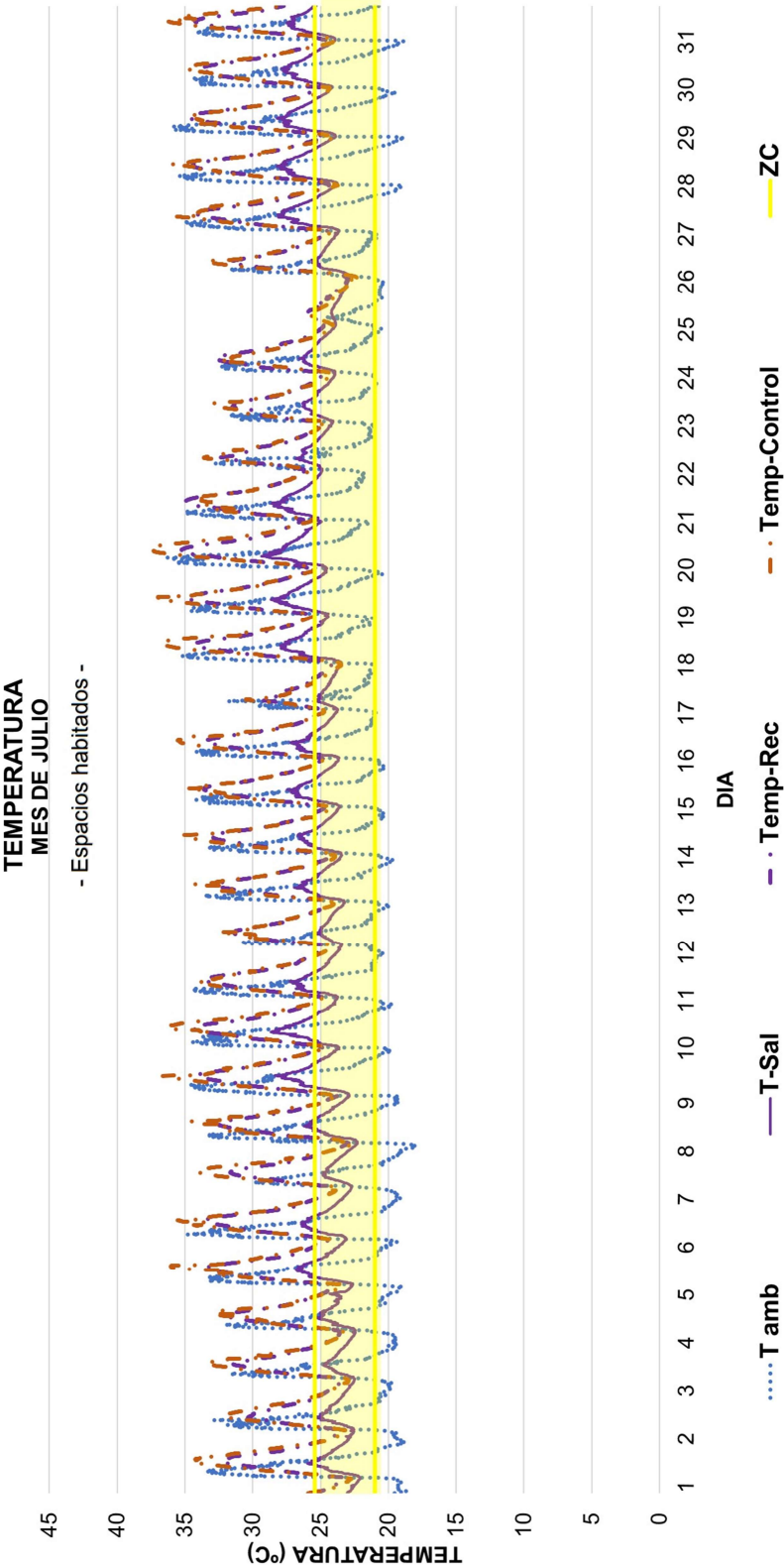
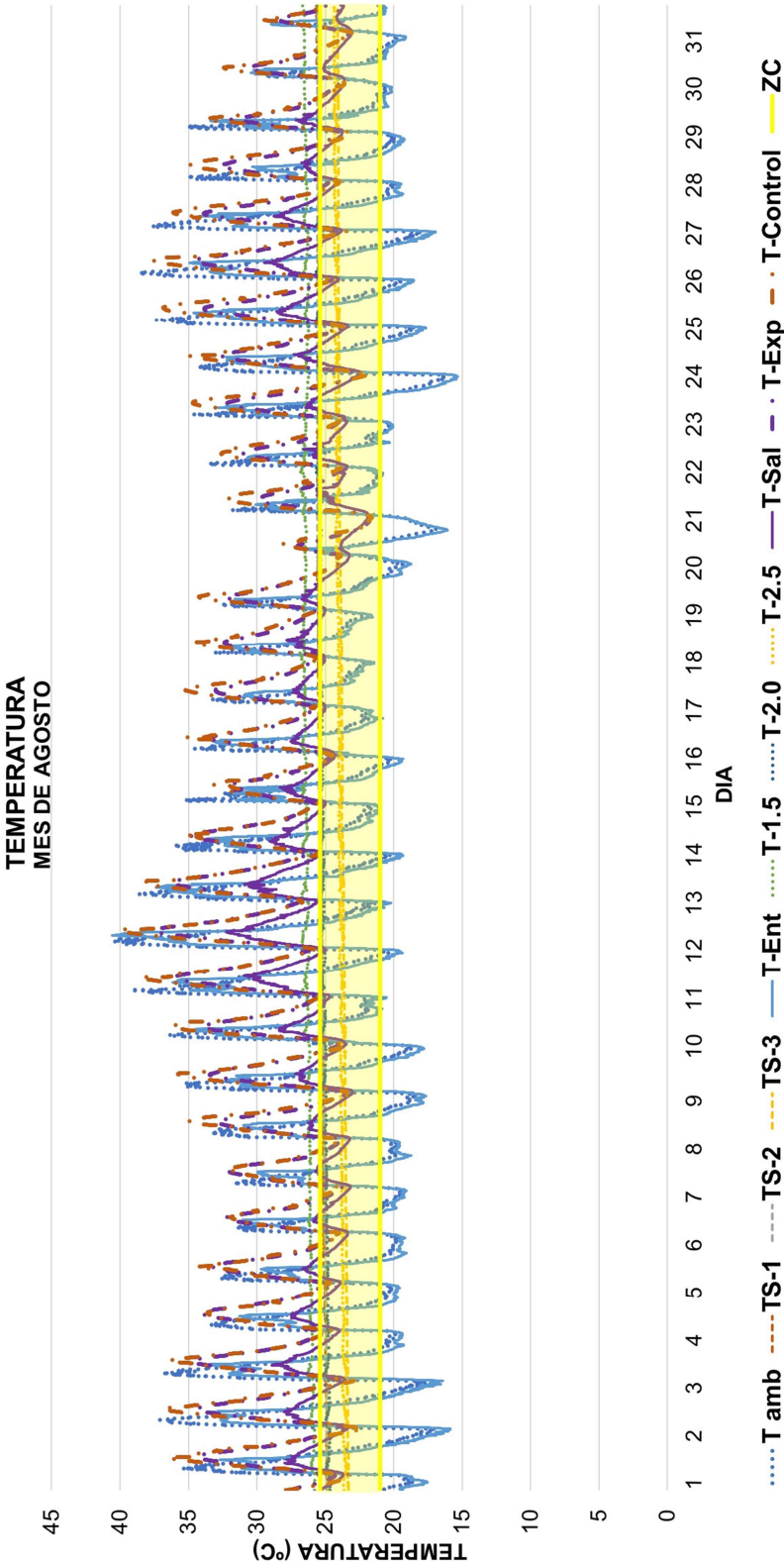


Figura B 13

Temperaturas registradas en el mes de agosto



### ➤ Intercambiador

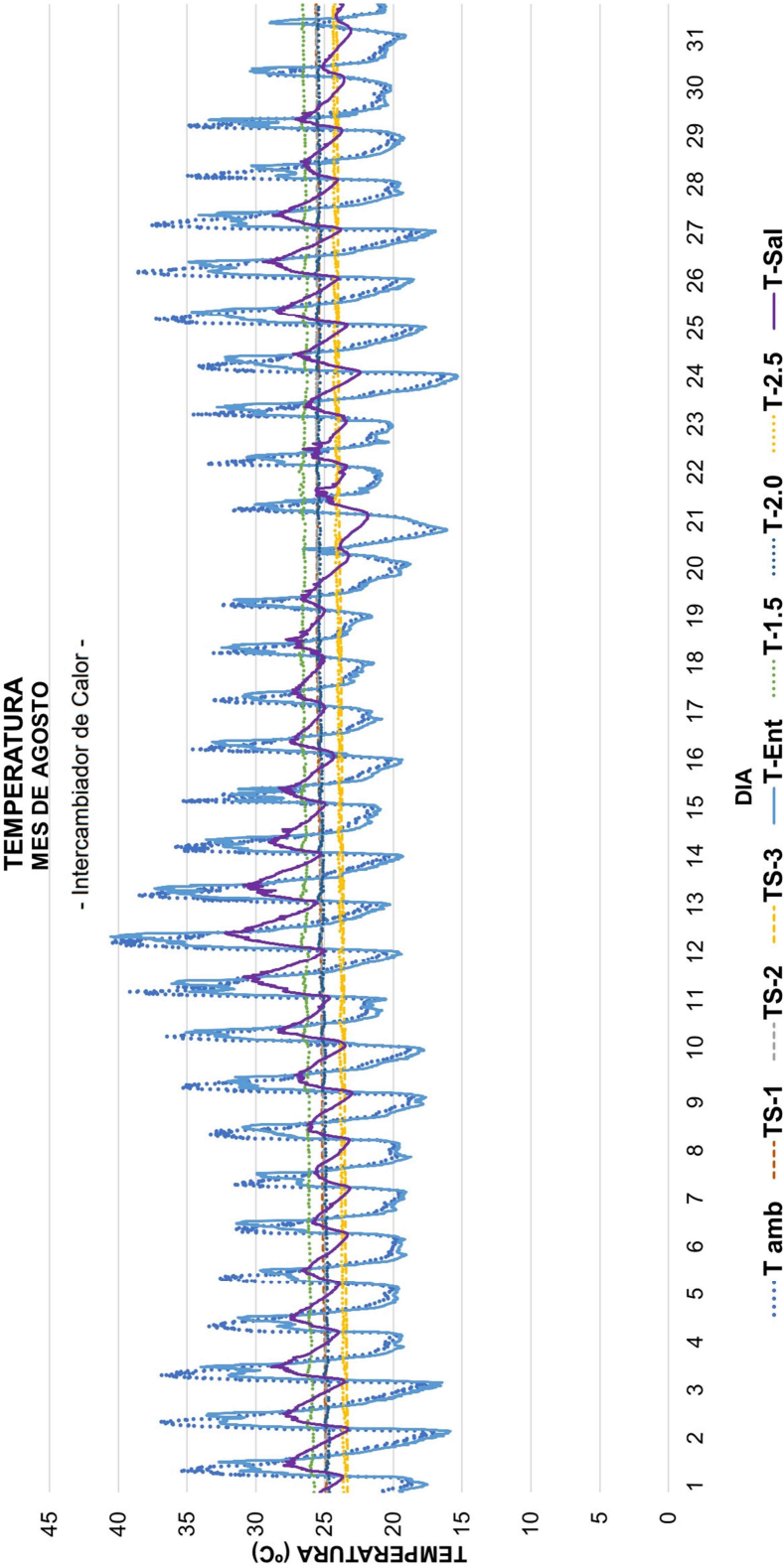
Al comparar la temperatura ambiente con del sistema a la salida del IC, se observó que el calentamiento representó el 66,4 % del periodo evaluado, con una diferencia promedio de 3,2 °C y un valor máximo extremo de calentamiento de 6,7 °C. Mientras tanto, el enfriamiento se presentó el 33,6 % restante del periodo, con una diferencia promedio de 4,3 °C y valor máximo extremo de 12,1 °C. Por lo tanto, el desempeño térmico efectivo del sistema osciló en el rango de 7,5 °C con una temperatura promedio de 25,6 °C en la salida del IC. No obstante, el promedio máximo de calentamiento fue de 4,2 °C (1,0 °C encima del promedio), mientras que el de enfriamiento fue de 6,5 °C (2,2 °C encima del promedio). Por lo tanto, el sistema observó, al igual que en los meses anteriores, un mejor desempeño de enfriamiento, tanto en promedio como en extremo, a pesar de que el calentamiento prevaleció por más tiempo durante el periodo evaluado (Figura B 14).

Al analizar la influencia que la temperatura del suelo tiene en el sistema, se observó un aumento de temperatura de 1,0 °C en promedio, de la TS-1 al interior del IC a la misma profundidad, mientras que en la profundidad 2,5, se observó una reducción de temperatura de 0,2 °C en el interior del IC con respecto a la temperatura del suelo; mientras que en la profundidad 2,5 m, se da un aumento de 0,2 °C de la TS- 3 hacia el interior del IC, manteniendo una temperatura promedio, al interior del IC, de 26,4 °C, 25,3 °C y 24,0 °C en las profundidades de 1,5 m, 2,0 m y 2,5 m, respectivamente.

Por lo anterior, y al comparar estas últimas temperaturas promedio con las del suelo en sus tres profundidades (25,3 °C, 25,4 °C y 23,8 °C, respectivamente) se advierte que el sistema logró una estabilidad térmica en el segmento del IC.

Figura B 14

Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de agosto.



### ➤ Espacio habitado

Al comparar la temperatura del ambiente con la del espacio experimental, este último presentó, el 81,0 % del periodo evaluado, un aumento de temperatura con respecto al primero, con un valor promedio de 5,2 °C; por su parte, la disminución de temperatura representó el 19,0 % del tiempo, con una reducción promedio de 3,7 °C, presentando valores promedios máximos de 6,6 °C y 6,4 °C, y extremos de 9,3 °C y 10,9 °C, respectivamente.

Por otra parte, la oscilación térmica promedio en el espacio experimental fue de 8,6 K, mientras que en el ambiente fue de 14,9 K y de 10,6 K en el espacio de control, lo que significa que el espacio experimental continúa siendo el que presenta mayor estabilidad térmica. Sin embargo, en este mes, las condiciones de temperatura se mantuvieron, la mayor parte del tiempo, por encima del rango de confort establecido para el periodo térmico de transición de frío-calor; el espacio experimental se mantuvo dentro del rango el 21,6 % del tiempo, mientras que el espacio de control lo hizo el 21,5 % y a la salida del IC, la temperatura se mantuvo el 50,1 % del periodo evaluado (Figura B 15).

### Septiembre

En el mes de septiembre, la ciudad de Ensenada presenta una temperatura máxima promedio, una media y una mínima promedio, de 24,9 °C, 21,1 °C y 17,3 °C, respectivamente. Sin embargo, durante la evaluación del sistema, este mes presentó las siguientes magnitudes respectivamente, 33,5 °C, 23,9 °C y 18,4 °C. Por lo anterior, se advierte que los valores recabados durante el periodo de evaluación continuaron presentándose por encima de las obtenidas en la caracterización climática; sin embargo, existe mayor diferencia en las temperaturas promedio máxima, siendo de 8,6 °C, mientras que en la media es de 2,8 °C y en la promedio mínima, es de 1,1 °C (Figura B 16).



Figura B 15

Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de agosto.

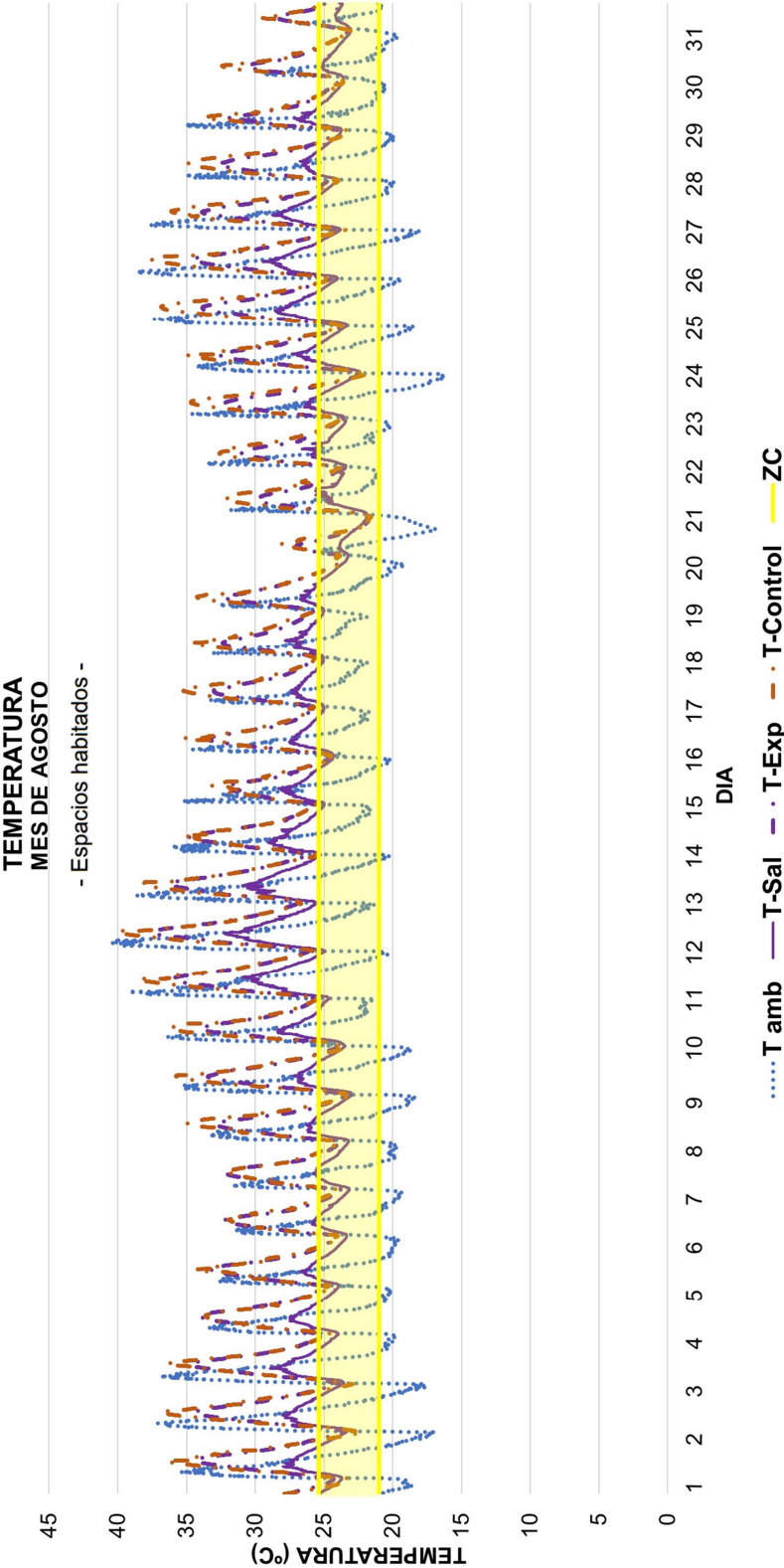
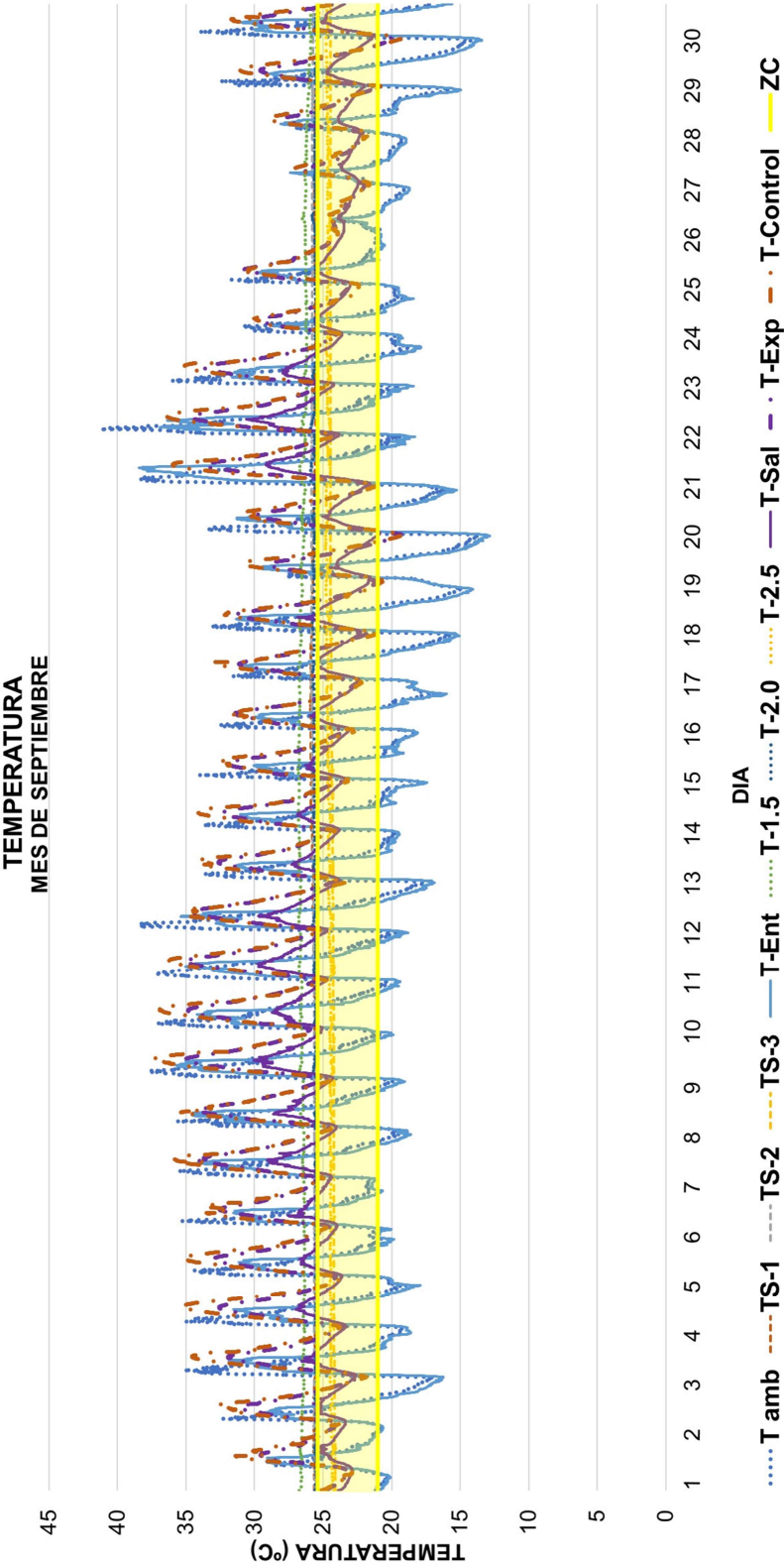




Figura B 16

Temperaturas registradas en el mes de septiembre



### ➤ Intercambiador

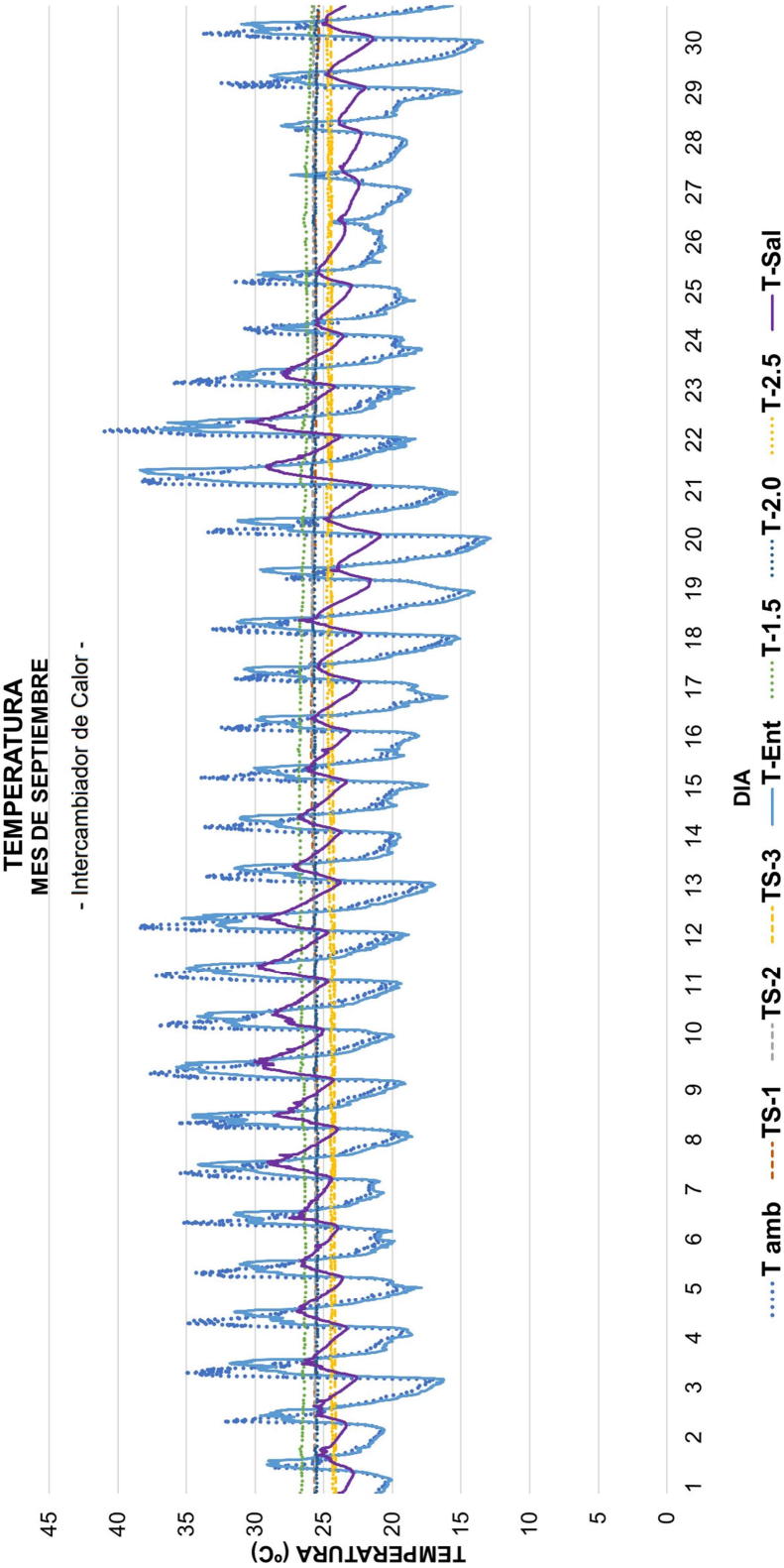
Al comparar la temperatura ambiente con la del sistema en la salida del IC, se observó que el calentamiento representó el 67,9 % del periodo evaluado, con una diferencia promedio de 3,5 °C y un valor máximo extremo de calentamiento de 7,6 °C. Mientras tanto, el enfriamiento se presentó el 32,1 % restante del periodo, con una diferencia promedio de 4,2 °C y valor máximo extremo de 15,5 °C. Por lo tanto, el desempeño térmico efectivo del sistema osciló en el rango de 7,7 °C con una temperatura promedio de 24,8 °C en la salida del IC. No obstante, el promedio máximo de calentamiento fue de 5,4 °C (1,9 °C encima del promedio), mientras que el de enfriamiento fue de 7,7 °C (3,5 °C encima del promedio). Por lo tanto, el sistema observó, al igual que en meses anteriores, un mejor desempeño de enfriamiento, tanto en promedio como en extremo, a pesar de que el calentamiento prevalece por más tiempo durante el periodo evaluado.

Por otra parte, al analizar la influencia que la temperatura del suelo tiene en el sistema, se observó un aumento de temperatura de 0,8 °C en promedio de la TS-1 al interior del IC a la misma profundidad, mientras que en la profundidad 2,5, se observó una reducción de temperatura de 0,2 °C en promedio, en el interior del IC con respecto a la temperatura del suelo; mientras que en la profundidad 2,5 m, se da un aumento de 0,2 °C, en promedio, de la TS-3 hacia el interior del IC, manteniendo una temperatura promedio al interior del IC, de 26,4 °C, 25,6 °C y 24,6 °C en las profundidades de 1,5 m, 2,0 m y 2,5 m respectivamente (Figura B 17).

Por lo anterior, y al comparar estas últimas temperaturas con las del suelo en sus tres profundidades (25,6 °C, 25,7 °C y 24,3 °C, respectivamente) se advierte que el sistema logró una estabilidad térmica en el segmento del IC.

Figura B 17

Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de septiembre.



### ➤ Espacio habitado

Al comparar la temperatura del ambiente con la del espacio experimental, este último presentó, el 81,6 % del periodo evaluado, condiciones de aumento de temperatura con respecto al primero, con un valor promedio de 5,0 °C, por su parte, la disminución de temperatura representó el 18,4 % del tiempo, con una reducción promedio de 4,1 °C, presentando valores promedios máximos de 6,1 °C y 8,1 °C, y extremos de 8,6 °C y 14,2 °C, respectivamente.

Por otra parte, la oscilación térmica promedio en el espacio experimental fue de 8,4 K, mientras que en el ambiente fue de 15,1 K y de 10,2 K en el espacio de control, lo que significa que el espacio experimental continúa siendo el que presenta mayor estabilidad térmica. Sin embargo, en este mes, las condiciones de temperatura se mantuvieron, la mayor parte del tiempo, por encima del rango de confort establecido para el periodo térmico cálido; el espacio experimental se mantuvo dentro del rango el 34,0 % del tiempo, mientras que el espacio de control lo hizo el 33,1 % y a la salida del IC, la temperatura se mantuvo dentro del rango el 68,2 % del periodo evaluado (Figura B 18).

## Periodo de transición cálido-frío

### Octubre

En octubre, la ciudad presenta una temperatura máxima promedio, una media y una mínima promedio, de 23,3 °C, 18,9 °C y 14,5 °C, esto de acuerdo a la caracterización climática de Huerta (2018). Sin embargo, durante la evaluación del sistema, este mes presentó las magnitudes de 30,4 °C, 19,8 °C y 13,9 °C, respectivamente. Por lo anterior, se advierte que los valores recabados, al igual que en el mes de mayo, la temperatura máxima promedio y la media, son mayores a los establecidos en la caracterización, mientras que la temperatura mínima promedio registrada, se encuentra por debajo de la caracterización (Figura B 19).

Figura B 18

Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de septiembre.

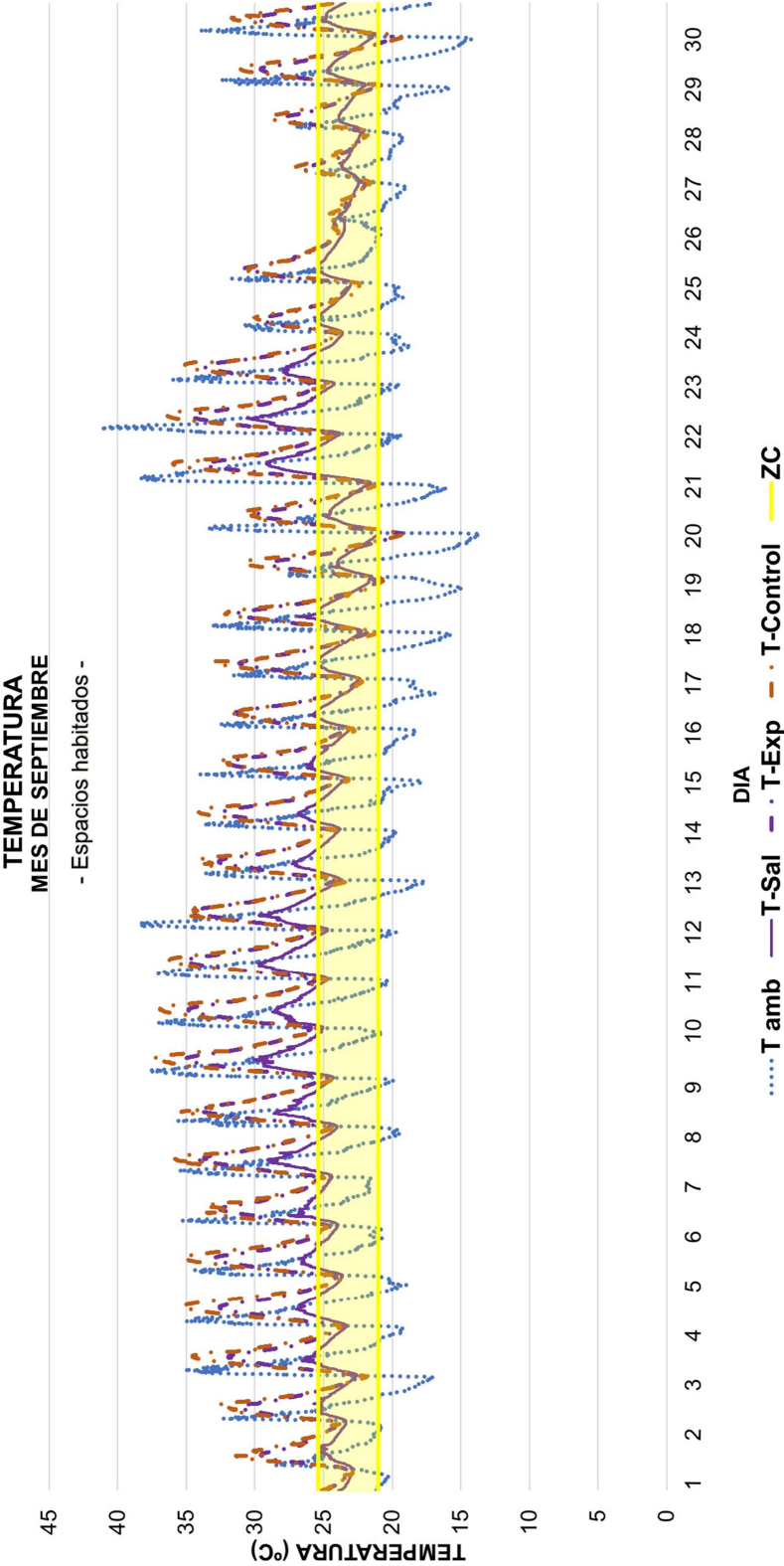
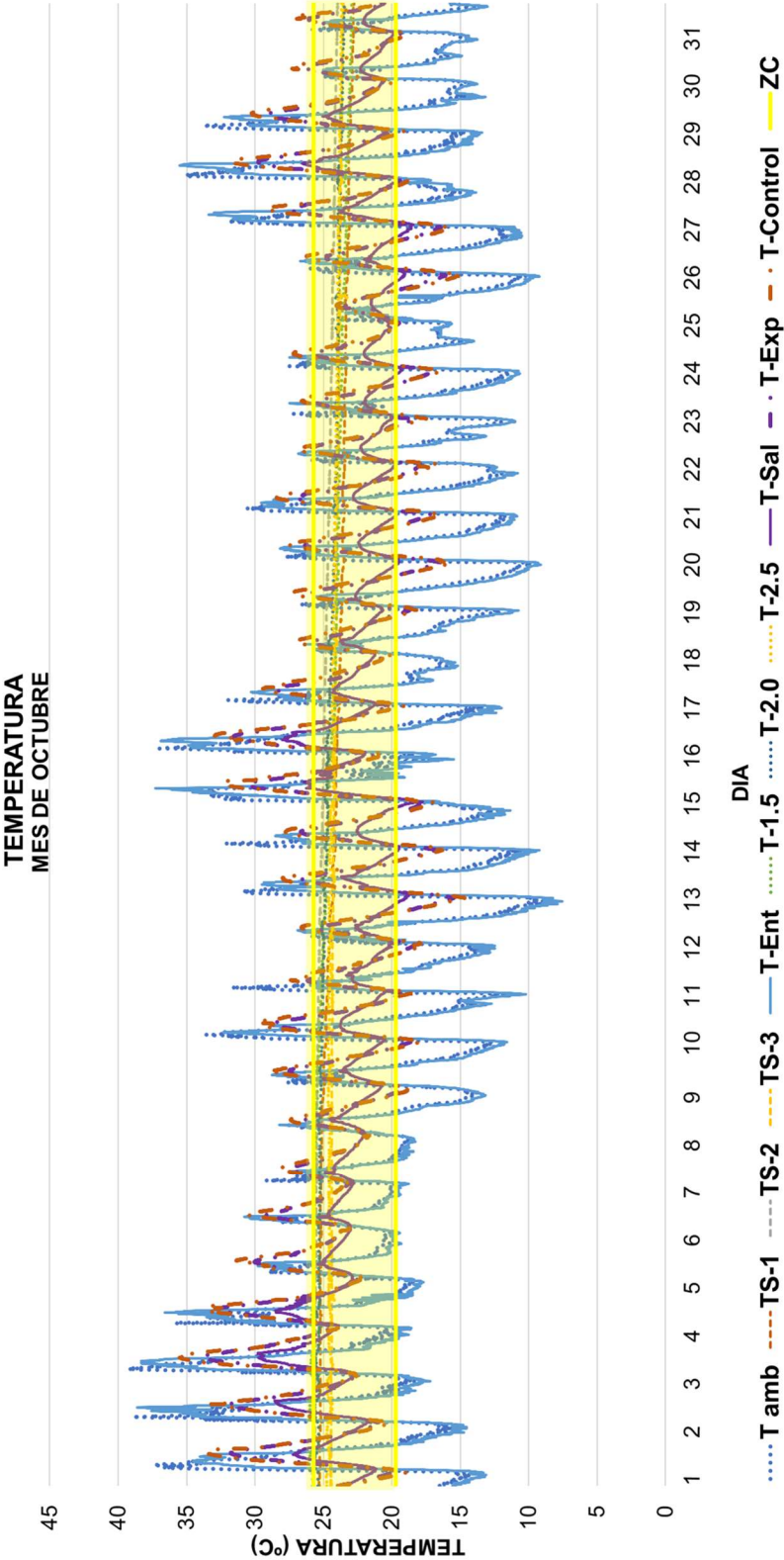




Figura B 19

Temperaturas registradas en el mes de octubre





### ➤ Intercambiador

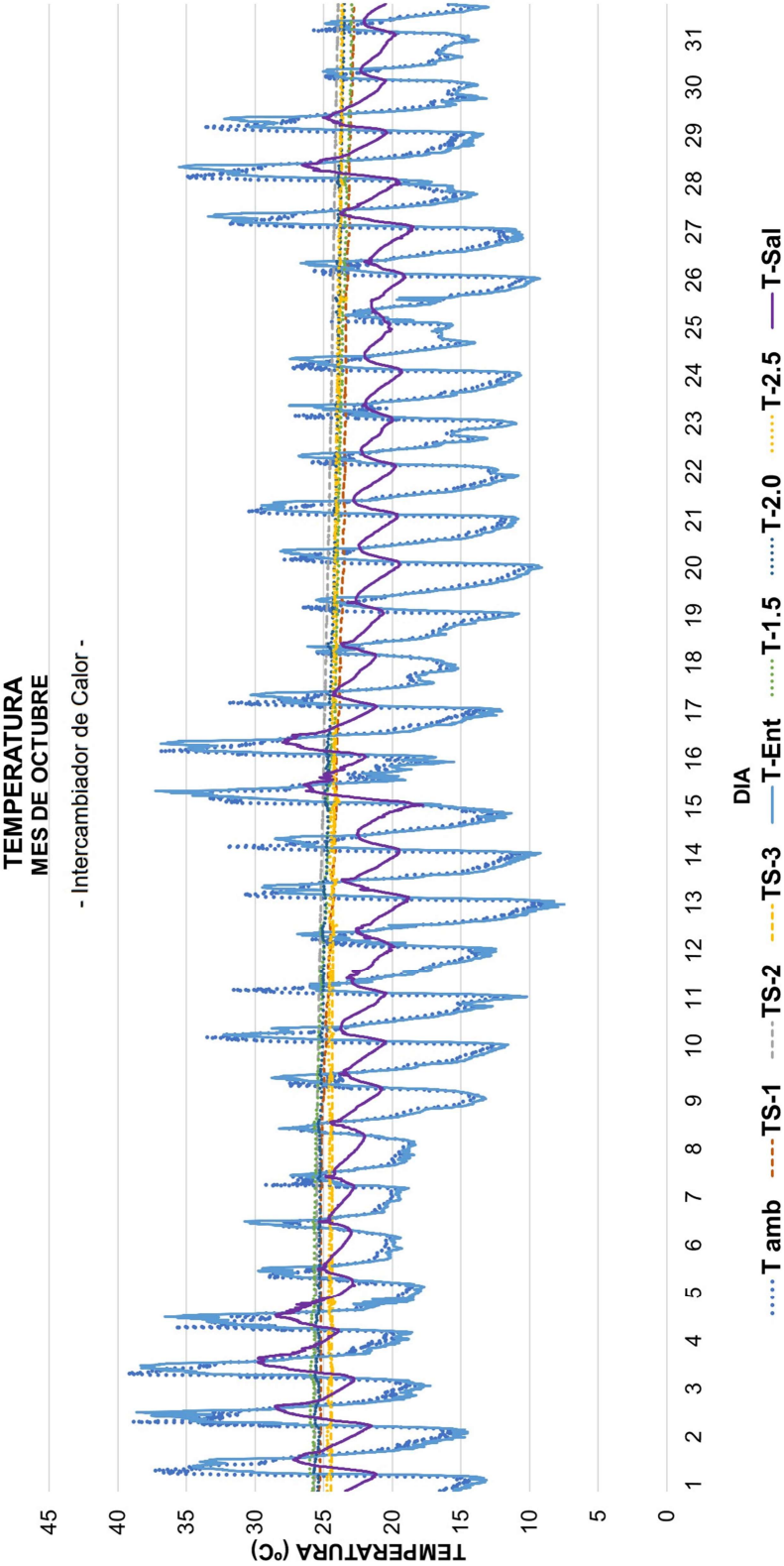
Al comparar la temperatura ambiente con la del sistema en la salida del IC, se observó que el calentamiento representó el 68,3 % del periodo evaluado, con una diferencia promedio de 4,7 °C y un valor máximo extremo de calentamiento de 10,8 °C. Mientras tanto, el enfriamiento se presentó el 31,7 % restante del periodo, con una diferencia promedio de 4,0 °C y valor máximo extremo de 15,5 °C. Por lo tanto, el desempeño térmico efectivo del sistema osciló en el rango de 8,7 °C con una temperatura promedio de 21,9 °C en la salida del IC. No obstante, el promedio máximo de calentamiento fue de 7,2 °C (2,5 °C encima del promedio), mientras que el de enfriamiento fue de 7,0 °C (3,0 °C encima del promedio). Por lo tanto, el sistema observó, un mejor desempeño de calentamiento, tanto en promedio como en extremo, siendo el primer mes del año evaluado en el que se presenta dicho fenómeno.

Por otra parte, al analizar la influencia que la temperatura del suelo tiene en el sistema, se observó un aumento de temperatura de 0,4 °C en promedio de la TS-1 al interior del IC a la misma profundidad, mientras que en la profundidad 2,5, se observó una reducción de temperatura de 0,4 °C en promedio, en el interior del IC con respecto a la temperatura del suelo; mientras que en la profundidad 2,5 m, se da un aumento de 0,2 °C, en promedio, de la TS-3 hacia el interior del IC, manteniendo una temperatura promedio al interior del IC, de 24,3 °C, 24,4 °C y 24,2 °C en las profundidades de 1,5 m, 2,0 m y 2,5 m respectivamente (Figura B 20).

Por lo anterior, y al comparar estas últimas temperaturas con las del suelo en sus tres profundidades (24,1 °C, 24,8 °C y 24,1 °C, respectivamente) se advierte que el sistema logró una estabilidad térmica en el segmento del IC.

Figura B 20

Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de octubre.



### ➤ Espacio habitado

Al comparar la temperatura del ambiente con la del espacio experimental, este último presentó, el 79,0 % del periodo evaluado, condiciones de aumento de temperatura con respecto al primero, con un valor promedio de 4,9 °C, por su parte, la disminución de temperatura representó el 21,0 % del tiempo, con una reducción promedio de 4,0 °C, presentando valores promedios máximos de 5,9 °C y 8,7 °C, y extremos de 8,6 °C y 14,3 °C, respectivamente.

Por otra parte, la oscilación térmica promedio en el espacio experimental fue de 8,5 K, mientras que en el ambiente fue de 16,5 K y de 10,3 K en el espacio de control, lo que significa que el espacio experimental continúa siendo el que presenta mayor estabilidad térmica. Sin embargo, en este mes, las condiciones de temperatura se mantuvieron, la mayor parte del tiempo, dentro del rango de confort de 19,7 °C a 25,7 °C, establecido para el periodo térmico de transición cálido-frío (Rincón-Martínez *et al.*, 2020); el espacio experimental se mantuvo dentro del rango el 60,6 % del tiempo, mientras que el espacio de control lo hizo el 50,9 % y a la salida del IC, la temperatura se mantuvo dentro del rango el 87,6 % del periodo evaluado (Figura B 21).

### Noviembre

En noviembre, la ciudad de Ensenada presenta una temperatura máxima promedio, una media y una mínima promedio, de 21,3 °C, 16,4 °C y 11,4 °C, respectivamente (Huerta, 2018). Sin embargo, durante la evaluación del sistema, en este mes se registraron magnitudes de 27,4 °C, 18,7 °C y 12,5 °C, respectivamente. Por lo anterior, se advierte que los valores recabados durante el periodo de evaluación se presentaron por debajo de las establecidas en la caracterización climática (Figura B 22).

Figura B 21

Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de octubre.

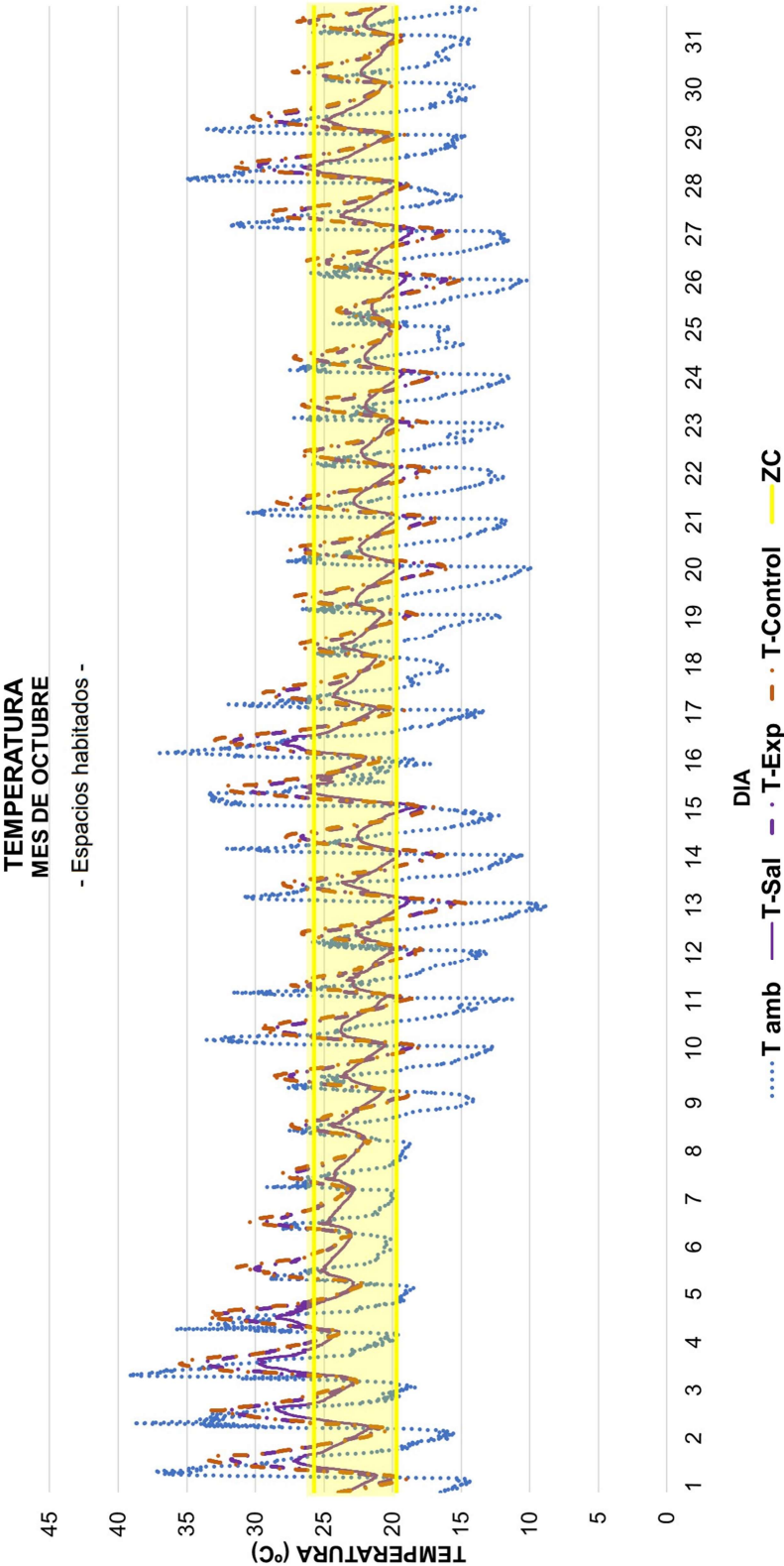
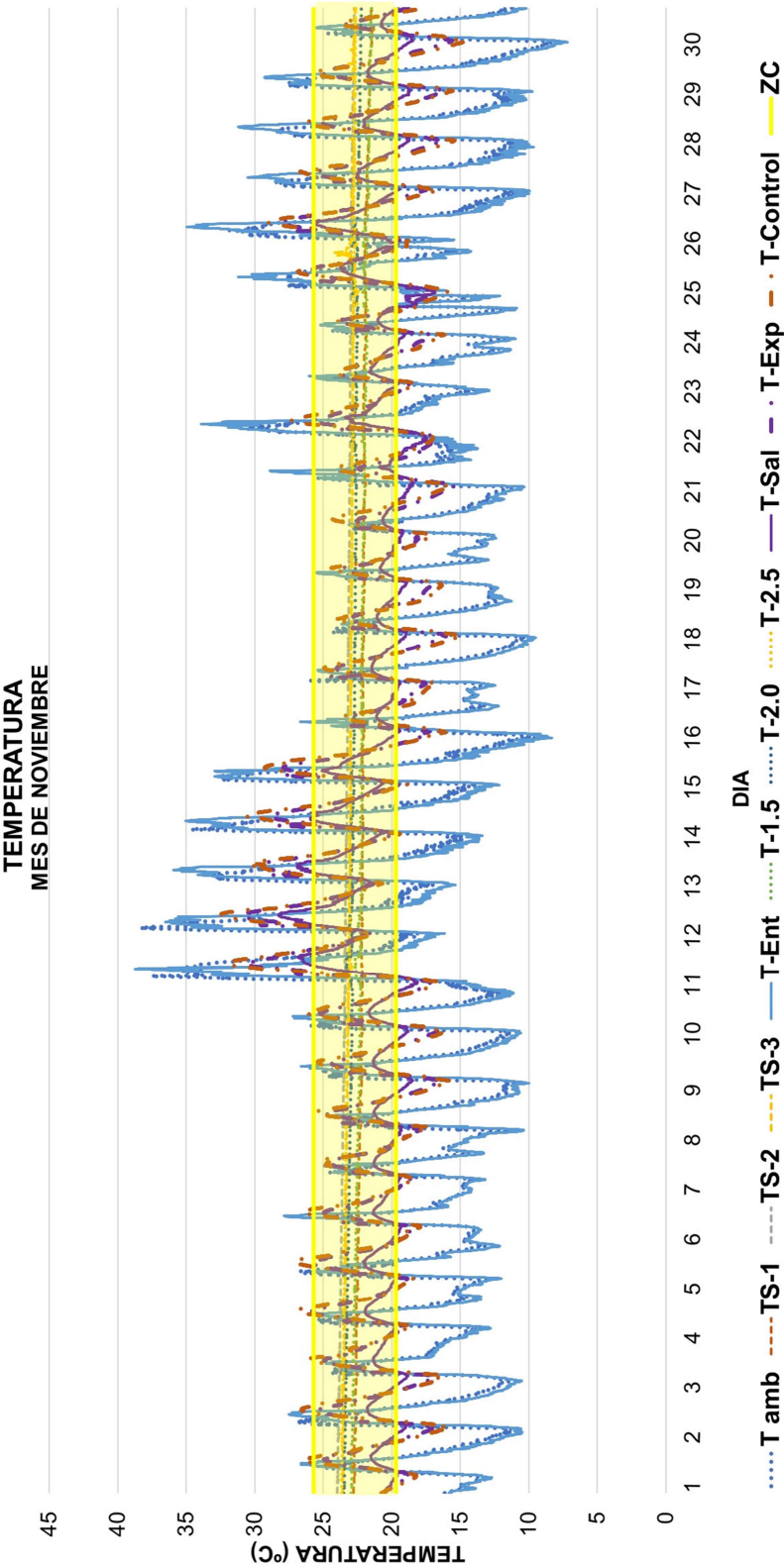


Figura B 22

Temperaturas registradas en el mes de noviembre



### ➤ Intercambiador

Al comparar la temperatura ambiente con la del sistema en la salida del IC, se observó que el calentamiento representó el 69,3 % del periodo evaluado, con una diferencia promedio de 4,9 °C y un valor máximo extremo de calentamiento de 10,7 °C. Mientras tanto, el enfriamiento se presentó el 30,7 % restante del periodo, con una diferencia promedio de 3,6 °C y valor máximo extremo de 17,8 °C. Por lo tanto, el desempeño térmico efectivo del sistema osciló en el rango de 8,5 °C con una temperatura promedio de 20,9 °C en la salida del IC. No obstante, el promedio máximo de calentamiento fue de 6,9 °C (2,0 °C encima del promedio), mientras que el de enfriamiento fue de 9,1 °C (5,5 °C encima del promedio). Por lo tanto, el sistema observó un mejor desempeño de calentamiento en temperaturas promedio, sin embargo, con respecto a las temperaturas promedio máximas el enfriamiento fue el que destacó.

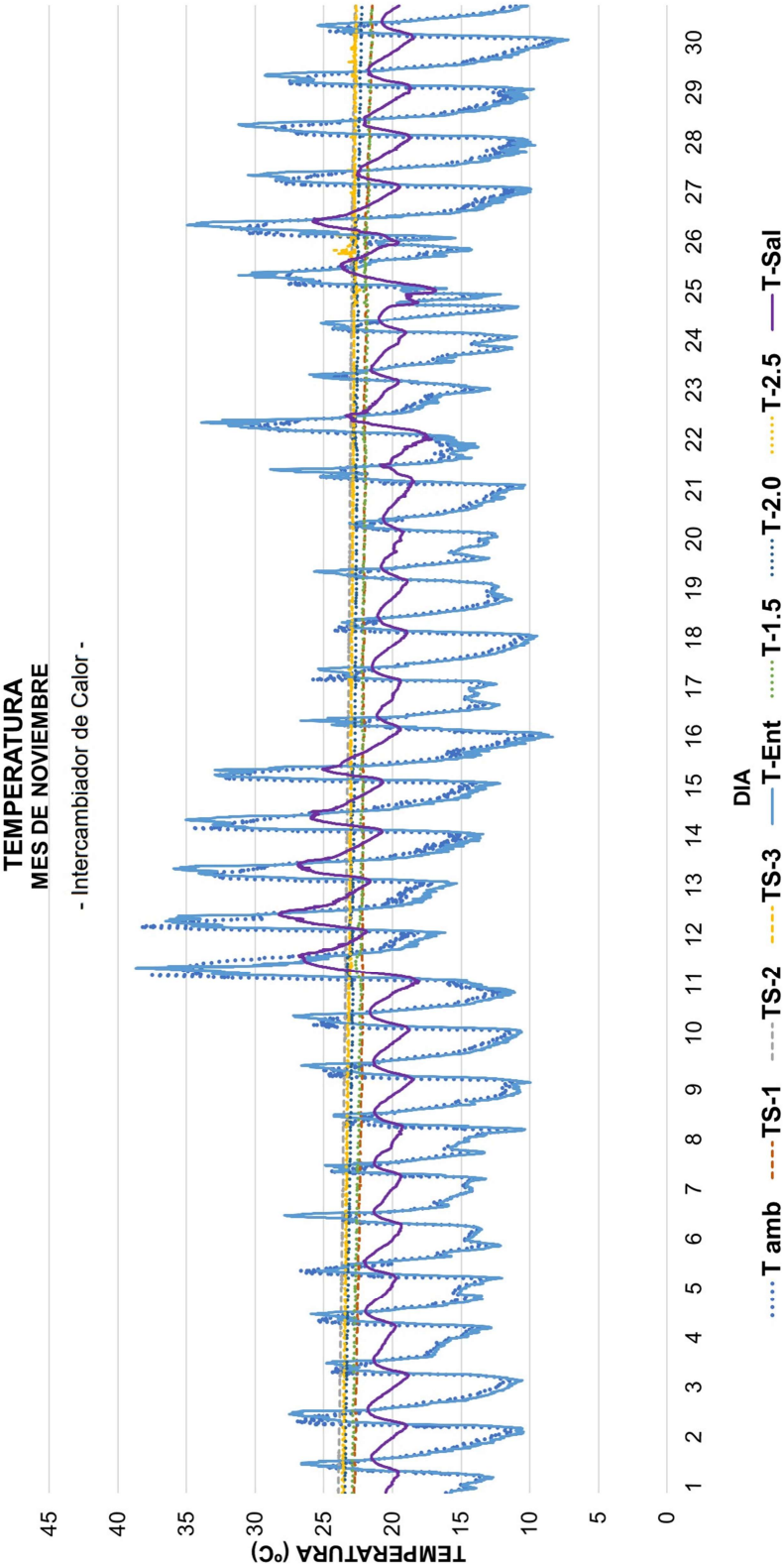
Por otra parte, al analizar la influencia que la temperatura del suelo tiene en el sistema, se observó un aumento de temperatura de 0,1 °C en promedio de la TS-1 al interior del IC a la misma profundidad, mientras que en la profundidad 2,5, se observó una reducción de temperatura de 0,4 °C en promedio, en el interior del IC con respecto a la temperatura del suelo; mientras que en la profundidad 2,5 m, se da la misma temperatura que la TS-3 hacia el interior del IC, manteniendo una temperatura promedio al interior del IC, de 22,2 °C, 22,8 °C y 23,1 °C en las profundidades de 1,5 m, 2,0 m y 2,5 m respectivamente (Figura B 23).

Por lo anterior, y al comparar estas últimas temperaturas con las del suelo en sus tres profundidades se advierte que el sistema logró una estabilidad térmica en el segmento del IC.



Figura B 23

Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de noviembre.



### ➤ Espacio habitado

Al comparar la temperatura del ambiente con la del espacio experimental, este último presentó, el 76,2 % del periodo evaluado, condiciones de aumento de temperatura con respecto al primero, con un valor promedio de 4,7 °C; por su parte, la disminución de temperatura representó el 23,8 % del tiempo, con una reducción promedio de 3,1 °C, presentando valores promedios máximos de 6,2 °C y 6,6 °C, y extremos de 9,1 °C y 16,4 °C, respectivamente.

Por otra parte, la oscilación térmica promedio en el espacio experimental fue de 7,7 K, mientras que en el ambiente fue de 14,9 K y de 9,3 K en el espacio de control, lo que significa que el espacio experimental continúa siendo el que presenta mayor estabilidad térmica. Además, en este mes, las condiciones de temperatura se mantuvieron dentro del rango de confort de 19,7 °C a 25,7 °C, establecido para el periodo térmico de transición cálido-frío; el espacio experimental el 58,1 % del tiempo, mientras que el espacio de control lo hizo el 50,2 % y a la salida del IC, el 74,0 % del periodo evaluado (Figura B 24).

## Periodo frío (segunda parte)

### Diciembre

En este mes, la ciudad de Ensenada presenta una temperatura máxima promedio, una media y una mínima promedio, de 19,0 °C, 13,9 °C y 8,8 °C, respectivamente (Huerta, 2018). Sin embargo, durante la evaluación del sistema, en este mes se registraron magnitudes de 21,1 °C, 13,9 °C y 9,1 °C, respectivamente. Por lo anterior, se advierte que los valores recabados durante el periodo de evaluación se presentaron muy similares a las establecidas en la caracterización climática, con una diferencia máxima de 2 °C, siendo la promedio, igual en ambos casos (Figura B 25).

Figura B 24

Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de octubre.

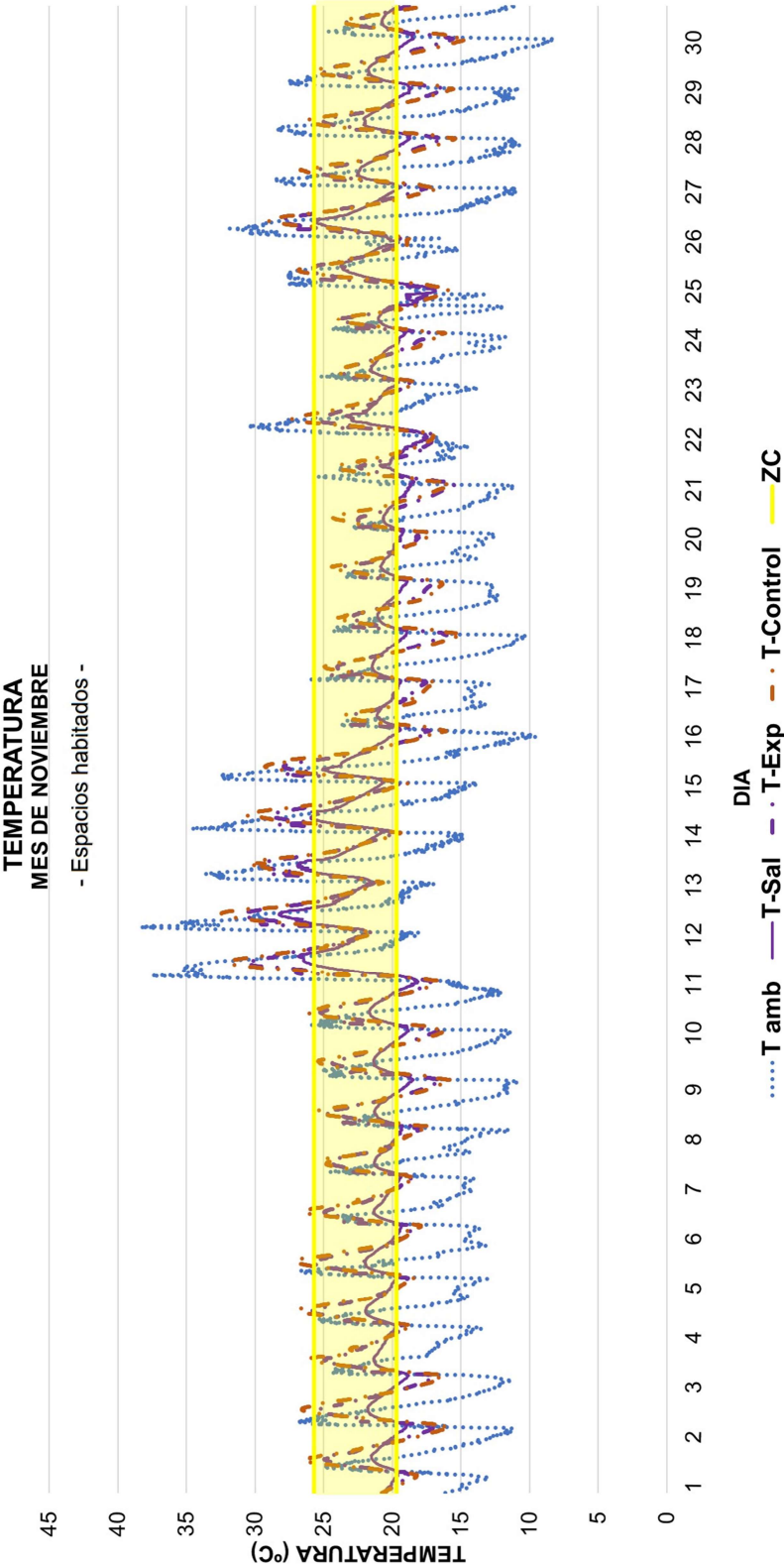
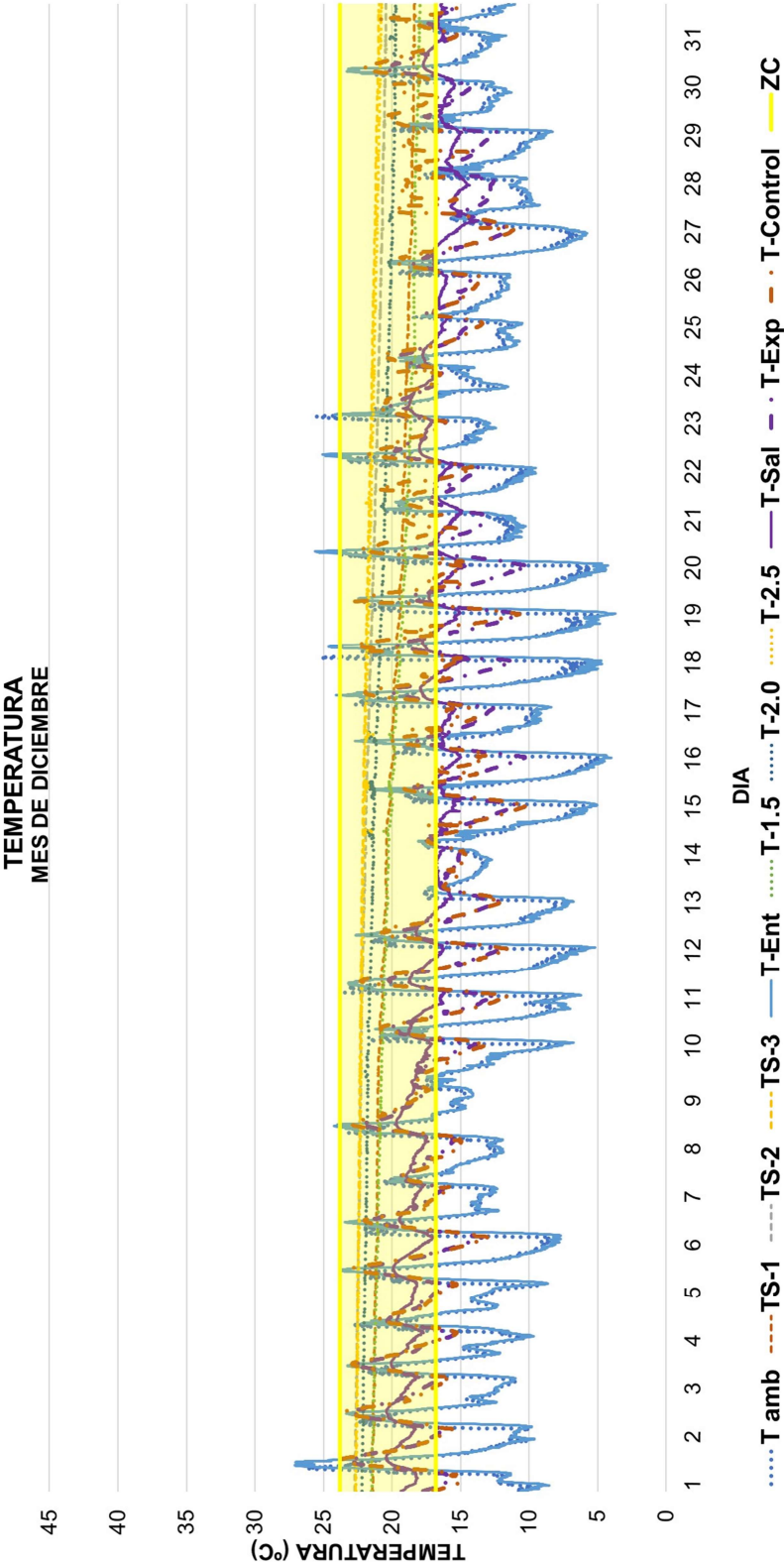


Figura B 25

Temperaturas registradas en el mes de diciembre



### ➤ Intercambiador

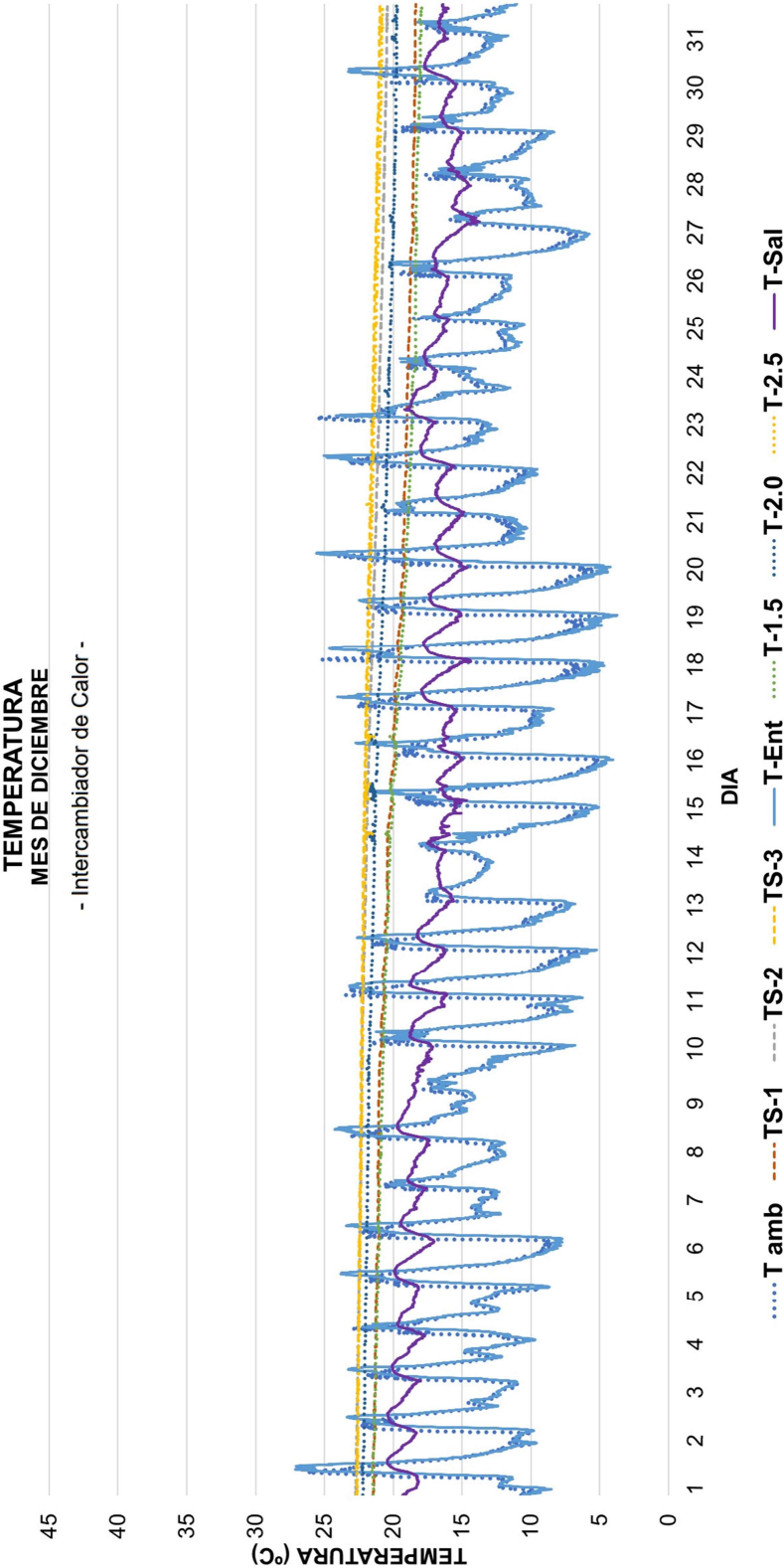
Al comparar la temperatura ambiente con la del sistema en la salida del IC, se observó que el calentamiento representó el 75,7 % del periodo evaluado, con una diferencia promedio de 4,9 °C y un valor máximo extremo de calentamiento de 10,7 °C. Mientras tanto, el enfriamiento se presentó el 24,3 % restante del periodo, con una diferencia promedio de 2,1 °C y valor máximo extremo de 10,6 °C. Por lo tanto, el desempeño térmico efectivo del sistema osciló en el rango de 7,0 °C con una temperatura promedio de 16,9 °C en la salida del IC. No obstante, el promedio máximo de calentamiento fue de 7,7 °C (2,8 °C encima del promedio), mientras que el de enfriamiento fue de 4,4 °C (2,3 °C encima del promedio). Por lo tanto, el sistema observó, un mejor desempeño de calentamiento, tanto en promedio como en extremo.

Por otra parte, al analizar la influencia que la temperatura del suelo tiene en el sistema, se observó la mayor parte del tiempo una disminución de temperatura de 0,2 °C en promedio de la TS-1 al interior del IC a la misma profundidad, mientras que en la profundidad 2,5, se observó una reducción de temperatura de 0,6 °C en promedio, en el interior del IC con respecto a la temperatura del suelo; mientras que en la profundidad 2,5 m, igualmente se presentó disminución de la temperatura al interior del IC con respecto a la TS-3, manteniendo una temperatura promedio al interior del IC, de 19,5 °C, 20,9 °C y 21,7 °C en las profundidades de 1,5 m, 2,0 m y 2,5 m respectivamente (Figura B 26).

Por lo anterior, y al comparar estas últimas temperaturas con las del suelo en sus tres profundidades se advierte que el sistema logró una estabilidad térmica en el segmento del IC.

Figura B 26

Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de diciembre.





### ➤ Espacio habitado

Al comparar la temperatura del ambiente con la del espacio experimental, este último presentó, el 78,9 % del periodo evaluado, condiciones de aumento de temperatura con respecto al primero, con un valor promedio de 3,7 °C; por su parte, la disminución de temperatura representó el 21,1 % del tiempo, con una reducción promedio de 2,6 °C, presentando valores promedios máximos de 5,5 °C y 5,4 °C, y extremos de 7,8 °C y 10,9 °C, respectivamente.

Por otra parte, la oscilación térmica promedio en el espacio experimental fue de 5,7 K, mientras que en el ambiente fue de 12,0 K y de 6,9 K en el espacio de control, lo que significa que el espacio experimental continúa siendo el que presenta mayor estabilidad térmica. Además, en este mes, las condiciones de temperatura se mantuvieron dentro del rango de confort de 16,8 °C a 23,8 °C, establecido para el periodo térmico frío; el espacio experimental el 43,4 % del tiempo, mientras que el espacio de control lo hizo el 55,1 % y a la salida del IC, el 55,6 % del periodo evaluado. En este periodo, en el espacio de control se utilizaron estrategias de adaptación térmica, como el uso de dispositivo mecánico para calefacción y cerrado de ventanas, es por ello que el periodo de confort es mayor (Figura B 27).

### Enero

En este mes, la ciudad de Ensenada presenta una temperatura máxima promedio, una media y una mínima promedio, de 19,7 °C, 14,3 °C y 8,9 °C, respectivamente (Huerta, 2018). Sin embargo, durante la evaluación del sistema, en este mes se registraron magnitudes de 24,6 °C, 16,3 °C y 9,2 °C, respectivamente. Por lo anterior, se advierte que los valores recabados durante el periodo de evaluación se presentaron por encima de las establecidas en la caracterización climática, con una diferencia promedio de 2 °C (Figura B 28).

Figura B 27

Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de diciembre.

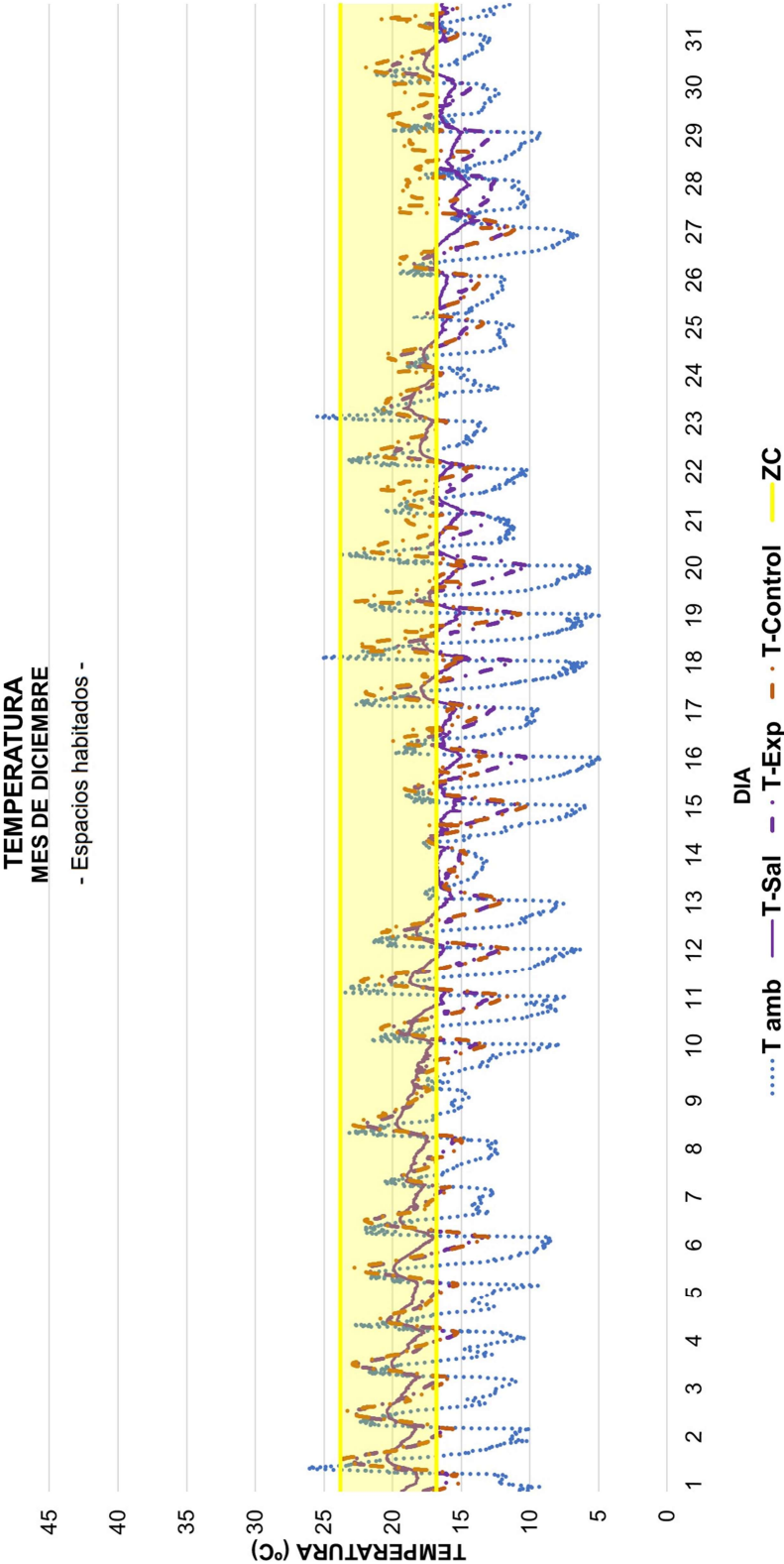
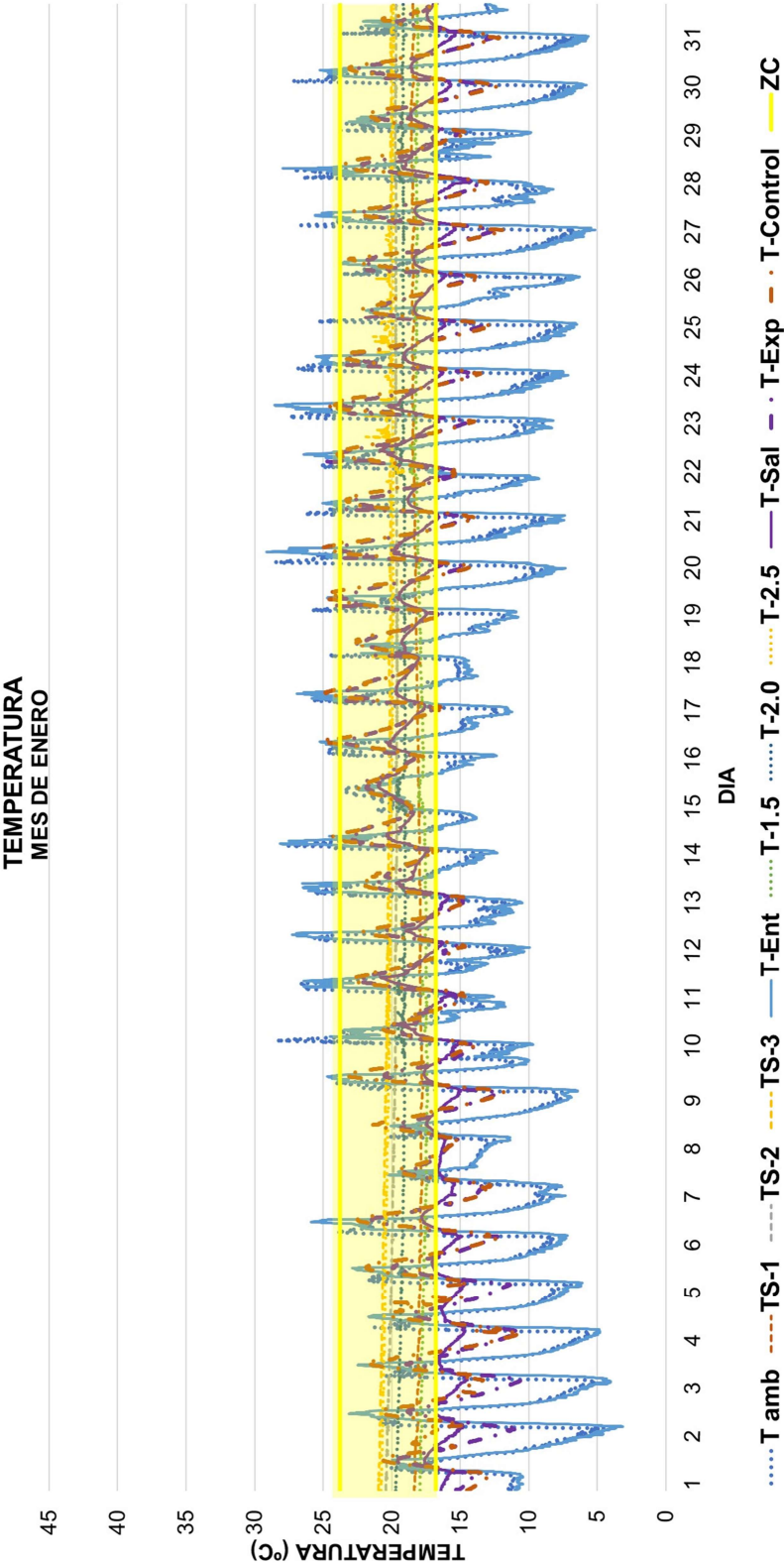


Figura B 28

Temperaturas registradas en el mes de enero



### ➤ Intercambiador

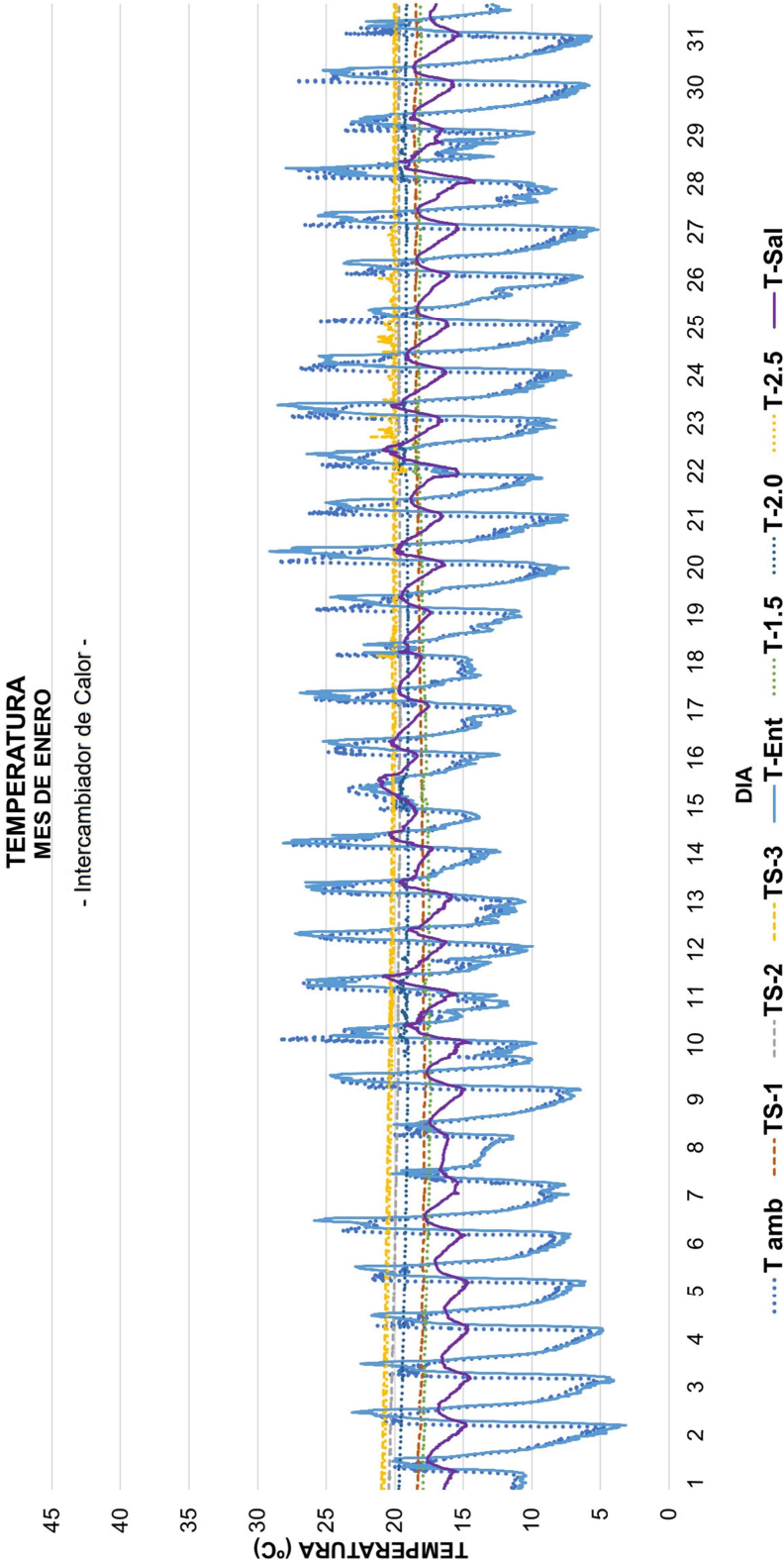
Al comparar la temperatura ambiente con la del sistema en la salida del IC, se observó que el calentamiento representó el 65,2 % del periodo evaluado, con una diferencia promedio de 4,7 °C y un valor máximo extremo de calentamiento de 10,5 °C. Mientras tanto, el enfriamiento se presentó el 34,8 % restante del periodo, con una diferencia promedio de 3,7 °C y valor máximo extremo de 12,9 °C. Por lo tanto, el desempeño térmico efectivo del sistema osciló en el rango de 8,4 °C con una temperatura promedio de 17,8 °C en la salida del IC. No obstante, el promedio máximo de calentamiento fue de 7,3 °C (2,6 °C encima del promedio), mientras que el de enfriamiento fue de 5,5 °C (1,8 °C encima del promedio). Por lo tanto, y al igual que en el mes de diciembre, el sistema observó un mejor desempeño de calentamiento, tanto en promedio como en extremo.

Por otra parte, al analizar la influencia que la temperatura del suelo tiene en el sistema, se observó la mayor parte del tiempo una disminución de temperatura de 0,2 °C en promedio de la TS-1 al interior del IC a la misma profundidad, mientras que en la profundidad 2,5, se observó una reducción de temperatura de 0,6 °C en promedio, en el interior del IC con respecto a la temperatura del suelo; mientras que en la profundidad 2,5 m, igualmente se presentó disminución de la temperatura al interior del IC con respecto a la TS-3, manteniendo una temperatura promedio al interior del IC, de 19,5 °C, 20,9 °C y 21,7 °C en las profundidades de 1,5 m, 2,0 m y 2,5 m respectivamente (Figura B 29).

Por lo anterior, y al comparar estas últimas temperaturas con las del suelo en sus tres profundidades se advierte que el sistema logró una estabilidad térmica en el segmento del IC.

Figura B 29

Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de enero.



### ➤ Espacio habitado

Al comparar la temperatura del ambiente con la del espacio experimental, este último presentó, el 78,9 % del periodo evaluado, condiciones de aumento de temperatura con respecto al primero, con un valor promedio de 3,7 °C; por su parte, la disminución de temperatura representó el 21,1 % del tiempo, con una reducción promedio de 2,6 °C, presentando valores promedios máximos de 5,5 °C y 5,4 °C, y extremos de 7,8 °C y 10,9 °C, respectivamente.

Por otra parte, la oscilación térmica promedio en el espacio experimental fue de 5,7 K, mientras que en el ambiente fue de 12,0 K y de 6,9 K en el espacio de control, lo que significa que el espacio experimental continúa siendo el que presenta mayor estabilidad térmica. Además, en este mes, las condiciones de temperatura se mantuvieron dentro del rango de confort de 16,8 °C a 23,8 °C, establecido para el periodo térmico frío; el espacio experimental el 43,4 % del tiempo, mientras que el espacio de control lo hizo el 55,1 % y a la salida del IC, el 55,6 % del periodo evaluado. En este periodo, en el espacio de control se utilizaron estrategias de adaptación térmica, como el uso de dispositivo mecánico para calefacción y cerrado de ventanas, es por ello que el periodo de confort es mayor (Figura B 30).

### Febrero

En este mes, la ciudad de Ensenada presenta una temperatura máxima promedio, una media y una mínima promedio, de 19,2 °C, 14,2 °C y 9,2 °C, respectivamente (Huerta, 2018). Sin embargo, durante la evaluación del sistema, en este mes se registraron magnitudes de 27,7 °C, 16,5 °C y 8,8 °C, respectivamente. Por lo anterior, se advierte que los valores recabados durante el periodo de evaluación se presentaron por encima de las establecidas en la caracterización climática, con una diferencia de 8,5 °C, 2,3 °C, en el caso de la promedio máxima y media; y por debajo 0,4 °C en la temperatura promedio mínima; con ello, se presume que las temperaturas registradas son relativamente similares a las de la caracterización climática (Figura B 31).



Figura B 30

Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de enero.

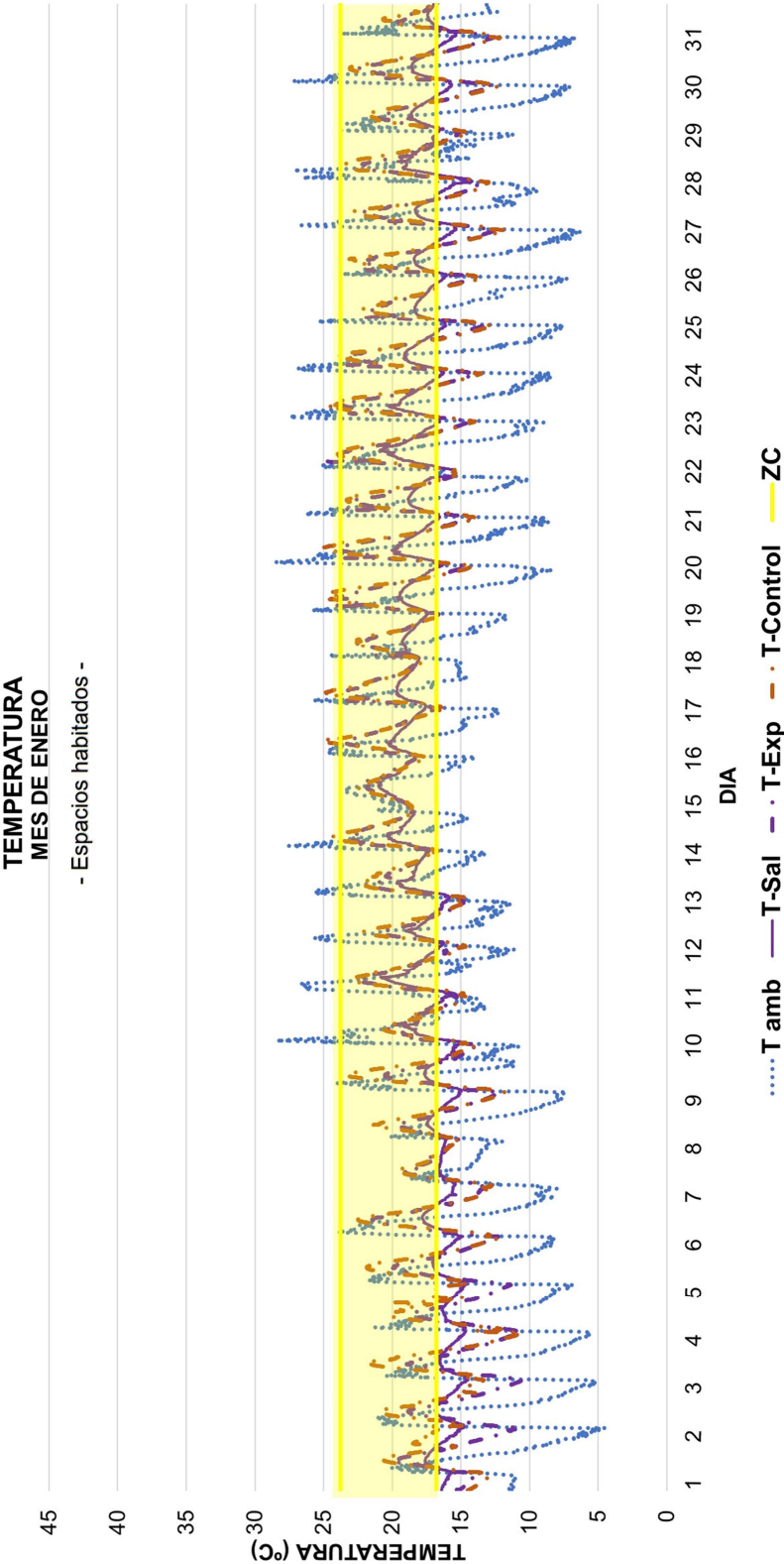
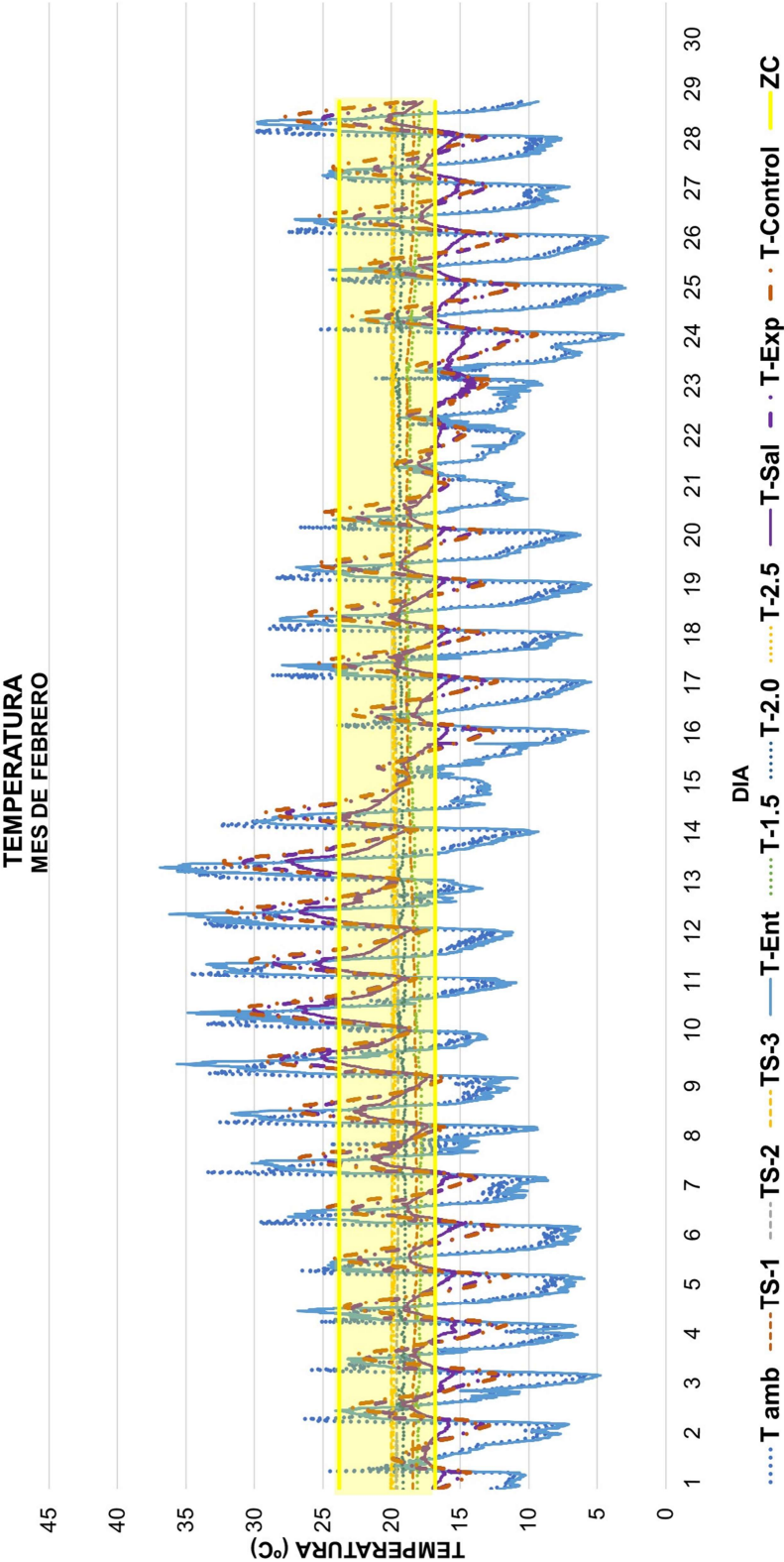


Figura B 31

Temperaturas registradas en el mes de febrero



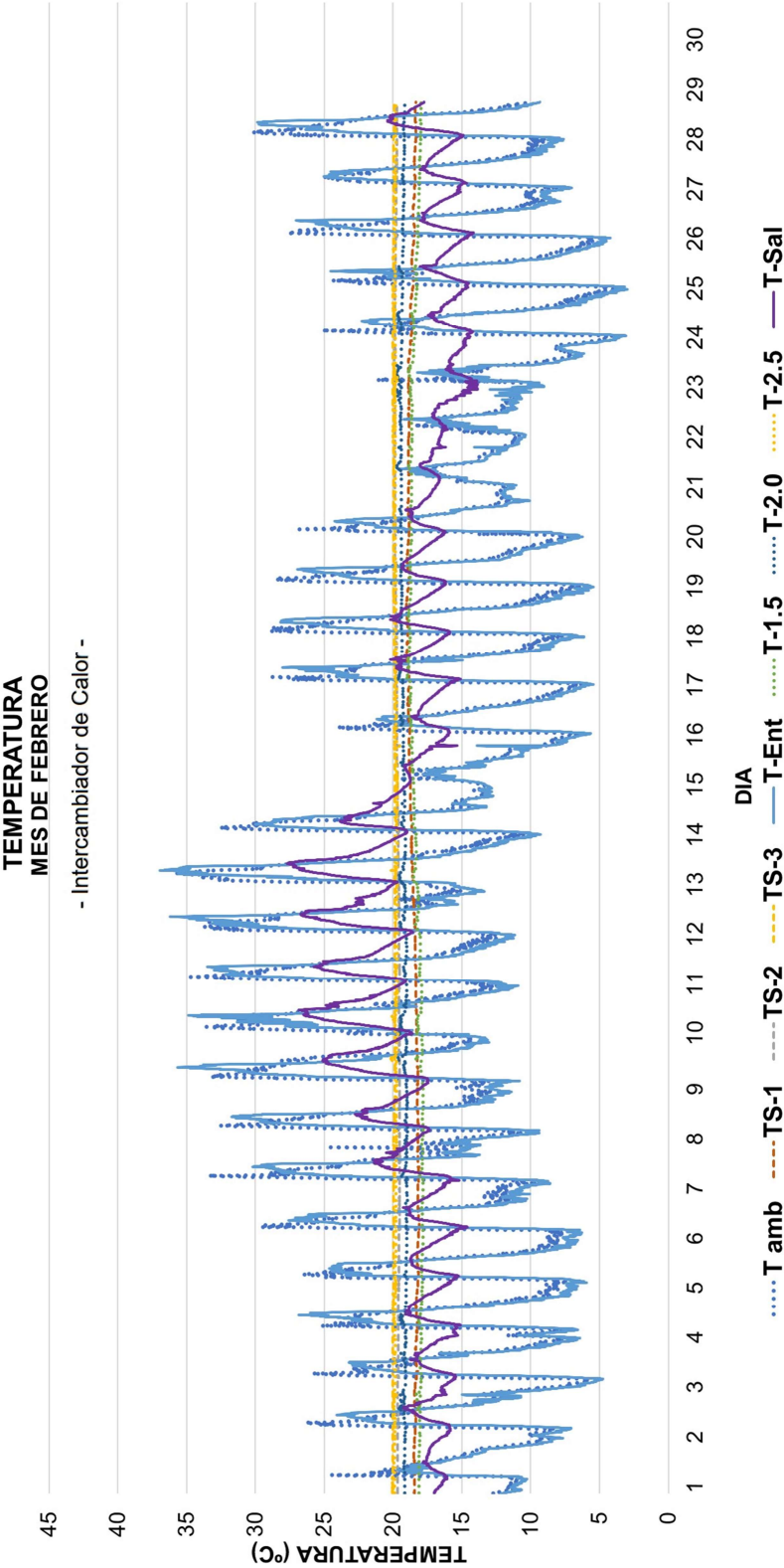
### ➤ Intercambiador

Al comparar la temperatura ambiente con la del sistema en la salida del IC, se observó que el calentamiento representó el 66,9 % del periodo evaluado, con una diferencia promedio de 5,3 °C y un valor máximo extremo de calentamiento de 11,1 °C. Mientras tanto, el enfriamiento se presentó el 33,1 % restante del periodo, con una diferencia promedio de 4,6 °C y valor máximo extremo de 17,3 °C. Por lo tanto, el desempeño térmico efectivo del sistema osciló en el rango de 9,9 °C con una temperatura promedio de 18,3 °C en la salida del IC. No obstante, el promedio máximo de calentamiento fue de 7,1 °C (1,8 °C encima del promedio), mientras que el de enfriamiento fue de 7,0 °C (2,4 °C encima del promedio). Por lo tanto, el sistema observó un mejor desempeño por calentamiento en temperaturas promedio, sin embargo, en valores extremos el mejor desempeño se tuvo en enfriamiento, a pesar de que el calentamiento prevaleció por más tiempo durante el periodo evaluado (Figura B 32).

Al analizar la influencia que la temperatura del suelo tiene en el sistema, se observó una disminución de temperatura de 0,3 °C en promedio al interior del IC a 1,5 m de profundidad respecto a la temperatura del suelo (TS-1); en la profundidad 2,5 m, se observó igualmente una reducción de temperatura de 0,5 °C en el interior del IC respecto a la temperatura del suelo (TS-2); de igual manera, en la profundidad 2,5 m, se da una disminución de 0,2 °C en promedio, en el interior del IC respecto a la temperatura del suelo (TS-3). Por lo anterior, y al analizar las temperaturas promedio en las tres profundidades, tanto de las temperaturas del suelo (18,5 °C, 19,7 °C y 20,0 °C, respectivamente) como las del IC (18,3 °C, 19,2 °C y 19,8 °C, respectivamente), se advierte que el sistema logró una estabilidad térmica en el IC.

Figura B 32

Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de febrero.



### ➤ Espacio habitado

Al comparar la temperatura del ambiente con la del espacio experimental, este último presentó, el 76,8 % del periodo evaluado, condiciones de aumento de temperatura con respecto al primero, con un valor promedio de 5,0 °C; por su parte, la disminución de temperatura representó el 23,2 % del tiempo, con una reducción promedio de 4,8 °C; se registraron valores promedios máximos de 7,2 °C y 7,8 °C, y extremos de 9,8 °C y 16,4 °C, respectivamente.

Por otra parte, la oscilación térmica promedio en el espacio experimental fue de 9,7 K, mientras que en el ambiente fue de 18,8 K y de 11,3 K en el espacio de control, lo que significa que el espacio experimental continúa siendo el que presenta mayor estabilidad térmica. Además, en este mes, las condiciones de temperatura se mantuvieron dentro del rango de confort de 16,8 °C a 23,8 °C establecido para el periodo térmico frío; el espacio experimental el 52,0 % del tiempo, mientras que el espacio de control lo hizo el 48,0 % y la salida del IC, el 61,8 % del periodo evaluado. En este periodo, se dejaron de utilizar estrategias de adaptación térmica para calefacción en el espacio de control (Figura B 33).

### Marzo

En este mes, la ciudad de Ensenada presenta una temperatura máxima promedio, una media y una mínima promedio, de 19,7 °C, 15,0 °C y 10,3 °C (Huerta, 2018), respectivamente. Sin embargo, durante la evaluación del sistema, en este mes se registraron magnitudes de 28,4 °C, 17,2 °C y 9,6 °C, respectivamente. Por lo anterior, se advierte que los valores recabados durante el periodo de evaluación se presentaron, al igual que el mes anterior, por encima de las establecidas en la caracterización climática, con una diferencia de 8,7 °C, 2,2 °C, la promedio máxima y media, respectivamente; y, por debajo 0,7 °C en la temperatura promedio mínima; con ello, se presume que las temperaturas registradas son relativamente similares a las de la caracterización climática (Figura B 34).



Figura B 33

Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de febrero.

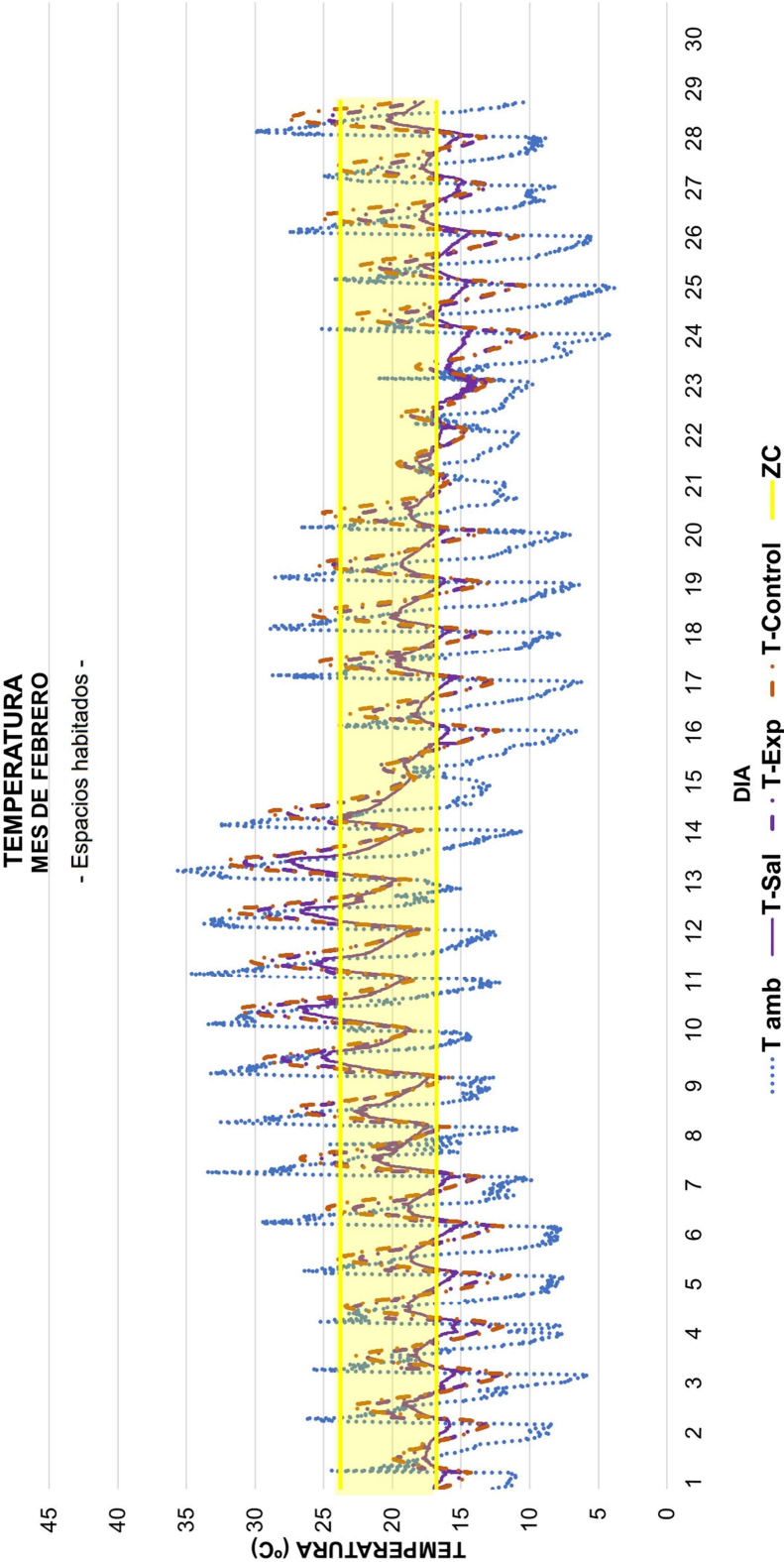
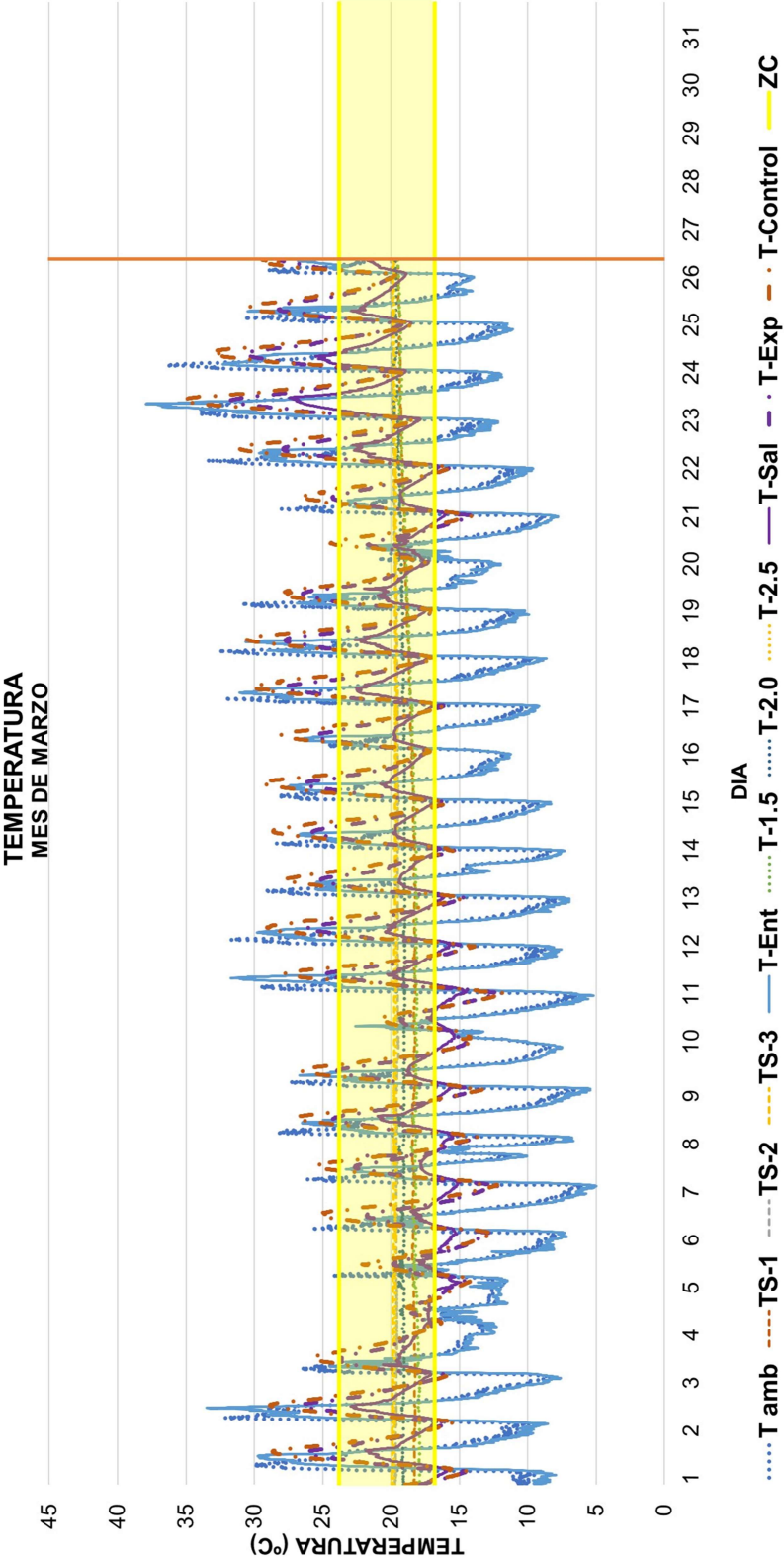




Figura B 34

Temperaturas registradas en el mes de marzo



Nota. La línea vertical naranja indica el final del periodo de análisis.

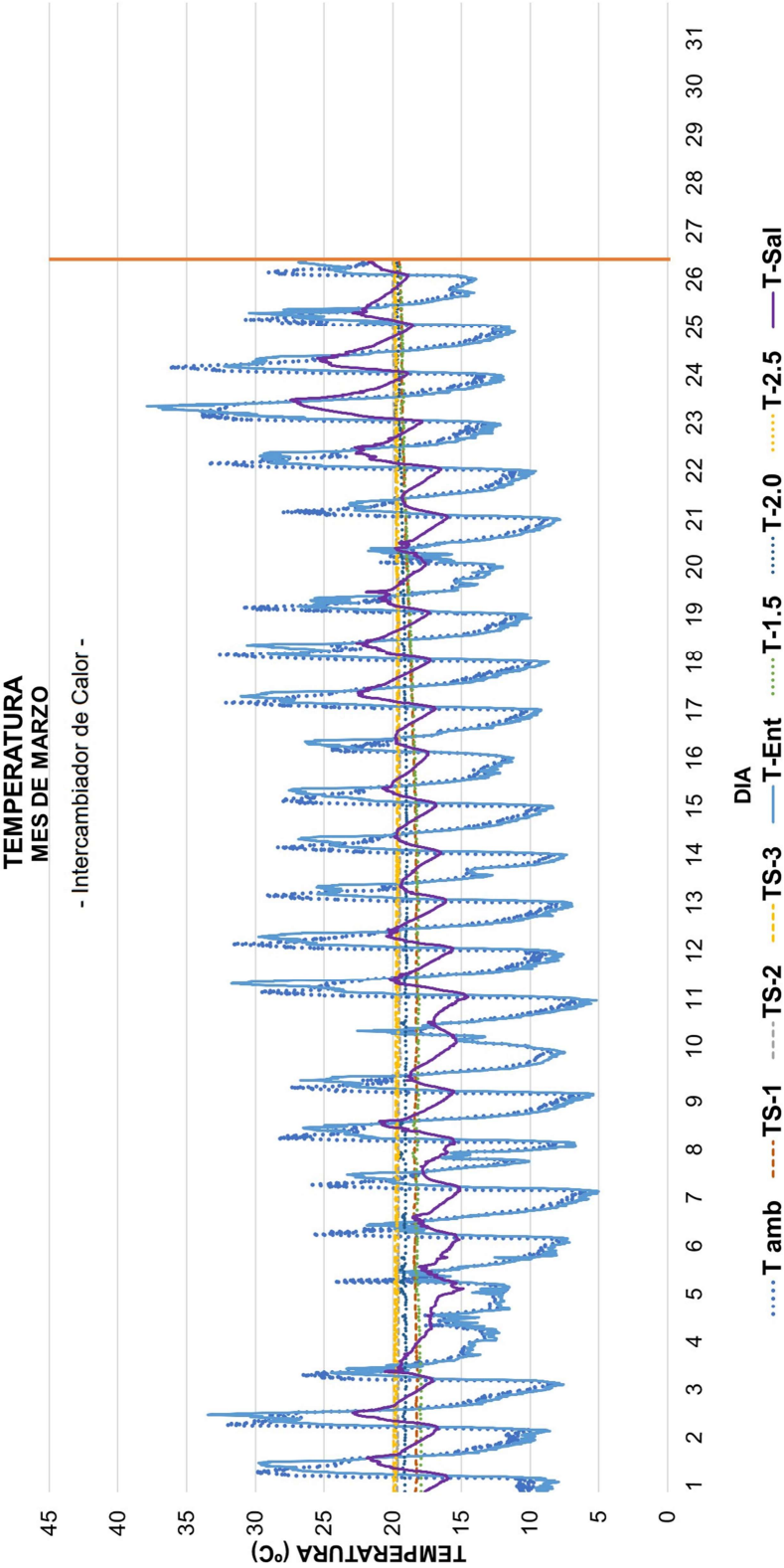
### ➤ Intercambiador

Al comparar la temperatura ambiente con la del sistema en la salida del IC, se observó que el calentamiento representó el 65,0 % del periodo evaluado, con una diferencia promedio de 4,9 °C y un valor máximo extremo de calentamiento de 9,5 °C. Mientras tanto, el enfriamiento se presentó el 35,0 % restante del periodo, con una diferencia promedio de 4,7 °C y valor máximo extremo de 14,9 °C. Por lo tanto, el desempeño térmico efectivo del sistema osciló en el rango de 9,6 °C con una temperatura promedio de 18,6 °C en la salida del IC. No obstante, el promedio máximo de calentamiento fue de 6,6 °C (1,7 °C encima del promedio), mientras que el de enfriamiento fue de 7,6 °C (2,9 °C encima del promedio). Por lo tanto, el sistema observó un mejor desempeño por calentamiento en temperaturas promedio, sin embargo, en valores extremos el mejor desempeño se tuvo en enfriamiento, a pesar de que el calentamiento prevaleció por más tiempo durante el periodo evaluado.

Al analizar la influencia que la temperatura del suelo tiene en el sistema, se observó una disminución de temperatura de 0,1 °C en promedio al interior del IC a 1,5 m de profundidad respecto a la temperatura del suelo (TS-1); en la profundidad 2,5 m, se observó igualmente una reducción de temperatura de 0,4 °C en el interior del IC respecto a la temperatura del suelo (TS-2); de igual manera, en la profundidad 2,5 m, se da una disminución de 0,1 °C en promedio, en el interior del IC respecto a la temperatura del suelo (TS-3). Por lo anterior, y al analizar las temperaturas promedio en las tres profundidades, tanto de las temperaturas del suelo (18,6 °C, 19,7 °C y 19,8 °C, respectivamente) como las del IC (18,5 °C, 19,2 °C y 19,7 °C, respectivamente), se advierte que el sistema logró una estabilidad térmica en el IC (Figura B 35).

Figura B 35

Relación de temperaturas del ambiente y del sistema (segmento IC) del mes de marzo.



Nota. La línea vertical naranja indica el final del periodo de análisis.

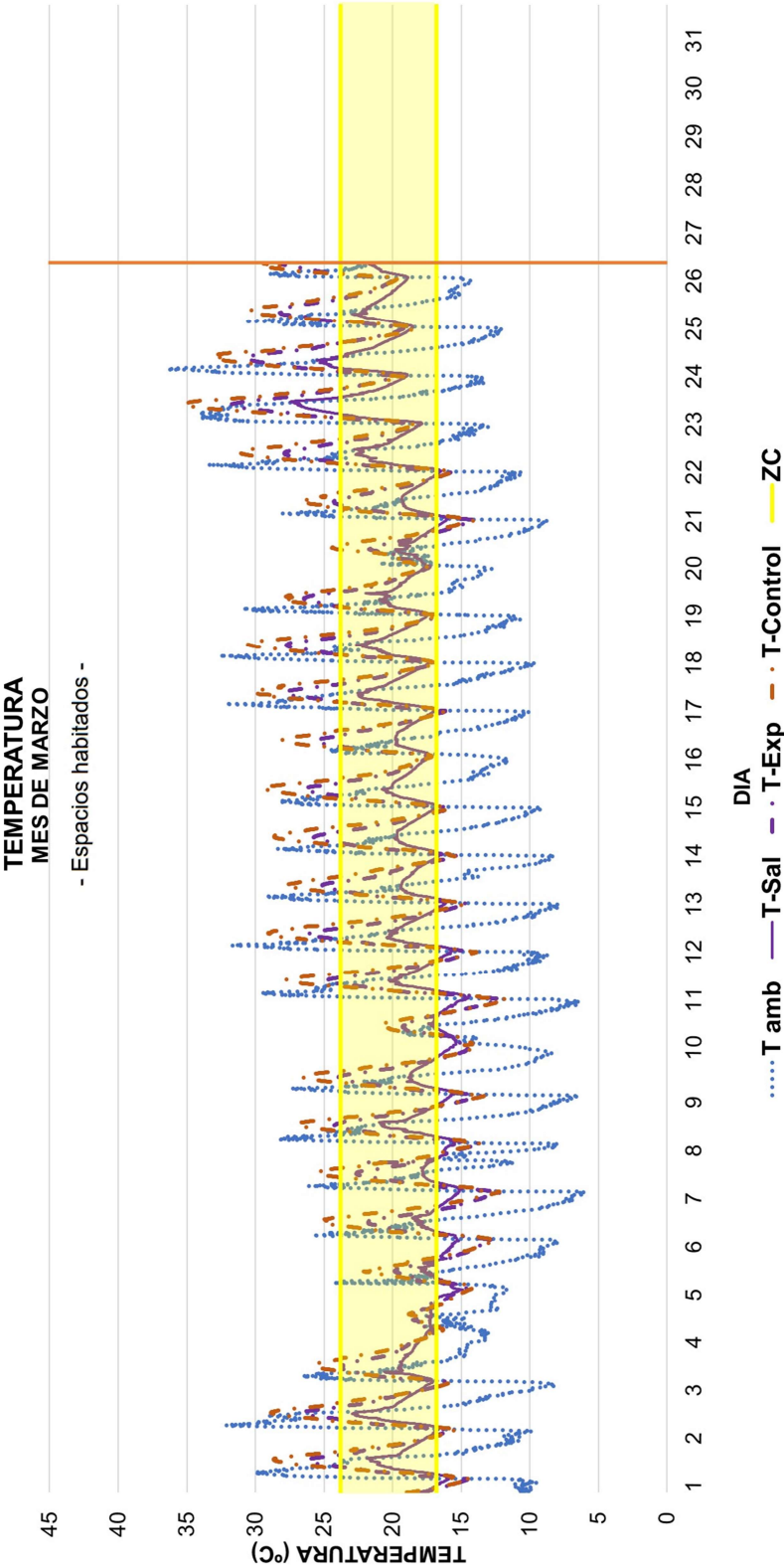
### ➤ Espacio habitado

Al comparar la temperatura del ambiente con la del espacio experimental, este último presentó, el 79,1 % del periodo evaluado, condiciones de aumento de temperatura con respecto al primero, con un valor promedio de 5,5 °C; por su parte, la disminución de temperatura representó el 20,9 % del tiempo, con una reducción promedio de 4,6 °C; se registraron valores promedios máximos de 7,0 °C y 6,9 °C, y extremos de 10,7 °C y 13,1 °C, respectivamente.

Por otra parte, la oscilación térmica promedio en el espacio experimental fue de 10,1 K, mientras que en el ambiente fue de 18,8 K y de 12,2 K en el espacio de control, lo que significa que el espacio experimental continúa siendo el que presenta mayor estabilidad térmica. Además, en este mes, el espacio experimental se mantuvo el 58,7 % del tiempo dentro del rango de confort de 16,8 °C a 23,8 °C establecido para el periodo térmico frío; mientras tanto, el espacio de control lo hizo el 47,8 % y la salida del IC el 78,8 % del periodo evaluado (Figura B 36).

Figura B 36

Relación de temperaturas del ambiente y de los espacios habitados del mes de marzo.



Nota. La línea vertical naranja indica el final del periodo de análisis.

## APÉNDICE C.

### Desempeño mensual de ventilación.

#### Periodo térmico frío

##### Abril

Durante el mes, se registraron velocidades promedio de 0,18 m/s en la salida del IC y de 0,07 m/s y en la chimenea solar, con velocidades máximas promedio registradas de 0,36 m/s y 0,77 m/s, así como máximas extremas de 0,47 m/s y 1,00 m/s, respectivamente. Por lo tanto, se puede observar que en la salida del IC es donde se presentaron las velocidades medias más elevadas; sin embargo, fue en la chimenea solar donde se presentaron las mayores velocidades máximas promedio y extremas (Figura C 1).

Con respecto al desempeño del sistema en cuanto a tasa de ventilación se refiere, en promedio se registraron de 5,33 m<sup>3</sup>/h y 28,69 m<sup>3</sup>/h, en la salida del IC y en la chimenea solar, respectivamente; en tanto, la tasa de flujo máximas promedio registradas fueron de 7,5 m<sup>3</sup>/h y 112,45 m<sup>3</sup>/h, así como máximas extremas de 8,94 m<sup>3</sup>/h y 217,99 m<sup>3</sup>/h, respectivamente.

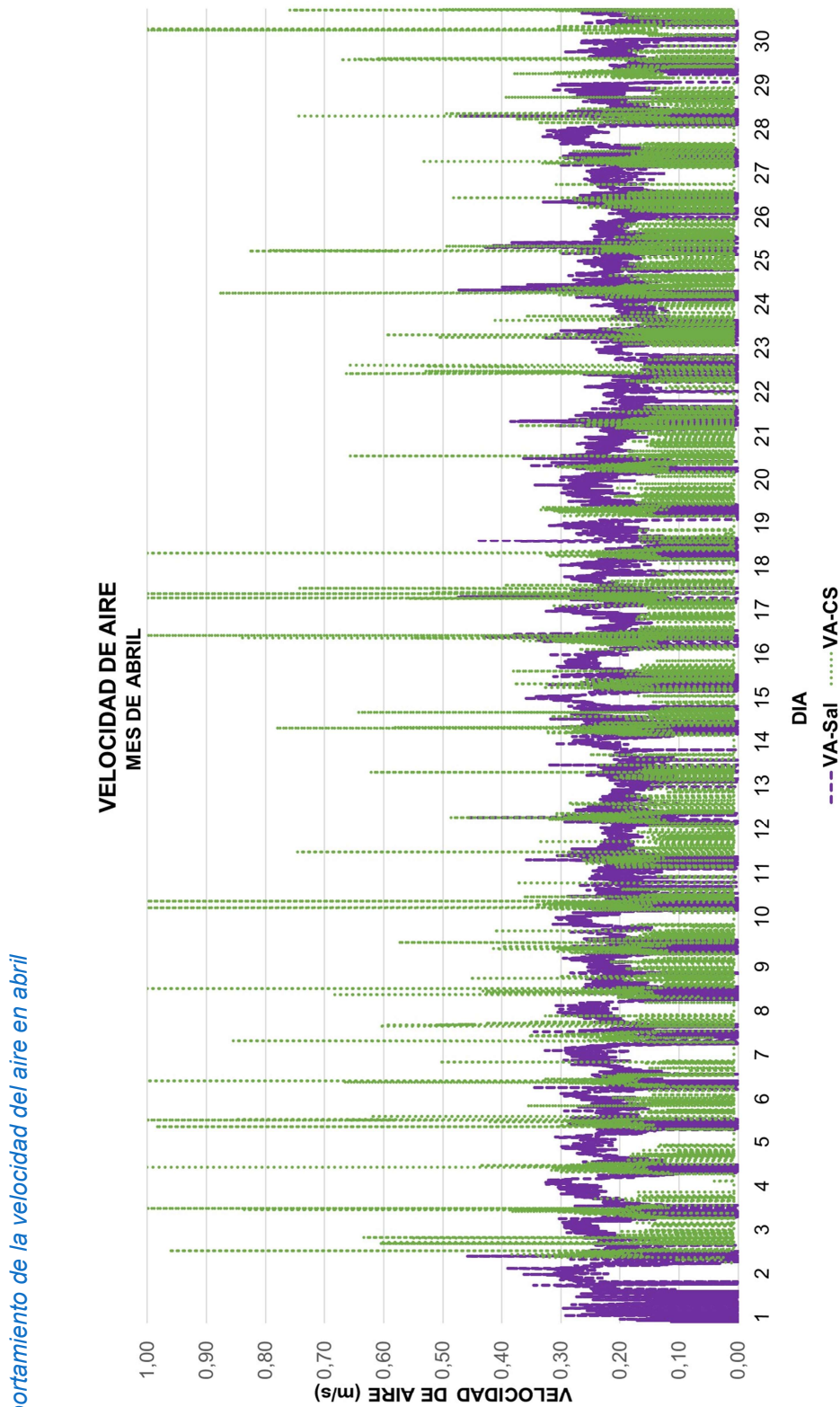
Cabe resaltar, que la ventilación en el IC se presenta más constante en horarios durante la noche y se vuelve más irregular con el incremento de la velocidad en la chimenea solar durante el día (Figura C 2).

#### Periodo térmico de transición frío-cálido

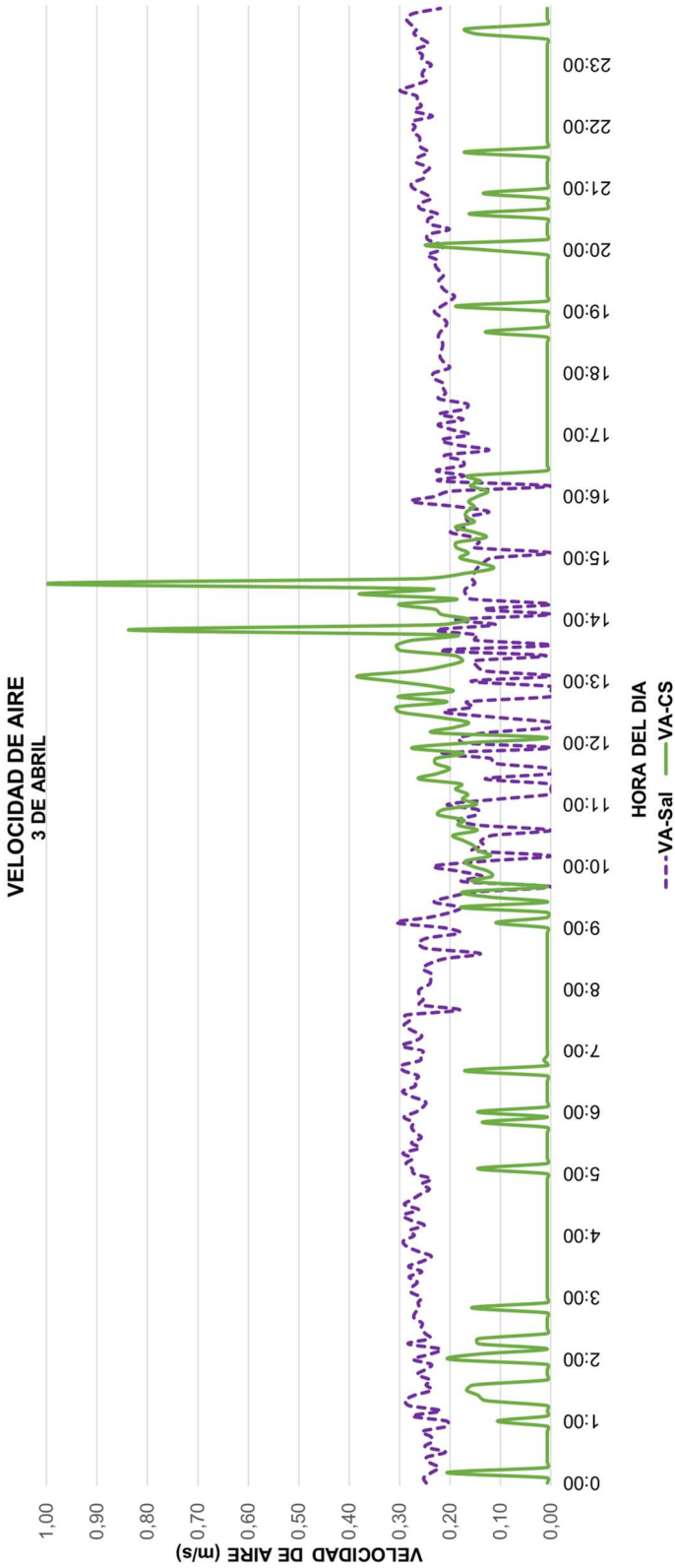
##### Mayo

En este mes se registraron velocidades promedio de 0,19 m/s en la salida del IC y de 0,07 m/s y en la chimenea solar, con velocidades máximas promedio registradas de 0,36 m/s y 0,75 m/s, así como máximas extremas de 0,51 m/s y 1,01 m/s, respectivamente (Figura C 3).





**Figura C 2**  
*Velocidad del aire en un día específico (3 de abril)*



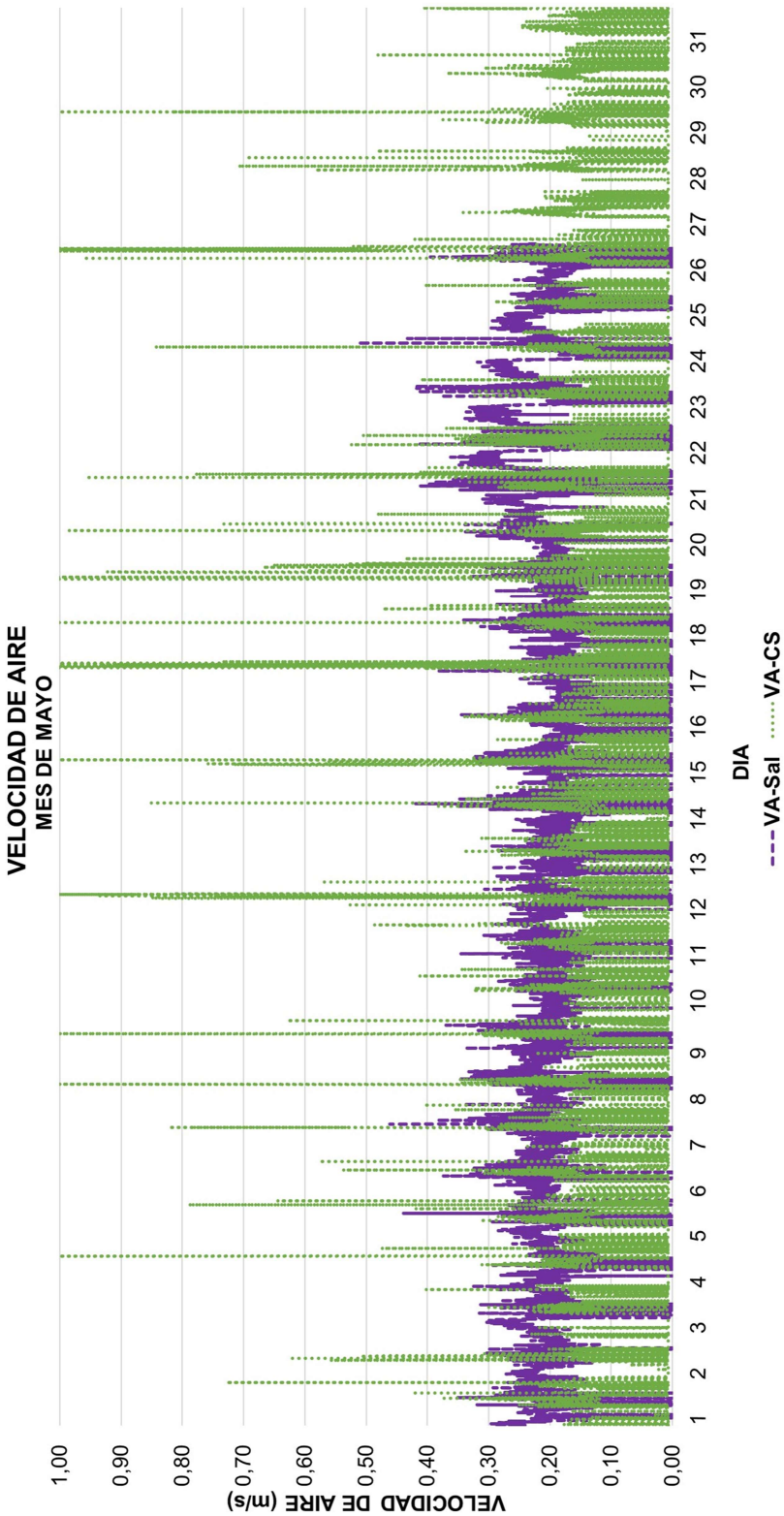


Figura C 3

Comportamiento de la velocidad del aire en mayo

Con relación al desempeño del sistema en cuanto a tasa de ventilación se refiere, en promedio se registraron de 5,58 m<sup>3</sup>/h y 29,03 m<sup>3</sup>/h, en la salida y en la chimenea solar, respectivamente; en tanto, la tasa de flujo máximas promedio registradas fueron de 7,37 m<sup>3</sup>/h y 119,39 m<sup>3</sup>/h, así como máximas extremas de 9,44 m<sup>3</sup>/h y 281,09 m<sup>3</sup>/h, respectivamente.

Al igual que el mes anterior, durante el periodo nocturno, en la salida del IC las velocidades se mantienen más constantes, sin embargo, es en el periodo diurno cuando se presentan las velocidades más altas, a pesar de ser más irregulares. En la Figura C 4 se muestra el comportamiento de la ventilación en un día específico, para lo cual se tomó como referencia un día nublado con llovizna por la mañana.

## Junio

En el mes se registraron velocidades promedio de 0,17 m/s en la salida del IC y de 0,06 m/s y en la chimenea solar, con velocidades máximas promedio registradas de 0,36 m/s y 0,58 m/s, así como máximas extremas de 0,50 m/s y 1,01 m/s, respectivamente (Figura C 5).

Con respecto al desempeño del sistema en cuanto a tasa de ventilación se refiere, en promedio se registraron de 5,06 m<sup>3</sup>/h y 24,12 m<sup>3</sup>/h, en la salida y en la chimenea solar, respectivamente; en tanto, la tasa de flujo máximas promedio registradas fueron de 6,72 m<sup>3</sup>/h y 78,18 m<sup>3</sup>/h, así como máximas extremas de 7,88 m<sup>3</sup>/h y 91,48 m<sup>3</sup>/h, respectivamente.

## Periodo térmico cálido

### Julio

Durante este mes se registraron velocidades promedio de 0,16 m/s en la salida del IC y de 0,05 m/s y en la chimenea solar, con velocidades máximas promedio registradas de 0,32 m/s y 0,58 m/s, así como máximas extremas de 0,42 m/s y 1,01 m/s, respectivamente (Figura C 6).

**Figura C 4**  
*Velocidad del aire en un día (2 de mayo)*

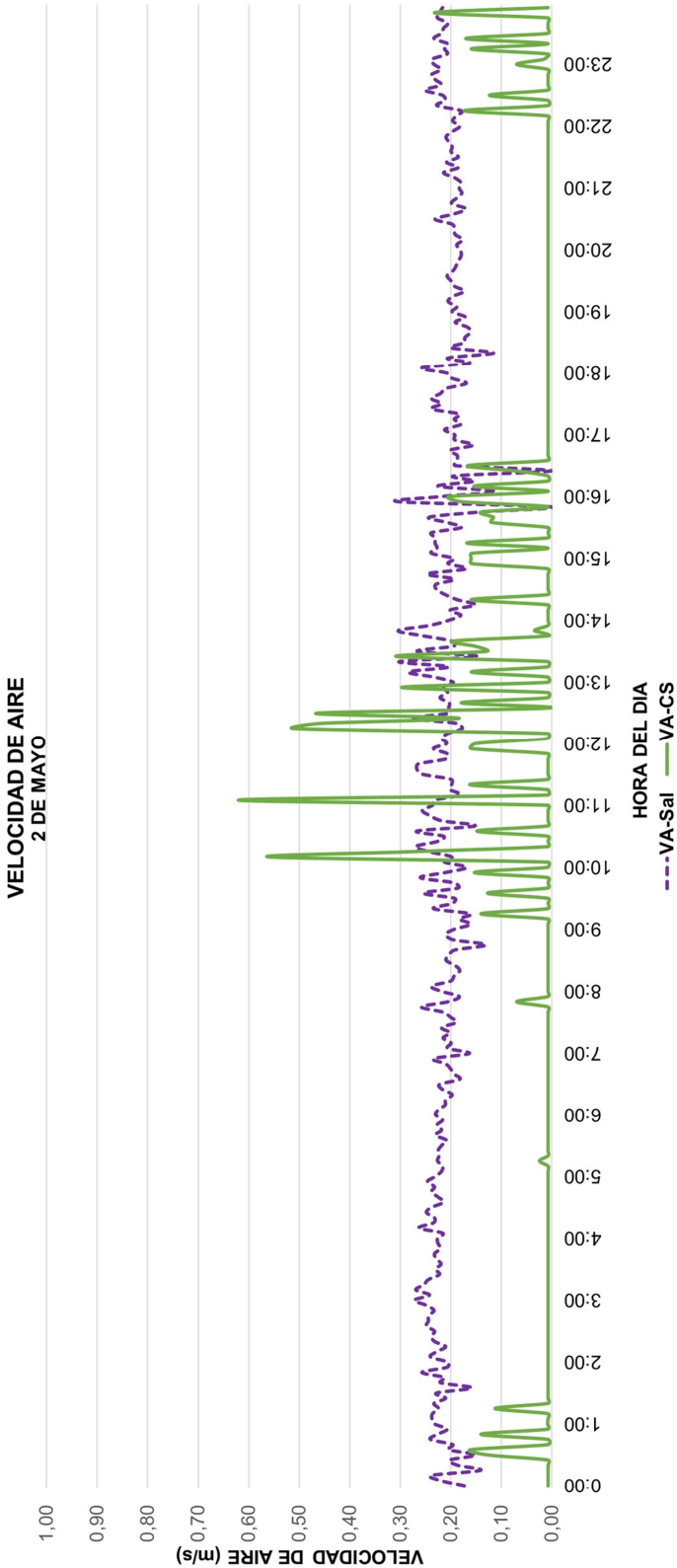
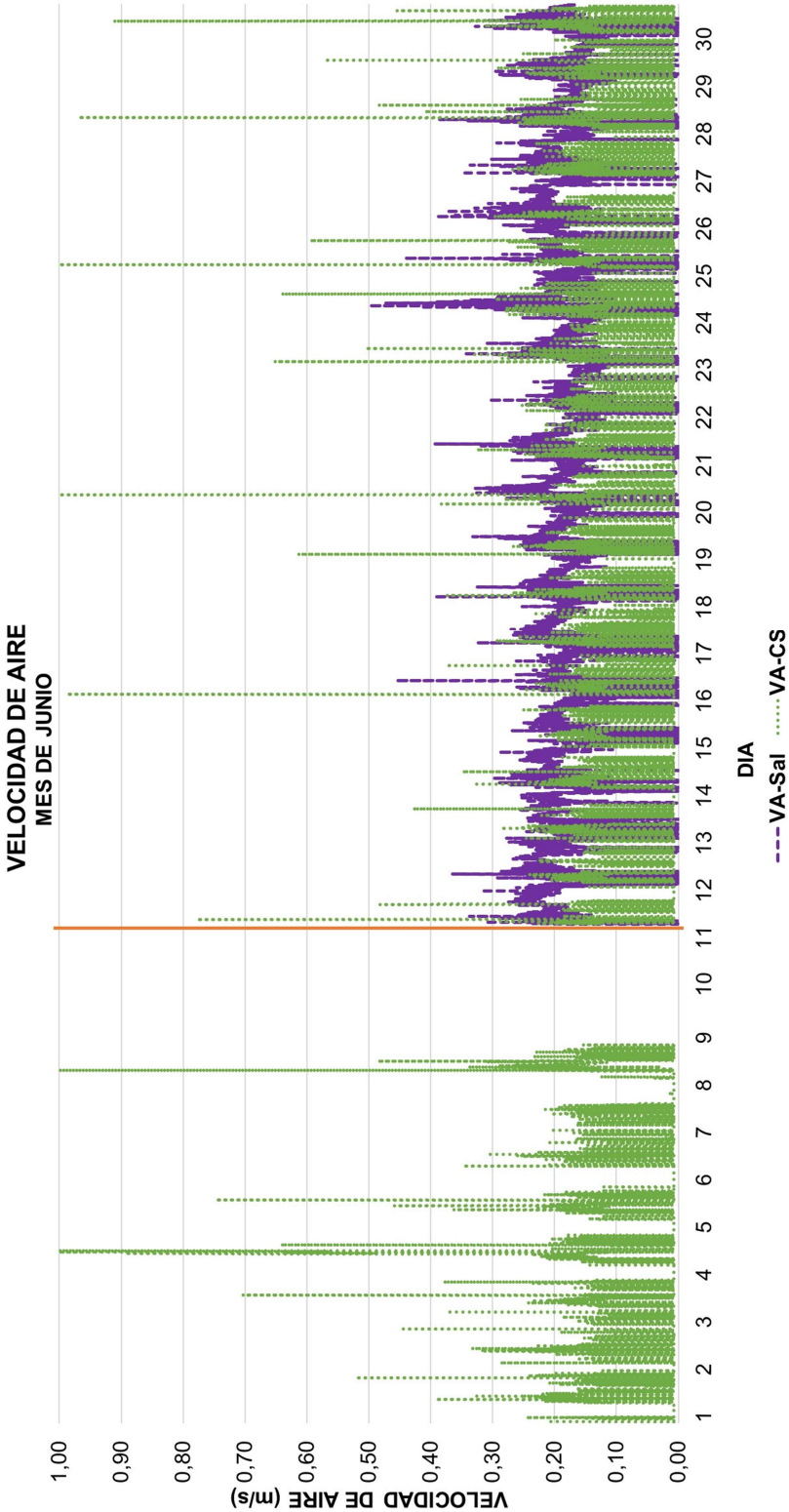




Figura C 5

Comportamiento de la velocidad del aire en junio

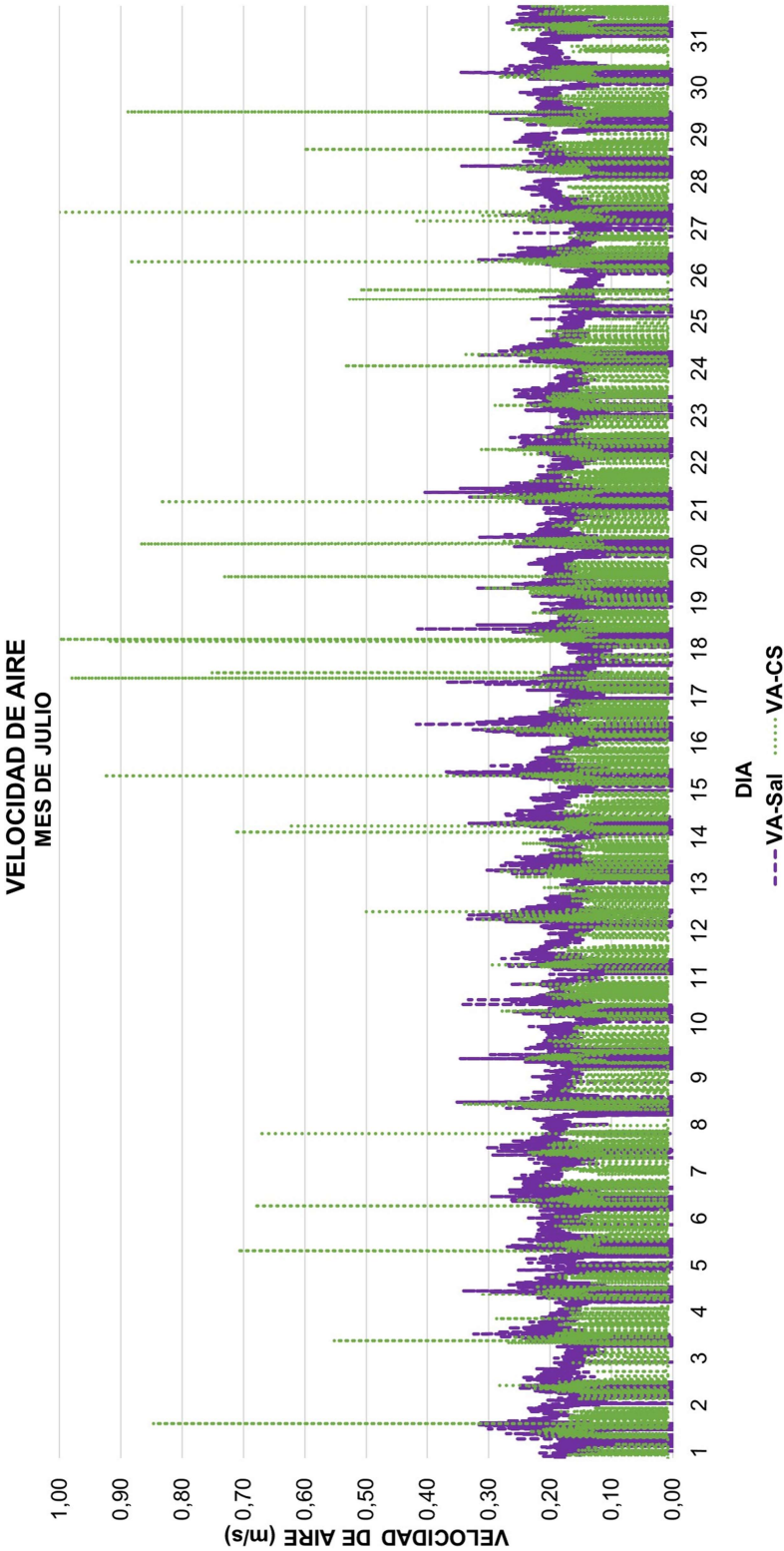


Nota. La línea vertical naranja indica el inicio del periodo de análisis.



Figura C 6

Comportamiento de la velocidad del aire en julio



Respecto al desempeño del sistema en cuanto a tasa de ventilación se refiere, en promedio se registraron de 4,56 m<sup>3</sup>/h y 23,38 m<sup>3</sup>/h, en la salida y en la chimenea solar, respectivamente; en tanto, la tasa de flujo máximas promedio registradas fueron de 6,16 m<sup>3</sup>/h y 81,32 m<sup>3</sup>/h, así como máximas extremas de 7,06 m<sup>3</sup>/h y 106,46 m<sup>3</sup>/h, respectivamente.

## Agosto

En este mes se registraron velocidades promedio de 0,15 m/s en la salida del IC y de 0,06 m/s y en la chimenea solar, con velocidades máximas promedio registradas de 0,33 m/s y 0,70 m/s, así como máximas extremas de 0,52 m/s y 1,01 m/s, respectivamente (Figura C 7).

Respecto al desempeño del sistema en cuanto a tasa de ventilación se refiere, en promedio se registraron de 4,51 m<sup>3</sup>/h y 27,45 m<sup>3</sup>/h, en la salida y en la chimenea solar, respectivamente; en tanto, la tasa de flujo máximas promedio registradas fueron de 6,24 m<sup>3</sup>/h y 96,25 m<sup>3</sup>/h, así como máximas extremas de 7,22 m<sup>3</sup>/h y 137,49 m<sup>3</sup>/h, respectivamente.

## Septiembre

Durante el mes, se registraron velocidades promedio de 0,17 m/s y de 0,07 m/s, en la salida del IC y en la chimenea solar, respectivamente; mientras tanto, las velocidades máximas promedio registradas fueron de 0,31 m/s y 0,62 m/s, así como máximas extremas de 0,49 m/s y 1,01 m/s, respectivamente (Figura C 8).

Con respecto al desempeño del sistema en cuanto a tasa de ventilación se refiere, en promedio se registraron de 4,90 m<sup>3</sup>/h y 30,94 m<sup>3</sup>/h, en la salida y en la chimenea solar, respectivamente; en tanto, la tasa de flujo máximas promedio registradas fueron de 6,54 m<sup>3</sup>/h y 103,88 m<sup>3</sup>/h, así como máximas extremas de 8,15 m<sup>3</sup>/h y 170,61 m<sup>3</sup>/h, respectivamente.

Figura C 7

Comportamiento de la velocidad del aire en agosto

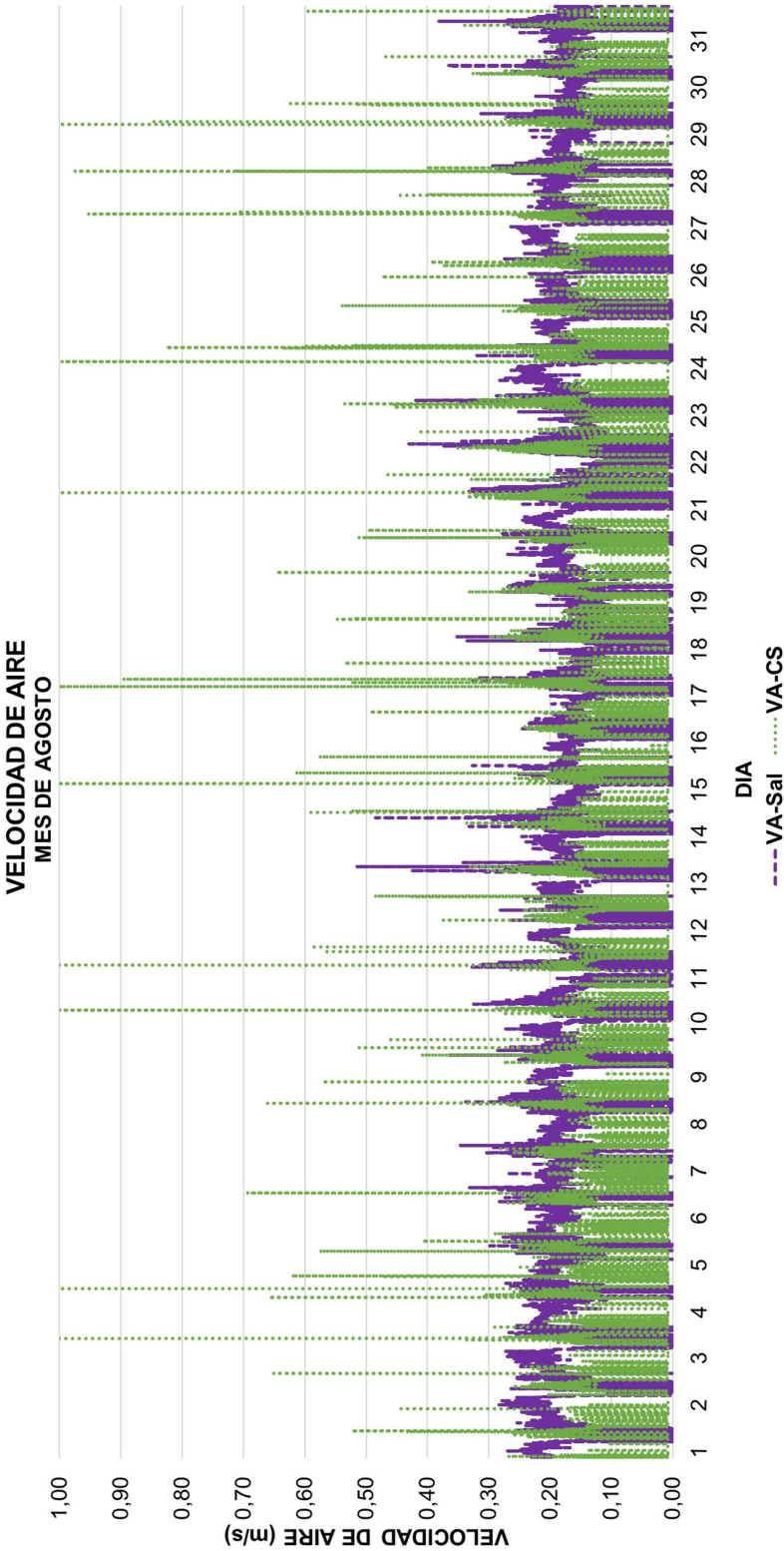
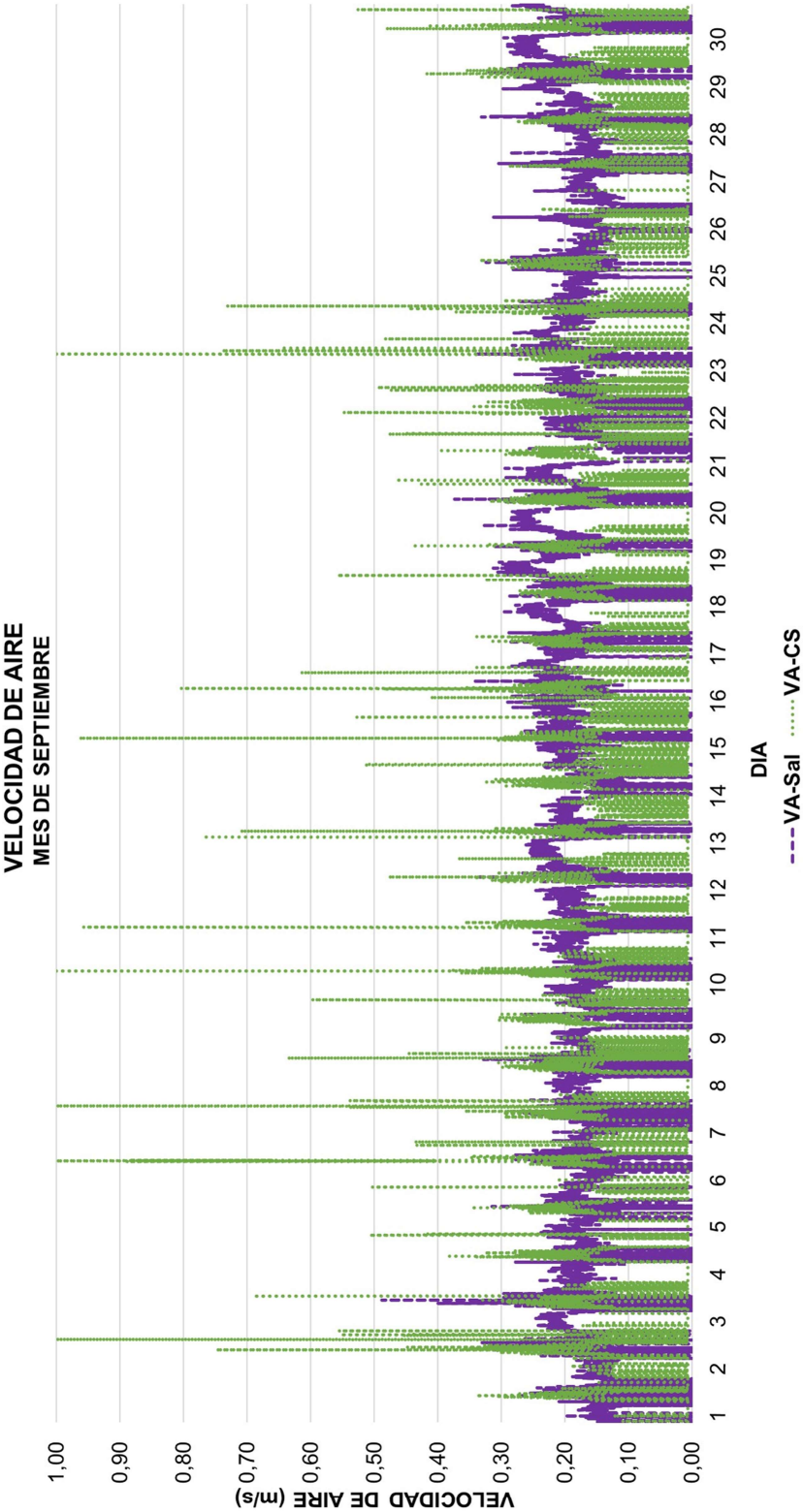


Figura C 8

Comportamiento de la velocidad del aire en septiembre



Nota. La línea vertical naranja indica el inicio del periodo de análisis.

## Periodo térmico de transición cálido-frío

### Octubre

Durante este mes se registraron velocidades promedio de 0,19 m/s en la salida del IC y de 0,08 m/s y en la chimenea solar, con velocidades máximas promedio registradas de 0,37 m/s y 0,64 m/s, así como máximas extremas de 1,00 m/s y 1,01 m/s, respectivamente (Figura C 9).

Con respecto al desempeño del sistema en cuanto a tasa de ventilación se refiere, en promedio se registraron de 5,53 m<sup>3</sup>/h y 32,73 m<sup>3</sup>/h, en la salida y en la chimenea solar, respectivamente; en tanto, la tasa de flujo máximas promedio registradas fueron de 8,06 m<sup>3</sup>/h y 112,65 m<sup>3</sup>/h, así como máximas extremas de 9,61 m<sup>3</sup>/h y 159,70 m<sup>3</sup>/h, respectivamente.

### Noviembre

En el mes de noviembre se registraron velocidades promedio de 0,21 m/s en la salida del IC y de 0,08 m/s en la chimenea solar, con velocidades máximas promedio registradas de 0,37 m/s y 0,47 m/s, así como máximas extremas de 0,69 m/s y 1,01 m/s, respectivamente (Figura C 10).

Con respecto al desempeño del sistema en cuanto a tasa de ventilación se refiere, en promedio se registraron 6,08 m<sup>3</sup>/h y 32,86 m<sup>3</sup>/h, en la salida y en la chimenea solar, respectivamente; en tanto, la tasa de flujo máximas promedio registradas fueron de 8,32 m<sup>3</sup>/h y 109,27 m<sup>3</sup>/h, así como máximas extremas de 10,71 m<sup>3</sup>/h y 153,44 m<sup>3</sup>/h, respectivamente.



Figura C 9

Comportamiento de la velocidad del aire en octubre

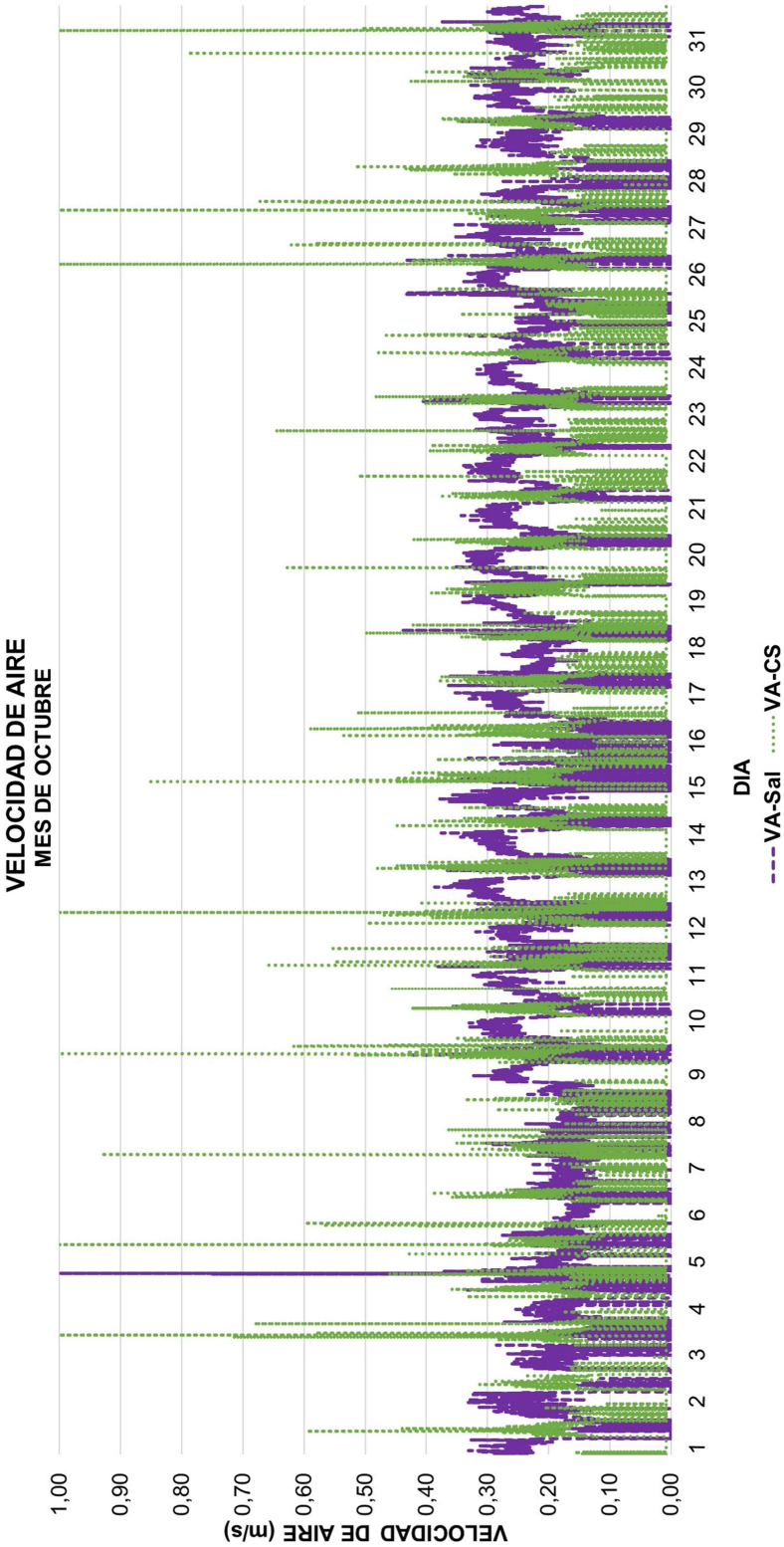
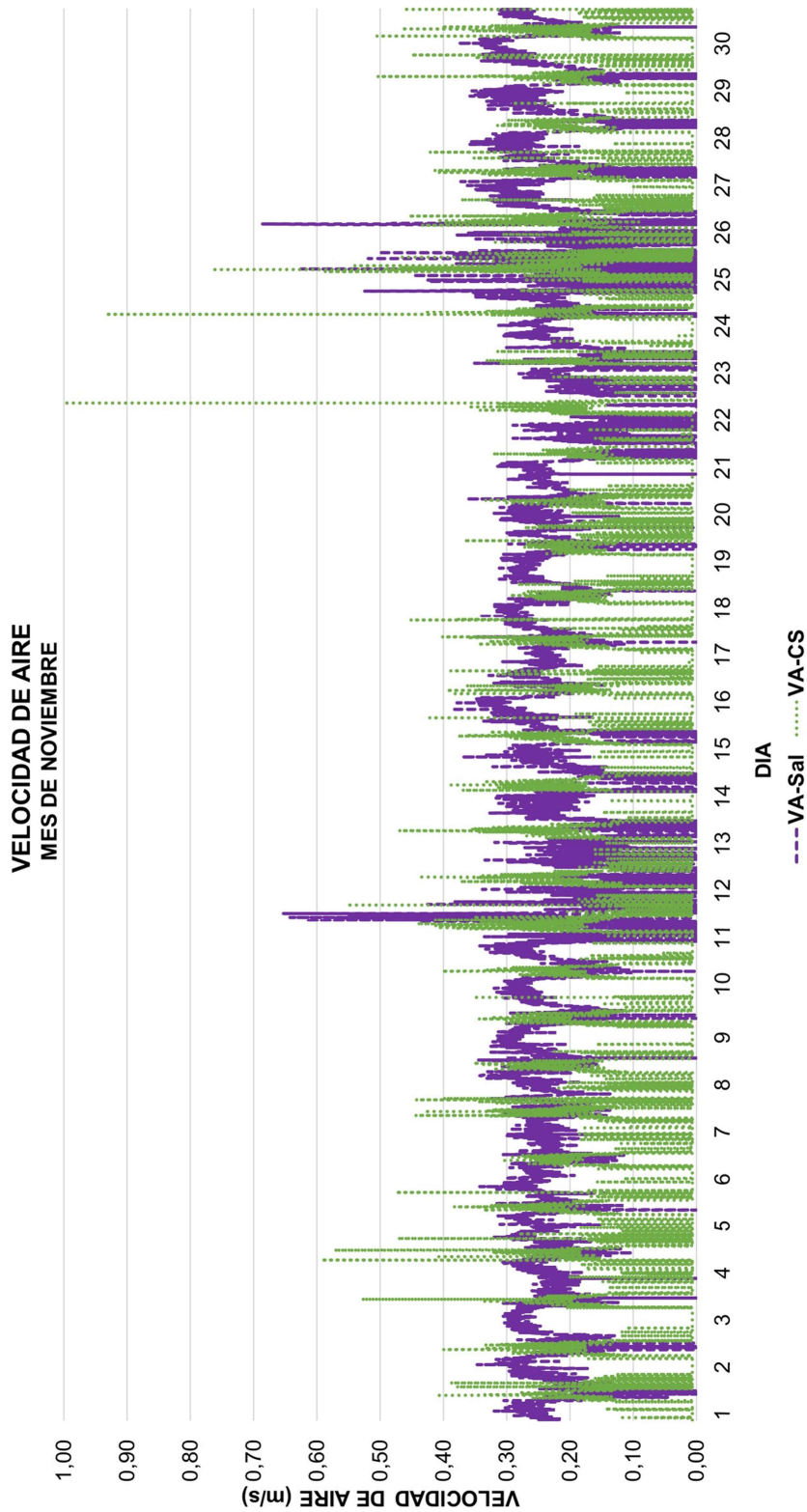




Figura C 10  
Comportamiento de la velocidad del aire en noviembre



## Periodo térmico frío (segunda parte)

### Diciembre

Durante el mes se registraron velocidades promedio de 0,21 m/s en la entrada del IC, de 0,22 m/s en la salida del IC y de 0,06 m/s en la chimenea solar, con velocidades máximas promedio registradas de 0,37 m/s, 0,34 m/s y 0,47 m/s, así como máximas extremas de 0,69 m/s, 0,42 m/s y 1,01 m/s, respectivamente (Figura C 11). Por lo tanto, se puede observar tanto en la entrada como en la salida del IC, las velocidades promedio son casi iguales, sin embargo, la primera de estas es la que presenta mayores velocidades extremas, y en general, de los tres puntos de análisis, la CS es la que presenta las velocidades máximas extremas

Con respecto al desempeño del sistema en cuanto a tasa de ventilación se refiere, en promedio se registraron 6,04 m<sup>3</sup>/h, en la entrada del IC, 6,43 m<sup>3</sup>/h en la salida del IC y 23,87 m<sup>3</sup>/h en la chimenea solar; en tanto, la tasa de flujo máximas promedio registradas fueron de 8,19 m<sup>3</sup>/h, 8,35 m<sup>3</sup>/h y 91,35 m<sup>3</sup>/h, así como máximas extremas de 9,72 m<sup>3</sup>/h, 9,51 m<sup>3</sup>/h y 133,21 m<sup>3</sup>/h, respectivamente. Por lo tanto, es en la salida del IC donde se presenta mayor flujo de aire con respecto a la entrada, tanto en promedio como en máximas promedio, sin embargo, en las máximas extremas se presenta mayor flujo en la entrada del IC. En cualquier caso, es la CS la que presenta el mayor flujo de aire.

### Enero

En este mes se registraron velocidades promedio de 0,19 m/s en la entrada del IC; 0,20 m/s en la salida del IC y de 0,07 m/s en la chimenea solar, con velocidades máximas promedio registradas de 0,41 m/s, 0,38 m/s y 0,49 m/s, así como máximas extremas de 0,99 m/s, 1,00 m/s y 1,01 m/s, respectivamente (Figura C 12). Por lo tanto, el comportamiento de la ventilación tanto en promedio como máximas promedio son similares al mes anterior, sin embargo, en los tres casos las velocidades máximas extremas lograron el valor máximo de registro.

Figura C 11

Comportamiento de la velocidad del aire en diciembre

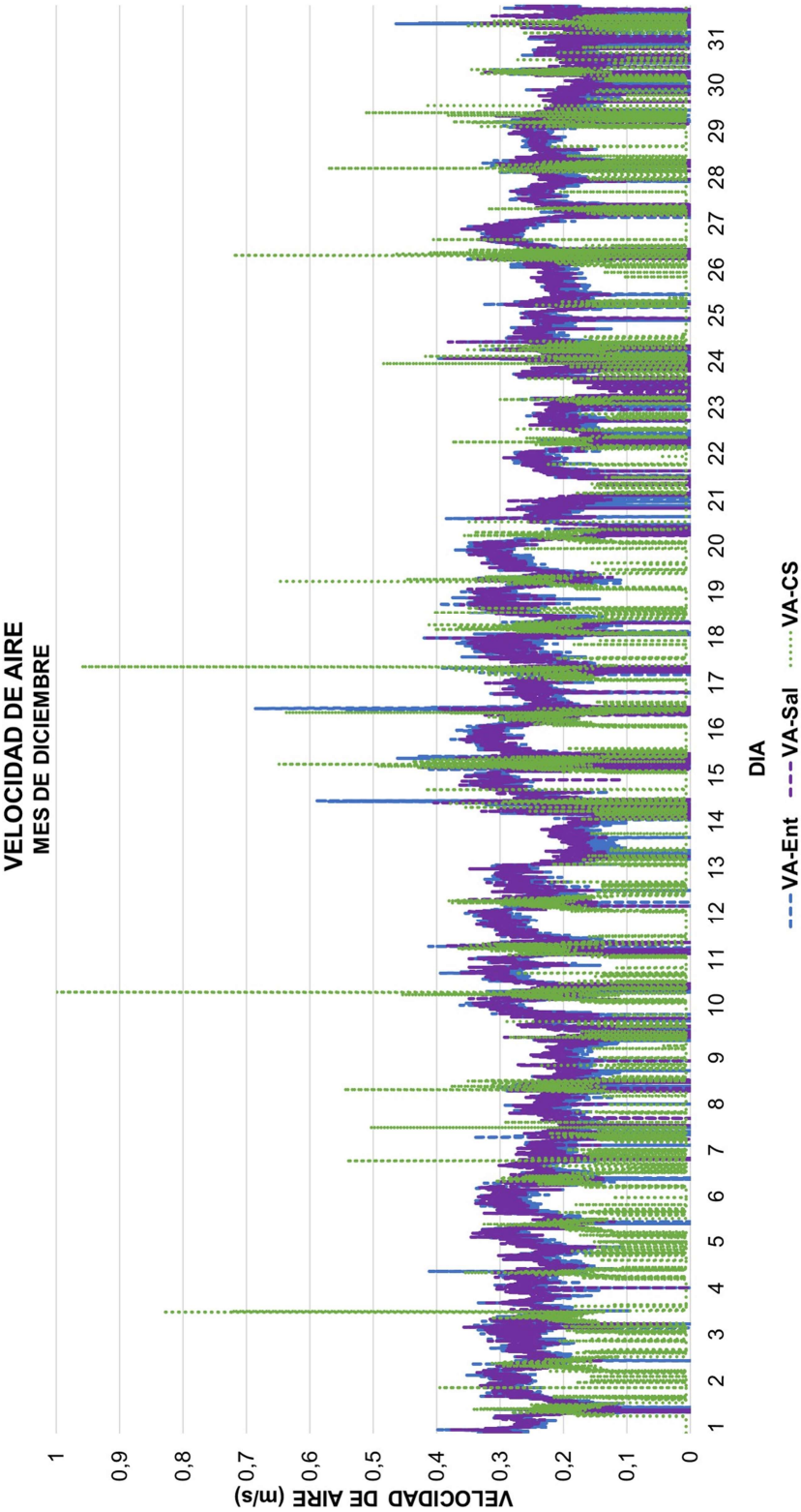
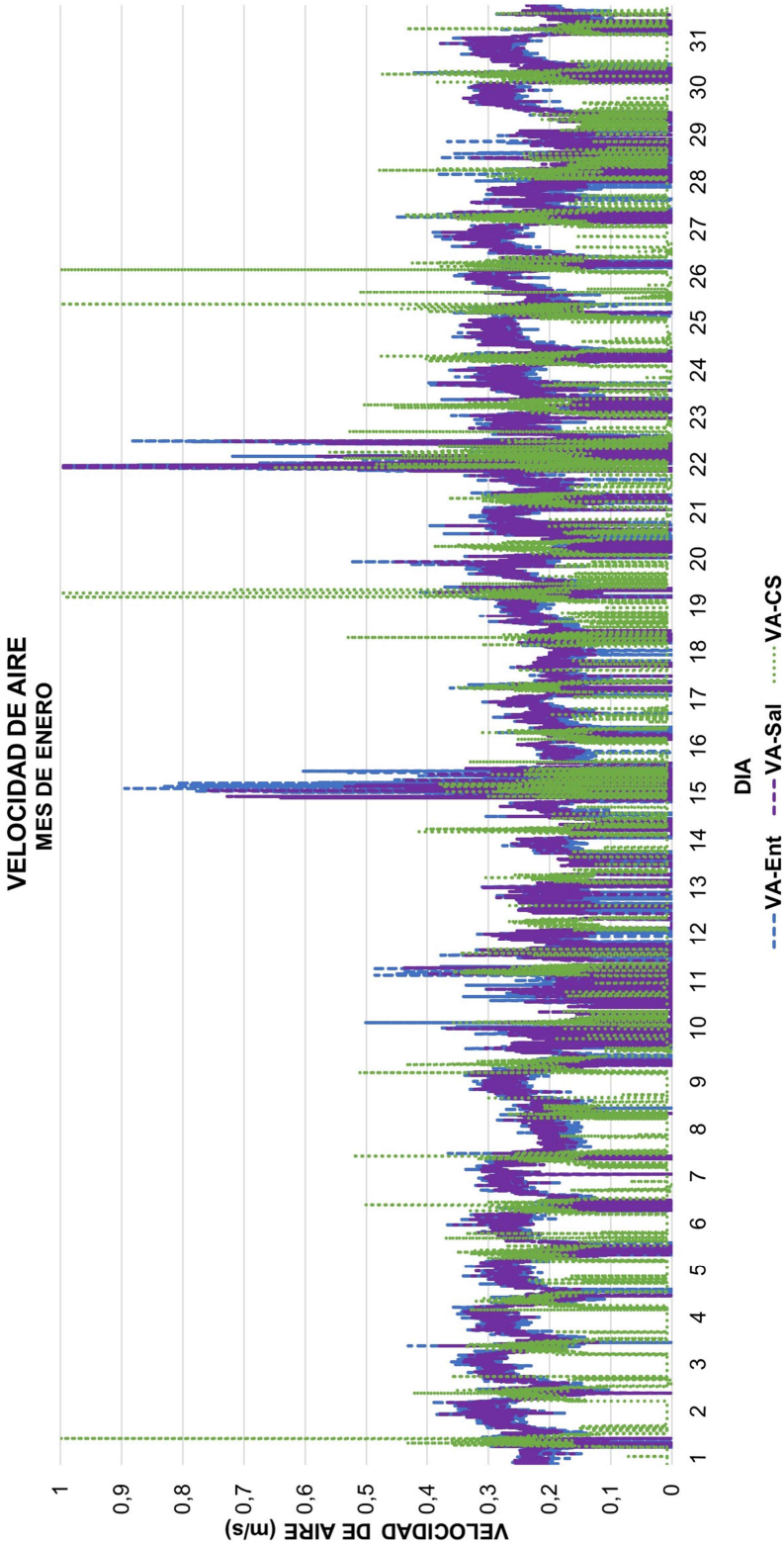


Figura C 12

Comportamiento de la velocidad del aire en enero





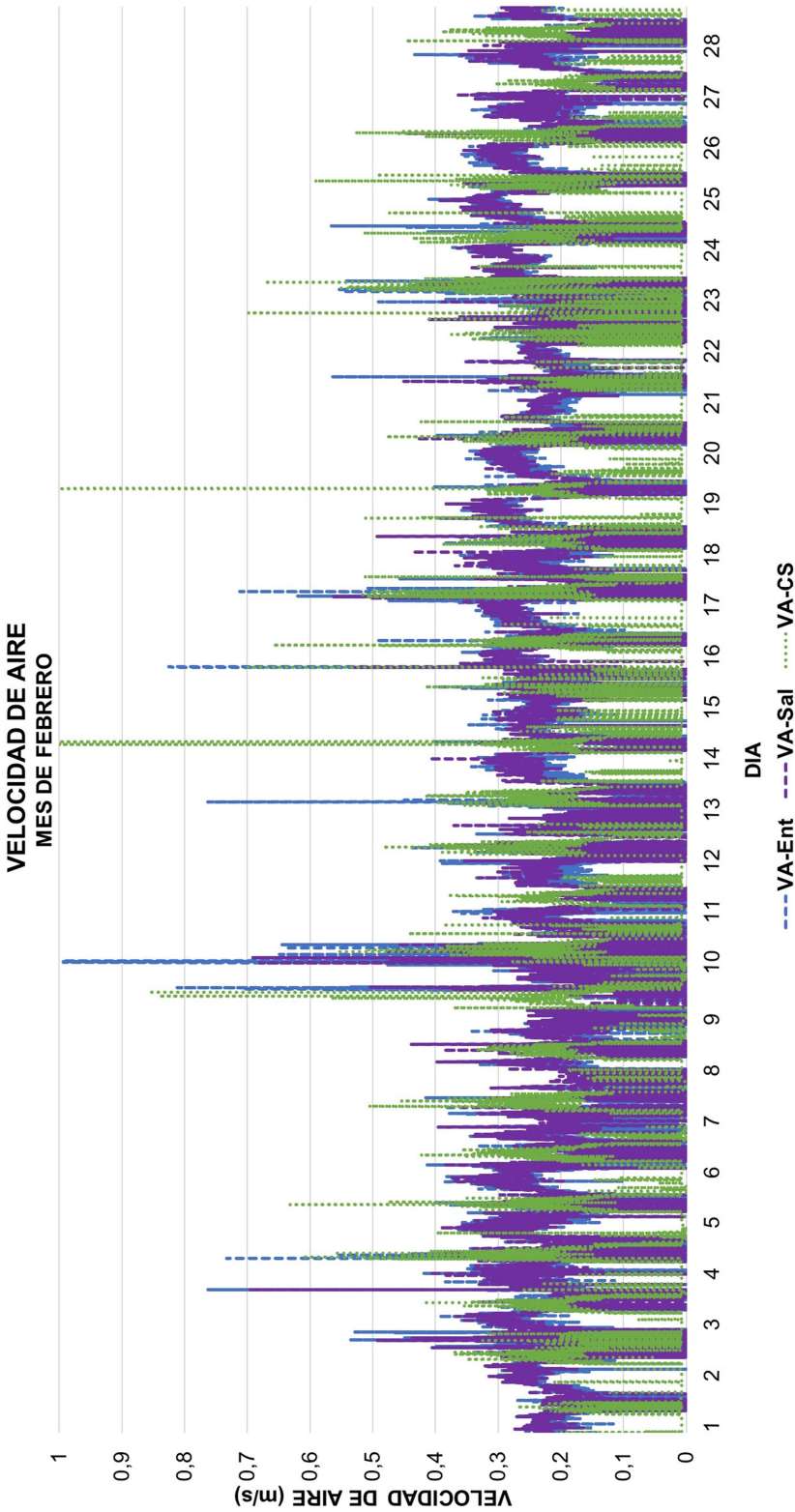
Respecto al desempeño del sistema en cuanto a tasa de ventilación se refiere, en promedio se registraron 5,47 m<sup>3</sup>/h, 5,76 m<sup>3</sup>/h y 29,08 m<sup>3</sup>/h, en la entrada, en la salida y en la chimenea solar, respectivamente; en tanto, la tasa de flujo máximas promedio registradas fueron de 8,37 m<sup>3</sup>/h, 8,28 m<sup>3</sup>/h y 106,48 m<sup>3</sup>/h, así como máximas extremas de 18,45 m<sup>3</sup>/h, 15,42 m<sup>3</sup>/h y 142,21 m<sup>3</sup>/h, respectivamente. Por lo tanto, es en la salida del IC donde se presenta mayor flujo de aire promedio con respecto a la entrada, sin embargo, tanto en las máximas promedio como extremas se presenta mayor flujo en la entrada del IC.

## Febrero

Durante el mes de febrero se registraron velocidades promedio de 0,17 m/s en la entrada del IC, de 0,19 m/s en la salida del IC y de 0,08 m/s en la chimenea solar, con velocidades máximas promedio registradas de 0,51 m/s, 0,43 m/s y 0,53 m/s, respectivamente. A pesar de que en la entrada y salida del IC las velocidades promedio son similares, se presenta mayor diferencia en las máximas promedio; sin embargo, la mayor diferencia se presentó en las velocidades máximas extremas, en las que en la entrada del IC se logran de 0,99 m/s, mientras que en la salida solo se logran máximo 0,70 m/s; la CS continúa con el mayor valor, de 1,01 m/s (Figura C 13).

Con respecto al desempeño del sistema en cuanto a tasa de ventilación se refiere, en promedio se registraron 5,05 m<sup>3</sup>/h, 5,46 m<sup>3</sup>/h y 33,97 m<sup>3</sup>/h, en la entrada y salida del IC, y en la chimenea solar, respectivamente; en tanto, la tasa de flujo máximas promedio registradas fueron de 8,41 m<sup>3</sup>/h, de 8,41 m<sup>3</sup>/h y de 113,10 m<sup>3</sup>/h, así como máximas extremas de 13,14 m<sup>3</sup>/h, 9,98 m<sup>3</sup>/h y 152,52 m<sup>3</sup>/h, respectivamente. Con ello se observa que el flujo promedio, en relación al IC, es mayor en la salida; sin embargo, en máximas promedio el desempeño entre la entrada y salida es igual, y mayor en la entrada, cuando se refiere a máximas extremas.

Comportamiento de la velocidad del aire en febrero





## Marzo

En este mes se registraron velocidades promedio de 0,18 m/s en la entrada del IC, de 0,20 m/s en la salida del IC y de 0,07 m/s en la chimenea solar, con velocidades máximas promedio registradas de 0,45 m/s, 0,37 m/s y 0,55 m/s, así como máximas extremas de 0,92 m/s, 0,56 m/s y 1,01 m/s, respectivamente (Figura C 14).

Con respecto al desempeño del sistema en cuanto a tasa de ventilación se refiere, en promedio se registraron 5,35 m<sup>3</sup>/h, 5,73 m<sup>3</sup>/h y 31,57 m<sup>3</sup>/h, en la entrada y salida del IC, y en la chimenea solar, respectivamente; en tanto, la tasa de flujo máximas promedio registradas fueron de 7,94 m<sup>3</sup>/h, 8,17 m<sup>3</sup>/h y 111,75 m<sup>3</sup>/h, así como máximas extremas de 9,51 m<sup>3</sup>/h, 9,48 m<sup>3</sup>/h y 129,07 m<sup>3</sup>/h, respectivamente.

Figura C 14

Comportamiento de la velocidad del aire en marzo

