



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA
FACULTAD DE ARQUITECTURA

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: Trópico cálido húmedo

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
DOCTORA EN ARQUITECTURA

PRESENTA
CLAUDIA JULIANA GÓMEZ MEJÍA

Director de tesis

Dr. José Diego Morales Ramírez
Facultad de Arquitectura

Miembros del comité tutor

Dr. José Luis Fernández Zayas-Instituto De Ingeniería UNAM
Dr. Víctor Armando Fuentes Freixanet-División de Ciencias y Artes Para El Diseño Departamento Del
Medio Ambiente UAM – Azcapotzalco
Dr. Alberto Muciño Vélez-Facultad De Arquitectura
Dr. Hermilo Salas Espíndola- Facultad De Arquitectura

Ciudad Universitaria, Cd. Mx. Noviembre 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

“Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, considerado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí contenidas, manifiesto que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Las citas de otras obras y las referencias generales a otros autores, se consignan con el crédito correspondiente”

JURADOS

Director de tesis

Dr. José Diego Morales Ramírez

Facultad de Arquitectura

Miembros del comité tutor

Dr. José Luis Fernández Zayas

Instituto De Ingeniería UNAM

Dr. Víctor Armando Fuentes Freixanet

División de Ciencias y Artes Para El Diseño Departamento Del Medio Ambiente

UAM – Azcapotzalco

Dr. Alberto Muciño Vélez

Facultad De Arquitectura

Dr. Hermilo Salas Espíndola

Facultad De Arquitectura



Programa de Maestría y Doctorado
en Arquitectura

Agradecimientos

Agradezco a México porque es un gran país lleno de oportunidades, además de convertirse en mi casa doy gracias a su gente llena de alegría, optimismo, compromiso y humanidad con los que venimos de fuera. ¡En México soy muy feliz!

A la UNAM y al Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura por brindarme la oportunidad de ser parte de sus estudiantes y tener la oportunidad de investigar sobre el tema que tanto me apasiona. Ustedes me abrieron sus puertas y cambiaron mi mundo...lo mejoraron a través de la educación y espero que eso repercuta en una mejor sociedad.

Al Dr. José Diego Morales Ramírez por ser el director de este proyecto además de su paciencia, experiencia y conocimientos.

Al Dr. José Luis Fernández Zayas por brindarme su tiempo, disposición, impulso, aportes y experiencias que enriquecieron este trabajo y mi formación como arquitecta.

Al Dr. Víctor Armando Fuentes Freixanet por compartir sus conocimientos, experiencias, disposición, tiempo, entrega y orientación.

Al Dr. Alberto Muciño Vélez y al Dr. Hermilo Salas Espíndola por sus importantes y oportunos aportes a este trabajo.

Cada uno de ustedes me ha influenciado de manera positiva como ser humano y profesional, les agradezco muy profundamente la oportunidad que compartieran su saber conmigo durante estos años.

A CONACyT por su sistema de becas que me permitió capacitarme a un alto nivel, aportando al país conocimiento a través de este proyecto.

Al Parque de Innovación Tecnológica de la Universidad Autónoma de Sinaloa dirigido por el Mtro. José Ramón López Arellano, gracias a su disposición, atención y apoyo de cada uno de los miembros que laboran en el Parque fue posible construir mi prueba experimental en su azotea y de esta manera recabar datos importantes que ayudan al entendimiento de la interacción de las edificaciones en un entorno con temperaturas y humedades muy altas como es el que se presenta en la ciudad de Culiacán-Sinaloa.

Así mismo quiero extender un agradecimiento muy especial al Dr. Bladimir Salomón Montijo, e Ing. Rogelio Sánchez Bañuelos responsables de la obtención y procesamiento de los datos de la Estación Climatológica de la Escuela de Biología de la Universidad Autónoma de Sinaloa, estos datos recabados durante todo 2015 y 2018 fueron un eje fundamental en el estudio comparativo del experimento del proyecto.

A Sinaloa y su clima porque presenta retos para la construcción con implementación de estrategias de ahorro energético, que se deben entender, y conocer. Allí fue posible poner en práctica los conocimientos teóricos que obtuve por varios años, estuve en el mejor laboratorio al aire libre donde a pesar de las dificultades tuve la oportunidad de interactuar con los fenómenos ambientales y entender el sistema experimental que propongo como una unidad.

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo.



A ese Ser supremo que siempre me acompaña.

*A mi madre Edilma y mi hermana Andrea gracias por estar siempre para mí, son ustedes parte fundamental de mi existencia, todo lo que hemos vivido ha valido la pena.
Las amo infinitamente.*

A mi Padre Miguel Gómez Osorio por hacerme ver el mundo diferente, gracias por la educación, me enseñaste que los retos es lo más apasionante que existe porque nos hacen sentir vivos.

Ildefonso gracias por creer en mí a pesar de las dificultades, por el apoyo incondicional, por la paciencia y la espera, por los consejos e impulsarme siempre a ser una gran profesional.

A mi Abuelita, Tíos, Tías, Primas y Primos gracias por el apoyo que me han brindado desde niña, este logro es también gracias a ustedes. Los amo mucho.

A mi familia en México, Felipe León Favela y Librada Monzón los quiero y los admiro mucho, gracias por ser tan fraternos conmigo.

Al Dr. Eligio López Portillo, su esposa Yolanda Campos e hijos: Ilse, Omar y Annel, ustedes me abrieron las puertas de su casa y me han hecho sentir parte de su familia, gracias por sus consejos, apoyo y cariño. Tienen un lugar muy especial en mi corazón y en el de mi familia.

A mis amigos y amigas que siempre me apoyan y tienen una palabra oportuna en los buenos y malos momentos

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo.



Contenido

	Página
Introducción	I
Planteamiento del problema	V
Hipótesis	VI
Objetivos	VI
Aportaciones	VII
1. Antecedentes	1
1.1 Desecantes como solución al problema de confort en el clima cálido húmedo	3
1.2 Ciclo de los desecantes	5
1.3 Sistemas pasivos de deshumidificación	6
1.4 Sistemas activos de deshumidificación	22
1.5 Tecnologías para la refrigeración solar	28
1.6 Zeolitas como solución a la problemática del confort en el clima cálido húmedo.	31
1.7 Arquitectura y zeolita	35
2. Objeto de estudio	38
2.1 Propuesta diseño experimental	39
2.1.1 Cálculo temperatura sol-aire para un modelo teórico, construido en block hueco de concreto. Caso: Culiacán – Sinaloa.	39
2.1.2 Análisis carta psicrométrica	44
2.1.3 Aproximación al modelo experimental	49
2.1.4 Dimensionamiento del contenedor del desecante: “ <i>invernadero</i> ”	56
2.1.4.1 Balance térmico invernadero: enero.	59
2.1.4.2 Balance térmico invernadero: febrero.	60
2.1.4.3 Balance térmico invernadero: marzo.	61

2.1.4.4 Balance térmico invernadero: abril.	63
2.1.4.5 Balance térmico invernadero: mayo.	64
2.1.4.6 Balance térmico invernadero: junio.	64
2.1.4.7 Balance térmico invernadero: julio.	65
2.1.4.8 Balance térmico invernadero: agosto.	65
2.1.4.9 Balance térmico invernadero: septiembre.	66
2.1.4.10 Balance térmico invernadero: octubre.	66
2.1.4.11 Balance térmico invernadero: noviembre.	67
2.1.4.12 Balance térmico invernadero: diciembre.	67
2.1.3 Obtención de la cantidad de zeolita para el objeto experimental	68
2.2 Localización caso de estudio	74
2.3 Análisis solar	76
2.4 Proceso de construcción módulo de experimentación.	78
2.5 Proceso de construcción módulo "invernadero"	81
2.6 Extractor de aire	82
3. Procedimiento Experimental	88
3.1 Proceso experimental	89
3.2 Prueba preliminar experimento I	93
3.3 Análisis de datos preliminares:temperatura y humedad relativa	94
3.4 Análisis de humedades absolutas y diagrama psicrométrico	107
3.5 Observaciones experimento Prueba I	120
4. Análisis Discusión de Resultados	122
4.1 Análisis resultados humedad relativa proceso experimental Prueba II	123
4.2 Análisis resultados humedad relativa proceso experimental Prueba III	126
4.3 Análisis resultados humedad relativa proceso experimental Prueba IV	129
4.4 Análisis resultados humedad relativa proceso experimental Prueba V	132
4.5 Análisis resultados humedad relativa proceso experimental Prueba VI	135
4.6 Análisis resultados humedad relativa proceso experimental Prueba VII	138

4.7	Análisis resultados humedad relativa proceso experimental Prueba VIII	141
4.8	Análisis resultados humedad relativa proceso experimental Prueba IX	144
4.9	Análisis resultados temperatura proceso experimental Prueba II	148
4.10	Análisis resultados temperatura proceso experimental Prueba III	151
4.11	Análisis resultados temperatura proceso experimental Prueba IV	155
4.12	Análisis resultados temperatura proceso experimental Prueba V	159
4.13	Análisis resultados temperatura proceso experimental Prueba VI	163
4.14	Análisis resultados temperatura proceso experimental Prueba VII	166
4.15	Análisis resultados temperatura proceso experimental Prueba VIII	170
4.16	Análisis resultados temperatura proceso experimental Prueba IX	174
4.17	Análisis humedad absoluta y diagrama psicrométrico proceso experimental Prueba II	179
4.18	Análisis humedad absoluta y diagrama psicrométrico proceso experimental Prueba III	184
4.19	Análisis humedad absoluta y diagrama psicrométrico proceso experimental Prueba IV	189
4.20	Análisis humedad absoluta y diagrama psicrométrico proceso experimental Prueba V	194
4.21	Análisis humedad absoluta y diagrama psicrométrico proceso experimental Prueba VI	199
4.22	Análisis humedad absoluta y diagrama psicrométrico proceso experimental Prueba VII	204
4.23	Análisis humedad absoluta y diagrama psicrométrico proceso experimental Prueba VIII	209
4.24	Análisis humedad absoluta y diagrama psicrométrico proceso experimental Prueba IX	214
5. Conclusiones		219
6. Bibliografía		241

Introducción

Para contextualizar y entender el problema de investigación que se plantea, Sánchez (2012) entrevista al Dr. En Arq. Carlos González Lobo y le hace la pregunta sobre “¿Qué es la vivienda social?:

“Es un horror. Yo creo que la vivienda no existe. Las empresas del mercado las producen en serie, pero lo que hacen son cajas. El tema de la vivienda es cómo albergar la actividad humana, cómo inscribirla en una configuración. La vivienda es el albergue espacial de los hechos humanos habitables de cualquier tipo de familia”

En este sentido el tema del confort climático y habitabilidad de viviendas y espacios arquitectónicos también está un poco relegado, ya que se observa que por parte del gremio de la construcción hay una negación de las particularidades climáticas de un lugar. Estas malas prácticas arquitectónicas llevan al usuario a responder desde su saber cómo debe enfriar o calentar su vivienda, y la respuesta a esto es el uso excesivo de aparatos climáticos de refrigeración, ya sea aires acondicionados o ventiladores.

Para ampliar el panorama del problema nos situaremos en el trópico Cálido Húmedo, ciudades con altas temperaturas, altas humedades y reducida velocidad de viento. Salazar (2001) menciona que el alto contenido de vapor en la atmósfera de éstos lugares restringe la evaporación del sudor generando esa sensación molesta de “bochorno” por lo que son ciudades que presentan altos índices de consumo energético, en México por ejemplo éstos índices los ocupan las ciudades del norte, según la Norma 008 ENER 2001, a nivel nacional el consumo energético de los edificios es del 45%, un número muy alto con repercusiones importantes ya que el 70% de la energía eléctrica que se produce en México proviene de la quema de combustibles fósiles que es la que origina el calentamiento global señala SENER (2011). El gobierno Mexicano ha presentado iniciativas en implementar normas que contribuyan al buen desempeño ambiental NOM-008-ENER 2001 y NOM 020-ENER 2011, sin embargo en el artículo “Hacia edificaciones más sustentables” de Guadalupe Huelsz y José Antonio Sierra Huelsz (2013) señalan que éstas medidas quedan cortas en materia de implementación y diseño.

Por lo que una motivación muy importante para realizar este estudio es la que indica Salazar (2001) donde señala que: “*las condiciones de calor y humedad en la arquitectura del trópico, no han sido objeto de suficiente estudio, por parte del gremio de la construcción. Las normativas desarrolladas en otros lugares del planeta no tienen aplicación en éste clima que es tan particular*”

Hay varios estudios teóricos encaminados a resolver el problema del confort interior en éste tipo de climas, pero trabajos experimentales son pocos. Artículos relacionados con el tema indican que la “*humedad*” es uno de los factores ambientales que más influye en la comodidad térmica del ser humano.

Si revisamos la parte del gasto energético, la Norma 020 ENER 2011 indica que en México el acondicionamiento de aire en las edificaciones, repercute en gran medida en la demanda pico del sistema eléctrico siendo su mayor impacto en el Norte del país y en las costas, ésta demanda

está determinada por el uso de aires acondicionados: cada tonelada de refrigeración puede llevar a que se tengan que realizar grandes inversiones en infraestructura eléctrica.

Éste gasto de consumo energético se relaciona con la falta de confort en el interior de las edificaciones que a su vez se relacionan con las variables de humedad relativa y ventilación natural, para el caso del trópico. El desarrollo desde la academia de *Sistemas Especializados* en soluciones de climatización pasiva, que tengan en cuenta: la carga interna del edificio, las propiedades de los materiales de techos, muros, y la infiltración de aire permiten optimizar el uso de la ventilación mecánica.

El proyecto que se propone: “*Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo*”, tiene como objetivo, desarrollar un sistema para mejorar el confort higrotérmico interior, aplicando los ciclos termodinámicos, utilizando dosis controladas de zeolita, teniendo en cuenta las condiciones ambientales en módulos experimentales fabricados en block de concreto, ubicados en un lugar de clima cálido húmedo, que en este caso es Culiacán- Sinaloa.

Como desecante se utilizó la zeolita natural, por ser un material con alta capacidad de absorción. El fabricante señala que absorbe el 42% de su peso en agua, son relativamente inocuas, no presentan problemas ambientales particulares, su costo es bajo y es un material fácil de adquirir en la República Mexicana con yacimientos en Sonora y Puebla. Expertos como Sánchez (2002) presentan como idóneo éste material para trabajos de deshumidificación, debido a sus grandes canales y poros, se regenera a altas temperatura y tiene una larga vida útil. No se toman en cuenta materiales como sílica gel por ejemplo, por ser un material que se satura en un tiempo muy corto. Materiales como la alúmina, carbón activado o cloruro de litio pueden ser perjudiciales para la salud, señala el mismo autor.

Los módulos experimentales se fabricaron en block de concreto ya que es el material de construcción más utilizado en el trópico cálido húmedo mexicano afirma López (2010), esto se presenta por su precio accesible y fácil transportación. El censo realizado en el 2010 por el INEGI no es preciso en cuantificar el número de hogares que utilizan este material; por otra parte Sánchez (2012) menciona en su investigación “*la vivienda social en México*” que el 28% del territorio nacional se encuentra bajo las condiciones de clima cálido húmedo, al ampliar la escala se obtiene que alrededor de 35 países tienen este tipo de clima ya que se encuentran ubicados en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).

La revisión bibliográfica abarcó aspectos primarios que estudian las relaciones entre la arquitectura y el clima, así como también los distintos tipos de sistemas de enfriamiento y de deshumidificación pasivos. Por otra parte basados en ASHRAE se hace una revisión de los diferentes tipos de desecantes que se encuentran en el mercado y además de su desempeño en el ciclo termodinámico. Se hace una descripción de las propiedades adsorbentes de la zeolita, así como del uso que se le ha dado a este mineral.

En el capítulo 2 se aborda el planteamiento del problema y el estudio del contexto medioambiental donde se desarrolló el proceso experimental. Se realizó el estudio mensual de las variables climáticas en la ciudad de Culiacán- Sinaloa de temperatura, humedad relativa, ventilación, radiación solar, entre otras. Las variables de temperatura y humedad relativa anuales se graficaron en diagramas psicrométricos que ayudaron a identificar los meses de mayor y menor confort en la ciudad. Con esta información se inició el diseño del sistema

experimental, su geometría, orientación, cantidad de material, cantidad de zeolita utilizada, y aberturas.

Los materiales desecantes se activan cuando se exponen a altas temperatura y la zeolita no es la excepción, esta se activa a partir de los 45°C. De acuerdo a esto se pensó en aprovechar la alta radiación solar anual que se presenta en la capital Sinaloense y construir un contenedor que además de albergar la zeolita, permita activar sus propiedades desecantes. Se realizaron cálculos numéricos que arrojaron que este contenedor podría alcanzar temperaturas cercanas a los 94°C. Entonces el principio de este sistema es tomar el aire del contenedor de la zeolita que ha sido deshumidificado por el efecto del calentamiento solar y transportarlo al módulo experimental construido de block de concreto por ductos de aluminio.

El sistema experimental fue materializado en la azotea del Parque de Innovación Tecnológica (PIT), de la Universidad Autónoma de Sinaloa, en la ciudad de Culiacán, allí se construyeron dos módulos de 1.80m de largo, por 1.80m de ancho y 2.0m de alto cada uno, en uno de los cuales se instaló un sistema de deshumidificación que utilizó zeolita como desecante sólido, éste módulo se denominó "módulo experimental", el módulo testigo se denominó "módulo de control". El montaje experimental finalizó en mayo de 2018, en ese mismo mes se inició con el monitoreo de datos cada 24 horas por 5 minutos de variables como temperatura y humedad relativa tanto interior como exterior del estudio. La toma de datos se realizó desde mayo de 2018 hasta enero de 2019, se analizaron alrededor de 750.000 datos en los cuales se observó que el desempeño de la humedad relativa en el módulo experimental fue menor que la humedad relativa registrada en el módulo de control.

La hipótesis de esta tesis plantea que *"aprovechar las propiedades de absorción de humedad de la zeolita permiten aplicarla a un sistema de deshumidificación de espacios arquitectónicos en climas cálidos húmedos y por lo tanto ayudan a mejorar el ambiente higrotérmico interior"* Este planteamiento Si se cumple para las 8 pruebas que se realizaron, ya que las temperaturas que se registraron en el interior del invernadero que contiene la zeolita fueron mayores de 60 °C y en los meses más calurosos llegaron alrededor de los 90 °C.

Se realizó una relación de los promedios de temperatura y humedad relativa de los días con mayor humedad para cada una de las pruebas, estos resultados se graficaron en el diagrama psicrométrico donde se observó que los puntos del sistema en el sistema de deshumidificación se desplazan según lo establecido para el ciclo de los desecantes descrito en ASHRAE Fundamentals: el desecante se activa con la radiación solar y el calor generado dentro del invernadero durante la mañana y parte de la tarde, es a partir de las 16:00 h cuando se activan las propiedades desecantes de la zeolita, estas se mantienen hasta el día siguiente cuando el aire saturado se vuelve a regenerar con el calor. Este aire deshumidificado viaja a través de tubos de aluminio y llega al módulo experimental. Los valores de humedad allí comparados con el exterior son menores desde las 18:00 h hasta las 07:30 h del día siguiente. Es importante recalcar que la activación de la zeolita se realizó a través de medios naturales y no hay intervención de sistemas mecánicos.

Con respecto al análisis de temperatura, se observó que el desempeño en el módulo experimental no fue el esperado, esto se debe a que la temperatura del aire que sale de invernadero no alcanza a disminuir por los ductos de aluminio, además que el block de concreto presenta valores de alta conductividad térmica. Las propiedades térmicas del block de

concreto, son dadas por la Norma Oficial Mexicana Nom-020-Ener-2011, Eficiencia Energética En Edificaciones. Envoltiente De Edificios Para Uso Habitacional allí indica que los valores de conductividad de éste material es de 0.12 W/mK, también se señala su densidad 450kg/m³.

En este sentido y para entender un poco del comportamiento térmico del block de concreto Marincic et al (2012) realizaron un estudio que tiene que ver con el *“Análisis de las temperaturas superficiales en una envoltiente mediante imágenes termográficas”* de una vivienda de interés social, fabricada en block de concreto ubicada en la ciudad de Hermosillo-Sonora. Los investigadores analizaron una sección de 0.75m de alto por 1.0 Mt. de ancho de la fachada sur, para ésta sección del muro se tomaron imágenes interiores y exteriores desde las 12:00 Horas hasta las 18:00 Horas. Los estudios mostraron que la superficie exterior del muro presenta una temperatura más elevada que en el interior, al finalizar la tarde la temperatura al interior de la envoltiente se eleva mientras que la temperatura exterior era menor. Este estudio permitió observar que las mayores temperaturas se presentaban en el hueco de los blocks. Los autores suponían que el aire que está dentro del block de concreto podía funcionar como aislante y la parte sólida como puente térmico, pero esto no sucede. Se observa claramente que los flujos de calor que atraviesa la envoltiente son complejos y *“no se pueden ver como flujos unidireccionales”*. Los autores indican que las variables de la transferencia de calor por radiación son instantáneas y dependen del tiempo y otra variable que entra en juego es la transferencia de calor por convección que se da en el hueco del block de concreto. Este fenómeno se piensa que también afectó el desempeño de la temperatura al interior de los módulos del estudio.

Por otra parte se afirma que la tecnología del invernadero funciona correctamente, ya que si este mismo sistema se conecta a módulos que tengan un aislamiento correcto, o incluso estén fabricados con otro material puede presentarse una mejora en el confort higrotérmico al interior de un espacio arquitectónico, de una forma natural. Así que esta tesis generó un diagnóstico que puede tener en el futuro muchas validaciones. La importancia de este trabajo radica en que se creó una metodología de análisis que a partir de los valores de temperatura y humedad relativa anuales de la ciudad de Culiacán-Sinaloa permitieron diseñar un sistema de deshumidificación experimental que responde al contexto de su implantación.

Otra de las aportaciones de este trabajo radica en que al plantear un proyecto experimental en una temática donde hay una gran documentación teórica y poco trabajo de campo, éste cobra importancia en la parte de generación de conocimiento, ya que se vive el fenómeno; además de que el monitoreo de datos, y las experiencias en el sistema propuesto quedan registradas para futuros estudios.

Planteamiento del problema

Según Salazar (2001), las zonas con el tipo de clima cálido-húmedo tienen temperaturas máximas promedios anuales de 32.8 °C, con humedades relativas medias anuales de 81 %, las cuales están fuera del rango de confort térmico que determina ASHRAE (2009). De acuerdo con esta asociación, la temperatura debe estar en 25 °C y la humedad relativa en 50 %, por lo que los habitantes de las zonas analizadas experimentan malestar térmico si no poseen un aparato mecánico de climatización. En este sentido, es importante mencionar a Steadman (1979), citado por Gómez (2013), e indicar que en el verano la humedad es el elemento ambiental que aumenta la sensación de bochorno.

Las características del clima en estas ciudades son: alta nubosidad, no existen diferencias apreciables entre las temperaturas del día y la noche, gran cantidad de radiación difusa debido a la alta nubosidad, precipitaciones elevadas y vientos generalmente tenues, variables en su velocidad y aleatorios en su dirección.

Existen en el mercado varios tipos de desecantes que pueden ayudar a resolver el problema de la humedad en espacios arquitectónicos, sin embargo, ASHRAE (2009) sostiene que durante el proceso en el que el aire entra en contacto con el desecante se incrementa la temperatura, por lo que el uso de estos debe estar sujeto a ciclos de enfriamiento para generar condiciones de confort.

Si el desecante utilizado para el proceso de deshumidificación no se regenera, se satura, pierde las propiedades absorbentes y deja de retener humedad.

Los antecedentes planteados a lo largo de este escrito me llevan a la siguiente pregunta:

¿Cuál es la colocación óptima de la zeolita en el sistema de deshumidificación para cerrar el ciclo termodinámico, regenerar el desecante, mantener la humedad relativa y la temperatura cercana a la zona de confort en la arquitectura del trópico cálido húmedo?

De esta pregunta problema se generan algunos interrogantes secundarios

- ¿La cantidad de zeolita utilizada para este sistema está relacionada directamente con los metros cúbicos de aire que se quieren tratar?
- La humedad se acumula donde hay poco viento ¿Cuáles son las formas pasivas de enfriar el aire?

Observaciones sobre el problema

¿Cuál es el proceso termodinámico que se debe llevar a cabo para que la regeneración de la zeolita complete un proceso de deshumidificación que incluya la refrigeración del aire para que esté cerca en la zona de confort en un espacio?

En los climas cálidos-húmedos un factor determinante es la poca ventilación ¿Cuáles son los sistemas pasivos que mejoran su captación? ¿Es suficiente un sistema pasivo?

¿Cuál es la cantidad de zeolita necesaria para deshumidificar un espacio?

Hipótesis

La hipótesis plantea que:

Aprovechar las propiedades de absorción de humedad de la zeolita permiten aplicarla a un sistema de deshumidificación de espacios arquitectónicos en climas cálidos húmedos y por lo tanto ayudan a mejorar el ambiente higrotérmico interior

Objetivos

Objetivo Principal

Desarrollar un sistema de deshumidificación utilizando dosis controladas de zeolita para controlar las condiciones de humedad (hígricas) en los espacios interiores en un clima cálido húmedo.

Objetivos Específicos

- Encontrar el punto de saturación de la zeolita y definir el ciclo de regeneración del desecante.
- Definir la cantidad y distribución de la zeolita en función de las condiciones ambientales y volumen de aire a tratar, y con ello, dimensionar el sistema propuesto.
- Evaluar el sistema de deshumidificación propuesto a través de un módulo experimental y comparándolo con un módulo testigo.
- Analizar los datos obtenidos de temperaturas y humedades interiores y exteriores de manera comparativa entre el módulo experimental y el de control.
- Analizar los datos de temperatura y humedad, y su comportamiento psicrométrico a partir de las zonas de confort.
- Evaluar el comportamiento y eficiencia del sistema de deshumidificación propuesto a partir del análisis estadístico de los datos recabados.

Aportaciones

Al revisar la parte del gasto energético, la Norma 020 ENER 2011 indica que en México el acondicionamiento de aire en las edificaciones, repercute en gran medida en la demanda pico del sistema eléctrico siendo su mayor impacto en el Norte del país y en las costas, ésta demanda está determinada por el uso de aires acondicionados: cada tonelada de refrigeración puede llevar a que se tengan que realizar grandes inversiones en infraestructura eléctrica.

Éste gasto de consumo energético se relaciona con la falta de confort en el interior de las edificaciones que a su vez se relacionan con las variables de alta radiación solar, humedad relativa y ventilación natural, para el caso del trópico. El desarrollo desde la academia de Sistemas Especializados en soluciones de climatización natural, que tengan en cuenta: la carga interna del edificio, las propiedades de los materiales de techos, muros, la infiltración de aire y el aprovechamiento de las variables climáticas del lugar permiten optimizar el uso de la ventilación mecánica.

El aporte social de esta investigación experimental es de gran impacto ya que la metodología y el diseño desarrollados permiten tomar el modelo de investigación y multiplicarlo en otros lugares además de integrarlos con otros materiales; de acuerdo a esto el beneficio a nivel social es importante ya que la franja de la zona de convergencia intertropical está compuesta por alrededor de 35 países además de que el 28% del territorio mexicano presenta este tipo de clima cálido húmedo.

Por otro lado, al plantear un proyecto experimental en una temática donde hay una gran documentación teórica pero poco trabajo de campo, el proyecto cobra importancia en la parte de generación de conocimiento, porque se crea una metodología que generó un diagnóstico y a que a futuro puede tener muchas validaciones. Fue una oportunidad grandiosa desde la academia hacer aportes en este sentido, así como ser parte de la divulgación a través de una ponencia en el evento PLEA en la ciudad de Los Ángeles en el año 2016.

La originalidad de éste estudio permite generar líneas de investigación en que estudiantes se interesen en el aprendizaje y desarrollo de tecnología en arquitectura dirigidas a soluciones de problemas de esta índole para México y América Latina.

Los planteamientos técnicos, transdisciplinarios y experimentales son necesarios en el Programa de Maestría y Doctorado de la UNAM, porque en el camino de la búsqueda del conocimiento científico en la arquitectura permiten al programa conectarse con centros de investigación, aprovechar los recursos que proporciona el estado para mejorar la infraestructura en los laboratorios y desarrollar proyectos interinstitucionales que tengan un impacto tanto social como académico y que en un futuro el posgrado pueda intervenir y proponer en la parte de legislación en lo que tiene que ver con eficiencia energética en edificaciones.

1. Antecedentes

1. Antecedentes

“Cada material, da igual si es natural o artificial, tiene cualidades propias que se deben conocer para poder trabajar con ellos. Los nuevos materiales y las nuevas construcciones no aseguran por sí mismas el saber hacerlo mejor. Lo decisivo es su empleo correcto. Cada pieza vale solo por lo que se sabe hacer con ella”.

Ludwig Mies Van der Rohe (*Discurso inaugural como director de la sección de arquitectura del Armour Institute of Technology 1938*).

Para abordar el objeto de estudio se tienen en cuenta referentes que intervienen de una u otra manera en la investigación que se plantea. Para iniciar es importante entender la relación entre la humedad relativa del ambiente y los materiales de construcción de una envolvente arquitectónica. Olgyay (1998) explica cómo un material poroso absorbe la humedad: *“Las sucesivas capas de la fachada se ‘saturan’ de calor hasta que finalmente el efecto es perceptible en la superficie interior”*. Los materiales absorben humedad, según sus cualidades higroscópicas, y al tener alta humedad presentan una mayor transmisión de calor debido a la alta conductividad térmica del agua.

Olgyay (1998) retoma el tema y vuelve a describir el proceso a una escala mayor: el vapor de agua penetra en los espacios abiertos de la edificación hacia aquellas zonas con presión baja. *“La dirección del flujo parte desde el interior cálido hacia el frío exterior, se producen flujos inversos desde el calor exterior hacia los espacios interiores más frescos”*. Toda esta descripción se debe tener en cuenta al realizar la propuesta de estudio, por lo que es necesario involucrar más variables, además de la humedad relativa y temperatura, se deben considerar: *flujos de aire, la temperatura, la temperatura de dichos flujos, asoleamiento, la velocidad del viento y la condensación*.

Olgyay (1998) afirma que los medios, a través de los cuales el cuerpo humano intercambia calor con su entorno, pueden clasificarse en: radiación, conducción, convección y evaporación. Se estima que el cuerpo humano pierde 2/5 partes de su calor por radiación; 2/5 partes, por convección, y 1/5 parte, por evaporación. Estas proporciones cambian si hay una variación en las condiciones térmicas, por ejemplo, en climas con alta humedad, la evaporación de la piel se ve perjudicada debido al alto índice de vapor de agua presente en el ambiente.

Guimarães (2013) señala que en condiciones de altas humedades, como en el caso de los climas tropicales, la comodidad térmica resulta más difícil de alcanzar, debido a que está presente desde la sensación de bochorno hasta el frío incómodo, sin puntos confortables intermedios. La solución arquitectónica, tanto en invierno como en verano, es utilizar estrategias de ventilación.

Nathan, H. A. G. (citado por Olgyay, 1998, p.115) realizó experimentos que muestran el efecto de la humedad higroscópica en la conductividad térmica de materiales inorgánicos en relación con su volumen, y de materiales orgánicos en proporción directa a su peso.

Así mismo, Rogers (1951) menciona que un problema relacionado con la humedad, y que se considera independiente de su comportamiento térmico, consiste en la creación de condiciones críticas producidas por el efecto de la condensación. De igual forma, describe diversos métodos

para eliminar dicha condición de las edificaciones: (1) reduciendo el contenido de humedad en el interior, (2) colocando una “*barrera de vapor*”, (3) conectando el lado frío con el lado exterior; (4) utilizando en el lado frío materiales que sean cinco veces más porosos al vapor que los empleados en el lado cálido.

1.1 Desecantes como solución al problema de confort en el clima cálido-húmedo

La investigación que se propone se apoya en planteamientos de la sociedad norteamericana de ingenieros de calentamiento, refrigeración y aire acondicionado: ASHRAE (siglas en inglés), en la versión FUNDAMENTALS (2009), capítulo 32: “*Sorbents and Dessicants*”.

En este capítulo se señala que todos los materiales desecantes atraen y mantienen el vapor de agua. Así mismo, explica que la diferencia entre los materiales comunes y los llamados desecantes es la capacidad de retención. La manera en que funciona un desecante es atrayendo la humedad hasta que alcanza el equilibrio con el aire circundante. La lectura indica que los desecantes: “*Deben ser calentados a temperaturas entre los 120 y los 500 °F, este aire debe ser enfriado ya que el proceso de absorción genera calor sensible igual a la latencia más un calor adicional por el proceso de absorción, que varía entre 5 y 25 % del calor latente del vapor de agua, este calor se transfiere al desecante del aire*”.

ASHRAE (2009) menciona que existen dos tipos de desecantes: los sólidos y los líquidos. Los adsorbentes atraen la humedad debido al campo eléctrico de la superficie del desecante. Este campo no es uniforme, el desecante atrae a su superficie las moléculas de agua por fuerza en la carga neta opuesta. Cuando la superficie completa está cubierta, el adsorbente puede contener todavía más humedad debido a que el vapor se condensa en primera la capa de agua y llena los capilares en todo el material. De igual manera que los absorbentes líquidos, la capacidad de adsorber para atraer la humedad depende de la diferencia de presión de vapor entre su superficie y el aire.

La capacidad de los adsorbentes sólidos es generalmente menor que la capacidad de absorbentes líquidos. Por ejemplo, un tamiz molecular típico adsorbente puede contener 17 % de su peso seco en agua cuando el aire está a 70 °C y la humedad relativa a 20 %. En contraste, el LiCl puede mantener el 130 % de su masa en la misma temperatura y humedad relativa, pero los adsorbentes sólidos tienen otras características favorables.

Varios tamices moleculares continúan absorbiendo humedad incluso cuando están muy calientes, lo que permite la deshumidificación de corrientes cálidas de aire. En el mercado existen diferentes absorbentes sólidos que pueden ser fabricados con tolerancias precisas, con diámetros de poro que pueden ser controlados. Esto significa que pueden ser adaptados para absorber moléculas de un diámetro determinado. *El agua, por ejemplo, tiene una molécula efectiva de 3,2 Angstrom. Un adsorbente de tamiz molecular con un diámetro promedio de 4,0 Angstrom adsorbe agua, pero no tiene capacidad para moléculas más grandes, tales como disolventes orgánicos.* Esta característica selectiva es útil en muchas aplicaciones, varios desecantes con diferentes tamaños de poro pueden combinarse en serie para eliminar primero el agua y luego filtrar el aire.

Comportamiento de adsorción:

De qué depende el comportamiento de adsorción:

1. Área total de superficie.
2. El volumen total de los capilares
3. Diámetro de los capilares.

En una gran superficie, el absorbente tiene una alta capacidad en humedades relativas bajas, grandes capilares proporcionan una alta capacidad de agua condensada, lo que mejora la adsorción cuando se encuentran humedades relativas altas. Por el contrario, diámetros estrechos de capilares permiten una selección de las moléculas de vapor que pueda llegar a contener.

ASHRAE (2009) hace un listado y descripción de los distintos desecantes sólidos que se encuentran en el mercado.

Los geles de sílice, las zeolitas, las zeolitas sintéticas (tamices moleculares), alúminas activadas, carbonos y los polímeros sintéticos.

Geles de sílice: son estructuras sólidas amorfas que se forman por la condensación de silicatos solubles a partir de soluciones de agua y otros disolventes. Una de sus ventajas es su costo, que es relativamente bajo. Se pueden encontrar en distintos tamaños que van desde perlas esféricas de 3/16 pulgadas de diámetro hasta granos pequeños en polvo fino.

Zeolitas: son minerales de aluminosilicato que se extraen de la naturaleza. Estos minerales tienen cristales muy abiertos como celosías, sus moléculas atrapan el vapor de agua como un objeto en una jaula. Dependiendo del tipo de aluminosilicato se determina el tamaño de las aberturas entre las "barras" de la jaula, estas a su vez determinan el tamaño máximo de la molécula que puede ser adsorbida en la estructura.

Zeolitas sintéticas: también llamados tamices moleculares, son aluminosilicatos fabricados en un proceso térmico. Para tal fin se controla la temperatura del proceso y la composición de los ingredientes de los materiales que permiten modificar las características de la superficie la estructura molecular y de adsorción. Su costo es un poco más elevado, pero permite obtener un producto con una superficie más uniforme que la zeolita natural.

Alúminas activadas: son óxidos e hidruros de aluminio que se fabrican en procesos térmicos. Entre sus principales características estructurales está poder ser controlados por los mismos gases que se utilizan para fabricarlos, debido a la temperatura y a la duración del proceso térmico.

Carbonos: se utilizan frecuentemente para absorber otros gases como el vapor de agua, debido a que tienen gran afinidad con las moléculas no polares típicas de solventes orgánicos. Como otros adsorbentes, los carbonos tienen una gran superficie interna y grandes capilares. Este volumen capilar les da una alta capacidad para adsorber agua de vapor a humedades relativas, de 45 a 100 %.

1.2 Ciclo de los desecantes

Los autores del ASHRAE (2009) indican que todos los desecantes funcionan de la misma manera:

La transferencia de humedad es causada por una diferencia entre las presiones de vapor de agua en su superficie y del aire circundante. Cuando el vapor presión en la superficie desecante es menor que la del aire, el desecante atrae la humedad. Cuando la presión de vapor de la superficie es mayor que la del aire circundante, el desecante libera la humedad.

La figura 1 muestra la relación entre el contenido de humedad del desecante y su presión de vapor en la superficie, una relación de aumento directamente proporcional. También resalta que en algún momento la presión de vapor en la superficie del desecante es la misma que la del aire: las dos están en equilibrio, entonces la humedad no puede moverse en cualquier dirección, a menos que una fuerza externa cambie la presión de vapor en el desecante o en el aire.

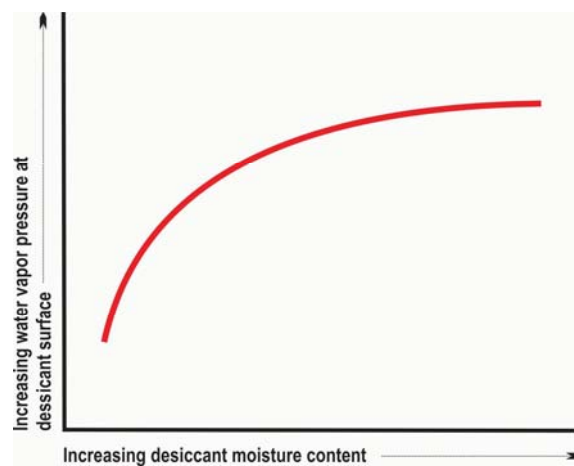


Fig. 1. Relación entre un contenido de humedad del desecante y su presión de vapor de la superficie.
Fuente: ASHRAE (2009)

La figura 2 muestra el efecto de la temperatura sobre la presión de vapor en la superficie de un desecante. Cuando se incrementa la temperatura, aumenta el contenido de la humedad y la presión de vapor. Cuando la presión de vapor es mayor que el aire circundante de la superficie del desecante, la humedad se retira. Cuando se incrementa la temperatura el desecante se seca no absorbe humedad porque la presión de vapor sigue siendo alta. Cuando el desecante se enfría se reduce la presión de vapor en la superficie y puede absorber la humedad de nuevo.

Después se seca el desecante (este se reactiva) por el calor. La presión de vapor sigue siendo alta, por lo que tiene muy poca capacidad para absorber la humedad. Enfriando el desecante se reduce su presión de vapor en la superficie de modo que puede absorber la humedad de nuevo. El ciclo completo se muestra en la figura 3.

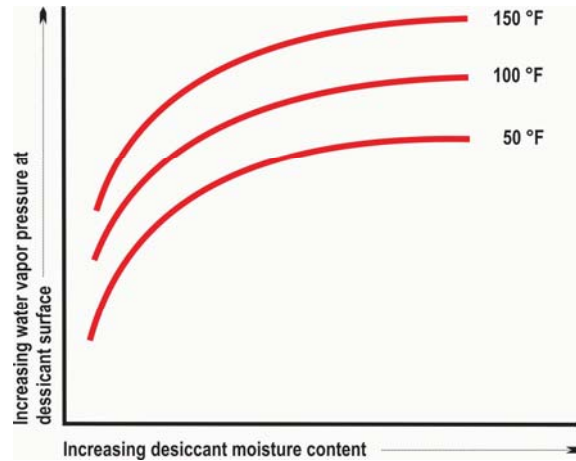


Fig. 2. Efecto de la temperatura sobre la presión de vapor en la superficie del desecante. Fuente: ASHRAE (2009).

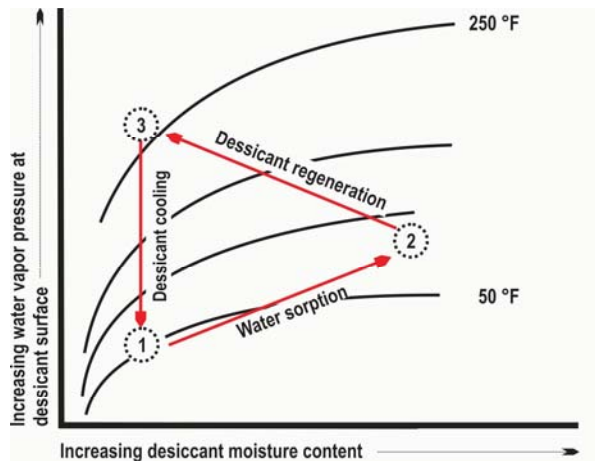


Fig. 3. Ciclo completo de los desecantes. Fuente ASHRAE (2009)

La economía de la operación del desecante depende del costo energético de mover un material a través de este ciclo. Deshumidificar el aire (carga del desecante con vapor de agua) generalmente procede sin entrada de energía. La mayor parte de la energía se invierte en la regeneración del desecante (que se mueve desde el punto 2 al punto 3) y el enfriamiento del desecante (punto 3 al punto 1).

1. 3. Sistemas pasivos de deshumidificación

Morillón (1993) señala dos tipos de métodos de deshumidificación donde también intervienen sistemas pasivos para el clima cálido húmedo: *Sistema de lecho dual por deshumidificación de Moore* y *deshumidificación solar pasiva*. El primero utiliza material desecante de bajo costo (que el autor no especificó), calor solar para la regeneración, y circulación convectiva de aire. El segundo está basado en el “efecto chimenea” o “termosifón” que hace que el aire circule por convección natural y se caliente por efecto invernadero en el espacio vertical, comprendido entre una cubierta metálica y un vidrio.

A través de la lectura de la tesis de Cruz (2006) et al, se hace un listado de los procesos y sistemas de enfriamiento y deshumidificación pasiva en la arquitectura:

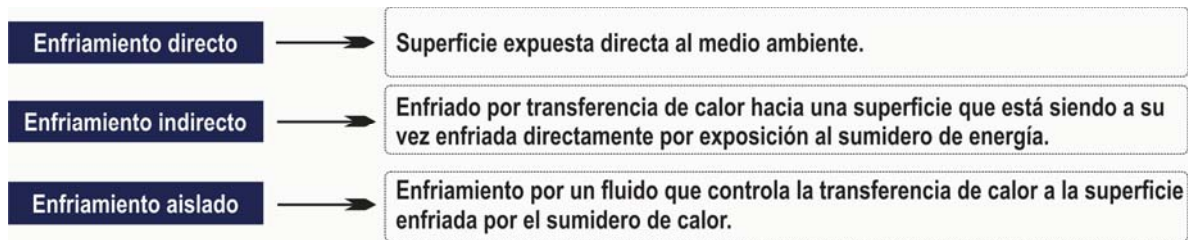


Fig. 4. Procesos de Enfriamiento, listado hecho basado en el análisis de la Tesis de Cruz (2006).

Sistemas pasivos de enfriamiento



Fig. 5. Sistemas Pasivos de Enfriamiento, listado hecho basado en el análisis de la tesis de Cruz (2006).

Cruz (2006) menciona otro método para inyectar aire fresco, que consiste en un tubo metálico, que va del exterior de la casa al interior de la misma. Este tubo se entierra en el suelo para mantener frío en el interior, ya que cuando el aire ingresa, existe una diferencia de temperaturas que forma una corriente convectiva. El autor hace énfasis en que la toma de aire exterior debe instalarse preferentemente orientada hacia el norte y en un lugar sombreado para succionar aire fresco.

López (2010) hace una descripción de los elementos pasivos de enfriamiento para edificaciones, estos sistemas se clasifican de acuerdo con las necesidades de climatización como calentamiento, enfriamiento, humidificación, deshumidificación, para ello cita a Morillón (1995). Estos sistemas consisten en: **Ganancia directa** que capta la energía del sol a través de superficies vidriadas. **Muro Trombe** que actúa como cuerpo negro y cuya función es de acumulación, pero no está ventilado. **Muro de acumulación ventilado**, el cual actúa como cuerpo negro, pero intercambia calor con el exterior a través de perforaciones. **Muro de invernadero adosado** que capta calor durante el día y evita su pérdida en la noche. **Acumulación de calor en el techo** o también llamado techo estanque. El sistema de **captación solar y acumulador de calor** que permite almacenar el calor y distribuirlo en periodos en que no hay asoleamiento.



Fig. 6. Control de Exceso de Entrada de Calor, listado hecho basado en el análisis de la Tesis de Cruz (2006).

Cruz (2006) plantea que se deben revisar cada una de las alternativas y sugiere que se pueden hacer variantes y modificaciones para resolver los problemas que se presentan.

En los lugares de clima cálido, López (2010) describe que el “*refrescamiento pasivo*” es un principio que puede funcionar si se utilizan materiales constructivos de gran masa térmica para conservar la temperatura fresca nocturna y previendo una adecuada ventilación nocturna, que remueva el calor de las superficies internas. A su vez, Gómez (2013) cita a Guimaraes (2008) y menciona cómo la arquitectura del trópico posee grandes aberturas, formas alargadas y estrechas en los ejes del costado oeste.

Se analizó el estudio “*Enfriamiento y deshumidificación pasiva de una casa habitación para la localidad de Bahía de Banderas, Jalisco*”, hecho por Cruz et al (2006). La vivienda a la que se le hace la evaluación tiene un área de 65.52 m², el clima predominante es de tipo tropical, con alta radiación solar a lo largo del año y una humedad relativa del 80 %. La estrategia de climatización pasiva para mejorar el confort higrotérmico dentro de la vivienda es un diseño de muro Trombe, que consiste en una pared pintada de negro (elemento que absorbe la energía solar), protegido del medio ambiente por una placa de vidrio que almacena el calor por efecto invernadero, formando un canal por donde circula el aire por su interior.

Los autores describen el proceso que tuvo el aire de la siguiente forma: “*El aire caliente sube y lleva el calor de la parte inferior a la parte superior del canal, las rejillas colocadas en el interior de la casa harán el recirculamiento del aire y las rejillas colocadas por la parte inferior del muro permitirán el acceso de aire fresco*”.

El diseño del sistema pasivo, según los autores, cuenta con una toma de aire de 0,5 m de altura sobre el nivel del suelo, este tubo está construido con cemento de 4 in de diámetro, que se instala por debajo del suelo. Los autores recomiendan colocar el tubo a 2 m de profundidad y

3 m de longitud para mantener la temperatura del aire por debajo del medio ambiente. El aire fresco se hace pasar por un desecante para disminuir su humedad, la base del sistema de deshumidificación, según los autores, está basado en el muro Trombe. Se colocaron unas bandejas transversales las cuales alojan el material desecante para que, en el momento que pase el aire de la parte inferior a la parte superior, estas absorban su humedad, las rejillas se situaron a una altura aproximada de 2,5 m para efectos de convección del aire.

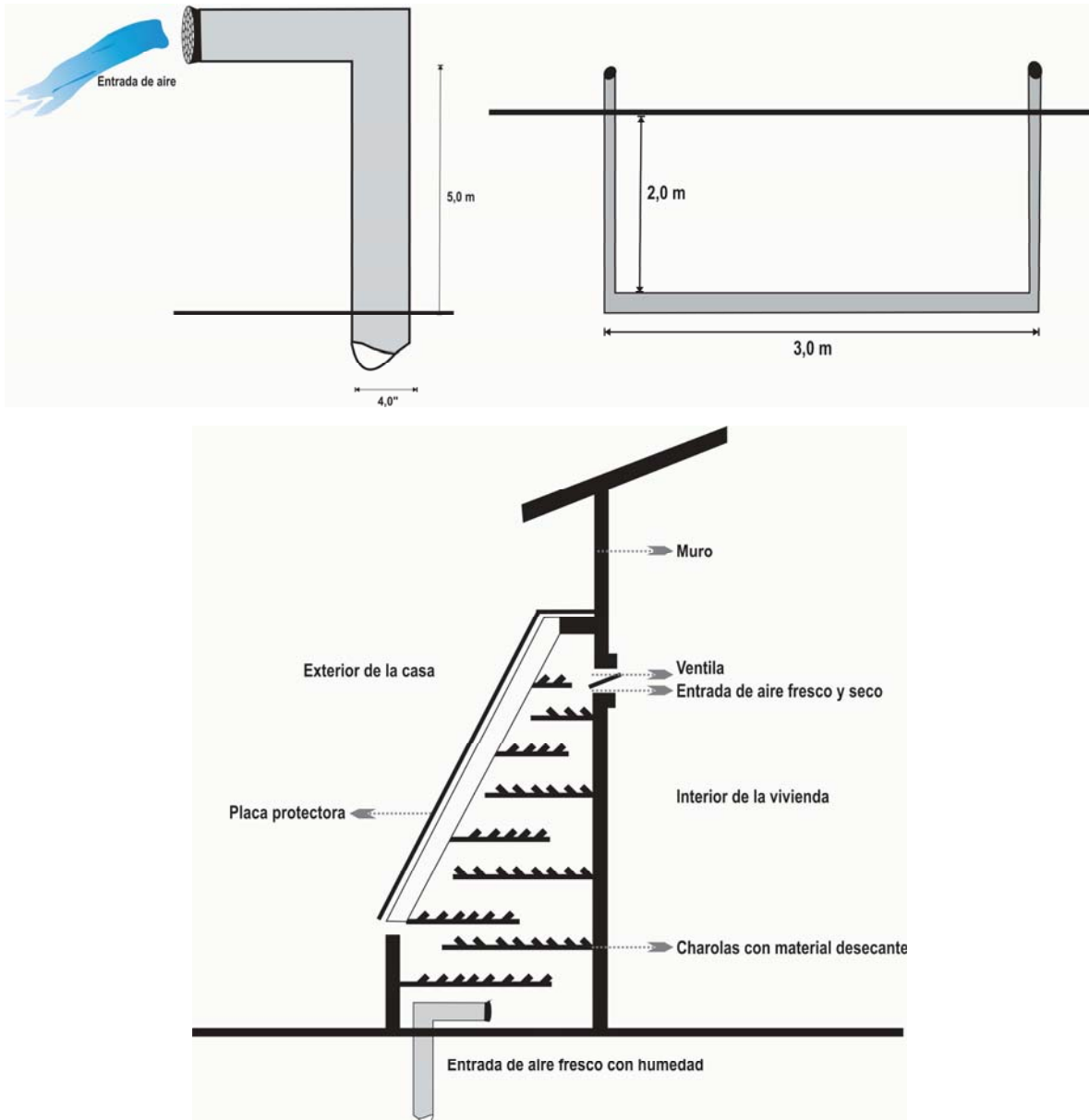


Fig. 7. Diseño del sistema pasivo de Cruz (2006) muro Trombe. Fuente: Cruz (2006).

Cruz et al (2006) afirma que cuando el desecante se saturó, en el sistema se abrió la cubierta que lo protegía, las ventilas de entrada y salida de aire fresco se cerraron y una ventila instalada en el exterior se abrió, esto sucedió para aprovechar el calor del sol que calentó el sistema pasivo al mismo tiempo que incrementó la temperatura del material desecante, el cual perdió

la humedad que absorbió durante el proceso de deshumidificación y retornó a su propiedad original. La humedad, señala el autor, salió por la parte superior en la ventila colocada en el exterior.



Fig. 8. Diseño del sistema pasivo propuesto por Cruz (2006) para regenerar el desecante. Fuente: Cruz (2006).

La conclusión a la que llega Cruz et al (2006) es que el empleo de este diseño puede disminuir el consumo de energía originado por el sistema de aire acondicionado convencional, sin embargo, el autor no presenta resultados numéricos ni experimentales del proyecto debido a cuestiones económicas.

Fernández et al (2013) realiza el estudio en España sobre un *“Modelo de fachada ventilada con desecante para acondicionamiento del aire exterior”*. Allí propone un diseño de una fachada ventilada a la cual se le adhiere material desecante; el aire captado circula a través de la cámara de aire de la fachada, poniéndose en contacto con el material desecante, se somete a un tratamiento de climatización convencional donde participa una batería de frío y enfriamiento evaporativo y se impulsa a un espacio. Para regenerar el desecante, la fachada dispone de un sistema de captación solar que calienta el aire exterior hasta la temperatura necesaria para su regeneración a partir de los 50 o 60 °C, el sistema cuenta con dos columnas de fachada desecante que permite alternar los modos de adsorción y desorción sin afectar la ventilación en el interior.

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo.

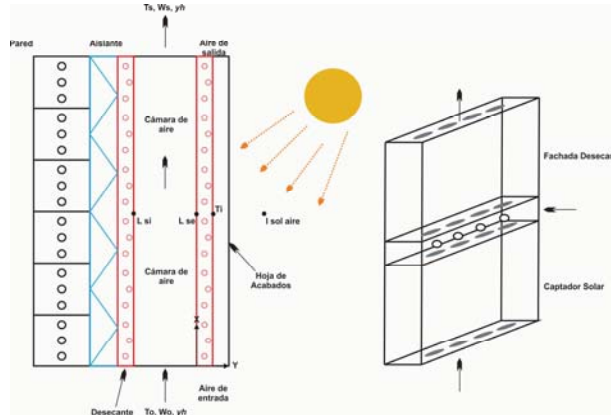


Fig. 9. Componentes del sistema diseñado por Fernández et al (2013). Fuente: Fernández et al (2013).

Fernández et al (2013) hace una descripción de los componentes del sistema:

“Si se parte de la cara interior, la primera capa es de aislamiento, para que el ambiente interior se vea afectado lo menos posible. Entre la capa de aislamiento y la hoja de acabado se establece una cámara de aire de unos pocos centímetros de espesor por donde circula el aire de ventilación. El material desecante va adherido a la cara exterior del aislante y a la cara interior de la hoja de acabado, de manera que la cámara de aire queda delimitada por las dos capas de desecante maximizando el contacto del aire con el desecante. Finalmente, se incorpora una hoja de acabado exterior, que puede ser de diversos materiales: piedra, madera, vidrio, paneles sándwich”.

En la parte metodológica los autores realizan una simulación del sistema utilizando el programa *Energy Plus*, aprovechando el fichero climático de la ciudad de Málaga para el día 22 de julio a las 12:00 p. m. Los parámetros de diseño que proporcionan los autores son los siguientes:

Desecante	Tipo de sílica-gel	Sílica gel RD (Pasaran [9])	Panel exterior	Conductividad térmica	0.01352 W/mK
	Espesor	0.1 mm		Espesor	0.004 m
	Nº de capas desecante en	2		Absortividad	0.4
	fachada (16 2)				
Fachada desecante	Longitud	2 m	Captador solar	Rendimiento	0.6
	Espesor cámara de aire	0.01 m		Longitud	2 m

Tabla 1. Parámetros de diseño utilizados por Fernández (2013) para la simulación del sistema de fachada ventilada. Fuente: Fernández et al (2013).

Fernández et al (2013) concluye que el sistema propuesto tiene la capacidad de deshumidificar el aire exterior de ventilación hasta 4.89 g agua/kg aire seco en un tiempo de adsorción de cuatro minutos. La regeneración del desecante fue óptima a los 70 °C aproximadamente en un tiempo de cinco minutos cuando se eliminó 0.14 kg agua/kg desecante seco. Otra conclusión a la que llega es que, a mayor temperatura de regeneración, hay un mejoramiento en el sistema. Este estudio no presentó un modelo experimental.

Otro estudio realizado en Latinoamérica, a través de la tesis de maestría de Suzuki (2012) "Avaliação do potencial de aquecimento/resfriamento de um sistema de climatização passiva", tuvo como objetivo analizar el potencial de calefacción y enfriamiento de un sistema de climatización pasiva basado en la utilización del *muro Trombe*, para ello fueron construidos dos prototipos en escala reducida, en uno de los cuales se utiliza este tipo de sistema pasivo, mientras que el otro no, sin embargo, ambos prototipos se construyeron con bloques de concreto. En la siguiente figura se muestran las dimensiones los dispositivos.

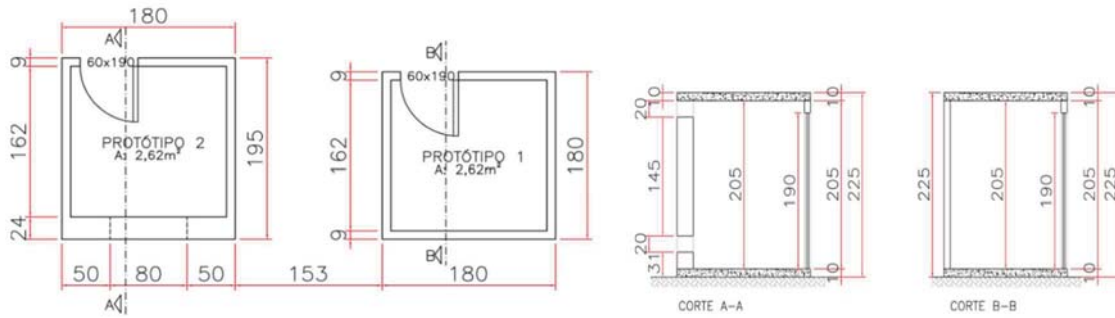


Fig. 10. Diseño de los prototipos experimentales. Fuente: Veridiane et al (2012)

La construcción se realizó en la Universidad Tecnológica de Paraná, en la ciudad de Curitiba, Brasil. La pared con el sistema del muro Trombe es doble, ambos separados por un mortero, los agujeros en los bloques de hormigón se rellenaron con mortero, eliminando los espacios de aire dentro de la pared. Se hicieron estos dos cambios en relación con las otras paredes para aumentar la masa térmica de la pared, señala Suzuki (2012).

Suzuki (2012) denomina al *muro Trombe* como "Prototipo 2", al otro lo llama "Prototipo 1". Ambos prototipos poseen pisos de concreto simple con un espesor de 10 cm para minimizar la influencia térmica en las edificaciones.



Fig. 11. Proceso constructivo de los prototipos experimentales. Fuente: Suzuki et al (2012).

Suzuki (2012) describe que los prototipos fueron orientados hacia el norte y poseen un recubrimiento interno con poliestireno de 5 cm, para minimizar la influencia de los intercambios de calor en las mediciones. Sobre las losas fue puesto un plástico transparente, como capa impermeabilizante, para disminuir la penetración de humedad. En la fachada sur de

los prototipos hay una puerta de madera para el acceso. La superficie exterior del vidrio del *muro Trombe* fue fijada con una estructura de aluminio blanca, estas ventanas se pueden abrir, lo que permite el intercambio de calor entre el exterior y el interior.



Fig. 12. Proceso constructivo: vidrio doble en el diseño del muro Trombe. Fuente: Suzuki et al (2012).

Para evitar pérdidas de calor, en el *muro Trombe*, Suzuki (2012) utiliza vidrio doble de 17 mm, siendo el externo de 4 mm y el interno de 5 mm (ambos transparentes y comunes), por lo que la cámara de aire queda con 8 mm de espesor. La pared de almacenamiento fue pintada de negro para absorber la radiación solar visible, siendo esta una de las principales características del *muro Trombe*.



Fig. 13. Prototipos construidos. Fuente: Suzuki et al (2012).

Las mediciones de temperatura interna y externa de los prototipos fueron realizadas simultáneamente, para esas mediciones la autora utilizó equipamiento Hobo, los *dataloggers* fueron colocados al interior de los prototipos en el centro de cada uno de ellos a una altura de 1.5 m, recabando datos cada 5 minutos. Así mismo, realizó mediciones para diferentes configuraciones: invierno y verano.

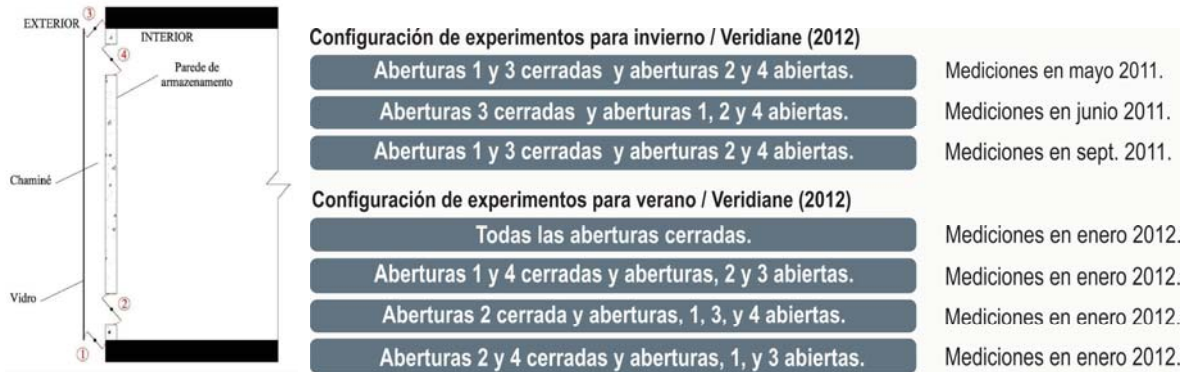


Fig. 14. Configuración de Experimentos proyecto Suzuki (2012). Fuente: Suzuki et al (2012).

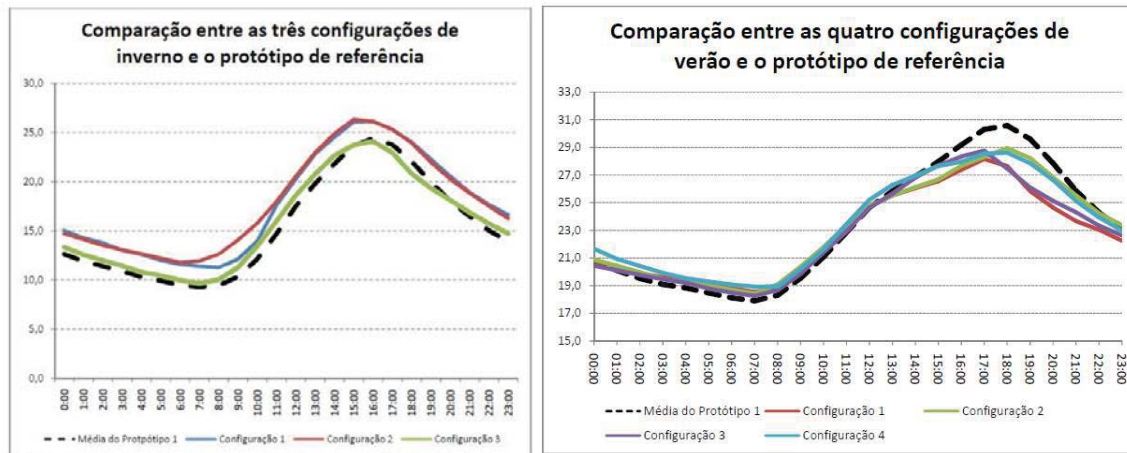


Fig. 15. Comparación entre experimentos. Fuente: Suzuki (2012)

Suzuki (2012) llega a distintas conclusiones, como, por ejemplo, que la utilización del muro Trombe puede ser una alternativa viable en la ciudad de Curitiba para mejorar el ambiente térmico en una edificación. En la mayoría de los casos el sistema propuesto presentó buenos resultados. En la época de invierno el muro Trombe mostró comparativamente mejor desempeño, ya que el muro de almacenamiento acumuló calor durante el día y lo liberó en el interior durante la madrugada. Para invierno la configuración de mejor resultado fue aquella donde la abertura 3 está cerrada y las aberturas 1, 2 y 4 abiertas. En la época de verano el sistema también mostró un buen resultado, a pesar de que el sistema se aconseja para condiciones frías, la configuración que obtuvo los mejores resultados fue la configuración 1, que simula un muro Trombe no ventilado (todas las aberturas cerradas), en esta configuración el muro absorbe calor en el interior de la chimenea durante el día, trabajando como masa térmica de enfriamiento.

Los procesos pasivos dependen de los principios de la termodinámica, donde López (2010) cita a Serrá (1999) quien señala que el calor se transmite del cuerpo más caliente al cuerpo más frío, en este proceso se tiene el equilibrio sin haber una creación o destrucción de energía sino una transformación. López (2010) hace una observación del fenómeno de la ventilación para el clima cálido-húmedo, donde el sistema funciona de la siguiente manera: capta el aire en una zona de alta presión, la salida en la zona de baja presión, y es allí cuando es posible deshumidificarlo en el proceso de enfriamiento.

López (2010) desarrolló el *Sistema de Aireación Inducida* o sistema *SAI*, que basa su estudio en el principio de balance de energía de un sistema limitado por los elementos arquitectónicos y su contexto. Los actores externos que se contemplan son: el clima, el microclima, la humedad relativa, el viento y la radiación. Procesos que deben ir relacionados con la colocación del desecante para mejorar el comportamiento del sistema SAI frente a los factores higrotérmicos.

López (2010) aprovecha la resistencia, la geometría de los materiales y el calentamiento de la envolvente. La autora plantea que la aireación intramuros permite la disminución del contenido de vapor de agua y reduce los efectos de condensación permanente. Este sistema está basado en el fenómeno de la convección inducida para que, a través de los muros, circule el aire por flotación y por diferencias de presión.

Los indicadores que utiliza López (2010) en su proyecto son:

- Humedad del aire que entra
- Humedad del aire que sale
- Temperatura del aire que entra
- Temperatura del aire que sale
- Temperaturas máximas, mínimas y medias
- Momentos de humedad máxima, mínima y promedio
- Viento y radiación.

Esta evaluación estuvo constituida por dos sistemas: ***sistema de inyección y sistema de eyección***. Las líneas de inyección están distribuidas a nivel de piso, con la utilización de codos a 45 grados y en las redes principales se utilizaron tubos de PVC DE 1 ½ in ϕ . La colocación del sistema de inyección se hace en la parte inferior de los muros, de igual manera con tubos de PVC de 1 in ϕ unidos con codos, tes y coples. Las entradas individuales del aire se encuentran insertadas en el muro oeste, resguardado en la sombra sin obstruir ninguna parte del sistema.

La autora describe que el muro norte posee un número menor de boquillas inyectoras, esta orientación cuenta con dos líneas de inyección de aire, debido a la ubicación de estas redes ocasionado por la posición de la puerta y la separación de los muros. La tubería de eyección está hecha con tubería de cobre de ½ in ϕ , cabe resaltar que la autora consideró la utilización de este material para mejorar el calentamiento y facilitar el desarrollo de succión de aire por diferencias de presión por el calor cedido de la losa al tubo y al aire que circula. El sistema se puso en contacto directo con la losa por razones teóricas que señalan que la conducción de calor de la losa a la tubería podría mantenerse prolongado en la tarde como consecuencia de la emisividad y a las propiedades de retardo térmico del concreto. Las principales tomas de aire del sistema inyector están orientadas a la fachada norte, para evitar exceso de radiación solar.

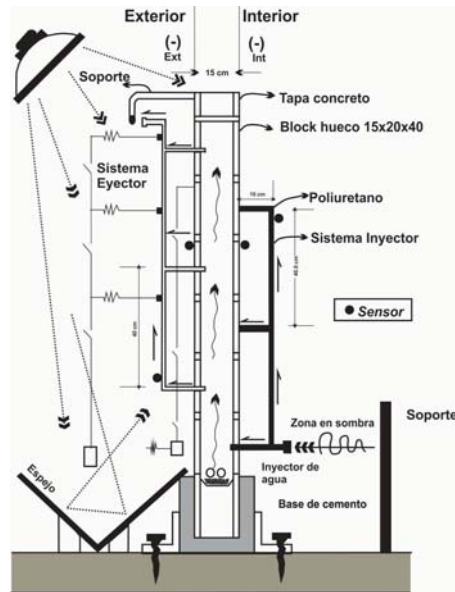


Fig. 16. Diseño del Sistema SAI. Fuente: López (2010).

El sistema SAI, construido por López (2010), consta de zapatas corridas para la cimentación, firme de concreto, muros de bloques hueco y losa de panel W revestida con concreto. En la construcción se cuidó que en el colado de los castillos y trabes el concreto no penetrara en los huecos del bloque para permitir la aireación al interior. Se cuidó la alineación de los bloques y su traslape para conformar los canales requeridos y lograr la aireación al interior de los muros. López (2010) describe cómo se cuidó en el proceso de construcción que no cayera mezcla en el interior de los bloques, con el fin de evitar la obstrucción de los canales del material, la losa está construida de panel de poliestireno reforzado con acero de $\frac{3}{8}$ in y recubierto con concreto. La losa interior tiene un acabado con mezcla de cemento arena. Es importante anotar que se conformó una ruptura del puente térmico con la separación de los muros en las mismas orientaciones, esto se hizo con el objetivo de medir simultáneamente el sistema arquitectónico con el sistema de aireación.

En la monitorización de datos utilizaron una *microestación bioclimática Hobo* para registrar la zona de inyección de aire en cada una de las orientaciones, donde se midió humedad, temperatura y punto de rocío simultáneamente. También se hicieron levantamientos de datos de radiación, viento y clima exterior, así como el microclima que se generaba al interior de los módulos. Los datos se registraron en dos fases: en la primera fueron resultados parciales, que comprendían el prototipo según el diseño para verificar la eficiencia del SAI, posteriormente se detectaron falencias se modificaron y se realizó una segunda campaña de medidas dando los resultados finales.

La ruta de análisis de la evaluación se realizó en diez pasos, consistió en medir las diferencias de comportamiento higrotérmico entre el punto de inyección, el punto de eyección, realizar comparativos del muro con el sistema SAI y el muro sencillo, realizar comparativos entre el aire captado en la red principal y el punto de inyección, comparar las condiciones microclimáticas internas con el aire de la red principal, estas mismas condiciones microclimáticas se compararon con el aire eyectado y por último determinar y comparar la diferencia entre el clima exterior, temperatura, humedad relativa y el aire extraído como indicadores para inferir la eficiencia del SAI.



Fig. 17. Mediciones dentro del Sistema SAI. Fuente: López (2010).

Los resultados muestran que los rangos de temperatura fueron menores en los muros con sistema SAI, estando de menor a mayor el muro oeste, el muro sur, el muro norte y el muro este. La humedad relativa sigue el mismo patrón. Los desempeños más estables para humedad relativa y temperatura se presentaron en los horarios nocturnos en los muros con el sistema SAI. Mientras que en los demás muros, que no tenían el sistema, los comportamientos fueron inestables entre la noche y el día.

En todas las orientaciones del prototipo estudiado, la diferencia entre el microclima exterior y el aire eyectado fue parecida. La temperatura del microclima para todas las orientaciones fue más elevada en el muro con el sistema SAI, tanto en el día como en la noche. Sin embargo, la humedad relativa tuvo un comportamiento distinto y fue baja en los muros con el sistema.

En la evaluación comparativa de la temperatura exterior y la temperatura interior del prototipo, las cuatro orientaciones presentaron los mismos comportamientos de las condiciones externas en relación con los muros SAI. Hubo pérdida de temperatura al medio externo en el horario nocturno. La humedad relativa presentó el mismo patrón para todas las orientaciones. Los datos de viento registrados provenían del sur-sureste, seguido del este-noreste, señala la autora.

López (2010) realizó un análisis de las cartas psicométricas para el prototipo donde observó que las condiciones de temperatura mínima de los muros con el sistema son similares y con pequeñas diferencias con respecto a la temperatura mínima exterior en todas las orientaciones. La diferencia importante está en las temperaturas máximas, mostrándose un aumento en la temperatura del muro SAI oeste, con respecto a la humedad relativa, se presentó estabilidad para todas las orientaciones.

Después del análisis de las campañas de medida López (2010) concluye lo siguiente:

Las disminuciones esperadas para la humedad relativa, entre el muro con el sistema SAI y el muro sin el sistema SAI, no se lograron. El muro con orientación sur y el este tuvieron un comportamiento distinto, ya que el factor viento influía.

“Aunque la humedad relativa no fue menor, en los muros con SAI, si fue la menor que el medio ambiente.”¹

¹ López Cervantes, Aída (2010). *Sistema De Aireación Inducida Para Disminuir Riesgos De humedad Intramuros: Caso De Estudio Para El Trópico Húmedo. Tesis Doctoral*. Doctorado en Arquitectura-UNAM, Facultad de Arquitectura. Universidad Nacional Autónoma de México.

La autora deduce que la humedad tomada del material al aire de la cavidad y no desde el exterior, debido a que en los puntos de inyección, la humedad relativa registrada era más baja en los muros con el sistema SAI que la de los muros sin el sistema.

“Este fenómeno abre la oportunidad para estudiar el fenómeno analíticamente y determinar el mayor riesgo de condensación en la pared interna o la pared externa, además de determinar si hay mayor o menor riesgo en el muro sin SAI o en el muro con SAI, proceso que reafirmaría, de ser positivo el resultado, la validez del funcionamiento del SAI.”²



Fig. 18. Construcción del Sistema SAI. Fuente: López (2010).

Morillón (2004) describe que el sistema de muros de descarga de calor se forma por dos placas paralelas, la primera es vidrio que protege otra placa que puede ser de aluminio, se monta sobre un muro y forma un canal por donde circula el aire. Los rayos del sol deben incidir en el “muro almacenador”, esta estructura, por sus características de absorción, conductividad térmica y almacenamiento, modifica su temperatura y, por su capacidad calorífica, se convierte en un acumulador de calor.

El calor que está almacenado se transmite al aire que es captado por el sistema del canal ocasionando convección natural. El autor indica que este aire puede entrar al interior de un espacio arquitectónico para calentarlo o se lleva al exterior generando así una ventilación y llevando la temperatura del interior a la zona de confort.

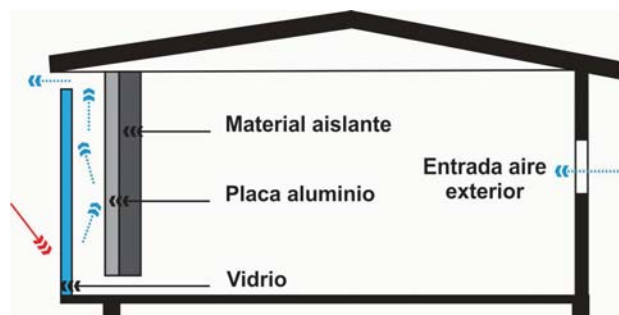


Fig. 19. Sistema de descarga de calor. Fuente: Morillón (2004).

En el trabajo “Modelo analítico que describe el comportamiento térmico de un sistema de descarga de calor en techos”, Hernández et al (2012) hace una descripción sobre los sistemas

² López Cervantes, Aída (2010). *Sistema De Aireación Inducida Para Disminuir Riesgos De humedad Intramuros: Caso De Estudio Para El Trópico Húmedo*. Tesis Doctoral. Doctorado en Arquitectura-UNAM, Facultad de Arquitectura. Universidad Nacional Autónoma de México.

de descarga de calor (SDC) los cuales permiten captar el flujo de calor que recibiría la envolvente de una edificación que se descarga al medio ambiente. Generalmente estos sistemas se instalan en la fachada de la edificación, donde se recibe la mayor parte de flujo de calor según el lugar donde se implante. Este sistema se utiliza en muros y techos se clasifican de dos formas: **los que cuentan con dos superficies opacas y los que cuentan con una superficie translúcida y una opaca**, generalmente emplean vidrio para atrapar los rayos solares y la segunda superficie es la parte del techo que interactúa con el interior de la edificación. En el caso donde se utilizan dos superficies opacas, la placa que interactúa con el medio ambiente absorbe el calor de los rayos solares, impidiendo que llegue a la placa que interactúa con el interior del edificio.

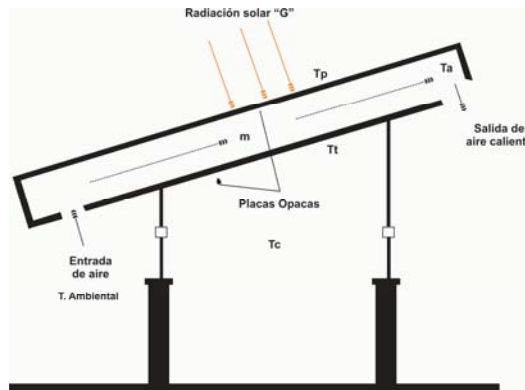


Fig. 20. Sistema de descarga de calor en techos formados por dos superficies opacas. Fuente: Hernández et al (2012)



Fig. 21. Prototipo experimental empleado para la validación del modelo analítico. Fuente: Hernández et al (2012).

Hernández et al (2012) menciona que el objetivo de su estudio fue presentar un modelo analítico que permitiera entender el comportamiento térmico de la descarga de calor en techos cuando el sistema tiene dos superficies opacas. Este sistema está formado por dos placas o superficies paralelas, situadas en el techo formando un canal por donde circula aire. El modelo analítico que presentaron los autores se validó con el modelo experimental presentado por Hernández et al. (2006) "Experimental and numerical model of wall like solar heat discharge passive system". El modelo experimental se instaló con una inclinación de 30 grados respecto a la horizontal, los autores señalan que se expuso en dos ocasiones a la radiación solar, bajo las condiciones ambientales de Cuautitlan Izcalli, Estado de México. Luego de dos experimentos, se halló una diferencia de temperaturas no mayor a 2.5 °C para la placa que está expuesta al sol;

3.5 °C para la temperatura del interior del cuarto y de 4.9 °C para la temperatura del flujo de aire formado en el canal.

Los autores afirman que la causa de la diferencia de temperaturas es el resultado de la obtención del coeficiente convectivo de transferencia de calor; para el cual los autores no encontraron estudios que definan su comportamiento con precisión. Se menciona en el estudio que el desempeño de la superficie del techo, que interactúa con el interior de la edificación, se mantiene cerca de la temperatura del ambiente y no refleja parte del calor ganado en la superficie que interactúa con el medioambiente. Es así como los autores concluyen que se puede considerar el modelo analítico propuesto para ser utilizado en simulaciones del comportamiento térmico de un sistema de descarga de calor en techos cuando las superficies que lo componen son opacas.

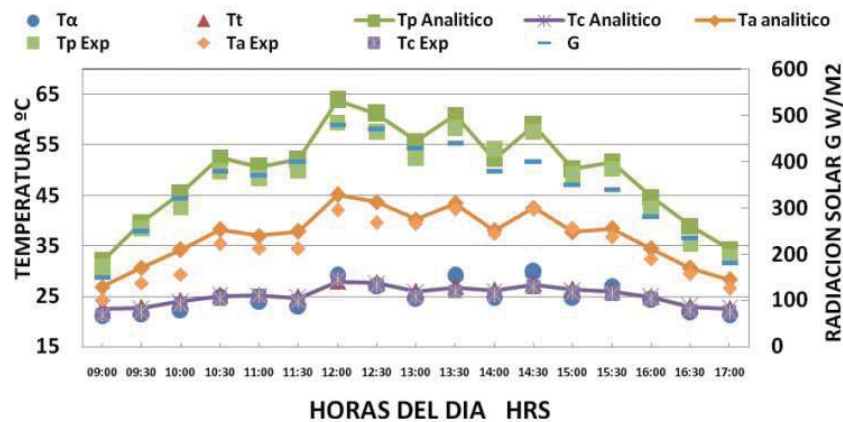


Fig. 22. Resultados comparativos entre el modelo analítico y experimental. Fuente: Hernández et al (2011).

El estudio *“Application of passive cooling systems in the hot and humid climate: The case study of solar chimney and wetted roof in Thailand”*, realizado por Sudaporn et al (2006), hace un comparativo entre una célula de estudio y una célula experimental que mide el rendimiento térmico de dos sistemas de enfriamiento pasivo, aplicando el sistema de *chimenea solar* en condiciones de clima cálido-húmedo. Los experimentos se realizaron durante tres periodos del año: junio-julio, septiembre-octubre y febrero-marzo de 2004-2005. El experimento se realizó en el edificio de laboratorio de Thammasat University, las dimensiones interiores de las células fueron 3.8 m x 2.8 m x 2.4 m, contaron con una estructura de madera, los muros se construyeron con madera y se cubrieron externamente con paneles de fibrocemento pintados de color blanco, e internamente con madera contrachapada.

Una capa de espuma de poliestireno de 0.076 m se localizó en el marco de madera entre el panel de fibrocemento y el triplay. La inclinación del techo fue de 45 grados y se dividió en dos partes: *norte y sur*. El área sur se compuso de tejas de terracota en el exterior, el aire exterior entró por una separación exterior de 0.15 m hecha con yeso (figura B) a través de dos lamas fijas con el objetivo de reducir el aire caliente. El techo norte de la celda de ensayo constó de dos capas: la capa exterior de zinc distribuido en rejillas y en el interior hay una placa de zinc donde hay una tubería de agua en la parte superior (Figura A). Los autores señalan que el techo norte de la célula controlada constó de tejas de terracota y placas de yeso ubicadas de la misma forma con rejilla de metal ajustable.

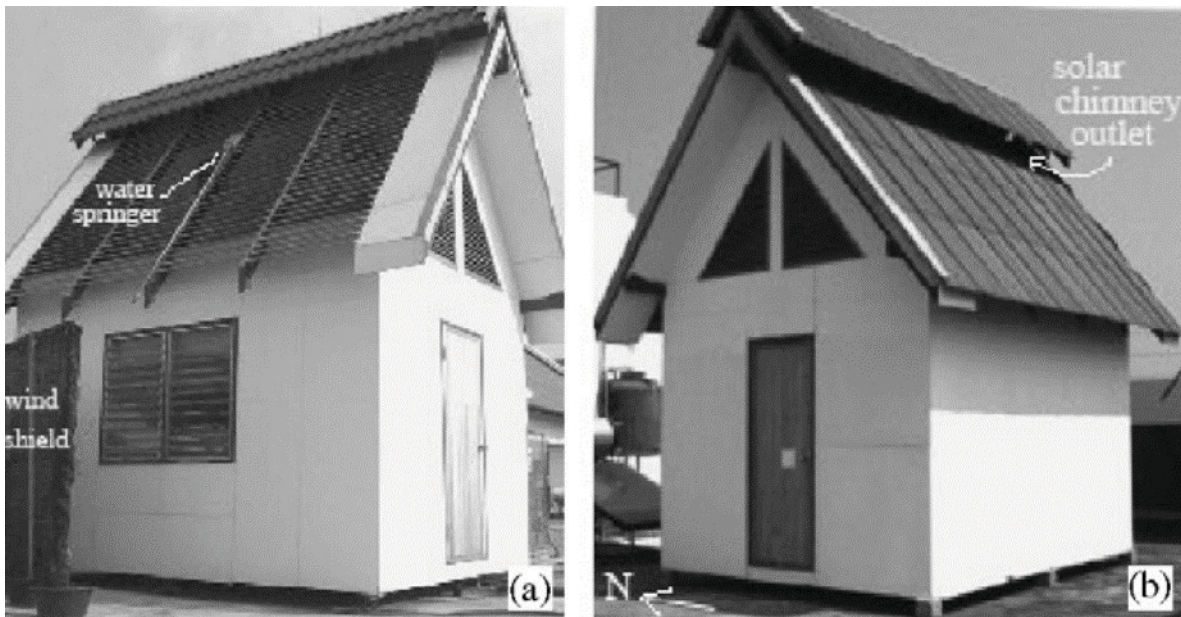


Fig. 23. (a) Pared y el techo hacia la dirección norte de la célula experimental. (b) Célula experimental cubierta sur sistema chimenea solar. Fuente: Sudaporn et al (2006).

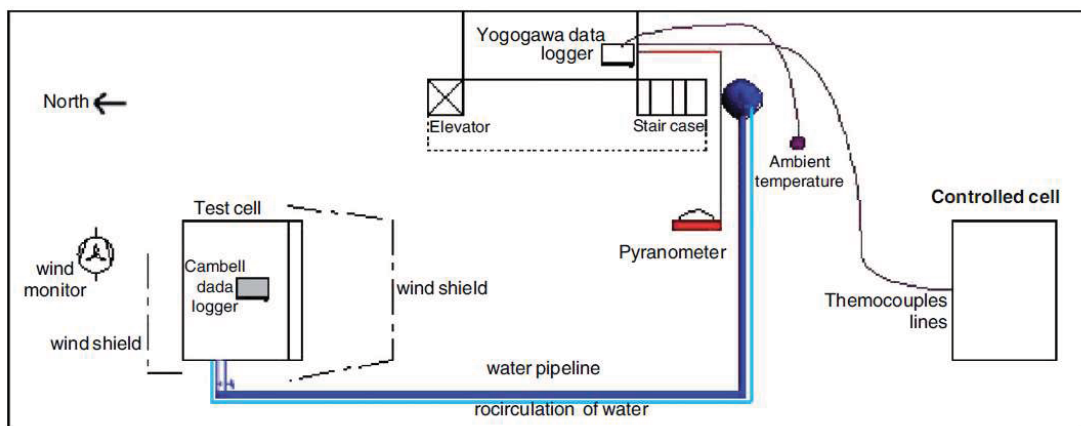


Fig. 24. Esquema del campo experimental ubicado en la cubierta de Sirindhorn International Institute of Technology

Se realizaron varios experimentos:

Utilización de sistema chimenea solar, (2) rociar agua en la cubierta durante los meses de junio y julio, (3) Sistema de chimenea solar en conjunto con rociar agua en la cubierta. Este estudio arrojó varios resultados: la diferencia de temperaturas más alta entre el interior y el sistema de chimenea solar se da durante febrero-marzo en comparación con junio-octubre. Por lo tanto, la aplicación del sistema de chimenea solar durante febrero-marzo puede producir más

ventilación al interior que durante junio-octubre, donde se esperan altas temperaturas del ambiente. La utilización de protección de viento puede reducir el efecto del viento dominante sobre la ventilación inducida en la célula experimental. La utilización de protección de viento puede reducir el efecto del viento dominante sobre la ventilación inducida en la célula experimental. Los resultados experimentales muestran que sin el efecto del viento la chimenea solar puede proveer ventilación natural en la célula experimental por 1.13 – 2.26 de ACH. El uso de la única chimenea solar es insuficiente y el viento pasa a ser un tema importante para esta clase de experimentos.

El uso del sistema de chimenea solar reduce la alta temperatura y la alta incidencia solar del día; esta puede reducir la temperatura interior por 1.0 a 3.5 °C comparado con el aire del ambiente de 32 a 40 °C y 1 y 1.3 °C si se compara con la célula de control que está entre los 32 °C y los 38 °C. Esparcir agua en el techo en combinación con sistema de chimenea solar es recomendado cuando se presenten altas temperaturas en el aire. Los resultados experimentales en el uso del sistema de chimenea solar unido al esparcimiento de agua puede reducir las temperaturas interiores de 2.0 a 6.2 °C comparada con el aire ambiente y de 1.4 a 3.0 °C comparado con la célula de control.

Los autores señalan que al utilizar el sistema de chimenea solar, durante el periodo de alta radiación solar y alta temperatura, la diferencia entre la temperatura y el aire a la entrada de la chimenea y la temperatura del aire a la salida del sistema tiende a disminuir. Esparcir agua en el metal de las celdas no solo disminuye la temperatura, la diferencia también se evidencia en el aire de la sala de la chimenea solar.

1.4 Sistemas activos de deshumidificación

Jain et al (1995) realizaron estudios de sistemas de deshumidificación con desecantes sólidos, para mejorar las condiciones de confort en ciudades de la India a través de simulación por computadora. Los autores concluyen que el ciclo de Dunkle es el óptimo para aplicar en procesos de deshumidificación. Teniendo en cuenta este antecedente es importante incluir un estudio de simulación por computadora, sin embargo, Jain et al (1995) no mencionan el tipo de desecante que utilizaron para las simulaciones.

Yadav et al (2012) proponen la regeneración y adsorción para la producción de aire seco utilizando distintos desecantes como el gel sílice, alúmina activada y carbón activado. Para regenerar el aire los autores utilizaron el calentamiento de colectores solares en tubos de vacío. Las temperaturas en las cuales se regeneraron los desecantes fueron de 54.3 a 68.3 °C. El mejor desempeño en cuanto a la regeneración lo tuvo el gel de sílice, el mejor desempeño y absorción fue el material de carbón activo y alúmina activada.

Es necesario conocer otros procesos para remover la humedad del aire. Sánchez (2002) describe estos procesos: *“Por enfriamiento, hasta alcanzar una temperatura por debajo del punto de rocío, por el incremento de la presión total, lo cual causa la condensación, y por último poner un desecante con el aire, con lo cual la humedad del aire migra hacia el desecante, impulsado por las diferencia en las presiones de vapor entre el aire y el desecante”*.

La investigación *“Performance of a solar liquid desiccant air conditioner–An experimental and theoretical approach”*, de Alizadeh (2007), muestra los resultados de estudios de deshumidificación utilizando un desecante líquido como acondicionador de aire en el clima tropical de Queensland, Australia. El sistema utilizó polímero intercambiador de calor de placas

para la deshumidificación/enfriamiento evaporativo indirecto y un cojín de enfriamiento como enfriador evaporativo directo para el aire seco. La autora utilizó cloruro de litio, un desecante eficaz para deshumidificar el aire, así mismo, como regenerador de aire empleó un artefacto que concentra la solución diluida del deshumidificador con el uso de agua caliente de colectores solares de placa plana. Los datos obtenidos del funcionamiento del solar LDAC, que opera en un sitio comercial de Brisbane, se compararon con un modelo que se desarrolló previamente para el PPHE (Polímero intercambiador).

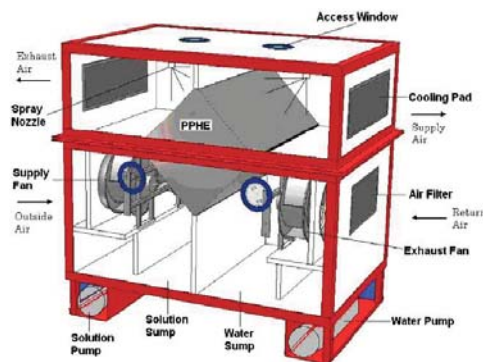


Fig. 1. Three dimensional view of the LDAC absorber unit.

Fig. 25. Configuración LDAC. Fuente: Alizadeh (2007)

Alizadeh (2007) desarrolló una unidad de absorción que deshumidifica y enfría el aire exterior a través de un desecante líquido y enfría el aire desde el espacio acondicionado. Una vista tridimensional de la unidad muestra los principales componentes del sistema

Las dimensiones totales son 1,30 m de largo por 1,5 m de ancho por 1.8 m de alto. El material utilizado para el acondicionador fue fibra de vidrio con aislamiento suficiente para proteger el sistema de transferencia de calor con el medio ambiente para la carcasa. La cama polímero de intercambio de calor (PPHE) fue posicionada horizontalmente dentro de la unidad e inclinada en un ángulo de 45 grados a lo largo de su eje longitudinal. Los sumideros de agua y de soluciones tuvieron una capacidad de 300 L cada uno y se ubicaron en la parte inferior de la unidad, estos recogieron y almacenaron el agua y la solución desecante desde el PPHE y el regenerador.

Una bomba centrífuga y una bomba magnética de impulsión hicieron circular la solución y el agua a través de la PPHE. Cuatro ventiladores centrífugos fueron situados sobre el suministro y retorno de los lados de la unidad que transportó el aire del exterior y lo devolvió a través del PPHE en contracorriente con respecto al flujo del líquido.

Seis boquillas de pulverización fijas se encontraron en los colectores horizontales en la parte superior de PPHE, rociaron la solución y el agua en el exterior devolvió el aire respectivamente. Un panel de refrigeración (por evaporación directa más frío) localizado al lado de la unidad enfrió y humidificó el aire seco tras el proceso de deshumidificación dentro de la PPHE. La almohadilla actuó como filtro para evitar el arrastre de las partículas de desecante al espacio acondicionado. Los filtros de aire se utilizaron en la entrada del acondicionador en los lados de la oferta y de retorno para evitar que el polvo y los contaminantes entraran en la unidad.

La unidad se instaló en la oficina de ingeniería de un sitio comercial en Brisbane, con el fin de examinar su rendimiento y las condiciones del aire dentro del edificio. El área de aire acondicionado era de aproximadamente 120 m² con diez ocupantes, cinco computadoras y una carga máxima de enfriamiento aproximadamente 10 kW, en condiciones de verano. El sistema proporcionó 100 % de aire fresco a la construcción, que, sobre la base de 10 cambios de aire por hora y una altura de techo de 3 m, el aire de suministro total fue de aproximadamente 1,000 L/s. Los termopares y sensores de humedad se utilizaron para controlar el aire seco, la temperatura de bulbo y la humedad relativa dentro del edificio y en la entrada y salida de la unidad. Los termopares fueron calibrados contra un termómetro de resistencia de platino digital

Los resultados experimentales obtenidos a partir de pruebas del prototipo Solar LDAC indican que el sistema tiene un rendimiento satisfactorio en el control de la temperatura y humedad de un sitio comercial de 120 m² de superficie en Brisbane. Las pruebas muestran, además de los estudios experimentales, que el modelo desarrollado previamente para PPHE y la unidad de acondicionador pueden tener una efectividad de aproximadamente 82 % cuando se utiliza con desecante líquido. La energía eléctrica utilizada por el Solar LDAC durante la operación del sistema, medido experimentalmente, fue de 3.5 kW.

Zhang L.Z et al (2001) desarrollaron la investigación: *"Comportamientos de la humedad interior asociados con el enfriamiento para climas cálidos y húmedos"*. Esta es una tecnología de refrigeración y ventilación complementaria que tiene el potencial para proporcionar confort térmico, mejorar la calidad del aire y disminuir el consumo de energía que los sistemas convencionales de aire presentan. Sin embargo, en las regiones cálidas y húmedas existe el riesgo de condensación en los paneles de techo limita su entrada al mercado. Para direccionar este problema, el comportamiento de la humedad interior está asociado con el enfriamiento en los climas cálidos húmedos que son investigados.

Al hablar de una habitación se hace referencia a temperatura, humedad promedio, humedad relativa máxima en las superficies del panel del techo, horas anuales de condensación y consumos anuales de energía. Se consideran, además, los efectos de la infiltración de aire en la noche, las tasas de retorno de aire en el rendimiento de la humedad interior y se discuten las horas anuales de condensación.

Los resultados obtenidos por el software *Accuracy* indican que, previo a la deshumidificación y ventilación, la operación de los paneles de enfriamiento son requeridos para reducir los riesgos de condensación en climas cálidos-húmedos. También se reveló que en una hora se podría eliminar por completo los problemas de condensación.

Este sistema, según los autores, combina la celda de enfriamiento con AHU para deshumidificación de aire y ventilación (CC+AHU). Los procesos de tratamiento de aire se muestran en el diagrama psicrométrico en la figura 26.

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo.

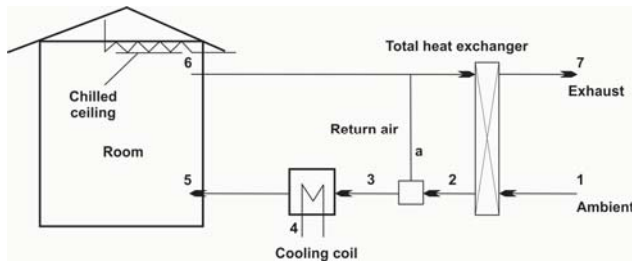


Fig. 26. Configuración AHU (CC + AHU). Fuente: Zhang L.Z. et al (2001).

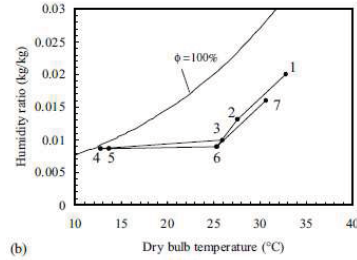


Fig. 1. A system combining chilled ceiling (CC) with air handling units (AHU), (a) schematics and (b) psychrometrics.

En la figura 26 el aire del ambiente comienza en el ventilador de recuperación total, donde se intercambia el calor sensible y la humedad con el aire de escape. El Aire en el estado 2 se mezcla con aire de retorno al estado 3 y es accionado entonces a través bobinas donde se enfría y deshumidifica por la condensación del agua. El aire que pasa por las bobinas se enfría estado 4 (13 °C, y 95 % de humedad relativa en las condiciones de diseño en verano) se bombea a continuación al espacio a través de conductos de aire acondicionado, donde el suministro de aire aumenta la temperatura 1 °C, debido a las ganancias de calor a lo largo del viaje (estado 4-5). La efectividad del calor sensible y latente del calor total recuperado en el ventilador podría ser fácilmente tan alta como 0,7, sin embargo, en simulaciones con sistemas de recuperación de calor son definidos en 0.

Aparte de emplear AHU para deshumidificación del aire, usar desecante para refrigerar (DC) combinado con las celdas de enfriamiento y el sistema de ventilación es una atractiva opción para deshumidificar. En lugar de utilizar electricidad el sistema propuesto usa energía térmica como el gas natural o el calor residual de grado bajo. El esquema de los componentes del sistema y el diagrama psicrométrico se muestra en la siguiente figura:

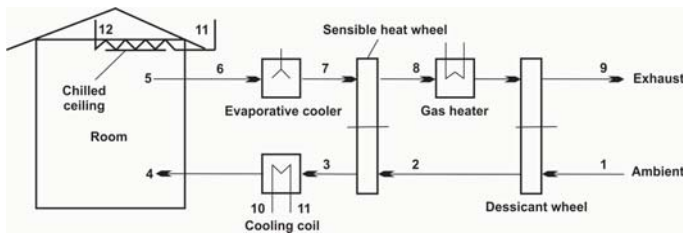


Fig. 27. Configuración AHU (CC + DC). Fuente: Zhang L.Z. et al (2001).

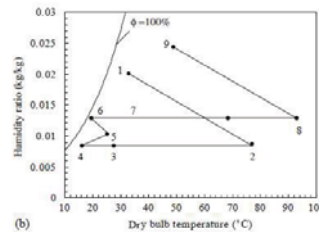


Fig. 2. Chilled ceiling with desiccant cooling, (a) schematics and (b) psychrometrics.

Los autores señalan que los paneles refrigerantes están equipados para extraer el calor sensible y el sistema de enfriamiento desecante con el propósito de deshumidificar. El aire del ambiente exterior, estado 1 entra en el conducto de aire de suministro, este aire pasa a través de una rueda desecante, el aire sale seco y caliente estado 2. Este aumento de temperatura se debe al calor que se desprende en la adsorción por la transferencia de calor sensible. El calor seco se reserva y se transfiere, mucho de este calor se devuelve a la corriente de aire en el proceso 2-3 envueltos en una rueda de calor.

A diferencia de un enfriamiento desecante de uso común, donde el aire en estado 3 se enfría por evaporación al estado 4, en este sistema el aire cálido y seco en el estado 3 es enfriado por

un serpentín de refrigeración a alrededor de 18 °C, para mantener la sequedad del aire de suministro en estado 4.

El aire frío y seco en el estado 4 se distribuye luego a la habitación. Después de aceptar la carga latente del edificio y una pequeña cantidad de la carga sensible, el aire a continuación vuelve al sistema desecante a través de los conductos de aire de retorno. Este es el estado del aire que corresponde al Estado 5. Este aire es un poco fresco, bastante seco se enfría por evaporación a una temperatura tan baja como sea posible en el estado 6. Para remover la humedad el aire es precalentado por la rueda rotativa (estado 7) mientras se enfría el suministro de la corriente de aire.

El estado 7 es donde la humedad del aire entra en la bobina de calentamiento. El aire húmedo caliente entra en 8 y se regenera en la rueda desecante. El aire caliente muy húmedo es agotado a los alrededores estado 9. En este sistema combinado la temperatura de evaporación es tan alta como 15 °C para enfriar el agua, lo que significa un COP más elevado.

Los autores hacen un análisis sobre la humedad relativa: la distribución de la humedad relativa interior durante las horas de trabajo se muestran en la Fig. 21 para los casos 1, 3 y 4. El caso 2 tiene las mismas tendencias de humedad con el caso 1. La zona óptima es de 40 % a 60 % y 50 % es ideal para la evitar los peligros de los hongos, las bacterias, los virus, dificultades respiratorias de los ocupantes. La figura muestra que todo el aire del sistema tuvo las horas medias anuales en la región de comodidad y cuenta con el mayor número de horas ya sea en el periodo seco (<40 %) o en el periodo húmedo (>60 %). La celda de enfriamiento combinada con enfriamiento desecante controla la humedad en el interior: el 90 % de las horas anuales de funcionamiento está en la región óptima.

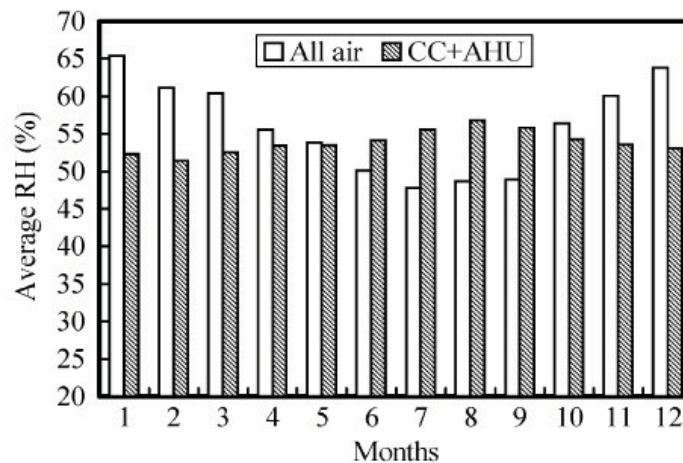


Fig. 28. Comportamiento de la humedad relativa para los 12 meses del año Sistema CC + AHU Fuente: Zhang L.Z. et al (2001).

Ríos (2013) realizó la investigación *“Diseño y análisis de un sistema cuasi-pasivo para la deshumidificación de espacios”*. Este sistema desecante consta de una placa formada de sílica gel de ½ kilogramo, que absorbe el vapor de agua del aire a través del proceso de fisorción, el proceso funciona en las noches: el aire de la habitación es tomado por medio de un ventilador y es dirigido hacia la placa desecante la cual absorbe el vapor de agua, este aire a la salida de la

placa se regresa a la habitación con su cantidad de agua reducida, para mezclarse con el aire del interior.

Este ciclo propicia que la humedad se reduzca con condiciones más cercanas a la zona de confort para esta región. Para regenerar el sistema el autor describe el proceso de regeneración del sistema que se realiza en las mañanas, se retira el agua que contiene la placa desecante, en esta parte el aire es tomado del exterior y calentado por el sol que entra a la cama desecante y absorbe el agua contenida allí.

El autor validó la hipótesis de manera positiva con un modelo matemático. Entre sus recomendaciones se destaca comparar la propuesta con diferentes tipos de desecantes sólidos y determinar cuál de estos puede funcionar mejor, así como realizar un estudio económico de la inversión y compararla con la parte de energía eléctrica.

Los sistemas de deshumidificación, estudiados hasta este punto, indican que son sistemas dinámicos no estáticos, en varios de ellos se deben tener en cuenta leyes de termodinámica para su correcto funcionamiento, se observa a través de la lectura que la responsabilidad de deshumidificar un espacio no está sujeta a un solo elemento, se deben conocer los ciclos de enfriamiento. La descripción del ciclo de enfriamiento con desecantes sólidos la realiza Sánchez (2002) a través del *ciclo de Pennington* o *de ventilación*, este ciclo se toma como base para el planteamiento del experimento de este trabajo. En la figura se observa su funcionamiento:

El sistema toma aire del ambiente (1) y es enviado al deshumidificador rotativo que utiliza desecantes sólidos, donde se absorbe la humedad contenida en el aire. La temperatura del aire aumenta debido a la energía liberada durante el proceso de adsorción. El aire que se introduce al espacio acondicionado se enfría primero sensiblemente en un intercambiador de calor rotativo (2) y luego evaporativamente (3). El aire que sale del cuarto es enfriado evaporativamente (5), entonces pasa a través del intercambiador de calor sensible donde recupera calor de adsorción del aire de suministro (6). Luego se calienta con energía térmica de bajo grado (7) y el aire caliente resultante se usa para regenerar el desecante (8).

Otro ciclo que describe el mismo autor se denomina *Ciclo de Recirculación*, el cual funciona de la misma manera que el ciclo de ventilación, pero se diferencia porque el aire se recircula a través del deshumidificador y otros componentes. Se usa aire ambiente para la regeneración y luego es liberado.

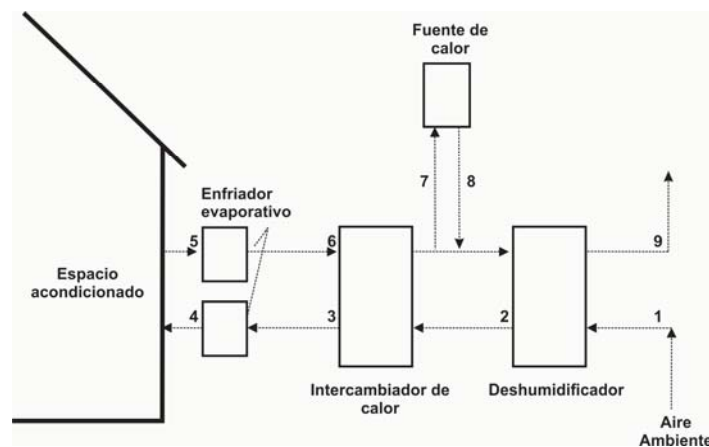


Fig. 29. Ciclo de Pennington. Fuente: Sánchez (2002).

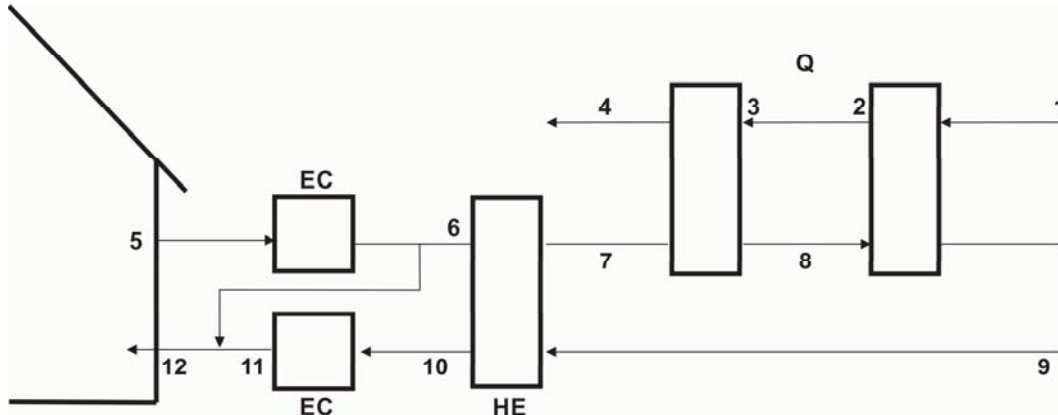


Fig. 30. Ciclo de Dunkle. Fuente: ASHRAE (2009).

Es necesario conocer sobre el *ciclo de Dunkle* que menciona Jain et al (1995), pero lo describe Collier et al (1981), el cual combina las ventajas termodinámicas de los ciclos de recirculación y ventilación. El ciclo mantiene la temperatura fría del disipador inferior a través de la ventilación como ocurre en el ciclo de recirculación, su rendimiento depende de un intercambiador de calor adicional, esto puede incrementar el costo y la complejidad, adicionalmente de los cambios de calor sensible. Como en el ciclo de recirculación, la falta de control de aire fresco dentro del espacio puede ser una desventaja.

Al analizar los ciclos de termodinámica es necesario tener en consideración lo siguiente: durante el proceso en que el aire entra al contacto con el desecante se incrementa la temperatura, por lo que se debe incluir esta variable para mantener el confort en el espacio que se va a evaluar.

1.5. Tecnologías para la refrigeración solar

Según López (2010), los procesos de refrigeración solar se clasifican en función de la forma en que se recoge la energía solar:

1. Generación de electricidad mediante módulos fotovoltaicos que generan electricidad y accionan un equipo eléctrico. Otro aspecto es la compresión mecánica y ciclo termoeléctrico Peltier.
2. Sin generación de electricidad se produce energía térmica a baja o media temperatura mediante colectores solares. Existen varias tecnologías para refrigerar entre ellas se encuentran: adsorción, Sistemas de refrigeración evaporativa con desecante, absorción.

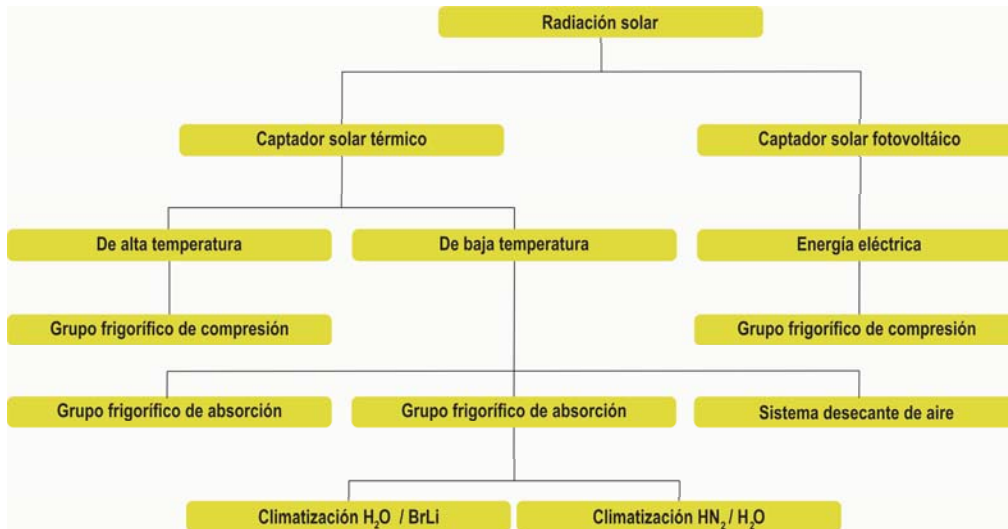


Fig. 31. Tecnologías para la refrigeración solar. Fuente: López (2010)

Refrigeración por compresión mecánica:

Se produce electricidad solar para su uso en enfriamiento por compresión mecánica, fuente de energía placa solares.

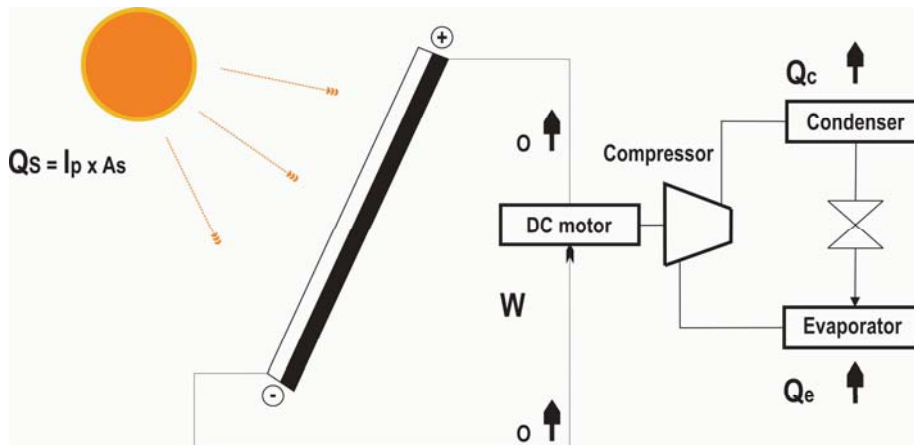


Fig. 32. Refrigeración por compresión mecánica. Fuente: López (2010)

En el diagrama anterior se presenta el ciclo teórico de producción de frío solar mediante compresión mecánica, hay que anotar que no se conoce ningún ejemplo de aplicación de esta tecnología para la obtención de frío a partir del sol.

Ciclo termoeléctrico Peltier

Las celdas Peltier se pueden utilizar en un sistema de refrigeración que utilice energía de la red eléctrica, como energía solar:

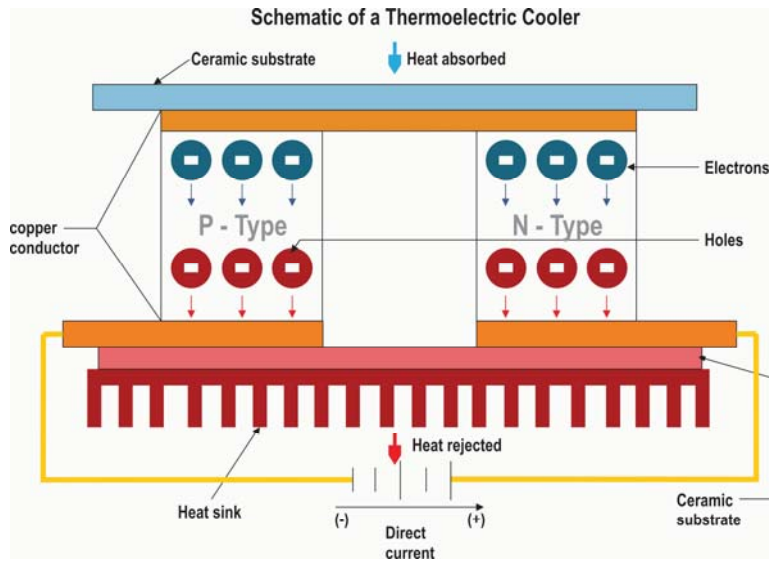


Fig. 33. Celda de Peltier. Fuente: López (2010)

Este dispositivo funciona como bomba de calor entre dos placas, de manera que absorbe calor por una, enfriando el ambiente que le rodea, y lo disipa por la otra. El efecto final es que una placa se enfría y la otra se calienta. Estas placas están unidas por cerámicas semiconductoras especiales que tienen un efecto Peltier. Cuando se hace circular corriente continua en una dirección, el calor se transporta de una placa a la otra, como se muestra, pero si se invierte la polaridad, se invierte la dirección del tránsito del calor. Esta posibilidad de intercambiar la placa fría y caliente, hace que las neveras, construidas con refrigeración Peltier, funcionen lo mismo como calentadores que como refrigeradores con solo invertir la polaridad de alimentación eléctrica.

Los componentes son:

- *Tarjeta electrónica*: está conectada a las placas solares y es la encargada de proporcionar energía a la celda Peltier y a los ventiladores.
- *Celda Peltier*: las placas cerámicas que están dispuestas en ambas caras llevan pistas de cobre que permiten unir los semiconductores eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo. Por un lado se produce frío y por el otro, calor.
- *Disipador de calor*: se utiliza para eliminar el exceso de calor que se produce en una de las caras de la celda.
- *Ventiladores externos*: se emplean para aumentar la transferencia de calor entre la cara caliente de la celda y el aire, en este caso, para refrigerar.
- *Disipador del lado frío*: transfiere el frío que se produce en una de las caras de la celda disipándolo al aire que se encuentra contenido en el termo de la nevera.
- *Ventilador interno*: se utiliza para aumentar la circulación de aire dentro de la nevera, básicamente para refrescar.

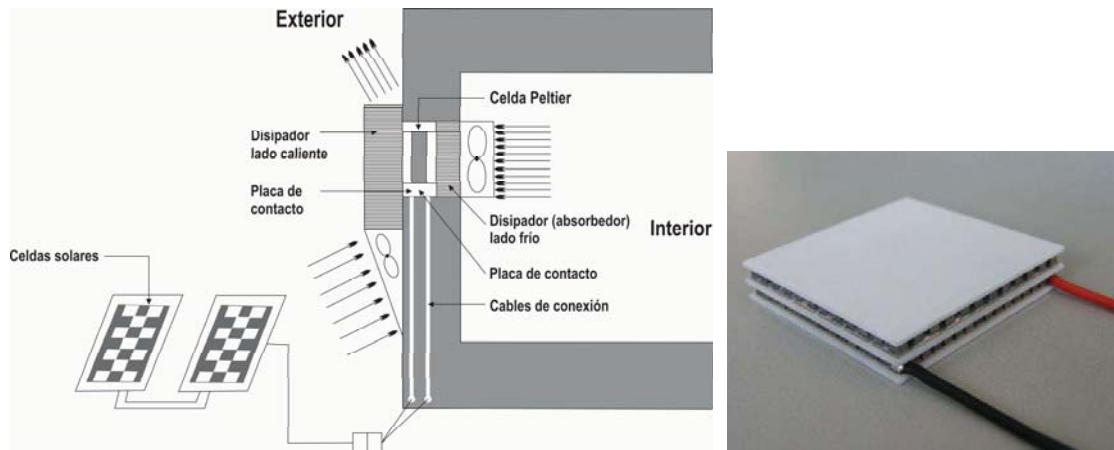


Fig. 34. Celda de enfriamiento. Fuente: López (2010).

1.6 Zeolitas como solución a la problemática del confort en el clima cálido húmedo.

Sánchez (2002) describe distintos procesos para remover la humedad del aire: por enfriamiento, hasta alcanzar una temperatura por debajo del punto de rocío, por el incremento de la presión total, lo cual causa la condensación, y por último poner un desecante con el aire, con lo cual la humedad del aire migra hacia el desecante, impulsado por las diferencia en las presiones de vapor entre el aire y el desecante.

Los desecantes pueden ser clasificados como: absorbentes que retienen la humedad sin experimentar cambios químicos o físicos, o los que absorben la humedad acompañado por cambios físicos o químicos. Por ejemplo, la sílica gel es desecante sólido y absorbente, contiene numerosos poros y capilares en los que el agua es condensada y contenida. La sílica gel tiene una alta capacidad de absorber la humedad y puede regenerarse si se somete a una alta temperatura. Es de bajo costo y disponible en tamaños desde 3/16 pulgadas.

Entre los sólidos adsorbentes se encuentran las zeolitas, Sánchez (2002) menciona que este tipo de adsorbentes atrae la humedad debido al campo eléctrico en la superficie del desecante. Cronstedt, (citado por Olguín) descubrió el mineral stilbita, este perdió agua cuando se calentó con una llama de soplete, un proceso conocido actualmente como “intumescencia”, él llamó a dicho mineral “zeolita”. Se considera como uno de los grupos de minerales más abundantes sobre la Tierra. Las zeolitas pertenecen a la familia de los tectosilicatos y son aluminosilicatos cristalinos, con elementos de los grupos I y II como cationes. Consisten en un armazón de tetraedros de $[\text{SiO}_4]^{4-}$ y $[\text{AlO}_4]^{5-}$ conectados el uno al otro en las esquinas por medio de átomos de oxígeno.

En sus investigaciones, Olguín³ menciona que la estructura de la zeolita presenta canales y cavidades de dimensiones moleculares en las cuales se encuentran los cationes de compensación, moléculas de agua u otros adsorbatos y sales. Este tipo de estructura microscópica hace que las zeolitas posean una superficie interna extremadamente grande, entre 500 y 1000 m²/gr, con relación a su superficie externa. La microporosidad de estos sólidos es abierta y la estructura permite la transferencia de materia entre el espacio intracrystalino y el medio que lo rodea.

Según Breck (1974) citado por Olguín (2002) las zeolitas son caracterizadas por las siguientes propiedades:

- Alto grado de hidratación.
- Baja densidad y un gran volumen de vacíos cuando es deshidratado.
- La estabilidad de su estructura cristalina cuando se deshidrata.
- Las propiedades de intercambio del catión.
- Presenta canales moleculares uniformes clasificados en los cristales deshidratados.
- Por su habilidad de absorber gases y vapores.
- Por sus propiedades catalíticas.



Fig. 35. zeolita. Fuente: www.zeolitech.com.

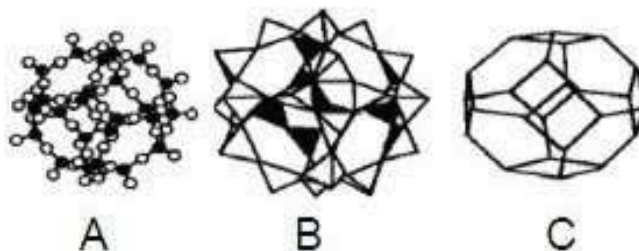


Fig. 36. Estructura típica de la zeolita. Fuente Sánchez (2002)

Todas las zeolitas son consideradas como tamices moleculares, que son materiales que pueden absorber selectivamente moléculas con base en su tamaño, pero no todos los tamices

³ Olguín, Gutiérrez María Teresa (2002) *Zeolitas características y propiedades*. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México, D. F. México

moleculares son considerados como zeolitas, ya que también el carbón activado, las arcillas activadas, la alúmina en polvo, y la sílice en gel se consideran como tamices moleculares. Breck (1974) (citado por Olguín) menciona las propiedades físicas, propiedades químicas y propiedades de adsorción de la zeolita.

Las propiedades físicas deben de considerarse de dos formas: (a) primero una descripción mineralógica, desde el punto de vista de sus propiedades naturales, incluyendo la morfología, hábitos del cristal, gravedad específica, densidad, color, tamaño del cristal o grano, el grado de cristalización, resistencia a la corrosión y abrasión. (b) El segundo desde el punto de vista de su desempeño físico como un producto para cualquier aplicación específica, tomando en cuenta las características de brillantes, color, viscosidad de Brookfield, viscosidad de Hércules, área superficial, tamaño de partícula, dureza, resistencia al desgaste.

La caracterización de cualquier zeolita siempre incluye la descripción básica de sus características mineralógicas y una evaluación al cambio con el efecto con la humedad, las cuales son consideradas para las aplicaciones comerciales específicas.

Propiedades químicas de las zeolitas

Las aplicaciones de las zeolitas naturales hacen uso de una o más de sus propiedades químicas, que generalmente incluyen: el intercambio de iones, adsorción o deshidratación y rehidratación. Estas propiedades están en función de la estructura del cristal de cada especie, y su estructura y composición catiónica. Mumpton (1999) describe estas propiedades de la siguiente manera:

Propiedades de adsorción de las zeolitas

Las zeolitas cristalinas son los únicos minerales adsorbentes. Sus grandes canales centrales de entrada y sus cavidades se llenan de moléculas de agua que forman las esferas de hidratación alrededor de dos cationes cambiables. Si el agua es eliminada y las moléculas tienen diámetros seccionales lo suficientemente pequeños para que pasen a través de los canales de entrada son fácilmente adsorbidos en los canales deshidratados y cavidades centrales. Las moléculas demasiado grandes no pasan dentro de las cavidades centrales y se excluyen dando origen a la propiedad de tamiz molecular.

Propiedad de intercambio de cationes: Se puede describir como la sustitución de los iones de sodio de las zeolitas faujasitas por cationes de otros tamaños y otra carga. Esta es una de las características esenciales de las zeolitas. En efecto, así se consiguen modificar considerablemente las propiedades y ajustarla a los usos más diversos.

Las especificaciones de la zeolita dependen de sus usos y varían ampliamente debido a la gran gama de productos de zeolita natural y variedades que existen en el mercado. La sociedad americana para materiales y pruebas (ASTM) ha establecido métodos, pruebas y especificaciones estándares para la zeolita en los Estados Unidos.

Las especificaciones y pruebas en Europa y en Japón se hacen conjuntamente por las compañías productoras. Los productores de zeolita dividen de dos maneras las especificaciones: la venta del mineral con base en especificaciones negociadas con el comprador, o la venta del mineral con base en una línea de productos, donde cada producto de zeolita tiene una designación de nombre o número con especificaciones físicas o químicas. Los productos de la zeolita se venden

usualmente con un nombre comercial en lugar de una variedad de mineral. Por ejemplo, la clinoptilonita.

Según la EPA (US Environmental Protection Agency), las regulaciones ambientales para la zeolita varían entre los estados y condados en Estados Unidos y esto puede ser una fuente de conflicto entre los inspectores del gobierno y los operadores encargados del minado. Las zeolitas naturales son relativamente inocuas y no presentan problemas ambientales particulares, con tres excepciones:

- Varios minerales de zeolita tienen formas fibrosas y pueden comportarse como materiales de asbesto.
- Los cristales de silicio fino se generan usualmente en depósitos de zeolita y los productos finos pueden ser respirados (0.1 %).
- El minado de la zeolita y las plantas procesadoras secas tienden a generar polvos, ocasionando problemas en la calidad del aire.

El polvo generado en la planta y el minado pueden considerarse como un contaminante ambiental local. La mayoría de las zeolitas contienen sílice en forma de sílice amorfa o cristalina. Las plantas procesadoras pueden, por lo tanto, requerir de un sistema eficiente para controlar la contaminación del aire, que van desde la norma Benhouse, en donde se utilizan colectores de polvo a precipitadores electrolíticos para minimizar la exposición de los trabajadores con estos polvos en el almacén del mineral o en los molinos, y para cumplir con los requerimientos locales de control de calidad del aire. La mayoría de las zeolitas se producen usando métodos secos. El procesamiento de las zeolitas se inclina inevitablemente hacia procesos de lavados con agua y métodos húmedos de clasificación, requiriendo para esto un estanque de desperdicio o presa de jales y una manipulación apropiada de la planta.

Los minerales de zeolita son considerados generalmente por ser químicamente inertes y la mayoría no es fibrosa. La erionita se establece como un mineral fibroso, mineral a circular y puede ser marcada como un posible cancerígeno con base en los estudios médicos, la modestia es también un mineral fibroso, pero no es remarcado como un cancerígeno potencial.

Las zeolitas naturales son vendidas como productos triturados y cribados, finalmente como pulverizados o micronizados a productos ultrafinos. El producto triturado y cribado de estos materiales es de bajo costo y es usado en aplicaciones simples como: acondicionamiento de suelos o como vivienda de animales domésticos, que toleran un equitativo y amplio rango de tamaño de partícula. Muchas zeolitas son trituradas, pulverizadas y clasificadas en un rango de tamaño de -60 a +325 mallas, de tal manera que pueden ser utilizadas en productos muy finos, de 5 a 10 mm, y productos ultrafinos como el papel filtro que llega a ser de 1 mm.

Los usos de la zeolita son los siguientes:

- En la agricultura como acondicionador y fertilizante de suelos.
- En la nutrición de animales. Da eficiencia en el desarrollo del ganado haciendo decrecer el agua amoniacal en el sistema digestivo (la clinoptilonita).
- Acuicultura.
- Catálisis y refinado del petróleo.
- Gasificación del carbón.
- Separación de gases.

- Intercambio iónico.
- Purificación del gas natural

1.7. Arquitectura y zeolita

Gómez (2013) realiza la tesis: *“Evaluación de la zeolita como desecante aplicado a la arquitectura del clima tropical cálido-húmedo”*. Este estudio se centró en evaluar las propiedades desecantes de la zeolita, también conocida como clinoptilolita, como material desecante interior en un espacio arquitectónico. El principio que se planteó, consistió en aprovechar su propiedad de absorción de agua, para ello realizó un estudio experimental y comparativo de su comportamiento, a través de once experimentos en diferentes épocas del año entre dos módulos construidos en bloque de concreto de 1m³ de volumen, en uno de los cuales se utilizó el desecante mencionado, experimentando con 2 kg, 4 kg y 6 kg. Estos módulos se encuentran en la ciudad de Culiacán, Sinaloa, al noroeste de la República Mexicana.

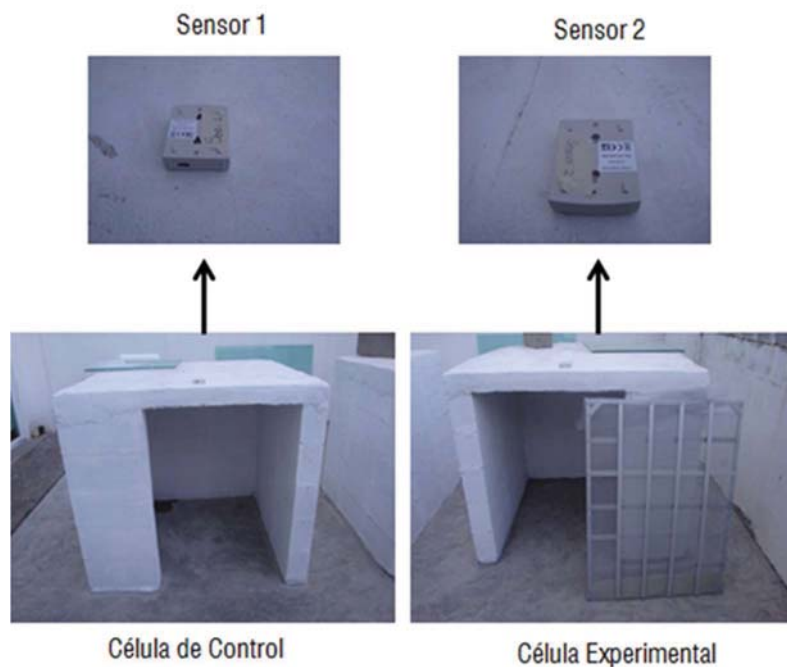


Fig. 37. Sistema experimental donde se prueba la zeolita en la arquitectura del clima tropical cálido-húmedo.
Fuente: Gómez (2013)

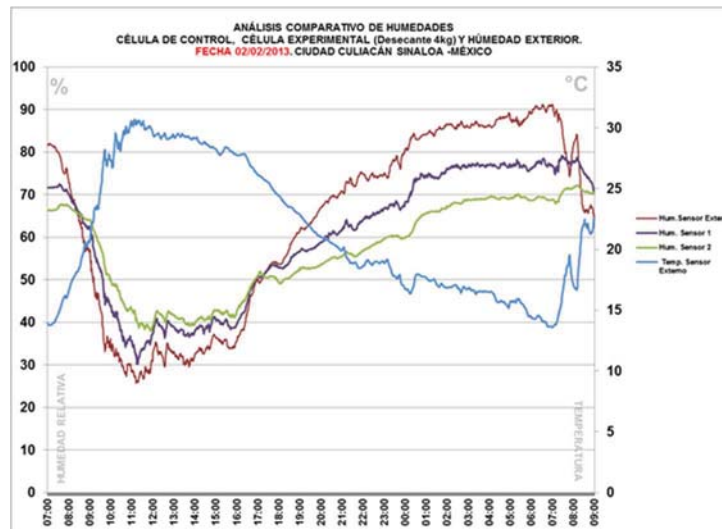
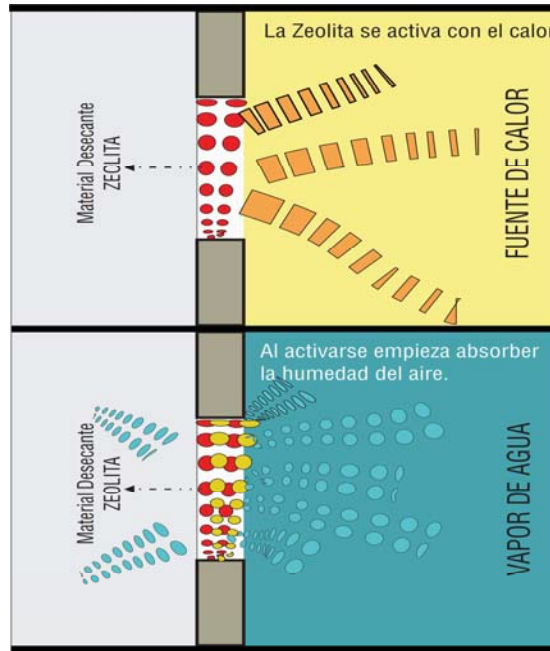


Fig. 38. Comportamiento de la zeolita en la parte experimental. Fuente: Gómez (2013).

Para activar las propiedades de la zeolita, el aire entra a través del exterior allí el desecante produce una atracción de las moléculas de aire a través de sus microporosidades. Para el experimento se pensó en calentar la zeolita, a través de un sistema mecánico, y en otra etapa se buscó aprovechar el calentamiento solar hasta llegar a la temperatura que las lecturas recomiendan 45-60°C (Sánchez 2002), con el fin de activar sus propiedades desecantes. El flujo de aire viaja al interior de la célula a través de un tamiz de zeolita y satura el interior del módulo de experimentación con aire menos húmedo que el aire exterior.

Finalmente la investigación arrojó datos de temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo, humedad relativa, y temperatura radiante, que fueron comparados entre ambos módulos y el exterior. También se realizó un análisis comparativo entre datos de humedades absolutas y valores de sensación térmica donde se concluye el beneficio en la disminución de la humedad relativa interior debido al uso de la zeolita como desecante, sin embargo, la autora

enfatisa en sus conclusiones sobre la responsabilidad de generar un ambiente confortable interior, no puede estar sujeto al uso de un solo material, pues para garantizar un confort higrotérmico interior se debe tener en cuenta las propiedades térmicas de los materiales con que se construye, la orientación, el tipo de aberturas, la geometría y los efectos del paisaje.

CERTIFICADO DE CALIDAD ZEOLITECH 2

Mineral: Zeolita tipo Clinoptilolita

Tamaño: 10x30 [IN-010] - 25% máximo finos

Adsorción de micotoxinas:

Aflatoxinas (AF1):	95%
Ochratoxinas (OA):	95%
Zearalanona (ZEARA):	75%
T2:	75%

Humedad: **RETIENE HASTA el 42%** de su peso en agua

Color: Crema a verde claro

Dureza: 3.5 Moh's

CONTACTO

Priv. Bugambillas No. 121 - 2, Col. Belavista
Cuernavaca, Morelia
62140 México
Tel/Fax 01 777 243 9779
Tel: 01 777 241 7595
Página web: <http://www.zeolitech.com.mx>

Ventas:
Andrea Isolina Legarreta
Cel: 044 777 107 0455
alegarreta@zeolitech.com.mx
ventas@zeolitech.com.mx

Priv. Bugambillas No. 021-012, Col. Belavista, Cuernavaca, Morelia, 62140
+52 (0) 777 243 9779 - 777 241 7595
www.zeolitech.com.mx
Copyright © 2013 - Zeolitech

Fig. 39. Propiedades de la zeolita comercial encontrada en México. Fuente: www.zeolitech.com

2. Objeto de Estudio

2.1 Propuesta diseño experimental

Con el fin de conocer las ganancias por calor en los muros de block hueco de concreto en sus diferentes orientaciones, se realizó el cálculo teórico de la *temperatura sol- aire*, para distintos meses del año en la ciudad de Culiacán, Sinaloa; para ello se analizó un modelo teórico de 1 m³ (1 m de alto x 1 m de ancho x 1 m de largo), cuyas paredes son de block hueco de concreto y la cubierta se proyectó también en concreto.

Este análisis fue posible gracias a que se obtuvieron registros climáticos anuales en sitio cada 10 minutos de: temperatura, humedad relativa, radiación solar global, y velocidad de viento, de la estación climatológica de la *Escuela de Biología* de la Universidad Autónoma de Sinaloa en la ciudad de Culiacán, a cargo del Mtro Rogelio Sánchez Bañuelos y el M. I. Bladimir Salomón Montijo. Estos datos se monitorearon en el año 2014 y 2018, por medio de la estación automatizada *ADCON Telemetry* de fabricación austriaca.



Fig. 40. Estación climatológica Facultad de Biología Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa.
Fuente: <http://www.uas.edu.mx/servicios/clima/>

2.1.1 Cálculo *temperatura sol-aire* para un modelo teórico, construido en block hueco de concreto. Caso: Culiacán – Sinaloa.

“Temperatura sol-aire es una variable que se utiliza para calcular la carga de refrigeración de un edificio y determinar la ganancia total de calor a través de las superficies exteriores”.

$$T_{s/a} = t_{amb} + (HT * \alpha) / h_o - DR * E / h^o$$

T_{amb}: Temperatura ambiente (°K)

HT: Radiación Solar (w/m²)

α: Absortancia (%)

h_o: Coeficiente de convección + Coeficiente de radiación

DR: Emisión infrarroja de onda larga de la superficie. Para superficies verticales DR=0

E: Emitancia de las superficies (%)

Teniendo en cuenta las propiedades térmicas y ópticas del block, se aplicó esta ecuación a la geometría de un módulo de estudio, de 1 m³ de block de concreto, para evaluar la ganancia de calor a través de sus superficies, durante los doce meses del año por las 24 horas del día en la ciudad de Culiacán, Sinaloa.

Cálculo temperatura sol-aire fachada *muro Este*

Las ganancias de temperatura se presentan a lo largo de la mañana, los valores más altos se registran en los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre. En este periodo, las temperaturas van desde los 45 a los 50 °C, alrededor de las 09:00 h y las 10:00 h; conforme se va acercando el mediodía la temperatura en la superficie disminuye. Las temperaturas mínimas se presentan en las primeras horas de la mañana, van desde los 15 °C en enero, hasta los 27 °C en junio. Los meses donde la superficie registra menos ganancias son enero y marzo, allí las máximas temperaturas se observan entre los 30 y los 35 °C.

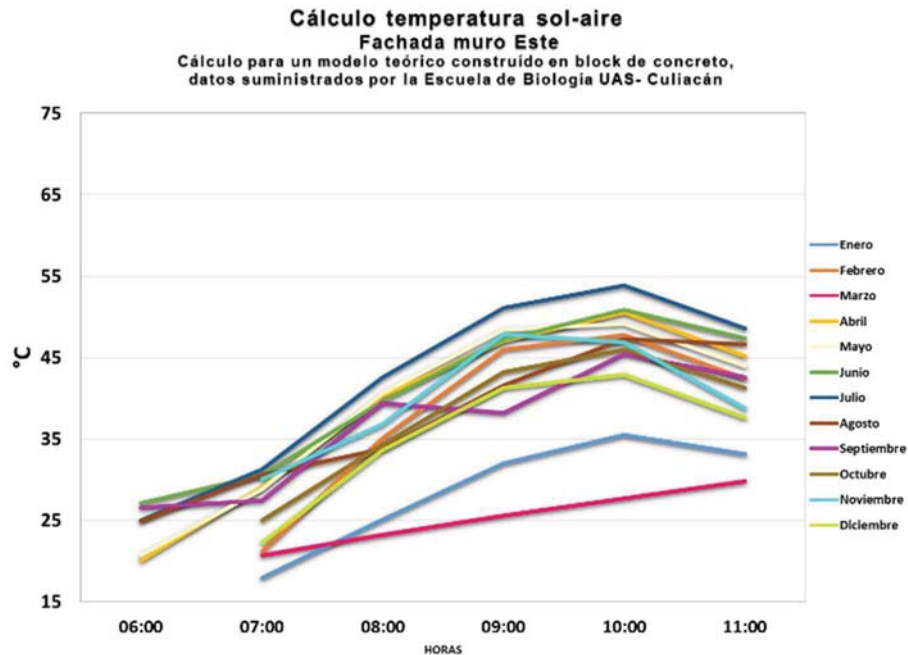


Fig. 41. Cálculo anual de temperatura Sol- Aire, fachada muro Este. Fuente: Propia.

Cálculo temperatura sol-aire fachada *muro Oeste*

Desde las 14:00 h hasta las 18:00 h de los 365 días del año, esta fachada está en dirección nort-sur y recibe ganancias importantes. En los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre las temperaturas mínimas inician en los 45 °C, sin embargo, en los meses de julio, agosto y mayo, la temperatura mínima se acerca a los 55°C (10 grados arriba). En estos meses de mayor ganancia, la temperatura más alta puede llegar a los 70 °C; mientras que en los meses de julio, octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo las ganancias se reducen. Las mínimas se presentan desde los 25 hasta los 35 °C al inicio de la tarde, las máximas

temperaturas que se presentan están entre los 35 y 45 °C y se dan entre las 15:00 h y las 16:00 h, a partir de allí la temperatura disminuye y puede llegar hasta los 20 °C.

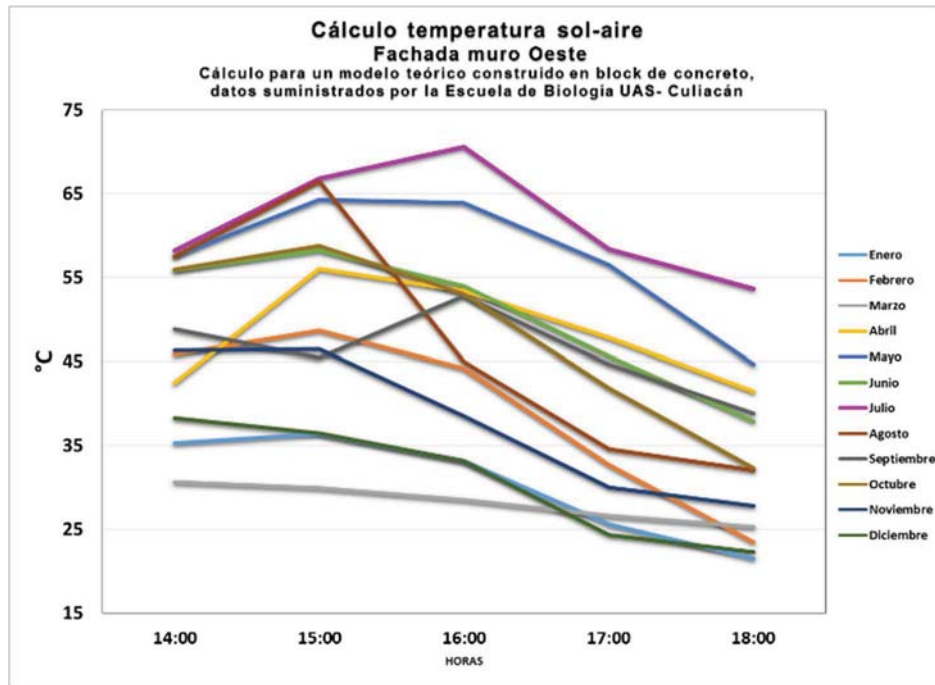


Fig. 42. Cálculo anual de temperatura Sol- Aire, fachada muro Oeste. Fuente: Propia.

Cálculo temperatura sol- aire fachada *muro Sur*

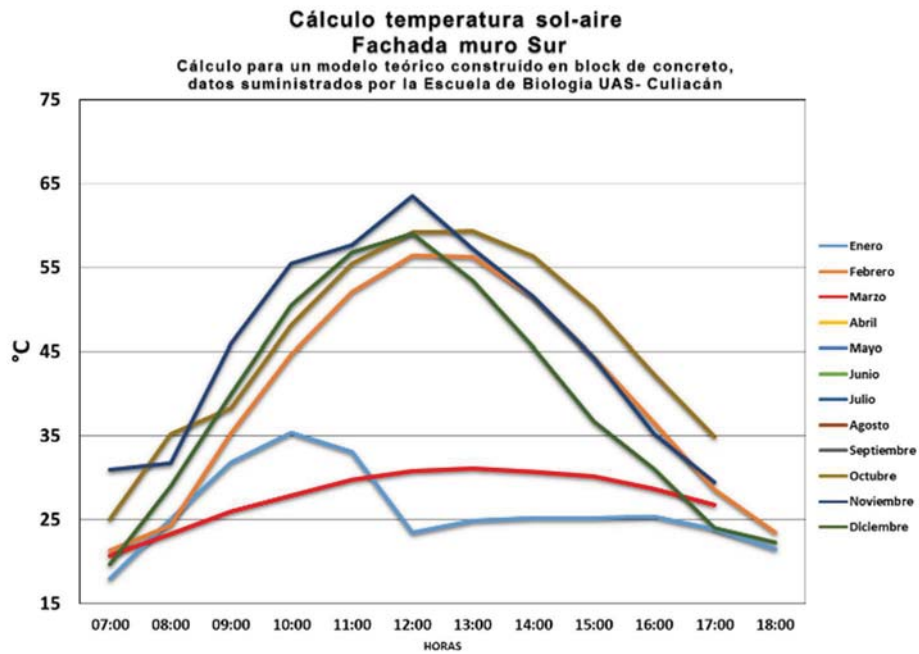


Fig. 43. Cálculo anual de temperatura Sol- Aire, fachada muro Sur. Fuente: Propia.

En esta fachada se tienen ganancias durante 6 meses: de enero a marzo y de octubre a diciembre. Las ganancias se dan a lo largo de todo el día. En el primer trimestre del año las ganancias van de un mínimo que ronda los 20 °C, se incrementan a lo largo del día hasta alcanzar su máximo alrededor de las 12:00 h. En enero y en marzo las temperaturas máximas llegan a los 30 °C, mientras que en febrero se incrementan y la superficie llega a los 55 °C. De octubre a diciembre, los valores aumentan con respecto al primer trimestre y se aprecia el mes con mayor ganancia solar: noviembre. En este mes se evidencia una mínima de 30 °C que van incrementándose hasta llegar a los 60 °C, luego de su máximo pico disminuye a los 35 °C, alrededor de las 18:00 h. Los meses de diciembre y octubre tienen valores semejantes: mínimas cerca de los 20 °C y máximas cercanas a los 58 °C, los valores en estos meses finalizan con temperaturas entre los 30 y los 25 °C.

Cálculo temperatura sol-aire fachada *muro Norte*

Abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre son los meses en los que recibe radiación solar directa. En abril tiene las menores ganancias: van de un mínimo de 20 °C hasta un máximo de 24 °C. En junio se presentan mayores valores: la temperatura mínima se encontró en 26 °C a las 06:00 h, la máxima llegó a las 09:00 h con un valor de 45 °C y decayó a 38 °C a las 10:00 h. En los meses de mayo, agosto, septiembre y noviembre el desempeño es muy similar: las temperaturas mínimas oscilan cerca de los 20 °C, mientras los máximos valores se presentan a las 09:00 h al estar entre los 25 y los 30 °C. A partir de las 10:00 h, los valores disminuyen y se vuelven a encontrar entre los 25 y los 30 °C; sin embargo, en septiembre la línea va en aumento: a las 10:00 alcanza el valor máximo de 40 °C.

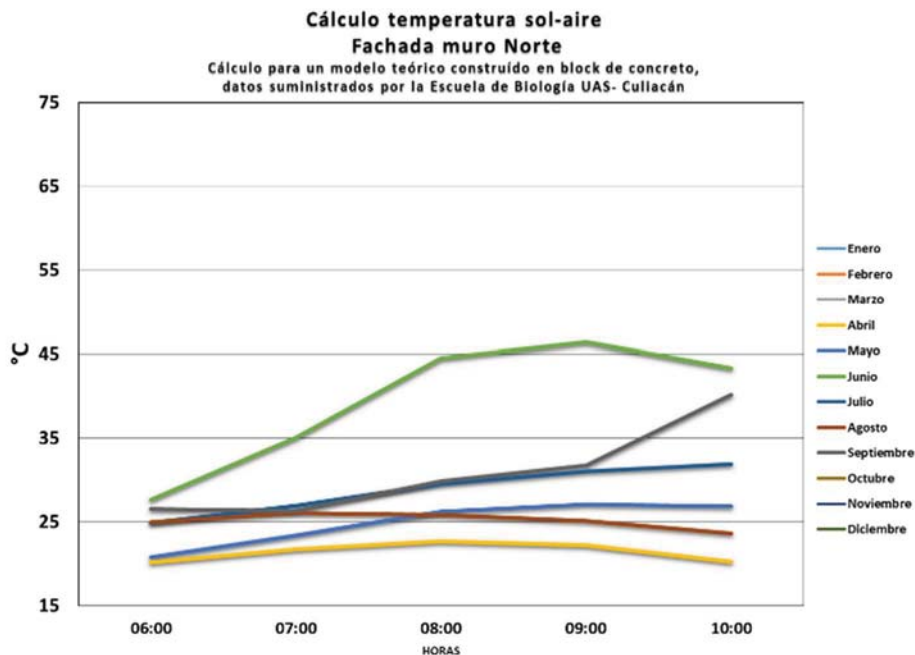


Fig. 44. Cálculo anual de temperatura Sol- Aire, fachada muro Norte. Fuente: Propia.

Cálculo temperatura sol-aire *Cubierta*

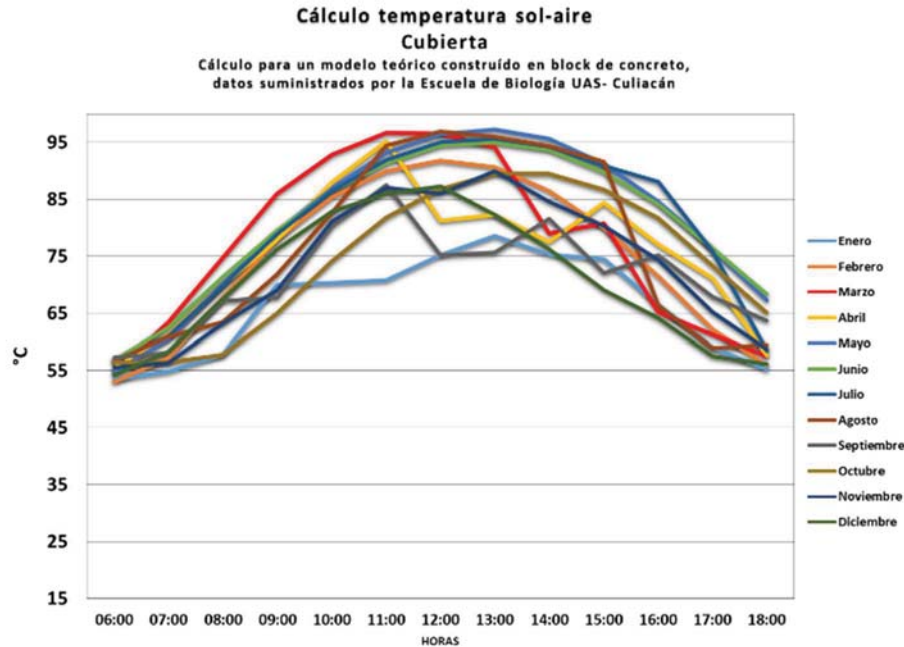


Fig. 45. Cálculo anual de temperatura Sol- Aire, Losa de Cubierta. Fuente: Propia.

Por su localización, la losa es el elemento arquitectónico que recibe mayor radiación solar durante todo el día, esta se presenta los 365 días del año. Para el primer trimestre del año, se observan temperaturas mínimas, entre los 52 y 54 °C a las 06:00 h, la línea de valor sigue ascendiendo encontrando su máximo valor a las 12:00 h: entre los 90 y los 95 °C. En la tarde los valores disminuyen a partir de las 15:00 h entre los 70 y 75 °C, y a las 18:00 h se encuentran alrededor de los 58 °C.

En abril, mayo y junio, los valores mínimos a las 06:00 h están entre 54 y 57 °C, la temperatura aumenta en la superficie y su máximo se encuentra entre 80 y 97 °C. Al mediodía la temperatura mantiene el mismo comportamiento que el primer trimestre y desciende en la tarde, sin embargo, a las 16:00 h se observan valores entre los 84 y 93°C, al finalizar la tarde la temperatura está entre los 57 y los 68 °C. En el verano las ganancias se incrementan a lo largo del día, las mínimas vuelven a estar entre los 56 y los 57 °C, al mediodía las temperaturas se incrementan y alcanzan valores máximos cercanos a los 96 °C, en la tarde estas temperaturas disminuyen y llegan a los 90 °C a las 16:00 h, al finalizar la tarde las ganancias se reducen y se encuentran valores entre los 58 y 63 °C.

Durante el último trimestre del año, las ganancias mínimas oscilan entre los 54 y 56 °C. Al mediodía se elevan entre los 81 y los 86 °C; a las 16:00 h las ganancias están entre los 64 °C, en diciembre, y 81 °C, en octubre, y finaliza el día con valores entre los 56 °C y las 65 °C.

Al hacer un comparativo a lo largo del año de las ganancias por temperatura sol-aire que se tienen en la losa, se observa que la mayor ganancia se da en el mes de abril donde la temperatura llegó a los 97.27 °C, en orden descendente le siguen julio, junio, febrero, mayo y marzo. Se observa, además, que las máximas temperaturas a lo largo del año son superiores a 60 °C. Al hablar de las mínimas se observan que están en el rango de los 50 y los 60 °C.

registrándose el menor valor en enero. Todos estos datos reflejan ganancias importantes de temperatura en esta superficie a lo largo de todo el año.

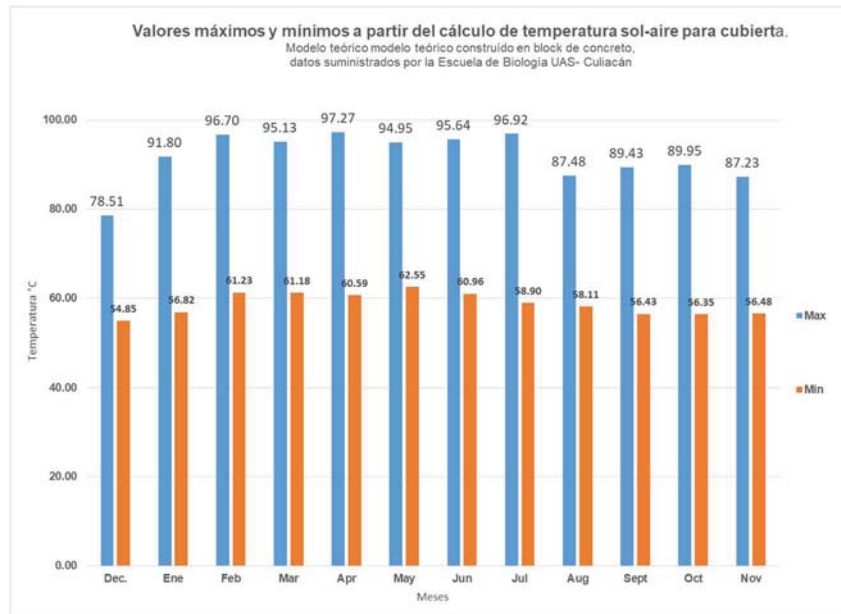


Fig. 46. Temperatura sol-aire losa. Comparativo valores máximos y mínimos. Fuente: Propia.

2.1.2 Análisis carta psicrométrica

López (2010) afirma que una carta psicrométrica “permite conocer las evoluciones del aire durante un ciclo de enfriamiento, calentamiento, humidificación o un ciclo completo de adecuación climática”.

Para este trabajo se utilizó el método de diagrama bioclimático de Givoni: “*Building Bioclimatic Chart*”, donde se tiene en cuenta el efecto de la edificación sobre el ambiente interno. Las bases se encuentran en el diagrama psicrométrico, donde cualquier estado del aire ambiental se define en función de la temperatura de bulbo seco, humedad relativa y otros parámetros del aire. Los rangos definidos por Givoni son los siguientes:

Confort de 21 a 26 °C de temperatura, de 20 a 75 % de humedad relativa.
Confort permisible de 20 a 27 °C de temperatura, de 20 a 80 % de humedad relativa.
Calefacción: Desplazamiento hacia la zona fría

- Calefacción por ganancias internas (3)
- Calefacción por aprovechamiento pasivo de la energía solar. (4)

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo.

- *Calefacción por aprovechamiento activo de la energía solar. (5)*
- *Humidificación (6)*
- *Calefacción convencional. (7)*

Protección Solar: (Desplazamiento hacia la zona cálida),

- *Protección solar. (8)*

Enfriamiento: (Desplazamiento hacia la zona cálida),

- *Refrigeración por alta masa térmica. (9)*
- *Enfriamiento por evaporación. (10)*
- *Refrigeración por alta masa térmica con renovación nocturna. (11)*
- *Refrigeración por ventilación natural y mecánica. (12)*
- *Aire acondicionado. (13)*
- *Deshumidificación convencional. (14)*

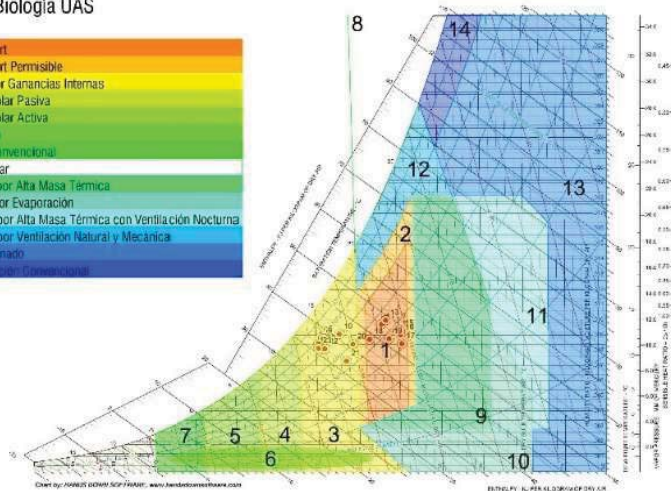
A partir de los datos de temperatura y humedad relativa se hace un análisis de la carta psicrométrica para la ciudad de Culiacán en los 12 meses del año.

DIAGRAMA PSICROMÉTRICO

CIUDAD: CULIACÁN - SINALOA
 Datos: Lab. Biología UAS



ENERO



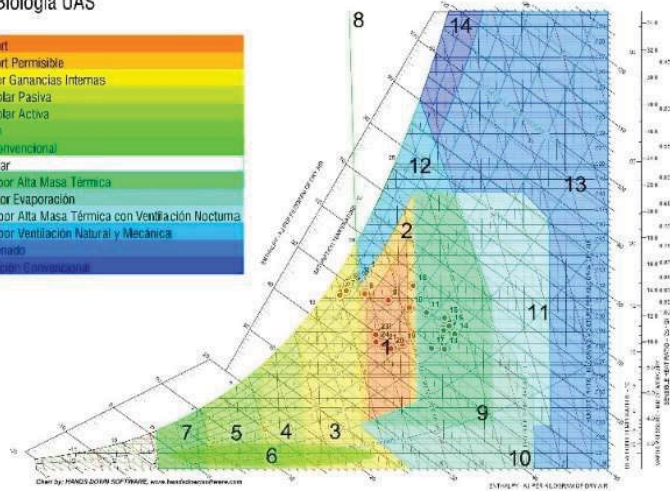
Enero		
Hora	Temperatura	HR
1 00:00	15.85	72.57
2 01:00	15.70	72.73
3 02:00	15.77	74.22
4 03:00	15.32	78.03
5 04:00	15.73	78.98
6 05:00	15.97	78.68
7 06:00	15.58	79.67
8 07:00	15.95	77.63
9 08:00	15.88	77.78
10 09:00	17.85	70.87
11 10:00	21.02	59.95
12 11:00	22.93	55.37
13 12:00	23.48	55.17
14 13:00	24.83	47.17
15 14:00	25.18	46.28
16 15:00	25.22	44.88
17 16:00	25.33	41.73
18 17:00	23.82	47.40
19 18:00	21.50	54.37
20 19:00	19.43	59.48
21 20:00	18.63	59.57
22 21:00	18.05	62.25
23 22:00	16.03	71.07
24 00:00	15.27	75.07
Max °C	25.33	
Max %		79.67
Mn °C	15.32	
Min %		41.73
Promedio °C	19.35	
Promedio %		63.73

Fig. 47. Diagrama Psicrométrico para la ciudad de Culiacán, Sinaloa en el mes de enero. Fuente: Propia

DIAGRAMA PSICROMÉTRICO

Ciudad: CULIACÁN - SINALOA
 Datos: Lab. Biología UAS

- 1 Zona de Confort
- 2 Zona de Confort Permisible
- 3 Calefacción por Ganancias Internas
- 4 Calefacción Solar Pasiva
- 5 Calefacción Solar Activa
- 6 Humidificación
- 7 Calefacción Convencional
- 8 Protección Solar
- 9 Refrigeración por Alta Masa Térmica
- 10 Enfriamiento por Evaporación
- 11 Refrigeración por Alta Masa Térmica con Ventilación Nocturna
- 12 Refrigeración por Ventilación Natural y Mecánica
- 13 Aire Acondicionado
- 14 Deshumidificación Convencional



MARZO			
Hora	Temperatura	HR	
1	00:00	21.17	81.40
2	01:00	20.42	83.07
3	02:00	20.13	84.40
4	03:00	19.15	87.78
5	04:00	18.92	88.23
6	05:00	17.90	88.43
7	06:00	18.67	86.37
8	07:00	20.88	74.00
9	08:00	23.70	60.13
10	09:00	26.18	49.55
11	10:00	28.23	42.72
12	11:00	30.23	33.68
13	12:00	31.32	29.13
14	13:00	31.58	30.47
15	14:00	30.97	33.40
16	15:00	30.40	36.35
17	16:00	28.72	32.18
18	17:00	26.75	32.67
19	18:00	25.27	40.70
20	19:00	23.85	42.65
21	20:00	22.98	46.35
22	21:00	22.40	52.10
23	22:00	22.13	52.93
24	00:00	22.10	50.00
Max °C		31.58	
Max %		88.43	
Min °C		17.9	
Min %		29.13	
Promedio °C		24.43	
Promedio %		56.03	

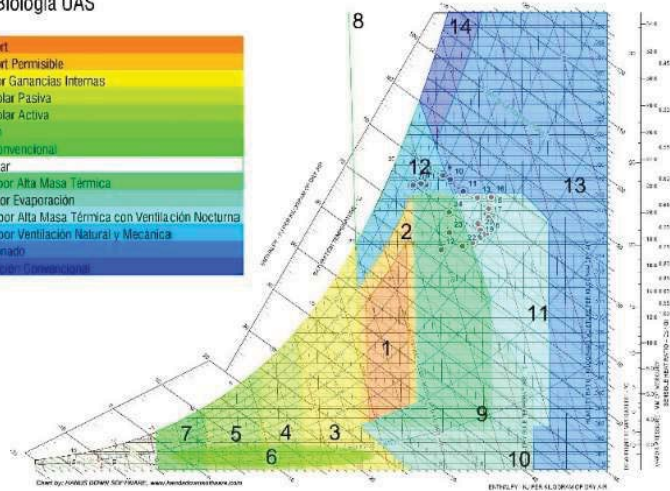
Fig. 48. Diagrama Psicrométrico para la ciudad de Culiacán, Sinaloa, en el mes de marzo. Fuente: Propia.

En el mes de enero (Fig. 47) se observa que en las primeras horas de la madrugada y en la noche es necesaria la calefacción, que se puede implementar con ganancias internas, mientras que en la tarde muchos de los puntos se sitúan sobre la zona de confort. El mes de marzo (Fig. 48) presenta solo dos puntos que necesitan calefacción, en las horas de la mañana y la tarde los datos se ubican en la zona 9 donde se hace necesaria la refrigeración, mientras que en las horas de la noche los puntos se ubican dentro de la zona de confort.

DIAGRAMA PSICROMÉTRICO

Ciudad: CULIACÁN - SINALOA
 Datos: Lab. Biología UAS

- 1 Zona de Confort
- 2 Zona de Confort Permisible
- 3 Calefacción por Ganancias Internas
- 4 Calefacción Solar Pasiva
- 5 Calefacción Solar Activa
- 6 Humidificación
- 7 Calefacción Convencional
- 8 Protección Solar
- 9 Refrigeración por Alta Masa Térmica
- 10 Enfriamiento por Evaporación
- 11 Refrigeración por Alta Masa Térmica con Ventilación Nocturna
- 12 Refrigeración por Ventilación Natural y Mecánica
- 13 Aire Acondicionado
- 14 Deshumidificación Convencional



JUNIO			
Hora	Temperatura	HR	
1	00:00	28.58	75.38
2	01:00	28.32	77.53
3	02:00	28.20	79.22
4	03:00	27.95	79.62
5	04:00	27.33	81.10
6	05:00	27.10	82.07
7	06:00	27.03	82.30
8	07:00	27.98	78.33
9	08:00	30.55	69.38
10	09:00	31.42	65.22
11	10:00	32.98	57.27
12	11:00	34.28	53.22
13	12:00	34.62	51.15
14	13:00	35.95	46.40
15	14:00	36.25	45.62
16	15:00	35.93	46.85
17	16:00	35.63	44.17
18	17:00	35.55	42.12
19	18:00	34.92	43.12
20	19:00	33.98	44.45
21	20:00	32.78	46.80
22	21:00	31.85	51.35
23	22:00	31.23	54.08
24	00:00	30.55	58.63
Max °C		36.25	
Max %		82.30	
Min °C		27.03333333	
Min %		42.12	
Promedio °C		31.76	
Promedio %		60.73	

Fig. 49. Diagrama Psicrométrico para la ciudad de Culiacán, Sinaloa, en el mes de junio. Fuente: Propia.

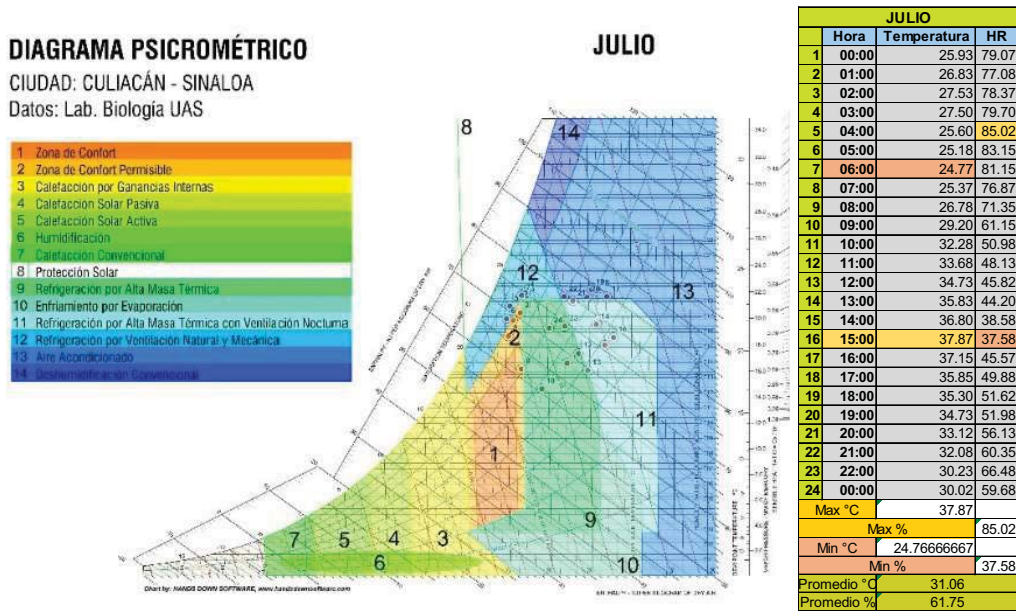


Fig. 50. Diagrama Psicrométrico para la ciudad de Culiacán, Sinaloa, en el mes de julio. Fuente: Propia.

En el mes de junio (Fig. 49), las temperaturas y la humedad relativa se incrementan y los puntos cambian de zona: desde las 10:00 h hasta las 15:00 h se sitúan en la zona 13 donde requieren refrigeración y ventilación, después de esta hora se ubican en la zona 9, donde se mantiene el requerimiento de refrigeración. En este mes no se observan puntos en la zona de confort. En julio, (Fig. 50), la tendencia es la misma, los puntos se ubican en la zona derecha del diagrama psicrométrico, zona que requiere enfriamiento y el uso de aire acondicionado.

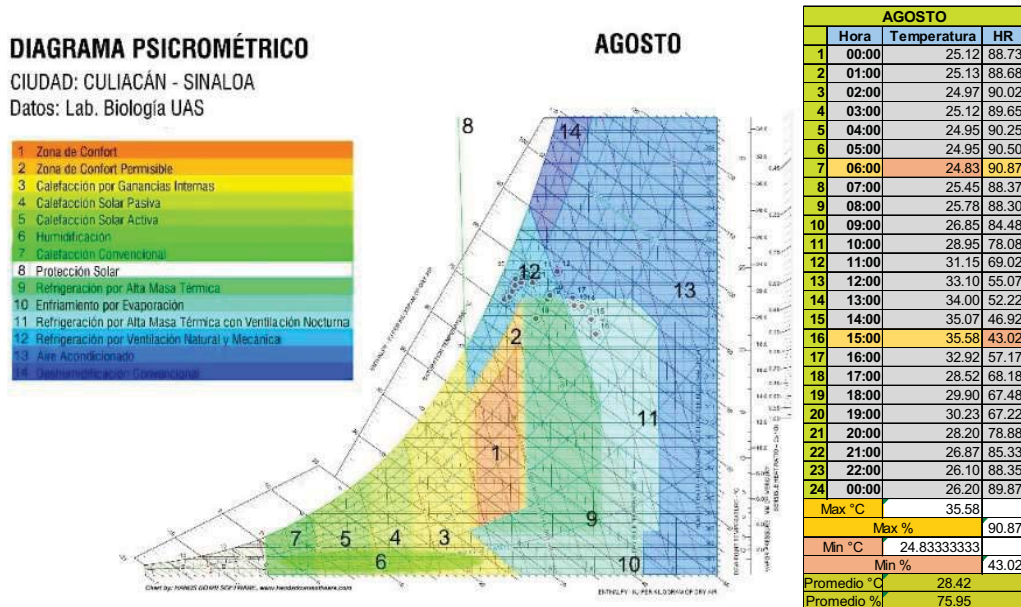


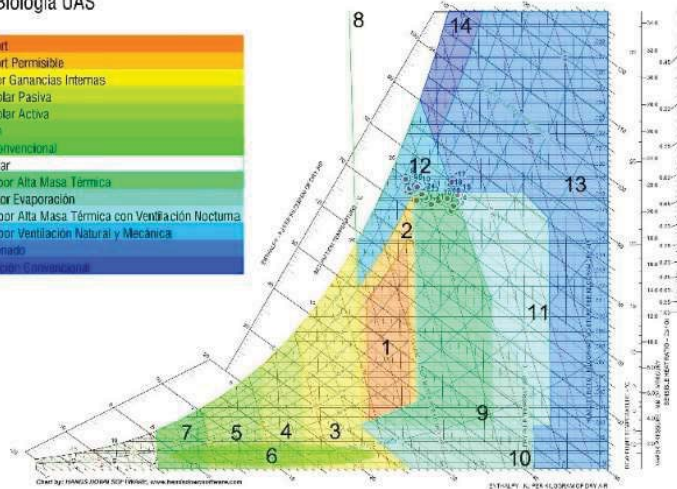
Fig. 51. Diagrama Psicrométrico para la ciudad de Culiacán, Sinaloa en el mes de agosto. Fuente: Propia.

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo.

DIAGRAMA PSICROMÉTRICO

CIUDAD: CULIACÁN - SINALOA
 Datos: Lab. Biología UAS

- 1 Zona de Confort
- 2 Zona de Confort Permisible
- 3 Calefacción por Ganancias Internas
- 4 Calefacción Solar Pasiva
- 5 Calefacción Solar Activa
- 6 Humidificación
- 7 Calefacción Convencional
- 8 Protección Solar
- 9 Refrigeración por Alta Masa Térmica
- 10 Enfriamiento por Evaporación
- 11 Refrigeración por Alta Masa Térmica con Ventilación Nocturna
- 12 Refrigeración por Ventilación Natural y Mecánica
- 13 Aire Acondicionado
- 14 Deshumidificación Convencional



SEPTIEMBRE			
Hora	Temperatura	HR	
1	00:00	27.70	92.00
2	01:00	27.30	93.00
3	02:00	27.00	94.00
4	03:00	26.90	94.00
5	04:00	27.00	94.00
6	05:00	26.90	95.00
7	06:00	26.60	96.00
8	07:00	26.70	95.00
9	08:00	27.50	92.00
10	09:00	29.30	83.00
11	10:00	30.40	77.00
12	11:00	31.70	73.00
13	12:00	32.20	71.00
14	13:00	33.30	65.00
15	14:00	33.10	66.00
16	15:00	33.70	64.00
17	16:00	33.70	67.00
18	17:00	32.60	72.00
19	18:00	30.90	76.00
20	19:00	29.80	80.00
21	20:00	29.00	82.00
22	21:00	28.30	84.00
23	22:00	27.90	84.00
24	00:00	28.10	83.00
Max °C		33.70	
Max %			96.00
Min °C		26.6	
Min %			64
Promedio °C		29.54	
Promedio %		82.13	

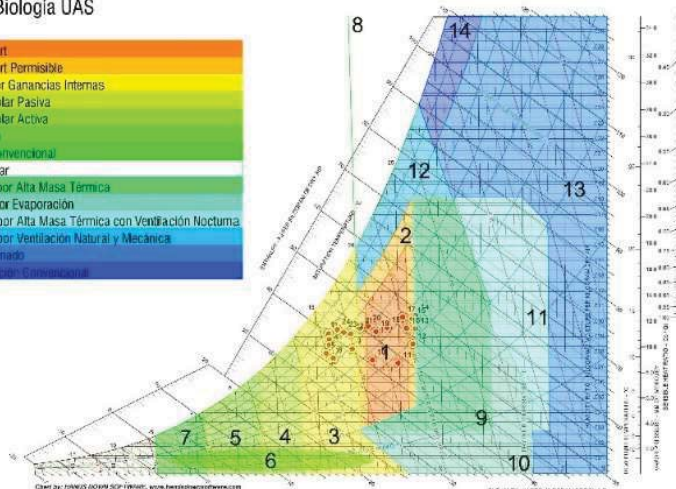
Fig. 52. Diagrama Psicrométrico para la ciudad de Culiacán, Sinaloa en el mes de septiembre. Fuente: Propia

En agosto (Fig. 51), a lo largo del día, los puntos se sitúan en la parte superior derecha del diagrama, allí los requerimientos de refrigeración se acentúan debido a las altas temperaturas y altas humedades relativas en 24 horas. Para septiembre (Fig. 52), los puntos se ubican en las zonas 12, 9 y 13. El 37 % de los puntos se encuentran en la zona 12, donde se requiere enfriamiento con aparatos mecánicos, esto se evidencia en la madrugada y en la mañana. Así mismo, 45.8 % de los datos se encuentran en la zona donde se necesita refrigeración, especialmente en las horas de la noche. A lo largo del día, el 16.7 % de los puntos se ubica en la zona de requerimiento de aire acondicionado.

DIAGRAMA PSICROMÉTRICO

CIUDAD: CULIACÁN - SINALOA
 Datos: Lab. Biología UAS

- 1 Zona de Confort
- 2 Zona de Confort Permisible
- 3 Calefacción por Ganancias Internas
- 4 Calefacción Solar Pasiva
- 5 Calefacción Solar Activa
- 6 Humidificación
- 7 Calefacción Convencional
- 8 Protección Solar
- 9 Refrigeración por Alta Masa Térmica
- 10 Enfriamiento por Evaporación
- 11 Refrigeración por Alta Masa Térmica con Ventilación Nocturna
- 12 Refrigeración por Ventilación Natural y Mecánica
- 13 Aire Acondicionado
- 14 Deshumidificación Convencional



DICIEMBRE			
Hora	Temperatura	HR	
1	00:00	16.17	80.55
2	01:00	16.53	78.23
3	02:00	16.62	74.73
4	03:00	16.62	71.62
5	04:00	16.15	69.05
6	05:00	17.02	62.22
7	06:00	16.70	63.53
8	07:00	17.02	62.77
9	08:00	19.32	58.58
10	09:00	21.73	45.98
11	10:00	24.85	37.08
12	11:00	26.65	38.95
13	12:00	27.02	42.62
14	13:00	27.10	46.27
15	14:00	26.67	48.87
16	15:00	25.97	46.50
17	16:00	25.48	45.47
18	17:00	23.58	50.32
19	18:00	22.27	52.63
20	19:00	21.32	55.52
21	20:00	20.33	61.12
22	21:00	19.17	63.88
23	22:00	18.37	66.15
24	00:00	17.58	70.22
Max °C		27.10	
Max %			80.55
Min °C		16.15	
Min %			37.08
Promedio °C		20.98	
Promedio %		57.51	

Fig. 53. Diagrama Psicrométrico para la ciudad de Culiacán, Sinaloa: mes de diciembre. Fuente: Propia

En diciembre (Fig. 53), se observa una disminución de los valores de temperatura y humedad relativa, con ello se vuelven apreciar varios puntos sobre la zona de confort (29.66 %), estos se detectan alrededor de las 19:00 h. En la tarde los puntos se mueven hacia la zona de refrigeración, ya que la temperatura va en aumento. En la madrugada y mañana se requiere calefacción puesto que la temperatura desciende y la humedad relativa aumenta.

2.1.3 Aproximación al modelo experimental

Se realiza el planteamiento experimental basado en la hipótesis que se plantea.

Cuando las partículas de agua del aire son absorbidas por un material desecante, aumenta la temperatura. Entonces obtener aire exterior para encausarlo a un ciclo termodinámico que integre la regeneración del desecante (zeolita) en un sistema de deshumidificación y transportar este aire por medio de ductos a otro espacio mejora el ambiente higrotérmico interior.

A partir de esta hipótesis se propone construir un módulo experimental para obtener aire deshumidificado que esté en la zona de confort en un sistema dinámico al interior de un espacio. Se quiere aprovechar el fenómeno de calentamiento solar y la reacción que tiene la zeolita al ser calentada por un cuerpo o por un fenómeno exterior.

Indicadores que se deben tener en cuenta:

- Humedad del aire exterior – Humedad intermedia del aire – Humedad del aire interior
- Temperatura del aire exterior – Temperatura del aire interior.
- Temperatura de la superficie de la zeolita.
- Temperatura de las superficies de los muros y vidrios del módulo experimental.
- Ventilación exterior / Ventilación interior.

A continuación se describen dos esquemas de los módulos experimentales probables que se pretenden desarrollar para este estudio.



Fig. 54. Propuesta Teórica I del Módulo experimental. Fuente: Propia.

El método que se utiliza en esta investigación es de tipo experimental descriptivo, en este sentido se hace necesario plantear la construcción de dos objetos de estudio de las mismas dimensiones, materiales, color y especificaciones. El primer módulo experimental contendrá el desecante junto con el sistema de deshumidificación, mientras que el segundo módulo servirá como objeto de control y no presentará ningún sistema de enfriamiento; esto con el fin de realizar un estudio comparativo del funcionamiento del aire entre ambos módulos, así como del potencial de enfriamiento y deshumidificación del objeto experimental.

Las medidas iniciales que se contemplaron para los objetos de estudio fueron: ancho 1 m, largo 1 m y alto 1 m. Los materiales que se utilizarán son: block de concreto convencional, vidrio, concreto y como desecante se utilizará zeolita.

El principio consiste en aprovechar las corrientes de aire que hay en el ambiente y la ganancia de radiación solar que activaría las propiedades adsorbentes de la zeolita. El módulo experimental no puede funcionar solo colocando la zeolita en alguna de sus caras, esto porque no se completaría el ciclo de los desecantes, por esta razón se propone un complemento donde suceda este ciclo. Esta parte estará construida en vidrio con una abertura en el interior por donde entrará el aire, se piensa en vidrio porque deja pasar los rayos del sol que activan la zeolita; la cual estará distribuida a lo largo del volumen en bandejas de acero microperforado.

Es en este lugar que se puede denominar "urna deshumidificadora" donde las moléculas de agua serán atrapadas por los canales de la zeolita. El problema radica, según revisiones bibliográficas y experiencias anteriores, en que los procesos de deshumidificación tienden a elevar la temperatura a su alrededor; es por ello que se plantea colocar una malla microperforada que contendrá el desecante para que el aire deshumidificado pueda pasar, por lo tanto, en ese compartimento será necesario la utilización de ventiladores que enfrien el aire. Este aire, con menos temperatura y deshumidificado, viajará por tubos de acero extruido hacia el interior del módulo experimental, donde se esparcirá propiciando la zona de confort. Este aire deberá ser renovado, razón por la cual se ha construido un extractor en una de las zonas de la cubierta del módulo.

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo.

Se debe tener en cuenta que, de acuerdo con los estudios de asoleamiento que se hicieron para este trabajo, lo más conveniente es orientar la *urna de deshumidificación* o *invernadero* hacia el sur, debido a las ganancias de radiación solar a lo largo de los 365 días del año. Uno de los problemas que señala la bibliografía es la poca ventilación en las zonas cálidas y húmedas, por eso el uso de ventiladores que estarán alimentados por pilas.

A continuación, se presentan distintas imágenes de la propuesta experimental I:

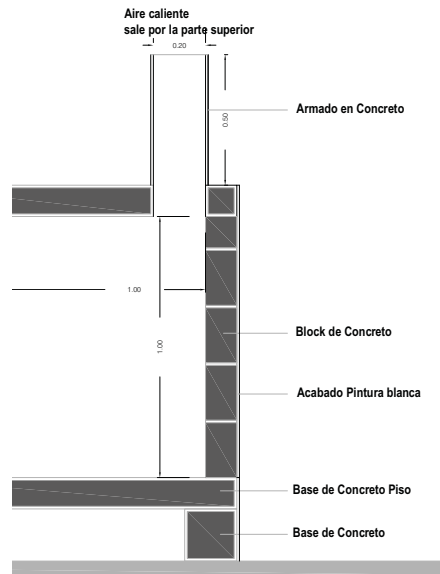


Fig. 55. Propuesta Teórica I del Módulo experimental. Fuente: Propia.

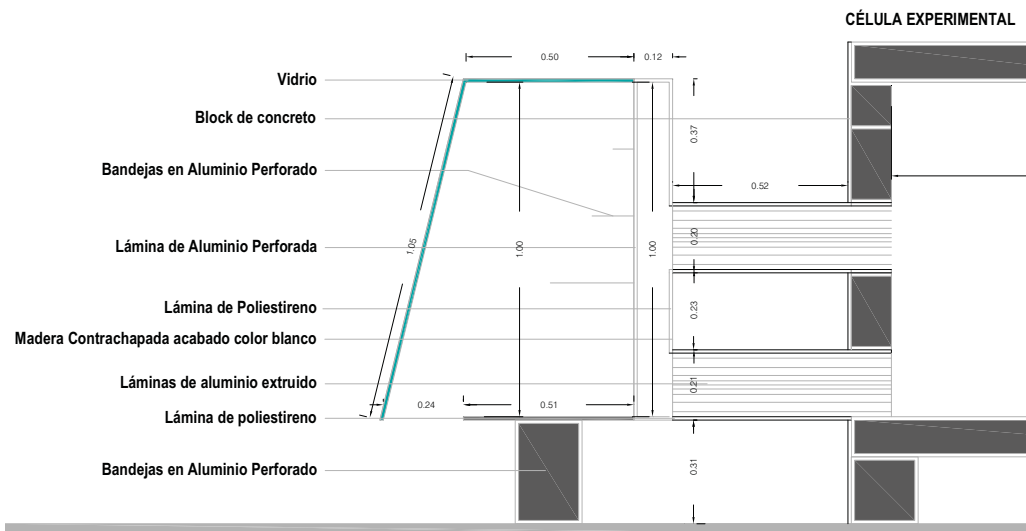


Fig. 56. Propuesta Teórica I del Módulo experimental. Fuente: Propia.

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo.

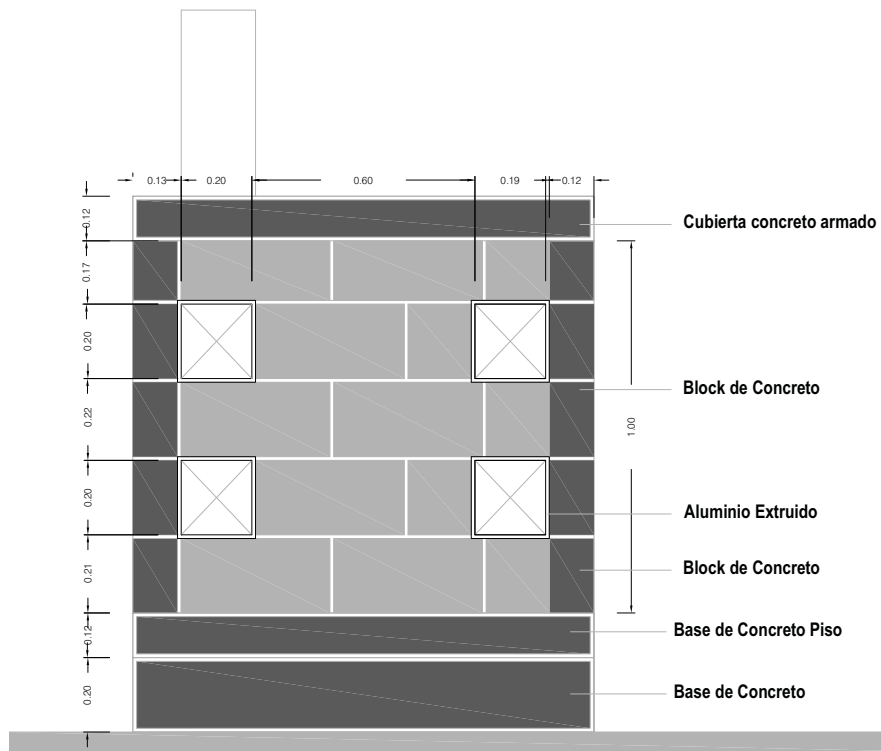


Fig. 57. Propuesta Teórica I del Módulo experimental. Fuente: Propia.

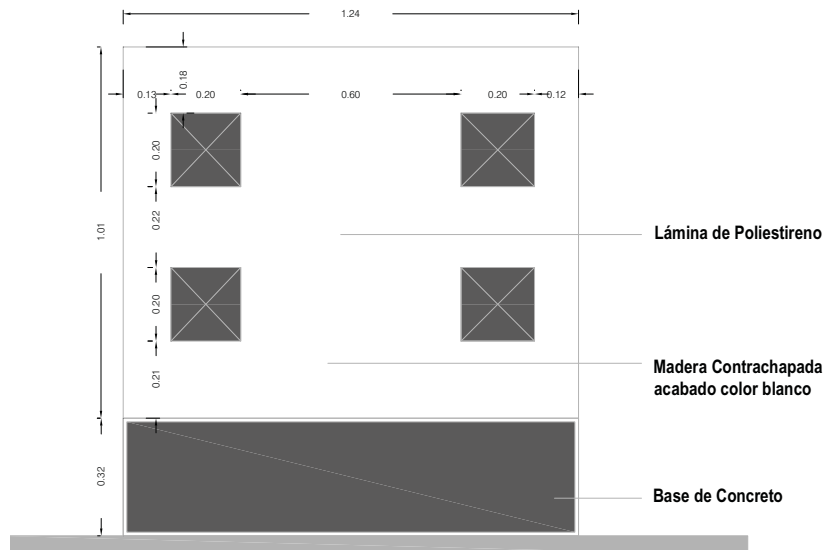


Fig. 58. Propuesta Teórica I del Módulo experimental. Fuente: Propia.

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo.

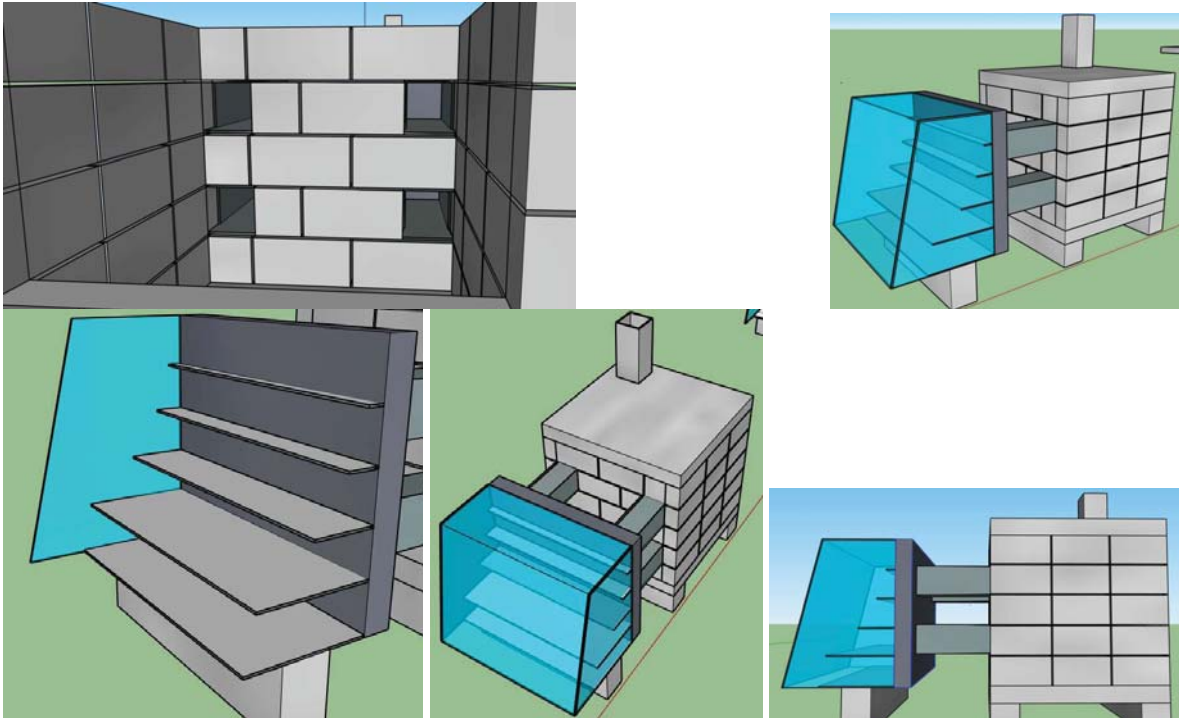


Fig. 59. Propuesta Teórica I del Módulo experimental. Fuente: Propia.

De acuerdo con la revisión bibliográfica, se hace una segunda propuesta donde la cubierta puede ser de gran utilidad. La propuesta consiste en transformar la *urna de deshumidificación*, con el fin de aprovechar las ganancias de la fachada sur y las ganancias de la cubierta, las cuales, como demostró el análisis previo, se dan a lo largo de todo el año. El principio de funcionamiento es el mismo que el de la propuesta experimental I.

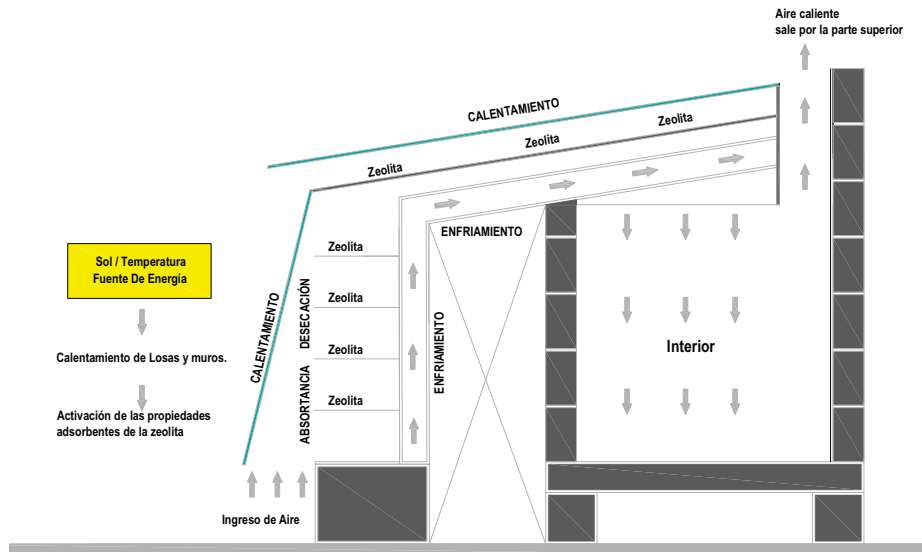


Fig. 60. Propuesta Teórica II del Módulo experimental. Fuente: Propia.

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo.

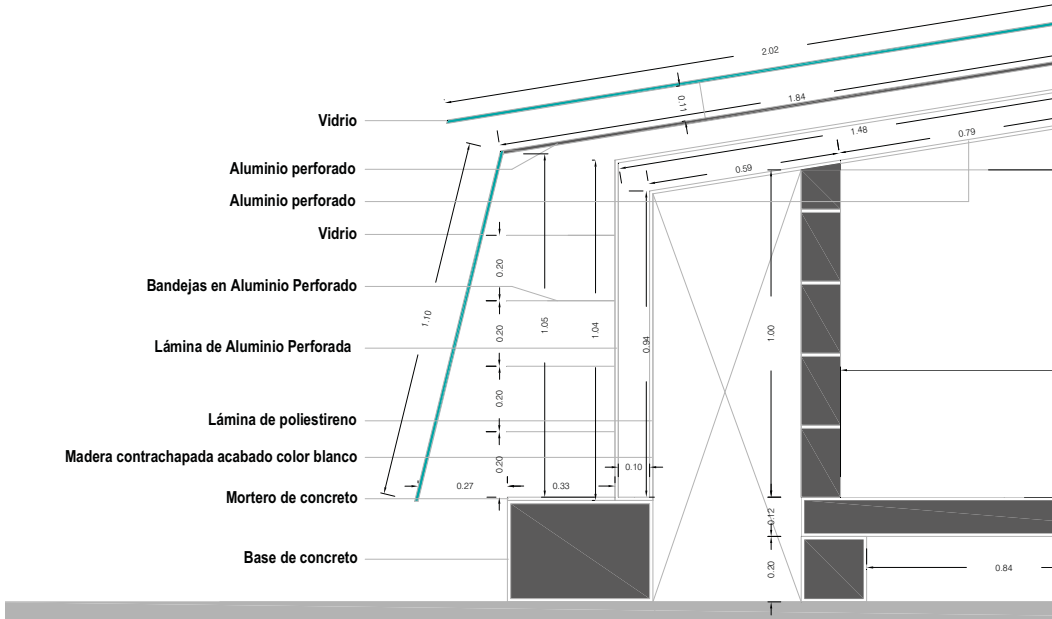


Fig. 61. Propuesta Teórica II del Módulo experimental. Propuesta materiales. Fuente: Propia

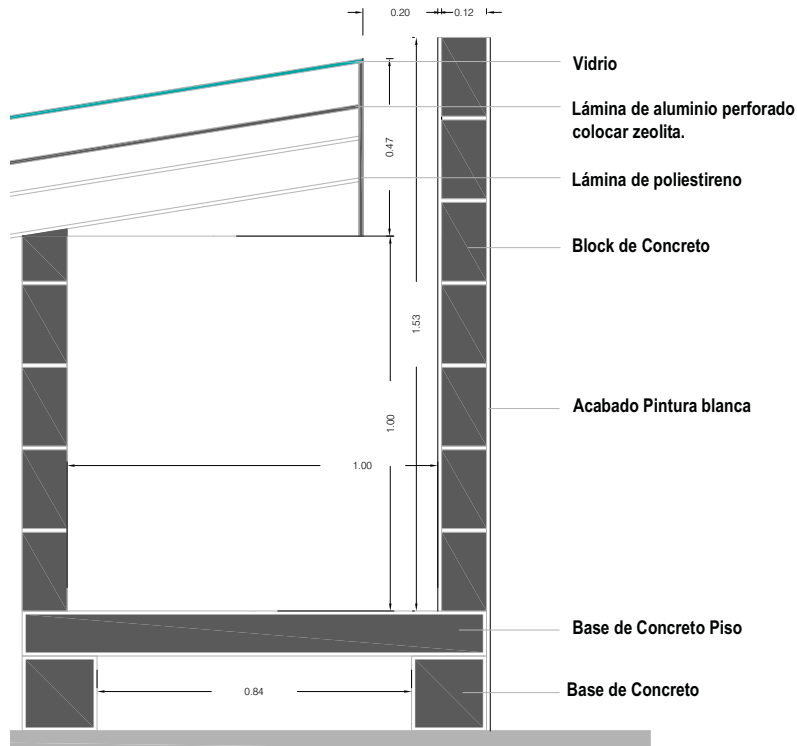


Fig. 62. Propuesta Teórica II del Módulo experimental. Propuesta materiales. Fuente: Propia

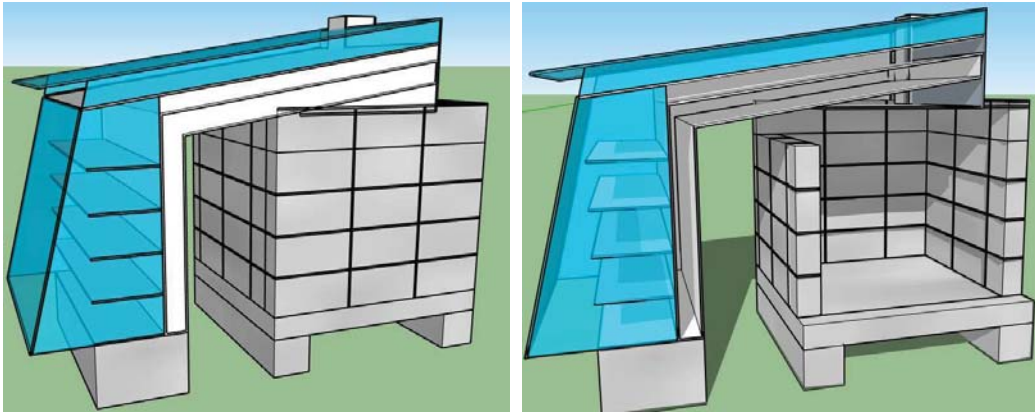


Fig. 63. Propuesta Teórica II del Módulo experimental. Vista exterior e interior. Fuente: Propia.

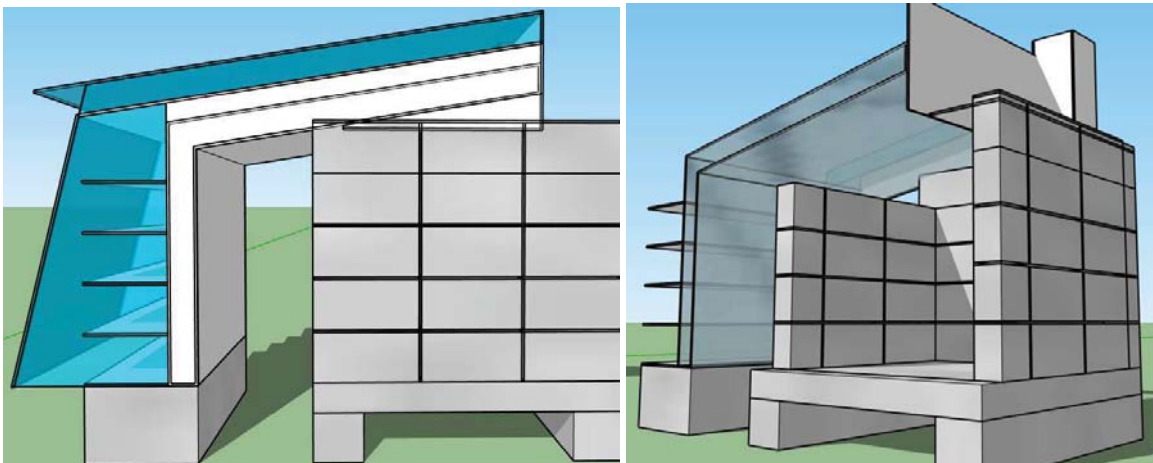
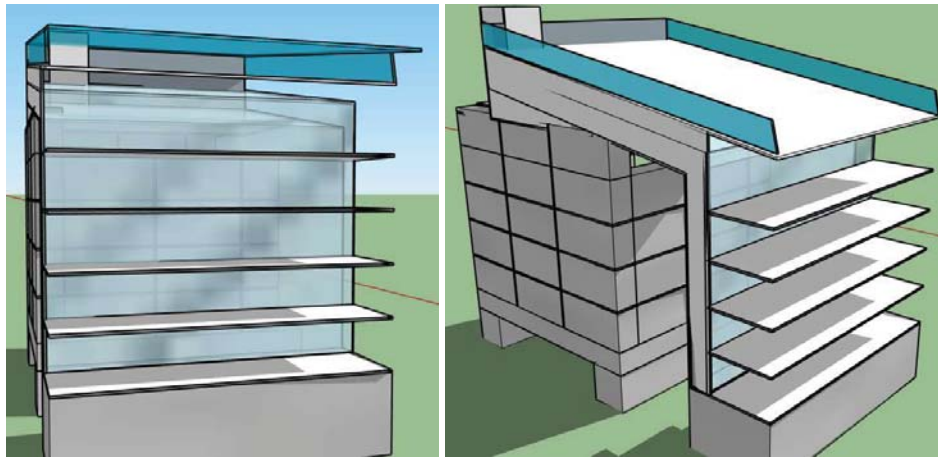


Fig. 64. Propuesta Teórica II del Módulo experimental. Vista exterior e interior. Fuente: Propia.

2.1.4 Dimensionamiento del contenedor del desecante: *Invernadero*

Para realizar el dimensionamiento del espacio donde se va a ubicar la zeolita, es necesario hacer un estudio de implantación, con el objetivo de reconocer la incursión solar directa, a lo largo del año, en las cuatro fachadas del espacio y en la cubierta que contendrá el desecante que, en este caso, se denominará invernadero.

Según estudios de asoleamiento previos, se concluye que la orientación de la fachada más larga deberá estar direccionada hacia el sur, con el fin de que los rayos solares entren en contacto con la superficie de la zeolita a lo largo del día. A continuación, se hace un estudio de incursión solar cualitativo para los meses de enero, marzo y abril en las horas de la mañana y en la tarde para la ciudad de Culiacán, Sinaloa.

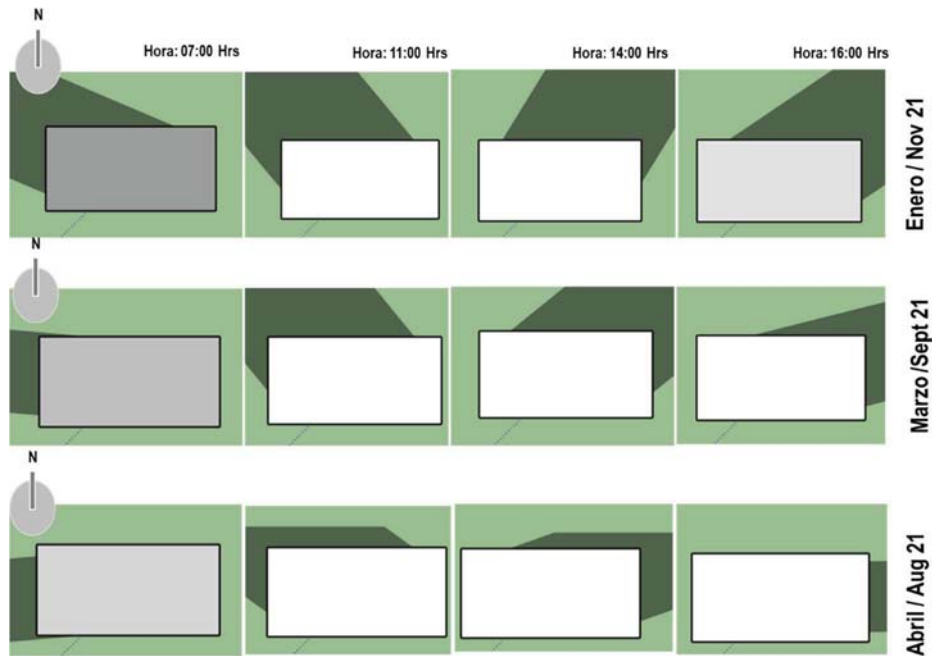


Fig. 65. Estudios de asoleamiento en planta para el invernadero. Fuente: Propia.

Para precisar las medidas y los materiales del invernadero fue necesario el análisis térmico en un espacio, con el fin de conocer el comportamiento de la temperatura en su interior, y así poder confirmar si las dimensiones que se proponen cumplen con el objetivo de calentar la zeolita a una temperatura mayor de 45 °C, en la ciudad de Culiacán, Sinaloa.

Se proyectó construir el módulo llamado *invernadero* con vidrio de 1 mm, en todas sus fachadas, excepto en la fachada norte. Para este diagnóstico se realizó el estudio de *Balance Térmico Interior* propuesto por el Dr. José Diego Morales Ramírez, seleccionando un día de cada mes del año para el análisis de temperaturas durante las 24 horas.

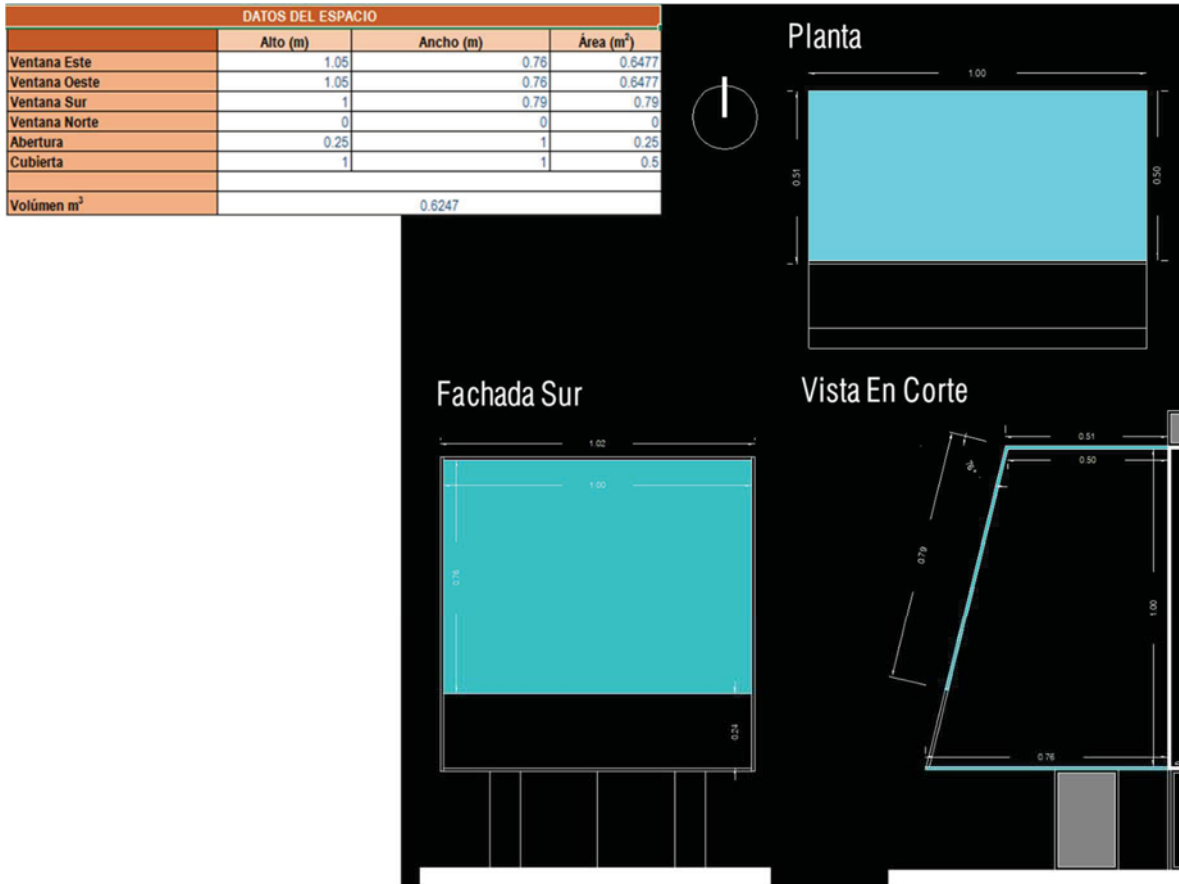


Fig. 66. Dimensiones del invernadero. Fuente: Propia.

Este método tiene en cuenta las propiedades ópticas de los materiales, para realizar cálculos de capacitancia, conducción, entre otros.

Tabla 2. Tabla de Materiales utilizados en el cálculo. Fuente ENER 020 2010

MATERIALES					
	Espesor (m)	Coductividad Térmica (w/m ² K)	Absortancia (α)	Emitancia (ϵ)	Transmitancia
Ventana Cristal Claro	0.01	1	0.15	0.94	0.8

El método utiliza las siguientes ecuaciones:

1. Cálculo de ganancia de calor:

1.1 Cálculo de "U" coeficiente global de transferencia de calor

1.2 Cálculo de temperatura sol-aire

$$T_{sa} = t_{amb} + (HT * \alpha) / h^{\circ} - DR * E / h^{\circ}$$

1.3 Cálculo de ganancia de calor por conducción

$$Q_{cond} = U * A * (t_{s/a} - t_{int})$$

1.4 Cálculo de ganancia de calor por radiación solar directa

$$Q_{SHG} = A_u * F_c * HT$$

1.5 Cálculo de ganancia por infiltración

$$Q_{infS} = 0.278 * C_{amb} * vol * \rho * C_{po} * (t_{amb} - t_{int})$$

$$Q_{infL} = 0.278 * C_{amb} * vol * \rho * H_{vap} * (W_{amb} - W_{int})$$

1.6 Cálculo de ganancia de calor por ventilación

$$Q_{ventS} = 0.278 * \rho * C_{po} * G * (t_{amb} - t_{int})$$

$$Q_{ventL} = 0.278 * \rho * C_{po} * G * (W_{amb} - W_{int})$$

1.7 Cálculo de capacitancia

Tabla 3. Cálculo capacitancia materiales utilizados en invernadero. Fuente: Propia

Elemento constructivo	Material	Volumen (m ³)	Peso Vol. (kg/m ³)	Masa (kg)	Calor específico (Kj/Kg °C)	Capacitancia (Kj/°C)	
Vidrio 1	Vidrio claro 0.01*0.51*1.0	0.01000	2,200.00	22.00	0.800	17.60	
Vidrio 2	Vidrio claro 0.01*0.79*1.0	0.00790	2,200.00	17.38	0.800	13.90	
Vidrio 3	Vidrio claro 0.003*0.76*1.0	0.00760	2,200.00	16.72	0.800	13.38	
Vidrio 4	Vidrio claro 0.01*0.64	0.01000	2,200.00	22.00	0.800	17.60	
Vidrio 5	Vidrio claro 0.01*0.64	0.00640	2,200.00	14.08	0.800	11.26	
Vidrio 6	0.01*0.76*1	0.00760	2,200.00	16.72	0.800	13.38	
Total						87.12	
Σcapacitancia=						24.20	W/°C

2.1.4.1 Balance térmico invernadero: enero

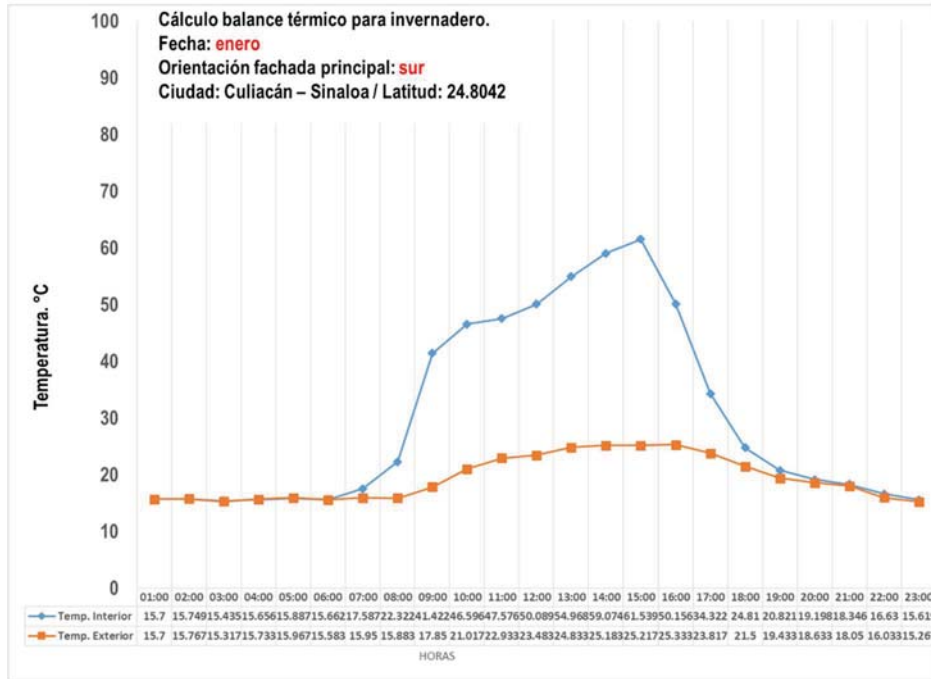


Fig. 67. Balance térmico invernadero, orientación fachada sur, mes de enero. Fuente: Propia

El registro de la temperatura al interior del invernadero inicia a las 01:00 h, con valores muy similares a la temperatura exterior. A las 07:00 h, la temperatura del invernadero se incrementa hasta llegar a una máxima de 61.54 °C. A partir de esta hora la temperatura al interior disminuye y los valores se igualan con la exterior al caer la noche. Así mismo, se observa un pico en la gráfica a las 15:00 h, según los datos analizados la influencia de la radiación solar directa en la superficie del vidrio afecta la temperatura interior.

Tabla 4. Calculo Flujo de calor por radiación directa, mes de enero.

Cálculo de Flujo de Calor por Radiación Solar Directa (Q SHG)												
Fachada	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
Ventana Este	16.92432373	53.46490583	171.1273114	121.7762151	72.13034931	0	0	0	0	0	0	0
Ventana Oeste	0	0	0	0	0	0	0	112.3308179	163.7215858	110.8749213	29.94500933	0
Ventana Sur	8.377896427	36.25136301	162.2533518	173.0488705	184.0350185	247.5112432	286.0062429	231.4867196	202.7821314	94.20039172	18.36164276	0
Abertura	0	0	0	0	0	0	0	43.35757987	63.19344829	42.79563118	11.55820956	0
Cubierta	14.1	48.355	182.875	173.45	171.48	223.205	259.505	219.755	209.9	111.34	26.18	0
Total	39.40222016	138.0712688	516.2556632	468.2750856	427.645368	470.716243	545.511243	606.930117	639.597166	359.210944	86.0448616	0

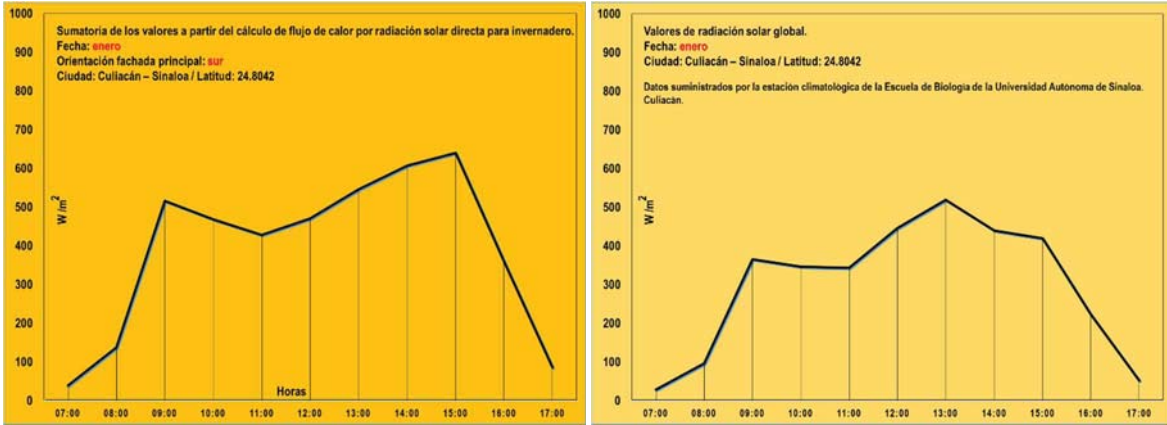


Fig. 68. Sumatorio de los valores flujo de calor de radiación solar directa para invernadero y valores de radiación solar global de la estación climatológica de la Escuela de Biología de la Universidad Autónoma de Sinaloa, para el mes de enero. Fuente: Propia.

Según la gráfica de la estación climática de la UAS, la radiación solar directa alcanzó su valor máximo de 500 W/m² a las 13:00 h, de igual manera se observa que para las tres fachadas del módulo y la cubierta del invernadero llegó a los 639.59 W/m² a las 15:00 h.

2.1.4.2 Balance térmico invernadero: febrero

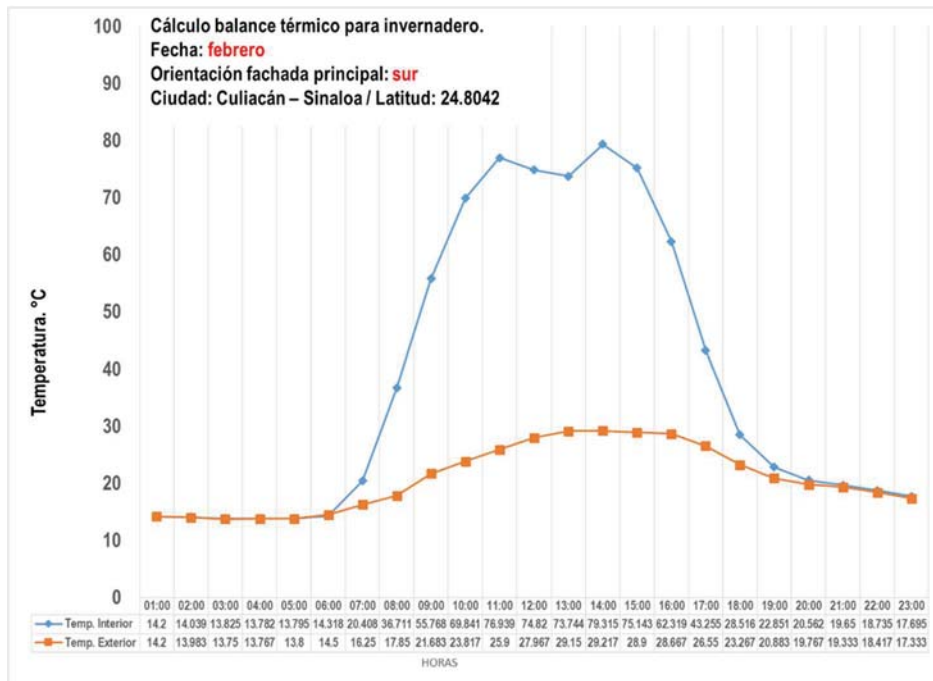


Fig. 69. Balance térmico invernadero, orientación fachada sur, mes de febrero. Fuente: Propia

Entre las 11:00 h y las 13:00 h la temperatura interior disminuye tres grados y a las 14:00 h llega a 79.31 °C. Este fenómeno se debe a que, al mediodía, las superficies que son afectadas por

radiación solar directa son la cubierta y la ventana sur y, a partir de las 14:00 h, se les suman las superficies de la fachada oeste

Tabla 5. Flujo de calor por radiación directa, mes de febrero.

Cálculo de Flujo de Calor por Radiación Solar Directa (Q SHG)												
Fachada	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
Ventana Este	51.35104839	180.9042636	258.2763073	256.0469565	178.3255735	0	0	0	0	0	0	0
Ventana Oeste	0	0	0	0	0	0	0	181.5867309	215.8878575	169.4289254	65.97396197	1.743241152
Ventana Sur	14.99058996	82.54118374	176.5640071	272.0534607	344.0569697	377.2110717	360.6785291	297.031917	204.9878774	104.9769068	27.14318791	0.444967665
Abertura	0	0	0	0	0	0	0	70.08905777	83.32864655	65.39637386	25.46470664	0
Cubierta	40.85	155.7666667	261.7833333	343.9166667	394.825	414.3916667	398.65	347.2416667	267.875	163.8666667	55.375	0
Total	107.1916383	419.2121141	696.6236478	872.0170839	917.207543	791.602738	759.328529	895.949372	772.079381	503.668873	173.956857	2.18820882

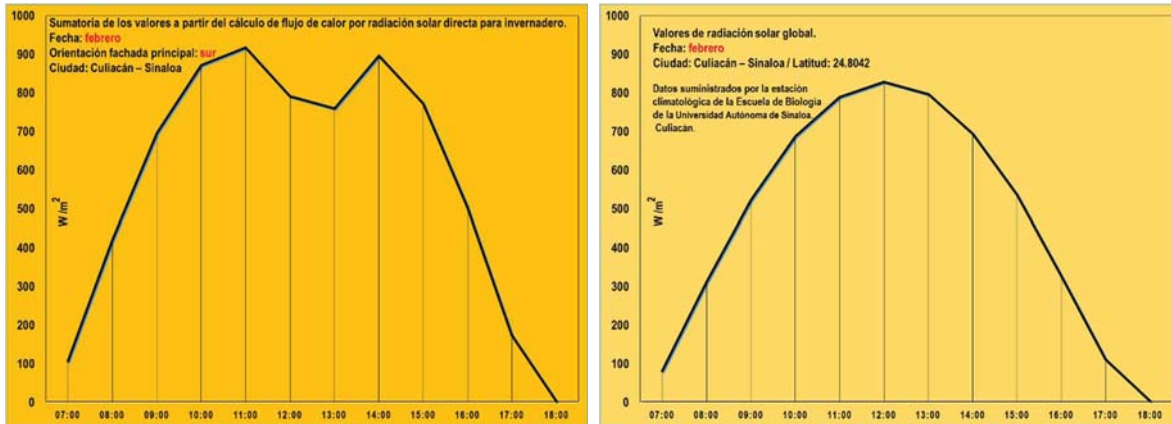


Fig. 70. Sumatorio de los valores flujo de calor de radiación solar directa para invernadero y valores de radiación solar global de la estación climatológica de la Escuela de Biología de la Universidad Autónoma de Sinaloa, para el mes de febrero. Fuente: Propia.

De acuerdo al cálculo realizado para el invernadero en el mes de febrero los valores promedio de flujo de calor por radiación solar directa llegan a 900 W/m², esto sucede a las 11:00 h, las fachadas con mayor ganancia de radiación solar en las horas de la mañana son: ventana oeste, ventana sur y cubierta; en la tarde las ganancias se presentan en la fachada sur, oeste y cubierta. De acuerdo a los datos de radiación solar global para el mes de febrero los valores máximos pueden llegar a los 800 W/m².

2.1.4.3 Balance térmico invernadero: marzo

En marzo las temperaturas exteriores muestran valores más altos, si se comparan con las de enero. A partir de las 06:00 h inicia la ganancia de temperatura al interior del espacio y a las 07:00 h se encuentra en 30.19 °C, mientras que en el exterior está en 20.88 °C. A las 11:00 h se presenta la temperatura máxima interior con un valor de 85.72 °C, a partir de ese momento los valores disminuyen y presentan temperaturas entre 79 y 50 °C, desde las 14:00 h a las 17:00h. A las 15:00 h se presenta una temperatura de 72.45 °C. A las 18:00 h la temperatura exterior sigue disminuyendo y se estabiliza cerca de los valores de la temperatura exterior a las 21:00 h.

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo.

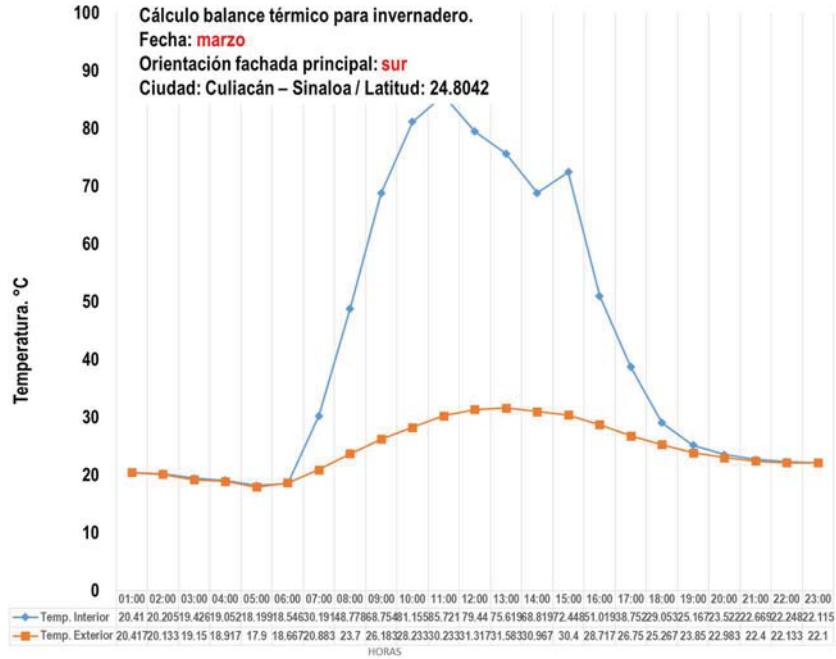


Fig. 71. Balance térmico invernadero, orientación fachada sur, mes de marzo. Fuente: Propia

La ganancia por radiación solar directa en el invernadero presenta valores máximos de 981.80 W/m² a las 11:00 h, y para ese momento el cálculo de balance térmico indica que en el invernadero la temperatura puede alcanzar 85.72 °C. El valor de radiación solar global promedio máximo fue de 900 W/m² y se presentó durante las 11:00 h y las 12:00 h.

Tabla 6. Flujo de calor por radiación directa, mes de marzo.

Cálculo de Flujo de Calor por Radiación Solar Directa (Q SHG)													
Fachada	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	
Ventana Este	121.5932974	257.1931343	345.4712117	314.6811414	203.7973867	0	0	0	0	0	0	0	0
Ventana Oeste	0	0	0	0	0	0	0	145.7375792	237.4929819	96.6097906	56.53448942	7.321218161	
Ventana Sur	11.3074872	62.34161394	150.5410017	234.3746958	296.8670945	312.2734435	287.5435906	151.8717961	138.1656474	32.7006887	9.58058387	0.210439886	
Abertura	0	0	0	0	0	0	0	56.25196048	91.66781761	37.28955944	21.82124804	0	
Cubierta	95.56666667	220.5833333	352.4833333	432.55	479.2916667	477.4833333	446.7666667	258.05	280.35	90.125	46.2	0	
Total	228.4674513	540.1180815	848.4955467	981.6058372	979.956148	789.756777	734.310257	611.911336	747.676447	256.725039	134.136321	7.53165805	

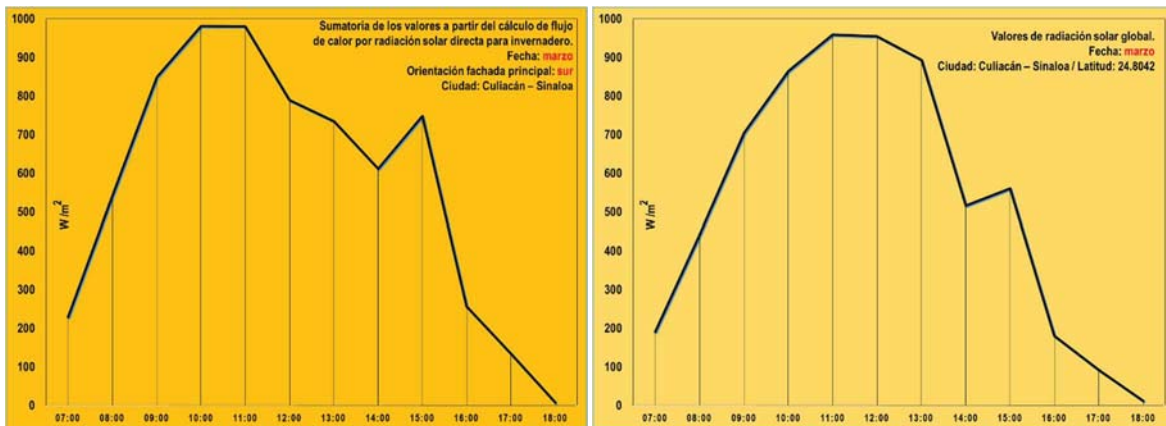


Fig. 72. Valores de radiación solar directa y radiación solar de la estación climática UAS, para el mes de febrero. Fuente: Propia

2.1.4.4 Balance térmico invernadero: abril

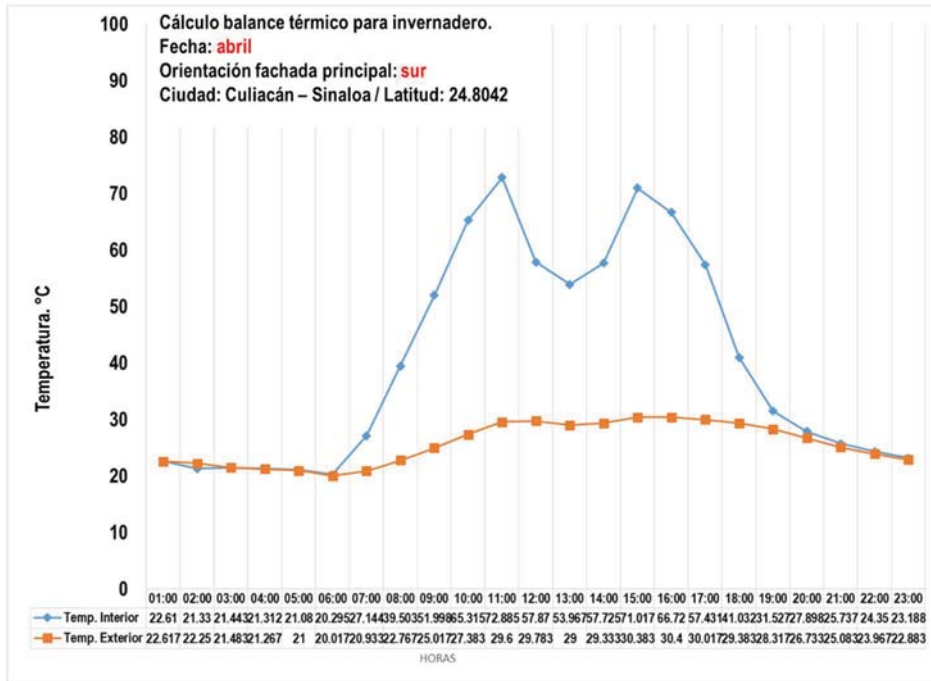


Fig. 73. Balance térmico invernadero, orientación fachada sur, mes de abril. Fuente: Propia

En el mes de abril en el ambiente exterior se presentan dos picos de temperaturas a lo largo de las 24 horas de cálculo. Este fenómeno se da a las 11:00 h con 72.89 °C y a las 15:00 h con 70.99 °C. A las 06:00 h, la temperatura exterior presenta una mínima de 20.02 °C, mientras la interior se ubica en 20.29 °C. A las 07:00 h hay una diferencia entre estas dos temperaturas de 6.21 °C. Por otro lado, a las 12:00 h la temperatura interior se encuentra en 29.78 °C, pero a las 13:00 h disminuye 7 °C, aunque se vuelve a incrementar a las 15:00 h hasta llegar a los 30.38 °C.

Tabla 7. Flujo de calor por radiación directa, mes de abril.

Cálculo de Flujo de Calor por Radiación Solar Directa (Q SHG)												
Fachada	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
Ventana Este	87.12244233	189.5046138	240.1482413	254.9365534	172.8760249	0	0	0	0	0	0	0
Ventana Oeste	0	0	0	0	0	0	0	145.1769204	284.6692902	255.62859	197.8487812	131.9940683
Ventana Sur	10.53156621	1.573336667	38.09421302	96.55137273	151.1815324	102.6077946	102.2584178	67.54654531	58.53940679	11.05141278	-17.67881367	-28.76424034
Abertura	0	0	0	0	0	0	0	56.03556674	109.876984	98.66782077	76.36590287	
Cubierta	70.51666667	169.2333333	258.8416667	379.075	465.2083333	290.8833333	304.2833333	244.3416667	329.6166667	237.9833333	163.325	0
Total	147.1075428	360.3112838	537.084121	730.5629262	789.265891	393.491128	406.541751	513.100689	782.702348	603.331157	419.86087	103.229828

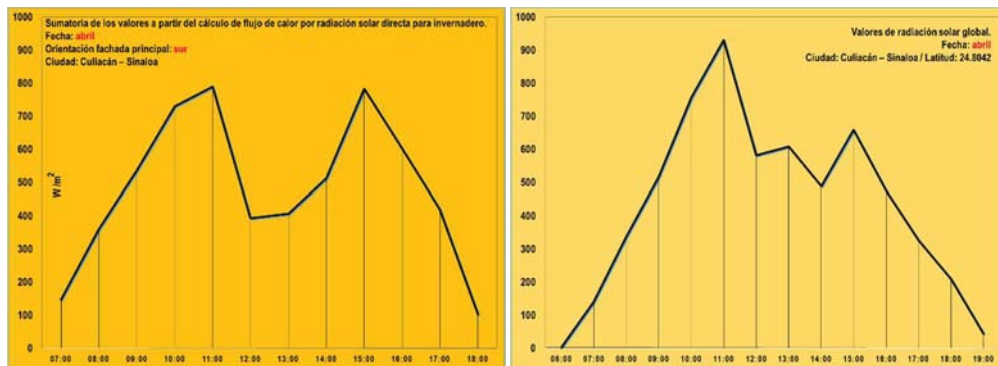


Fig. 74. Valores de radiación solar directa y radiación solar de la estación climática UAS, para el mes de abril. Fuente: Propia

Los datos de radiación solar, recabados en la estación meteorológica de la Universidad Autónoma de Sinaloa, muestran valores de este fenómeno que se van incrementando a lo largo de la mañana con rangos que van desde los 141.0 W/m², hasta que a las 11:00 h llegan a su valor máximo con 930.41 W/m². A partir de ese momento los valores disminuyen durante toda la tarde, incluso a las 12:00 h, cuando el valor disminuye a 581.7 W/m². Este fenómeno pudo darse debido a un día parcialmente nublado.

Esto afectó la evolución de temperatura interior, en la gráfica se observa que las temperaturas interiores disminuyen la capacitancia del material. Es por eso que se muestra en la gráfica de temperatura interior y exterior de abril dos picos altos entre las 11:00 h y las 15:00 h.

2.1.4.5 Balance térmico invernadero: mayo

En mayo, las ganancias de temperatura al interior del invernadero inician a las 07:00 h y pueden llegar a un máximo de 83.94 °C a las 15:00 h y, a partir de allí, disminuye hasta valores muy cercanos a la temperatura exterior. La línea de temperatura interior lleva una dirección ascendente, y al mediodía se detiene en dos valores de temperatura muy parecidos, esto se debe a que las ganancias de calor importantes vienen de la cubierta por radiación solar directa. Los valores de temperatura que se dan en este mes, son aptos para activar el desecante y para que tenga un buen funcionamiento.

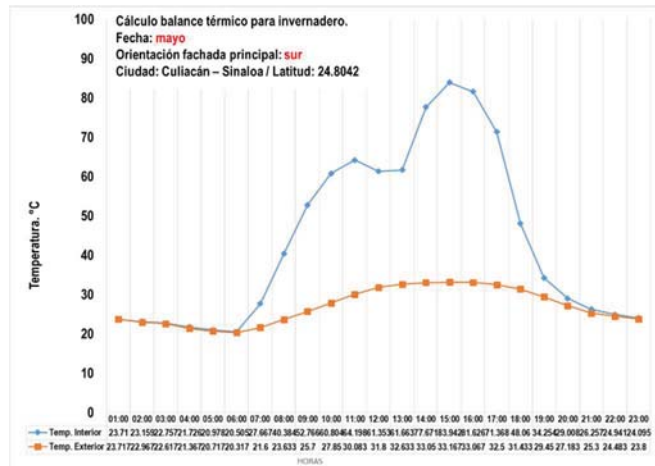


Fig. 75. Balance térmico invernadero, orientación fachada sur, mes de mayo. Fuente: Propia

2.1.4.6 Balance térmico invernadero: junio

Se repite el fenómeno del mes anterior, sin embargo, las temperaturas interiores más altas están entre los 60 y los 79 °C a lo largo del día. En la noche, la temperatura interior tiene valores similares a la exterior, es decir, alcanza la condición adecuada para calentar el desecante.

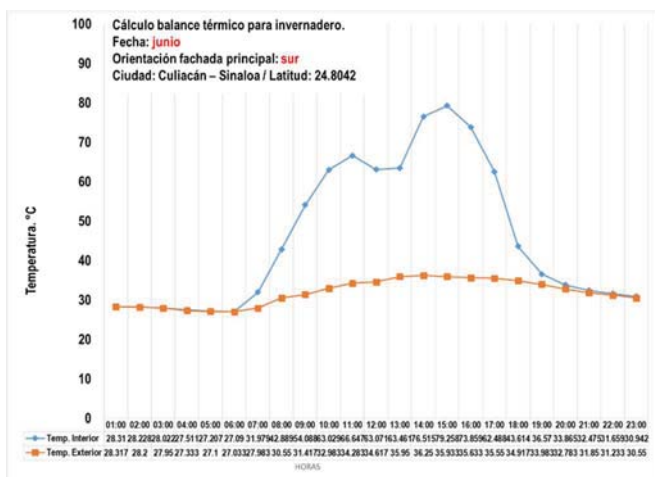


Fig. 76. Balance térmico invernadero, orientación fachada sur, mes de junio. Fuente: Propia

2.1.4.7 Balance térmico invernadero: julio

En julio, a partir de las 07:00 h, las temperaturas interiores van desde 30 °C y se incrementan, paulatinamente, hasta llegar a su pico a las 15:00 h con 81.2 °C. A las 16:00 h la temperatura disminuye a 77.41 °C y mantiene este desempeño hasta que, al finalizar la noche, iguala la temperatura exterior de 30.02 °C. De igual forma, se cumple con la condición de tener temperaturas mayores a los 45°C para activar el desecante.

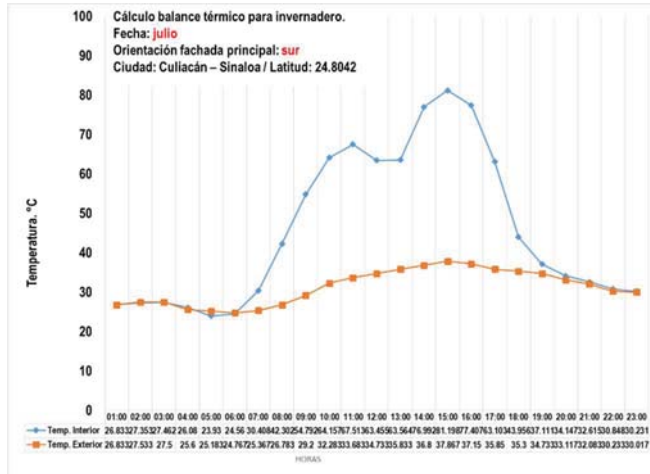


Fig. 77. Balance térmico invernadero, orientación fachada sur, mes de julio. Fuente: Propia

2.1.4.8 Balance térmico invernadero: agosto

Como en meses anteriores, la temperatura exterior muestra dos picos, el primero a las 11:00 h con 65.01 °C y el segundo a las 15:00 h con 78.7 °C, siendo esta última la máxima temperatura del registro exterior. En el interior la máxima fue de 35.58 °C a las 15:00 h.

Los rangos a lo largo del día y la tarde superan los 50 °C, pero no sobrepasan los 80 °C. En la noche la temperatura interior presenta valores similares a los valores de la temperatura exterior, que está en los rangos de 28 y 26 °C.

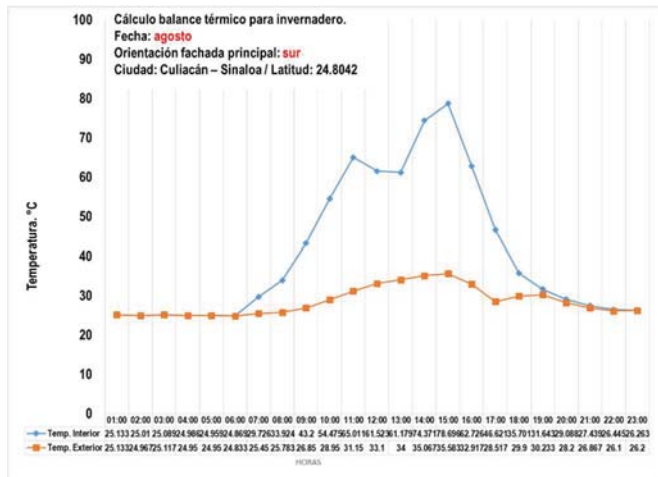


Fig. 78. Balance térmico invernadero, orientación fachada sur, mes de agosto. Fuente: Propia

2.1.4.9 Balance térmico invernadero: septiembre

Para el mes de septiembre se observan temperaturas exteriores que van desde los 27 a los 33 °C, sigue ocurriendo el mismo fenómeno de los meses anteriores. En el exterior, al mediodía la temperatura se encuentra en 31.4 °C y en el interior del *invernadero* se encuentra en 75.57 °C. A las 14:00 h la exterior se incrementa a 32.23 °C y en el interior disminuye con respecto a la hora precedente y llega a un valor de 62.91 °C, en la siguiente hora se sitúa en 65.65 °C y a partir de las 16:00 h disminuye a 49.99 °C y sigue bajando hasta igualar los valores con la temperatura exterior a las 20:00 h.

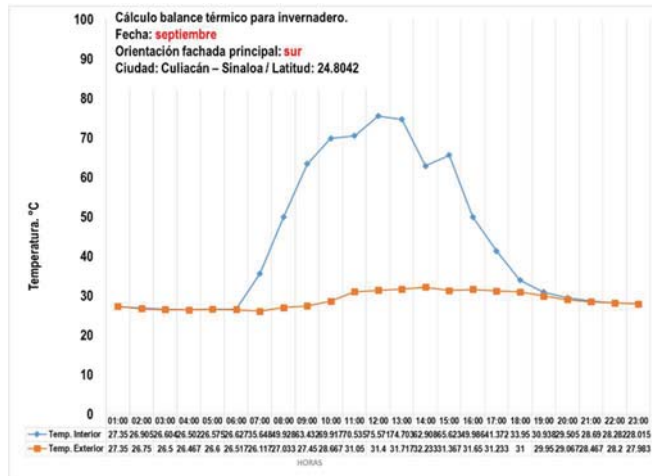


Fig. 79. Balance térmico invernadero, orientación fachada sur, mes de septiembre. Fuente: Propia

2.1.4.10 Balance térmico invernadero: octubre

En el mes de octubre la temperatura mínima exterior se registra a las 06:00 h con 23.88 °C, y llega a un máximo de 34.98 °C a las 14:00 h. En el interior a esta misma hora la temperatura tiene un valor de 87.82 °C. A partir de las 07:00 h el invernadero se va calentando desde una temperatura de 25.09 °C hasta alcanzar los 76.65 °C a las 13:00 h y llega a su máximo (87,82 °C) a las 14:00 h. La temperatura a lo largo de la tarde disminuye, igual que la temperatura exterior, estos valores oscilan entre los 50 y 30 °C.

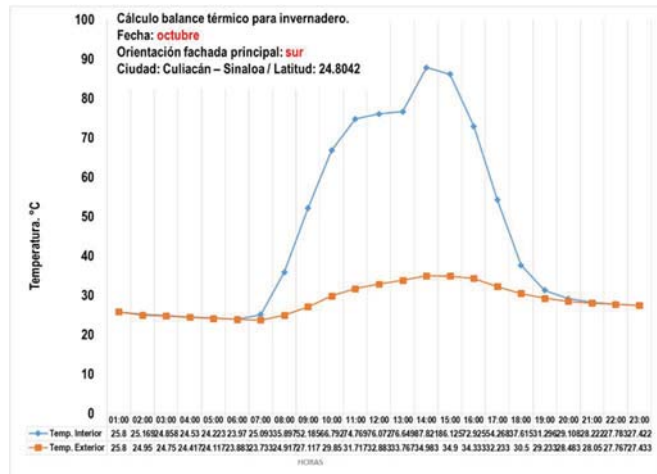


Fig. 80. Balance térmico invernadero, orientación fachada sur, mes de octubre. Fuente: Propia

2.1.4.11 Balance térmico invernadero: noviembre

En la madrugada del mes de noviembre tanto la temperatura exterior como la interior tienen variaciones mínimas, se sitúan entre los 20.82 y los 21 °C.

A las 07:00h en el interior se incrementa la temperatura a 30.95 °C y sigue aumentando en la mañana hasta que al mediodía llega a 78.75 °C. Mientras tanto, en el exterior, las temperaturas van desde los 22.85 °C, a las 08:00 h, hasta los 31.07 °C, al mediodía. En la tarde al interior las temperaturas disminuyen, sin embargo, los valores son tan altos que oscilan entre los 68.99 °C, a las 15:00 h, y los 36.38 °C, a las 17:00 h. En la noche tanto la temperatura exterior como la interior presentan valores similares y no sobrepasan los 25 °C.

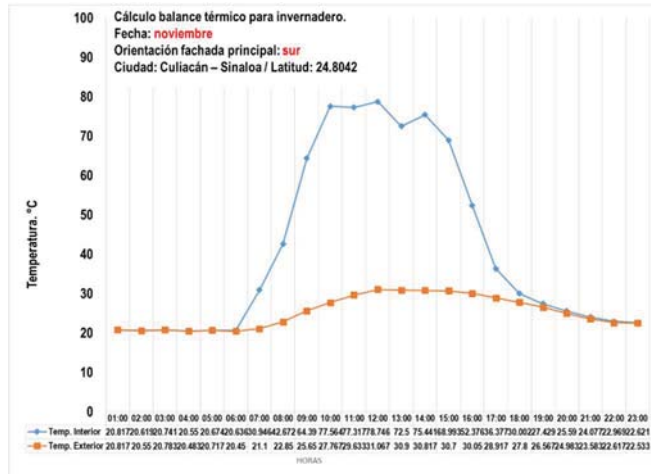


Fig. 81. Balance térmico invernadero, orientación fachada sur, mes de noviembre. Fuente: Propia

2.1.4.12 Balance térmico invernadero: diciembre

En diciembre las temperaturas exteriores e interiores se encuentran en el rango de los 16 °C. En las mañanas en el exterior se presentan temperaturas que van desde los 17.02 °C, a las 07:00 h, hasta los 26.65 °C, a las 11:00 h. En el interior del invernadero la temperatura está en un rango que va de 21.85 °C y se incrementa en el transcurso del día para llegar a su máxima a las 11:00 h con una temperatura de 75.52 °C. En la tarde, el interior del invernadero pierde calor hora a hora y los rangos van desde los 65.46 °C, a las 14:00 h, hasta los 29.61 °C, a las 17:00 h. En el exterior la temperatura se encuentra en los rangos de los 27 y 25 °C. Al finalizar el día los valores de las dos temperaturas que se analizan están alrededor de los 19 °C.

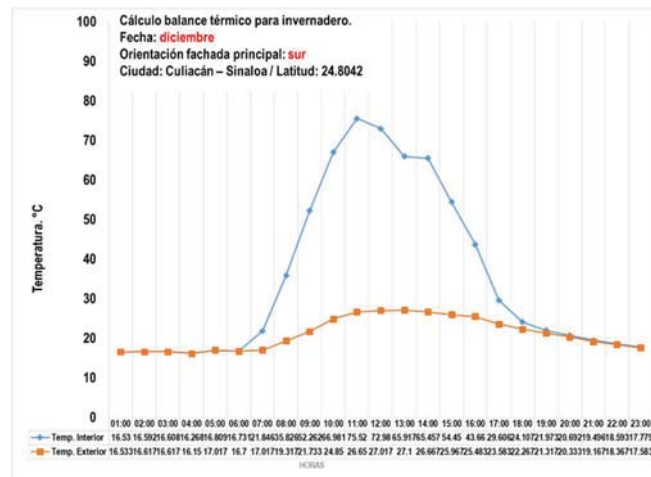


Fig. 82. Balance térmico invernadero, orientación fachada sur, mes de diciembre. Fuente: Propia

En esta primera parte se concluyó que la dimensión propuesta para el invernadero es adecuada para los meses en donde el sol incide en la fachada sur a lo largo del día, ya que la temperatura al interior es mayor a 40 °C desde el inicio de la mañana hasta finalizar la tarde.

2.1.3 Obtención de la cantidad de zeolita para el objeto experimental

Falta información con respecto a los gramos de agua por metro cúbico que absorbe la zeolita, según el fabricante tiene una adsorción de 42 % de su peso en agua, sin embargo, no especificó los valores de la temperatura al inicio de las pruebas de laboratorio ni el método que utilizó para obtenerlos.



Fig. 83. Ficha técnica zeolita, Zeolitech. Fuente: <http://www.zeolitech.com.mx/>

Martín et al (2012) hace un trabajo comparativo de adsorción de humedad relativa entre dos tipos de zeolitas, procedentes de diferentes yacimientos cubanos. El primer tipo de zeolita natural es del yacimiento San Andrés (ZSA) y se compara con una zeolita comercial canadiense (ZC). El método que utilizó para el estudio de adsorción es el método de las campanas con diferentes valores de humedad relativa generados a partir de ácido sulfúrico a distintas concentraciones.

Tabla 8. Muestra de las condiciones de preparación de las muestras. Fuente, Martín et al (2012).

Muestras	Peso Húmedo	Peso seco	Temperatura activación	Tiempo activación	Temperatura estufa
ZSA	5.0082	5g	120	1h	120
ZC	5.0063	5g	120	1h	120

Con una activación de la zeolita a 120 °C por dos horas, se muestra a continuación una tabla con los porcentajes de adsorción con diferentes porcentajes de humedad relativa:

Tabla 9. Promedio de adsorción con diferentes humedades relativas. Fuente, Martín et al (2012)

Zeolita San Andrés (ZSA)					Zeolita Canadá (ZCA)				
	100% (HR)	80% (HR)	60% (HR)	40% (HR)		100% (HR)	80% (HR)	60% (HR)	40% (HR)
% Adsorción	28.4	28.37	24.88	22.55	% Adsorción	20.95	21.33	18.04	15.77
Adsorción en gramos (5g)	1.42	1.4185	1.244	1.1275					

Tabla 10. Cinética de adsorción de humedad de la zeolita natural. Fuente, Martín et al (2012).



En la tabla de Cinética por adsorción de humedad de la zeolita natural, se observa cómo, con el paso de las horas, va aumentando la capacidad de absorción del mineral, por lo que se concluye que es una función exponencial.

La empresa Drytech, de USA, que fabrica filtros desecantes y utiliza como material principal la zeolita, compara los desecantes que más se utilizan en el mercado como es la sílica gel y la zeolita sintética. Varios autores expresan que el gel de sílice absorbe hasta un 35 % en peso, sin embargo, en la prueba de adsorción de humedad muestra que a los 25 °C puede adsorber hasta un 27 % de su peso.

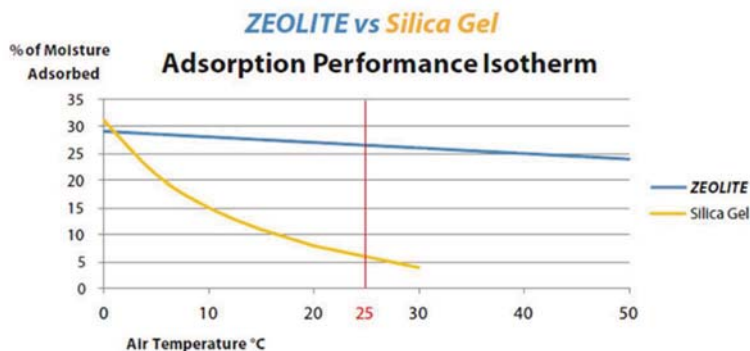


Fig. 84. Isoterma de rendimiento de adsorción entre sílica gel y zeolita. Fuente: <https://www.drytechinc.com/>

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo.

Tabla 11. Isoterma de rendimiento de adsorción entre sílica gel y zeolita. Fuente: <https://www.drytechinc.com/>

Series	Brand A		ZEOZORB	
Model	Model A	Model B	ZZ-150	ZZ-300
Dim. "A"	10" (254mm)	12" (305mm)	6.1" (157mm)	10.7" (272mm)
Dia. "B"	5.2" (132mm)		5" (127mm)	
Dim. "C"	1" NPT		1" slip fit/1" NPT	
Max Operating Flow Rate	1.50 scfm	3.0 scfm	1.50 scfm	3.0 scfm
Desiccant medium	Silica Gel		ZEOLITE	
Desiccant weight	3.3 lbs	4.5 lbs	1.5 lbs	3.0 lbs
*Lowest PPM H2O	384 ppm	272 ppm	96 ppm	63 ppm

En la gráfica *Zeolite vs Silica Gel Adsorption Performance Isotherm* a los 25°C se absorbe el 27% de humedad. Se realiza el estudio cuántos son los gramos por m³ para éste caso, ya que con este dato se puede obtener los gramos/ Volumen de zeolita necesarios para llegar a 50% de humedad relativa en el invernadero.

1	Temp (°C)	25	
	Humedad Relativa (%)	27	
	Presión de Vapor Saturado kPa	3.1697	Ashrae
2	Calculo Presión de Vapor kPa	0.855819	
	Se debe calcular la masa de vapor que hay en la habitación en ese momento		
3	R atm-l/(mol-K)	0.082	Masa Molecular del Agua (gramos)
	Constante de Los Gases Ideales		18
	Presión (Kpa/ k * mol)	101.318994	
	Es Necesario hacer la conversión de los valores de temperatura en °C a °K		
	Temperatura Exterior (°K)	298.15	$P_{vap} V = m_{vap} R T$
	m vap (moles)		
	Calculo Masa Vapor		
	Para un Volumen de 1 m ³	0.3454955	
	Subtotal		
	m vap (gramos)	6.21891894	
4	Se calcula la máxima masa de vapor de que puede contener el aire que es la masa de vapor saturado		
	m vap saturada (moles)		
	Calculo Masa Vapor	1.27961295	$P_{vap,sat} V = m_{vap,sat} R T$
	Para un Volumen de 1 m ³		
m vap (gramos)	23.0330331		
5	Se obtiene la Humedad Absoluta de la siguiente ecuación		
	$H.A = \frac{m_{vap}}{Vol_{aire}}$		
	Humedad Absoluta	6.21891894	
	gramos/ m ³		
Para un Volumen de 1m ³			
Humedad Específica		0.0058146	
kg de agua / Kg de Aire			

La humedad absoluta fue de 6.21 gr / m³, se utilizó un volumen hipotético de 1 m³ ya que es un número mínimo estándar.

En términos de kg de agua/ kg de aire el valor es de 0.0058146 kg agua/ kg aire.

Para este ejercicio se va a tomar la metodología empleada por Ríos (2013), utilizada para hallar la cantidad de zeolita que se va a emplear en el experimento.

Parámetros a tener en cuenta

- La cantidad de zeolita que se concentra en el invernadero tiene como objetivo mantener la humedad relativa en un promedio de 50 % en su proceso de adsorción.

Para determinar la hora y la fecha de inicio para el cálculo de la zeolita se analiza el valor de humedad relativa promedio de 24 horas de un día tipo por los 12 meses del año, también se observa el valor de temperatura máxima y la hora en que se presentan estos valores en la ciudad de Culiacán, Sinaloa. (Estos valores han sido proporcionados por la facultad de Biología de la Universidad Autónoma de Sinaloa)

Tabla 12. Valores de temperaturas máximas y humedades relativas máximas de la ciudad de Culiacán, Sinaloa.
Fuente: Propia.

Temperaturas Máximas				Humedades Relativas Máximas			
	°C	HR	Hora		HR	°C	Hora
Enero	25.33	41.73	16:00	Enero	79.66	15.58	06:00
Febrero	29.21	33.81	13:00	Febrero	77.75	14.5	05:00
Marzo	31.58	30.46	13:00	Marzo	88.43	17.9	05:00
Abril	30.4	39.88	16:00	Abril	86.38	21.26	04:00
Mayo	33.16	29.43	15:00	Mayo	56.2833	23.8	23:00
Junio	36.25	45.61	14:00	Junio	82.3	27.03	06:00
Julio	37.86	37.58	15:00	Julio	85.01	25.6	04:00
Agosto	35.58	43.01	15:00	Agosto	90.86	24.833	06:00
Septiembre	32.23	58.76	14:00	Septiembre	88.41	26.11	07:00
Octubre	34.98	48.33	15:00	Octubre	88.55	23.73	07:00
Noviembre	31.07	43.06	12:00	Noviembre	89.67	20.78	03:00
Diciembre	27.1	46.26	13:00	Diciembre	78.23	16.53	01:00

Tabla Temperaturas Máximas Culiacán

Tabla Humedades Relativas Máximas Culiacán

Basados en el criterio de remover la mayor cantidad de humedad, el valor que se establece para iniciar el cálculo de la cantidad de zeolita, es el promedio más alto de la humedad relativa a lo largo del año. En este caso se presenta en agosto con **90.86 %** y una temperatura de **24.833 °C** a las **06:00 h**.

1. INICIO

Temperatura:	24.833 °C
Humedad Relativa:	90.86%
Fecha:	Agosto
Hora:	06:00 am

- Valor de la humedad absoluta: **0.0174358 kg de agua / kg de aire**
- Se toma el mismo valor de temperatura de inicio de cálculo, sin embargo, el valor de humedad relativa será de 50 %:

0.0095949 kg de agua / kg de aire.

En la metodología de Ríos (2013) planteada en su tesis de Maestría titulada “Diseño y análisis de un sistema cuasi pasivo para la deshumidificación de espacios”, se señala que se debe tener en cuenta la masa de agua a través de la siguiente ecuación:

$$m_{\text{agua a remover}} = (w - w_{50\%}) m_{\text{aire}}$$

Donde $m_{\text{aire}} = P_{\text{aire}} * Vol_{\text{lugar}}$

P_{aire} : La densidad del aire depende de la temperatura, en este caso es 1.184 (kg/m³).

Humedad Inicial (w)	Humedad Inicial (w ₅₀)	P: Densidad del Aire	Volúmen
kg de agua/kg de aire	kg de agua/kg de aire	kg/m ³	m ³
0.0174358	0.010767792	1.184	1

$m_{\text{agua a remover}}$
kg de agua
0.007894922

El agua a remover es: **0.007894922 kg de agua**

- Siguiendo esta misma metodología, se hace un cálculo para remover el agua por efecto de la ventilación:

$$m_{\text{agua a remover}} = (w - w_{50\%}) m_{\text{aire}}$$

Donde $m_{\text{aire}} = P_{\text{aire}} * V * Vol_{\text{lugar}}$

Donde $V = \text{velocidad de viento} * (C_v * A_v)$ C_v y A_v

Corresponde a la eficiencia de la ventana y el área libre de la abertura de la ventana. Para este caso, según Ashrae $C_v = 0.55$

Velocidad de Viento	Área de Abertura m ²	Eficiencia de la Ventana	$m_{\text{agua a remover}}$
V (m/h)	0.25	0.55	kg/hr
4680			5.080382273

Se realiza la sumatoria de ambas operaciones

$$m_{\text{total agua a remover}} = 5.080382273 \text{ kg/hr} + 0.007894922 \text{ kg/hr}$$

$$m_{\text{total agua a remover}} = 5.0882831493 \text{ kg/hr}$$

Se tienen tres tipos de zeolitas con distintos porcentajes de adsorción por peso, a partir de estos valores y con el valor de la masa total de agua, que se va a remover, se determinará la cantidad de zeolita.

Zeolita (Zeolitech)	42	% peso en agua
Zeolita (San Andrés)	24.88	% peso en agua
Zeolita (Sintética)	27	% peso en agua

A continuación, se muestran los valores de las tres zeolitas que absorbe en promedio en un espacio por kilo:

	Kg de agua / Kg de Zeolita	m_{agua a remover}
Zeolita (Zeolitech)	0.42	kg 5.088283149
Zeolita (San Andrés)	0.2488	
Zeolita (Sintética)	0.27	

$$m_{\text{zeolita}} = \text{kg}_{\text{agua}} / \text{kg}_{\text{agua}} / \text{kg}_{\text{zeolita}}$$

Según el tipo de zeolita que se va a elegir, los kilogramos necesarios para el prototipo experimental serán de:

	Kg de agua / Kg de Zeolita	kg de zeolita necesarios para obtener Humedad Relativa del 50%.	Kg de Zeolita
Zeolita (Zeolitech)	0.42	→	12.11495988
Zeolita (San Andrés)	0.2488	→	20.45129883
Zeolita (Sintética)	0.27	→	18.84549315

Para ubicar la zeolita dentro del invernadero, se considera el valor de la densidad del material: La densidad de la zeolita es de 1 gr/cc o sea, un metro cúbico pesa 1.000 kg, debido a esta homogeneidad se debe distribuir el material desecante uniformemente, se puede lograr dividiendo el peso de la zeolita en bandejas de lámina perforada.

2.2 Localización caso de estudio

El caso de estudio se llevará a cabo en la azotea del Parque de Innovación Tecnológica, de la Universidad Autónoma de Sinaloa, en la ciudad de Culiacán. El centro de investigación se encuentra al noreste de la ciudad y es parte del conjunto de Ciudad Universitaria.



Fig. 85. Localización caso de estudio. Fuente: Google Maps.

“El Parque de Innovación Tecnológica (PIT), es una unidad organizacional de la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), inaugurado en mayo de 2014 con el objeto de fungir como impulsora del modelo de la triple hélice, mediante el cual, gobierno, empresas, sector educativo, y sociedad, se interrelacionan en aras de generar proyectos interdisciplinarios colaborativos que incentiven el desarrollo sustentable del Estado de Sinaloa.”



Fig. 86. Implantación caso de estudio. Fuente: Propia.

Se proyectan dos módulos construidos en block de concreto de 0.12 m de espesor con las siguientes medidas (espacio libre entre muros): 1.60 m de ancho, 1.60 m de largo y 2 m de alto. Se tienen entonces 5.12 m³ de aire que deben ser enfriados y deshumidificados. A continuación, se presentan los planos del módulo experimental y el módulo testigo. El módulo experimental es donde se va a llevar a cabo la prueba del sistema de enfriamiento junto con la zeolita.

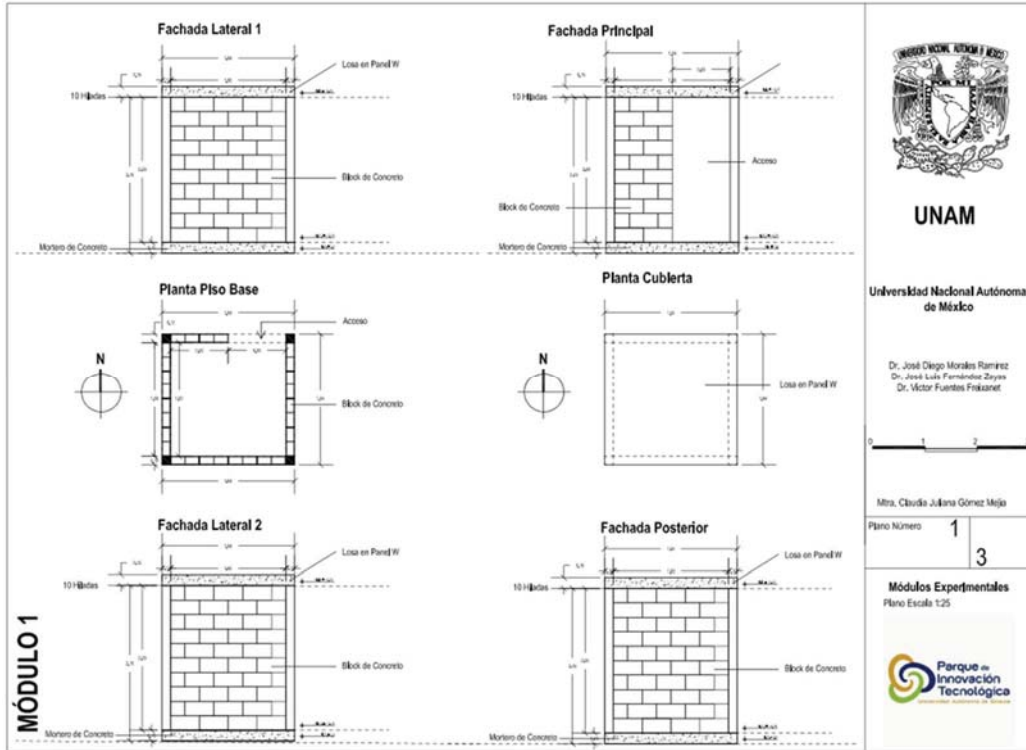


Fig. 87. Planos módulo de control. Fuente: Propia.

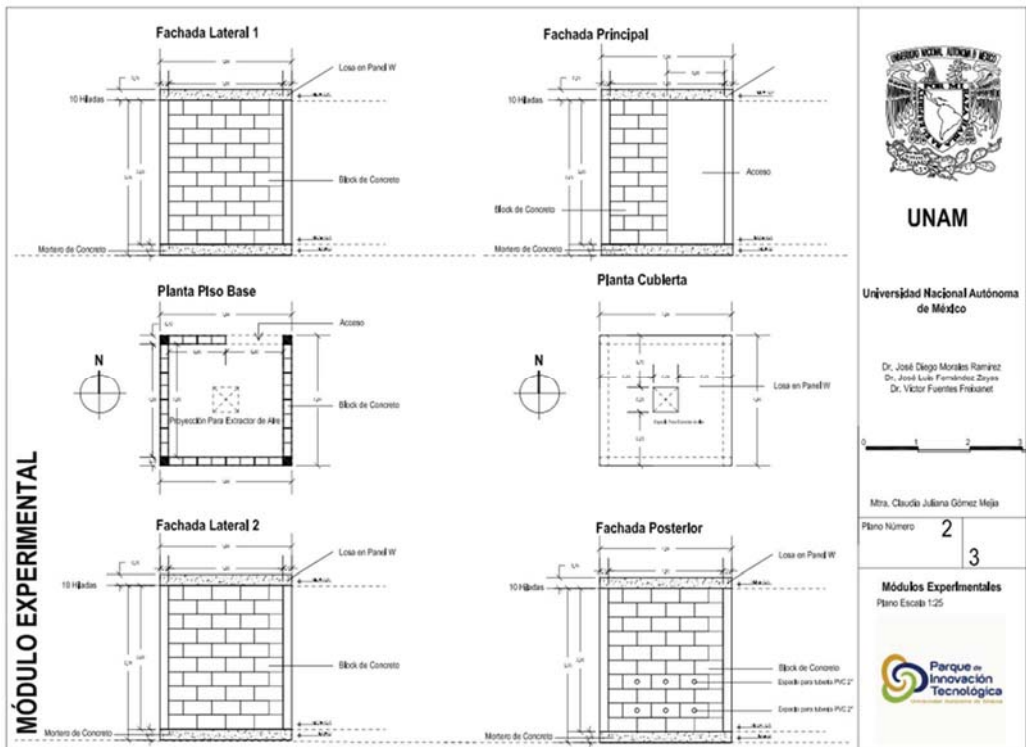


Fig. 88. Planos módulo experimental. Fuente: Propia.

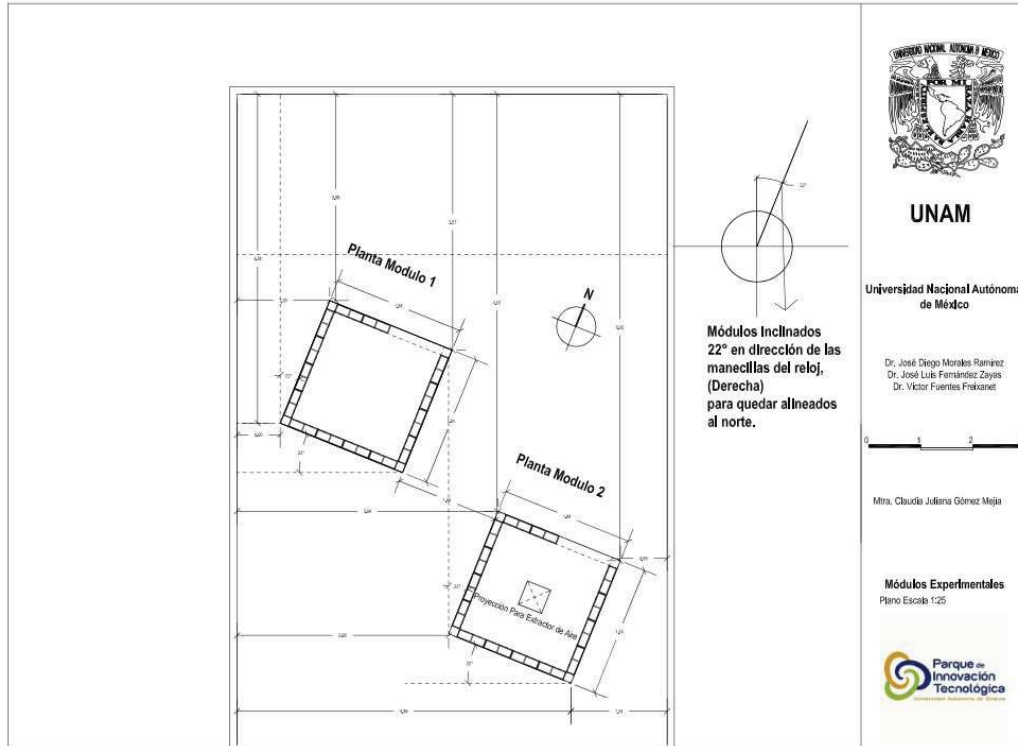


Fig. 89. Implantaci3n de los m3dulos de estudio en la azotea del Parque De Innovaci3n Tecnol3gica UAS. Fuente: Propia.

2.3 An3lisis solar

Se realiza un an3lisis de las proyecciones solares en distintas 3pocas a lo largo de un a1o, con el objetivo de minimizar las sombras arrojadas sobre los dos m3dulos de estudio. Este diagn3stico se hace con el m3todo de diagrama de sombras para la ciudad de Culiac3n, Sinaloa, para los d3as: 21 de junio, 21 de septiembre y 21 de diciembre en el horario matutino y vespertino. El an3lisis se complementa con un an3lisis cualitativo con el software *Sketchup*, para la misma ciudad de estudio.

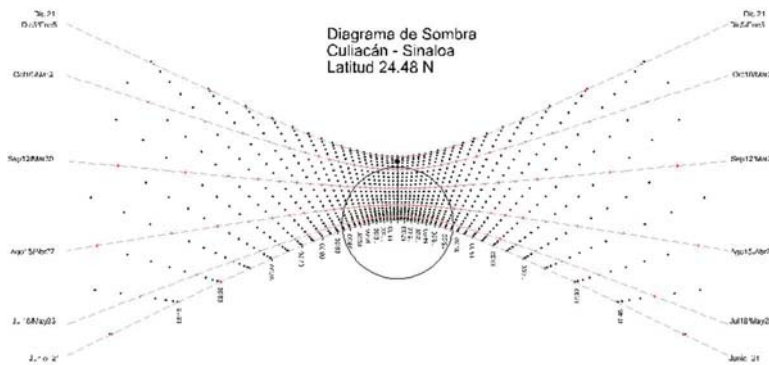


Fig. 90. Diagrama de sombras para la ciudad de Culiac3n, Sinaloa. Fuente: Propia.

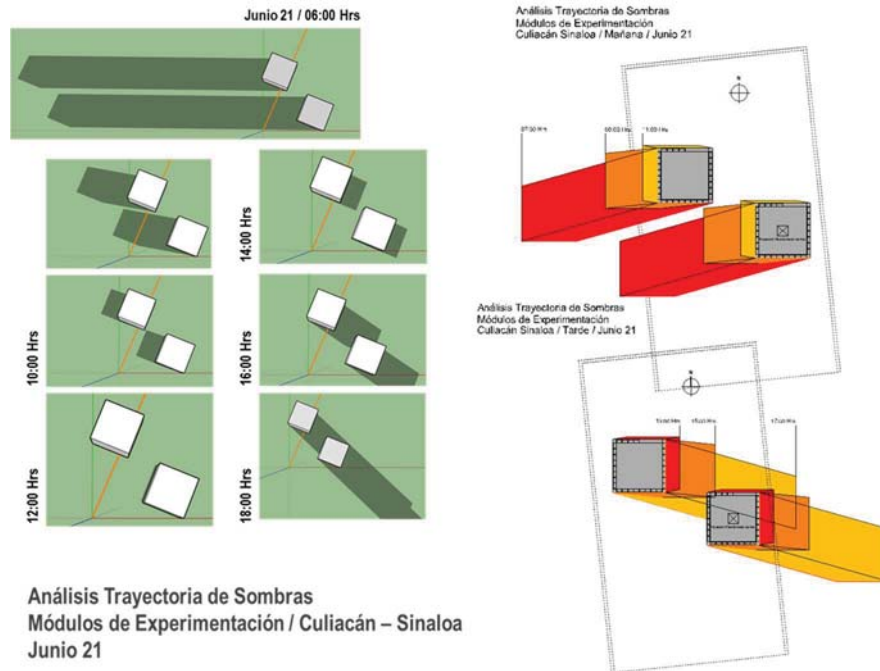


Fig. 91. Diagnóstico proyección de sombras para módulos de experimentación, fecha junio 21. Fuente: Propia

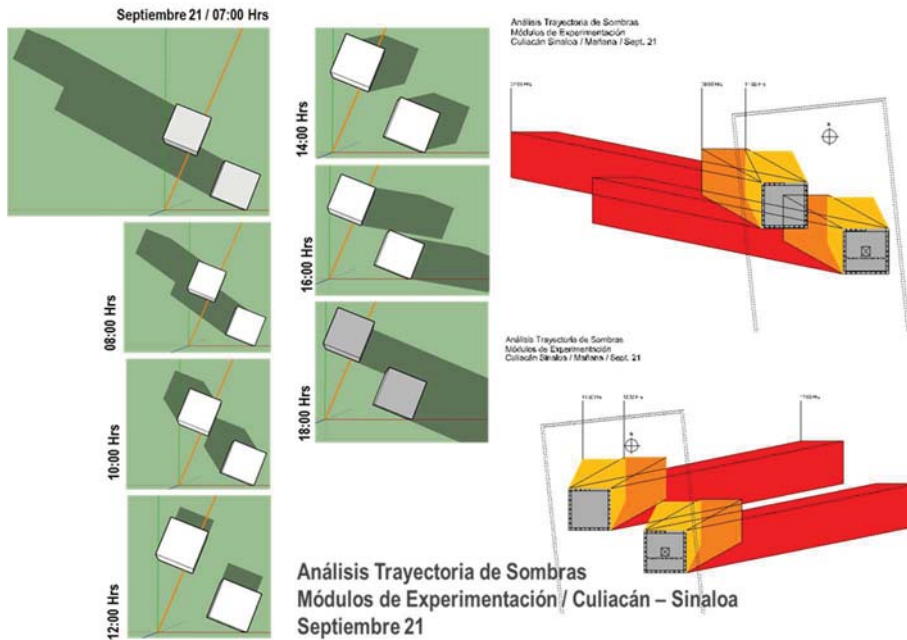


Fig. 92. Diagnóstico proyección de sombras para módulos de experimentación, fecha septiembre 21. Fuente: Propia

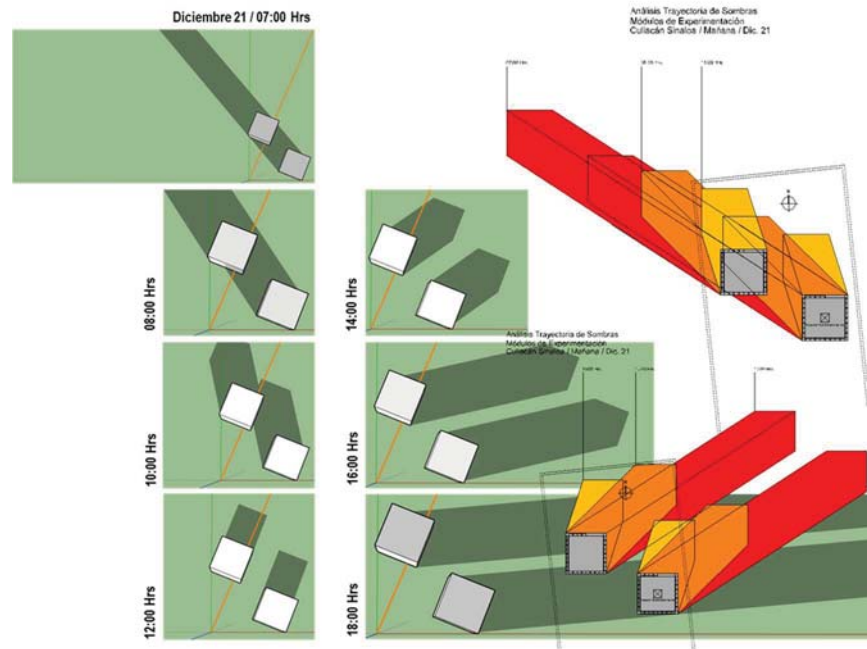


Fig. 93. Diagnóstico proyección de sombras para módulos de experimentación, fecha diciembre 21. Fuente: Propia

2.4 Proceso de construcción del módulo de experimentación.



Fig. 94. Proceso inicial de construcción módulos. Fuente: Propia



Fig. 95. Levantamiento de muros, módulos de experimentación. Fuente: Propia



Fig. 96. Levantamiento de muros, y vaciado de losa módulos de experimentación. Fuente: Propia



Fig. 97. Vaciado de losa, módulos de experimentación. Fuente: Propia



Fig. 98. Trabajos finales, módulos de experimentación. Fuente: Propia

2.5 Proceso de construcción del módulo *Invernadero*

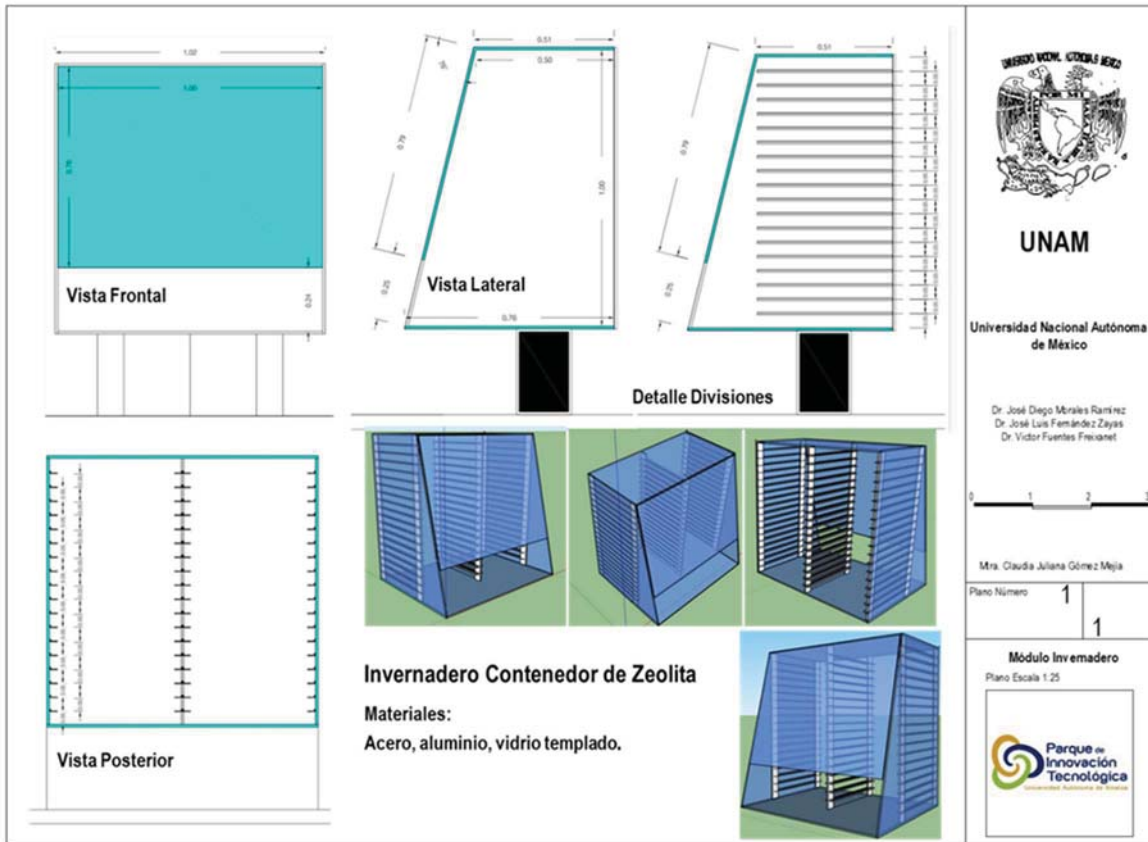


Fig. 99. Planos invernadero contenedor de zeolita. Fuente: Propia

El proceso de construcción del invernadero contó con dos etapas: la primera fue la construcción del esqueleto de acero y aluminio por partes independientes para ser armadas en la azotea del edificio, este esqueleto se subió por medio de poleas.



Fig. 100. Instalación del invernadero contenedor de la zeolita. Fuente: Propia

En la segunda etapa se armaron las piezas, la base del invernadero es acero de grueso calibre y está soportado por llantas para hacer más fácil la movilidad durante el montaje del experimento.



Fig. 101. Instalación del invernadero contenedor de la zeolita. Fuente: Propia.

2.6 Extractor de aire

Para renovar el aire de una forma pasiva en el módulo experimental se proyectó instalar en el techo un extractor atmosférico. Se realizó un balance de temperaturas internas para los 12 meses del año en las 24 horas del día teniendo en cuenta las propiedades de los materiales de los módulos: orientación, dimensiones, temperatura exterior, humedad relativa exterior, radiación, humedad específica y vientos. Este procedimiento lo integran cinco etapas: obtención de datos climáticos, ganancia de calor, capacitancia del edificio, Qload o ganancia total de calor y resultado de temperatura interior.

DATOS						Balance Térmico Enero Orientación Sur					
LOCALIZACIÓN						FACHADA ESTE					
Ciudad	Culiacán, Sin					FACHADA SUR					
Latitud	24°48'15" N					Fachada Lateral 1					
Longitud	107°25'52" W					Fachada Lateral 1					
Altitud	54 msnm					Muro de Concreto					
DÍA DE DISEÑO						MATERIALES					
Fecha de diseño	21/01/2016 Enero					Esesor (mm)	Conductividad Térmica (w/m² K)	Absortancia (α)	Emitancia (ε)	Transmitancia	
Número consecutivo del Día del año	21.00					Muro Block de concreto	0.12	1.2	0.8	0.8	0
DATOS DEL ESPACIO						Layer Concreto Armado	0.05	1.74			
	Alto (m)	Ancho (m)	Área (m²)			Materiales Ambiente	0.05	0.24			
Muro Este	2.3	1.84	4.232			Techo al Interior	0.05	0.372			
Muro Oeste	2.3	1.84	4.232								
Muro Sur	2.3	1.84	4.232								
Muro Norte	2.3	0.92	2.116								
Abertura	2	0.8	1.6								
Cubierta	1.84	1.84	3.3856								
Volúmen m³		1.5									
		5.12									
MATERIALES											
	Esesor (m)	Conductividad Térmica (w/m² K)	Absortancia (α)	Emitancia (ε)	Transmitancia						
Muro Block de concreto	0.12	1.2	0.8	0.8	0						

Fig. 102. Elementos de la envolvente, espesores y propiedades de conductividad térmica. Fuente: Propia.

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo.

Tabla 13. Balance térmico módulo experimental enero. Fuente: Propia.

Módulo Experimental Temperatura Interior Mes Enero																							
	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Temp Exterior	15.7	15.8	15.3	15.7	16.0	15.6	16.0	15.9	17.9	21.0	22.9	23.5	24.8	25.2	25.2	25.3	23.8	21.5	19.4	18.6	18.1	16.0	15.3
Temp Interior	15.7	16.1	16.5	16.8	17.1	17.4	17.7	18.1	19.0	20.0	21.1	22.0	23.1	24.2	25.2	25.8	26.1	26.0	25.7	25.4	25.1	24.5	24.0
% HR	72.73	74.22	78.03	78.98	78.68	79.67	77.63	77.78	70.87	59.95	55.37	55.17	47.17	46.28	44.88	41.73	47.4	54.37	59.48	59.57	62.25	71.07	75.07

Tabla 14. Balance térmico módulo experimental febrero. Fuente: Propia.

Módulo Experimental Temperatura Interior Mes Febrero																							
	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Temp Exterior	14.2	14.0	13.8	13.8	13.8	14.5	16.3	17.9	21.7	23.8	25.9	28.0	29.2	29.2	28.9	28.7	26.6	23.3	20.9	19.8	19.3	18.4	17.3
Temp Interior	14.2	14.74	15.19	15.57	15.91	16.29	16.97	18.12	19.88	21.81	23.71	25.35	26.88	28.41	29.61	30.38	30.48	30.01	29.31	28.56	27.86	27.14	26.38
% HR	75.8	76.47	75.87	76.07	77.75	73.08	64.2	56.8	45.4	39.9	36.88	34.75	33.82	32.85	33.07	32	38.37	45.98	59.95	66.97	69.57	71.32	69.77

Tabla 15. Balance térmico módulo experimental marzo. Fuente: Propia.

Módulo Experimental Temperatura Interior Mes Marzo																							
	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Temp Exterior	20.42	20.13	19.15	18.92	17.9	18.67	20.88	23.7	26.18	28.23	30.23	31.32	31.58	30.97	30.4	28.72	26.75	25.27	23.85	22.98	22.4	22.13	22.1
Temp Interior	20.41	20.82	21.08	21.27	21.31	21.41	22.05	23.07	24.48	25.98	27.41	28.5	29.46	30.28	31.09	31.41	31.39	31.11	30.7	30.24	29.78	29.34	28.91
% HR	83.07	84.4	87.78	88.23	88.43	86.37	74	60.13	49.55	42.72	33.68	29.13	30.47	33.4	36.35	32.18	32.67	40.7	42.65	46.35	52.1	52.93	50

Tabla 16. Balance térmico módulo experimental abril. Fuente: Propia.

Módulo Experimental Temperatura Interior Mes Abril																							
	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Temp Exterior	22.62	22.25	21.48	21.27	21	20.02	20.93	22.77	25.02	27.38	29.6	29.78	29	29.33	30.38	30.4	30.02	29.38	28.32	26.73	25.08	23.97	22.88
Temp Interior	22.61	22.96	23.17	23.33	23.46	23.48	23.76	24.4	25.3	26.09	26.69	27.6	28.33	29.19	30.3	31.15	31.72	31.98	31.93	31.73	31.38	30.96	30.48
% HR	67.05	70.78	80.88	86.38	83.57	81.48	80.15	76.02	68.78	57.07	40.85	39.48	48.17	43.07	33.63	39.88	43.4	44.42	50.17	59.35	65.97	72.32	76.77

Tabla 17. Balance térmico módulo experimental mayo. Fuente: Propia.

Módulo Experimental Temperatura Interior Mes Mayo																							
	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Temp Exterior	23.72	22.97	22.62	21.37	20.72	20.32	21.6	23.63	25.7	27.85	30.08	31.8	32.63	33.05	33.17	33.07	32.5	31.43	29.45	27.18	25.3	24.48	23.8
Temp Interior	23.71	23.99	24.2	24.27	24.26	24.22	24.43	25.08	26.13	27.19	28.23	29.08	29.92	31.15	32.37	33.42	34.14	34.4	34.2	33.79	33.25	32.68	32.1
% HR	45.72	48.52	48.18	50.57	53.37	55.2	50.55	48.38	41.58	36.58	30.42	30.52	29.87	27.22	29.43	28.35	25.93	25.05	28.82	35.92	49.87	55.28	56.28

Tabla 18. Balance térmico módulo experimental junio. Fuente: Propia.

Módulo Experimental Temperatura Interior Mes Junio																							
	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Temp Exterior	28.32	28.2	27.95	27.33	27.1	27.03	27.98	30.55	31.42	32.98	34.28	34.62	35.95	36.25	35.93	35.63	35.55	34.92	33.98	32.78	31.85	31.23	30.55
Temp Interior	28.31	28.56	29.2	29.3	29.33	29.35	29.48	29.96	30.6	31.33	32.07	32.59	33.11	33.92	34.72	35.37	35.84	36.05	36.13	36.11	36.02	35.89	35.67
% HR	77.53	79.22	79.62	81.1	82.07	82.3	78.33	69.38	65.22	57.27	53.22	51.15	46.4	45.62	46.85	44.17	42.12	43.12	44.45	46.8	51.35	54.08	58.63

Tabla 19. Balance Térmico Módulo Experimental julio. Fuente: Propia.

Módulo Experimental Temperatura Interior Mes Julio																							
	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Temp Exterior	26.83	27.53	27.5	25.6	25.18	24.77	25.37	26.78	29.2	32.28	33.68	34.73	35.83	36.8	37.87	37.15	35.85	35.3	34.73	33.12	32.08	30.23	30.02
Temp Interior	26.83	27.18	27.51	27.64	27.73	27.75	27.9	28.34	29.06	29.96	30.82	31.48	32.37	33.47	34.59	35.52	36.09	36.4	36.05	36.04	35.94	35.69	35.45
% HR	77.08	78.37	79.7	85.02	83.15	81.15	76.87	71.35	61.15	50.98	48.13	45.82	44.2	38.58	37.58	45.57	49.88	51.62	51.98	56.13	60.35	66.48	59.68

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo.

Tabla 20. Balance térmico módulo experimental agosto. Fuente: Propia.

Módulo Experimental Temperatura Interior Mes Agosto																							
	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Temp Exterior	25.13	24.97	25.12	24.95	24.95	24.83	25.45	25.78	26.85	28.95	31.15	33.1	34	35.07	35.58	32.92	28.52	29.9	30.23	28.2	26.87	26.1	26.2
Temp Interior	25.13	25.49	25.82	26.1	26.35	26.57	26.92	27.33	27.94	28.77	29.7	30.45	31.38	32.6	33.5	34.2	34.23	34.25	34.14	34.94	34.42	33.88	33.42
% HR	88.68	90.02	89.65	90.25	90.5	90.87	88.37	88.3	84.48	78.08	69.02	55.07	52.22	46.92	43.02	57.17	68.18	67.48	67.22	78.88	85.33	88.35	89.87

Tabla 21. Balance térmico módulo experimental septiembre. Fuente: Propia.

Módulo Experimental Temperatura Interior Mes: Septiembre																							
	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Temp Exterior	27.35	26.75	26.5	26.47	26.6	26.52	26.12	27.03	27.45	28.67	31.05	31.4	31.72	32.23	31.37	31.65	31.23	31	29.95	29.07	28.47	28.2	27.98
Temp Interior	27.35	27.59	27.79	27.97	28.14	28.34	28.64	29.22	29.92	30.54	31.13	31.48	32.04	32.69	33.24	33.57	33.8	33.94	33.76	33.53	33.4	33.25	32.97
% HR	76.4	83	84.48	85.03	82.22	83.68	88.42	82.02	79.57	72.95	62.03	58.18	58.18	58.77	64.32	63.5	63.27	62.18	65.5	68.1	72.2	74.38	75.23

Tabla 22. Balance térmico módulo experimental octubre. Fuente: Propia.

Módulo Experimental Temperatura Interior Mes: Octubre																							
	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Temp Exterior	25.8	24.95	24.75	24.42	24.12	23.88	23.73	24.92	27.12	29.85	31.72	32.88	33.77	34.98	34.9	34.33	32.23	30.5	29.23	28.48	28.05	27.77	27.43
Temp Interior	25.8	26.08	26.32	26.51	26.65	26.75	26.84	27.09	27.61	28.35	29.1	29.53	30.03	30.82	31.54	31.99	31.99	31.68	31.27	30.84	30.4	29.98	29.58
% HR	76.35	80.62	81.18	82.78	84.37	87.17	88.55	83.92	75.52	63.37	55.38	51.5	49.12	45.82	48.33	50.93	58.23	62.78	67.92	71.58	74.75	76.58	78.07

Tabla 23. Balance térmico módulo experimental noviembre. Fuente: Propia.

Módulo Experimental Temperatura Interior Mes: Noviembre																							
	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Temp Exterior	20.82	20.55	20.78	20.48	20.72	20.45	21.1	22.85	25.65	27.77	29.63	31.07	30.9	30.82	30.7	30.05	28.92	27.8	26.57	24.98	23.58	22.62	22.53
Temp Interior	20.82	21.23	21.6	21.91	22.2	22.46	22.99	23.81	25.14	26.49	27.61	28.62	29.48	30.42	31.27	31.72	31.79	31.71	31.52	31.19	30.76	30.27	29.83
% HR	85.32	86.48	89.67	88.1	87.47	88.77	86.22	80.7	68.63	58.13	49.53	43.07	44.3	45.2	45.67	49.33	49.77	55.02	60.62	68.7	76.57	81	81.17

Tabla 24. Balance térmico módulo experimental diciembre. Fuente: Propia.

Módulo Experimental Temperatura Interior Mes: Diciembre																							
	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Temp Exterior	16.53	16.62	16.62	16.15	17.02	16.7	17.02	19.32	21.73	24.85	26.65	27.02	27.1	26.67	25.97	25.48	23.58	22.27	21.32	20.33	19.17	18.37	17.58
Temp Interior	16.53	16.99	17.42	17.75	18.13	18.45	18.88	19.7	20.84	22.18	23.43	24.41	25.28	26.15	26.8	27.25	27.31	27.24	27.09	26.86	26.55	26.2	25.81
% HR	78.23	74.73	71.62	69.05	62.22	63.53	62.77	58.58	45.98	37.08	38.95	42.62	46.27	48.87	46.5	45.47	50.32	52.63	55.52	61.12	63.88	66.15	70.22

Una vez realizado el balance térmico anual para las 24 horas, se observa que las temperaturas interiores en cada uno de los meses durante las primeras horas del día (01:00h -08:00h) son más altas entre 2 y 3 °C que las exteriores. En el transcurso de la mañana las temperaturas disminuyen y después del mediodía vuelven a sobrepasar las exteriores como consecuencia de las ganancias aportadas por la interacción de los materiales y las condiciones externas. Al hacer un análisis detallado de las ganancias, se puede determinar que los valores más altos se generan por la alta conductividad de los materiales de construcción, lo que genera un sobrecalentamiento al interior del módulo.

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo.

Tabla 25. Resumen sumatorias balance térmico para el mes de agosto. Fuente: Propia.

		RESUMEN																						
Mes		01.08	02.08	03.08	04.08	05.08	06.08	07.08	08.08	09.08	10.08	11.08	12.08	13.08	14.08	15.08	16.08	17.08	18.08	19.08	20.08	21.08	22.08	
°K	Temp. Interior	298.353333	298.37	298.73	299.03	299.31	299.52	299.67	299.74	299.76	299.76	299.76	299.76	299.76	299.76	299.76	299.76	299.76	299.76	299.76	299.76	299.76	299.76	
°C	Temp. Interior	25.13333333	25.22	25.58	25.88	26.18	26.37	26.72	26.98	27.08	27.08	27.08	27.08	27.08	27.08	27.08	27.08	27.08	27.08	27.08	27.08	27.08	27.08	
Capacidad Almacenamiento		617.7796073	617.7796073	617.7796073	617.7796073	617.7796073	617.7796073	617.7796073	617.7796073	617.7796073	617.7796073	617.7796073	617.7796073	617.7796073	617.7796073	617.7796073	617.7796073	617.7796073	617.7796073	617.7796073	617.7796073	617.7796073	617.7796073	
Cálculo Global		01.08	02.08	03.08	04.08	05.08	06.08	07.08	08.08	09.08	10.08	11.08	12.08	13.08	14.08	15.08	16.08	17.08	18.08	19.08	20.08	21.08	22.08	
Condensación																								
W/m²	ZCondens	0.00	220.00	208.27	177.00	158.00	139.50	220.37	254.72	376.10	511.10	568.26	457.97	366.11	280.24	200.64	130.70	75.30	35.30	28.30	-55.00	479.00	-296.97	-308.07
Radiación Solar Directa																								
W/m²	ZGIRAD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.21	0.47	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Infiltración																								
W/m²	ZInfil	0.00	-0.00	-1.34	-2.52	-3.25	-4.13	-3.47	-3.97	-2.10	1.38	4.60	7.76	7.24	7.24	2.90	-1.60	-5.31	-11.63	-19.79	-19.79	10.90	-21.60	-22.25
Ventilación																								
W/m²	ZVentil	0.00	-0.00	-0.00	-0.17	-0.22	-0.20	-0.21	-0.26	-0.15	0.09	0.32	0.50	0.40	0.40	0.14	-0.12	-1.06	-0.79	-0.73	0.74	-1.47	-1.57	-1.57
Global																								
W/m²	ZGlo	0.00	219.97	204.88	174.33	155.41	135.16	216.77	251.50	374.06	513.12	573.34	466.79	373.83	284.06	200.64	130.66	75.30	35.30	28.30	-55.00	479.00	-296.97	-308.07
Temperature Inicial °C	25.13333333																							
Temperature Interior °C		25.13333333	25.48939324	25.82103824	26.10228711	26.34478961	26.57266566	26.82446142	27.10199470	27.40714209	28.78772290	29.89644102	31.44881371	31.87967322	32.69927810	33.00224874	34.19890420	34.22741917	34.29239024	34.14009703	34.83999102	34.42181300	33.84048108	

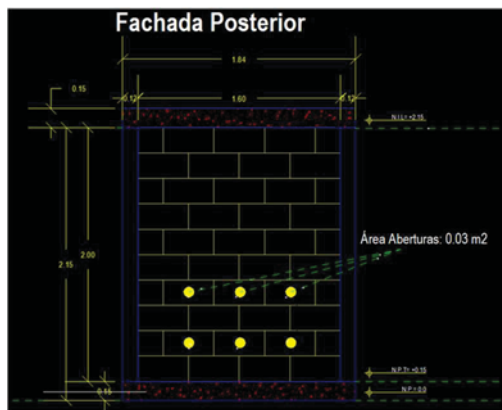
Es importante determinar cuál es la velocidad promedio mensual interior dentro del módulo experimental, teniendo en cuenta solo las aberturas del muro sur (unidireccionales) y los datos de velocidad promedio de viento. Se aplica la ecuación: "The British Standards Method" citada por Fuentes (2004) en el libro "Ventilación natural: cálculos básicos para arquitectura".

$$Q = 0.025 A v$$

Q= Tasa de Ventilación (m³/s)

A= Área libre de la abertura de ventilación (m²)

V= Velocidad de viento (m/s)



	Velocidad de Viento Exterior m/s	Q Tasa de Ventilación Promedio m³/s
Enero	1.1	0.18
Febrero	1.4	0.23
Marzo	1.2	0.20
Abril	1.5	0.25
Mayo	1.1	0.18
Junio	1	0.16
Julio	1.4	0.23
Agosto	1.3	0.21
Septiembre	1.5	0.25
Octubre	1.5	0.25
Noviembre	1.2	0.20
Diciembre	1.4	0.23

Fig. 103. Tasa de ventilación promedio anual módulo de experimentación. Fuente: propia.

Los datos arrojados del análisis muestran números que no son favorables para la ventilación dentro de los módulos, esto quiere decir que la sensación térmica dentro del módulo es alta. Es importante anotar que al momento de deshumidificar de forma pasiva es factible tener aberturas controladas. Se propone entonces una ventilación en el techo que se relacione directamente con una mejor optimización climática de este espacio por las diferencias de presión.

Cuando se habla de viviendas o espacios en el trópico cálido-húmedo tenemos la característica de la limitada ventilación natural dentro de ellos, por lo que la evolución de las temperaturas

tiende a ser alta. Con el objetivo de mejorar el movimiento del aire dentro de los módulos de experimentación y que contribuya a alcanzar la meta de este estudio se propone implementar en la cubierta un extractor atmosférico que ayude por diferencias de presión a remover el aire que se calienta dentro del módulo. Se adquirió el equipo Alum Chumex de 14 in.



Fig. 104. Extractor atmosférico que se va a utilizar en el proceso experimental. Fuente: Propia.

Se aplica la siguiente fórmula, suministrada por el fabricante del extractor, para calcular la capacidad de extracción de aire del ventilador:

MXACH-002:

$$\text{Extracción}^* = (0.818 + [0.0303 \times A]) \times (121.5 + [103.4 \times V] + [11.6 \times G] + [5.6 \times T]) \times 1.10$$

A: Altura en metros

V: Velocidad de Viento en Km/h

G: Gradiente Térmico en °C----Temperatura Interior – Temperatura exterior

T: Temperatura Exterior

Tabla 26. Capacidad de extracción ventilador atmosférico en módulo experimental. Fuente: Propia.

	CAPACIDAD DE EXTRACCIÓN VENTILADOR ATMOSFÉRICO MÓDULO EXPERIMENTAL m3/h																						
	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Enero	47.64	47.98	48.49	48.60	48.79	49.20	49.31	49.68	49.59	49.06	49.10	49.70	50.02	50.81	51.69	52.23	53.13	54.13	54.86	54.96	54.94	55.35	55.22
Febrero	55.56	56.14	56.64	56.98	57.26	57.28	57.07	57.36	57.17	57.90	58.64	59.14	59.95	61.29	62.50	63.29	64.36	65.45	65.92	65.77	65.34	65.12	64.95
Marzo	52.51	53.01	53.69	53.96	54.47	54.21	53.76	53.37	53.48	53.88	54.23	54.70	55.43	56.44	57.42	58.48	59.36	59.79	60.08	60.08	59.93	59.67	59.29
Abril	62.02	62.50	63.03	63.28	63.52	63.99	63.81	63.54	63.31	62.92	62.44	63.16	64.17	64.78	65.29	66.04	66.71	67.24	67.69	68.23	68.68	68.82	68.89
Mayo	51.08	51.67	52.02	52.65	52.94	53.09	52.69	52.34	52.31	52.27	52.17	52.13	52.50	53.40	54.43	55.41	56.31	57.03	57.77	58.45	58.83	58.70	58.50
Junio	46.13	46.93	47.62	48.36	48.86	49.24	49.24	48.78	49.20	49.40	50.07	50.62	50.74	51.89	53.04	53.93	54.44	54.90	55.31	55.72	55.92	55.95	55.97
Julio	60.98	60.97	61.28	62.27	62.54	62.74	62.60	62.34	61.88	61.26	61.38	61.48	61.77	62.30	62.80	63.96	65.06	65.59	65.54	66.28	66.67	67.29	67.18
Agosto	57.40	57.79	58.02	58.34	58.57	58.82	58.84	59.05	59.10	58.87	58.69	58.46	58.87	59.47	60.03	61.88	63.93	63.32	63.06	64.71	64.86	64.73	64.28
Septiembre	58.35	58.84	59.13	59.31	59.40	59.61	60.06	60.16	60.59	60.58	60.01	60.16	60.51	60.85	61.74	61.90	62.30	62.53	62.85	63.05	63.22	63.20	63.05
Octubre	63.39	64.03	64.34	64.66	64.92	65.12	65.27	64.95	64.39	63.79	63.60	63.45	63.49	63.63	64.31	64.97	65.94	66.46	66.68	66.64	66.44	66.20	66.00
Noviembre	52.69	53.18	53.41	53.81	53.97	54.32	54.49	54.42	54.31	54.54	54.68	54.92	55.76	56.63	57.44	58.14	58.73	59.17	59.56	60.00	60.26	60.27	59.92
Diciembre	56.56	56.93	57.31	57.82	57.76	58.19	58.42	58.10	58.00	57.76	58.04	58.74	59.48	60.45	61.35	61.97	62.90	63.44	63.75	64.00	64.26	64.31	64.33

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo.

Al aplicar la fórmula del fabricante arroja valores de extracción que sobrepasan los 45 m³/h, sin embargo, el cálculo no contempla el área de las aberturas ni el volumen del espacio.

Se adquirieron 100 kilos de zeolita natural denominada malla 12, de la empresa Zeolitech. El material será distribuido en las 36 bandejas fabricadas con aluminio y malla mosquitera. La granulometría de esta zeolita es de 3 a 5 mm.



Fig. 105. Zeolita que se va a utilizar en el experimento. Fuente: propia

3. Procedimiento Experimental

3.1 Proceso Experimental

Durante los meses de marzo y abril se realizó el montaje final del experimento:

- Se efectuó la conexión entre el módulo denominado invernadero, que contiene 62 kg de zeolita, y el módulo experimental.
- El desecante se distribuyó en todo el invernadero en bandejas que contenían 3 kg de zeolita.
- La conexión entre ambos módulos se realizó con 2.50 m de conducto flexible de aluminio de 3 in.
- Se le dio un acabado final con pintura blanca en ambos módulos.
- Las puertas se sellaron con Foamular 250 de 1 in X 48 in X 96 in.
- Las uniones de las conexiones de la tubería, así como las grietas, fueron selladas con poliestireno.
- Se colocó una lona blanca por encima de la tubería de aluminio con el fin de contrarrestar los rayos solares y evitar ganancias de calor por radiación directa.



Fig. 106. Construcción proceso experimental. Fuente: Propia.



Fig. 107. Construcción proceso experimental, conexión invernadero y módulo experimental. Fuente: Propia



Fig. 108. Construcción proceso experimental, bandejas dentro del módulo invernadero. Cada bandeja contiene 3 kg de zeolita. Fuente: Propia.

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo.



Fig. 109. Construcción proceso experimental, conexión con tubos de aluminio flexible. Fuente: Propia.



Fig. 110. Instalación de sensores en los módulos de estudio. Fuente: Propia

Se instalaron dos sensores Hobo para monitorear temperatura y humedad relativa en cada uno de los módulos. Los sensores se ubicaron a 1.80 m de altura, esta distancia se tomó desde el piso.



Fig. 111. Montaje módulo experimental. Fuente: Propia.

En el módulo de control se dispusieron dos entradas de aire con la misma ubicación y el mismo diámetro que en la fachada sur.

En la fachada norte se utilizó el mismo tipo de cerramiento del módulo experimental, se dejó un vano en la parte superior de la puerta que corresponde al área que hay en el techo donde se ubica el extractor.



Fig. 112. Montaje módulo de control. Fuente: Propia.

Se instalaron 2 extractores de aire, de 4 pulgadas, en cada módulo, se conectaron a dos temporizadores que activan los extractores simultáneamente por media hora en el siguiente horario:

07:00 h - 07:30 h, 09:00 h - 09:30 h, 11:00 h - 11:30 h, 13:00 h - 13:30 h, 15:00 h - 15:30 h, 17:00 h - 17:30 h, 19:00 h - 19:30 h, 21:00 h - 21:30 h, 22:00 h - 22:30 h, 23:00 h - 23:00 h.



Fig. 113. Instalación de extractores los módulos de experimentación. Fuente: Propia

En el módulo invernadero se instalaron dos sensores; el primero de contacto, de la marca *EasyLog USB* que tiene un termopar y monitoriza los valores de temperatura de la superficie de la zeolita. También se instaló un sensor *Hobo*, con el fin de tomar datos de temperatura y

humedad relativa, y conocer lo que pasa con estas dos variables en el módulo que contiene la zeolita.

Los dos sensores tomaron datos simultáneamente, cada cinco minutos, tanto en los módulos que están contruidos en block de concreto como en el exterior y el módulo invernadero. También se realizó la calibración de los sensores utilizados:

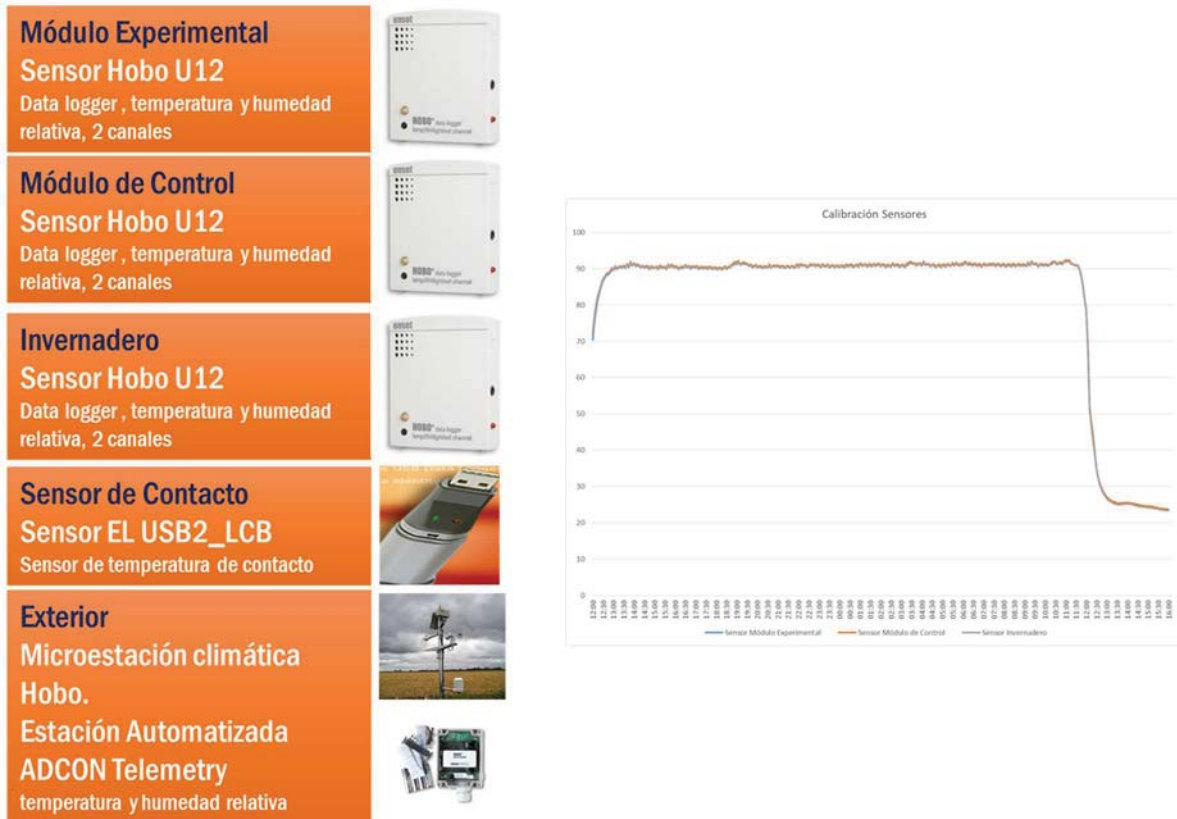


Fig. 114. Calibración de sensores utilizados en el proceso experimental. Fuente: Propia Fig. 114. Sensores utilizados en el módulo "invernadero" para la nueva fase de medición. Fuente: Propia

3.2 Prueba preliminar experimento I

Desde del 27 de abril hasta el 2 de mayo de 2018 se realizó una prueba de ensayo del sistema experimental en conjunto con el módulo de control:

Fecha de inicio: 27 abril de 2018

Fecha final: 2 de mayo de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos

Módulo experimental / Datos a evaluar:

Temperatura interior °C

Humedad relativa interior %

Módulo de control / Datos a evaluar

Temperatura interior °C

Humedad relativa interior %

Módulo invernadero/ Datos a evaluar

Temperatura interior °C

Humedad relativa interior %

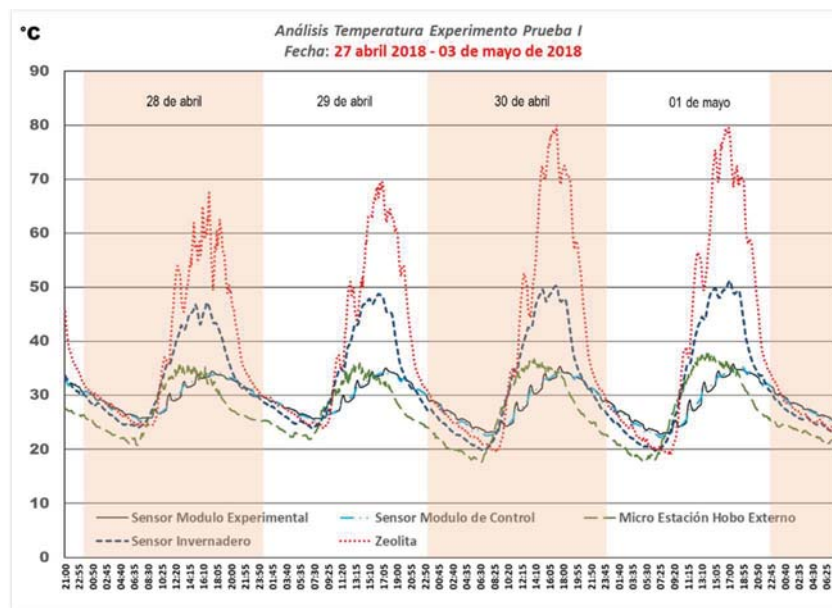
Temperatura superficie de la zeolita °C

Exterior / Datos a evaluar

Temperatura exterior °C

Humedad relativa exterior %

3.3 Análisis de datos preliminares – temperatura y humedad relativa



Se realizaron mediciones de temperatura durante cuatro días, en los cuales los valores tuvieron el desempeño normal de una gráfica de temperatura. De acuerdo con los valores analizados, las temperaturas promedio para esos días fueron “benévolas”, ya que no sobrepasaron los 30 °C. En el módulo experimental y en el módulo de control, las temperaturas presentaron valores muy parecidos; mientras que en el exterior las temperaturas promedio se situaron con los números más bajos comparados con el resto de valores medidos en el experimento.

Durante los días 30 de abril y 1 de mayo, el sensor, que se ubicó dentro del invernadero con el fin de medir la temperatura en la superficie de la zeolita, registró temperaturas hasta los 80 °C, mientras que la temperatura del aire en el mismo lugar llegaba a los 50 °C.

La humedad relativa tuvo un desempeño normal, se observaron humedades altas en las horas de la madrugada y se registró también el funcionamiento del desecante en el horario nocturno.

Tabla 27. Análisis valores temperatura experimento prueba I. Fuente: Propia

Temperatura				
Fecha	28 de abril			
	M. Experimental	M. Control	Exterior	M. Invernadero
Promedio	29.86	29.86	27.76	33.36
Varianza M. Experimental y Control	5.46			
Varianza M. Exp., Control y Exterior	5.40			
Varianza M. Exp. Control, Ext. e Invernadero	5.49			
Desviación M. Experimental y Control	2.34			
Desviación M. Exp., Control y Exterior	2.32			

Temperatura				
Fecha	29 de abril			
	M. Experimental	M. Control	Exterior	M. Invernadero
Promedio	29.80	29.68	27.64	33.34
Varianza M. Experimental y Control	5.45			
Varianza M. Exp., Control y Exterior	5.39			
Varianza M. Exp. Control, Ext. e Inv.	5.48			
Desviación M. Experimental y Control	2.34			
Desviación M. Exp., Control y Exterior	2.32			

Temperatura				
Fecha	30 de abril			
	M. Experimental	M. Control	Exterior	M. Invernadero
Promedio (%)	28.61	28.42	26.79	32.35
Varianza M. Experimental y Control	5.34			
Varianza M. Exp., Control y Exterior	5.29			
Varianza M. Exp. Control, Ext. e Inv.	5.39			
Desviación M. Experimental y Control	2.31			
Desviación M. Exp., Control y Exterior	2.30			

Temperatura				
Fecha	01 de mayo			
	M. Experimental	M. Control	Exterior	M. Invernadero
Promedio (%)	28.85	28.68	27.47	33.06
Varianza M. Experimental y Control	5.36			
Varianza M. Exp., Control y Exterior	5.32			
Varianza M. Exp. Control, Ext. e Inv.	5.43			
Desviación M. Experimental y Control	2.32			
Desviación M. Exp., Conrol y Exterior	2.31			

En las siguientes páginas se hace un análisis diario de las temperaturas y de las humedades relativas del experimento por 24 horas.

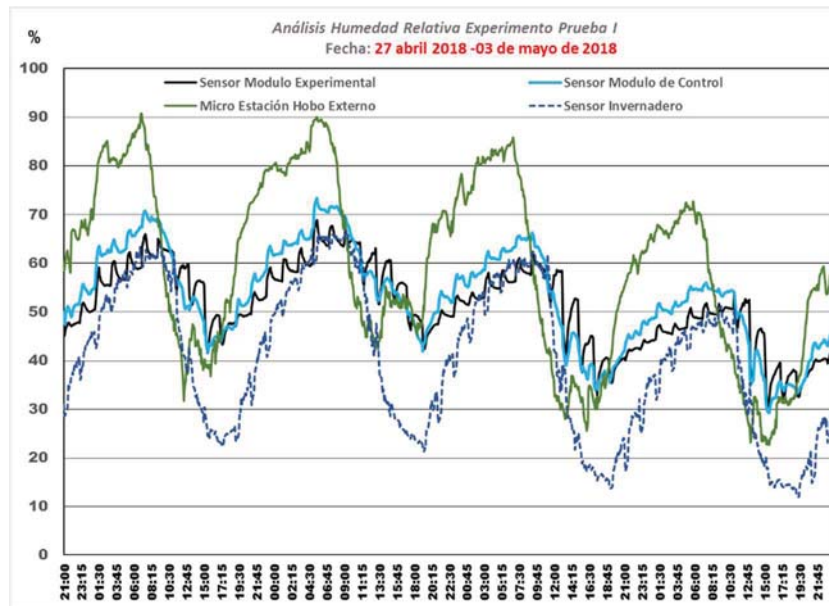


Fig. 116. Análisis humedad relativa experimento prueba I. Fuente: Propia.

Análisis temperatura

27 de abril de 2018

Para este experimento, la toma de datos inició a las 21:00 h. El sensor externo tuvo una lectura de 27.45 °C, en el módulo experimental fue de 33.13 °C y en el módulo de control llegaba a los 33.44 °C. En el invernadero llegaba a los 33.70 °C. La temperatura de la superficie de la zeolita, la cual al iniciar este experimento fue de 45.5 °C.

De las 21:00 h a las 00:00 h, los valores de las temperaturas disminuyeron. Al final del día en el módulo experimental la temperatura promedió 31.64 °C; en el módulo de control, 31.71 °C; en el invernadero, 32.89 °C, y en el sensor exterior, 26.65 °C. La diferencia de temperaturas entre los dos módulos fue de 0.07 °C, siendo más alta en el módulo de control. La diferencia de temperaturas entre el módulo experimental y el exterior fue 5.99 °C.

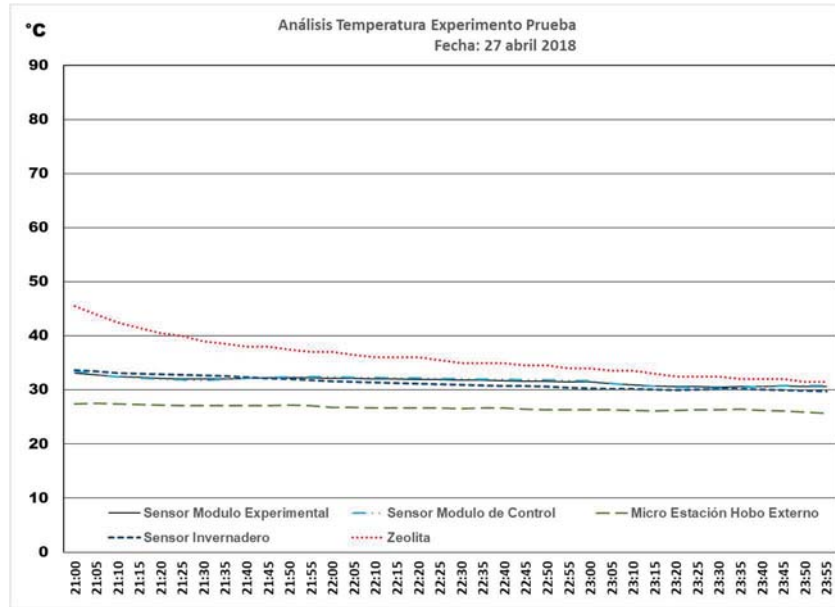


Fig. 117. Análisis temperatura 27 de abril 2018. Fuente: Propia.

Tabla 28. Tabla de temperaturas máximas y temperaturas mínimas 27 de abril. Fuente: Propia.

27-abr				27-abr			
	Temp Max	HR (%)	Hora		Temp Min	HR (%)	Hora
S. Módulo Exp.	33.131	46.968	21:00	S. Módulo Exp.	30.52	51.87	23:30
S. Módulo Control	33.443	49.956	21:00	S. Módulo Control	30.318	55.72	23:30
S. en Invernadero	33.704	30.819	21:00	S. en Invernadero	29.69	43.01	23:55
S. Externo	27.505	58.7	21:05	S. Externo	25.623	67.30	23:55
Zeolita	45.5		21:00	Zeolita	31.5		23:55

Análisis humedad relativa

27 de abril 2018

Para esta jornada la medición de esta variable se efectuó desde las 21:00 h hasta 00:00 h, cada 5 minutos. En este pequeño intervalo se observó que la humedad en el interior del invernadero fue la de menor valor, los rangos allí estuvieron entre 30 y 43 %, siendo este último el valor máximo, alcanzado a las 23:40 h.

Por encima de los datos al interior del invernadero estuvo la línea de humedad relativa en el módulo experimental donde su valor máximo fue de 51.87 % a las 23:30 h; en el módulo de control la humedad máxima se presentó a las 23:30 h con 55.71 %. Los mayores valores se presentaron en el exterior con un máximo de 69 % a las 23:40 h. En este sentido, la humedad relativa estuvo 5 % más baja que en el módulo de control, y 18 % más baja que en el ambiente.

Los valores mínimos se presentaron al inicio del experimento 21:05 h. En el exterior el valor mínimo fue de 58 % mientras que en el invernadero este valor fue de 28.51 %, allí entonces hubo una reducción del 29.49 %.

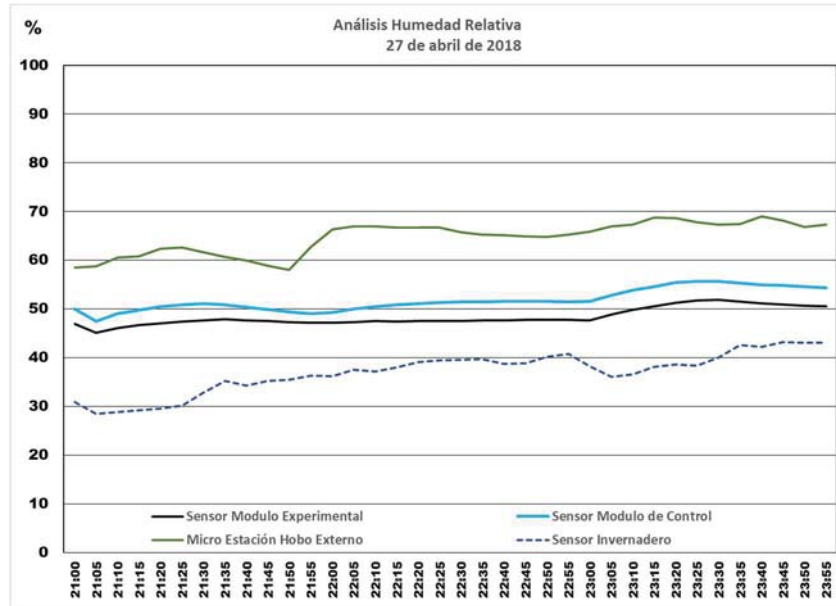


Fig. 118. Análisis humedad relativa, 27 de abril de 2018. Fuente: Propia.

Tabla 29. Tabla de humedades máximas y humedades mínimas 27 de abril. Fuente: Propia.

27-abr			27-abr		
	HR MAX	Hora		HR MIN	Hora
S. Módulo Exp.	51.873	23:30	S. Módulo Exp.	45.078	21:05
S. Módulo Control	55.715	23:30	S. Módulo Control	47.495	21:05
S. en Invernadero	43.206	23:45	S. en Invernadero	28.511	21:05
S. Externo	69	23:40	S. Externo	58	21:50

Análisis temperatura

28 de abril de 2018

Para esta jornada, a las 00:00 h la temperatura en el exterior estaba en 25.69 °C; en el módulo experimental en, 30.59 °C, y en el módulo de control llegaba a los 30.69 °C. La temperatura en el invernadero fue 29.56 °C, mientras que el sensor de contacto en la zeolita indicaba que la temperatura del mineral era 31.5 °C.

En las horas de la madrugada las líneas de temperatura tuvieron la tendencia a disminuir. Desde las 00:00 h y hasta las 08:00 h los datos del ambiente exterior fueron los de menor valor, comparados con los del resto del experimento. En ese tiempo la temperatura en la superficie de la zeolita no superó los 35 °C, por lo que se deduce que en este momento no se activó la propiedad de absorber aire del ambiente. El módulo experimental y el de control tuvieron temperaturas muy similares en las primeras horas de la mañana, 5 °C más calientes que el exterior.

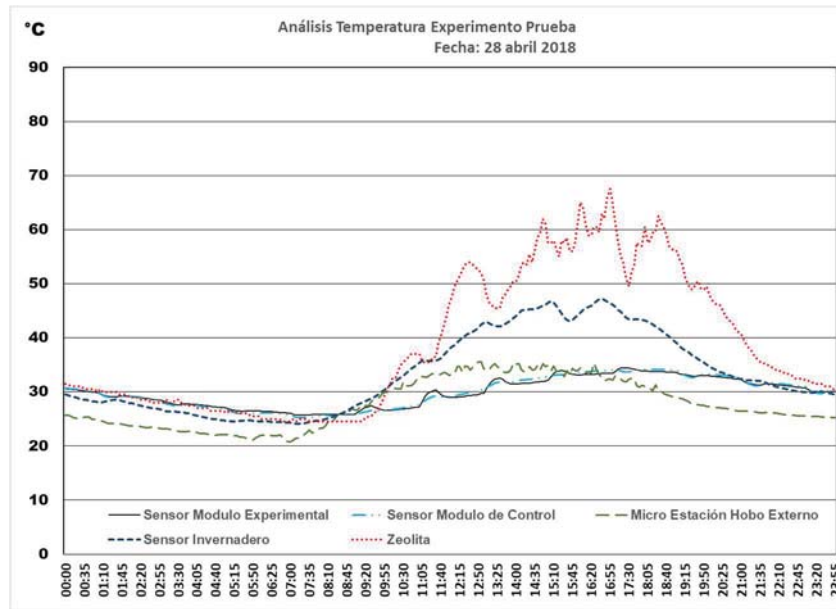


Fig.119. Análisis temperatura experimento, 28 de abril de 2018. Fuente: Propia.

Tabla 30. Tabla de temperaturas máximas y temperaturas mínimas 28 de abril. Fuente: Propia.

28-abr				28-abr			
	Temp Max	HR (%)	Hora		Temp Min	HR (%)	Hora
S. Módulo Exp.	34.413	43.64	17:15	S. Módulo Exp.	25.671	59.314	07:00
S. Módulo Control	34.176	47.062	18:00	S. Módulo Control	25.21	70.772	07:25
S. en Invernadero	47.255	24.258	16:40	S. en Invernadero	24.146	60.13	07:15
S. Externo	35.582	37.3	12:55	S. Externo	20.77	90.8	06:55
Zeolita	67.5		16:55	Zeolita	24.5		06:45

A las 08:00 h las temperaturas en los módulos, tanto experimental como de control, se encontraron en los 25 °C; la temperatura ambiente estaba en 23.32 °C y los sensores ubicados en el invernadero en 24.5 °C. A esta hora los valores que se detectaron son muy parecidos, pero empezaban a incrementarse. El sensor de contacto mostró que a las 10:50 h la superficie de la zeolita estaba a 37 °C, a las 12:10 h llegaba a 50 °C, a las 15:00 h a 60 °C y a las 16:35 h a 70 °C. La temperatura en el sensor del invernadero se fue incrementando y superó los 30 °C, llegando a su máxima a las 16:25 h con un registro de 49 °C, luego descendió hasta llegar a 27 °C a las 23:00 h.

A las 09:00 h en el módulo experimental y en el módulo de control las temperaturas eran las mismas: 25.86 °C, mientras que en el exterior se registraron 26.67 °C. Entre las 08:00 h y las 16:00 h, la temperatura fue 5°C más alta en el ambiente exterior.

Durante la jornada, la temperatura máxima en el módulo experimental se presentó a las 17:17 h, con un valor de 34.41 °C, y en el módulo de control la temperatura máxima fue a las 18:00 h, con un valor de 34.176 °C. La temperatura máxima ambiente fue de 35.98 °C a las 13:45 h.

En los módulos, las temperaturas fueron muy parecidas, sin embargo, en el experimental se presentaron una serie de picos: a las 09:00 h, 11:00 h, 13:00 h, 15:00 h y 17:00 h, esto coincidió con los horarios en que se encendió (por media hora) el ventilador dentro de ambos módulos. Cabe aclarar que estos picos desaparecieron de la gráfica durante la noche. Cuando sucedió este

fenómeno la temperatura en el módulo experimental subió 1 °C más, en comparación con el módulo de control, pero cuando los ventiladores se apagaron, la temperatura se estabilizó.

Análisis humedad relativa

28 de abril de 2018

Con respecto a la humedad relativa del ambiente, a lo largo de las 24 horas se evidenció un desempeño normal en su curva: altos valores de humedad relativa en las noches que fueron disminuyendo su valor conforme avanzaba el día, presentándose el menor registro cuando se encontraba el valor de la temperatura más alta.

A las 00:00 h del 28 de abril, la humedad relativa en el ambiente exterior fue de 66.3 %, y llegó a su máximo a las 06:55 h con 90.8 %. Desde las 00:00 h hasta las 09:00 h la línea de la gráfica, que corresponde al módulo experimental, tuvo un valor promedio de 58.04 %, el módulo de control tuvo 63.86 %, mientras que el exterior promedió 81.0 %. Al revisar los datos arrojados por el sensor del invernadero el promedio fue de 54.96 %, siendo este último, la línea que presentó valores con menor humedad relativa.

Desde las 09:00 h y hasta las 17:00 h el módulo experimental alcanzó el promedio más alto de humedad relativa con 55.84 %, el módulo de control contó con 53.80 %, el exterior con 45.83 % y el sensor del invernadero registró el menor valor promedio con 41.38 %.

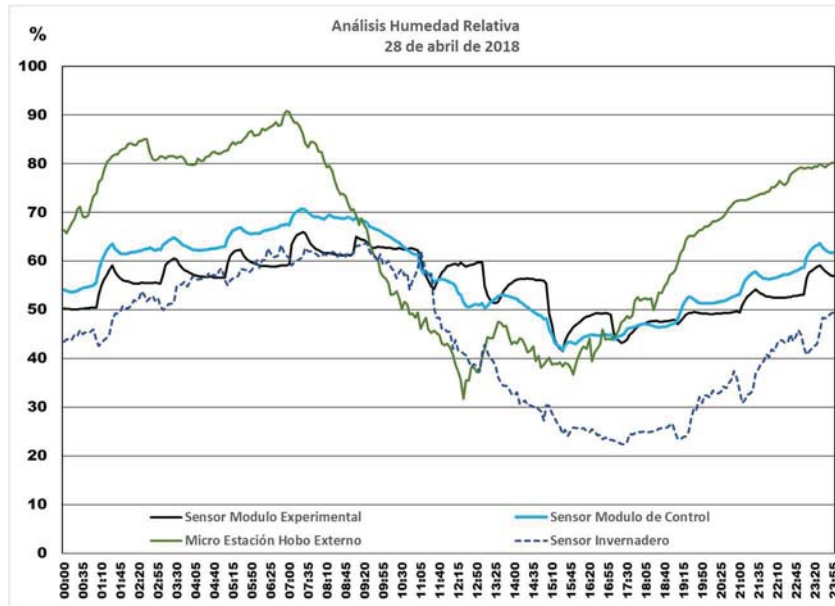


Fig.120. Análisis humedad relativa experimento, 28 de abril de 2018. Fuente: Propia.

Tabla 31. Tabla de humedades máximas y humedades mínimas 28 de abril 2018. Fuente: Propia.

28-abr			28-abr		
	HR MAX	Hora		HR MIN	Hora
S. Módulo Exp.	65.965	07:25	S. Módulo Exp.	41.543	15:30
S. Módulo Control	70.772	07:25	S. Módulo Control	41.732	15:30
S. en Invernadero	63.639	09:25	S. en Invernadero	22.298	17:25
S. Externo	90.8	06:55	S. Externo	31.7	12:20

Conclusiones primer día de medición

Es importante relacionar los valores de temperatura para los mismos horarios de análisis de la humedad relativa. En el rango de las 00:00 h y 09:00 h, el promedio de la temperatura fue 27.55 °C y en el módulo de control fue 27.38 °C. En ese mismo periodo la temperatura en el exterior se encontraba a 23.24 °C, es decir, un ambiente alrededor de 4.3 °C más frío que en ambos módulos de block de concreto. Por su parte, la temperatura en el invernadero fue de 26.14 °C, mientras que el sensor de contacto registró una temperatura promedio en la superficie de la zeolita de 27.10 °C.

De las 09:00 h a las 17:00 h, los valores de las temperaturas se incrementaron, ambos módulos promediaron 30.3 °C, mientras que el exterior tuvo una media de 32.83 °C. De igual manera, en el interior del invernadero la temperatura promedio fue 39.70 °C y en el sensor de contacto fue 46.98 °C.

De las 17:00 h a las 23:55 h, la temperatura promedio en los módulos tuvo una tendencia a incrementarse con un valor de 32.4 °C mientras que la temperatura ambiente fue un poco más fresca con 27.78 °C; en el interior del invernadero el promedio de la temperatura del aire fue de 35.47 °C y el sensor de contacto presentó una temperatura promedio de 44.52 °C.

De acuerdo con las lecturas, se establece que la zeolita activa su propiedad de absorción al alcanzar 45 °C. Según el análisis de los datos, la zeolita alcanzó una temperatura de 50 °C a las 12:10 h, cuando la humedad en el ambiente disminuyó a 38.8 % y la humedad en el invernadero tenía un valor de 43.76 %, es decir, 4.9 % más que en el exterior. Hasta aquí la zeolita no absorbía humedad del aire, sin embargo, a las 14:00 h, la humedad dentro del invernadero fue de 32.45 % y en el ambiente se registró 43.4 %. Los datos de humedad relativa en ambos módulos a la misma hora fueron mayores que en el exterior.

En la tarde, la humedad relativa dentro del invernadero siguió disminuyendo, pero en el módulo experimental la humedad relativa no alcanzaba a tener un valor que lo clasificara con menor valor. Sin embargo, hay que destacar que, aunque la humedad tuviera un valor más alto que el exterior, la temperatura en los dos módulos fue muy parecida.

A partir de las 17:05 h cuando la zeolita aún presentaba una temperatura en su superficie de 65 °C y la humedad en el ambiente aumentaba, la humedad relativa en el módulo experimental empezó a disminuir, lo que sucedió durante la noche y la madrugada. A las 03:00 h cuando la humedad en el exterior tenía un valor de 82.1 %, y la zeolita una temperatura de 28.0 °C se observó que la humedad dentro del invernadero fue 55.16 % y en el módulo experimental la humedad relativa era 58.159 %. En el módulo de control la humedad relativa a esa misma hora era 63.98%. La humedad dentro del módulo experimental tuvo una diferencia del 23.95 % con respecto al exterior, y 5.8 % con respecto al módulo de control. Con estos valores se demuestra que el efecto de absorción de la zeolita siguió presentándose.

A las 09:00h del 29 de abril la zeolita se saturó, esto se deduce de observar los datos de humedad relativa en el interior del invernadero, ya que son valores mayores a los valores de humedad relativa del exterior.

Análisis temperaturas

29 de abril de 2018

Las gráficas muestran que para el día 29 de abril las líneas de temperatura tuvieron una tendencia muy parecida al día anterior. La diferencia de las temperaturas en la madrugada entre el módulo experimental (línea negra) y el módulo de control (línea azul punteada) fue muy poca: 0.1 °C entre las 00:00 h y las 08:10 h. Los rangos de temperatura a esta hora se situaron en los 30 °C y disminuyeron hasta llegar a los 25 °C. La temperatura en el exterior a esas horas se encontró 5 °C por debajo de la temperatura de ambos módulos.

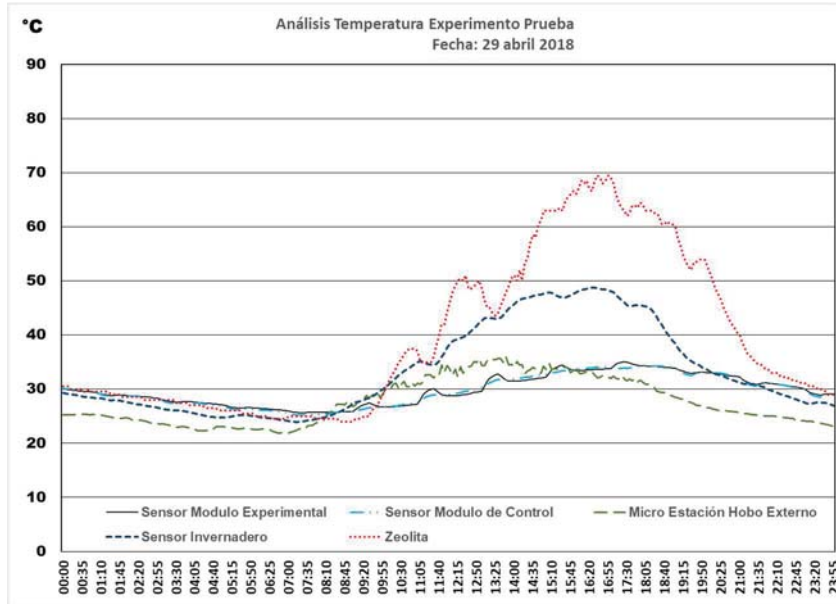


Fig.121. Análisis temperatura, 29 de abril de 2018. Fuente: Propia.

A partir las 08:45 h las temperaturas en ambos módulos se incrementaron y alcanzaron su máximo en la tarde: módulo experimental 35.04 °C a las 17:25 h y 34.28 °C en el módulo de control. La temperatura máxima en el ambiente se dio a las 13:45 h con un valor de 35.98 °C. El invernadero alcanzó una temperatura máxima de 48.70 °C a las 16:10 h. La temperatura del aire desde las 08:45 h hasta las 16:20 h se ubicó hasta por 5°C más arriba que la temperatura de ambos módulos. El sensor de contacto mostró que a las 16:35 h la superficie de la zeolita tenía una temperatura de 69.5 °C, a su vez, la temperatura máxima en el invernadero era de 48.70 °C a las 16:10 h.

Tabla 32. Tabla de temperaturas máximas y temperaturas mínimas 29 de abril. Fuente: Propia.

29-abr				29-abr			
	Temp Max	HR (%)	Hora		Tep Min	HR (%)	Hora
S. Módulo Exp.	35.049	46.704	17:25	S. Módulo Exp.	25.647	67.501	07:20
S. Módulo Control	34.281	47.239	18:00	S. Módulo Control	25.234	71.578	07:20
S. en Invernadero	48.704	27.019	16:10	S. en Invernadero	23.93	63.941	07:15
S. Externo	35.985	44.7	13:45	S. Externo	21.867	87.5	07:00
Zeolita	69.5		16:35	Zeolita	24		07:25

Análisis humedad relativa

29 de abril de 2018

La gráfica del día 29 de abril siguió el mismo patrón de la gráfica del 28 de abril, con altas humedades en las horas de la madrugada.

La humedad relativa máxima más elevada se presentó en el ambiente con 90.1 % a las 06:50 h. Por su parte, en el módulo experimental a las 05:30 h se encontró la humedad máxima con 68.87 %, y a esa misma hora también ocurrió el mismo fenómeno en el módulo de control con 73.34 %.

Los valores de humedad relativa en el invernadero en la madrugada se situaron con los números más bajos y su valor máximo fue 66.7 % a las 09:05 h.

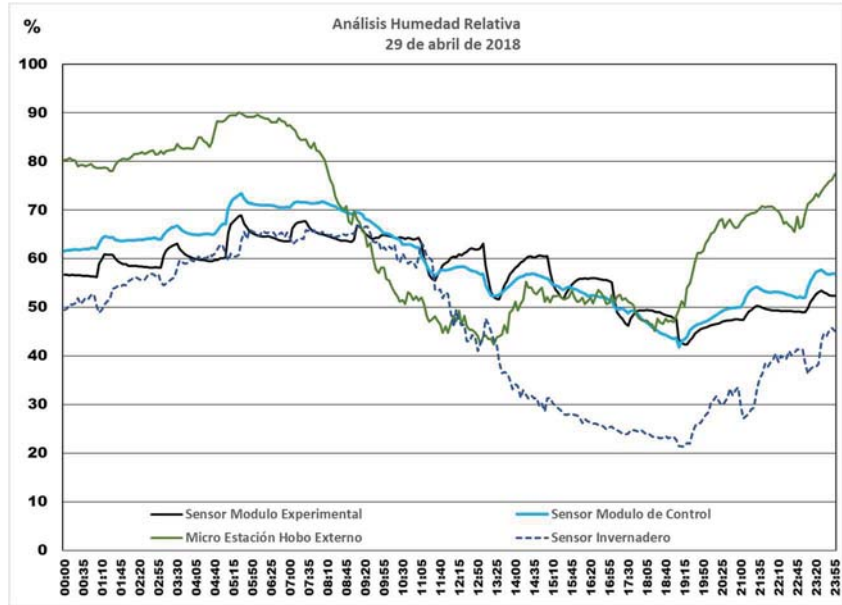


Fig. 122. Análisis humedad relativa, 29 de abril de 2018. Fuente: Propia.

A partir de las 09:00 h, los valores de humedad relativa empezaron a disminuir y la línea que representa el exterior ahora se encontró con los números de menor valor; llegó a su mínimo a las 13:20 h con 42.3 %. A esa misma hora, en el módulo experimental se encontró en 52.12 % y en el módulo de control en 52.25%. En el invernadero se apreciaron valores que sobrepasaron los de la humedad exterior, esto ocurrió en el tiempo comprendido entre las 08:40 h y 14:00 h.

Tabla 33. Tabla de humedades máximas y humedades mínimas 29 de abril. Fuente: Propia.

29-abr			29-abr		
	HR MAX	Hora		HR MIN	Hora
S. Módulo Exp.	68.877	05:30	S. Módulo Exp.	42.363	19:20
S. Módulo Control	73.347	05:30	S. Módulo Control	41.841	19:05
S. en Invernadero	66.711	09:05	S. en Invernadero	21.306	19:10
S. Externo	90.1	06:50	S. Externo	42.3	13:20

Análisis de temperaturas

30 de abril de 2018

Esta prueba inició con una temperatura exterior a las 00:00 h de 22.82 °C, y se registró la mínima a las 06:40 h con 17.67 °C.

Las temperaturas, tanto en el módulo de experimentación como en el módulo de control, se encontraron 7 °C por encima del exterior. La temperatura mínima en el módulo experimental se presentó a las 07:20 h con 23.06 °C, en el módulo de control la mínima fue de 22.51 °C a las 07:15 h.

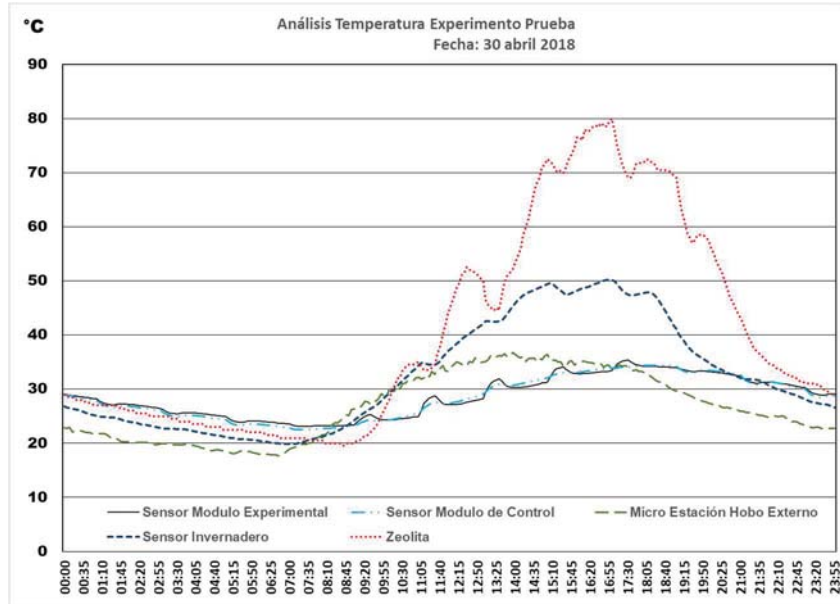


Fig. 123. Análisis temperatura, 30 de abril de 2018.

A las 08:10 h la temperatura se incrementó, en el exterior a las 14:20 h la máxima llegó a 36.74 °C. En el módulo experimental la temperatura máxima se dio a las 17:30 h con 35.36 °C y en el módulo de control la máxima alcanzó los 34.38 °C a las 18:15h.

A las 16:55 h la temperatura en el invernadero fue de 50.23 °C y a las 17:00 h en el sensor de contacto fue de 80°C. De acuerdo con el estudio, se monitorizaron alrededor de ocho horas donde la temperatura del módulo experimental estuvo por debajo de la exterior.

Tabla 34. Tabla de temperaturas máximas y temperaturas mínimas 30 de abril. Fuente: Propia.

30-abr				30-abr			
	Temp Max	HR (%)	Hora		Temp Min	HR (%)	Hora
S. Módulo Exp.	35.368	32.753	17:30	S. Módulo Exp.	23.064	60.725	07:20
S. Módulo Control	34.387	37.346	18:15	S. Módulo Control	22.513	65.39	07:15
S. en Invernadero	50.231	18.13	16:55	S. en Invernadero	19.817	57.434	07:05
S. Externo	36.742	36.9	14:20	S. Externo	17.677	85.8	06:40
Zeolita	80		17:00	Zeolita	19.5		08:40

Análisis humedad relativa

30 de abril de 2018

La humedad en el exterior a las 06:40 h llegó a una máxima de 85.8 %. A las 09:05 h la humedad en el módulo de control fue de 66.29 %, mientras que en el módulo experimental fue de 62.34 %, es decir, 4 % menos que en el módulo de control. En el invernadero la humedad máxima fue de 62.40 % a las 09:20 h.

Alrededor de las 09:00 h de la mañana, la humedad del exterior descendió y llegó a su valor mínimo a las 16:10h con 25.6 %, a esa misma hora la humedad en el módulo experimental fue de 43.26 % y en el módulo de control fue 36.45 %.

El invernadero a esa hora registró una humedad relativa del 17.31 %, por lo que se concluye que la zeolita sí tuvo un buen funcionamiento, pero cuando llegó al módulo experimental la humedad relativa aumentó. A las 19:00 h la humedad en el módulo experimental se situó por debajo de la línea del módulo de control alrededor del 4 %, y 20 % por debajo del exterior.

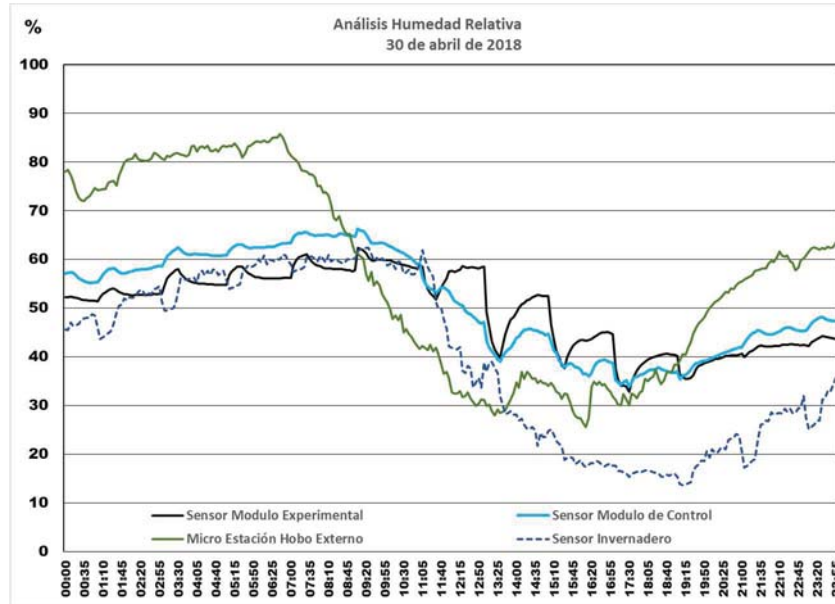


Fig.124. Análisis humedad relativa, 30 de abril de 2018. Fuente: Propia.

Tabla 35. Tabla de humedades máximas y humedades mínimas 30 de abril. Fuente: Propia.

30-abr			30-abr		
	HR MAX	Hora		HR MIN	Hora
S. Módulo Exp.	62.345	09:05	S. Módulo Exp.	32.753	17:30
S. Módulo Control	66.299	09:05	S. Módulo Control	33.872	17:30
S. en Invernadero	62.408	09:20	S. en Invernadero	13.68	19:10
S. Externo	85.8	06:40	S. Externo	25.6	16:10

Análisis temperaturas

1 de mayo de 2018

Para este día el patrón de las gráficas siguió siendo el mismo de los análisis anteriores. En la madrugada la temperatura en el exterior fue 5 °C menor que las temperaturas de los módulos de concreto. La temperatura mínima en el exterior fue de 17.74 °C a las 05:10 h. Un poco más tarde, a las 07:25 h, se presentó la temperatura mínima en el módulo experimental con 22.77 °C y en el módulo de control con 22.22 °C.

Las temperaturas en ambos módulos tuvieron un desempeño muy similar a lo largo de las 24 horas. La temperatura máxima en el módulo experimental se detectó a las 17:30 h con 35.77 °C, y a las 18:20 h se presentó en el módulo de control con un valor de 35.10 °C. En el exterior la temperatura máxima se registró a las 14:05 h. El sensor de contacto mostró una temperatura máxima a las 16:25 h con 79.5 °C, y la temperatura del aire en el invernadero a las 17:00 h fue de 51.20 °C.

Para este día, al igual que el análisis del 29 de abril, se registraron ocho horas, a lo largo del día, en que los valores de temperatura del módulo experimental estuvieron por debajo de la temperatura exterior.

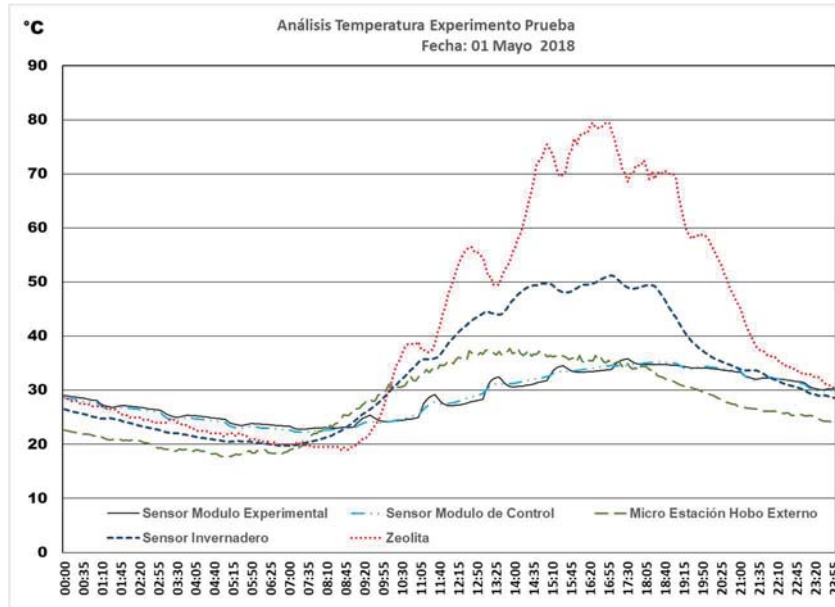


Fig. 125. Análisis temperatura, 1 de mayo de 2018. Fuente: Propia.

Tabla 36. Tabla de temperaturas máximas y temperaturas mínimas 1 de mayo de 2018. Fuente: Propia.

01-may				01-may			
	Temp Max	HR (%)	Hora		Temp Min	HR (%)	Hora
S. Módulo Exp.	35.77	32.132	17:30	S. Módulo Exp.	22.776	51.527	07:25
S. Módulo Control	35.102	35.029	18:20	S. Módulo Control	22.226	55.762	07:25
S. en Invernadero	51.207	15.351	17:00	S. en Invernadero	19.722	46.261	07:00
S. Externo	37.728	28.9	14:05	S. Externo	17.748	71.8	05:10
Zeolita	79.5		16:25	Zeolita	19		08:40

Análisis humedad relativa

1 de mayo de 2018

Para el 1 de mayo se observó que las líneas de los valores en el módulo experimental y de control tuvieron una tendencia definida en las horas de la madrugada, sin embargo, cuando los ventiladores se encendieron en las horas impares se observó que la humedad aumentó en el interior del espacio, lo cual se vio reflejado en las mediciones.

En el módulo experimental a las 13:00 h la humedad tuvo un valor de 52.19 %, a esa hora los ventiladores se activaron y provocaron el descenso de la humedad hasta un valor de 37.70 %, igualmente en el módulo de control pasó el mismo fenómeno y ambas líneas estuvieron muy juntas. Esta tendencia se repitió para ambos módulos en el resto de la tarde.

A las 19:00 h las líneas de medición (excepto la del invernadero) se cruzaron en el valor de 34.5 %; a partir de entonces en ambos módulos la humedad relativa tuvo la tendencia a disminuir hasta que las líneas se separaron, y la de menor valor fue la del módulo experimental. En el exterior sucedió lo contrario, la humedad aumentó y se ubicó casi 10 % arriba, al compararse con los valores de los módulos.

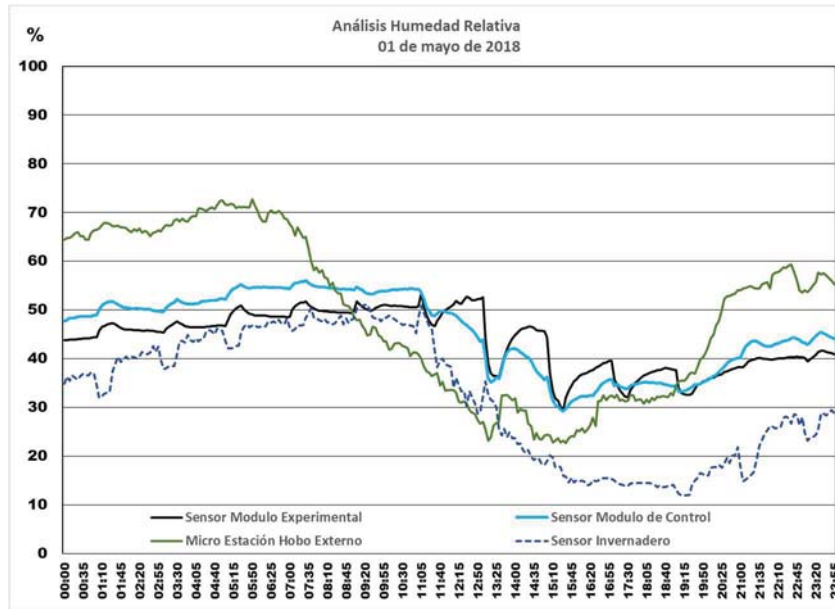


Fig. 126. Análisis humedad relativa, 01 de mayo de 2018. Fuente: Propia

Tabla 37. Tabla de humedades máximas y humedades mínimas 1 de mayo de 2018. Fuente: Propia.

01-may				01-may			
	Temp Max	HR (%)	Hora		Temp Min	HR (%)	Hora
S. Módulo Exp.	35.77	32.132	17:30	S. Módulo Exp.	22.776	51.527	07:25
S. Módulo Control	35.102	35.029	18:20	S. Módulo Control	22.226	55.762	07:25
S. en Invernadero	51.207	15.351	17:00	S. en Invernadero	19.722	46.261	07:00
S. Externo	37.728	28.9	14:05	S. Externo	17.748	71.8	05:10
Zeolita	79.5		16:25	Zeolita	19		08:40

3.4 Análisis de humedades absolutas y diagrama psicrométrico

Análisis humedad absoluta 28 de abril de 2018

Se calcularon los valores de humedad absoluta con el fin de saber el contenido de agua en el aire. En este análisis es importante observar el desempeño que tuvo la zeolita, tanto en el módulo experimental como en el módulo del invernadero y en el exterior. La línea que corresponde al invernadero estuvo por debajo de las tres mediciones en las horas de la

madrugada, se observó cómo, desde las 08:00 h hasta las 16:00 h, esta misma línea sobrepasó a todas las mediciones. Se puede deducir con esto que la zeolita en el horario matutino presentó saturación y en la tarde el calor activó sus propiedades desecantes. En la noche, se observó la poca humedad que había en el invernadero y en el módulo experimental.

Estos valores sirvieron para ubicarlos dentro de una carta psicrométrica; allí se observó que los puntos del módulo experimental y del módulo de control se concentraron cerca de la zona de confort, la estrategia que se debe seguir es la refrigeración por alta masa térmica. En el invernadero los puntos tuvieron un desempeño distinto: iniciaron dentro de la zona de confort y se desplazaron hacia la zona que requiere refrigeración, finalmente los puntos regresaron al inicio.

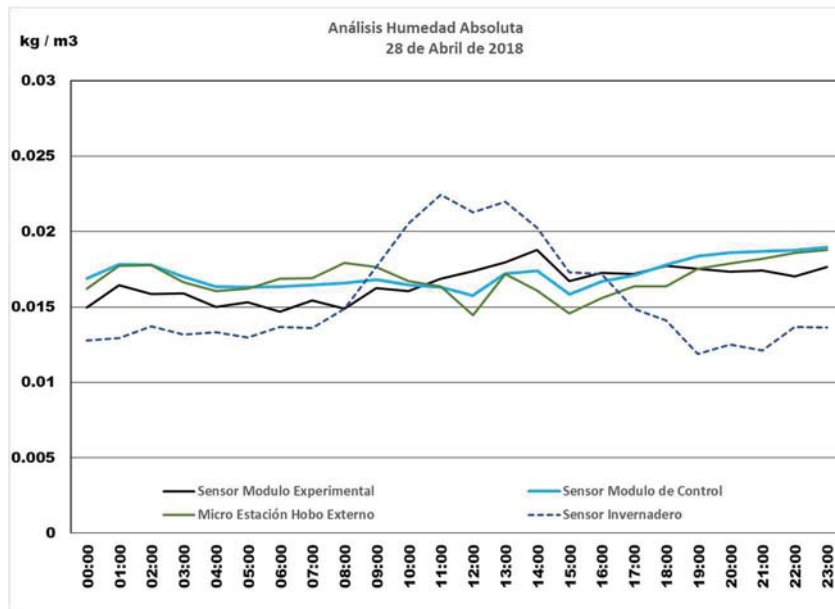


Fig. 127. Análisis humedad absoluta, 28 de abril de 2018. Fuente: Propia.

Tabla 38. Resumen datos humedad relativa 28 de abril de 2018. Fuente: Propia.

Humedad Relativa				
Fecha	28 de abril			
	M. Experimental	M. Control	Exterior	M. Invernadero
Promedio (%)	55.13	57.35	65.06	44.24
Varianza M. Experimental y Control	7.50			
Varianza M. Exp., Control y Exterior	7.69			
Varianza M. Exp. Control, Ext. e Inv.	7.43			
Desviación M. Experimental y Control	2.74			
Desviación M. Exp., Control y Exterior	2.77			

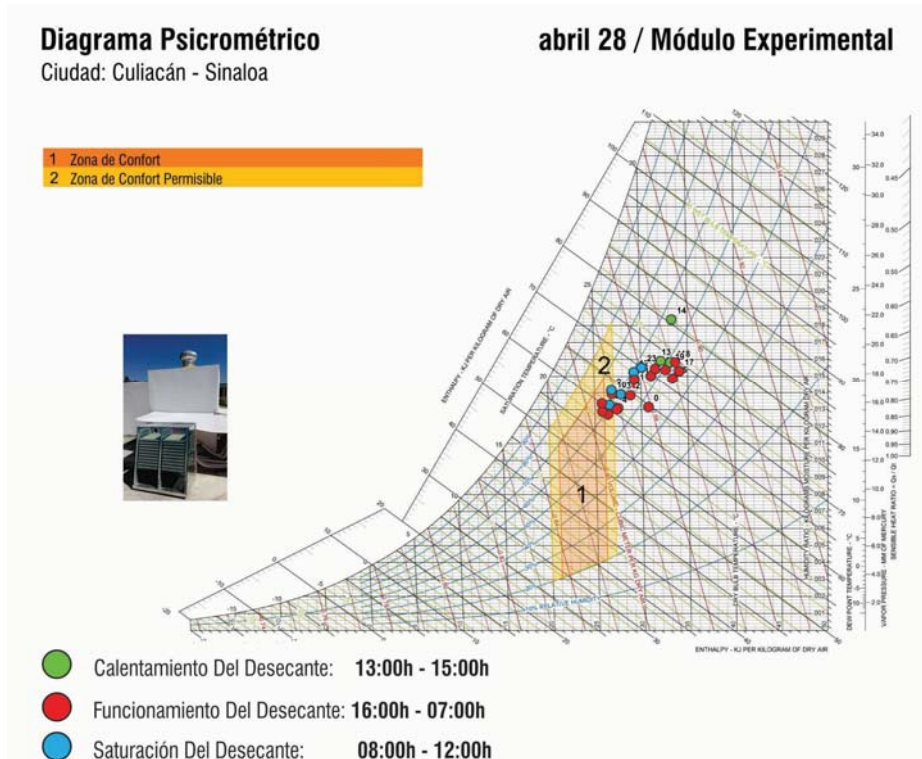


Fig. 128. Diagrama psicrométrico experimento prueba I módulo experimental, 28 de abril de 2018. Fuente: Propia.

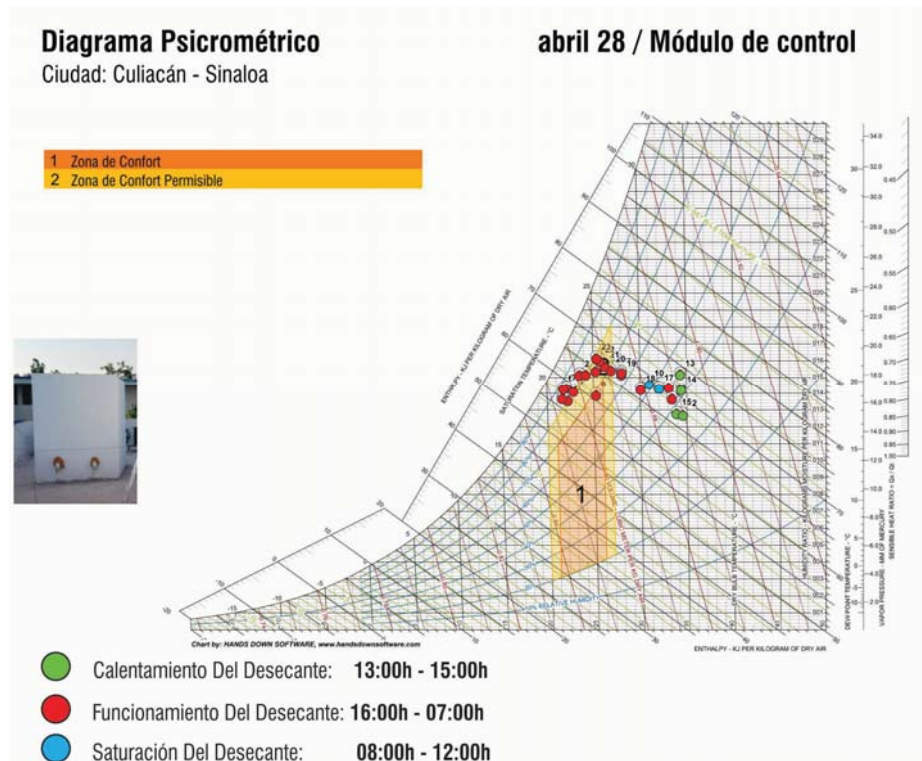


Fig. 129. Diagrama psicrométrico experimento prueba I módulo de control, 28 de abril de 2018. Fuente: Propia.

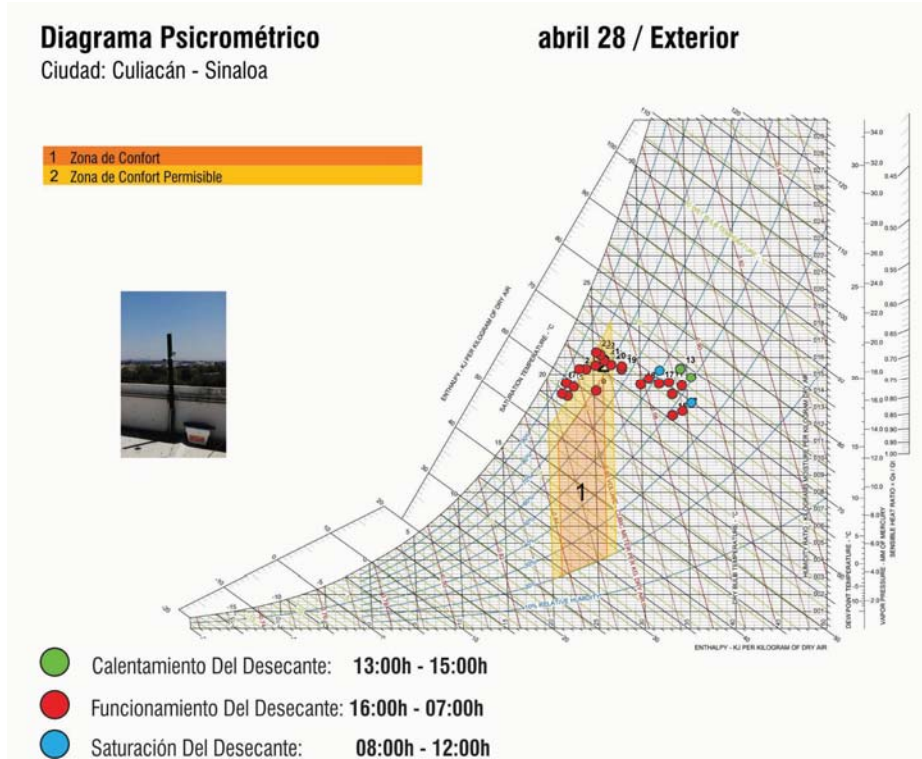


Fig. 130. Diagrama psicrométrico experimento prueba I exterior, 28 de abril de 2018. Fuente: Propia.

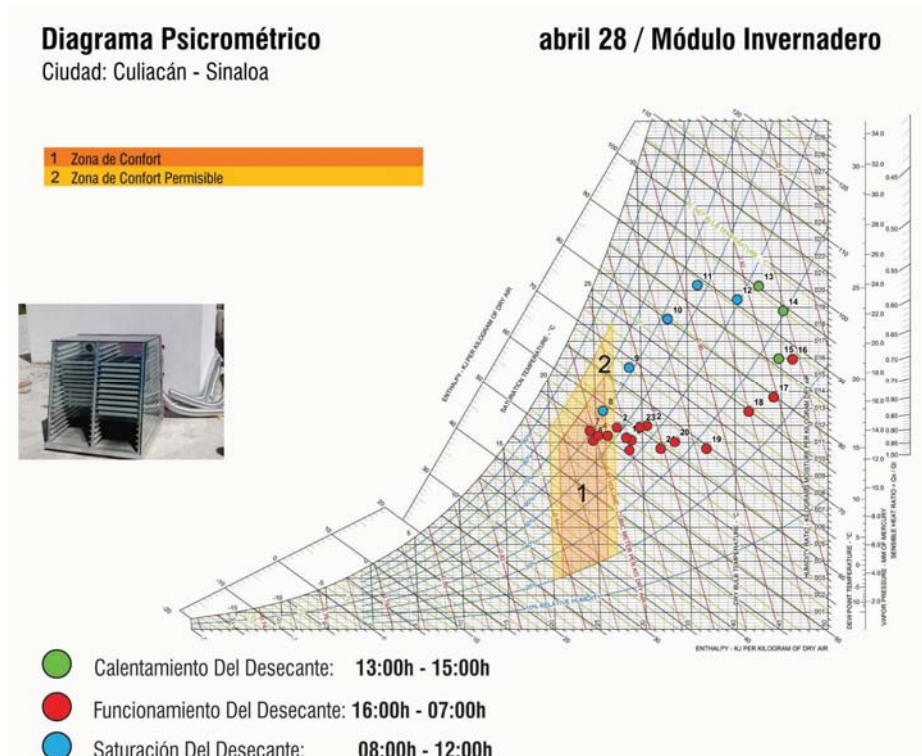


Fig. 131. Diagrama psicrométrico experimento prueba I módulo invernadero, 28 de abril de 2018. Fuente: Propia.

Análisis humedad absoluta 29 de abril de 2018

Durante esta jornada, la tendencia del análisis anterior fue muy similar. Se observó que las líneas del módulo de control y los valores del exterior estuvieron muy cercanas a lo largo del día, sin embargo, a las 14:00 h se separaron 0.0025 kg/m³ y a las 19:00 h volvieron a juntarse.

En el invernadero, la humedad máxima alcanzó los 0.025 kg/m³ a las 13:00 h, tuvo una diferencia con el módulo experimental de 0.005 kg/m³. La diferencia que se observó entre el módulo experimental y el de control, desde la madrugada hasta las 10:00 h, tuvo un valor promedio de 0.0071 kg/m³, situándose con menos humedad el módulo experimental. Después de las 11:00 h la diferencia fue de 0.00068 kg/m³, siendo los valores más altos de humedad los correspondientes al módulo experimental.

Por otro lado, en el diagrama psicrométrico los puntos que se localizaron en el exterior se presentaron dispersos a lo largo del día, en el módulo experimental se concentraron en la zona que requiere refrigeración por alta masa térmica. El funcionamiento del invernadero presentó el mismo desempeño del día anterior.

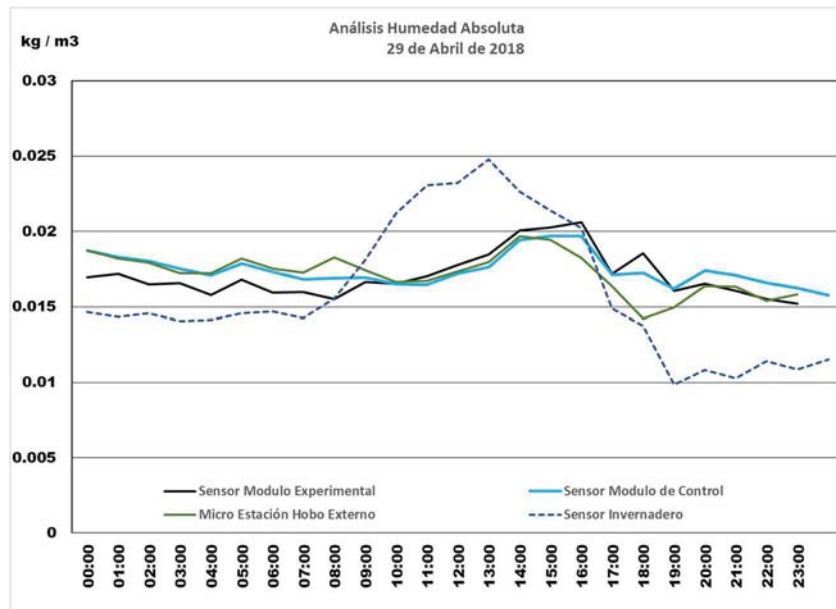


Fig. 132. Diagrama psicrométrico experimento prueba I. 28 de abril de 2018. Fuente: Propia.

Tabla 39. Resumen datos humedad relativa 29 de abril de 2018. Fuente: Propia.

Humedad				
Fecha	29 de abril			
	M. Experimental	M. Control	Exterior	M. Invernadero
Promedio	57.10	59.15	66.17	46.12
Varianza M. Experimental y Control	7.62			
Varianza M. Exp., Control y Exterior	7.79			
Varianza M. Exp. Control, Ext. e Inv.	7.54			
Desviación M. Experimental y Control	2.76			
Desviación M. Exp., Control y Exterior	4.84			

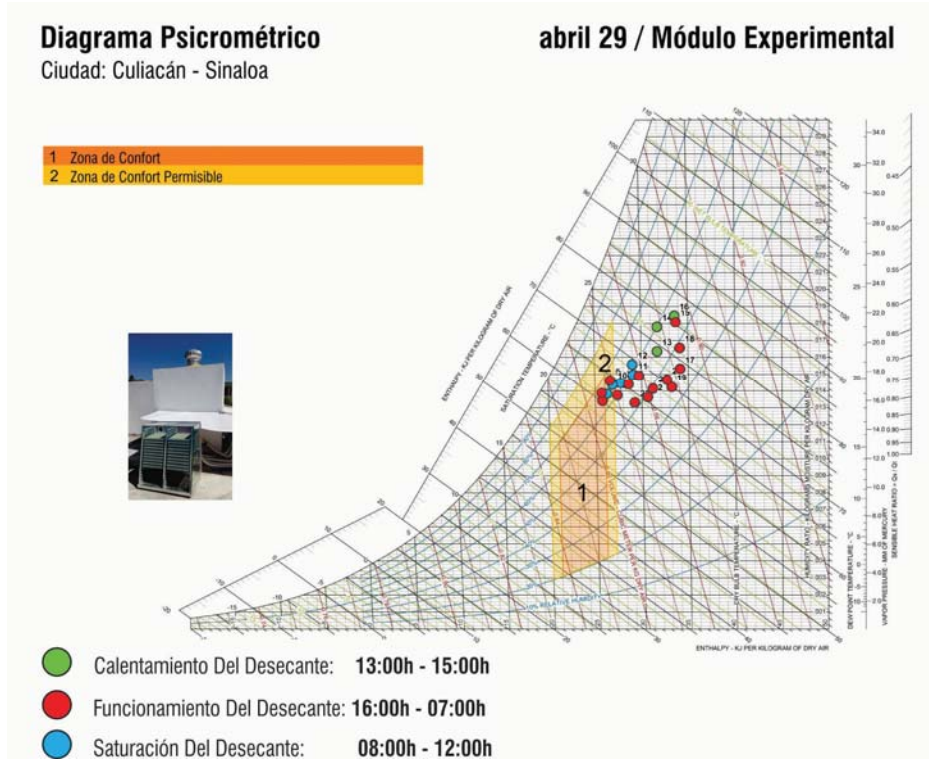


Fig. 133. Diagrama psicrométrico experimento prueba I módulo experimental, abril 29 de 2018. Fuente: Propia.

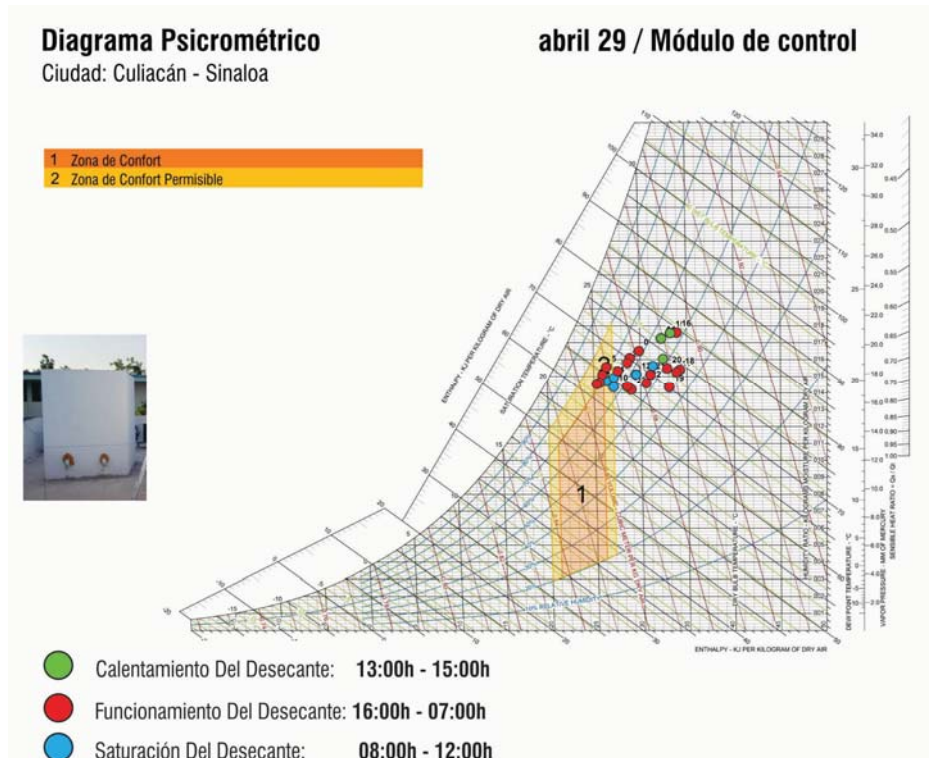


Fig. 134. Diagrama psicrométrico experimento prueba I módulo de control, abril 29 de 2018. Fuente: Propia.

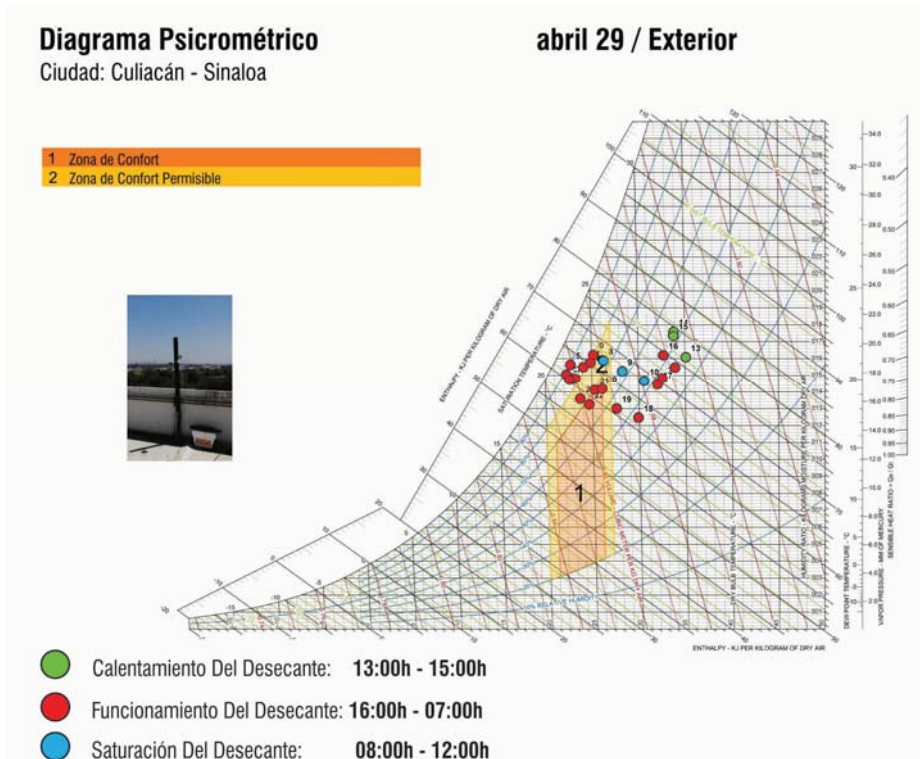


Fig. 135. Diagrama psicrométrico experimento prueba I exterior, abril 29 de 2018. Fuente: Propia.

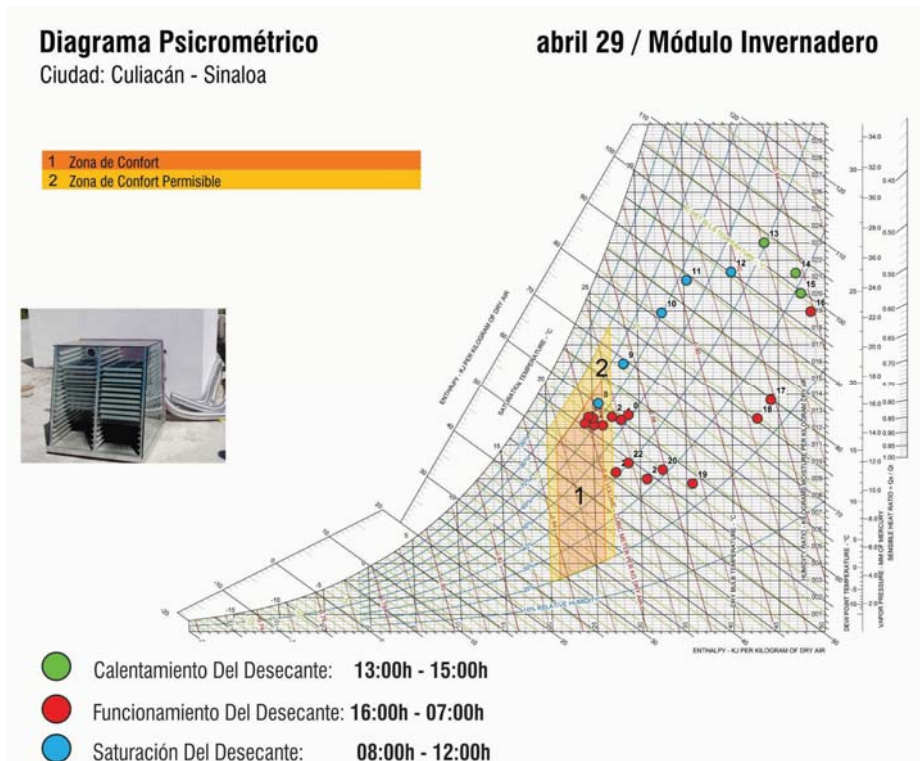


Fig. 136. Diagrama psicrométrico experimento prueba I módulo invernadero, abril 29 de 2018. Fuente: Propia.

Análisis humedad absoluta 30 de abril de 2018

De acuerdo con lo revisado anteriormente, el patrón de los valores de humedad fue el mismo en los sensores que se instalaron. Se observó que los valores de humedad en el módulo de control fueron los más altos de todo el experimento, desde las 00:00 h hasta las 07:00 h, en ese punto la humedad del exterior aumentó y sus valores descendieron a partir de las 12:00 h.

Los promedios mostraron la eficiencia en el funcionamiento del invernadero con una humedad relativa de 39.71 %. La diferencia de este promedio con el módulo experimental fue de 10.17 %, siendo más alta en este dispositivo.

La diferencia de promedios entre el módulo experimental y el exterior fue de 6.68 %, posicionándose el exterior con los valores más altos de humedad relativa. Entre el módulo experimental y el de control el porcentaje de diferencia fue 1.39 %, siendo más alto el módulo de control.

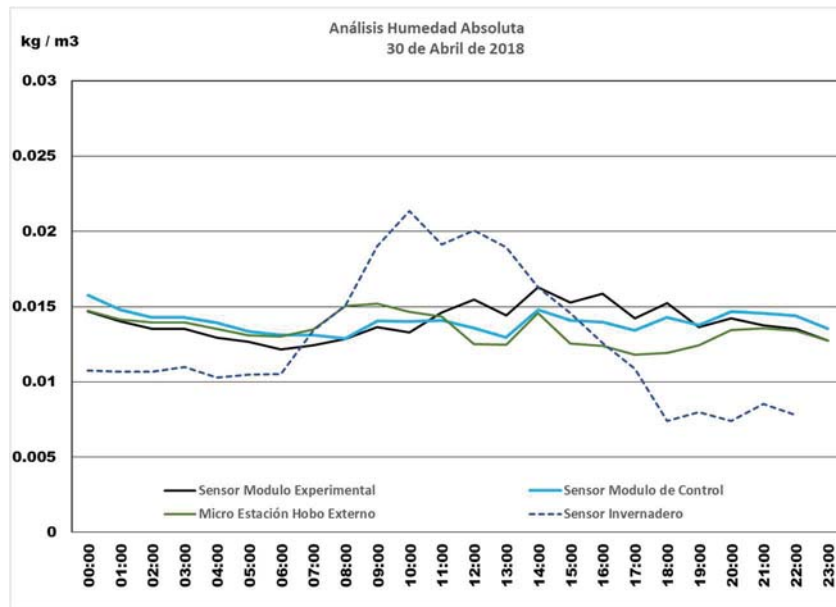


Fig. 137. Análisis humedad absoluta, 30 de abril de 2018. Fuente: Propia.

Tabla 40. Resumen datos humedad relativa 30 de abril de 2018. Fuente: Propia.

Humedad				
Fecha	30 de abril			
	M. Experimental	M. Control	Exterior	M. Invernadero
Promedio	49.88	51.27	56.56	39.71
Varianza M. Experimental y Control	7.11			
Varianza M. Exp., Control y Exterior	7.25			
Varianza M. Exp. Control, Ext. e Inv.	7.01			
Desviación M. Experimental y Control	2.67			
Desviación M. Exp., Control y Exterior	2.69			

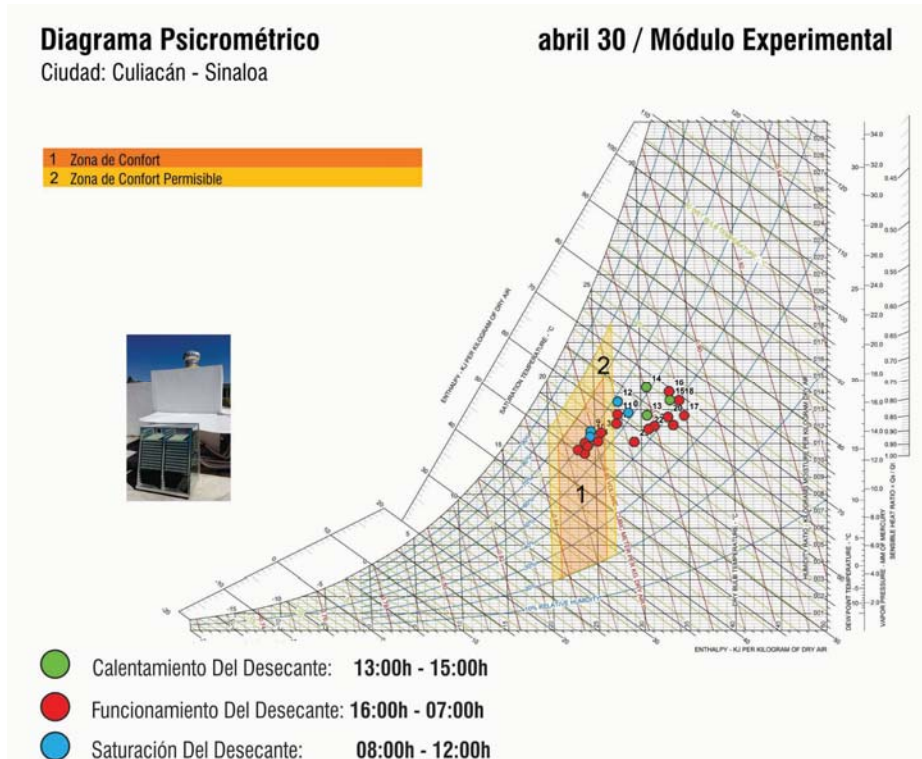


Fig. 138. Diagrama psicrométrico experimento prueba I módulo experimental, abril 30 de 2018. Fuente: Propia.

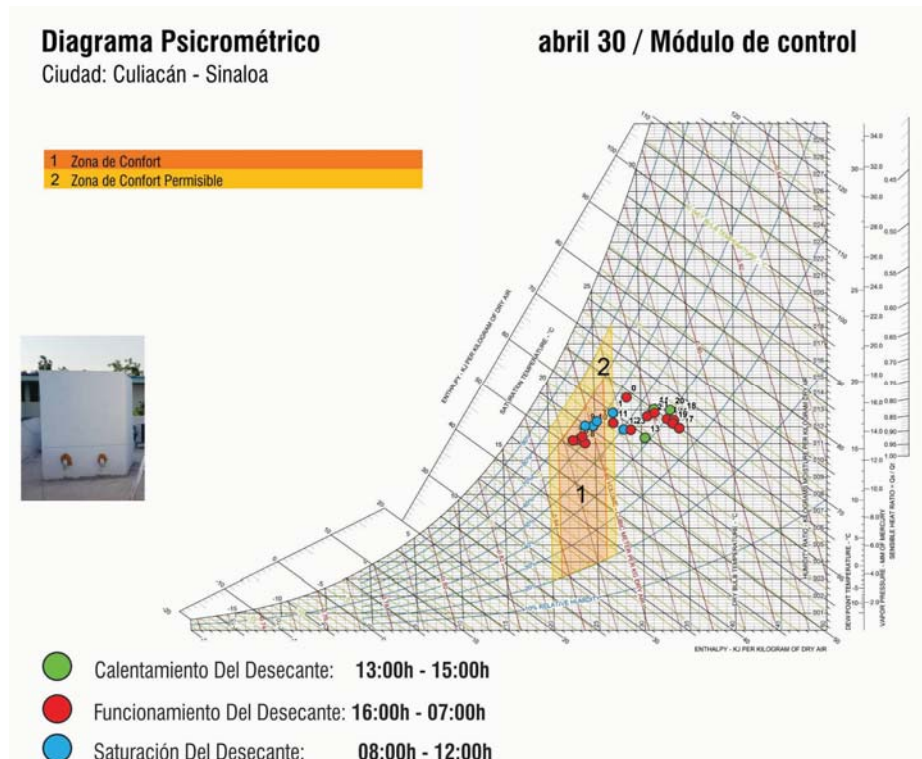


Fig. 139. Diagrama psicrométrico experimento prueba I módulo de control, abril 30 de 2018. Fuente: Propia.

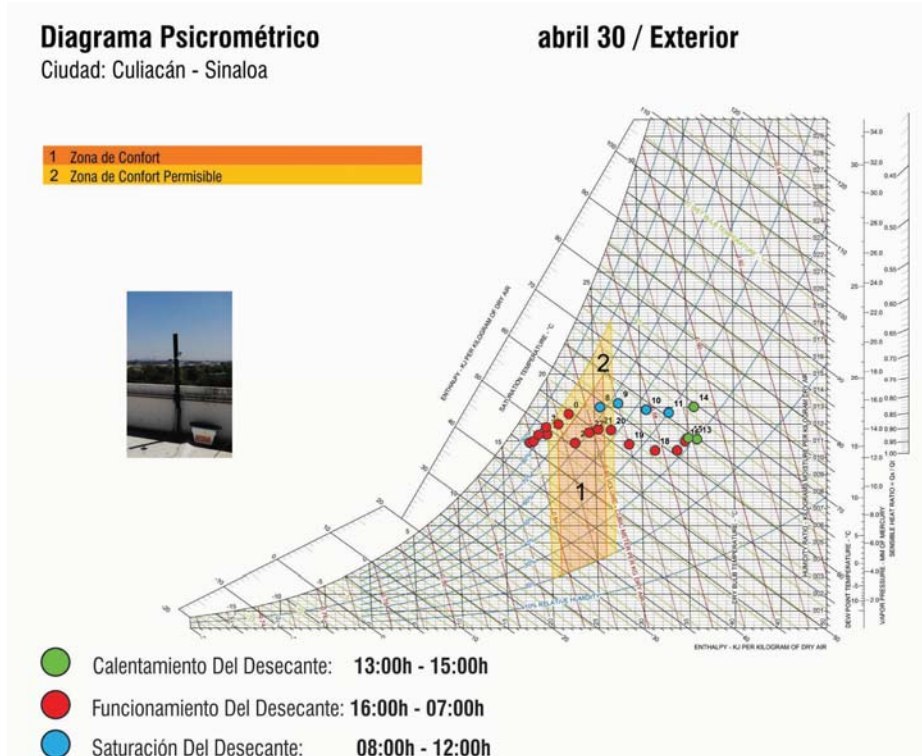


Fig. 140. Diagrama psicrométrico experimento prueba I exterior, abril 30 de 2018. Fuente: Propia.

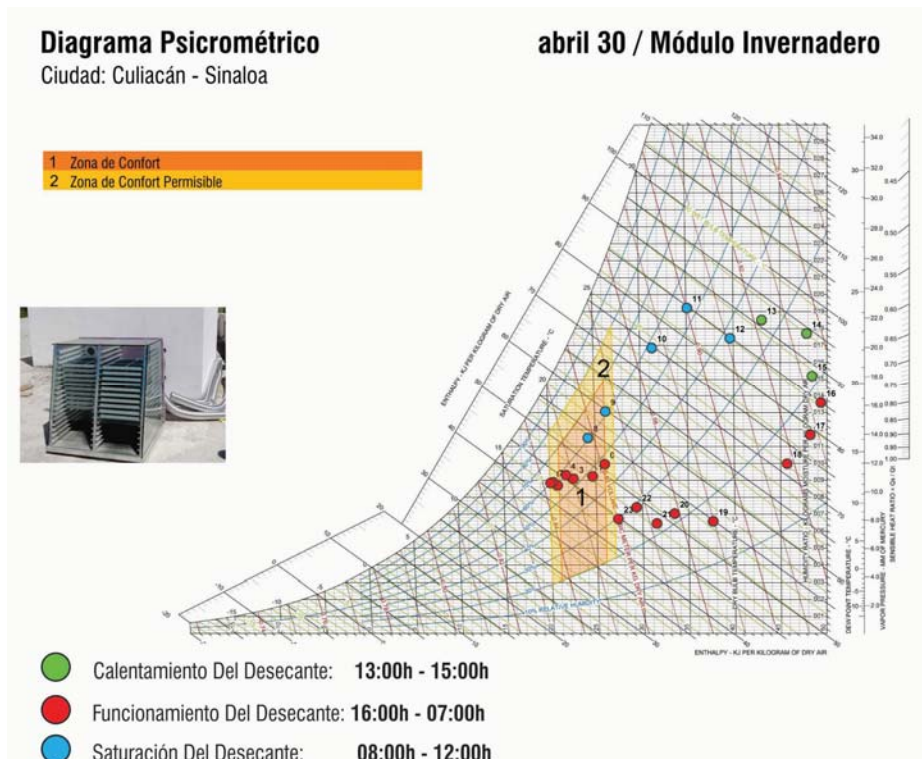


Fig. 141. Diagrama psicrométrico experimento prueba I módulo invernadero, abril 30 de 2018. Fuente: Propia.

Análisis humedad absoluta 01 de mayo de 2018

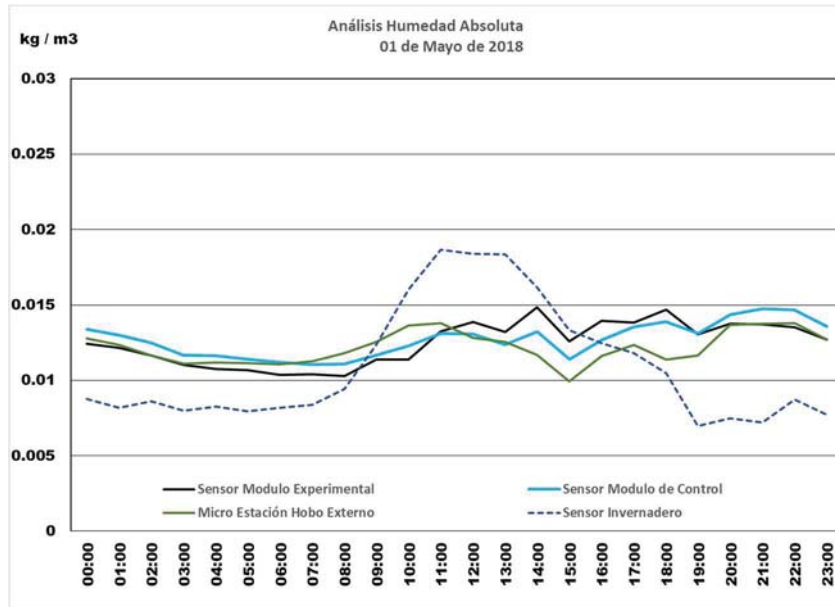


Fig. 142. Análisis humedad absoluta, 30 de abril de 2018. Fuente: Propia.

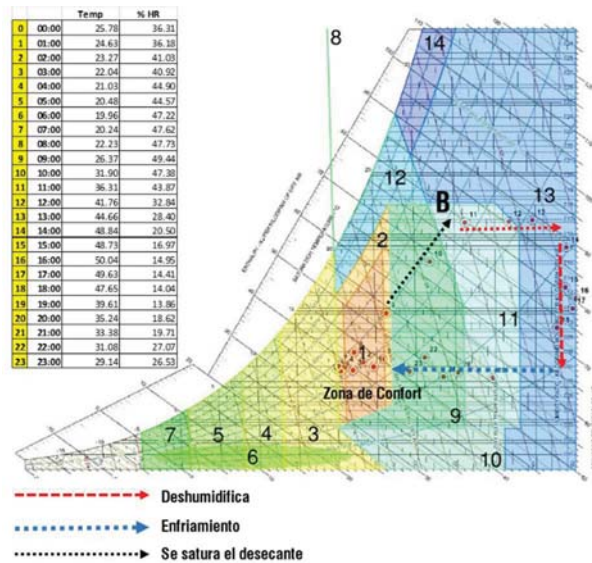


Fig. 143. Proceso de deshumidificación "invernadero", 01 de mayo de 2018. Fuente: Propia.

El inicio del proceso de deshumidificación se hizo en el punto A, a las 13:00 h cuando la temperatura estaba a 41.0 °C y la humedad relativa a 32.84 %, la humedad se siguió absorbiendo mientras la temperatura iba aumentando. A partir de las 19:00 h la temperatura disminuyó y los puntos, desde las 00:00 h hasta las 09:00 h, estuvieron dentro de la zona de confort. Cabe resaltar que el desecante se saturó en las horas de la mañana.

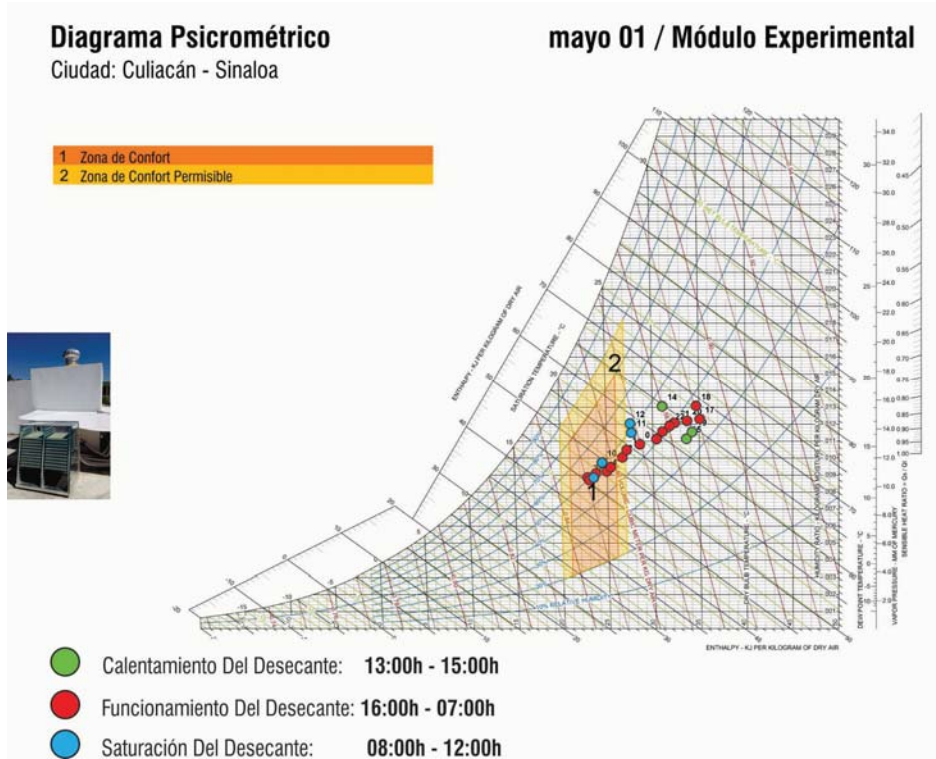


Fig. 144. Diagrama psicrométrico experimento prueba I módulo experimental, 1 de mayo de 2018. Fuente: Propia.

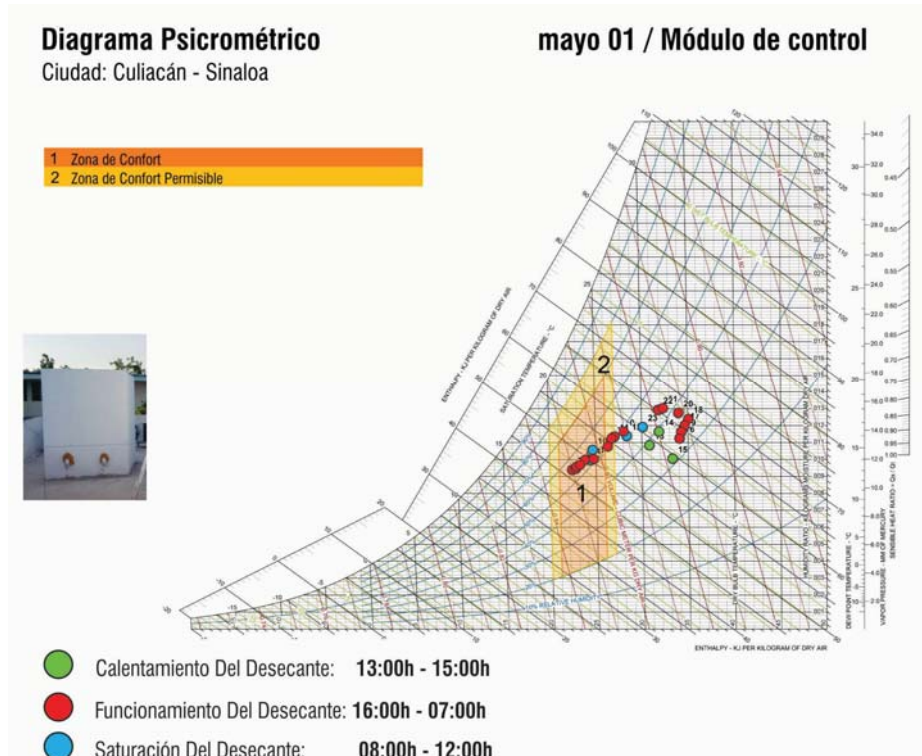


Fig. 145. Diagrama psicrométrico experimento prueba I módulo de control, 1 de mayo de 2018. Fuente: Propia.

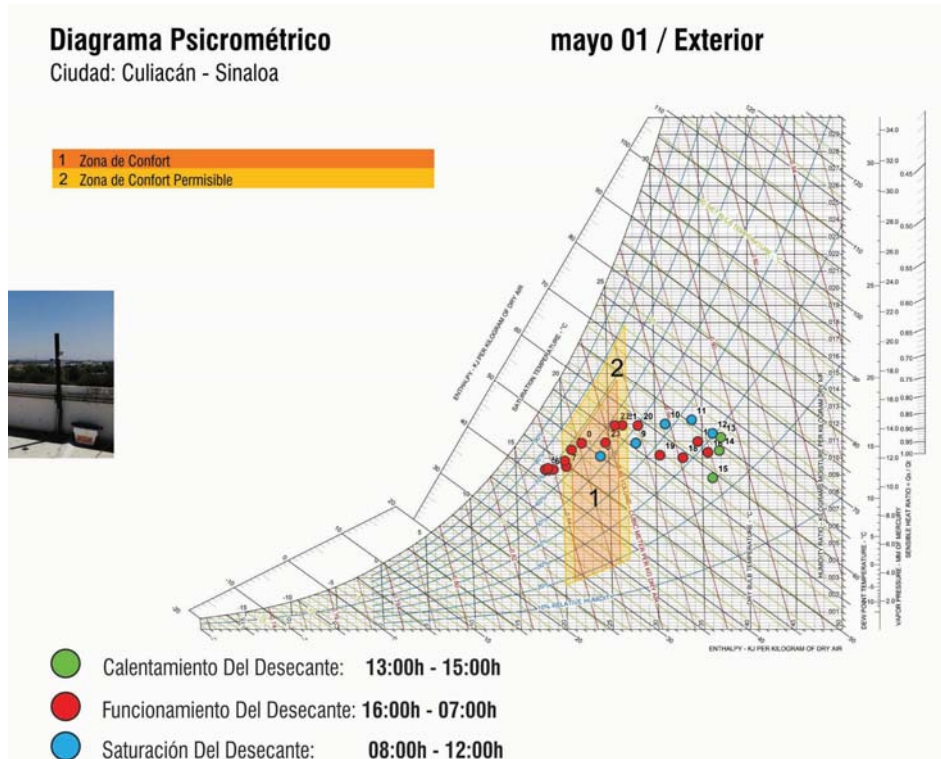


Fig. 146. Diagrama psicrométrico experimento prueba I exterior, 1 de mayo de 2018. Fuente: Propia.

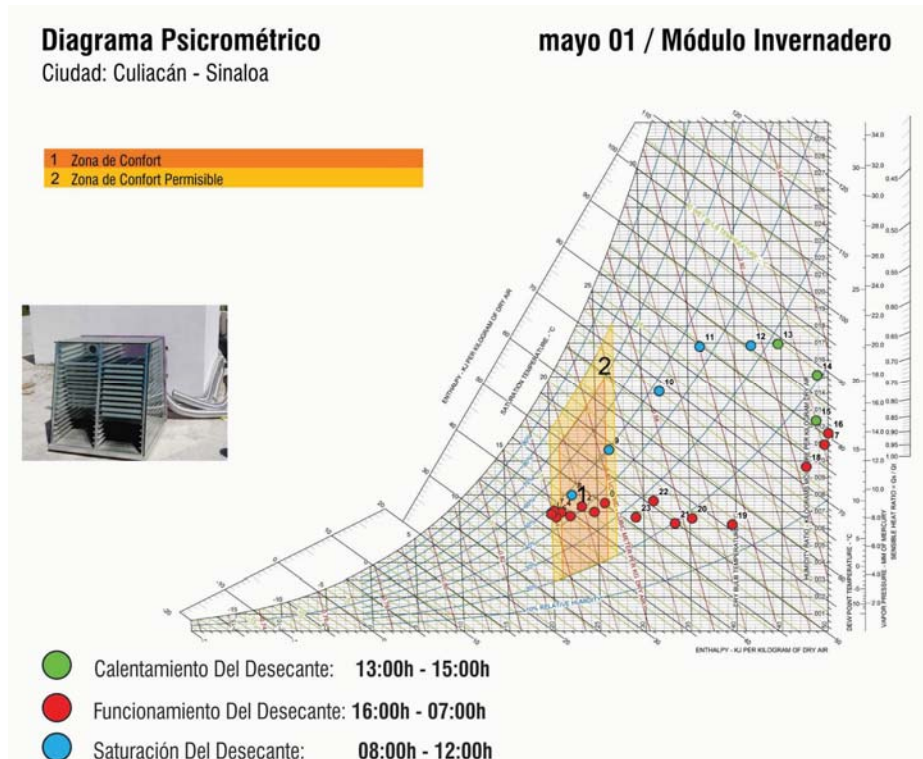


Fig. 147. Diagrama psicrométrico experimento prueba I módulo invernadero, 1 de mayo de 2018. Fuente: Propia.

Tabla 41. Resumen datos humedad relativa 01 de mayo de 2018. Fuente: Propia.

Humedad				
Fecha	01 de mayo			
	M. Experimental	M. Control	Exterior	M. Invernadero
Promedio	43.85	45.47	49.06	32.31
Varianza M. Experimental y Control	6.68			
Varianza M. Exp., Control y Exterior	6.79			
Varianza M. Exp. Control, Ext. e Inv.	6.51			
Desviación M. Experimental y Control	2.59			
Desviación M. Exp., Control y Exterior	2.61			

3.5 Observaciones experimento Prueba I

En el horario de la madrugada los puntos del invernadero se encontraron dentro de la zona de confort y coincidieron con la ubicación de los puntos del módulo experimental. Es importante mencionar que, en la tarde, mientras en el módulo del invernadero se presentaron temperaturas de hasta 50 °C, dentro del módulo experimental fueron 20 °C por debajo. Esta situación ocurrió en todas las pruebas que se realizaron.

Cuando la zeolita se activó en el módulo del invernadero, la humedad se redujo hasta un 50 % comparada con la humedad del ambiente, sin embargo, en el trayecto de los 2.5 m de tubo, ganó humedad y temperatura, por lo que se concluye que la ventilación generada dentro del módulo incrementa los valores de estas variables.

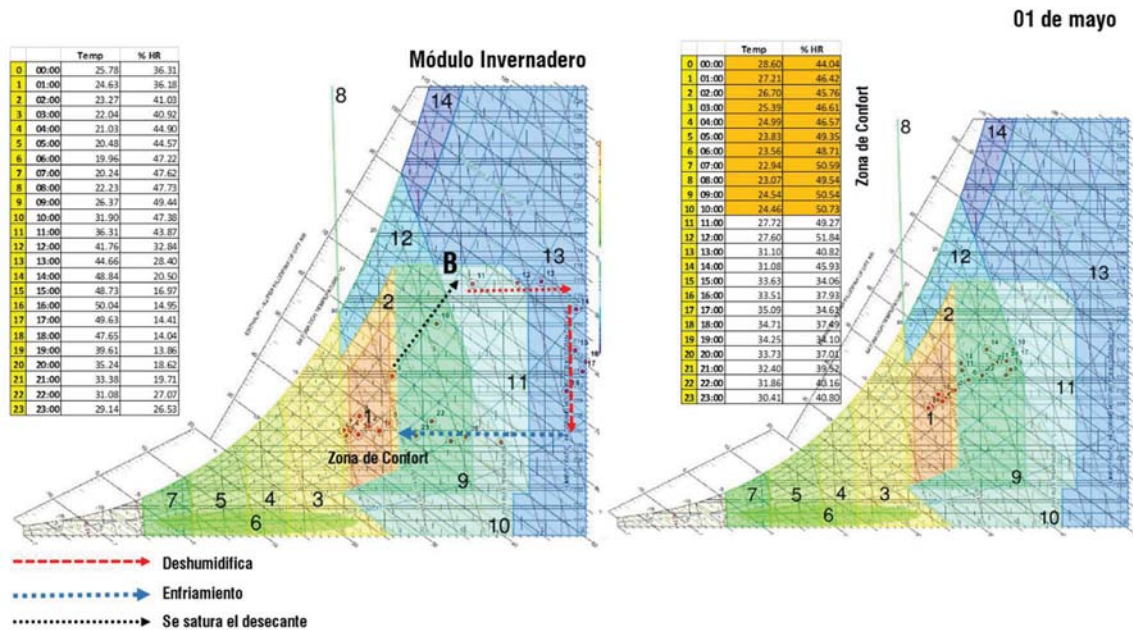


Fig.148. Análisis diagrama psicrométrico durante la prueba experimental. Fuente: Propia.

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo.

Tabla 42. Desempeño de las mediciones cuando se presenta la temperatura máxima en el ambiente exterior prueba I. Fuente: Propia.

Desempeño de las mediciones cuándo se presenta la temperatura máxima en el ambiente exterior

27 de abril de 2018											
		Sensor 1		Sensor 2		Sensor Externo		Sensor 3		Sensor Contacto	
		Sensor Modulo Experimental		Sensor Modulo de Control		Micro Estación Hobo Externo		Sensor Invernadero		Zeolita	
		Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	
27-abr	21:00	33.131	46.968	33.443	49.956	27.456	58.5	33.704	30.819		45.5
27-abr	21:05	32.768	45.078	32.872	47.495	27.505	58.7	33.391	28.511		44
27-abr	21:10	32.484	46.034	32.407	49.073	27.358	60.5	33.105	28.766		42.5

28 de abril de 2018											
		Sensor 1		Sensor 2		Sensor Externo		Sensor 3		Sensor Contacto	
		Sensor Modulo Experimental		Sensor Modulo de Control		Micro Estación Hobo Externo		Sensor Invernadero		Zeolita	
		Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	
28-abr	12:55	29.69	59.723	30.369	50.919	35.582	37.3	42.416	37.268		52

29 de abril de 2018											
		Sensor 1		Sensor 2		Sensor Externo		Sensor 3		Sensor Contacto	
		Sensor Modulo Experimental		Sensor Modulo de Control		Micro Estación Hobo Externo		Sensor Invernadero		Zeolita	
		Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	
29-abr	13:45	31.663	55.526	31.637	54.018	35.985	44.7	44.288	36.403		48

30 de abril de 2018											
		Sensor 1		Sensor 2		Sensor Externo		Sensor 3		Sensor Contacto	
		Sensor Modulo Experimental		Sensor Modulo de Control		Micro Estación Hobo Externo		Sensor Invernadero		Zeolita	
		Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	
30-abr	13:55	30.268	48.12	30.697	42.922	36.742	32.6	45.248	28.076		52

01 de mayo de 2018											
		Sensor 1		Sensor 2		Sensor Externo		Sensor 3		Sensor Contacto	
		Sensor Modulo Experimental		Sensor Modulo de Control		Micro Estación Hobo Externo		Sensor Invernadero		Zeolita	
		Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	
01-may	14:05	30.672	45.391	31.382	41.805	37.728	28.9	47.646	22.465		58

Temp. Máxima

Tabla 43. Desempeño de las mediciones cuando se presenta la temperatura mínima en el ambiente exterior prueba I. Fuente: Propia.

Desempeño de las mediciones cuándo se presenta la temperatura mínima en el ambiente exterior

27 de abril de 2018											
		Sensor 1		Sensor 2		Sensor Externo		Sensor 3		Sensor Contacto	
		Sensor Modulo Experimental		Sensor Modulo de Control		Micro Estación Hobo Externo		Sensor Invernadero		Zeolita	
		Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	
27-abr	23:45	30.672	50.927	30.722	54.786	26.158	68.2	29.991	43.206		32
27-abr	23:50	30.646	50.665	30.748	54.598	25.914	66.8	29.94	43.024		31.5
27-abr	23:55	30.621	50.532	30.722	54.339	25.623	67.3	29.69	43.007		31.5

28 de abril de 2018											
		Sensor 1		Sensor 2		Sensor Externo		Sensor 3		Sensor Contacto	
		Sensor Modulo Experimental		Sensor Modulo de Control		Micro Estación Hobo Externo		Sensor Invernadero		Zeolita	
		Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	
28-abr	06:55	28.085	59.073	25.817	67.621	20.77	90.8	24.363	61.177		24.3

29 de abril de 2018											
		Sensor 1		Sensor 2		Sensor Externo		Sensor 3		Sensor Contacto	
		Sensor Modulo Experimental		Sensor Modulo de Control		Micro Estación Hobo Externo		Sensor Invernadero		Zeolita	
		Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	
29-abr	07:00	25.987	63.554	25.55	70.478	21.867	87.5	24.146	64.251		25

30 de abril de 2018											
		Sensor 1		Sensor 2		Sensor Externo		Sensor 3		Sensor Contacto	
		Sensor Modulo Experimental		Sensor Modulo de Control		Micro Estación Hobo Externo		Sensor Invernadero		Zeolita	
		Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	
30-abr	06:40	23.713	56.136	23.04	63.096	17.677	85.8	19.96	59.986		21

01 de mayo de 2018											
		Sensor 1		Sensor 2		Sensor Externo		Sensor 3		Sensor Contacto	
		Sensor Modulo Experimental		Sensor Modulo de Control		Micro Estación Hobo Externo		Sensor Invernadero		Zeolita	
		Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	HR	Temperatura	
01-may	05:10	23.93	49.051	23.304	53.861	17.748	71.8	20.46	42.127		22

Temp. Mínima

4. Análisis Discusión de Resultados

A continuación, se hace el análisis de las 9 pruebas experimentales que se realizaron en los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre. Se analizaron alrededor de 768.000 datos de temperatura y humedad relativa exterior, temperatura y humedad relativa interior en el módulo experimental, temperatura y humedad relativa interior en el módulo de control, temperatura y humedad relativa en el interior del invernadero, temperatura de contacto con la superficie de la zeolita.

El registro de estos valores se realizó cada 5 minutos, para los datos exteriores se contó con el apoyo del M. I. Bladimir Salomón Montijo, encargado de la Estación Climatológica de la Facultad de Biología, de la Universidad Autónoma de Sinaloa, en la ciudad de Culiacán.

Así como en la *Prueba I*, en la que se utilizaron extractores de aire en el interior de los módulos, para el resto de las ocho pruebas, en los 8 meses del año, también se usó el extractor, que se conectó a un temporizador para que se activara en las horas impares del día: 01:00 h, 03:00 h, 05:00 h, 07:00 h, 09:00 h, 11:00 h, 13:00 h, 15:00 h, 17:00 h, 19:00 h, 21:00 h y 23:00 h.

La monitorización abarcó el periodo de verano, otoño e invierno, por lo que se tienen diferentes desempeños, tanto en la temperatura como en la humedad relativa. El análisis se complementó con el cálculo y representación de los valores de humedad absoluta para todas las pruebas, además se seleccionaron días específicos de cada prueba, para ubicar los puntos de humedad relativa y temperatura dentro de los diagramas psicrométricos con el fin de conocer si estos puntos se ubicaron dentro de la zona de confort.

4.1 Análisis resultados humedad relativa proceso experimental Prueba II

Fecha inicio de análisis: **5 de mayo de 2018**

Fecha final: **3 de junio de 2018**

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos Ciudad: Culiacán, Sinaloa

Durante este periodo, los valores mínimos se presentaron en las horas del mediodía, pero en la tarde se incrementaron paulatinamente hasta llegar a su máximo en la madrugada. La humedad relativa exterior, denominada como *microestación Hobo* (línea verde), registró valores máximos que sobrepasaron el 60 % a lo largo de la prueba, el mayor se detectó el día 18 de mayo con 90 %. Por el contrario, el valor mínimo fue de 19.63 % y registró el día 20 de mayo.

Estos valores son la base para realizar el comparativo entre el *módulo experimental* (línea negra), *módulo de control* (línea azul celeste) e *invernadero* (línea azul oscura punteada).

De igual manera, en el *invernadero* (línea azul oscura punteada), los datos estuvieron por debajo de las líneas del exterior, del módulo experimental y del módulo de control. Especialmente en horas de la tarde estas líneas se separaron y se evidenciaron diferencias que van desde 15 hasta 30 %; para esta prueba el valor mínimo fue de 11.91 %, el valor máximo fue de 66.24 % y el promedio fue de 36.46 %.

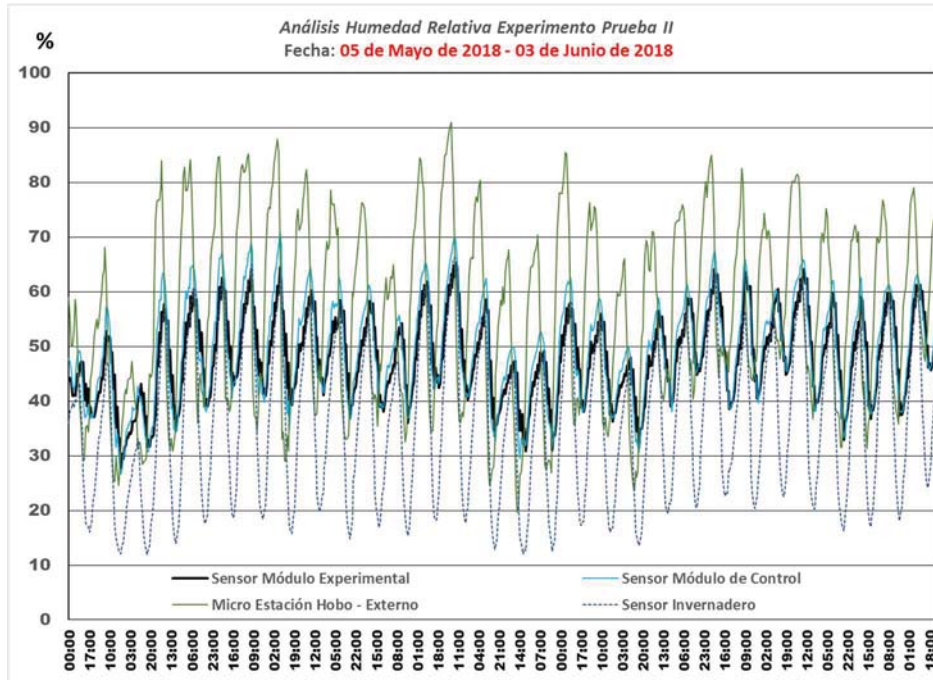


Fig. 149. Análisis humedad relativa, prueba II. Fuente: Propia.

Las líneas del *módulo experimental* y del *módulo de control* registraron 43.91 % y 47.68 % respectivamente; el exterior presentó una humedad relativa de 58.89 % y el invernadero de 35.98 %. Las líneas tuvieron la tendencia a estar separadas y se observó una clara diferencia entre los valores del exterior y los de ambos módulos. El 12 de marzo de 2018, a las 12:00 h, la diferencia de humedad relativa entre ambos módulos fue de 10.07 %; en el módulo de control estuvo en 42.26 % y en el experimental en 52.33 %. Para ese mismo momento la humedad relativa exterior se encontraba en 29.18 % y en el invernadero en 31.72 %.

Este mismo día a las 06:00 h, se presentó una diferencia de 8.82 % entre ambos módulos, en el experimental estuvo en 59.61 % y en el de control en 68.43 %. Por su parte, en el exterior se registró una humedad relativa de 85.58 %, es decir, 25.97 % por arriba del módulo experimental. En ese mismo lapso, en el invernadero estaba en 59.52 %.

Al revisar la gráfica y los datos numéricos arrojados por los sensores, se observó que el desempeño anterior de la humedad relativa en ambos módulos es repetitivo tanto en las horas de la madrugada como en el mediodía.

Durante los 29 días monitorizados, el valor promedio de humedad relativa en el módulo experimental fue de 48.26 %, para el invernadero fue de 36.46 %, el módulo de control tuvo un promedio mensual de 49.50 %, y en el exterior el valor promedio fue de 56.20 %. Si se toma el valor promedio del exterior como el 100 % y se compara con los valores convertidos a porcentajes respecto al exterior; quiere decir que los valores mostrados que se alejen del 100 % tienen mejor desempeño; con esto se puede concluir que la efectividad del módulo experimental fue de 85.87 %, mientras que la efectividad del módulo de control fue de 88.07 % y la del invernadero 64.87 %.

Con el fin de analizar con detalle el desempeño del experimento, se eligió el día de la humedad relativa más alta, que fue el 18 de mayo, y como mecanismo de control se graficó su desempeño junto a los días 17 y 19 de mayo.

En la siguiente gráfica se observa que la humedad relativa del ambiente a las 00:00 h del 18 de mayo estuvo en 84.94 %, mientras que en el módulo experimental estaba en 52.04 % y en el de control el valor era de 57.63 %. El módulo experimental presentó una humedad relativa 5.59 % más baja que la humedad del módulo de control y 32.9 % más baja que el exterior, este punto evidencia que la zeolita absorbió la humedad.

También se encontró que en el transcurso de la madrugada la línea del módulo experimental se mantuvo por debajo de los valores estudiados, y desde las 02:00 h hasta las 09:00 h los valores de humedad relativa en el módulo experimental y en el invernadero fueron muy cercanos. Sin embargo, a las 09:00 h, estos dos valores se separaron y se situaron por encima de la humedad relativa exterior, así como de la humedad relativa en el módulo de control.

Desde las 12:00 h hasta las 16:00 h, la humedad relativa en el módulo de control fue más baja que en el experimental, pero más alta que en el exterior. A las 17:00 h los valores de humedad relativa del módulo experimental, el módulo de control y el exterior fueron similares, en el invernadero se registró la humedad relativa mínima de 17.79 % y, a partir de allí y en el resto de la noche, esa disminución de humedad relativa se vio reflejada en el módulo experimental porque la línea negra se situó por debajo de la línea del módulo de control y el exterior. Este patrón se presentó en el experimento prueba: la línea del módulo experimental no fue continua y tuvo unos picos durante las horas en que el ventilador se encendió.

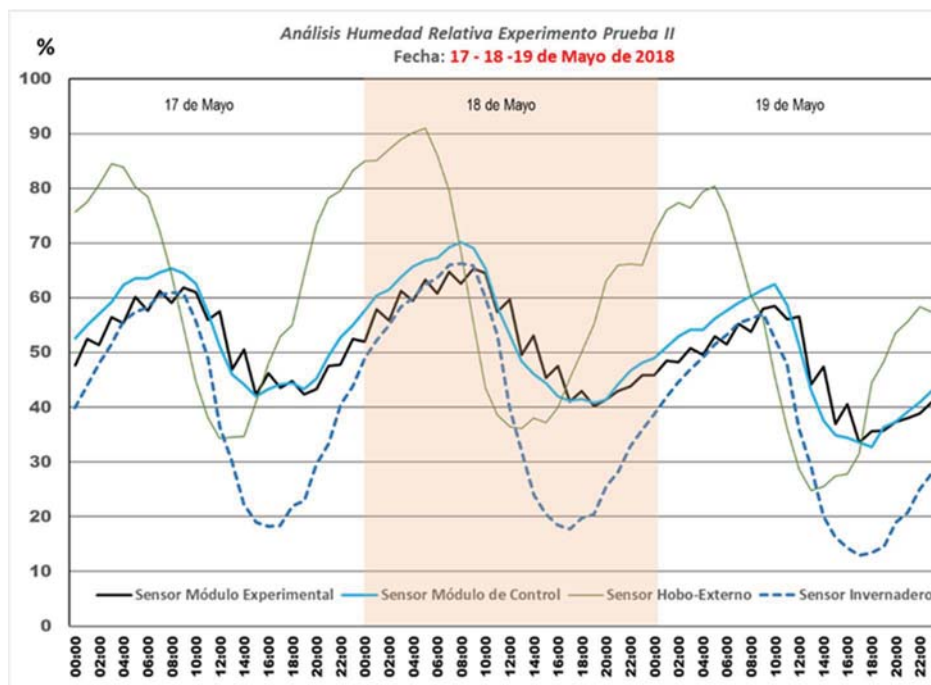


Fig. 150. Análisis humedad relativa, prueba II día 18 de mayo. Fuente: Propia.

4.2 Análisis resultados humedad relativa proceso experimental Prueba III

Fecha inicio de análisis: 5 de junio de 2018

Fecha final: 5 de julio de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos Ciudad: Culiacán, Sinaloa

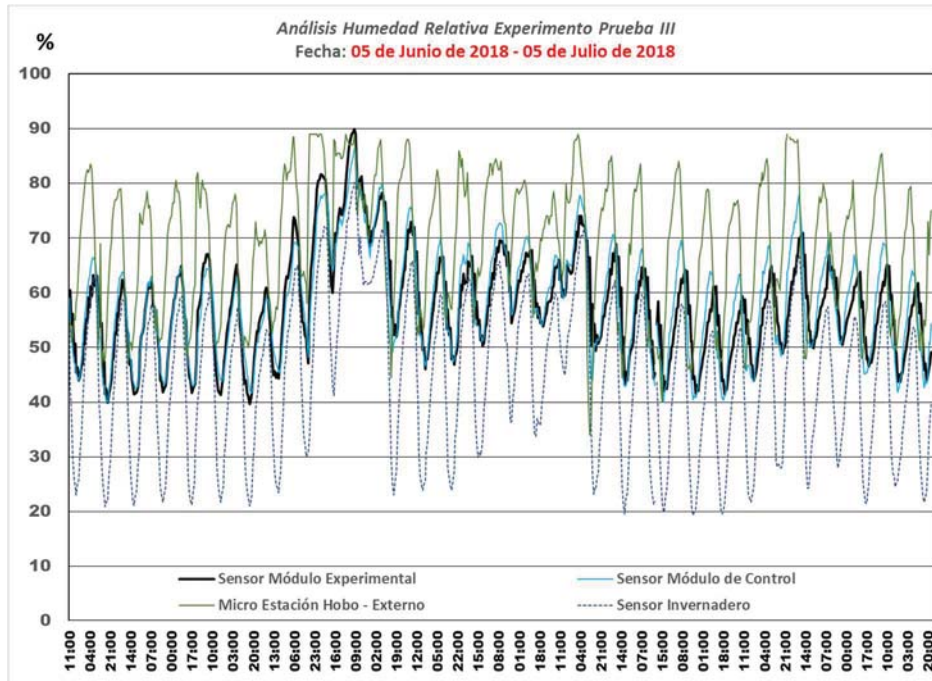


Fig. 151. Análisis humedad relativa, prueba III. Fuente: Propia.

La siguiente prueba experimental se realizó a comienzos del verano, en los meses de junio y julio. El promedio de humedad relativa en el ambiente exterior durante estos 30 días fue de 68.63 %; en el módulo experimental promedió 57.84 %; en el módulo de control, 58.32 %, y en el invernadero, 44.70 %.

El desempeño de la humedad relativa exterior fue normal para esta prueba: los máximos valores se presentaron en la madrugada. Durante las primeras horas de la mañana estos valores disminuyeron, llegaron a su mínimo al mediodía, aumentaron en la tarde y en la noche se encaminaron de nuevo para llegar a su máximo valor. En el módulo experimental los máximos valores de humedad relativa se encontraron en la madrugada; mientras que los valores mínimos se detectaron al finalizar la tarde (alrededor de las 19:00 h). Este mismo desempeño ocurrió en el invernadero. De igual manera, en el módulo de control la humedad máxima se registró en la madrugada y la mínima en la tarde, entre las 16:00 h y 17:00 h.

El día 15 de junio se presentaron los promedios máximos de humedad relativa: en el ambiente exterior con 89.0 %; en el módulo experimental, 89.89 %; en el módulo de control, 86.25 %, y en el invernadero, 80.15 %. Esto como consecuencia de las precipitaciones que, según, los datos climáticos de la UAS, alcanzaron los 72.70 mm. Cabe acotar que el registro numérico de todas las variables se efectuó simultáneamente a las 08:00 h.

El 23 de junio, a las 12:00 h, se registró el mínimo de humedad exterior de toda la prueba, con un valor de 34.0 %. Por su parte, el 11 de junio, a las 17:00 h, el módulo experimental evidenció

el valor mínimo con 39.60 %. Así mismo, el mínimo en el módulo de control fue de 39.95 % a las 19:00 h del día 6 de junio. En el invernadero la humedad mínima fue de 19.25 %, el 27 de junio a las 17:00 h.

Se observó un desempeño cíclico de la humedad en el experimento: la línea con valores de humedad relativa exterior (línea verde) se mantuvo por encima de los valores del módulo experimental (línea negra) y del módulo de control (línea azul) cuando los valores de la primera tienen mayor valor numérico. Se detectó que las tres líneas tuvieron la tendencia unirse en las horas de la mañana, pero cuando se daba el valor mínimo en el exterior las líneas se separaban. En esta gráfica se observa que las líneas del módulo de control (línea azul) y el módulo experimental (línea negra) tuvieron un desempeño similar, las separaciones entre ellas se presentaron cuando las humedades relativas estaban en su máximo o su mínimo. La humedad relativa en el invernadero (línea azul punteada) se situó por debajo de las líneas anteriormente mencionadas, esta diferencia llegó a ser hasta del 20 % y se dio al finalizar la tarde. En la madrugada la diferencia disminuyó, luego, en la mañana las líneas de humedad exterior, del módulo experimental, del módulo de control y el invernadero se encontraron por algunas horas hasta que llegaron a su valor mínimo y se separaron los valores.

Con el fin de evaluar el desempeño del módulo experimental se midió el valor promedio de la humedad relativa del exterior (68.63 %) que equivale al 100 %; la eficiencia en el módulo experimental (57.84 %) fue de 84.27 %, en el módulo de control (58.32 %) fue de 89.97 %, y en el invernadero (44.70 %) fue de 65.13 %. El desempeño del módulo experimental fue mejor comparado con el módulo de control por una diferencia de 5.7 %, así mismo, con respecto al exterior este módulo tuvo una eficacia del 15.73 %. La eficiencia que presentó el invernadero con respecto al exterior fue de 34.87 %. Se tomó el día en que se tuvo mayor humedad relativa exterior con el fin de hacer una descripción el desempeño de la humedad relativa durante ese día.

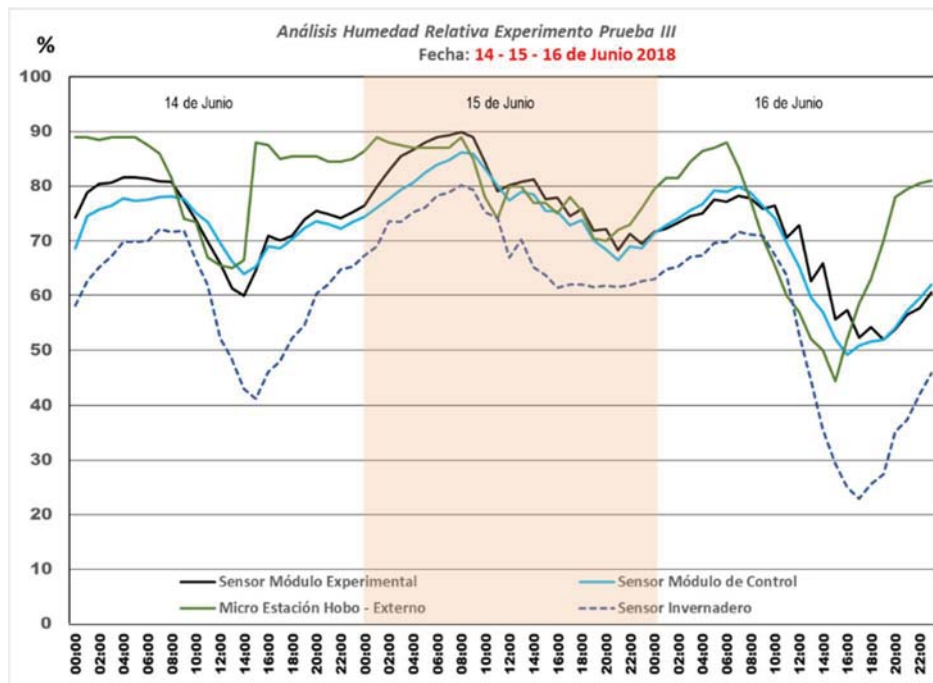


Fig. 152. Análisis humedad relativa, prueba III, día 15 de junio. Fuente: Propia.

De acuerdo con la revisión de los datos del 14 de junio del ambiente exterior, el promedio de humedad a lo largo del día fue 82.13 %, con una temperatura promedio de 27.23 °C; se puede afirmar que la zeolita no alcanzó la temperatura adecuada en horas de la tarde para absorber humedad en las primeras horas del 15 de junio; se observó que la línea en el módulo experimental no siguió la trayectoria de días anteriores.

Desde las 07:00 h hasta las 12:00 h el promedio de humedad relativa en el exterior fue de 82.17 %, en el módulo experimental el valor fue 85.32 %, en el módulo de control fue 82.96 % y en el invernadero fue 75.81 %. El valor de humedad relativa se situó por encima del exterior 3.15 % y del módulo de control 2.36 %. El invernadero siguió presentando el menor valor de humedad y se situó 9.51 % por debajo del módulo experimental. En el trayecto de los tubos de aluminio hasta el módulo experimental el aire volvió a saturarse con humedad y no se alcanzó a deshumidificar debido a la alta humedad que había en el ambiente exterior.

Desde las 13:00 h hasta las 19:00 h el valor promedio de la humedad relativa exterior fue 76.14 %; en el módulo experimental, 77.15 %; en el módulo de control, 75 %, y en el invernadero, 63.73 %. Para el rango de horas, comprendido entre las 20:00 h y 23:00 h, el porcentaje de humedad relativa en el exterior fue 72.75 %, en el módulo experimental el porcentaje fue 70.31 %, en el módulo de control fue de 68.10 %, y en el invernadero, 61.97 %.

Otro factor que se tuvo en cuenta, es que el día 15 de junio se presentó la mayor precipitación, cayeron cerca de 72.70 mm de agua. Durante esa jornada, desde las 00:00 h y hasta las 06:00 h, el promedio de humedad relativa en el exterior fue de 87.43 %; en el módulo experimental, 88.97 %; en el módulo de control, 79.23 %, y en el invernadero, 73.29 %.

En pruebas anteriores se observó que en las tardes la temperatura en el interior del invernadero sobrepasó los 50 °C, sin embargo, al revisar las mediciones del 15 de junio en el rango comprendido entre las 13:00 h y las 19:00 h, la temperatura promedió apenas los 31.06 °C, mientras que en el sensor de contacto de la zeolita no sobrepasó los 34.73 °C. Dichas temperaturas fueron insuficientes para activar las propiedades desecantes de la zeolita, situación que se vio reflejada en los resultados de humedad relativa, pues los valores más altos se concentraron en el módulo experimental a lo largo de diferentes rangos horarios.

Por el contrario, en los días en que no llovió, durante las madrugadas en el módulo experimental la humedad relativa se situó por debajo de las líneas del módulo de control y del ambiente exterior. Durante las tardes la zeolita se activó con el calor que se produjo en el ambiente y con los rayos del sol, provocando que, en la noche, la humedad relativa en el módulo experimental se posicionara por encima del módulo de control y del ambiente.

4.3 Análisis resultados humedad relativa proceso experimental Prueba IV

Fecha inicio de análisis: 7 de julio de 2018
Fecha final: 6 de agosto de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos – Ciudad: Culiacán, Sinaloa

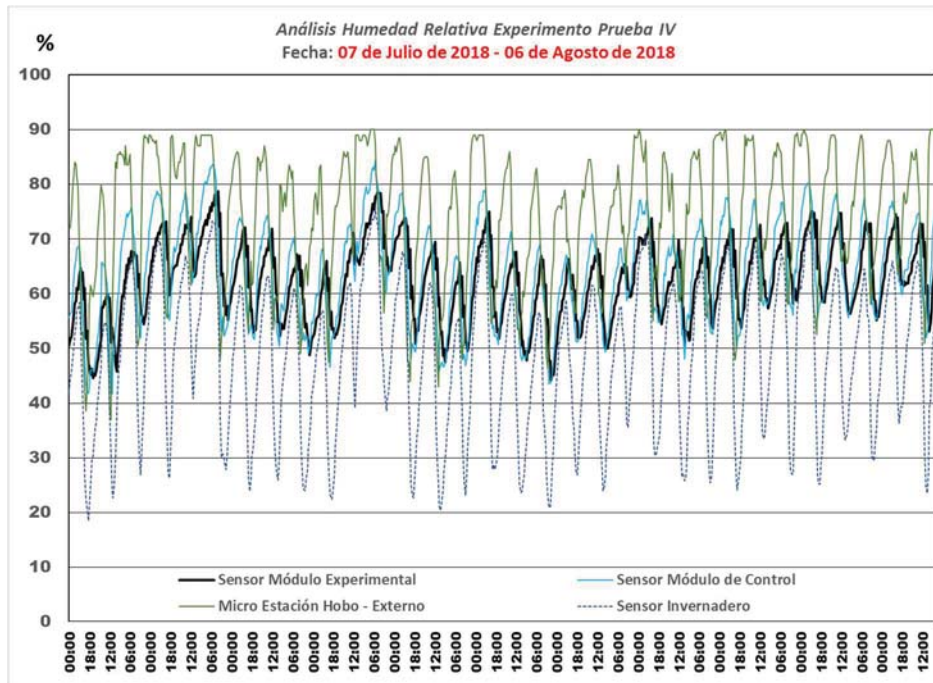


Fig. 153. Análisis humedad relativa, prueba IV. Fuente: Propia.

La prueba realizada del 7 de julio al 7 de agosto presentó en sus líneas la trayectoria normal de la humedad relativa a lo largo del día: altos valores de humedad en la noche y madrugada, al mediodía decrece y vuelve a incrementarse para cerrar su ciclo. El promedio de humedad relativa en el exterior fue 73.84 %; en el módulo experimental, 62.71 %; en el módulo de control, 64.11 %, y en el invernadero, 48.47 %.

Al comparar esta gráfica con las pruebas de mayo y junio, se observó el incremento de la humedad relativa en el ambiente; el número de picos que se acercaron al valor de 90 % de la línea de la humedad relativa en el exterior fue mayor. A lo largo de la prueba se encontró que hay una diferencia entre las líneas que representan los valores del módulo experimental (línea negra) y los valores del módulo de control (línea azul). Esta diferencia se registró en la noche y en la madrugada.

De igual forma, la separación entre las líneas que representan el módulo experimental (línea negra) y la humedad relativa del ambiente (línea verde) fue muy apreciable, también se presentó al finalizar la tarde, en la noche y en las horas de la madrugada. En algunos casos, esta

diferencia pudo ser de menos de 20 % de humedad relativa en el módulo experimental. Se observó en la gráfica, que las cuatro variables estudiadas se encontraron en un punto y continuaron su trayectoria con poca diferencia entre sus valores. Este fenómeno ocurrió en las mañanas y parte de la tarde cuando la humedad relativa exterior llegó a su valor mínimo, mientras que en las noches las líneas volvieron a separarse.

El 17 de julio se presentó el máximo valor de humedad relativa exterior: 90 % desde las 03:00 h hasta las 07:00 h, esta situación coincidió con el día en que se registró la máxima precipitación del periodo, la cual alcanzó a los 21.40 mm. Durante ese mismo día se presentaron los máximos valores de humedad relativa para todas las mediciones del experimento: en el módulo experimental fue de 78.47 % a las 09:00 h, en el módulo de control fue de 84.37 % a las 07:00 h, y en el invernadero fue de 75.85 % a las 07:00 h.

El valor mínimo de humedad relativa en el ambiente fue de 37 % y se presentó el día 7 de julio a las 13:00 h; a esa misma hora en el módulo experimental fue 51.04 %; en el módulo de control, 41.65 %, y en el invernadero, 30.74 %. El valor mínimo de humedad relativa en el módulo experimental fue de 44.21 % y se presentó el día 23 de julio a las 19:00 h, cuando la humedad en el exterior se encontraba en 59.50 %; en el módulo de control, 43.76 %, y en el invernadero, 23.06 %.

La trayectoria de los valores del invernadero se situaron por debajo de las tres variables del experimento, los valores mínimos de esta se presentaron entre las 16:00 h y las 17:00 h y, en la mayoría de los días, se encontraron por debajo de 30 % de humedad relativa. Los valores máximos para esta variable se registraron entre las 07:00 h y 09:00 h, y no sobrepasaron la barrera de 75 %.

Tomando el promedio total de la humedad relativa del ambiente (73.8 %), el cual representa el 100 % para esta prueba, el porcentaje efectivo de disminución del módulo experimental fue de 15.03 % con respecto al exterior; para el módulo de control el porcentaje de disminución fue de 13.14 % con respecto al exterior; en el invernadero el porcentaje de disminución fue mayor con un valor de 34.32 %.

A continuación, se grafican los datos del día 1 de agosto con el fin de observar con detalle el desempeño de las trayectorias de las variables estudiadas, cabe destacar que este día presentó la segunda humedad relativa del ambiente más alta a lo largo de la prueba. A las 00:00 h la humedad relativa exterior se encontró en 85 %, a esa misma hora en el módulo experimental fue de 62.26 %; en el módulo de control, 66.64 %, y en el invernadero, 53.81 %. Desde las 00:00 h hasta las 07:00 h, estas dos líneas se observaron separadas con una diferencia numérica entre 5 y 6 %, situándose la humedad relativa del módulo experimental como de menor valor. En ese mismo rango de tiempo la humedad en el módulo experimental estuvo entre 22 y 14 % más baja comparada con la humedad del ambiente exterior. Después de tener su pico más alto en la madrugada, la humedad relativa exterior disminuyó sus valores.

A las 10:00 h las líneas de los valores del ambiente exterior, del módulo experimental y del módulo de control se encontraron; a partir de allí se observó que la línea del módulo experimental presentó los valores más altos: entre 5 y 14.20 % comparados con la humedad del ambiente, y entre 1 y 10 % más altos que los datos del módulo de control; este fenómeno duró alrededor de cuatro horas.

A las 12:00 h se presentó la máxima humedad relativa del módulo experimental con 73 %, y coincidió con el mínimo valor de humedad relativa en el ambiente que fue de 58 %. A partir de esa hora la trayectoria de la línea del ambiente exterior aumentó, y los valores en el módulo experimental disminuyeron, así como los valores del módulo de control. La humedad relativa en el módulo de control se mantuvo más baja que el módulo experimental desde las 12:00 h hasta las 18:00 h, dicha diferencia de porcentaje estuvo en los rangos de 2 a 10.74 %. A las 16:00 h la línea del módulo experimental se situó por debajo de la humedad relativa exterior. A las 17:00 h se registró el valor mínimo de 56.12 % en el módulo de control, una hora después se encontró el mínimo de humedad relativa en el módulo experimental: 58.19 %, desde esta hora y hasta la madrugada, el módulo experimental tuvo los valores con mejor desempeño. Realizando el comparativo en horas, el módulo experimental tuvo 16 horas con humedad relativa más baja que el módulo de control y 20 horas con valores de humedad más bajos que el ambiente exterior.

Los valores de humedad relativa en el invernadero se mantuvieron por debajo de las variables evaluadas en las pruebas experimentales, el valor promedio de humedad relativa fue 51.94 %, el máximo valor de humedad fue 67.35 % a las 07:00 h y el mínimo fue 26.97 % a las 16:00 h.

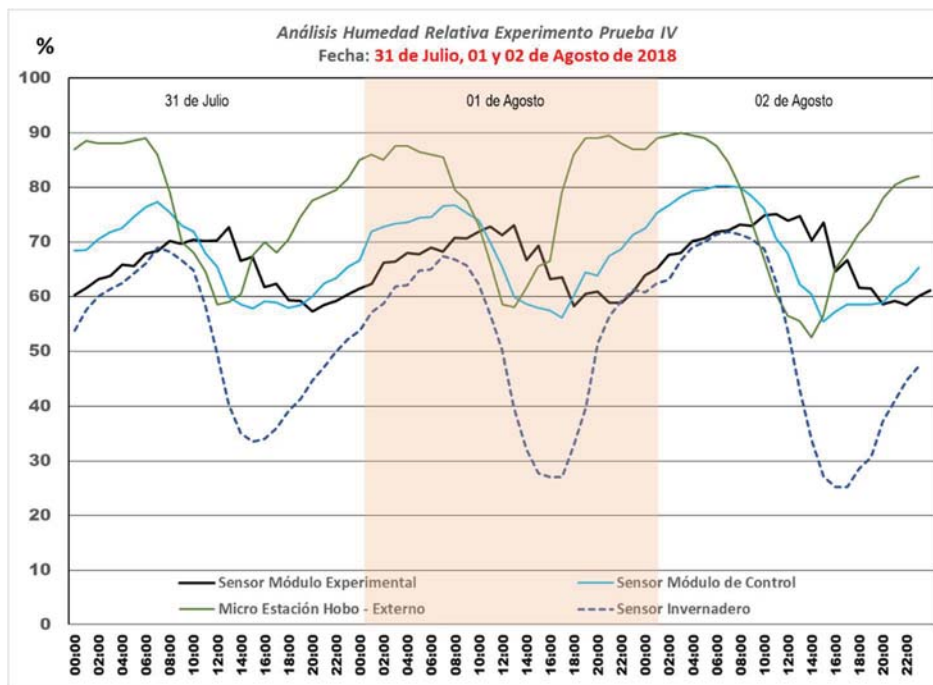


Fig. 154. Análisis humedad relativa, prueba IV día 01 de agosto. Fuente: Propia.

4.4 Análisis resultados humedad relativa proceso experimental Prueba V

Fecha inicio de análisis: 7 de agosto de 2018

Fecha final: 7 de septiembre de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos – Ciudad: Culiacán, Sinaloa

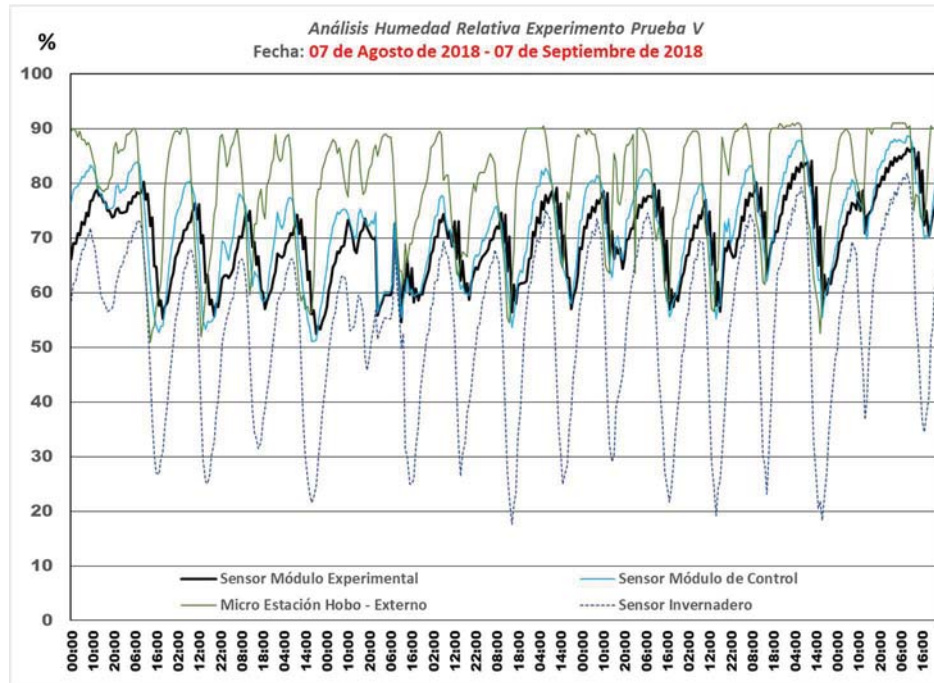


Fig. 155. Análisis humedad relativa, prueba V. Fuente: Propia.

Se realizó el monitoreo de las variables experimentales por 15 días entre el mes de agosto y septiembre: desde el 7 de agosto al 12 de agosto, y la segunda etapa desde el 28 de agosto al 7 de septiembre. Para esta prueba el valor promedio de humedad relativa para el exterior fue 78.7 %; en el módulo experimental, 64.61 %; en el módulo de control, 65.78 %, y en el invernadero, 53.70 %.

En la prueba se observó que los picos llegaron al 90 % en la línea que corresponde a los valores de humedad relativa exterior, en este sentido el valor máximo fue 91 %, que se presentó en la madrugada del 7 de septiembre y se extendió desde las 01:00 h hasta las 07:00 h. Es importante anotar que el promedio de precipitación por 24 h para este día fue de 36 mm. Este mismo día se presentaron los máximos valores de humedad relativa para el módulo experimental: 86.42 % a las 11:00 h, y para el módulo de control: 88.75 % a las 09:00 h. En el invernadero el valor máximo fue de 89.50 % y se presentó el día 30 de agosto a las 14:00 h.

El valor mínimo de humedad relativa en el ambiente exterior fue 51 %, se presentó el 8 de agosto a las 13:00 h. En el módulo experimental el valor mínimo fue 52.47 %, se presentó el día 11 de agosto a las 19:00h. En el módulo de control el valor mínimo fue de 51.07 % y se presentó también el día 11 de agosto a las 17:00 h. En el invernadero el valor mínimo fue de 25.50 % a las 07:00 h.

Se observaron patrones que se repiten en las gráficas que se analizaron en pruebas anteriores, los valores de humedad relativa externa se ubicaron por encima de todas las variables al finalizar las tardes y en las madrugadas; debajo de esta línea se encontraron los valores del módulo de control, seguido por los de módulo experimental y finalmente se ubicó la línea con los valores de humedad relativa en el invernadero. Pasada la hora en que se presentó la humedad máxima en el exterior las líneas de esta, el módulo experimental y el módulo de control tuvieron la tendencia a unirse con pequeñas diferencias, esto aconteció en la mañana y en las horas de la tarde.

Al mediodía, cuando se presentó el valor mínimo de humedad relativa en el exterior, las humedades en ambos módulos fueron más altas que en el ambiente, de hecho, en ese momento el valor de la humedad en el módulo experimental se situó como el más alto. Al finalizar la tarde el valor de la humedad exterior aumentó, la zeolita, al estar todo el día captando calor, se activó y es en ese momento que comenzó la absorción de humedad relativa en el módulo experimental. En la noche y en la madrugada se apreció cualitativamente la disminución de vapor de agua en el aire y la línea del módulo experimental se situó por debajo de los valores del ambiente y del módulo de control. La humedad en el invernadero permaneció por debajo de las tres variables anteriormente mencionadas, con diferencias notables; sin embargo, en las mañanas cuando la zeolita no estaba activa, se observó que la línea igualaba los valores del ambiente exterior, del módulo experimental y del módulo de control.

Con el fin de apreciar la efectividad de absorción de humedad de la zeolita, se tomó el valor promedio del ambiente para esta prueba: 79.84 % que equivale al 100 %. La efectividad del módulo de control fue de 89.59 % y en el módulo experimental fue de 87.61 %. En este último experimental se logró disminuir la humedad relativa un 12.31 % con respecto al exterior, y 1.98 % con relación al módulo de control. A continuación, se analiza el 8 de agosto; uno de los días con mayor temperatura registrada durante la prueba: 35.78 °C.

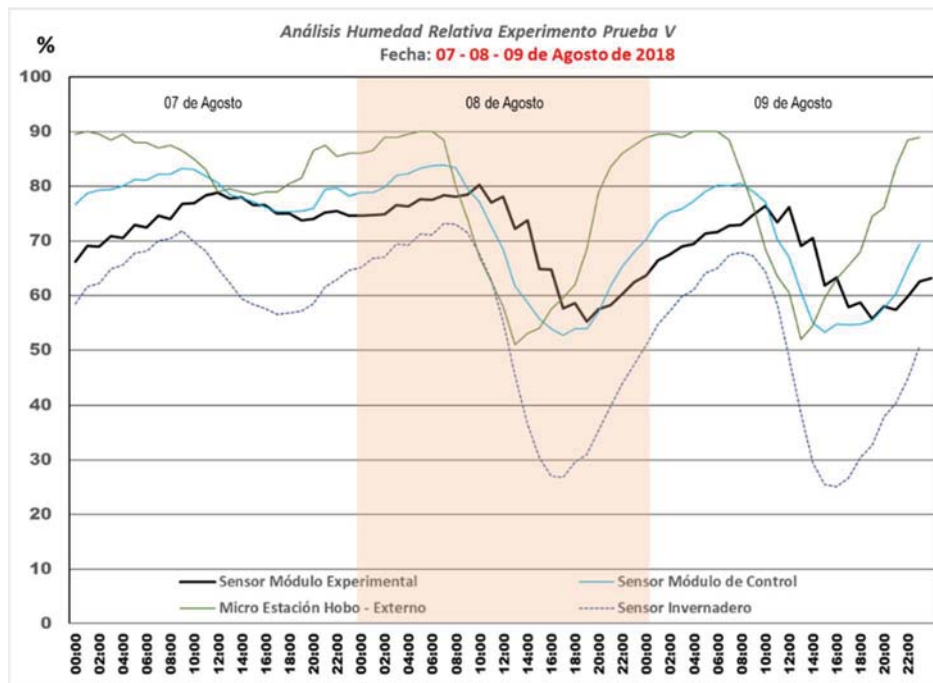


Fig. 156. Análisis humedad relativa, prueba V día 8 de agosto. Fuente: Propia.

Para el día 8 de agosto, la humedad relativa en el exterior promedió 74.65 %; en el módulo experimental, 70.32 %; en el módulo de control, 69.85 %, y en el invernadero, 73.11 %.

El valor máximo de humedad relativa en el exterior fue de 90 % y se presentó a las 05:00 h y 06:00 h, a esa misma hora en el módulo experimental la humedad se encontraba en 77.62 % y en el módulo de control en 83.33 %. En este caso la humedad en el módulo experimental estuvo 12.38 % más baja que en el ambiente exterior y 5.71 % más baja que en el módulo de control, a esta hora la humedad en el invernadero fue de 71.25 %.

A las 10:00 h se presentó el máximo valor de humedad para el módulo experimental: 80.32 %, simultáneamente el valor de la humedad relativa exterior fue de 67 %, en el módulo de control fue de 77.11 %. Se observó en la gráfica que a esta hora la línea que representa la humedad relativa exterior se encontró por debajo de las líneas del módulo experimental y del módulo de control. La humedad relativa del módulo experimental estuvo 13.32 % por encima de los valores del exterior, y 3.21 % por encima de los valores del módulo de control. Se concluye entonces que para esta fracción de tiempo la zeolita no absorbió humedad del aire ya que el valor de humedad relativa en el invernadero fue de 67.59 %, 0.59 % más alto que en el valor del ambiente.

El valor máximo de humedad relativa se presentó a las 07:00 h en el módulo de control con un 83.84 %; en el exterior en ese mismo momento la humedad relativa fue 88.50 % y en el módulo experimental fue 78.36 %. Para este periodo, el módulo experimental estuvo 10.14 % por debajo del exterior y 5.48 % por debajo del módulo de control. La zeolita en el invernadero estuvo activa, la humedad relativa a las 07:00 h fue de 73.11 %.

A las 13:00 h se presentó el valor mínimo de humedad relativa en el exterior: 51 %, para ese momento la humedad en el módulo experimental tuvo un valor de 72.14 % y en el módulo de control fue de 61.70 %; a esa misma hora en el invernadero estaba en 45.51 %, lo que hace pensar que a esa hora comenzó la activación de la zeolita, ya que los valores del módulo de control se ubicaron 21.14 % por encima de los datos del exterior, y 10.44 % por encima de los valores del módulo de control.

En el módulo de control, el valor mínimo se detectó a las 17:00 h con 52.73 %; en el exterior a esa misma hora la humedad estaba en 59.50 % y en el módulo experimental 57.61 %. En el invernadero la humedad tuvo un valor de 26.73 %; la absorción de la zeolita no se vio reflejada en el valor de la humedad relativa del módulo experimental ya que estaba 6.77 % por encima del módulo de control y 1.89 % por debajo del ambiente exterior.

A las 19:00 h, la humedad relativa estaba en 55.18 % y representaba el mínimo valor en el módulo experimental, para este rango de tiempo la humedad en el ambiente exterior fue de 68.50 % y en el módulo de control fue de 53.90 %. El invernadero presentó una humedad de 30.95 %; a partir de esta hora y hasta la madrugada se apreció una notable diferencia entre los valores de las líneas de humedad, tanto en el exterior como en el módulo de control. La humedad exterior estuvo por encima de los valores del módulo experimental 13.32 % y el módulo de control estuvo 1.28 % más bajo que el valor presentado en módulo de estudio.

4.5 Análisis resultados humedad relativa proceso experimental Prueba VI

Fecha inicio de análisis: 8 de septiembre de 2018

Fecha final: 8 de octubre de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos – Ciudad: Culiacán, Sinaloa

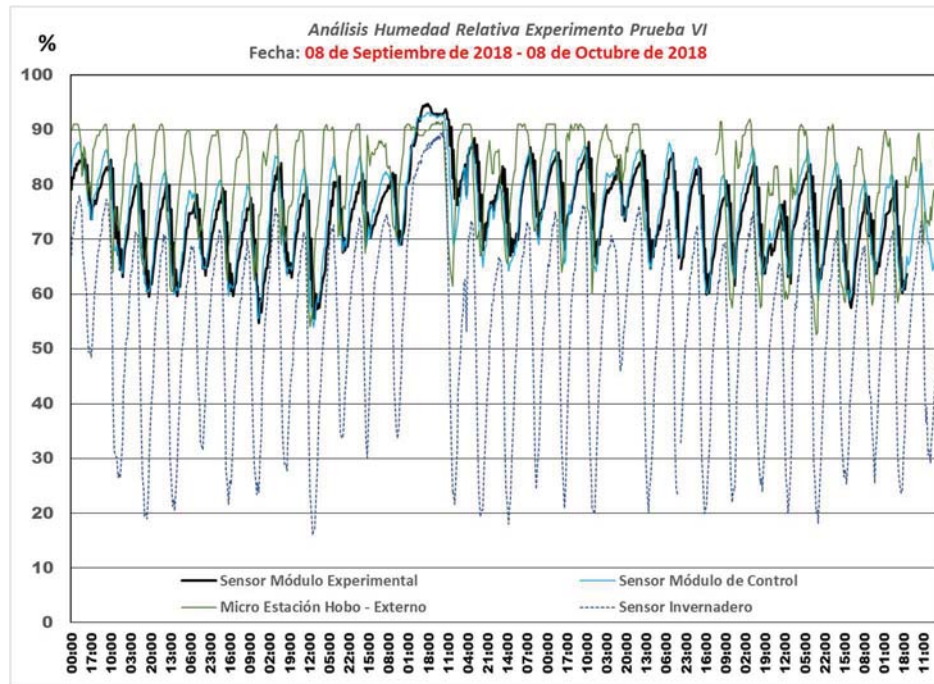


Fig. 157. Análisis humedad relativa, prueba VI. Fuente: Propia.

El mes de septiembre de 2018 se clasificó como el mes con las más altas precipitaciones anuales; de acuerdo con lo que se observa en la gráfica para los 30 días de esta prueba los máximos valores de humedad relativa en el exterior (línea verde) sobrepasaron el 90 %. La trayectoria de las líneas, en las variables estudiadas, presentó un desempeño muy similar al que se ha evidenciado en pruebas anteriores. En la gráfica también se observa que hay un momento en que las líneas del módulo experimental, del módulo de control y del invernadero sobrepasan el valor de 90 %, este día es el 20 de septiembre, fecha en la cual se presentaron 224 mm de precipitación por 24 horas, según los registros del *“Boletín Climatológico Mensual”* de la Escuela de Biología, de la Universidad Autónoma de Sinaloa.

Así mismo, se encontró que promedio mensual de humedad relativa en el ambiente exterior fue 80.72 %; en el módulo experimental, 79.42 %; en el módulo de control, 75.27 %, y en el invernadero, 53.40 %.

Al analizar los datos se observó que el valor máximo de humedad relativa en el exterior fue de 92 % y se presentó el día 2 de octubre; se cruzó esta información con el *“Boletín Climatológico Mensual”* de la Escuela de Biología de la Universidad Autónoma de Sinaloa y se encontró que para ese día se tuvo una precipitación máxima por 24 h de 2.40 mm. Para ese mismo día, el valor máximo en el módulo experimental fue 83.93 % y en el módulo de control fue 86.76 %, para el módulo del invernadero la máxima humedad fue de 51.93 %. Estos valores máximos de humedad relativa se dan en las horas de la madrugada y a principios de la mañana; el

desempeño de la humedad en el módulo experimental estuvo 8.07 % por debajo del ambiente exterior y 2.83 % por debajo de los datos del módulo de control. La diferencia numérica entre los valores de humedad en el invernadero y el módulo experimental es 32 % por debajo de los valores de humedad del módulo experimental. El valor máximo mensual de humedad relativa en el módulo experimental fue 94.80 %, y en el módulo de control fue 93.20 %, ambos valores se presentaron el 20 de septiembre a las 18:00 h y en ese momento la humedad relativa exterior estuvo en 90 %, también se destaca que la humedad en el invernadero tuvo un valor muy alto: 86.52 %. Es importante anotar que al iniciar ese día y al finalizar la noche, los rangos de la humedad relativa exterior estuvieron entre los 89.50 % y 91.0 %.

El valor mínimo promedio de humedad en el ambiente exterior fue de 52.50 %, este se presentó el 4 de octubre a las 15:00 h. Para ese rango de tiempo la humedad relativa en el módulo experimental fue 65.92%, en el módulo de control fue 63.51 % y en el invernadero fue 20.25 %.

Como ocurrió en análisis anteriores, en las horas de la tarde la zeolita puesta en el invernadero no alcanzó a absorber la humedad del ambiente por lo que la humedad en el módulo experimental fue 13.42 % más alta que el exterior y 2.41 % más alta que el módulo de control. El valor mínimo de humedad relativa en el módulo experimental fue 55.46 % y se presentó el 16 de septiembre a las 17:00 h; en el módulo de control el valor mínimo de humedad relativa fue 54.01 %, se presentó también el 16 de septiembre a las 16:00 h, para esa misma fecha se presentó en el invernadero el valor mínimo de humedad relativa: 15.95 % a las 15:00 h.

Tomando el promedio mensual de humedad relativa exterior y haciendo la equivalencia al 100 %, se concluye que la efectividad del módulo experimental basado en su promedio mensual es de 98.38 % y el módulo de control es de 93.24 %. Dentro del análisis que se ha hecho hasta ahora estos son los valores con menos eficiencia que se han presentado, y esto se debe a los altos valores de humedad que se presentaron el día 20 de septiembre donde el sistema de deshumidificación no funcionó por ser un día nublado y lluvioso.

Se tomó el día 20 de septiembre con el fin de hacer un análisis diario de humedad relativa y observar el desempeño de la humedad relativa en el módulo experimental en un día muy lluvioso. La trayectoria de las líneas de las variables estudiadas en esta prueba, se expresaron distinto a pruebas anteriores, ya que no se observaron los picos característicos que indican los máximos y mínimos valores en la mañana y en la tarde respectivamente. La trayectoria de las cuatro líneas fue ascendente y se mantuvo así alrededor de 15 horas, solo hasta el 21 de septiembre regresó, se estabilizó y mostró las curvas usuales.

El promedio diario de humedad relativa exterior fue 90.10 %, en el módulo experimental este valor fue 90.23 %, en el módulo de control fue 90.14 %, y en el invernadero llegó a 82.41 %. De acuerdo con lo anterior, la humedad relativa más alta se presentó en el módulo experimental y esto se reflejó en el alto valor promedio del invernadero.

El máximo valor de humedad relativa para el exterior fue 91 %, este valor se presentó en varios horarios: a las 00:00 h, 01:00 h, 02:00 h, 21:00 h, 22:00 h y 23:00 h. Desde las 00:00 h hasta las 02:00 h la humedad relativa en el módulo experimental tuvo un promedio de 80.41 %; en el módulo de control, 81.72 %, y en el invernadero, 70.46 %. En ese momento el módulo de estudio presentó el menor valor de humedad relativa, comparado con la variable del exterior y del módulo de control.

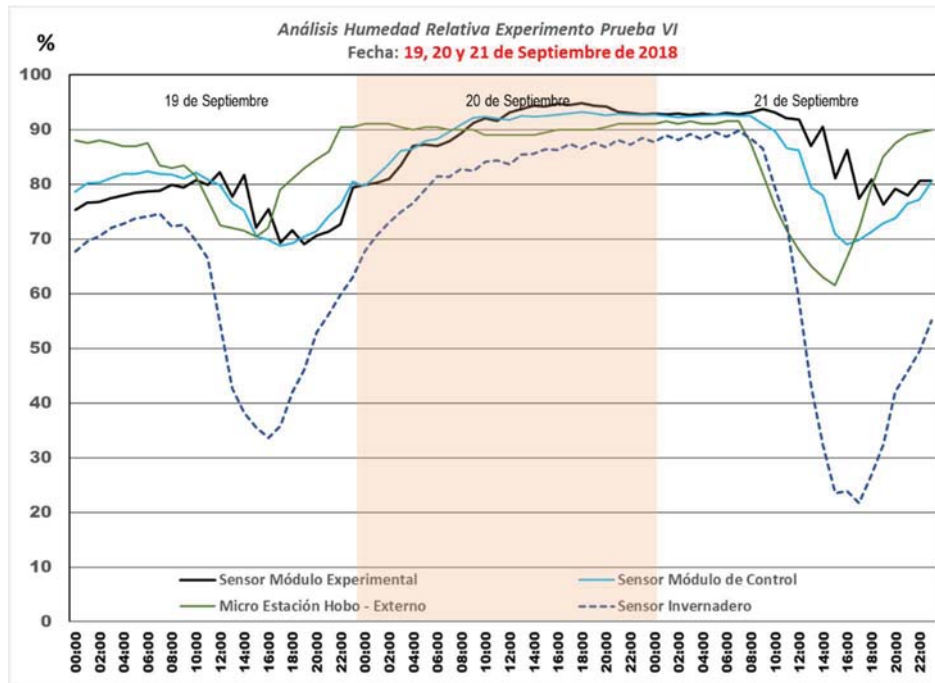


Fig. 158. Análisis humedad relativa, prueba VI día 20 de septiembre. Fuente: Propia.

El máximo valor diario de humedad relativa en el módulo de control fue 93.20 %, este valor se dio a las 18:00 h. En ese momento la humedad relativa exterior fue 90.0 %; en el módulo experimental, 94.80 %, y en el invernadero, 86.52 %; estos dos últimos valores representan el máximo valor diario de sus variables. Se observó en este rango de tiempo una alta saturación de vapor de agua en el aire exterior, lo que afectó el desempeño de la zeolita en el invernadero y en el módulo experimental. Los valores de este último se encontraron 1.6 % más altos que el módulo de control y 4.8 % más altos que el ambiente exterior. Es importante precisar que generalmente este valor máximo ocurrió en la madrugada, sin embargo, se registró muchas horas más tarde de lo normal. El promedio de humedad relativa en el módulo de control entre las 00:00 h y la 07:00 h fue 85.45 %; en el módulo experimental, 84.26 %, y en el invernadero, 75.60 %.

El valor mínimo de humedad relativa en el exterior fue 89.0 %, y se presentó por varias horas: 10:00 h, 11:00 h, 12:00 h, 13:00 h, 14:00 h y 15:00 h. En este rango de tiempo el valor promedio de humedad relativa en el módulo experimental fue 93.22 %; en el módulo de control, 92.34 %, y en el invernadero, 85.10 %. Estos valores de humedad relativa son atípicos, según lo analizado en otras pruebas, ya que se encuentran entre los rangos de 85 % y 93 %; aun así, es interesante observar que la humedad relativa promedio en el invernadero que contiene la zeolita se mantiene por debajo de los valores de las variables.

El valor mínimo diario de humedad relativa en el módulo experimental fue 79.91 %; en el módulo de control, 79.78 %, y en el invernadero, 67.77 %. Estos valores se dieron simultáneamente a las 00:00 h, y se observa lo atípico del día ya que los valores mínimos de humedad en los módulos se presentan regularmente en la tarde.

4.6 Análisis resultados humedad relativa proceso experimental Prueba VII

Fecha inicio de análisis: 9 de octubre de 2018
Fecha final: 9 de noviembre de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos – Ciudad: Culiacán, Sinaloa

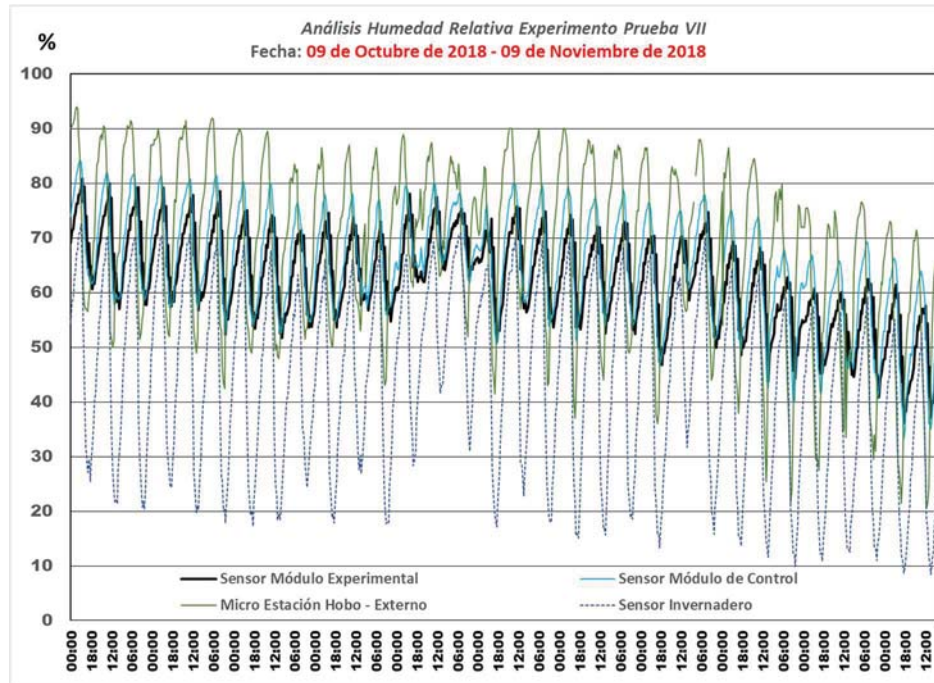


Fig. 159. Análisis humedad relativa, prueba VII. Fuente: Propia.

En esta prueba se siguieron observando altos valores de humedad relativa en el exterior; el promedio mensual tuvo un valor de 68.31 %, en el módulo experimental el promedio fue 62.57 %, en el módulo de control fue 65.08 % y en el invernadero fue de 43.04 %. Los valores del módulo experimental se situaron por debajo del ambiente exterior 5.74 %, y 2.51 % por debajo del módulo de control.

Se toma el valor del promedio de la humedad relativa exterior como el 100 %, con el fin de evaluar la eficiencia de los módulos, el módulo experimental tuvo una eficiencia de 91.59 %, el módulo de control tuvo una eficiencia de 95.27 % y en el invernadero la eficiencia fue 44.45 %; en este sentido el mejor desempeño en la parte de humedad relativa fue para el módulo experimental.

El desempeño de las trayectorias de humedad relativa para esta prueba mostró un desarrollo típico del fenómeno: altos valores que llegan a su pico en las horas de la madrugada y que decrecen hasta llegar a su mínimo en las horas de la tarde. También se observó que se repiten patrones de las pruebas anteriores: las líneas se separaron en la madrugada y en el día se juntaron para en la noche volver a separarse.

El máximo valor de humedad relativa para esta prueba fue 94.0 % y se presentó el día 9 de octubre a las 05:00 h. A esta hora la humedad en el módulo experimental tuvo un valor de 76.31 %, en el módulo de control fue 81.61 % y en el invernadero fue de 67.18 %. En ese momento el

desempeño de la humedad del módulo experimental estuvo 17.69 % por debajo del exterior y 5.3 % por debajo del módulo de control.

En el módulo experimental, el valor máximo de humedad relativa fue 80.83 %, y se presentó también el 9 de octubre a las 10:00 h. Ese mismo día se registró el valor máximo para el módulo de control con 84.21 % a las 08:00 h. En este rango de tiempo hay un descenso muy rápido en los valores de la humedad relativa exterior, a las 08:00 h se presentó un valor de 85 % y a las 10:00 h el valor fue de 70.50 %.

El valor mínimo de humedad relativa exterior fue de 20.50 % y se registró el 9 de noviembre a las 13:00 h; para ese momento las humedades tanto en el módulo experimental y en el de control fueron más altas: 51.30 % y 49.98 %, respectivamente. En el invernadero, el valor de la humedad fue 19.18 % y se situó por debajo de la exterior.

Ese mismo día a las 17:00 h, se registró el valor mínimo de humedad relativa para el invernadero: 8.53 %; a esa hora en el módulo experimental fue de 37.08 %, en el módulo de control fue 35.10 % y en el exterior fue 44.50 %. Para este momento la absorción de humedad no fue suficiente en el módulo experimental, para que fuera menor que en el módulo de control, sin embargo, es muy importante anotar que dos horas después, se reflejó la disminución de la humedad en el módulo experimental, situándose por debajo de las variables que se están evaluando.

El 8 de noviembre se presentó el valor mínimo de humedad relativa en el módulo de control: 33.43 % a las 17:00 h. En ese momento, la humedad relativa exterior fue de 40.50 %; en el módulo experimental también se registró el valor mínimo con 36.22 %, y en el invernadero la humedad relativa fue 8.70%. A pesar de que el valor registrado en el invernadero fue muy bajo, no alcanzó para que el aire que se transfiere al módulo experimental estuviera por debajo del valor del módulo de control, aun así, este valor se ubicó 4.28 % por debajo de la humedad del ambiente exterior.

A continuación, analiza el día 9 de noviembre, ya que es el día en que se presentó el valor mínimo de humedad relativa exterior para toda la prueba. El promedio de humedad relativa que se presentó en el exterior fue de 52.94 %; para el módulo experimental, 48.90 %, para el módulo de control, 51.91 %, y en el invernadero, 29.35 %.

Las trayectorias de las líneas en las horas de la madrugada muestran altos valores para las variables que se están estudiando; el promedio de humedad relativa en el rango de las 00:00 h hasta las 06:00 h en el exterior fue de 68.36 %, en el módulo de control fue de 56.04 %, en el invernadero fue 38.89 % y en el módulo experimental fue 49.88 %. La reducción de humedad en el módulo experimental, comparada con el exterior, fue 18.48%, y 6.16% en el módulo de control; este es el rango de tiempo donde mejor funcionó el sistema de deshumidificación. A las 02:00 h se presentó una diferencia numérica importante entre el módulo experimental y el exterior, ya que se registró una reducción de humedad relativa en el módulo experimental de 23.15 %, comparado con el exterior.

A partir de las 08:00 h comenzó la reducción de humedad relativa en el exterior: 55.50 %; a esa misma hora ocurrió una importante reducción de humedad relativa entre el módulo experimental: 63.95 % y el módulo de control: 63.95 %. El comparativo numérico entre ambos

módulos dio como resultado una disminución de 9.33 % que favoreció al módulo experimental, esta diferencia se sostuvo hasta las 11:00 h.

La línea que representa los valores del módulo experimental sobrepasó a los datos externos y del módulo de control a partir de las 10:00 h hasta las 18:00 h, debajo de esta línea se encontraron los valores del módulo de control.

La humedad relativa exterior en el rango comprendido entre las 12:00 h y las 16:00h fue de 25.30 %; en el módulo de control, 44.46 %; en el invernadero, 17.18 %, y en el módulo experimental, 50.13 %. El valor mínimo de humedad relativa en el exterior se presentó a las 13:00 h: 20.50 %.

El valor mínimo en el módulo experimental y en el invernadero se registró a las 17:00 h, con valores de 37.08 % y 8.53% respectivamente, una hora después de que ocurriera este fenómeno, los valores de la humedad relativa en el módulo experimental se posicionaron por debajo del módulo de control y del exterior.

En el rango comprendido entre las 19:00 h y 23:00 h, se presentó una humedad relativa en el exterior de 63.90 %; en el módulo de control, 49.22 %; en el invernadero, 30.82 %, y en el módulo experimental, 44.35 %. Para este periodo la humedad relativa en el módulo experimental fue 19.55 % más baja que la del exterior, y 4.87% por debajo de la del módulo de control.

En este día se evidenciaron 17 horas en las que la humedad relativa presentó menores valores en el módulo experimental al compararse con el módulo de control y con el exterior.

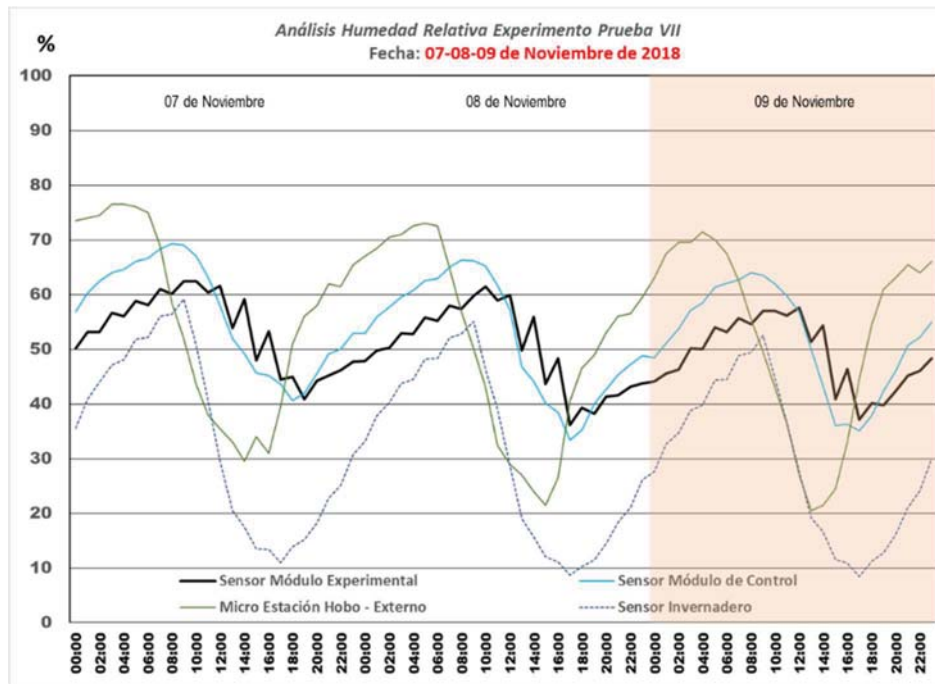


Fig. 160. Análisis humedad relativa, prueba VII día 9 de noviembre. Fuente: Propia.

4.7 Análisis resultados humedad relativa proceso experimental Prueba VIII

Fecha inicio de análisis: 10 de noviembre de 2018

Fecha final: 4 de diciembre de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos – Ciudad: Culiacán, Sinaloa

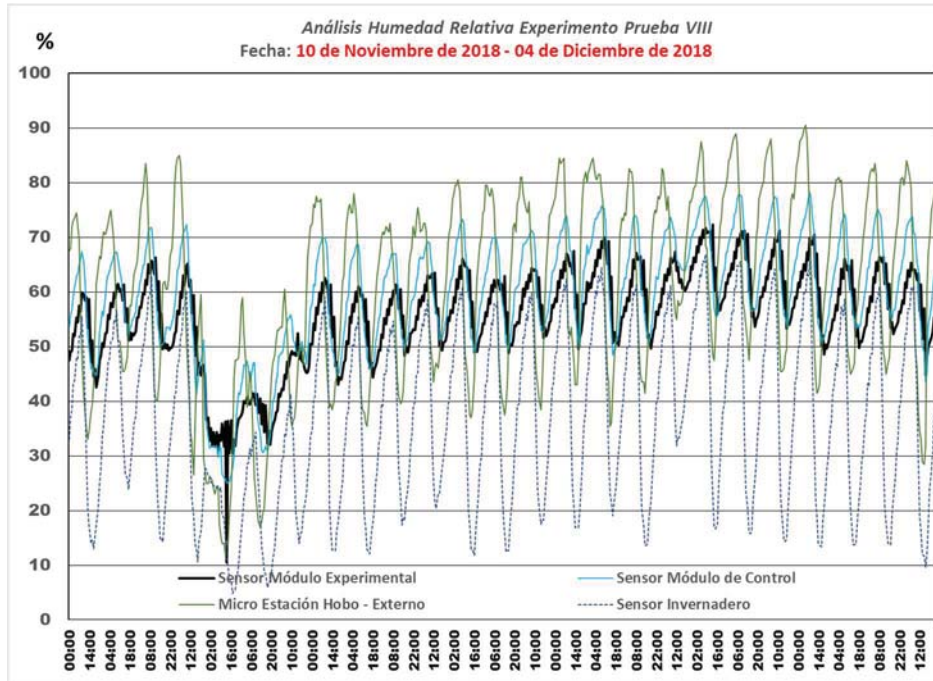


Fig. 161. Análisis humedad relativa, prueba VIII. Fuente: Propia.

Para la prueba que comprende los meses de noviembre y diciembre, el promedio de humedad relativa exterior fue 60.66 %; en el módulo experimental, 55.93 %; en el módulo de control, 59.55 %, y en el invernadero, 36.27 %. Se observa en la gráfica una proyección normal de las líneas de humedad relativa a lo largo de toda la prueba, el 80 % de las líneas de humedad relativa exterior sobrepasaron el 70 % y, durante algunos días, los valores llegaron hasta la línea del 90 %. Se observa, además, una disminución importante en los valores de humedad relativa los días 15 y 16 de noviembre, para estas fechas los valores máximos exteriores llegaron a 60 % y los valores mínimos estuvieron en el rango del 15 %.

La eficiencia para esta prueba del módulo experimental, comparada con el 100 % que representa la humedad relativa exterior, fue de 92.29 %; la eficiencia del módulo de control comparada con el exterior fue de 98.17 %. La eficiencia del módulo experimental comparado con el módulo de control muestra una disminución de humedad relativa del 5.88 % y con el exterior se evidencia una disminución de 7.71 %.

El registro del valor máximo de humedad relativa fue de 90.50 %, que se presentó el día 1 de diciembre a las 05:00 h. A esa hora, la humedad relativa en el invernadero fue de 59.74 %; en el módulo experimental, 63.89 %, y en el módulo de control, 73.97 %. En el módulo experimental la humedad relativa se redujo a las 05:00 h con un 26.61 %, comparado con el exterior y 10.08 %, comparado con el módulo de control. Tres horas más tarde, para ese mismo

día, en el módulo de control se registró el valor máximo de humedad relativa: 78.18 %, la humedad en el exterior era 74 %, en el invernadero el valor fue de 65.52 % y en el módulo experimental fue de 69.92 %. El día 28 de noviembre, a las 13:00 h se registró en el módulo experimental el valor máximo de humedad relativa: 72.37 %. Este dato se presentó en una hora inusual, ya que en todas las pruebas los valores de humedad máxima se presentaban en horas de la madrugada. A esa misma hora, la humedad en el exterior fue de 48.50 %, en el módulo de control fue de 62.77 % y en el invernadero fue de 22.65 %. En este momento la humedad relativa en el módulo exterior presentó valores más altos que en el exterior y en el módulo de control.

El valor mínimo de humedad relativa se presentó el día 14 de noviembre a las 12:00 h en el exterior y en el módulo de control, con valores de 12 % y 25.84 %. En el invernadero la humedad fue de 14.86 % y en el módulo experimental fue 36.35 %. Aunque el invernadero tuvo valores muy bajos de humedad relativa para el mediodía, la zeolita no se activó, por lo que los valores en el módulo experimental estuvieron 24.35 % más altos que en el exterior y 10.51 % más altos que en el módulo de control.

En el módulo experimental y en el invernadero se presentó el valor mínimo de humedad relativa a las 17:00 h del día 14 de noviembre: 30.45 % y 4.90 %. Para ese momento en el exterior la humedad registró un valor de 32 % y en el módulo de control fue de 27.86 %. Para este rango de tiempo la zeolita se situó por debajo de los valores del exterior: 1.55 %, y si se compara con el módulo de control se ubicó por encima un 2.59 %. A partir de las 19:00 h se observó que la zeolita activó su propiedad de absorción ya que la trayectoria de la línea que corresponde al módulo experimental se movió con valores menores, si se compara con el módulo de control y con el exterior. A continuación, se hace el análisis por 24 horas del día en que se obtuvo el mayor valor de humedad relativa exterior, este día corresponde al 1 de diciembre de 2018.

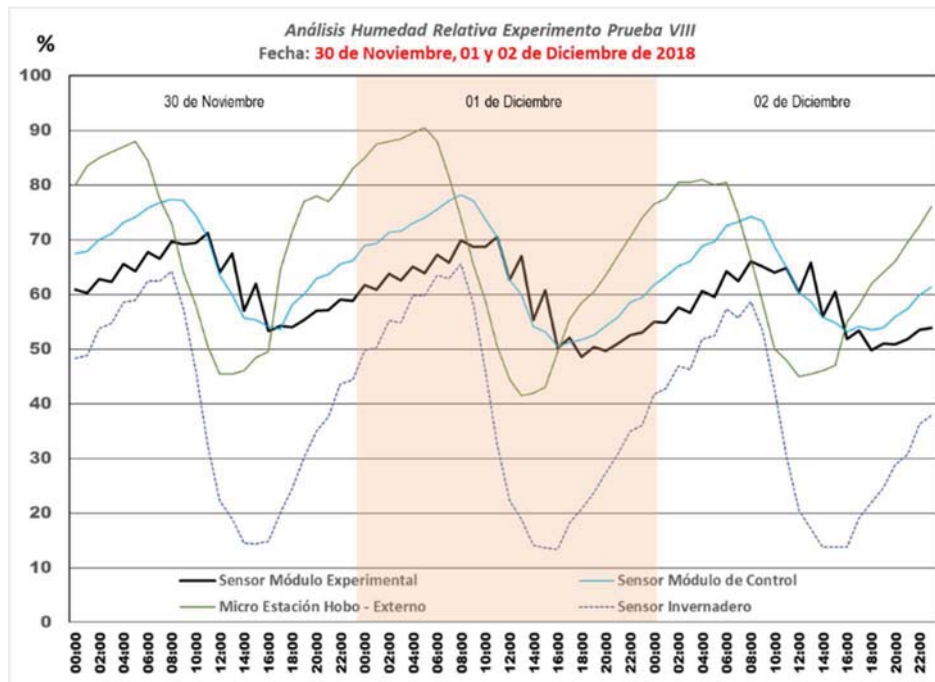


Fig. 162. Análisis humedad relativa, prueba VIII día 01 de diciembre. Fuente: Propia.

Para la madrugada del 1 de diciembre, desde las 00:00 h hasta las 06:00 h, el rango de humedad relativa que se presentó en el exterior fue de 88.14 %; en el módulo de control, 71.97 %; en el invernadero, 56.19 %, y en el módulo experimental, 63.60 %. A esta hora se apreció una amplia diferencia entre el exterior y el módulo experimental, esta fue 24.54 % por debajo del exterior. La separación entre las líneas del módulo de control y el módulo experimental fue de 8.37 %, posicionando los valores del módulo experimental por debajo del módulo de control. En este tiempo los valores en el invernadero se mantuvieron por debajo de las variables que se midieron. La línea de humedad relativa exterior llegó a su máximo con 90.50 %.

En el período de las 07:00 h a las 12:00 h, los valores de humedad relativa en el exterior tuvieron la tendencia disminuir, las líneas del módulo de control y del módulo experimental se mantuvieron con valores altos y sobrepasaron los valores del exterior. A las 08:00 h se encontró el máximo valor de humedad relativa en el módulo de control: 78.18 % y a las 11:00 h se presentó el máximo valor de humedad relativa en el módulo experimental: 70.51 %. Para el rango de tiempo anteriormente mencionado, el valor de la humedad relativa en el exterior fue de 62.50 %; en el módulo de control, 73.25 %, en el invernadero, 47.97 %, y en el módulo experimental, 67.73 %. La línea del módulo experimental se posicionó por encima del exterior un 5.23 %; entre el módulo experimental y el módulo de control la diferencia fue de 5.52 %, siendo el más bajo en el módulo experimental; la diferencia que se presentó entre el módulo de control y el exterior fue de 10.75 % por debajo del exterior.

En las horas de la tarde, los valores disminuyeron, desde las 13:00 h hasta las 17:00 h el promedio de humedad relativa exterior fue de 46.30 %; en el módulo de control, 53.80 %; en el invernadero, 15.65 % y en el módulo experimental fue de 57.05 %. A las 13:00 h se presentó el valor mínimo de humedad relativa en el ambiente: 41.50 %, los valores en el módulo experimental y del módulo de control se localizaron por encima de estos, los valores en el invernadero se hallaron un 38.15 % por debajo de los registrados en el exterior. A las 16:00 h se presentó el valor mínimo en el módulo de control: 50.53 %, en ese punto los valores del exterior y del módulo experimental convergieron, y se observó que a partir de allí los valores en el exterior aumentaron y de igual forma se observó este desempeño en el módulo de control. A las 18:00 h se presentó el menor valor de humedad relativa en el módulo experimental: 48.58 %, al igual que en el invernadero: 20.72 %. En el periodo comprendido de las 18:00 h y las 23:00 h, se observó que las trayectorias del módulo experimental se ubicaron por debajo de los valores del módulo de control y del módulo experimental. La trayectoria del invernadero se mantuvo por debajo de todas las variables.

Se presentaron 16 horas donde la humedad relativa fue menor en el módulo experimental que en el exterior, el máximo valor de humedad relativa disminuido fue de 26.63 % y el mínimo fue de 3.42 % a las 17:00 h. Al comparar el módulo experimental con el módulo de control se observó que se hubo 18 horas, en que la humedad fue menor en el módulo experimental. La reducción máxima de absorción en el módulo experimental con respecto al de control fue de 11.27 % a las 07:00 h y la mínima fue de 0.36% a las 16:00h. En el módulo de control se presentaron 15 horas, en que la humedad relativa fue menor que en el exterior, la diferencia máxima fue de 18.21 % y la mínima fue de 4.30 %.

4.8 Análisis resultados humedad relativa proceso experimental Prueba IX

Fecha inicio de análisis: 5 de diciembre de 2018

Fecha final: 5 de enero de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos – Ciudad: Culiacán, Sinaloa

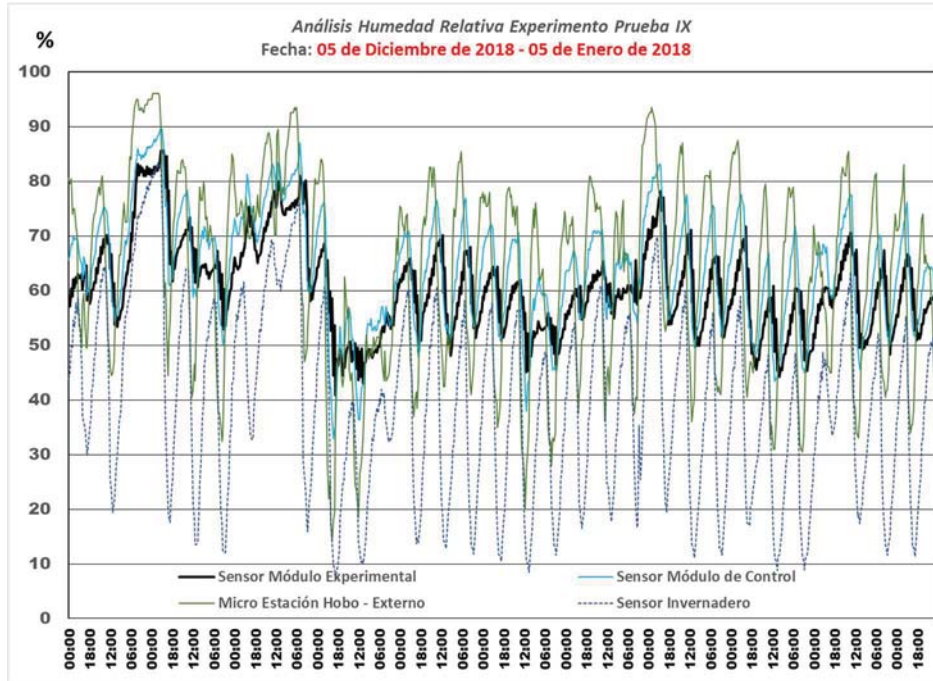


Fig. 163. Análisis humedad relativa, prueba IX. Fuente: Propia.

Para el período comprendido entre diciembre y enero los valores de humedad relativa exterior disminuyeron, en la imagen se observa solo tres días en que la humedad relativa sobrepasó la línea de 90 %. Además, se encontró una dramática reducción de los valores de humedad en el exterior y, por consiguiente, en el resto de las variables el día 15 de diciembre, el valor máximo exterior registrado fue de 62.50 % mientras que el resto de los días los rangos que se manejaron fueron entre 70 % y 80 %.

El promedio de humedad que se registró en el exterior fue de 63.44 %; en el módulo de control, 64.06 %; en el invernadero, 39.44 %, y en el módulo experimental, 60.78 %. El porcentaje de disminución de humedad relativa en el módulo experimental comparado con el exterior fue 2.66 %; en el módulo de control, 0.62 %. La diferencia entre ambos módulos fue de 3.28 %, presentándose la humedad relativa más baja en el módulo experimental.

El valor máximo registrado en el exterior para estas fechas fue de 96 %, este se presentó el día 8 de diciembre desde las 01:00 h hasta las 06:00 h. En este periodo se dio un valor de precipitación por 24 h de 40.80 mm. En ese rango de tiempo el promedio de humedad relativa en el módulo de control fue 87.70 %; para el invernadero, 82.14 %, y en el módulo experimental, 82.25 %. A las 06:00 h de este mismo día se presentó el máximo valor de humedad relativa en el invernadero: 83.72 %. De acuerdo con los valores anteriores, se puede afirmar que para este lapso el módulo experimental presentó valores 13.75 % por debajo del exterior, y 5.45 % por

debajo del módulo de control. En el caso de este último, disminuyó un 8.3% con relación al exterior.

El máximo valor de humedad relativa registrado en el módulo de control fue de 89.81 %, el día 8 de diciembre a las 08:00 h, en ese mismo momento se presentó el valor máximo de 85.59 % en el módulo experimental. Cabe anotar que a esa hora la humedad relativa exterior presentó un valor de 90.50 %, en el invernadero la humedad tuvo un valor de 82.57 %. Aunque en este momento los valores de humedad relativa eran altos, los valores en el módulo experimental se situaban por debajo de los valores de las variables de control y exterior. Los valores de la línea del invernadero se encontraron muy cercanos a la línea de los valores del módulo experimental.

El valor mínimo registrado de humedad relativa exterior fue de 14.0 %, el 14 de diciembre a las 13:00 h; a esa hora en el módulo de control se registró una humedad relativa de 36.38 %; en el módulo experimental, 58.64 %, y en el invernadero fue de 14.08 %. Una hora después, a las 14:00h, se presentó el valor mínimo de humedad relativa en el módulo de control: 32.91 %, en ese momento la humedad relativa en el módulo experimental siguió descendiendo 44.45 %, y llegó a su valor mínimo a las 16:00 h, con 40.93 %. A esa misma hora se registró el valor mínimo de humedad relativa en el invernadero: 7.04 %. Al finalizar la tarde se observó cómo las líneas del módulo experimental se situaron por debajo de las líneas del módulo de control y del exterior; por debajo de todas las variables se sitúa la línea del invernadero en todos los días de la prueba.

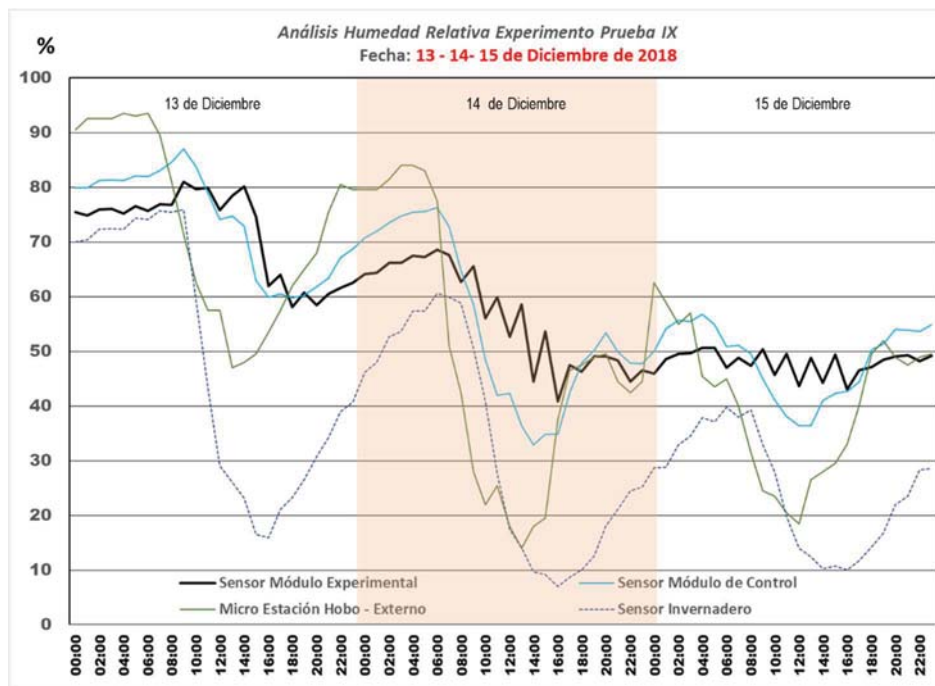


Fig. 164. Análisis humedad relativa, prueba IXI día 14 de diciembre. Fuente: Propia.

A continuación, se hace el análisis del día en que se presentó el valor mínimo de humedad relativa en el ambiente exterior. Este valor fue de 14 %, y se registró el día 14 de diciembre de 2018. El rango de humedad relativa exterior promedio entre las 00:00 h y 06:00 h fue de 81.29 %; en el módulo de control fue de 74.03 %; en el invernadero, 53.70 %. Entre las 03:00 h y 05:00

h se presentó el máximo valor de humedad relativa en el exterior: 84 %; a las 06:00 h se registró el máximo valor de humedad relativa en el módulo de control: 76.30 %. A esa misma hora se encontró el máximo valor en el invernadero: 60.68 %, también sucedió lo mismo en el módulo experimental: 68.62 %.

Al avanzar la mañana se observó una disminución de valores de humedad relativa importante, en el rango de las 07:00 h a las 12:00 h, el registro de humedad relativa para el exterior fue de 31.17 %; en el módulo de control, 54.81 %; en el invernadero, 42.51 %, y en el módulo experimental, 60.74 %. A las 08:00 h se observó que la línea del módulo experimental se posicionó con los valores más altos de todas las variables evaluadas, seguida por la línea del módulo de control, luego se situaron los valores del invernadero y los de la línea del exterior, que es la que registró los datos menores en todas las horas de la mañana. Se detectó en los registros de los datos del módulo experimental, que cada dos horas, la línea sigue su curso, pero en las horas impares la humedad se incrementó durante una hora, creando pequeños picos dentro de la misma línea; este incremento de humedad fue de alrededor del 5 %, no obstante, a la siguiente hora volvió a disminuir. Este fenómeno es recurrente en todo el estudio en el módulo experimental, ocurre cuando los ventiladores se activan en las horas impares. En el módulo de control también se instaló el mismo tipo de ventiladores, sin embargo, la línea de humedad relativa es una línea continua.

En el rango de las 13:00 h a las 18:00 h, los valores siguieron disminuyendo. El registro promedio de humedad relativa exterior fue de 30.50 %; para el módulo de control, 38.22 %; en el invernadero, 9.81 %, y en el módulo experimental fue de 48.57 %. A las 13:00 h, se presentó el valor mínimo en el ambiente con un registro de 14 %. A las 14:00 h, se presentó el valor mínimo en el módulo de control con 32.91 %, a las 16:00 h este valor se presentó en el invernadero con 7.04 % y esta última hora coincidió con el valor mínimo para el módulo experimental con 40.93 %.

En la tarde las diferencias entre las líneas se mantuvieron, a las 13:00 h se observó que la línea del invernadero y del exterior tuvieron valores muy parecidos. La diferencia entre los valores del módulo experimental y el ambiente fue de 18.07 %, siendo los valores más altos para el módulo experimental; entre el módulo de control y el ambiente exterior la diferencia fue de 7.72 %, siendo los valores más altos para el módulo de control. La diferencia entre el módulo experimental y el módulo de control fue de 10.35 %, siendo el de menor valor el módulo de control.

En la noche los valores de humedad relativa aumentaron, en el rango de las 19:00 h a las 23:00 h el registro promedio de humedad en el exterior fue de 46 %; en el módulo de control, 49.78 %; en el invernadero, 20.31 %, y en el módulo experimental fue de 47.49 %. Para este periodo los valores del invernadero fueron menores, el módulo experimental no alcanzó a absorber un gran porcentaje del ambiente, se presume que esto se debe a los bajos valores de humedad relativa que se presentaron en el exterior.

Se observaron 9 horas en que la humedad relativa fue menor en el módulo experimental que en el exterior, esta diferencia se presentó en las horas de la madrugada cuando los valores sobrepasaron el 70 %; la mayor diferencia se presentó a las 06:00 h, se presentó una reducción de 17.82 %, en el módulo experimental con respecto al exterior. A las 09:00 h la máxima

diferencia de porcentaje de humedad registrado entre el exterior y el módulo experimental fue de 37.53 %, siendo más alto en el módulo experimental.

Al comparar el módulo experimental con el módulo de control, se observaron 15 horas en donde los valores de humedad fueron menores en el módulo experimental, a las 03:00 h hubo una reducción de 8.52 % en el módulo experimental. A las 13:00 h la diferencia entre el módulo de control y el módulo experimental fue de 22.26 %, donde la humedad fue más baja para el módulo de control.

Entre el módulo de control y el exterior se observan 9 horas en que los valores de humedad relativa estuvieron por debajo del exterior. Desde las 07:00 hasta las 15:00 h, la humedad en el módulo de control estuvo más alta que en el exterior, la máxima diferencia fue de 24.29 % a las 12:00 h. Desde las 18:00 h hasta las 23:00 h, la humedad relativa en el módulo de control fue más alta que en el exterior.

4.9 Análisis resultados temperatura proceso experimental Prueba II

Fecha inicio de análisis: 5 de mayo de 2018

Fecha final: 3 de junio de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos

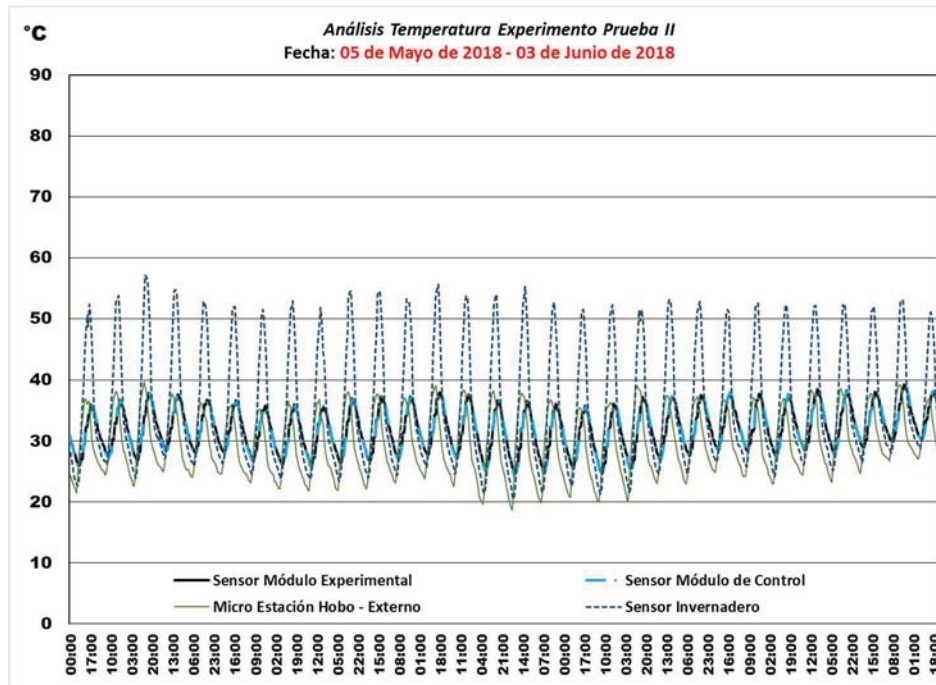


Fig. 165. Análisis temperatura prueba II. Fuente: Propia.

Con respecto a la evolución de las temperaturas a lo largo de los 29 días del proceso experimental, se observó un desempeño normal durante el día y la noche. Las líneas correspondientes al módulo experimental y al módulo de control se notaron muy juntas, lo que significa que los valores tuvieron pocas variaciones entre ellos. Los valores del invernadero se alejaron de las dos líneas anteriormente mencionadas, y de los valores externos. La variación de los datos de temperatura exterior se presentó de acuerdo con la evolución climática que tuvo cada día.

Se encontraron patrones repetitivos a lo largo de la prueba: el valor numérico de temperaturas desde las 00:00 h hasta las 08:00 h, tanto en el módulo experimental como en el de control, fue más alto que las temperaturas en el exterior. Ambos valores presentaron pocas diferencias. A las 08:00 h la temperatura en el ambiente exterior se incrementó, y fue entonces cuando las temperaturas en el módulo experimental y en el módulo de control quedaron por debajo de la temperatura ambiente. Después de las 16:00 h, la temperatura en el módulo experimental y en el módulo de control sobrepasó las temperaturas del ambiente, situación que se mantuvo hasta finalizar la noche. Las líneas de temperatura para ambos módulos se apreciaron con pocas diferencias, las más significativas acontecieron en la tarde y favorecieron con menos temperatura al módulo experimental, alrededor de 1 °C. La línea de temperatura en el

invernadero muestra que sus máximas diarias se presentaron entre las 15:00 h y las 16:00 h y sobrepasaron el rango de los 50 °C, esto hace pensar que la zeolita se activó en esos momentos.

En esta prueba, el promedio de temperaturas exterior fue de 29.84 °C; en el módulo experimental, 32.01 °C; en el módulo de control el valor promedio también, 32.01 °C, y en el invernadero, 35.77 °C.

Las temperaturas promedio máximas para el módulo experimental y de control fueron 39.27 °C, y en el ambiente exterior de 39.72 °C; mientras que en el invernadero las temperaturas estuvieron más altas con un máximo de 57.13 °C. La temperatura promedio mínima en el exterior fue de 18.73 °C; en el módulo experimental, 24.57 °C; en el módulo de control, 24.44 °C, y en el invernadero, 20.50 °C.

A continuación, se hace un acercamiento de la gráfica tomando el día en el que la humedad relativa presentó el mayor valor a lo largo de la prueba:

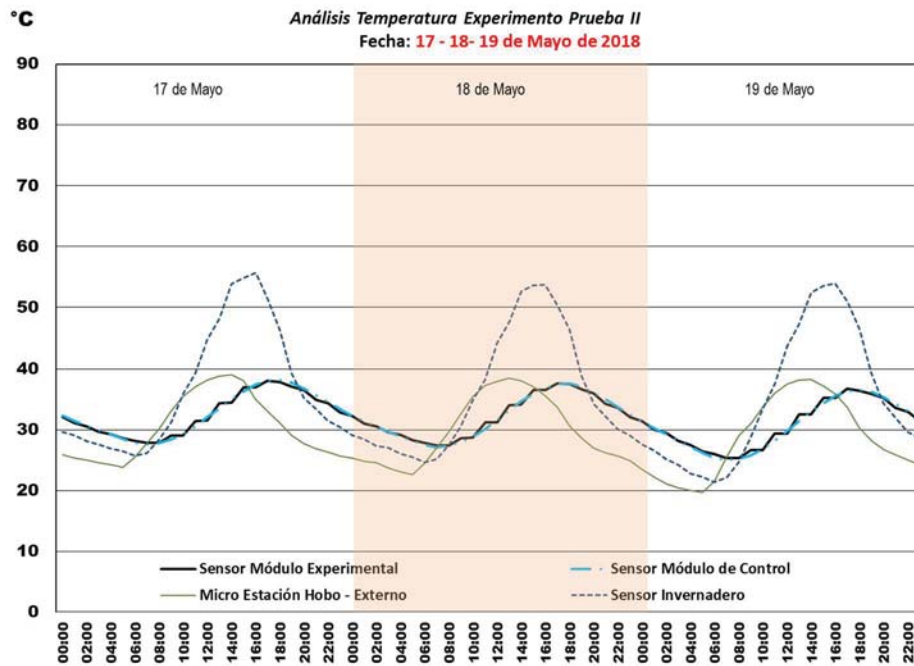


Fig. 166. Análisis temperatura prueba II, día 18 de mayo de 2018. Fuente: Propia.

Para este estudio, el valor máximo de humedad relativa en el ambiente fue de 91.03 % y ocurrió el 18 de mayo a las 05:00 h; a esa misma hora las temperaturas en el módulo experimental tuvieron un valor de 28.27 °C; en el módulo de control, 28.15 °C, y en el exterior, 22.59 °C. Se observa entonces que a esta hora sí hubo reducción de la humedad relativa en el módulo experimental, sin embargo, la temperatura en el módulo experimental fue 5.68 °C más alta que en el exterior y 0.12 °C más alta que en el módulo de control.

A las 08:00 h la temperatura en el ambiente exterior fue 29.67 °C; en el módulo experimental, 27.46 °C; en el invernadero, 27.45 °C, y en el módulo de control, 27.36 °C. Se puede afirmar que en este momento todos los elementos, excepto el exterior, se encontraron en un solo punto. A

las 09:00 h las temperaturas se incrementaron en ambos módulos con valores cercanos a los 28 °C, en el invernadero la temperatura se encontró en 30.51 °C y en el exterior en 32.60 °C.

A las 13:00 h la temperatura exterior llegó a su máximo valor con 38.48 °C, la temperatura en el invernadero fue de 47.62 °C, en ese momento la humedad relativa exterior se encontraba en 36.08 % y en el invernadero en 32.23 %. Al revisar la temperatura del módulo experimental esta fue de 34.05 °C con una humedad relativa de 49.57 %; el módulo de control tuvo una temperatura de 33.21 °C con 48.38 % de humedad relativa. En las horas de la tarde en el invernadero las temperaturas se incrementaron y llegaron a su máximo a las 16:00 h con un valor de 53.69 °C, allí la humedad relativa estuvo en 18.50 %, mientras que el exterior tenía una temperatura de 35.59 °C con 39.95 % de humedad relativa. En el módulo experimental la temperatura estuvo en 36.54 °C con 47.54 % de humedad relativa y en el módulo de control la temperatura fue de 36.88 °C con 42.03 % de humedad relativa.

Las temperaturas en el invernadero se mantuvieron al finalizar la tarde entre 32 °C y 38 °C, a las 18:00 h en el módulo experimental se apreció una disminución de los valores de temperatura y de la humedad relativa con respecto al módulo de control y al exterior. A las 22:00 h la temperatura en el módulo experimental fue de 33.62 °C con una humedad relativa de 43.77 %; en el módulo de control la temperatura fue de 33.73 °C y la humedad relativa fue de 46.67 %; en el exterior la temperatura fue de 25.63 °C con 66.26 % de humedad. En el módulo experimental la temperatura fue 7.99 °C más alta que en el exterior y 0.11 °C menor que en el módulo de control.

Así mismo, se hizo un conteo de las horas en que se registró menor temperatura en el módulo experimental, comparada con los valores del módulo de control. De las 24 horas del día, 14 presentaron menor temperatura, el valor promedio de esta disminución fue de 0.30 °C; la hora en la que se presentó mayor diferencia de temperaturas fue las 21:00 h con 0.66 °C menos que en el módulo de control. La menor diferencia de temperaturas con respecto al módulo de control se presentó a las 00:00 h con un valor de 0.09 °C.

Desde las 08:00 h hasta las 15:00 h se presentaron valores menores de temperatura en el módulo experimental, comparados con el exterior; el promedio de esta diferencia fue de 4.33 °C. A las 10:00 h la temperatura en el módulo experimental estuvo 6.79 °C más baja que en el exterior, la cual se encontró en 35.46 °C.

4.10 Análisis resultados temperatura proceso experimental Prueba III

Fecha inicio de análisis: 5 de junio de 2018

Fecha final: 5 de julio de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos

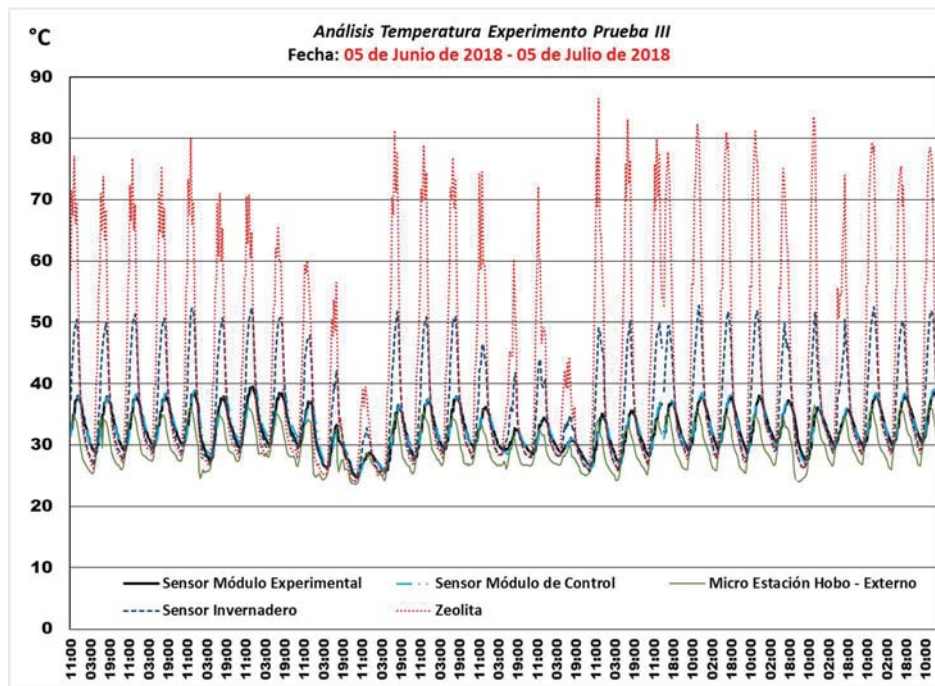


Fig. 167. Análisis temperatura prueba III. Fuente: Propia.

Para esta prueba se sumó, a las variables que se están evaluando, otra que se denominó “zeolita”, esta variable corresponde a la temperatura de contacto registrada en la superficie del mineral absorbente y se representó con una línea color rojo punteada. En esta evaluación se apreciaron líneas continuas y de desempeño normal de las temperaturas diarias en el ambiente exterior, estas líneas llegaron a los valores máximos y, a partir de allí, descendieron hasta llegar a los mínimos, luego se repetía el ciclo.

La variable que registró mayor temperatura fue la del sensor de contacto denominado zeolita, ya que durante algunos días sobrepasó los 80 °C. Por debajo de esta línea se situaron los valores correspondientes a las temperaturas del invernadero; a su vez, debajo de esta variable se ubicaron las temperaturas del módulo experimental, las del módulo de control y las del exterior. Estas variables tuvieron un desempeño diferente a lo largo del día, se observó que las líneas del módulo experimental y del módulo control estuvieron muy cercanas, además hubo un momento en el día en que estos valores se encontraron con la temperatura exterior, y desde la tarde hasta la noche los valores se situaron por debajo de las variables antes mencionadas. Este fenómeno fue repetitivo a lo largo de toda la prueba.

El promedio de temperatura para el exterior fue de 29.68 °C; en el módulo de control, 32.51 °C; en el sensor zeolita, 42.81 °C, en el invernadero, 32.51 °C, y en el módulo experimental fue de 32.44 °C. La diferencia de temperaturas entre el módulo experimental y el exterior fue de 2.76 °C, siendo más alta en el módulo experimental. El comparativo entre el módulo de control y el

módulo experimental arrojó una diferencia de 0.07 °C, siendo más alta la temperatura en el módulo de control. Entre el exterior y el módulo de control, la temperatura fue más alta en este último con 2.84 °C.

El máximo valor de temperatura en el exterior fue de 36.58 °C y se registró el día 5 de julio a las 13:00 h; a esa hora la humedad relativa exterior fue de 49.50 %. En el módulo de control la temperatura fue de 35.74 °C con una humedad de 50.64 %. En el módulo experimental, el sensor zeolita registró una temperatura de 77.54 °C, en el invernadero la temperatura fue de 49.10 °C con 32.83 % cuando este aire llegó al módulo experimental se registró una temperatura de 35.64 °C con 56.30 %. Para ese momento, los valores en el módulo experimental no mostraron una disminución ni en la temperatura, ni en la humedad relativa, pero si fue un hecho que la zeolita se estaba activando, debido a los valores altos que se registraron dentro del invernadero y en el sensor zeolita. La temperatura en el módulo experimental para ese momento estuvo 0.94 °C por debajo del exterior, y el módulo de control tuvo una temperatura de 0.84 °C más baja que el exterior.

El mínimo valor de temperatura para el ambiente exterior fue de 23.60 °C, se presentó el día 15 de junio a las 06:00 h con una humedad relativa de 87 %. A esa hora la temperatura del módulo de control registró 25.46 °C con 83.96 %, es decir, 1.86 °C más caliente que el exterior. La temperatura de contacto en la zeolita fue de 24 °C, en el invernadero la temperatura fue de 24.89 °C con 78.31 %. En el módulo experimental la temperatura fue de 24.79 °C con 88.97 %, 1.19 °C más alta que el exterior.

El valor máximo en el módulo de control fue de 39.87 °C, se presentó el día 11 de junio a las 18:00 h; para ese momento la humedad relativa aumentó y la temperatura disminuyó en el exterior, este módulo permaneció con valores por debajo de la humedad ambiente y se ubicó 1.13 °C más alto que el módulo experimental. El valor mínimo registrado en el módulo de control fue de 25.17 °C el día 15 de junio a las 08:00 h, para ese momento las temperaturas en el exterior fueron de 24.25 °C y 24.79 °C para el módulo experimental.

En el caso del módulo experimental el máximo valor registrado fue de 39.52 °C, se presentó el día 11 de junio a las 17:00 h, con una humedad relativa de 39.60 %. En ese momento la temperatura en el sensor de la zeolita fue de 51.96 °C, en el invernadero fue de 50.74 °C con 20.93 %. El desempeño de la humedad relativa para ese momento presentó un valor más bajo en el módulo experimental comparado con el exterior, esta reducción es de 12.4 %. La reducción de humedad relativa con respecto al módulo de control fue de 2.72 %. Con respecto a la temperatura, el módulo experimental estuvo 4.64 °C más cálido que en el exterior y 0.19 °C más frío que en el módulo de control.

El valor máximo de temperatura en el sensor de contacto zeolita fue de 86.54 °C, se registró el 23 de junio a las 14:00 h, para ese momento la temperatura en el invernadero fue de 49.06 °C con 26.86 %; la temperatura del módulo experimental se encontraba 1.64 °C más baja que el exterior, en el módulo de control la temperatura estuvo 1.37 °C más baja que el exterior. Los valores de humedad relativa fueron más altos en ese momento para el módulo experimental. El 15 de junio, a las 06:00 h, se registró el valor mínimo de temperatura para el sensor de contacto zeolita: 24 °C.

En el invernadero el día 27 de junio a las 16:00 h se registró el valor máximo: 52.73 °C con una humedad relativa promedio de 20.44 %. En ese mismo momento la temperatura exterior estuvo

en 34.73 % con 46 %, el sensor de contacto zeolita registró una temperatura de 80.21 °C. La temperatura en el módulo de control fue de 37.69 °C con 42.79 % y en el módulo experimental fue de 37.12 °C con 51.24 % de humedad relativa.

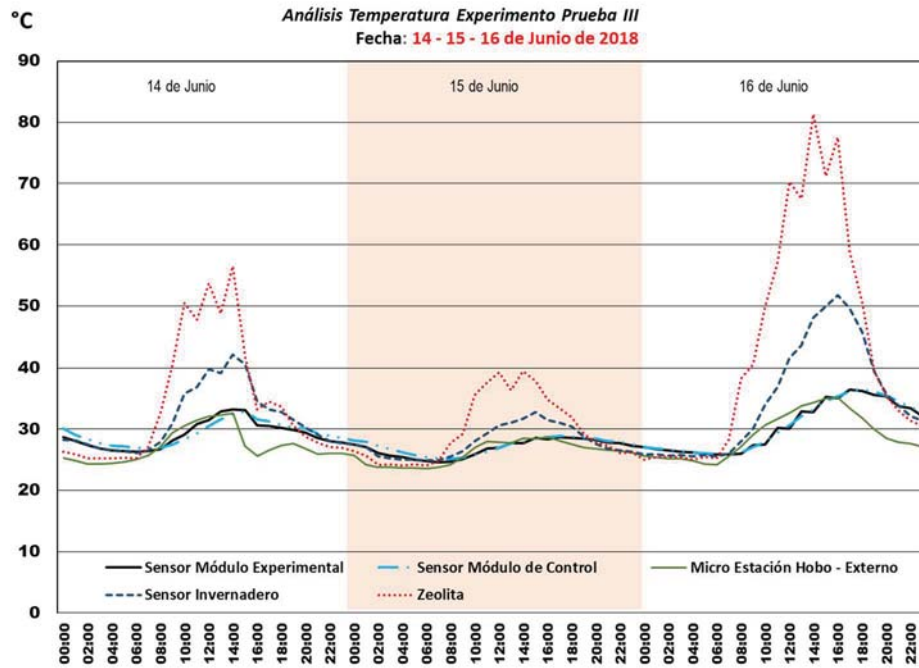


Fig. 168. Análisis temperatura prueba III, día 15 de junio de 2018. Fuente: Propia.

Con el fin de evaluar el desempeño del módulo experimental, se hizo un análisis en el día en el que la humedad relativa tuvo el valor máximo (15 de junio) con el objetivo de cruzar los datos de humedad relativa y los de temperatura de las variables estudiadas.

La temperatura promedio registrada para el 15 de junio en el exterior fue 26.12 °C; para el módulo de control, 27.23 °C; en el sensor de contacto zeolita, 29.91 °C; en el invernadero 27.91 °C, y en el módulo experimental, 26.87 °C.

Las temperaturas para este día no presentaron valores tan altos, como en otros días del mes. Las líneas de temperatura desde las 00:00 h hasta las 06:00 h permanecieron muy cercanas, para este rango de tiempo la temperatura promedio exterior fue 24.07 °C; en el módulo de control, 26.79 °C; en el sensor de contacto zeolita, 24.68 °C; en el invernadero, 24.07 °C, y en el módulo experimental 25.95 °C. A pesar de que en la madrugada se presentaron altos valores de humedad relativa en las variables estudiadas, la temperatura fue menor en el ambiente exterior, ya que el módulo de control estuvo 2.72 °C más cálido, y el módulo experimental fueron de 1.88 °C más cálido. A las 06:00 h se presentó la temperatura mínima en el exterior y simultáneamente se presentó la máxima humedad relativa en el ambiente.

Al avanzar la mañana, se incrementaron las temperaturas y disminuyeron los valores de humedad relativa. En el rango de las 07:00 h a las 12:00 h, el promedio de temperatura exterior

fue de 24.07 °C; en el módulo de control, 26.79 °C; en el sensor zeolita, 24.68 °C; en el invernadero, 25.75 °C, y en el módulo experimental, 25.71 °C. En este rango de tiempo los valores de humedad relativa fueron descendiendo, siendo las variables con más humedad relativa las de los módulos de control y experimental, seguidas por los valores del ambiente y al final los del invernadero. Las bajas temperaturas que se presentaron en el sensor de contacto zeolita y en el invernadero no fueron suficientes para activar las propiedades absorbentes del material desecante.

Entre las 13:00 h y las 19:00 h, se presentaron los máximos valores de temperaturas para las variables evaluadas: en el sensor zeolita a las 14:00 h con un valor de 39.50 °C, en el invernadero a las 15:00 h con un valor de 32.84 °C, en el exterior a las 16:00 h con un valor de 28.70 °C, a las 17:00 h en el módulo experimental con un valor de 28.73 °C y en el módulo de control con un valor de 28.89 °C. En ese rango de tiempo, el registro mínimo de humedad relativa se presentó en el exterior y en el invernadero.

De las 19:00 h a las 23:00 h, las temperaturas disminuyeron en el exterior, el promedio fue 26.60 °C; en el sensor zeolita, 27.35 °C; en el invernadero, 27.24 °C; en el módulo experimental, 27.91 °C, y en el módulo de control 28.11 °C. A las 19:00 h los valores de humedad relativa aumentaron en el exterior, y en ambos módulos los valores fueron menores que en el anterior. Sin embargo, el módulo experimental no alcanzó a mostrar valores que posicionaron a esta variable por debajo del módulo de control. Se observaron temperaturas en el sensor zeolita y en el invernadero no sobrepasaron los 35 °C, por lo que se explica la poca absorción que se presentó en el módulo experimental.

Se observan 6 horas en que la temperatura del módulo experimental estuvo por debajo de los valores del exterior; este desempeño se presentó desde las 11:00 h hasta las 17:00 h. La máxima disminución de temperatura fue de 1.18 °C a las 10:00 h y la mínima disminución fue de 0.11 °C a las 13:00 h.

Durante siete horas, la temperatura del módulo de control presentó menores valores comparada con el exterior, el periodo en el que ocurrió fue entre las 09:00 h y las 17:00 h. La máxima disminución de temperatura fue de 1.68 °C, a las 11:00 h con respecto al exterior, y la mínima disminución fue de 0.05 °C a las 16:00 h (hora en que se presenta el valor máximo exterior).

Comparando ambos módulos se observan 11 horas, en donde el valor de la temperatura fue menor en el módulo experimental, esto ocurrió en dos partes del día: desde las 00:00 h hasta las 09:00 h y una segunda parte de las 14:00 h a las 23:00 h. El promedio de esta diferencia fue de 0.44 °C.

4.11 Análisis resultados temperatura proceso experimental Prueba IV

Fecha inicio de análisis: 7 de Julio de 2018
Fecha final: 6 de agosto de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos

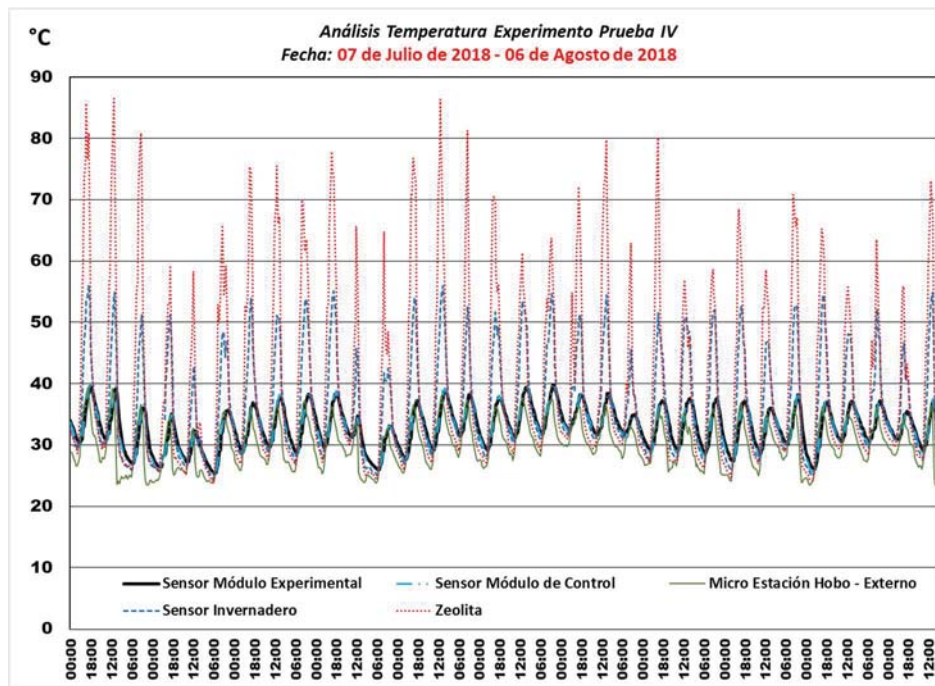


Fig. 169. Análisis temperatura prueba IV. Fuente: Propia.

Para la prueba IV el promedio de temperaturas en el exterior fue de 30.12 °C; en el módulo de control, 32.58 °C; en el sensor de contacto zeolita, 40 °C; para el invernadero, 36.34 °C, y en el módulo experimental, 32.76 °C. Con base en estos promedios, la temperatura en el módulo de control estuvo 2.46 °C más cálida que en el exterior; en el módulo experimental la temperatura fue 2.64 °C más cálida que en el ambiente exterior; comparando ambos módulos, el módulo experimental presentó 0.18 °C más que el módulo de control.

Se observan algunos puntos en la gráfica donde el sensor de contacto zeolita llegó a temperaturas entre los 80 °C y los 90 °C, los puntos con menos valores se ubicaron entre los 25 °C y los 30 °C. En el invernadero la mayoría de los días los valores máximos oscilaron entre los 50 °C y los 55 °C, a su vez, los valores mínimos estuvieron entre los 25 °C y los 30 °C. Para el ambiente exterior, el módulo de control y el módulo experimental las líneas fueron continuas muy cercanas una de la otra, donde los máximos estuvieron entre los 30 °C y 40 °C; y mínimos se situaron en los 25 °C, pero algunos días más calurosos estuvieron en los 30 °C.

En el módulo experimental el valor máximo de temperatura fue de 39.43 °C, este se presentó el día 6 de julio a las 15:00 h; a esta misma hora se registró el máximo valor de temperatura para el invernadero: 54.11 °C. Para ese momento la temperatura en el módulo de control fue de 38.09 °C; en el sensor contacto zeolita la temperatura, 76.63 °C, y en el módulo experimental, 38 °C.

Con base en el análisis anterior, a esa hora las humedades relativas presentaron poco valor numérico, en el exterior la humedad relativa fue de 38.50 %; en el módulo de control, 43.51 %; en el módulo experimental, 51.79 %, y en el invernadero, 54.11 %. A pesar de que la temperatura en la superficie de la zeolita superó los 70 °C, la humedad relativa en el interior del módulo experimental fue más alta que en el exterior y se presentó una disminución de 1.43 °C con relación al exterior. Para el módulo de control la humedad relativa presentó un valor más alto que en el ambiente exterior, pero menor que en el módulo experimental, la temperatura se redujo 1.19 °C con respecto al exterior.

La temperatura mínima en el exterior fue de 26.58 °C, se presentó también el 6 de julio a las 06:00 h. A esa misma hora, la temperatura en el módulo de control fue de 30.24 °C: en la superficie de contacto de la zeolita, 28.62 °C; en el invernadero la temperatura, 29.28 °C, y en el módulo experimental, 30.85 °C. En las primeras horas de la mañana se presentó la humedad relativa exterior mínima que, en este caso, fue de 83.50 %; el módulo de control tuvo una humedad de 66.30 %, con respecto a la temperatura estuvo 3.66 °C más cálido que en el exterior. En el módulo experimental la humedad fue de 58.60 % y la temperatura fue 4.27 °C más cálida que en el exterior. La temperatura en el invernadero y en el sensor de contacto se encontraron entre 2.5 y 3 °C por encima de la temperatura exterior y la humedad relativa fue de 54.20 %.

En el módulo de control, la temperatura máxima fue de 40.09 °C, se presentó el día 23 de julio a las 18:00 h; una hora antes, a las 17:00 h, se presentó el máximo valor de temperatura para el módulo experimental: 39.75 °C. Para ese momento la temperatura exterior fue de 34.88 °C, para el sensor de contacto de la zeolita fue de 51.96 °C, en el invernadero fue de 49.74 °C y cuando ese aire llegó al módulo experimental tuvo una temperatura de 39.69 °C. Con respecto a la humedad relativa, el valor exterior fue de 53.50 %, en el módulo de control fue de 43.70 %; en el invernadero al presentarse un alto valor de temperatura la humedad registró tan solo 21.16 % y en el módulo experimental la humedad fue de 47.70 %, es decir, 5.8 % por debajo del ambiente exterior.

El valor mínimo de temperatura en el módulo de control fue de 25.08 °C a las 06:00 h del 11 de julio, la temperatura a esa hora en el exterior fue de 23.78 °C. En la superficie de la zeolita fue de 24 °C y representó el mínimo registrado en la prueba para esta variable. En el invernadero la temperatura fue de 24.43 °C y se clasificó también como el valor mínimo de la prueba; en el módulo experimental fue de 25.43 °C. Una hora después, a las 07:00 h, se presentó el valor mínimo de temperatura en el módulo experimental con 25.35 °C. La humedad relativa exterior para ese momento fue de 89 %; en el módulo experimental la reducción de humedad con respecto al exterior fue de 13.8 % para ese momento la humedad en el invernadero fue de 71.35 %. En el módulo de control la reducción de humedad con respecto al exterior fue de 5.8 %. Para el sensor de contacto de la zeolita el valor máximo de temperatura se presentó el día 7 de julio y fue de 86.46 °C a las 14:00 h. En ese momento la temperatura en el invernadero fue de 54.11 °C; en el módulo experimental, 37.10 °C; en el exterior, 38.45 °C, y en el módulo de control, 38.01 °C. Entre tanto, en el módulo experimental hubo una reducción de humedad relativa con respecto a la humedad exterior (56.50 %) de 2.67 % y la temperatura se ubicó 1.35 °C más baja que el exterior. La humedad en módulo de control fue de 41.65 % por lo que disminuyó 14.85 % con respecto al exterior y tuvo 0.44 °C menos en relación a la temperatura exterior.

El día 1 de agosto se realizó el análisis detallado para la humedad relativa. La evolución de las temperaturas para este día en las variables estudiadas, presentó distintos desempeños, en la madrugada y en las primeras horas de la mañana los valores entre las 5 variables se encontraron muy cercanos, además se apreció que los valores del exterior se mantuvieron por debajo de del módulo de control, del módulo experimental, del invernadero y del sensor de contacto zeolita. Después de bajar a su mínimo, las temperaturas aumentaron en la mañana, y alrededor de las 14:00 h se presentó el valor máximo en la superficie de contacto de la zeolita y en el exterior. Un poco más tarde, se apreciaron los valores máximos en el invernadero, en el módulo de control y en el módulo experimental. Es importante mencionar que en la tarde y en la noche los valores en el exterior registraron los menores valores de temperatura para este día.

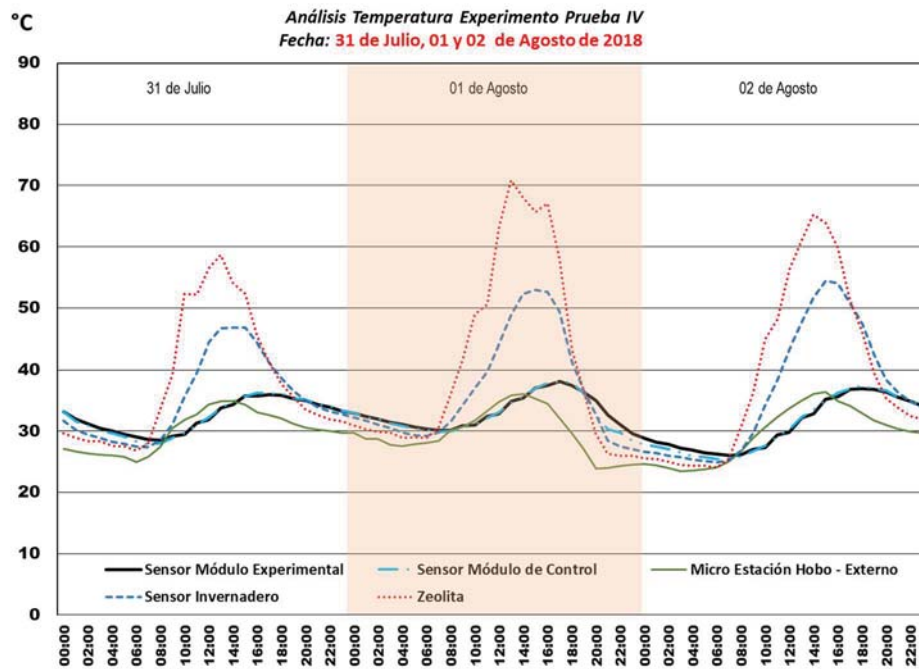


Fig. 170. Análisis temperatura prueba IV, día 01 de agosto de 2018. Fuente: Propia.

El promedio de temperatura exterior para esta fecha fue de 29.79 °C; en el módulo de control, 32.73 °C; en el sensor de contacto zeolita, 41.52 °C; en el invernadero, 36.69 °C, y en el módulo experimental, 33.07 °C. Entre las 00:00 h hasta las 06:00 h el promedio de temperaturas en el exterior fue 28.35 °C; en el módulo de control, 31.46 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 29.68 °C; en el invernadero, 30.56 °C, y en el módulo experimental, 31.56 °C. A las 04:00 h se detectaron los valores mínimos de humedad relativa para las variables estudiadas: en el exterior fue 27.53 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 28.92 °C; en el módulo de control, 30.23 °C; en el invernadero, 29.24 °C, y en el módulo experimental, 30.39 °C. Se observó que en la hora en el que se presentó la temperatura mínima en el exterior, también se generó el máximo porcentaje de absorción en el módulo experimental, esta disminución representó un 19.73 % por debajo de la humedad del ambiente exterior que se encontró a esa hora en 87.50 %. A las

06:00 h también se presentó una diferencia notable (6.29 %) entre las humedades de los dos módulos, en el módulo de control llegó a 74.53 %, en el módulo experimental fue de 68.24 %. Con respecto a las temperaturas para este rango de tiempo, el módulo de control se clasificó 3.11 °C más cálido que el exterior; mientras que el módulo experimental fue 3.21 °C más cálido que el exterior.

Entre las 07:00 h y las 12:00 h, el promedio de temperaturas en el exterior fue de 31.51 °C; en el módulo de control, 31.11 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 45.21 °C; en el invernadero, 36.10 °C, y en el módulo experimental, 31.26 °C. La diferencia de temperaturas entre el módulo de control y el exterior fue de 0.4 °C, siendo el valor más bajo para el módulo de control. Entre el módulo experimental y el exterior la diferencia fue de 0.25 °C, siendo la más baja del módulo experimental. Entre ambos módulos la temperatura fue más alta en el módulo experimental con una diferencia de 0.15 °C. Con respecto a la humedad relativa se observó una disminución de los valores, con relación al exterior en el módulo experimental entre las 07:00 y las 10:00 h, después de esta hora los valores de humedad relativa en el interior se incrementan y esto mismo pasa en el módulo de control, a las 12:00 h se presenta el máximo valor de humedad relativa en el módulo experimental: 73.00 %. En el exterior los valores de humedad relativa disminuyen.

A las 13:00 h se presenta el máximo valor de temperatura en el sensor de contacto de la zeolita con un valor de 70.88 °C, en ese momento se presenta el valor mínimo de humedad relativa exterior con 58.0 %. A las 14:00 h se presenta el máximo valor de temperatura para el exterior: 36.08 °C. A las 17:00 h se presenta el máximo valor de temperatura y el valor mínimo de humedad relativa para ambos módulos: en el módulo experimental la temperatura fue de 38.15 °C con 58.19 %, y en el módulo de control el valor de temperatura fue de 38.03 °C con 56.12 %, en ese momento en el exterior la temperatura fue de 32.08 °C con 79 %. En el rango de las 13:00 a las 18:00 h, los valores promedio de temperatura exterior fueron de 34.05 °C, para el módulo de control fue de 36.31 °C, para el sensor de contacto de la zeolita fue de 62.35 °C, para el invernadero fue de 48.83 °C y en el módulo experimental fue de 36.18 °C. La temperatura en el módulo de control estuvo 2.26 °C por encima del exterior; y la temperatura del módulo experimental estuvo 2.13 °C más cálida que en el exterior.

De las 19:00 a las 23:00 h los valores de temperatura disminuyen en el exterior y presentó un valor promedio de 24.77 °C, en el módulo de control fue de 31.50 °C, en el sensor de contacto de la zeolita fue de 28.87 °C, en el invernadero fue de 30.50 °C y en el módulo experimental fue de 32.93 °C. La temperatura en el módulo de control fue 6.73 °C más alta que en el exterior, en el módulo experimental la temperatura fue 8.16 °C más alta que en el exterior. En este rango de tiempo las humedades relativas promedio se encuentran en 88.08 %, en el módulo experimental llegan a 60.62 %, y en el módulo de control fue de 65.95 %. La reducción entre el exterior y el módulo experimental fue de 27.46 %. Para este día solo se registraron 5 horas en que las temperaturas en el módulo experimental fueron más bajas que en el exterior, esto se presentó desde las 10:00 h hasta las 14:00 h. Desde las 08:00 h hasta las 14:00 h los valores de temperatura fueron menores en el módulo de control, comparado con el exterior. Al comparar ambos módulos se observa una disminución de temperatura por 7 horas distribuidas a lo largo del día.

4.12 Análisis resultados temperatura proceso experimental Prueba V

Fecha inicio de análisis: 7 de agosto de 2018

Fecha final: 7 de septiembre de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos

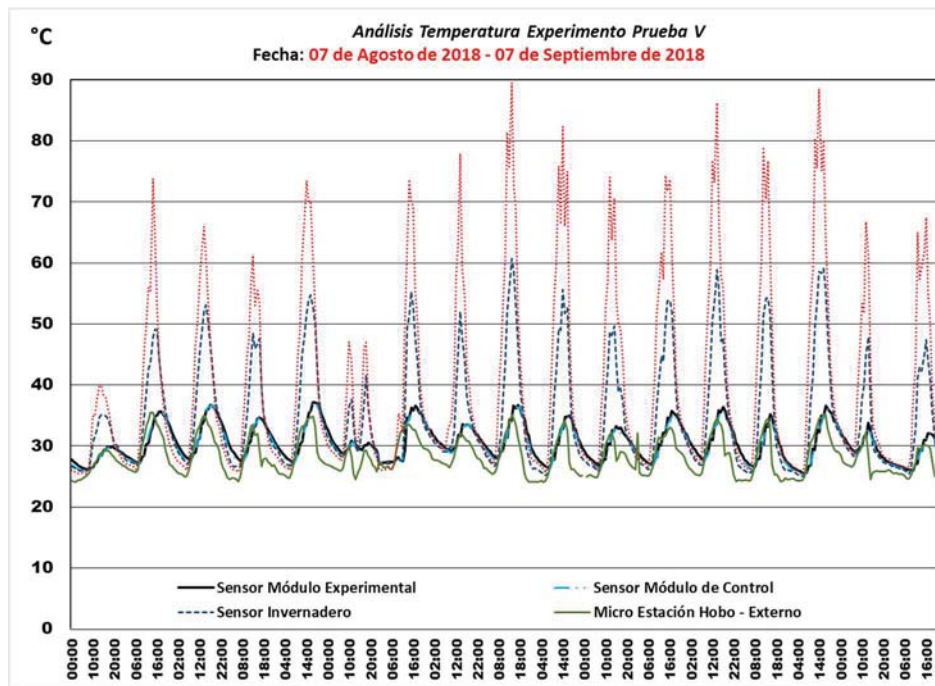


Fig. 171. Análisis temperatura prueba V. Fuente: Propia.

Para la prueba V se tomaron datos de las variables estudiadas por 15 días, entre el mes de agosto y septiembre: la primera etapa fue desde el 7 al 12 de agosto, y la segunda etapa fue desde el 28 de agosto al 7 de septiembre. En estas fechas la evolución de las temperaturas mostró un desempeño normal; el valor promedio de temperaturas para el ambiente exterior fue de 28.23 °C; en el módulo de control, 30.21 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 38.73 °C; en el invernadero, 30.80 °C, y en el módulo experimental, 30.51 °C. Según estos promedios, el módulo de control tuvo una temperatura de 1.98 °C más alta que el exterior; mientras que en el módulo experimental la temperatura fue 2.28 °C más alta que el exterior.

El valor máximo registrado en el exterior fue de 35.48 °C y sucedió el día 8 de agosto a las 13:00 h. Para ese momento la temperatura en el módulo de control fue de 32.63 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 55.42 °C; en el invernadero, 43.63 °C, y en el módulo experimental, 32.41 °C. A esta hora la temperatura en el módulo experimental fue 3.07 °C más baja que en el exterior, y en el módulo de control fue 2.85 °C menor que en el ambiente exterior. Con respecto a la humedad relativa, se tuvo en el exterior una humedad relativa de 51 %, que fue el valor mínimo de humedad para ese día; en el módulo experimental la humedad fue de 72.14 %, es decir, 21.14 % más alta que en el exterior; en el módulo de control la humedad fue de 61.70 %, 10.7 % más alta que en el exterior. Respecto al sistema de absorción se detectó que durante cuatro horas en el sensor de contacto de la zeolita se registraron temperaturas por encima de los 50 °C, esto mismo ocurrió en el invernadero, lo que quiere decir que la zeolita se calentó y no estuvo lista

para absorber la humedad del aire. La temperatura mínima para el exterior fue de 24.03 °C, se presentó el día 30 de agosto a las 21:00 h, una hora inusual para este registro, ya que en ese horario se solían tener datos mucho menores, además se constituyó en una señal del clima cálido de esta jornada. Para la hora que se mencionó anteriormente la temperatura en el módulo de control fue de 30.44 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 29.63 °C; en el invernadero, 27.83 °C, y en el módulo experimental, 31.68 °C. La temperatura en el módulo de control fue 6.41 °C más cálida que en el exterior y en el módulo experimental fue 7.65 °C más alta que en el exterior. Se observa un buen desempeño del módulo experimental con respecto a la zeolita, ya que la humedad relativa en el exterior fue de 90 %, en el módulo experimental se registró un valor de 62.02 %, es decir, 27.98 % menos que en el exterior. En el módulo de control la humedad fue de 67.77 %, 22.23 % menos que el ambiente exterior.

El día 11 de agosto a las 18:00 h se presentó el máximo valor de temperatura para el módulo de control: 37.42 °C y para el módulo experimental: 37.19 °C. En ese momento la temperatura en el exterior fue de 33.23 °C, en el sensor de contacto de la zeolita fue de 52.63 °C, y en el invernadero fue de 49.87 °C. La diferencia entre el módulo de control y el exterior fue de 4.19 °C siendo más alta la temperatura en el módulo de control; en el módulo experimental la temperatura estuvo 3.96 °C más alta que el ambiente exterior. Comparativamente hablando entre ambos módulos la diferencia fue de 0.23 °C, siendo el de valor más bajo el módulo experimental. En esa hora los niveles de humedad relativa se encontraron entre los rangos de 50 y 60 % en ambos módulos y en el exterior, en este caso el mejor desempeño se presentó en el módulo de control que disminuyó 10.4 % con respecto al exterior, y 5.67 % con respecto al módulo experimental.

El 5 de septiembre a las 06:00 h se presentó el mínimo valor de temperatura para el módulo de control: 25.24 °C, para el módulo experimental: 25.59 °C y para el invernadero: 25.02 °C. Para ese momento las variables evaluadas presentaron temperaturas muy similares. En el exterior la temperatura registrada fue de 24.43 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 25.67 °C, y en el módulo experimental fue de 25.65 °C. La temperatura en el módulo de control fue 0.81 °C más alta que el exterior, y en el módulo de control la temperatura fue 1.22 °C más alta que en el exterior. A esta hora la humedad relativa exterior fue de 91 %, y en el módulo experimental se registró un valor de 82.06 %, por lo que la disminución de humedad relativa con respecto al exterior fue de 8.94 % y también se presentó una disminución con respecto al módulo de control (87.89 %) de 5.83 %.

El máximo valor de temperatura en el sensor de contacto de la zeolita fue de 89.50 °C se presentó el día 30 de agosto a las 14:00 h, en ese mismo momento se presentó el máximo valor para el invernadero con una temperatura de 60.72 °C, el valor para el módulo experimental fue de 34.12 °C; en el exterior la temperatura fue de 34.98 °C, en el módulo de control fue de 34.37 °C. En el módulo de control la temperatura fue 0.61 °C más baja que el exterior y en el módulo experimental fue 0.81 °C por debajo del exterior. Es interesante observar este alto valor de temperatura que se presentó tanto en el sensor de contacto como en el del invernadero, ya que la humedad en el invernadero fue de 22.61 % contra 54.50 % en el exterior; esta disminución de humedad en el invernadero no se vio reflejada para ese momento en los valores de humedad en el módulo experimental, ya que se ubicaron por encima de la humedad en el módulo de control y del exterior.

El día 11 de agosto a las 04:00 h se presentó el mínimo valor de temperatura para el sensor de contacto de la zeolita: 26.50 °C, a esa misma hora la temperatura en el invernadero fue de 27.07 °C, en el exterior fue de 25.13 °C, en el módulo de control fue de 27.88 °C y en el módulo experimental fue de 27.77 °C. En el módulo experimental la temperatura fue 2.64 °C más cálido que en el exterior y en el módulo de control fue 2.75 °C más alta que en el exterior. Con el fin de tener un análisis más detallado de la prueba V, se toma el día 8 de agosto que es el día que registró la temperatura más alta.

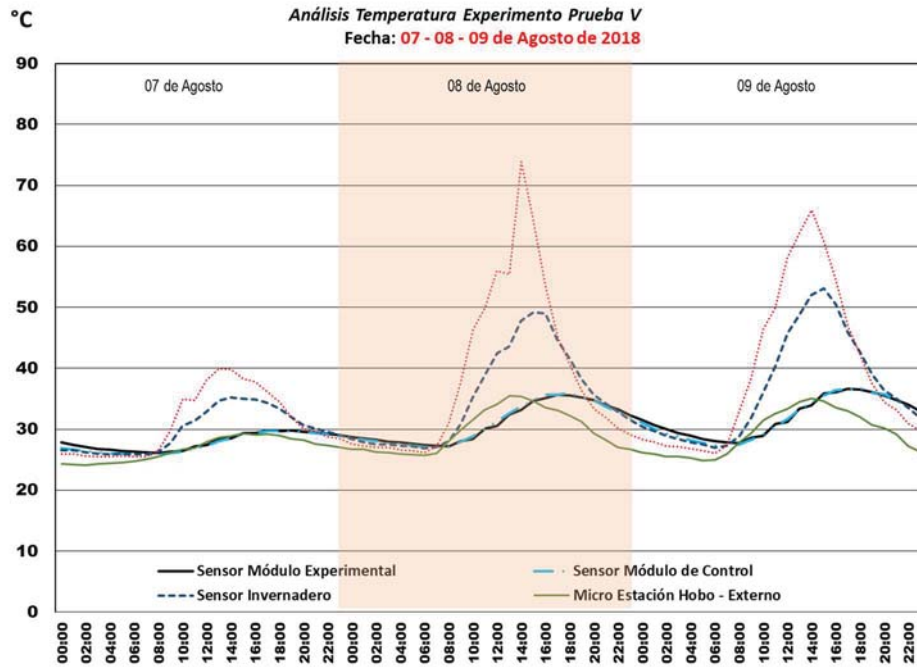


Fig. 172. Análisis temperatura prueba V, día 8 de agosto de 2018. Fuente: Propia.

Como ocurrió en análisis pasados, en la madrugada y en las primeras horas del día las líneas que representan las variables evaluadas se encontraron muy cercanas, en rangos entre los 25 °C y los 30 °C. Alrededor de las 06:00 h se presentaron las temperaturas mínimas. En horas de la mañana las temperaturas se incrementaron hasta llegar a su máximo valor en el mediodía, en este transcurso de tiempo, las líneas de las variables se separaron: el sensor de contacto de la zeolita alcanzó una temperatura cercana a los 80 °C, por debajo de este se ubicaron los valores del invernadero, que llegó a los 50 °C, seguido por la temperatura del exterior, que alcanzó los 35 °C. En la tarde los valores disminuyeron, sin embargo, en ambos módulos se presentaron los máximos valores de temperatura: llegaron a los 35 °C. En la noche los valores descendieron para todas las variables del experimento y las líneas tuvieron, de nuevo, la tendencia a acercarse.

El promedio de temperatura para este día en el exterior fue de 29.71 °C; en el módulo de control, 31.01 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 38.74 °C; en el invernadero, 35.16 °C, y en el módulo experimental, 31.0 °C. Basado en este promedio, la temperatura en el módulo de control estuvo 1.3 °C más alto que el exterior; en el módulo experimental la temperatura fue 1.29 °C más alta que el ambiente.

En el rango comprendido entre las 00:00 h y las 06:00 h, el promedio de temperaturas para el exterior fue de 26.21 °C; en el módulo de control, 27.82 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 26.17 °C; en el invernadero, 27.55 °C, y en el módulo experimental, 28.04 °C. Para este periodo la temperatura en el módulo de control fue 1.61 °C más cálida que el exterior, y en el módulo de control el desempeño de la temperatura fue 1.83 °C más alta que el exterior. En este rango de tiempo los valores mínimos de temperatura se registraron a las 06:00 h para las siguientes variables: en el exterior: 25.70 °C, en el sensor de contacto de la zeolita: 26.89 °C, y en el módulo experimental: 27.40 °C.

Cabe acotar que cuando se presentó el mínimo valor de temperatura en el exterior, se registró el máximo valor de humedad relativa para el día: 90 %; en el módulo experimental la humedad se redujo un 12.55 % con respecto al exterior, en el módulo de control la reducción de humedad relativa fue de 6.20 %. En este rango de tiempo el módulo experimental tuvo un buen desempeño. Entre las 07:00 h y las 12:00 h, el promedio de valores de temperatura en el exterior fue 30.48 °C; en el módulo de control, 28.74 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 41.31 °C; en el invernadero, 33.79 °C, y en el módulo experimental, 28.64 °C. En el módulo de control la temperatura estuvo 1.74 °C por debajo del exterior; en el módulo experimental la temperatura estuvo 1.84 °C por debajo del exterior. Con respecto a la humedad relativa en este rango de tiempo la humedad exterior tuvo valores descendentes en el exterior, sin embargo, al interior de los módulos permaneció por encima de los valores del ambiente.

Entre las 13:00 h y las 18:00 h el rango promedio de temperaturas en el exterior fue de 34.05 °C; en el módulo de control, 34.74 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 55.45 °C; en el invernadero, 45.95 °C, y en el módulo experimental, 34.43 °C. En el módulo de control la temperatura estuvo 0.69 °C más alta que en exterior; y en el módulo experimental la temperatura fue 0.38 °C más alta que el ambiente exterior. En este periodo se presentaron los máximos valores de temperatura para las siguientes variables: en el exterior a las 13:00 h con 35.48 °C, a las 14:00 h en el sensor de contacto de la zeolita con 73.88 °C, en el invernadero a las 15:00 h con 49.16 °C, a las 17:00 h en el módulo experimental con 35.64 °C y a las 18:00 h en el módulo de control con 36.0 °C. En cuanto a la humedad relativa los valores en el exterior tuvieron la tendencia a aumentar, y los valores de humedad relativa mínima aparecieron en ambos módulos cuando se presentó la temperatura máxima, sin embargo, estos valores fueron más altos que en el exterior.

Entre las 19:00 h y las 23:00 h las temperaturas disminuyeron; el promedio de temperaturas en el exterior fue de 28.50 °C; en el módulo de control, 33.70 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 34.49 °C; en el invernadero, 34.49 °C, y en el módulo experimental, 33.88 °C. Con respecto a la humedad relativa, a las 21:00 h cuando la humedad exterior era de 83.50 %, se observaron disminuciones de hasta el 20 % en el módulo experimental. Entre las 08:00 h y las 13:00 h la temperatura fue menor en el módulo experimental comparada con el exterior, el máximo valor disminuido fue de 3.52 °C a las 12:00 h. En el módulo de control coincidió en el horario y el número de horas en que la temperatura fue más baja en esta variable, el valor máximo que disminuyó fue 3.13 °C con respecto al exterior a las 11:00 h. Comparando ambos módulos, se presentaron 10 horas en que la temperatura fue menor en el módulo experimental que en el de control, este fenómeno se presentó en el horario entre las 12:00 h y las 20:00 h, la máxima diferencia fue de 0.79 °C a las 12:00 h.

4.13 Análisis resultados temperatura proceso experimental Prueba VI

Fecha inicio de análisis: 8 de septiembre de 2018

Fecha final: 8 de octubre de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos

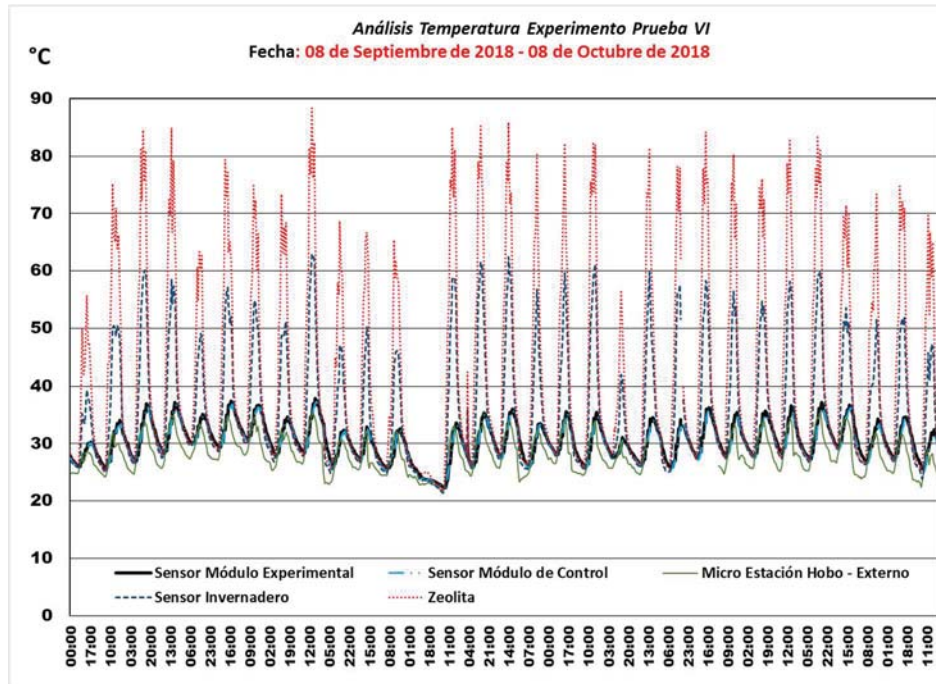


Fig. 173. Análisis temperatura prueba VI. Fuente: Propia.

Septiembre se clasificó como el mes más lluvioso del año para la ciudad de Culiacán, sin embargo, se pudo apreciar que la mayoría de los días del mes presentaron temperaturas cálidas, por lo que la combinación entre altos valores de humedad relativa y alta temperatura produjo una sensación térmica incómoda. El promedio de temperaturas en el exterior fue de 28.12 °C; en el módulo de control, 30.07 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 42.01 °C; en el invernadero, 35.66 °C, y en el módulo experimental, 30.42 °C. La temperatura en el módulo de control fue 1.95 °C más cálida que en el exterior; en el módulo experimental la temperatura fue 2.3 °C más alto que el ambiente exterior.

Durante la prueba VI, la máxima temperatura registrada en el ambiente exterior fue 35.50 °C, se presentó el día 4 de octubre a las 16:00 h. Para esa hora la temperatura en el sensor de contacto de la zeolita fue 81.0 °C; en el invernadero, 59.91 °C; en el módulo experimental, 35.79 °C, y en el módulo de control, 35.47 °C. La temperatura en el módulo de control fue 0.03 °C más baja que en el exterior, y en el módulo experimental la temperatura fue 0.29 °C más alta que en el exterior. Para este periodo la humedad relativa exterior fue 53 %, en el módulo experimental el valor registrado fue 71.57 %, es decir, 18.57 % más alta que en el exterior. Esto lleva a pensar que, aunque la zeolita aún no estaba captando la humedad del aire, las altas temperaturas en el sistema de deshumidificación afectaron la temperatura al interior del módulo experimental. En

el caso del módulo de control la humedad relativa tuvo un valor de 60.95 %, es decir, 7.95 % menos que en el ambiente exterior.

El día 21 de septiembre se presentaron los valores mínimos para todas las variables evaluadas del experimento: en el exterior se dio a las 05:00 h con 21.70 °C; a las 07:00 h se presentó en el sensor de contacto de la zeolita con 21.71 °C; en el invernadero con 21.34 °C, y en el módulo de control con un valor de 22.08 °C. En el invernadero el valor mínimo se registró a las 07:00 h con 22.29 °C. Entre las 05:00 h y las 07:00 h los rangos de temperatura para todas las variables se ubicaron entre los 21 y los 22 °C; los valores del exterior fueron los más bajos, y la temperatura en el módulo experimental fue 0.7 °C más cálida que el exterior, y en el módulo de control la temperatura fue 0.36 °C más alta que el ambiente exterior.

También se analizaron los datos de humedad relativa para este rango de tiempo, se observó que para este día en las horas de la madrugada la humedad relativa exterior tuvo valores de 91 %; el registro de humedad relativa en ambos módulos mostró valores que sobrepasaron el 92 % y clasificó al módulo experimental con los valores más altos para ese momento. Es importante aclarar que el día anterior, 20 de septiembre, se presentó el día más lluvioso del año, por lo que se presumió que la zeolita no alcanzó la temperatura adecuada para absorber agua del aire y esto se reflejó en los valores.

El 16 de septiembre, a las 14:00 h, se presentaron los valores máximos de temperatura para el módulo de contacto de la zeolita con 88.42 °C, y para el invernadero con 62.87 °C. En ese momento la temperatura exterior fue de 35.08 °C; en el módulo de control, 34.58 °C, y en el módulo experimental, 34.42 °C. A las 17:00 h se presentó el máximo valor para el módulo de control con 37.28 °C, y a las 18:00 h se presentó el máximo valor para el módulo experimental con 37.92 °C.

Para el momento en que se presentaron los valores máximos en el sensor de contacto de la zeolita y en el invernadero, se apreció una disminución de 0.65 °C en el módulo experimental con respecto al exterior, y de 0.50 °C más bajo que el exterior en el módulo de control. Esa tarde los valores máximos sobrepasaron la temperatura exterior, porque los valores en esta última ya estaban disminuyendo. Con respecto a la humedad relativa, cuando se presentó la máxima temperatura del día, la humedad en el módulo experimental fue más alta que el exterior, esto mismo ocurrió en el módulo de control con un porcentaje menor. Al finalizar la tarde una hora después de que se registrara el máximo valor en el módulo experimental se apreció la disminución de humedad relativa en el módulo experimental y de control. Al avanzar la noche la diferencia entre ambos módulos y el exterior se hizo más notoria.

A continuación, se toma el día 20 de septiembre con el fin de analizar las temperaturas que se registraron ese día, y entender un poco el funcionamiento del sistema de deshumidificación en el módulo experimental. Al observar la gráfica donde se apreciaron el día antes y después del análisis (19 y 21 de septiembre), se pudieron ver los trayectos “normales” de las temperaturas de cada una de las variables: se representan claramente los momentos en que se registraron las temperaturas máximas y las temperaturas mínimas. En la siguiente gráfica no se aprecian estas diferencias, y el día evaluado muestra el desempeño de unas líneas que tuvieron temperaturas con pocas variaciones.

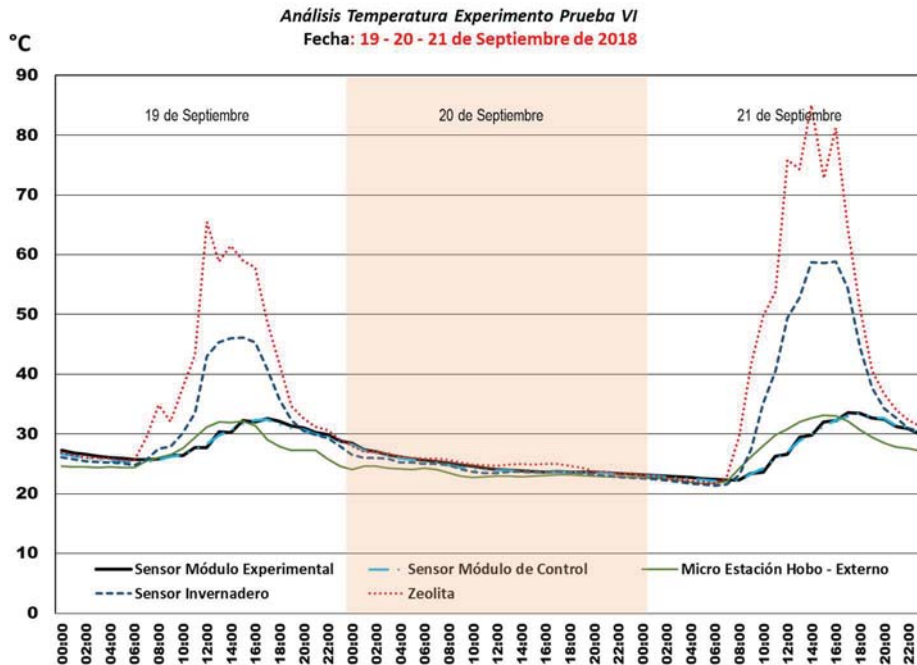


Fig. 174. Análisis temperatura prueba VI, día 20 de septiembre de 2018. Fuente: Propia.

El promedio de temperaturas exteriores para el día 20 de septiembre fue 23.40 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 25.24 °C; en el invernadero, 24.22 °C; en el módulo de control, 24.61 °C, y en el módulo experimental, 24.80 °C. La temperatura en el módulo de control fue 1.21 °C más alta que el exterior y en el módulo experimental la temperatura fue 0.44 °C más alta que el exterior. Los máximos valores de temperatura se presentaron a las 00:00 h para las 5 variables del experimento; en el módulo de control fue de 24.60 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 27.96 °C; en el invernadero, 26.59 °C, y en el módulo experimental, 28.44 °C. Para este momento la temperatura más baja se registró en el exterior. Con respecto a la humedad desde las 00:00 h hasta las 09:00 h los valores de humedad relativa en el módulo experimental y en el invernadero fueron los más bajos, esto se debió a que la zeolita se activó en la tarde del 19 de septiembre.

En la mañana entre las 07:00 h y las 12:00 h los rangos de temperatura de las variables estuvieron entre los 23 °C y los 25 °C: en el exterior la temperatura fue de 23.18 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 25.17 °C; en el invernadero, 24.07 °C; en el módulo de control, 24.36 °C, y en el módulo experimental, 24.72 °C. A las 09:00 h se observó en la gráfica de humedad que los valores en el módulo experimental se posicionaron como los más altos de la prueba y se mantuvieron en una línea sostenida por 11 horas, esto mismo sucedió con las otras tres variables. En la tarde los rangos de las temperaturas de las variables se encontraron en los 23 °C, excepto para el sensor de contacto de la zeolita donde el rango estuvo en los 25 °C. Las temperaturas siguieron descendiendo y a las 23:00 h se registraron los valores mínimos en el exterior con 22.78 °C; en el sensor de contacto de la zeolita fue 23.25 °C; en el invernadero, 22.78 °C; en el módulo de control, 23.26 °C, y en el módulo experimental, 23.32 °C. Para este caso en el sistema de deshumidificación no se registró la temperatura adecuada que activara la zeolita; es por ello que los valores de humedad relativa en el módulo experimental se mantuvieron como los más altos de la prueba.

4.14 Análisis resultados temperatura proceso experimental Prueba VII

Fecha inicio de análisis: 9 de octubre de 2018
Fecha final: 9 de noviembre de 2018
Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos

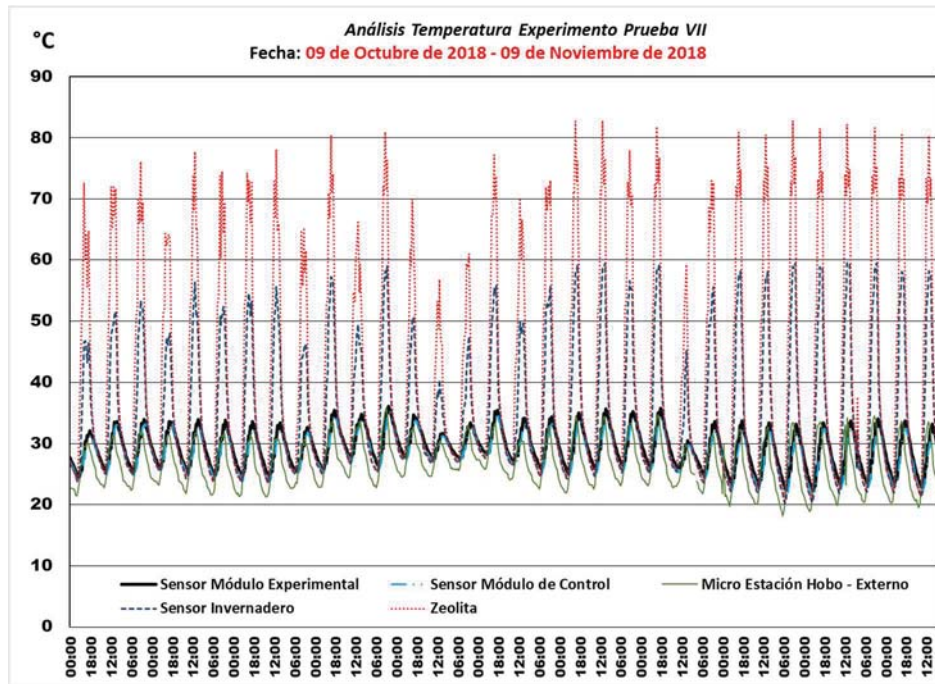


Fig. 175. Análisis temperatura prueba VII. Fuente: Propia.

En la prueba VII, las trayectorias de los valores de temperatura para las cinco variables de las pruebas anteriores tuvieron un desempeño “normal”. La mayoría de las temperaturas máximas en el sensor de contacto de la zeolita se registraron entre los rangos de 70 y 80 °C y los valores mínimos estuvieron entre los 20 y 30 °C. Esta variable fue la que presentó los mayores valores de temperatura en la prueba. La segunda variable con las temperaturas más altas se presentó en el invernadero, allí los valores mínimos estuvieron entre los 20 °C y los 25 °C, mientras que las máximas estuvieron cercanas a los 60 °C. Las temperaturas, tanto en el módulo de control como en el experimental, presentaron temperaturas muy parecidas, a lo largo del día se detectaron variaciones sujetas al desempeño del sistema de deshumidificación en el caso del módulo experimental. En los módulos los rangos de temperatura mínimos estuvieron entre los 20 y los 25 °C, las máximas se encontraron entre los 30 y 35 °C. Las temperaturas exteriores mínimas estuvieron entre los 19 °C y los 25 °C, las máximas en los rangos de los 32.0 y los 36.0 °C.

El promedio de temperaturas para el exterior fue de 26.64 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 40.86 °C; en el invernadero, 34.91 °C; en el módulo de control, 28.54 °C, y en el módulo experimental fue 29.26 °C. Basados en estos promedios, la temperatura en el módulo de control fue 1.9 °C más alta que el exterior, y en el módulo experimental fue 2.62 °C más alta que el exterior.

El día 20 de octubre se presentaron las máximas temperaturas. En el exterior con 35.85 °C a las 15:00 h, también para el módulo de control con 35.30 °C a las 18:00 h, y en el módulo experimental con 36.12 °C a las 17:00 h. A las 15:00 h cuando se presentó el máximo valor de temperatura en el exterior, en el módulo del sensor de la zeolita se registró una temperatura de 71.38 °C; en el invernadero, 57.03 °C; en el módulo de control, 35.30 °C, y en el módulo experimental fue 36.12 °C. Para este momento el módulo de control tuvo una temperatura 0.55 °C más baja que el exterior, en el módulo experimental la temperatura estuvo 0.27 °C más alta que en el exterior. A esa hora la humedad relativa exterior fue 59 %; en el módulo experimental la humedad estuvo 12.77 % más alta que en el exterior, y en el módulo de control la humedad estuvo 11.88 % más alta que el exterior.

En el módulo experimental y en el módulo de control se presentaron los valores máximos con una hora de diferencia. Al finalizar la tarde las temperaturas descendieron y en el exterior se registraron 32 °C. La temperatura en el módulo de control fue 3.3 °C más alta que el exterior, y en el módulo experimental 4.12 °C más alta que el exterior. Comparando ambos módulos, la temperatura en el experimental fue 1.02 °C más alta que en el módulo de control. La diferencia entre la temperatura exterior de 32 °C con el sensor de contacto de la zeolita fue de 24.58 °C, y en el invernadero se registran 50 °C. Esta acumulación de calor de todo el día, permitió que a las 18:00 h se apreciara una disminución de humedad relativa en el módulo experimental. En el módulo de control también ocurrió este fenómeno a la misma hora, la diferencia radicó en que el porcentaje de absorción de humedad en el módulo experimental fue más alto que en el módulo de control.

El 28 de octubre se presentó el máximo valor de temperatura para el sensor de contacto de la zeolita: 82.88 °C a las 14:00 h; en el exterior la temperatura fue de 33.50 °C; en el invernadero, 58.52 °C; en el módulo de control, 31.34 °C, y en el módulo experimental, 31.99 °C. A pesar de la temperatura tan elevada en la superficie de la zeolita, en el recorrido que hizo el aire desde el exterior (pasa por la zeolita y se transporta a través de tubos de aluminio) perdió temperatura, y llegó a 31.99 °C, que comparada a la del exterior, fue 1.51 °C más baja en el exterior. En el módulo de control se redujo la temperatura con respecto al exterior 2.16 °C.

La humedad en el exterior fue 46 %; en el invernadero la humedad fue 21.54 %, sin embargo, la humedad en el módulo experimental (68.67 %) no alcanzó a ser menor que el exterior debido a que la zeolita no se calentó por suficientes horas y no activó la propiedad de adsorción. El módulo de control tuvo una humedad de 60.40 %, rebasó por 14.4 % al exterior y se situó 8.19 % por debajo del módulo experimental.

El 6 de noviembre se presentó el máximo valor de temperatura en el invernadero: 59.59 °C a las 15:00 h. La temperatura en el sensor de contacto de la zeolita fue de 71.96 °C; en el exterior, 32.43 °C; en el módulo de control, 31.31 °C, y en el módulo experimental, 33.33 °C. El módulo experimental tuvo una temperatura de 0.9 °C más alta que el exterior, y el módulo de control estuvo 1.12 °C más baja que en el exterior. Con respecto a la humedad relativa el desempeño fue muy similar al caso anterior; es interesante observar que en el invernadero la humedad para ese momento fue 13.17 % y la humedad en el módulo experimental fue 47.57 %, esta humedad estuvo 2.07 % más alta que el exterior (45.50 %). En el módulo de control la humedad se posicionó 0.51 % por encima del exterior.

El 4 de noviembre se registraron los valores mínimos en el exterior con 18.13 °C a las 05:00 h, también se presentó este mínimo en el sensor de contacto de la zeolita con 20.71 °C y en el invernadero con 20.18 °C, en ambos casos ocurrió a las 07:00 h. En el módulo de control y en el módulo experimental las temperaturas fueron de 22.57 y 21.53 °C. Es de anotar que en la madrugada las temperaturas fueron más altas en ambos módulos. Durante las pruebas, cuando se presentó el mínimo valor de humedad relativa se presentaba el máximo valor de absorción en el módulo experimental, en este caso, la humedad estuvo 20.44 % por debajo de la humedad exterior (80.0 %); y en el módulo de control la humedad estuvo 13.70 % por debajo de los valores exteriores.

A las 08:00 h del 5 de noviembre se presentó el valor mínimo en el módulo de control con 21.15 °C y en el módulo experimental con 22.28 °C. En esa hora la temperatura en el exterior fue 24.25 °C, en el sensor de contacto de la zeolita fue 29.21 °C y en el invernadero fue 21.01 °C. La temperatura en el módulo experimental fue 1.97 °C más baja que en el exterior, y en el módulo de control fue 3.1 °C más baja que el exterior. La humedad relativa en el exterior se encontró en ese momento con 53.50 %, en ambos módulos las líneas de humedad se dirigieron hacia el punto de valor máximo y se posicionaron por encima de los valores exteriores: módulo de control: 66.88 % y módulo experimental 58.77 %.

Para tener un abanico de diferentes situaciones, se tomó el día 9 de noviembre, el cual se registró con el valor mínimo de humedades relativas: 8.53 % para la prueba VII.

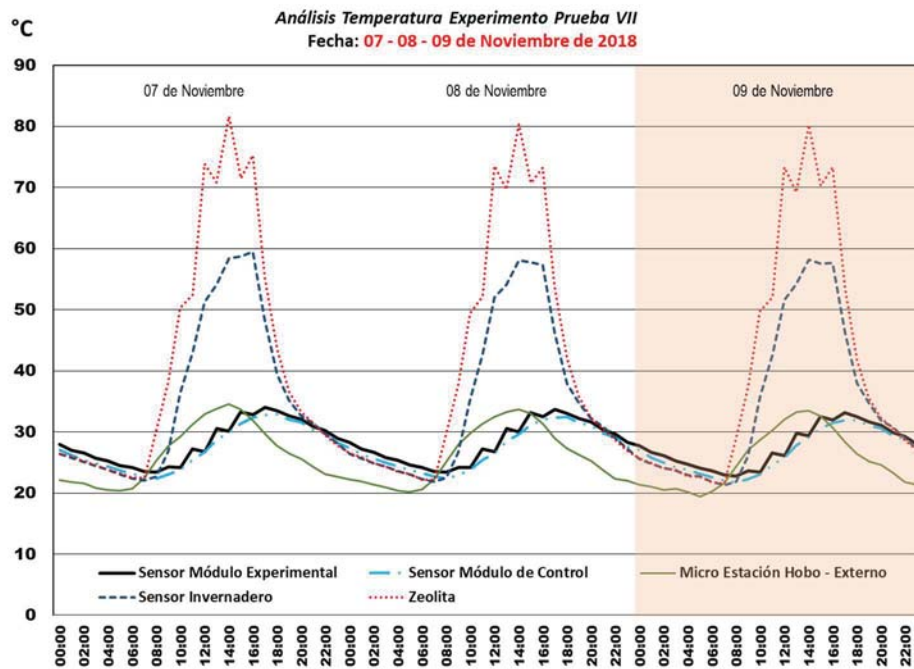


Fig. 176. Análisis temperatura prueba VII, día 9 de noviembre de 2018. Fuente: Propia.

El promedio de temperaturas en el exterior para este día fue 25.40 °C; en el módulo de control, 26.74 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 40.47 °C; en el invernadero, 34.62 °C, y en el módulo experimental, 27.64 °C. Según el promedio anterior, la temperatura en el módulo de

control fue 1.34 °C más alta que el exterior y el módulo de control la temperatura fue 2.24 °C más elevada que en el exterior.

En el rango de las 00:00 h y las 06:00 h, la temperatura del exterior se situó por debajo de los valores de ambos módulos, así como en el invernadero y en el sensor de contacto. El promedio de temperaturas a esta hora en el exterior fue 20.54 °C, a las 05:00 h se presentó el valor mínimo con 19.48 °C. En el módulo de control el promedio de temperaturas fue 24.54 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 23.66 °C; en el invernadero, 23.70 °C, y en el módulo experimental, 25.47 °C. El módulo de control estuvo 4.0 °C más cálido que el exterior y el módulo experimental estuvo 4.93 °C más alto que el exterior. El promedio de humedades relativas exteriores fue 68.36 %, y se observó una disminución de humedad muy importante en el módulo experimental con 19.31 % menos que en el exterior. La reducción que se presentó en el módulo de control fue de 12.32 % con relación al exterior.

Entre las 07:00 h y las 12:00 h el promedio de temperaturas en el exterior fue 27.36 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 43.83 °C; en el invernadero, 33.22 °C; en el módulo de control, 23.29 °C, y en el módulo experimental, 24.28 °C. A esta hora la temperatura en el módulo de control fue 4.07 °C más baja que el exterior; en el módulo experimental la temperatura fue 3.08 °C más baja que el exterior. A las 07:00 h se presentaron los valores mínimos de temperatura para el sensor de contacto de la zeolita con 21.54 °C, y para el invernadero con 21.34 °C. Una hora después, a las 08:00 h, se registraron los valores mínimos para el módulo de control con 21.74 °C y también para el módulo experimental con 22.81 °C. En este rango de tiempo la humedad relativa en ambos módulos presentó los valores más altos que el ambiente exterior, y comparando ambos módulos, los valores más altos se encontraron en el módulo experimental y los más bajos en el invernadero.

Entre las 13:00 h y 18:00 h el promedio de temperaturas en el exterior fue 30.85 °C; en el módulo de control, 30.51 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 64.74 °C; en el invernadero, 54.76 °C, y en el módulo experimental, 31.56 °C. A las 14:00 h se presentaron los máximos valores de temperatura en el exterior con 33.55 °C, en el invernadero fue 58.17 °C, y en el sensor de contacto de la zeolita fue 80.29 °C. De las 13:00 a las 15:00 horas las temperaturas en el módulo estuvieron por debajo de las temperaturas del exterior. A las 15:00 h las líneas que representan la temperatura de los módulos y al exterior oscilaron entre los 30°C y los 32°C. A las 17:00 h se presentó el máximo valor de temperatura para el módulo experimental con 33.17 °C, y a las 18:00 h se registró el máximo valor para el módulo de control con 31.97 °C. Entre las 19:00 h y las 23:00 h, los valores más bajos de temperatura ocurrieron en el exterior con un promedio de 23.30 °C. En el módulo de control la temperatura fue 29.43 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 32.65 °C; en el invernadero, 30.75 °C, y en el módulo experimental, 30.0 °C. En el módulo de control la temperatura fue 6.13 °C más alta que en el exterior, en tanto que en el módulo experimental fue 6.7 °C más cálida que en el exterior.

En el módulo experimental se detectaron ocho horas en las cuales la temperatura fue más baja que en el exterior, el periodo en que esto se presentó fue el comprendido entre las 07:00 h y las 14:00 h. El máximo valor que se disminuyó con respecto al exterior fue de 5.90 °C y se encontró a las 11:00 h. El módulo de control registró 8 horas donde la temperatura fue más baja comparada con el exterior, esto sucedió desde las 08:00 h hasta las 14:00 h y el valor máximo de esta diferencia fue de 6.24 °C a las 12:00 h.

4.15 Análisis resultados temperatura proceso experimental Prueba VIII

Fecha inicio de análisis: 10 de noviembre de 2018

Fecha final: 4 de diciembre de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos

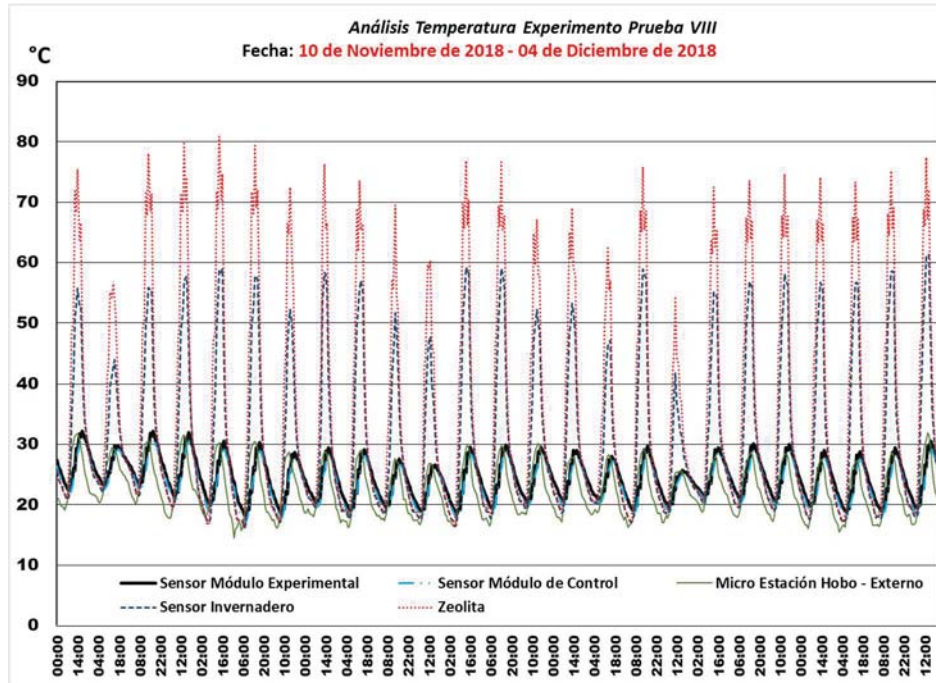


Fig. 177. Análisis temperatura prueba VIII. Fuente: Propia.

En la prueba VIII se observó una clara disminución en los valores de las temperaturas en el exterior y en ambos módulos, lo que indicó que la época de invierno se acercaba. Las temperaturas más altas se presentaron en el sensor de contacto de la zeolita, más del 60 % de los días en la prueba, los máximos de temperatura estuvieron entre los rangos de los 75 y los 80 °C y los valores mínimos se situaron entre 15 y 20 °C. En el invernadero los valores mínimos de temperatura estuvieron entre 20.0 y 21 °C; los puntos máximos se ubicaron entre los 35.0 y los 58.0 °C. En ambos módulos las trayectorias de la evolución de las temperaturas fueron muy parecidas, por ello las líneas se acercaron. Como en análisis anteriores las temperaturas del exterior presentaron valores similares a los de los módulos, sin embargo, después del mediodía esta línea se separaba y se ubicaba con los menores valores de temperatura.

Para esta prueba el promedio de temperaturas en el exterior fue 22.51 °C; en el módulo de control, 23.69 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 35.50 °C; en el invernadero, 30.78 °C, y en el módulo experimental, 24.50 °C. Según los promedios de este mes, en el módulo de control la temperatura fue 1.18 °C más alta que en el exterior. En el módulo experimental la temperatura fue 1.99 °C más alta que en el ambiente exterior.

El máximo valor de temperatura en el exterior fue de 31.95 °C, se presentó el 4 de diciembre a las 14:00 h. A las 15:00 h de ese mismo día, también se registró el máximo valor de temperatura

para el invernadero con 61.34 °C. Para ese momento la temperatura en el sensor de contacto de la zeolita fue de 67.25 °C; en el módulo de control, 27.43 °C, y en el módulo experimental, 29.65 °C. La diferencia entre la temperatura del módulo de control y el exterior fue de 4.52 °C, siendo menor en el módulo de control; comparando el módulo experimental contra el exterior la diferencia fue de 2.3 °C siendo menor el módulo experimental. La humedad relativa para ese momento en el exterior presentó valores bajos, en este caso fue de 29 %, en el invernadero la humedad fue de 12 %, sin embargo, en el módulo experimental la humedad del aire fue de 51.35 % y en el módulo de control fue de 50.02 %. En este horario el sistema de deshumidificación no se activó, ya que los valores de humedad relativa en el módulo experimental fueron más altos que en el exterior y en el módulo de control.

El 14 de noviembre a las 14:00 h se detectó el valor máximo en el sensor de contacto de la zeolita con 80.96 °C; en ese momento la temperatura en el invernadero fue de 58.75 °C; en el módulo experimental, 26.51 °C; en el exterior la temperatura, 30.23 °C, y en el módulo de control, 26.46 °C. Para este momento la temperatura en el módulo experimental fue 3.72 °C menos que el exterior; y en el módulo de control fue 3.77 °C menos que el ambiente exterior. La humedad relativa exterior en ese momento fue tan solo de 14.0 %; en el invernadero la humedad, 9.90 %. En el módulo de control y en el módulo experimental la humedad fue más alta con diferencias entre 15 y 16 %.

Las máximas temperaturas en el módulo de control y en el módulo experimental se presentaron el 10 de noviembre, con valores de 31.06 °C y 32.24 °C respectivamente. Los horarios en que se registraron estos valores fueron las 17:00 h para el módulo experimental y las 18:00 h para el módulo de control. En ese momento la temperatura en el exterior fue menor que en los módulos con un valor de 28.08 °C; la temperatura en el sensor de contacto de la zeolita fue 40.50 °C y en el invernadero fue de 37.26 °C. Como en análisis anteriores, también aumentó la humedad relativa en el exterior, y, al finalizar la tarde cuando se presentó el máximo valor de humedad relativa en el módulo experimental, comenzó la disminución de humedad relativa paulatinamente y continuó así por toda la noche

El 15 de noviembre se presentaron los mínimos valores de humedad relativa en todas las variables evaluadas. A las 05:00 h con 15.68 °C se registró la mínima en el exterior; a las 07:00 h se registró la mínima en el sensor de contacto de la zeolita con 16.21 °C y en el invernadero con 16.12 °C; a las 08:00 h el valor mínimo en el módulo experimental fue de 18.22 °C y en el módulo de control fue de 17.10 °C. El promedio de temperaturas entre las 05:00 h y las 08:00 h del exterior fue de 18.13 °C; en el módulo experimental la temperatura fue 18.74 °C, es decir, 0.61 °C por encima del exterior; en el módulo de control la temperatura fue de 17.64 °C, 1.96 °C más elevada que el exterior. La temperatura en el sensor de contacto de la zeolita fue de 18.66 °C y en el invernadero fue de 18.13 °C; en el exterior la humedad relativa fue de 33.50 % y en el invernadero fue de 32.83 %. Cuando se registró el valor mínimo de humedad relativa en el módulo experimental, se observó que inmediatamente los registros se elevaron en el interior de este; pero en la madrugada los menores valores de humedad relativa se presentaron en el módulo experimental. En el módulo de control, la disminución de humedad relativa solo se registró durante las cuatro primeras horas de la madrugada, a las 04:00 h los valores del interior del módulo de control sobrepasaron los del exterior.

Se grafica a continuación las temperaturas del día en que se registró el mayor valor de humedad para la prueba VIII, este día fue el 10 de diciembre:

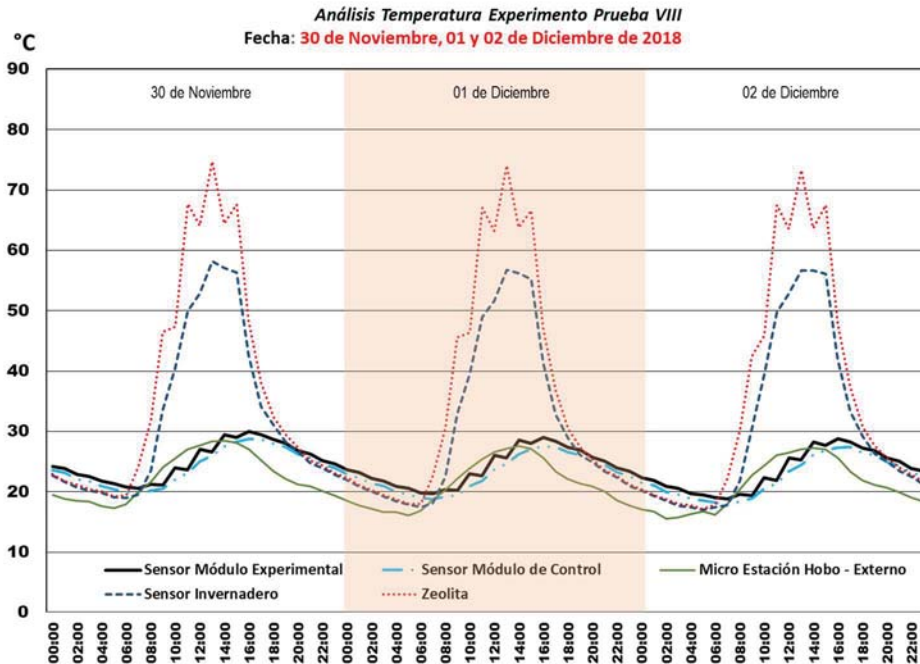


Fig. 178. Análisis temperatura prueba VIII, día 1 de diciembre de 2018. Fuente: Propia.

Para las primeras horas del 1 de diciembre, los valores de las temperaturas de las variables en pruebas anteriores presentaban pocas diferencias en sus trayectorias, durante este día se observaron separaciones marcadas en sus valores; las líneas más cercanas fueron las del sensor de contacto de la zeolita y del invernadero. Para ese momento el menor valor de temperatura se presentó en el exterior. En el transcurso de la mañana los valores se separaron y se encaminaron hacia la temperatura máxima, así mismo, el sensor de contacto de la zeolita mostró los valores más altos del día, seguido por los valores del invernadero, en el transcurso de esas horas la temperatura en ambos módulos fue menor que el exterior. Después de que se registrara la temperatura máxima en el exterior, los valores descendieron y la temperatura en ambos módulos fue superior a la del ambiente, este fenómeno se sostuvo para el resto de la noche.

Entre las 00:00 h y las 06:00 h, el promedio de datos para el exterior fue 17.08 °C; en el módulo de control, 20.86 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 19.67°; en el invernadero, 19.38 °C, y en el módulo experimental, 21.73 °C. A las 05:00 h se presentó el valor mínimo en el exterior con 16.03 °C, a las 06:00 h ocurrió lo mismo en el sensor de contacto de la zeolita (17.96 °C) y en el invernadero (17.48 °C). La temperatura en el módulo de control fue 3.78 °C más alta que en el exterior; en el módulo experimental la temperatura fue 4.65 °C más elevada que el exterior. En este mismo rango de tiempo, la humedad relativa presentó el máximo valor con 90.50 % a las 05:00 h; en el módulo experimental la humedad fue de 63.89 %; en el módulo de control, de 73.97 %; en el invernadero, 59.74 %. La humedad relativa se redujo en el módulo experimental un 26.61 % con respecto al exterior, mientras que en el módulo de control hubo una reducción de 16.53 %.

En el rango de tiempo de las 07:00 h hasta las 12:00 h, el promedio de temperaturas en el exterior fue 22.82 °C; en el módulo de control, 20.63 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 45.88 °C; en el invernadero, 35.58 °C, y en el módulo experimental, 21.98 °C. A las 07:00 h se

presentaron las máximas temperaturas en el módulo de control y en el módulo experimental con 18.75 y 19.68 °C respectivamente. A partir de las 07:00 h se observó cómo la línea de las temperaturas exteriores incrementó sus valores, mientras las líneas de ambos módulos quedaron por debajo de esta. En el módulo de control la temperatura estuvo 2.19 °C más baja que el exterior; en el módulo experimental la temperatura fue de 0.84 °C inferior que el ambiente.

Es importante mencionar que a las 08:00 h se presentó el máximo valor de humedad relativa para el módulo de control; pero solo hasta las 11:00 h se registró este máximo valor en el módulo experimental. En el transcurso de este tiempo la humedad relativa fue más alta en el módulo experimental, seguida por los valores del módulo de control, después del exterior y finalmente de los valores del invernadero.

Entre las 13:00 h y las 18:00 h, el promedio de temperaturas exterior fue 25.49 °C; en el módulo de control, 26.58 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 53.14 °C; en el invernadero, 45.22 °C, en el módulo experimental, 27.82 °C. A las 13:00 h se presentaron los máximos valores de temperatura en el sensor de contacto de la zeolita con 74.08 °C, y en el invernadero con 56.72 °C. A las 14:00 h se encontró el máximo valor de temperatura en el exterior con 27.53 °C. A las 16:00 h en el módulo experimental y en el módulo de control se presentaron los máximos valores de temperatura con 29.02 °C y 27.47 °C. En la gráfica se observó que a las 14:00 h se cruzaron las líneas de temperatura exterior con las de los módulos y se posicionaron de tal forma que la temperatura en el exterior se situó por debajo de los valores de los módulos. Los valores de temperatura en el módulo experimental fueron 2.33 °C más altos que el exterior. En el caso del módulo de control la temperatura estuvo 1.09 °C arriba del ambiente exterior. En las primeras horas de la tarde se presentaron los valores mínimos de humedad relativa para el exterior, al finalizar la tarde se encontraron los mínimos valores en ambos módulos. A las 16:00 h, cuando se registró el mínimo valor de humedad relativa en el módulo de control, las líneas de temperatura cambiaron de posición y los valores de humedad relativa del exterior se situaron con los valores más altos. Desde las 18:00 h y hasta la madrugada es apreciable la reducción de humedad relativa en el módulo experimental. Los valores de humedad del invernadero se mantuvieron como los más bajos dentro del rango analizado.

Entre las 19:00 h y las 23:00 h, las temperaturas exteriores registraron los valores más bajos comparados con el resto de variables evaluadas. El promedio en el exterior fue 20.20 °C; en el módulo experimental, 25.41 °C, y en el módulo de control, 24.68 °C. Para este día en el módulo experimental transcurrieron cinco horas en que la temperatura fue más baja que en el exterior, exactamente de 09:00 h y 13:00 h. A las 11:00 h se presentó el valor máximo de reducción de temperatura en el módulo, con una diferencia de 2.75 °C que favoreció al módulo experimental. A las 19:00 h se presentó una diferencia máxima de 5.54 °C donde la temperatura exterior estuvo por debajo de la temperatura del módulo experimental,

En el módulo de control pasaron ocho horas donde la temperatura fue más baja que en el exterior, esto ocurrió entre las 08:00 h y 15:00 h. La diferencia máxima entre el exterior y el interior fue de 3.59 °C a las 11:00 h. A las 19:00 h la temperatura al interior del módulo fue más alta que el exterior por 4.79 °C de diferencia.

4.16 Análisis resultados temperatura proceso experimental Prueba IX

Fecha inicio de análisis: 5 de diciembre de 2018

Fecha final: 5 de enero de 2019

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos

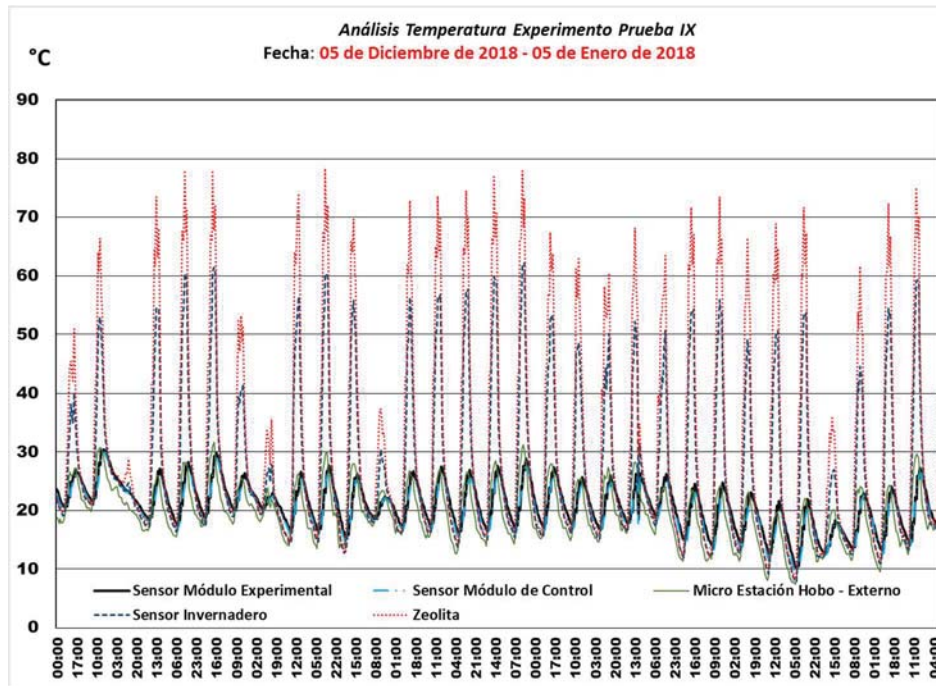


Fig. 179. Análisis temperatura prueba IX. Fuente: Propia.

La prueba IX abarca el primer mes de invierno; la evolución de temperaturas para esta prueba se asemejó a análisis anteriores. La diferencia radicó en que los valores de temperatura para todas las variables fueron menores que, por ejemplo, agosto o septiembre. En cuanto a las variables en las madrugadas, las líneas se apreciaron muy cercanas, después de registrar las temperaturas mínimas las líneas se separaron y ascendieron hasta llegar a su máximo valor; para ese momento las diferencias entre las variables fueron muy apreciable y las temperaturas en el exterior estuvieron más altas que en ambos módulos. En la tarde y en la noche, sucedió lo contrario, las temperaturas en ambos módulos fueron más altas que en el exterior. En las horas del día, los valores más altos de temperatura se detectaron en el invernadero y en el sensor de contacto de la zeolita.

En diciembre la temperatura promedio del exterior fue 19.61 °C; en el módulo de control, 20.19 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 29.84 °C; en el invernadero, 26.91 °C, y en el módulo experimental, 20.86 °C. Con base en estos promedios, la temperatura en el módulo de control fue 0.58 °C más alta que en el exterior; mientras que en el módulo experimental la temperatura fue 1.25 °C más elevada que el exterior.

El máximo valor registrado en el exterior fue 31.63 °C el 10 de diciembre a las 14:00 h, para ese momento las temperaturas fueron más bajas en el módulo experimental con 29.33 °C y en el módulo de control con 27.55 °C. En el sensor de la zeolita la temperatura fue de 67.75 °C y en el invernadero fue de 61.46 °C. Para ese momento la humedad relativa en el exterior fue 33.50 %; en el invernadero se registró una humedad de 12.41 %; en el módulo experimental la humedad relativa fue más alta con respecto al exterior: 52.87 %, y en el módulo de control la humedad relativa fue más baja con respecto al módulo experimental: 50.14 %.

El día 14 de diciembre a las 14:00 h, en el sensor de contacto de la zeolita la máxima temperatura registrada fue 78.38 °C, para ese momento en el invernadero estaba en 60.32 °C, en el exterior, 29.65 °C. En el módulo de control la temperatura fue 23.71 °C, es decir, 5.94 °C más baja que el exterior; en el módulo experimental la temperatura fue 22.98 °C, 6.67 °C más baja que el ambiente exterior. Aunque la temperatura en la superficie de la zeolita y en el invernadero fue muy alta, la humedad relativa en el módulo experimental fue más alta que en el exterior: 14 %. En el módulo experimental la humedad relativa estuvo 44.64 % más alta que en el ambiente; y en el módulo de control la humedad fue 22.38 % más alta que el exterior.

El 21 de diciembre a las 15:00 h se presentó el máximo valor en el invernadero: 62.18 °C; en ese momento el sensor de contacto de la zeolita registró 73.25 °C. La temperatura en el exterior fue 29.88 °C; en el módulo experimental fue 26.91 °C, 2.97 °C más baja que en el exterior; y en el módulo de control la temperatura fue de 27.06 °C, 0.15 °C menos que en el exterior.

Con respecto a la humedad relativa, ocurrió lo mismo que en la descripción anterior, a pesar de tener un registro bajo en el exterior y altas temperaturas en el sistema de deshumidificación, la humedad en el módulo experimental fue más alta que en el exterior por factor aproximado del 20 % y esto mismo sucedió para el módulo de control.

El 6 de diciembre se presentaron los máximos valores de temperatura para el módulo de control: 29.92 °C a las 17:00 h, y en el módulo experimental: 30.47 °C a las 16:00 h. La temperatura exterior en ese momento fue 28.38 °C; en el invernadero, 35.85 °C, y en el sensor de contacto de la zeolita, 34.35 °C. A esta hora de la tarde los valores de temperatura se incrementaron en ambos módulos y la temperatura del exterior se posicionó como la menor. Al finalizar la tarde la humedad relativa del exterior aumentó, y a partir de las 16:00 h los valores de humedad relativa en el módulo experimental disminuyeron paulatinamente; en el módulo de control la humedad relativa estuvo por encima del módulo experimental alrededor del 2 %.

El 31 de diciembre se presentaron los valores mínimos de temperatura para las cinco variables del experimento. La temperatura mínima en el sensor de contacto de la zeolita fue 8.29 °C a las 05:00 h; en el invernadero fue 7.80 °C y en el exterior fue 7.38 °C a las 06:00 h. A las 07:00 h se presentaron las máximas en el módulo de control con 8.72 °C y en el módulo experimental con 10.09 °C. La temperatura en el módulo experimental estuvo 2.62 °C por arriba del exterior; y en el módulo de control la temperatura fue 1.36 °C más cálida que el ambiente. Las temperaturas registradas para ese momento en el sensor de contacto de la zeolita y en el invernadero tuvieron valores muy cercanos a los que se registraron en el exterior. La humedad relativa en el exterior fue de 76.83 %; en el módulo experimental se registró una disminución de humedad del 20.6 % con respecto al exterior; el porcentaje de disminución en el módulo de control fue de 7.99 %; la humedad relativa más baja fue registrada en el invernadero: 43.06 %.

A continuación, se hace el análisis de temperaturas del día en que se presentó el valor mínimo de humedad relativa exterior que fue el 14 de diciembre con un valor de 14 %.

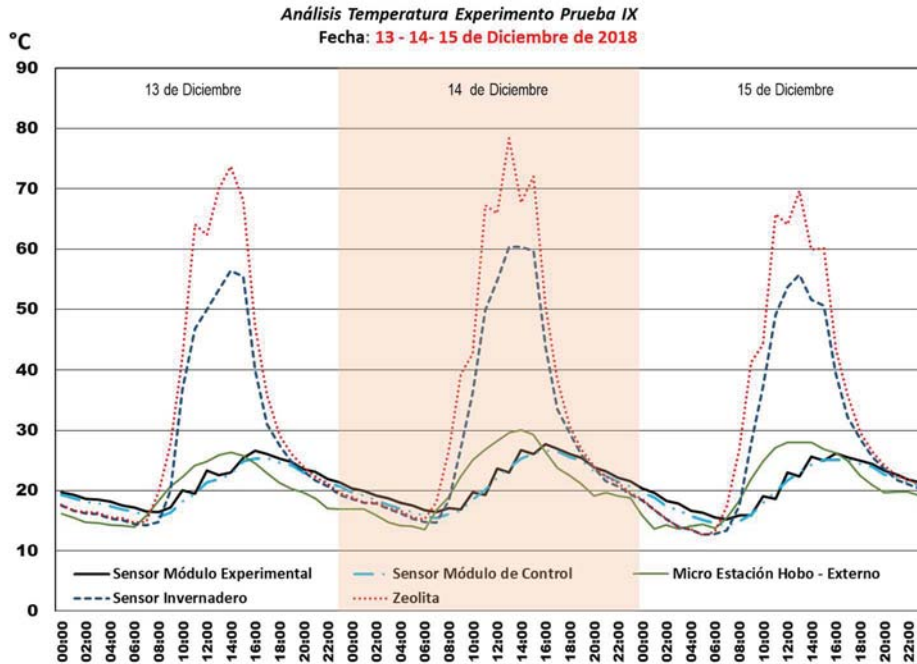


Fig. 180. Análisis temperatura prueba IX, día 15 de diciembre de 2018. Fuente: Propia.

El desempeño de las temperaturas para el día 14 de diciembre evidenció una trayectoria descendente en las primeras horas del día, se pudo observar que la línea de ambiente exterior contuvo los valores con menos temperatura; las variables restantes presentaron valores muy similares, por ello las líneas estuvieron muy cercanas. A las 06:00 h se registraron los valores mínimos de temperatura en el exterior y en las otras variables, a partir de allí todos los valores ascendieron y llegaron a su máximo en las horas de la tarde. En las primeras horas de la mañana la temperatura en el exterior fue más alta que en ambos módulos, y las variables que tuvieron la temperatura más alta se registraron en el invernadero y en el sensor de contacto.

A las 16:00 h la temperatura exterior descendió y los datos de ambos módulos tuvieron mayores temperaturas que el exterior; en el invernadero y en el sensor de contacto de la zeolita los datos de temperatura superaron por número a todas las variables. En la noche las temperaturas más bajas fueron las registradas en el exterior; a las 19:00 h los valores en el invernadero y en el sensor de contacto de la zeolita descendieron, también sus valores fueron más bajos que en ambos módulos. Al finalizar la jornada las temperaturas en ambos módulos se registraron como las más altas del día.

El promedio de temperaturas para este día en el exterior fue 20.99 °C; en el módulo experimental, 20.81 °C; en el módulo de sensor de contacto de la zeolita, 34.63 °C; en el invernadero, 29.87 °C, y en el módulo experimental, 21.52 °C. Basados en los promedios la temperatura en el módulo de control estuvo 0.81 °C más baja que en el exterior, y el módulo experimental registró 0.53 °C más que el exterior.

Entre las 00:00 h y las 06:00 h, el rango de temperatura promedio para el exterior fue 15.19 °C; en el módulo de control, 17.74 °C, es decir, 2.55 °C más alta que el exterior. En el módulo experimental fue 18.65 °C, 3.46 °C más alta que el ambiente. La temperatura en el sensor de contacto de la zeolita fue 17.38 °C y en el invernadero fue 16.79 °C. A las 06:00 h se presentó el mínimo valor de temperatura con 13.53 °C; esto también sucedió en el sensor de contacto de la zeolita con 15.25 °C. Entre las 03:00 h y las 05:00 h se presentó el máximo valor de humedad relativa con 84 %; para ese momento la humedad en el módulo experimental fue 66.84 %, es decir, 17.16 % por debajo del exterior; en el módulo de control la humedad fue 75.06 %, 8.94 % por debajo del ambiente. La máxima absorción de humedad, con respecto al exterior, se presentó en el módulo experimental a las 01:00 h, esta diferencia fue 17.82 %. En el módulo de control la máxima absorción de humedad con respecto al exterior se presentó a las 03:00 h con una diferencia de 9.30 %. A las 06:00 h también se detectaron los máximos valores de humedad relativa para el módulo de control, para el invernadero, y en el módulo experimental.

Desde las 07:00 h a las 12:00 h el rango promedio de temperaturas en el exterior fue 23.02 °C; en el módulo de control, 18.15 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 43.33 °C; en el invernadero, 33.49 °C, y en el módulo experimental, 18.83 °C. A las 07:00 tuvieron lugar los valores mínimos de temperatura en el invernadero con 14.65 °C, en el módulo de control con 16.48 °C y en el módulo experimental con 16.48 °C. Para este periodo el módulo de control tuvo temperaturas 4.84 °C más bajas que el exterior; y en el módulo experimental las temperaturas fueron 4.19 °C más bajas que el ambiente. En el exterior, en las horas de la mañana los valores de humedad relativa descendieron para todas las variables evaluadas. Los mayores valores de humedad relativa se presentaron en el módulo experimental, seguidos por los del módulo de control, en tercer lugar, se ubicaron los valores del exterior y por último los datos del invernadero y del sensor de contacto de la zeolita.

De las 13:00 h a las 18:00 h, el rango promedio de temperatura exterior fue de 26.93 °C; en el módulo de control, 25.62 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 56.27 °C; en el invernadero, 47.84 °C, y en el módulo experimental, 26.10 °C. A las 13:00 h se presentó el máximo valor de temperatura en el sensor de contacto de la zeolita con 78.38 °C, y en el invernadero con 60.32 °C. A las 14:00 h se identificó el máximo valor de temperatura en el exterior con 30.10 °C. Al finalizar la tarde a las 16:00 h se presentó el máximo valor de temperatura en el módulo de control con 26.56 °C y en el módulo experimental con 27.75 °C. En la tarde los valores de humedad relativa descendieron; a las 13:00 h cuando se presentó el máximo valor de temperatura para el ambiente exterior, se registró el valor mínimo de humedad relativa. El valor mínimo de humedad relativa en el módulo de control se presentó a las 14:00 h, y en el módulo experimental esto ocurrió a las 16:00 h (hora del valor máximo de temperatura).

Para este rango de tiempo los mayores valores de humedad relativa se mantuvieron en el módulo experimental, seguido por el módulo de control, en tercer lugar, los valores del ambiente exterior y por último los valores del invernadero y del sensor de contacto de la zeolita. A las 18:00 h el orden de las líneas comenzó a cambiar y los valores en el módulo experimental descendieron hasta ser superados por el módulo de control; al finalizar la noche la humedad relativa en el exterior tuvo los valores más altos, seguidos por el módulo de control, en tercer lugar, se ubicó el módulo experimental y los menores valores se presentaron en el invernadero y en el sensor de contacto de la zeolita.

Entre las 18:00 h y las 23:00 h el promedio de temperatura en el ambiente exterior fue 19.53 °C; en el módulo de control, 22.54 °C; en el sensor de contacto de la zeolita, 22.79 °C; en el invernadero, 22.28 °C, y en el módulo experimental, 23.26 °C. En el módulo de control la temperatura estuvo 3.01 °C más elevada que en el exterior; en el módulo experimental la temperatura fue 3.73 °C más alta que el exterior. Entre las 07:00 y las 15:00 se presentó una disminución de temperatura en el módulo experimental con respecto al exterior; la mayor diferencia fue de 7.49 °C y se presentó a las 11:00 h, la menor diferencia fue de 0.35 °C y se evidenció a las 07:00 h.

En el módulo de control transcurrieron nueve horas en que la temperatura fue más baja que en el exterior, esto se sucedió entre las 07:00 h y las 15:00 h; la máxima diferencia se presentó a las 10:00 h con un valor de 6.68 °C, la diferencia mínima fue de 1.43 °C a las 07:00 h.

4.17 Análisis humedad absoluta y diagrama psicrométrico proceso experimental Prueba II

Fecha inicio de análisis: 5 de mayo de 2018

Fecha final: 3 de junio de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos

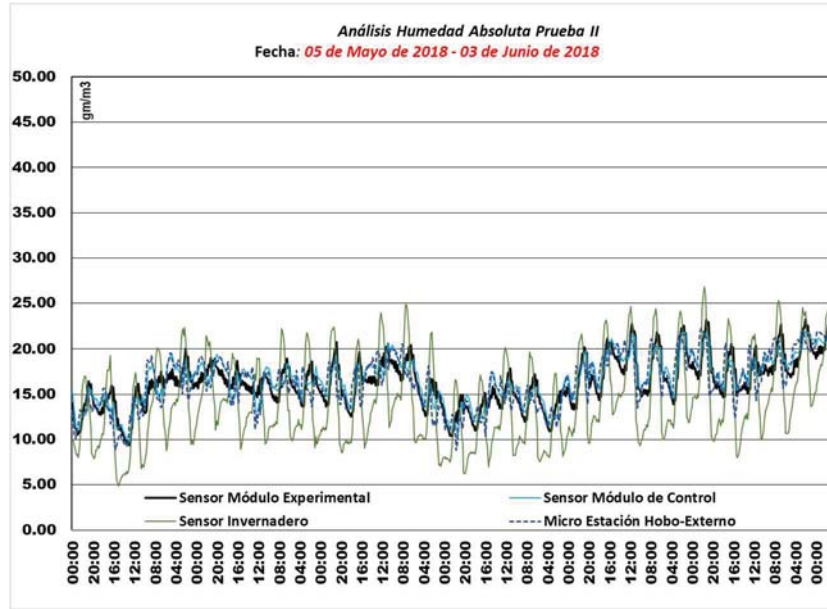


Fig. 181. Análisis humedad absoluta prueba II. Fuente: Propia.

Los valores mínimos y máximos de humedad absoluta calculados para la prueba se presentaron en el invernadero. Las líneas del sensor del módulo experimental, del módulo de control y del exterior, por algunos momentos se observaron muy cercanas, sin embargo, en las madrugadas se separaron. El valor promedio de humedad absoluta en el exterior de 16.35 gr/m^3 , en el módulo de control fue 16.67 gr/m^3 , en el invernadero alcanzó los 14.215 gr/m^3 , y en el módulo experimental llegó a los 16.35 gr/m^3 , mismo valor que el exterior.

La máxima cantidad de vapor que se redujo en el módulo experimental durante la *Prueba II*, con respecto al exterior (20.57 gr/m^3), fue 5.85 gr/m^3 , este valor se presentó el 31 de mayo a las 08:00 h. El valor mínimo de gramos de agua que se redujo en esta variable, con respecto al exterior, fue 0.02 gr/m^3 , registrado el día 4 de junio a las 11:00 h. En conclusión, el valor promedio de humedad absoluta que se redujo en el módulo experimental con respecto al exterior fue 1.52 gr/m^3 ; en total fueron 400 h, de 739 h, (horas totales de la prueba) donde la humedad absoluta fue menor.

En el módulo de control, el máximo valor de reducción de humedad absoluta fue 4.28 gr/m^3 , se presentó también el 31 de mayo a las 08:00 h cuando la humedad absoluta exterior llegó a los 20.57 gr/m^3 . El valor mínimo de reducción de humedad absoluta en esta variable con respecto al exterior (19.96 gr/m^3) fue 0.01 gr/m^3 , la cual se presentó el día 18 de mayo a las 00:00 h. En el módulo de control la reducción promedió 1.07 gr/m^3 . Para esta prueba en el módulo de control se obtuvieron 288 horas, de 739 horas totales, donde la humedad absoluta fue menor.

A las 00:00 h del 8 de mayo se presentó la máxima reducción de humedad absoluta en el invernadero con 9.48 gr/m^3 , por debajo de los valores del exterior (18.25 gr/m^3). El 20 de mayo a las 09:00 h se presentó la menor diferencia de humedad absoluta entre el invernadero y el exterior (12.63 gr/m^3), con 0.04 gr/m^3 , siendo más bajo para el invernadero. El valor promedio del registro de los datos, que estuvieron por debajo exterior, fue 4.52 gr/m^3 . En el invernadero se presentaron 511 horas, del total de 730 horas de la prueba, en que la humedad absoluta fue menor que el exterior.

Se grafican a continuación las condiciones de humedad absoluta para el día 18 de mayo de 2018, cuando se presentó la mayor humedad relativa de toda la prueba.

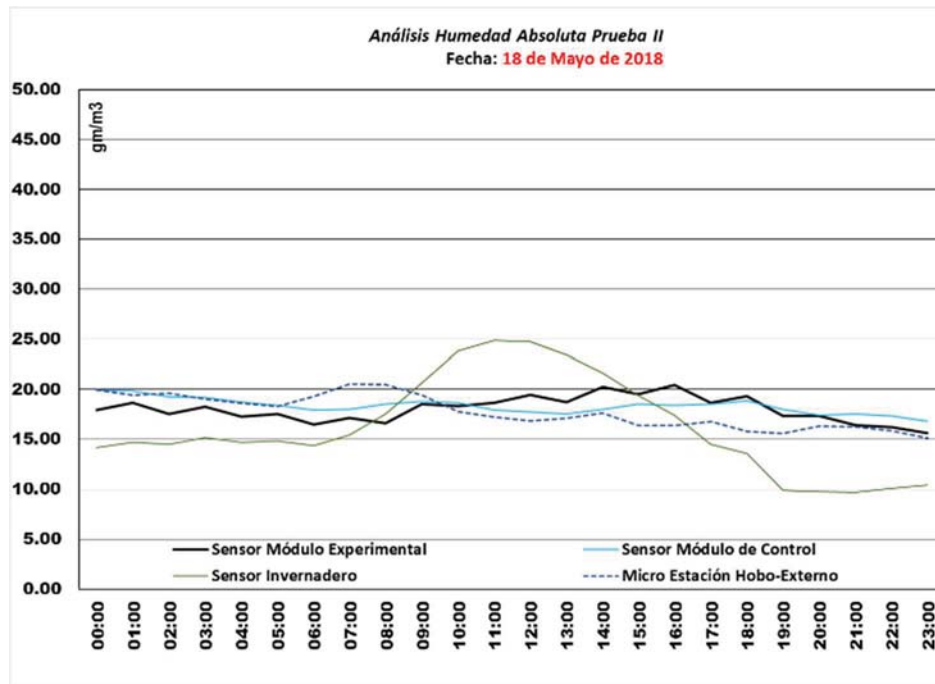


Fig. 182. Análisis humedad absoluta, 18 de mayo de 2018. Fuente: Propia.

De las 00:00 h a las 06:00 h se observó que la línea del invernadero tuvo los valores más bajos de humedad absoluta. Las líneas de ambiente exterior y el módulo de control estuvieron muy cercanas. A las 05:00 h los valores del ambiente exterior ascendieron y se presentó el máximo valor para esta variable con 20.52 gr/m^3 por una hora. La línea del módulo experimental no es continua, presentó unos pequeños picos en las horas impares; este fenómeno ocurrió cuando el ventilador estuvo encendido por media hora. En el invernadero se presentó el valor mínimo de humedad absoluta con 14.35 gr/m^3 a las 06:00 h. Para este periodo, el promedio de humedad absoluta en el exterior fue 19.18 gr/m^3 , en el módulo de control alcanzó los 19.05 gr/m^3 , mientras que en el invernadero llegó a los 14.63 gr/m^3 , y en el módulo experimental a los 17.68 gr/m^3 .

De las 06:00 h a las 12:00 h, los valores en el invernadero ascendieron y llegaron a su máximo a las 11:00 h; después de alcanzar el valor máximo de humedad absoluta en el exterior los valores descendieron y a las 10:00 h se cruzaron con la línea del módulo experimental para posicionarse como la variable de menor humedad absoluta. A las 08:00 h se presentó el valor mínimo en el módulo experimental con 16.62 gr/m^3 ; en el módulo de control el valor mínimo

se dio a las 07:00 h con 18.02 gr/m^3 . Desde las 09:00 h hasta las 15:00 los valores más altos de humedad absoluta se encontraron en el invernadero, es decir, en este tiempo la zeolita estuvo totalmente saturada y no absorbió la humedad del aire.

A las 15:00 h la línea del invernadero se cruzó con las líneas de los valores del módulo experimental, del módulo de control y del ambiente. A las 17:00 h siguió descendiendo y a las 19:00 h estableció una diferencia importante, comparada con las otras variables que la posicionaron con valores de humedad absoluta más baja. A las 21:00 h la humedad absoluta en el módulo experimental se situó debajo de los valores del módulo de control y del exterior. En el módulo experimental se monitorearon diez horas en que la humedad absoluta fue menor que en el exterior, esto ocurrió entre las 00:00 h y las 09:00 h. Comparando el módulo de control con el exterior, se presentaron seis horas donde la humedad absoluta fue menor en el módulo. En el invernadero se registraron 16 horas en que los valores de humedad absoluta fueron menores que en el exterior, esta situación se presentó de las 00:00 h a las 08:00 h y entre las 17:00 h y las 23:00 h.

Análisis Diagrama Psicrométrico – Prueba II

Día de análisis: 18 de mayo de 2018, día de mayor humedad relativa en el exterior

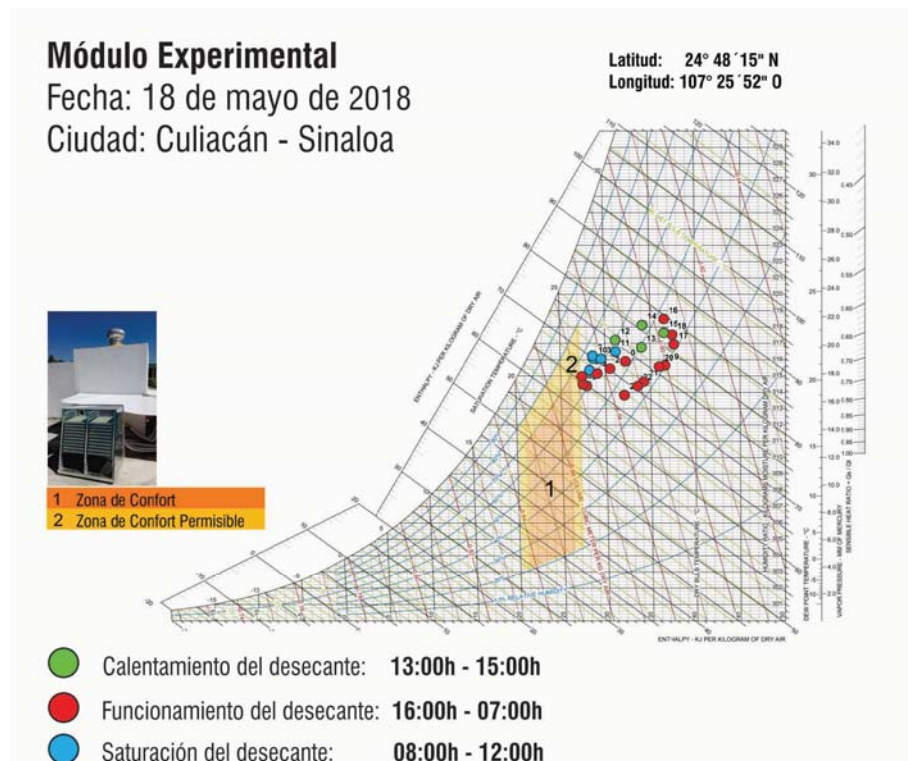


Fig. 183. Análisis diagrama psicrométrico, módulo experimental prueba II. 18 de mayo de 2018. Fuente: Propia.

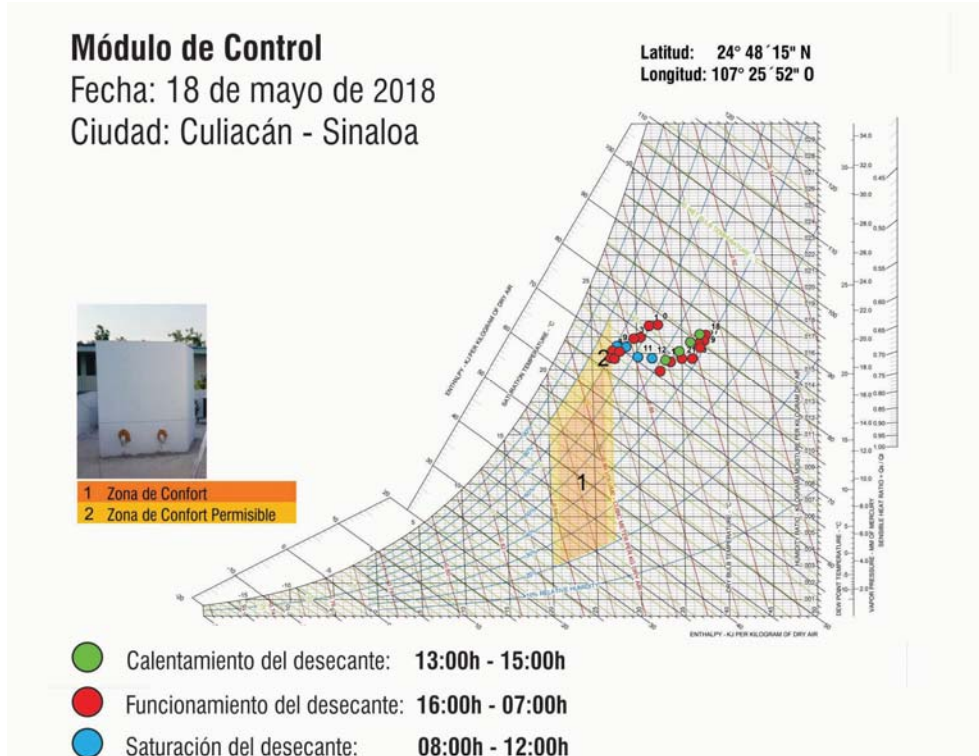


Fig. 184. Análisis diagrama psicrométrico, módulo de control prueba II. 18 de mayo de 2018. Fuente: Propia.

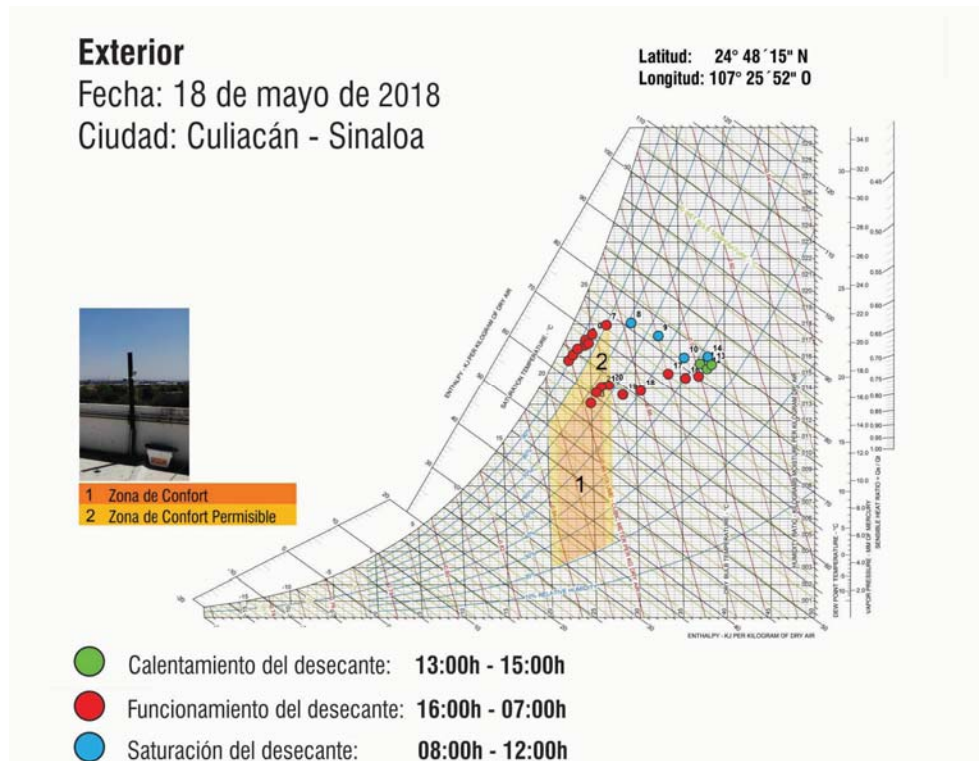


Fig. 185. Análisis diagrama psicrométrico, exterior prueba II. 18 de mayo de 2018. Fuente: Propia.

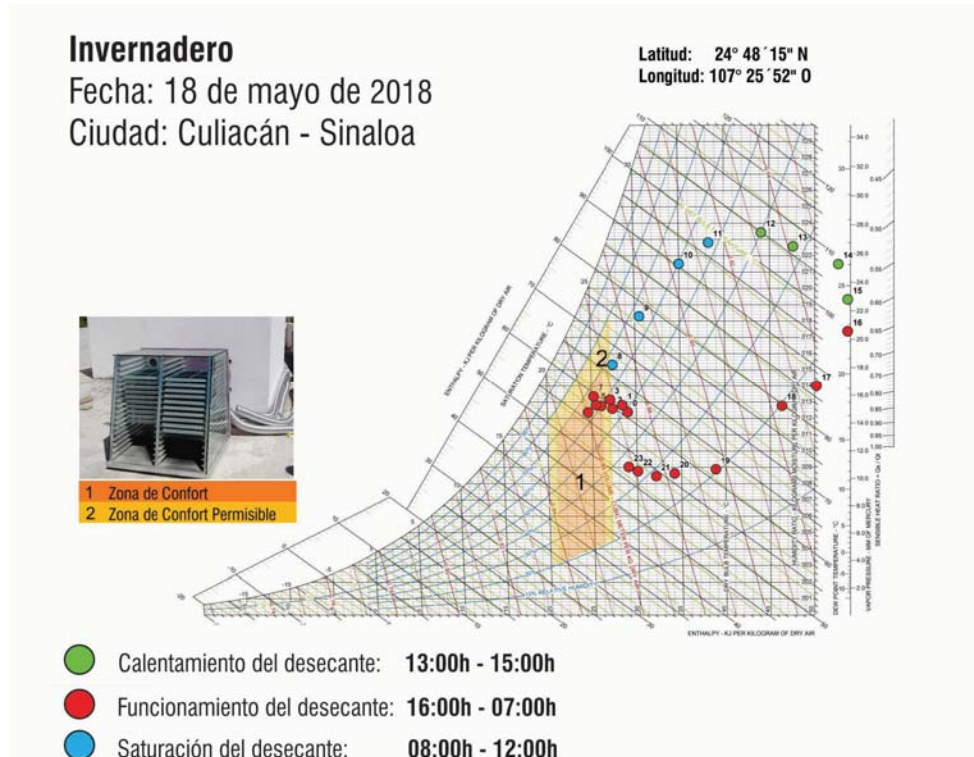


Fig. 186. Análisis diagrama psicrométrico, invernadero prueba II. 18 de mayo de 2018. Fuente: Propia.

Para el día 18 de mayo de 2018, se grafican los puntos de temperatura y humedad relativa con el fin de verificar si las variables evaluadas se encontraron dentro de los rangos de confort. En el exterior se observaron solo tres puntos dentro de los límites de la zona de confort, estos puntos correspondieron a las 21:00 h, 22:00 h y 23:00 h.

Entre las 6:00 h y las 08:00 h, en el módulo experimental se apreciaron tres puntos en la línea límite de la zona de confort. En el módulo de control se observaron dos puntos que también se ubicaron en el límite de la zona de confort, a las 06:00 h y a las 07:00 h. En el invernadero se presentaron cuatro horas dentro de la zona de confort: desde las 04:00 h hasta las 07:00 h; sin embargo, el resto del día los puntos se dispersaron en la zona superior del diagrama.

4.18 Análisis humedad absoluta y diagrama psicrométrico proceso experimental Prueba III

Fecha inicio de análisis: 5 de junio de 2018

Fecha final: 5 de julio de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos

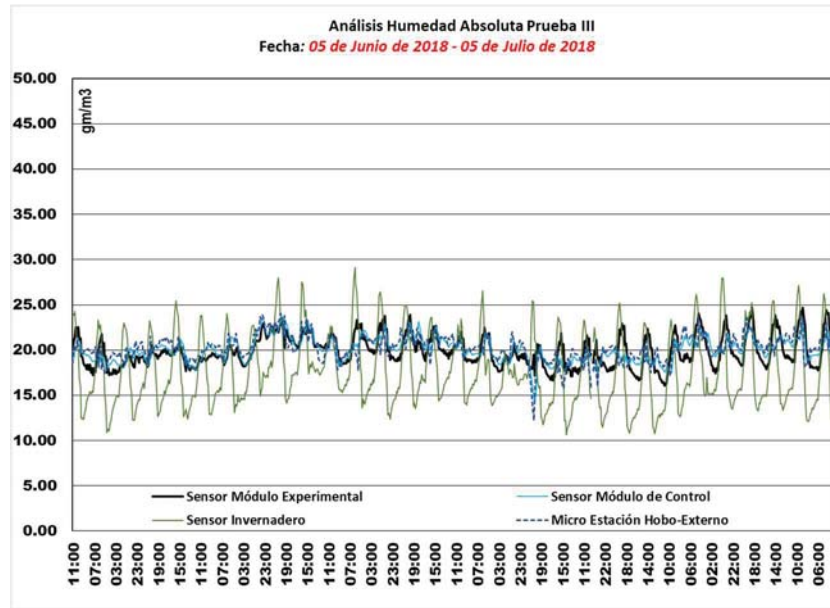


Fig. 187. Análisis humedad absoluta prueba III. Fuente: Propia.

Para la prueba III se observó el incremento de los valores de humedad absoluta para todas las variables evaluadas. Los máximos y los mínimos valores de la prueba se concentraron en la línea que muestra la trayectoria del invernadero. Las líneas del módulo experimental, el módulo de control y el exterior se encontraron en el centro de la gráfica y evidenciaron pequeñas variaciones entre ellas, variaciones sujetas al valor de la temperatura y a la humedad relativa; los valores mínimos estuvieron entre los 18.0 gr/m³ y los 20.0 gr/m³; los valores máximos se hallaron entre 21.0 y 25.0 gr/m³.

En el exterior el promedio de humedad absoluta fue 20.23 gr/m³, el valor máximo alcanzó los 24.10 gr/m³ y el mínimo llegó a los 20.23 gr/m³. En el módulo de control el promedio fue 23.74 gr/m³ con valor máximo de 20.05 gr/m³ y con un valor mínimo de 14.22 gr/m³. En el módulo del invernadero el valor promedio fue 17.64 gr/m³, con un valor máximo de 29.16 gr/m³ y el valor mínimo fue 10.65 gr/m³. Para el módulo experimental el valor promedio fue 19.86 gr/m³, el valor máximo fue 24.73 gr/m³ y el mínimo, 16.05 gr/m³. Según estos promedios, la humedad absoluta en el módulo experimental estuvo 0.37 gr/m³ por debajo de los valores del exterior; con respecto al módulo de control, el módulo experimental tuvo una humedad absoluta 0.19 gr/m³ más baja.

El módulo de control presentó 0.18 gr/m³ menos que el exterior, según los promedios. Al comparar los valores máximos, el mayor fue el módulo experimental que fue superior en 0.63 gr/m³ al exterior y 0.99 gr/m³ al módulo de control.

El valor promedio de disminución de humedad absoluta, que se registró en el módulo experimental con respecto al exterior, fue 1.30 gr/m³. El valor máximo que disminuyó con el respecto al exterior fue 4.24 gr/m³ y el menor 0.0021 gr/m³. Se contabilizaron el número de horas en que la humedad absoluta fue menor que en el exterior y el resultado fue 479 horas, de 718 horas que duró la prueba.

En el módulo de control el promedio de reducción de humedad absoluta, comparada con el exterior, fue de 0.69 gr/m³; la máxima reducción tuvo un valor de 2.57 gr/m³ y la mínima reducción fue de 0.01 gr/m³. Este módulo presentó 464 horas en que la humedad absoluta fue menor. En el caso del invernadero, el valor promedio de reducción de humedad absoluta con respecto al exterior fue de 4.45 gr/m³. El máximo valor reducido fue de 8.92 gr/m³ y el valor mínimo fue 0.01 gr/m³. En total, fueron 538 horas en que la humedad absoluta del invernadero fue inferior a la exterior.

A continuación, se grafican los valores de humedad absoluta para el día 15 de junio, día en que se presentó el mayor valor de humedad relativa de la prueba. De acuerdo con los datos de humedad relativa, analizados hace unos capítulos, se comentó que desde las 00:00 hasta las 06:00 h se registró el máximo valor de precipitación para el mes de junio con 72.70 mm. Los valores de humedad absoluta para el rango de tiempo mencionado fueron menores en el invernadero, seguidos por el exterior, y con los mayores valores se encontraron los módulos. Para ese momento el promedio de humedad absoluta exterior fue de 19.16 gr/m³; el módulo experimental la humedad se ubicó en 1.59 gr/m³ por encima de esta última y el módulo de control se ubicó con 1.31 gr/m³ por arriba del exterior.

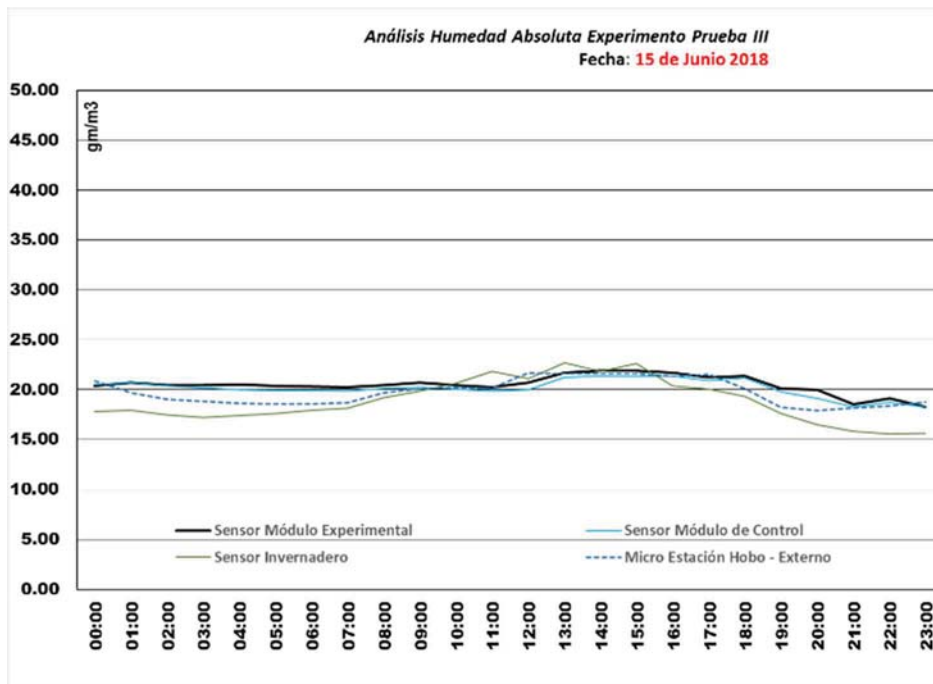


Fig. 188. Análisis humedad absoluta, 15 de junio de 2018. Fuente: Propia.

A las 10:00 h los valores de humedad absoluta del invernadero ascendieron y sobrepasaron las líneas de humedad de ambos módulos y del exterior, situándose como la variable con más alta humedad absoluta. Desde las 11:00 h hasta las 13:00 h los valores de la humedad en el exterior sobrepasaron los valores de ambos módulos y la línea del módulo de control se situó por debajo de todas las variables. A las 13:00 h se presentó el máximo valor de humedad absoluta en el invernadero con 22.70 gr/m^3 . A las 16:00 h la línea del invernadero descendió y cruzó las líneas de las variables evaluadas para situarse con los menores valores de humedad absoluta. A esa hora los valores del exterior cruzaron también las líneas de los módulos y se situaron debajo de estas. Para el resto de la tarde y la noche, los valores con humedad absoluta más alta fueron los del módulo experimental, seguidos por los módulos de control.

En conclusión, para este día el sistema de deshumidificación no funcionó, es importante precisar que el 14 de junio también se presentaron lluvias y la temperatura tuvo un promedio de $27.23 \text{ }^\circ\text{C}$. Se piensa entonces que esto afectó el desempeño de la zeolita, aunado a la lluvia de la mañana del 15 de junio; ya que, si bien los valores del invernadero estuvieron por debajo de los valores del exterior por 20 horas, no fue suficiente para que la absorción se transfiriera al módulo experimental. A lo largo del día, tan solo durante cuatro horas la humedad absoluta fue menor en el módulo experimental comparada con el exterior. El módulo de control tuvo nueve horas en que la humedad absoluta fue inferior al exterior, lo que se presentó entre las 10:00 h y las 15:00 h.

Análisis Diagrama Psicrométrico – Prueba III

Día de análisis: 15 de junio de 2018, día de mayor humedad relativa en el exterior

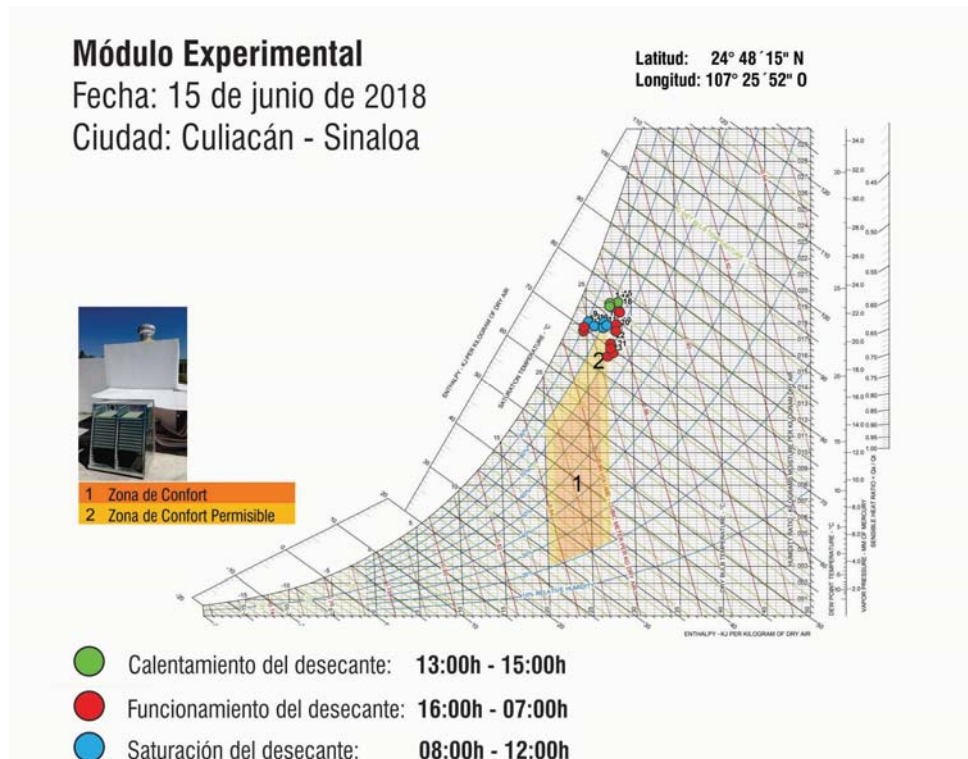


Fig. 189. Análisis diagrama psicrométrico, módulo experimental prueba III. 15 de junio de 2018. Fuente: Propia.

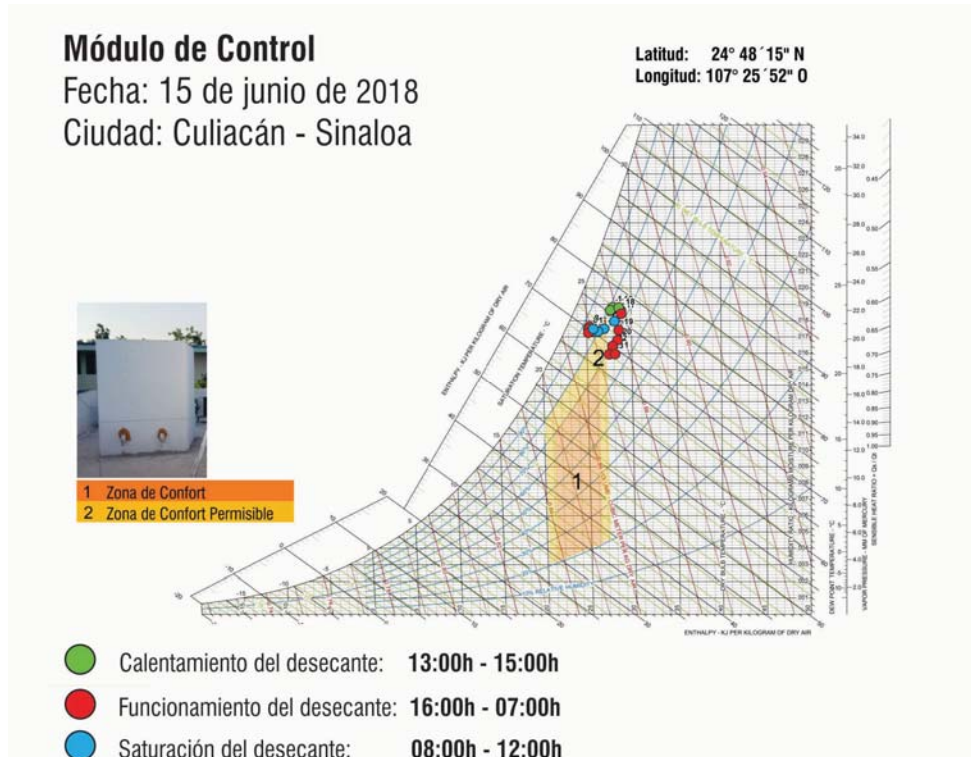


Fig. 190. Análisis diagrama psicrométrico, módulo de control prueba III. 15 de junio de 2018. Fuente: Propia.

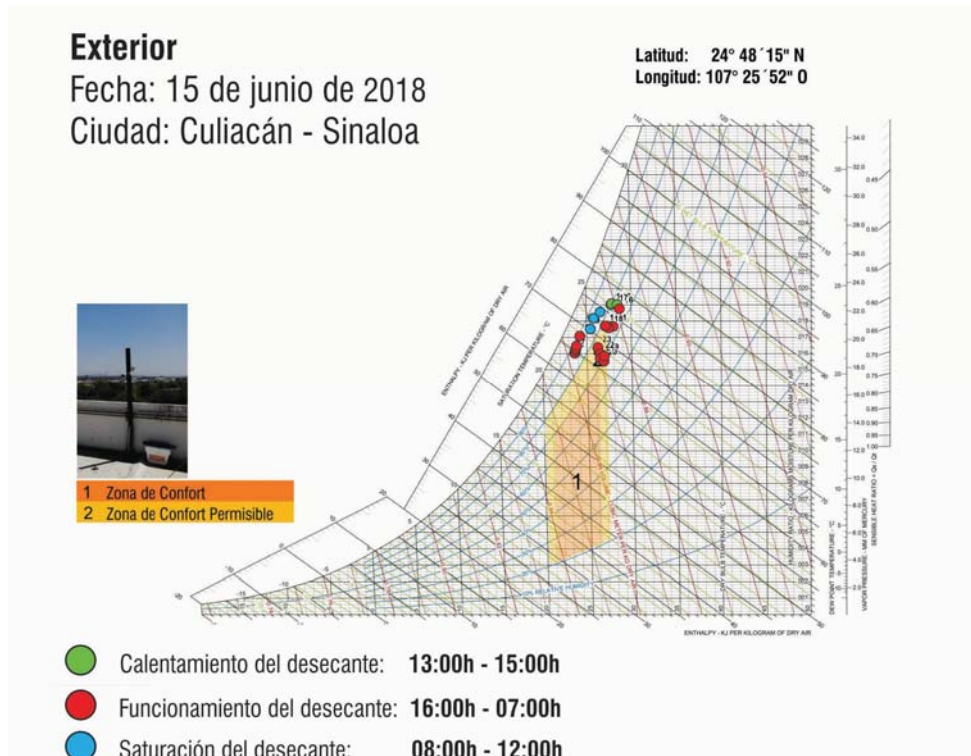


Fig. 191. Análisis diagrama psicrométrico, exterior prueba III. 15 de junio de 2018. Fuente: Propia.

Para esta prueba se evidenció que los puntos de temperatura y humedad relativa en el módulo experimental se concentraron en la parte superior derecha de la zona de confort, pero no se posicionaron dentro del recuadro. En el módulo de control, los puntos se apreciaron también en la parte superior derecha del recuadro de la zona de confort. En el exterior los puntos dentro de la zona de confort aparecieron entre las 19:00 h y 23:00 h. Según este diagrama, la estrategia que se requiere para ambos módulos está relacionada con la ventilación natural o mecánica y refrigeración por alta masa térmica.

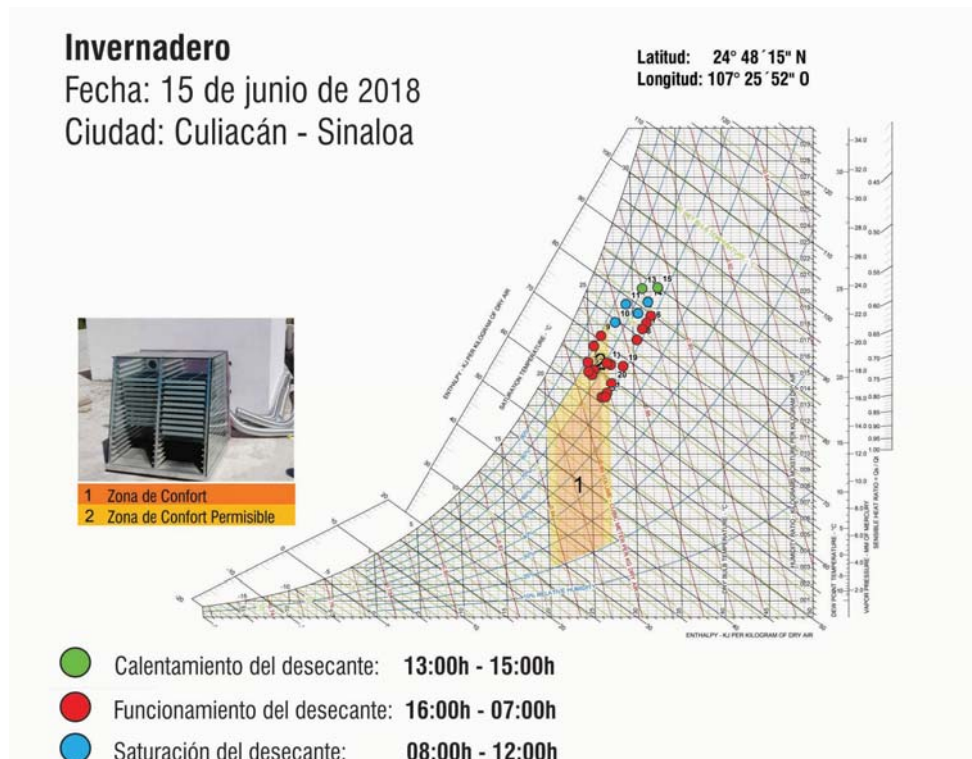


Fig. 192. Análisis diagrama psicrométrico, invernadero prueba III. 15 de junio de 2018. Fuente: Propia.

4.19 Análisis humedad absoluta y diagrama psicrométrico proceso experimental Prueba IV

Fecha inicio de análisis: 7 de julio de 2018
Fecha final: 6 de agosto de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos

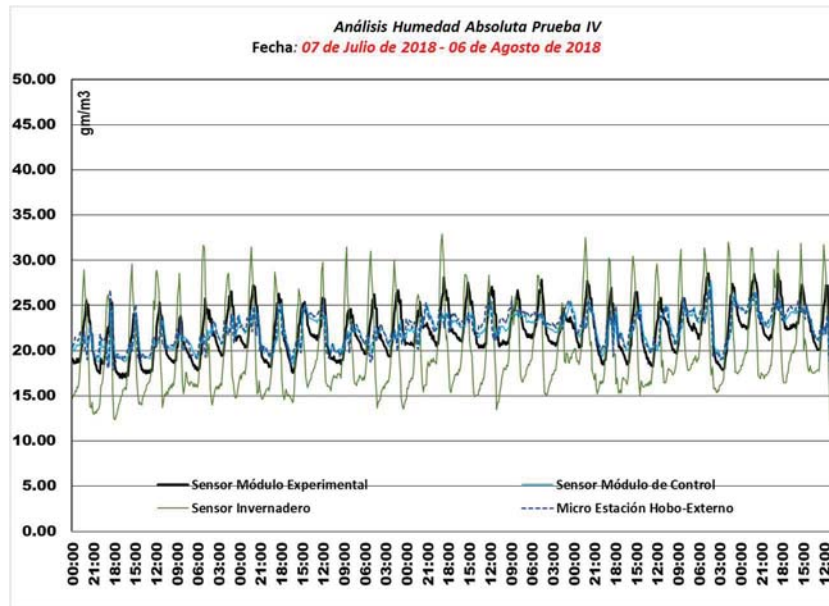


Fig. 193. Análisis humedad absoluta prueba IV. Fuente: Propia.

Para los meses de julio y agosto los valores de humedad absoluta fueron altos, con registros que van desde 12.35 gr/m³ hasta los 32.92 gr/m³; igual que en análisis anteriores las líneas del módulo experimental, del módulo de control y del exterior se encontraron en el centro de la imagen, en medio de los valores del invernadero. En algunos puntos se observó que los valores del módulo experimental se separaron de los del exterior y de los del invernadero, que dependen de la temperatura del momento, así como de la humedad relativa. Los picos más altos y los valores más bajos correspondieron a la línea del invernadero.

El valor promedio de la humedad absoluta exterior fue 22.33 gr/m³; en el módulo de control, 22.21 gr/m³; en el invernadero, 19.84 gr/m³, y en el módulo experimental, 22.11 gr/m³. De acuerdo con estos datos, la humedad absoluta en el módulo experimental estuvo 0.22 gr/m³ más baja que los valores exteriores. En el módulo de control la humedad absoluta fue 0.12 gr/m³ más baja que el exterior. En el invernadero la diferencia con el exterior fue 2.49 gr/m³ por debajo. La diferencia promedio entre el módulo experimental y el invernadero fue 2.27 gr/m³, siendo el de menor valor los del invernadero.

El valor máximo registrado de humedad absoluta en el exterior fue 26.95 gr/m³, en el módulo de control fue 27.76 gr/m³, en el invernadero fue 32.92 gr/m³ y en el módulo experimental fue 28.56 gr/m³. El valor mínimo de humedad absoluta en el exterior fue 17.82 gr/m³; en el módulo control, 18.21 gr/m³; en el invernadero, 12.23 gr/m³, y en el módulo experimental, 18.21 gr/m³.

Se contabilizó el número de horas en que las variables presentaron menores valores comparadas con el exterior, el total de horas de la prueba fue 768. Durante 463 horas la humedad absoluta registrada en el módulo de control fue menor que los valores del exterior; en el invernadero fueron 592 horas y en el módulo experimental: 489 horas.

La humedad absoluta máxima se redujo 4.31 gr/m³ en el módulo experimental con respecto al exterior; en el módulo de control, 7.44 gr/m³, y en el módulo del invernadero, 9.42 gr/m³. El valor mínimo que se redujo con respecto al exterior en el módulo experimental fue 0.007 gr/m³; en el módulo de control, 0.0002 gr/m³, y en el invernadero, 0.003 gr/m³. Se observó un patrón diario en el cual la humedad absoluta en el módulo experimental fue menor que en el exterior y que en el módulo de control, esto se generó entre las 19:00 h y las 10:00 h. En el invernadero ocurrió entre las 16:00 h y las 10:00 h (del día siguiente). En el módulo de control se disminuyó la humedad absoluta con respecto a la exterior entre las 00:00 h y las 12:00 h y entre las 05:00 h y las 10:00 h.

Se graficaron los puntos de humedad absoluta para el 1 de agosto, este día se registró la segunda humedad más alta en el ambiente para los días de la prueba. Desde las 00:00 h hasta las 08:00 h los valores con menos humedad absoluta se hallaron en el invernadero, y por encima de ellos se encontraron los del módulo experimental. Para esa hora los valores del módulo de control y los del exterior tuvieron registros similares. En ese periodo la humedad absoluta fue de 23.93 gr/m³; la humedad en el módulo de control estuvo 0.15 gr/m³ por debajo del exterior; en el invernadero la reducción fue de 4.45 gr/m³, y en el módulo experimental la reducción fue de 1.84 gr/m³.

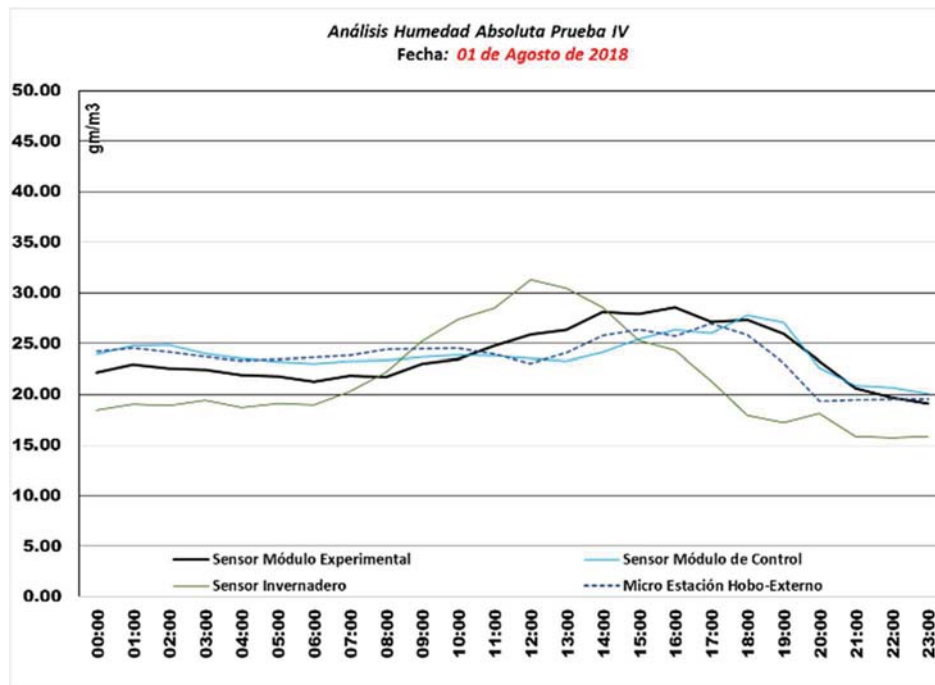


Fig. 194. Análisis humedad absoluta, 01 de Agosto de 2018. Fuente: Propia.

A las 08:00 h la línea del invernadero cruzó las líneas del módulo experimental, del exterior y del módulo de control. A las 09:00 h se posicionó como la variable con mayor humedad absoluta del experimento; a las 12:00 h alcanzó su máximo valor con 31.31 gr/m³. El valor mínimo para el exterior se registró a las 12:00 h con un valor de 23.05 gr/m³.

A las 15:00 h los valores de la humedad en el invernadero descendieron, a las 15:00 h se presentaron como la variable con menos humedad absoluta. Entre las 15:00 h y las 18:00 h los valores del módulo experimental se posicionaron como los más altos, y se produjo el valor máximo a las 16:00 h con 28.56 gr/m³. A las 17:00 h se registró el máximo valor en el módulo de control con 26.95 gr/m³. A las 18:00 h los valores descendieron en el módulo experimental y a las 21:00 h sus valores se posicionaron por debajo del módulo de control y el exterior.

Se registraron 11 horas en que los valores de humedad absoluta en el módulo experimental estuvieron por debajo del exterior, esto se presentó entre las 00:00 y las 10:00 h. En el módulo de control se registraron once horas, esto sucedió en el horario de las 05:00 h y las 11:00 h y entre las 13:00 h y las 17:00 h. Para el invernadero fueron 18 horas de reducción de humedad absoluta, entre las 00:00 h y las 09:00 h, y también ocurrió un segundo intervalo entre las 15:00 y las 23:00 h.

Análisis Diagrama Psicrométrico – Prueba IV

Día de análisis: 01 de agosto de 2018, día de mayor humedad relativa en el exterior

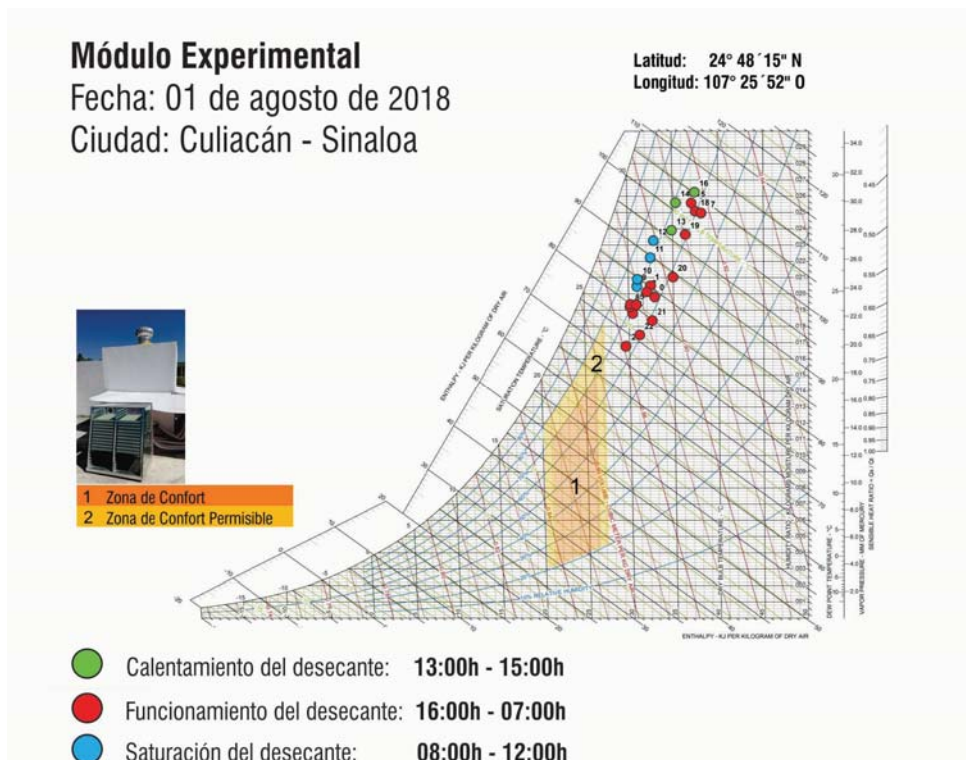


Fig. 195. Análisis diagrama psicrométrico, módulo experimental prueba IV. 1 de agosto de 2018. Fuente: Propia.

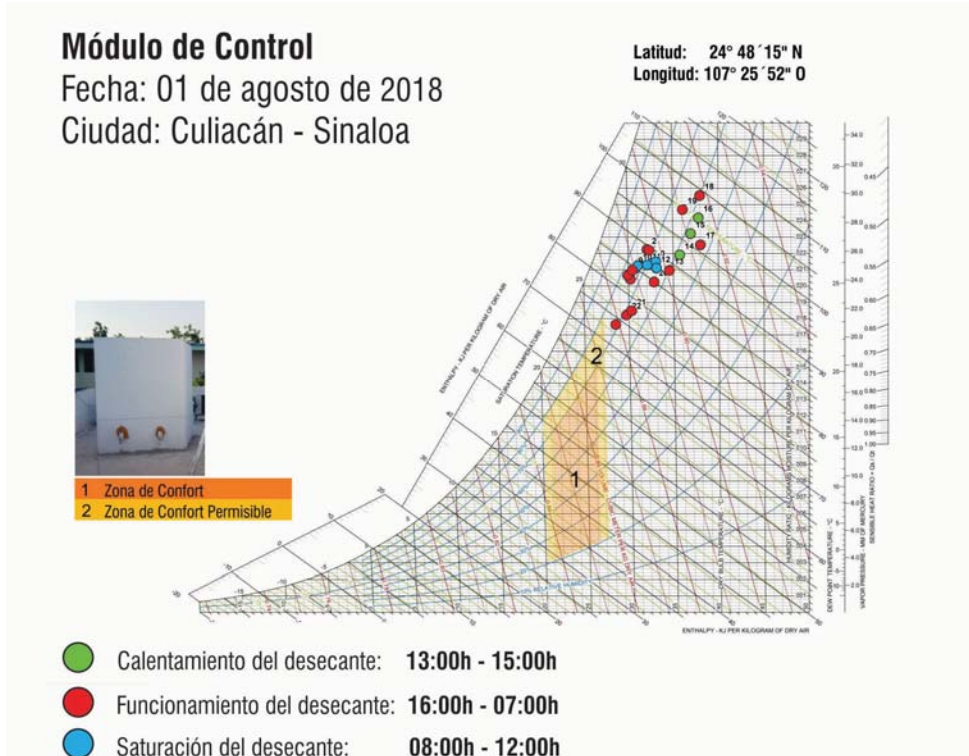


Fig. 196. Análisis diagrama psicrométrico, módulo de control prueba IV. 1 de agosto de 2018. Fuente: Propia.

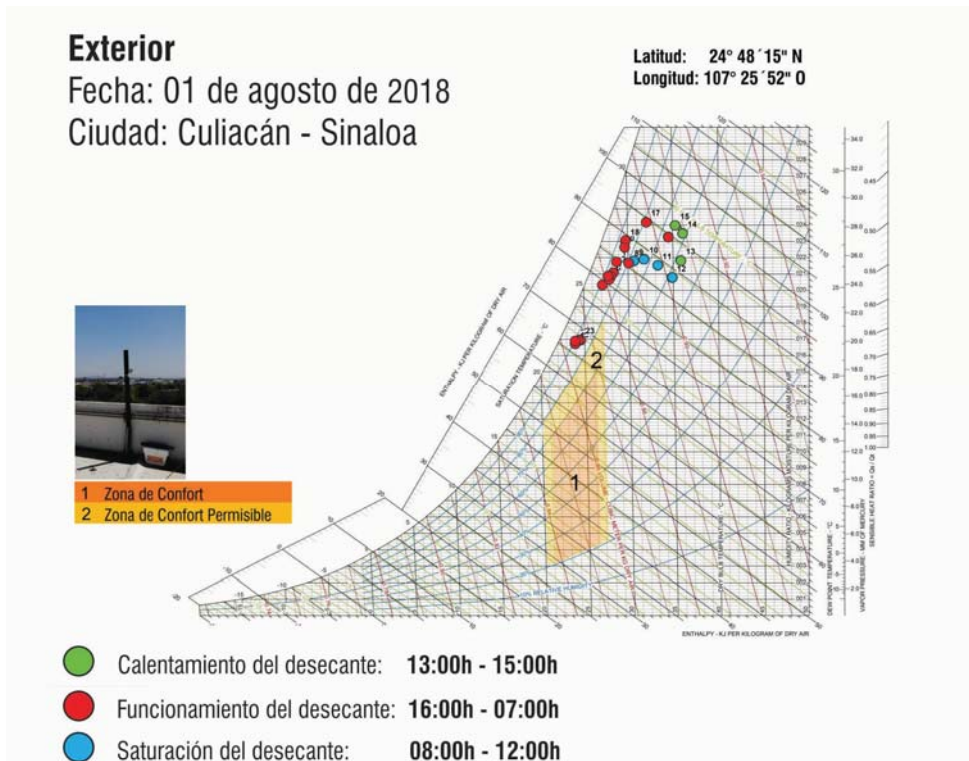


Fig. 197. Análisis diagrama psicrométrico, exterior prueba IV. 1 de agosto de 2018. Fuente: propia.

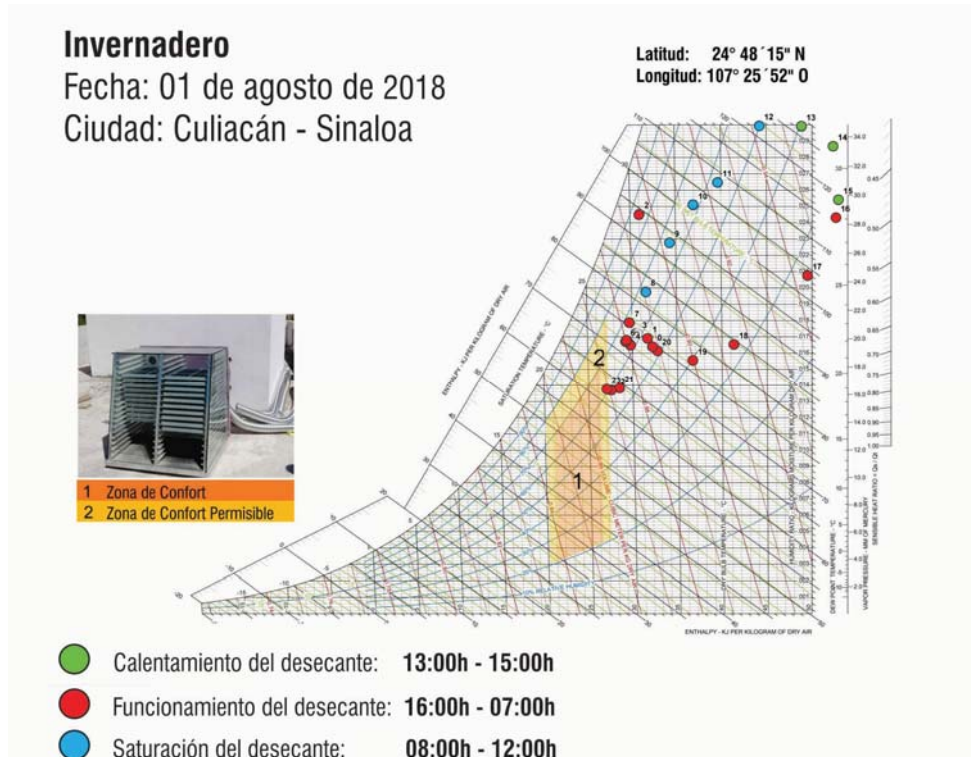


Fig. 198. Análisis diagrama psicrométrico, invernadero prueba IV. 1 de agosto de 2018.

En el diagrama psicrométrico de la prueba IV se encontró que no hubo ningún punto dentro de la zona de confort en el módulo de control, ni en el módulo experimental ni en el exterior. El requerimiento del diagrama para los tres casos es el uso de aire acondicionado; sin embargo, en el exterior desde las 20:00 h hasta las 23:00 h se presentaron puntos más cercanos a la zona de confort en la parte superior, la estrategia sugerida para estos puntos es la ventilación natural o mecánica. En el invernadero los puntos se desplazaron en forma ascendente en la parte superior derecha del diagrama, donde en una parte se observó que el material retiene mucha humedad, esto sucedió en los puntos que van desde las 09:00 h hasta las 14:00 h. A las 15:00 h la zeolita se activó con el calor y los puntos descendieron durante las horas de la tarde, hasta que, en la noche, desde las 21:00 h hasta las 23:00 h, se encontraron en la parte derecha del límite de la zona de confort.

4.20 Análisis humedad absoluta y diagrama psicrométrico proceso experimental Prueba V

Fecha inicio de análisis: 7 de agosto de 2018

Fecha final: 7 de septiembre de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos

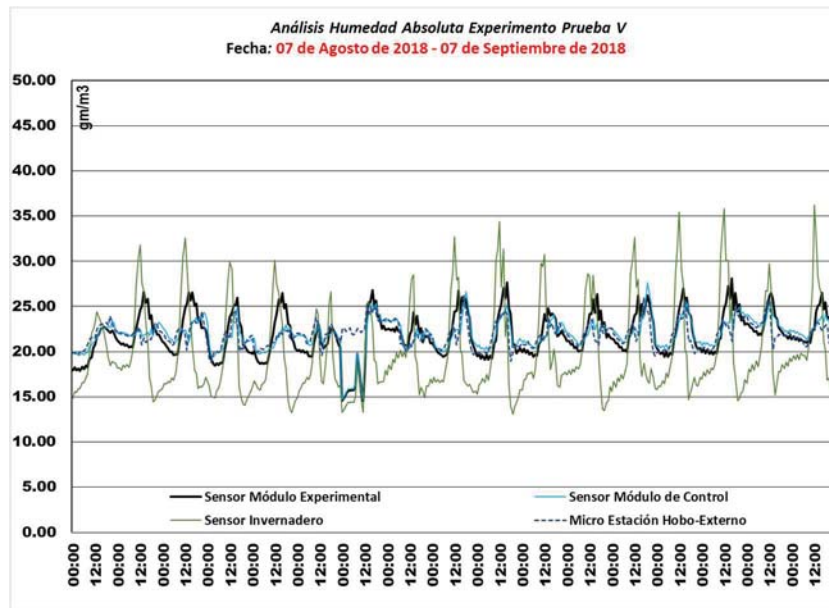


Fig. 199. Análisis humedad absoluta prueba V. Fuente: Propia.

En la prueba V se calcularon los valores de humedad absoluta para los 15 días en que se hizo el monitoreo de la evaluación. Los datos máximos y mínimos del estudio se registraron en el invernadero, la humedad absoluta máxima allí alcanzó 36.19 gr/m^3 , lo que sucedió alrededor del mediodía, en contraste el valor mínimo llegó al finalizar la tarde con 13.07 gr/m^3 . Los valores de humedad absoluta en el módulo de control, en el módulo experimental y en el exterior tuvieron trayectorias muy parecidas con diferencias apreciables en las madrugadas y al finalizar la noche, esta situación se acentuó en la línea del sensor experimental.

El promedio de humedad absoluta para el exterior fue de 21.8928 gr/m^3 ; en el módulo de control, 21.91 gr/m^3 ; en el invernadero, 19.75 gr/m^3 , y en el módulo experimental, 21.8965 gr/m^3 . La diferencia entre el exterior y el módulo de control fue de 0.0172 gr/m^3 siendo la humedad más alta en el módulo de control. Entre el módulo experimental y el exterior la diferencia fue de tan solo 0.00037 gr/m^3 , siendo menor valor para el exterior. Comparado con el ambiente, en el invernadero la diferencia fue 2.14 gr/m^3 más baja. El valor máximo en el exterior fue de 26.27 gr/m^3 ; en el módulo de control, 27.62 gr/m^3 ; en el invernadero, 36.19 gr/m^3 , y en el módulo experimental, 28.10 gr/m^3 . En el exterior el valor mínimo fue 18.82 gr/m^3 ; en el módulo de control, 14.66 gr/m^3 ; en el invernadero, 13.06 gr/m^3 , y en el módulo experimental, 14.47 gr/m^3 .

En esta prueba se contabilizaron 408 horas de registros de humedad absoluta; en el módulo de control fueron 184 horas en que la humedad absoluta fue menor que en el exterior; en el

invernadero se presentaron 308 horas con registros por debajo del exterior y en el módulo experimental se presentaron 242 horas con valores por debajo del ambiente. Para el módulo de control el valor con mayor diferencia, que lo ubicó por debajo del exterior, fue 7.80 gr/m^3 , en el invernadero fue 9.67 gr/m^3 , y en el módulo experimental fue 7.94 gr/m^3 . Los valores con mínima diferencia comparados con el exterior, siendo los valores del exterior más altos fueron los siguientes: módulo de control: 0.0002 gr/m^3 ; invernadero: 0.13 gr/m^3 ; módulo experimental: 0.02 gr/m^3 .

En el módulo experimental se observó el mismo patrón de otras pruebas, con respecto a las horas en que se redujo la humedad absoluta comparada con el exterior; esta situación se presentó entre las 19:00 h y las 10:00 h. En el módulo de control se registró en diferentes intervalos a lo largo del día. En el invernadero este fenómeno se apreció desde las 16:00 h hasta las 08:00 h, así mismo, desde las 09:00 h hasta las 15:00 h la humedad absoluta fue más alta que el exterior, a las 16:00 h se reinició el ciclo.

A continuación, se analiza la humedad absoluta para el 8 de agosto, este día registró la temperatura más alta en toda la prueba. En el rango de las 00:00 h y las 06:00 h, el promedio de humedad en el exterior fue 21.90 gr/m^3 y en el módulo de control fue 21.99 gr/m^3 , situándose con los valores de humedad más altos para ese momento. Debajo, con una diferencia con el exterior de 1.07 gr/m^3 se encontró al módulo experimental. El invernadero fue la variable con menos humedad absoluta: 18.27 gr/m^3 .

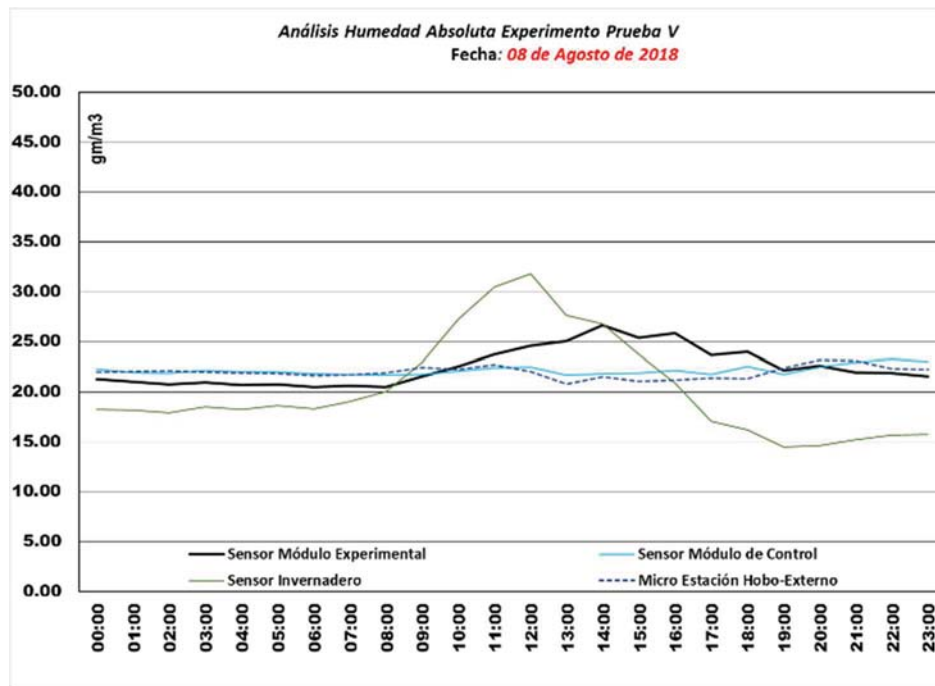


Fig. 200. Análisis humedad absoluta, 08 de Agosto de 2018. Fuente: Propia.

A las 06:00 h las temperaturas ascendieron en el invernadero; a las 08:00 h se presentaron las mínimas temperaturas en el módulo de control con 21.66 gr/m^3 y en el módulo experimental con 20.47 gr/m^3 . A las 09:00 h se cruzó la línea del invernadero con las líneas de ambos módulos

y la del exterior. A las 12:00 h se registró el máximo valor de humedad absoluta en el invernadero con 31.78 gr/m³. En ese momento los valores del invernadero y los del módulo de control se situaron por encima del módulo de control y de los valores del exterior.

A las 13:00 h se presentó el mínimo valor en el exterior con 20.77 gr/m³; a las 14:00 h se tuvo el máximo valor en el módulo experimental con 26.62 gr/m³. A las 16:00 h y con un valor de 21.17 gr/m³ los valores en el invernadero descendieron y se posicionaron con menor humedad absoluta, en contraste, para ese momento la mayor humedad se encontró en el módulo experimental. A las 19:00 h se presentó el valor mínimo de humedad absoluta en el invernadero con 14.43 gr/m³; a las 20:00 h se registró el máximo valor en el exterior con 23.17 gr/m³, y a las 22:00 h se detectó el máximo valor en el módulo de control con 23.22 gr/m³.

A las 21:00 h los valores del módulo experimental disminuyeron y cruzaron los valores del módulo de control y del exterior. En este punto se observó que sus valores quedaron por debajo de estas dos variables, y la línea con menor humedad relativa fue el invernadero. Entre las 0:00 h y las 09:00 h, y entre las 19:00 y las 23:00 h, la humedad absoluta fue menor en el módulo experimental que en el exterior, es decir, por un periodo de 15 horas. En el módulo de control se contabilizaron nueve horas donde los valores de humedad absoluta estuvieron por debajo del exterior; se presentó en varios intervalos: 01:00 h a 02:00 h; 08:00 h a 11:00 h, y 19:00 h a 21:00 h. En el invernadero se contabilizaron 17 horas en las que los valores fueron menores con respecto al exterior, en dos intervalos claramente identificados: 00:00 h a 08:00 h, y 16:00 a 23:00 h.

Análisis Diagrama Psicrométrico – Prueba V

Día de análisis: 08 de agosto de 2018, día con la mayor temperatura exterior registrada

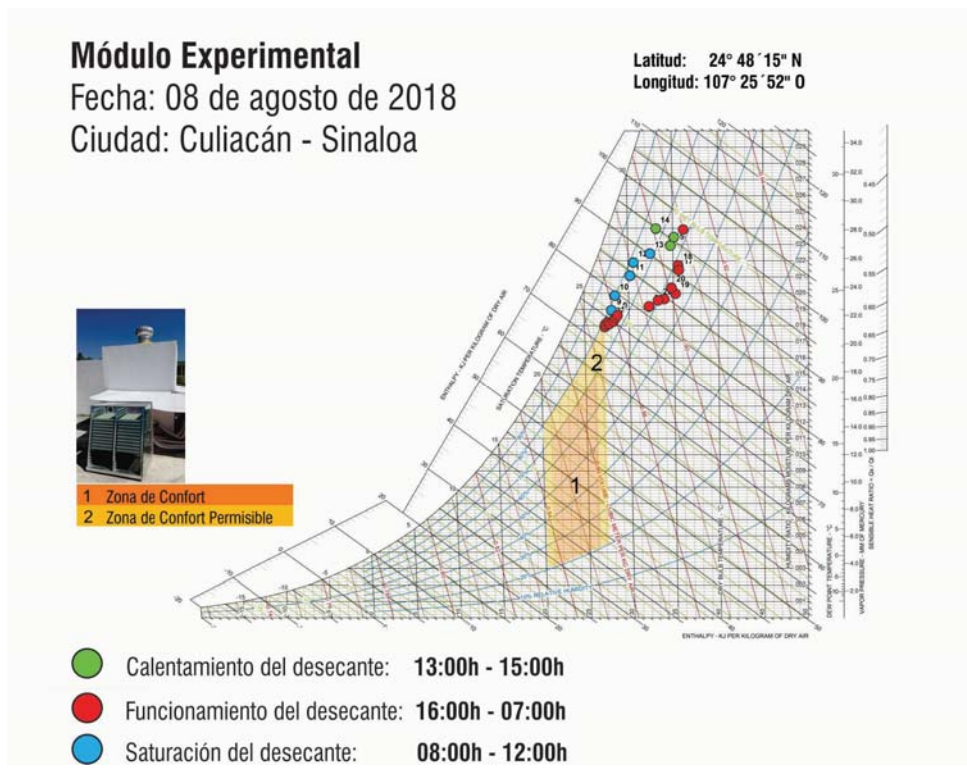


Fig. 201. Análisis diagrama psicrométrico, módulo experimental prueba V. 08 de agosto de 2018. Fuente: Propia.

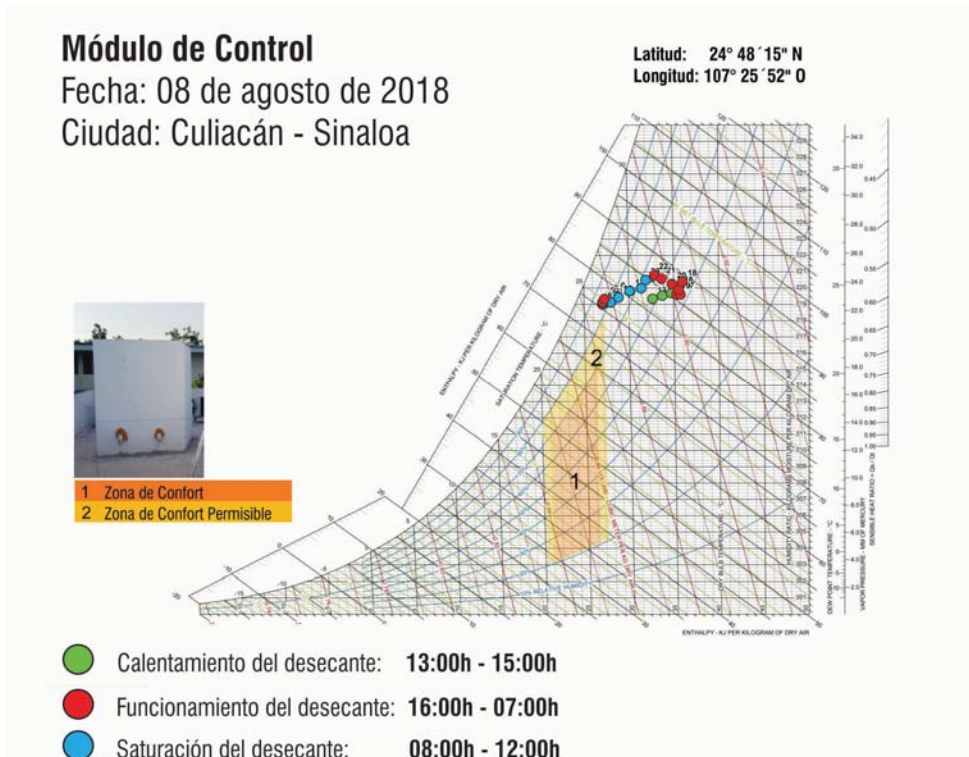


Fig. 202. Análisis diagrama psicrométrico, módulo de control prueba V. 08 de agosto de 2018. Fuente: Propia.

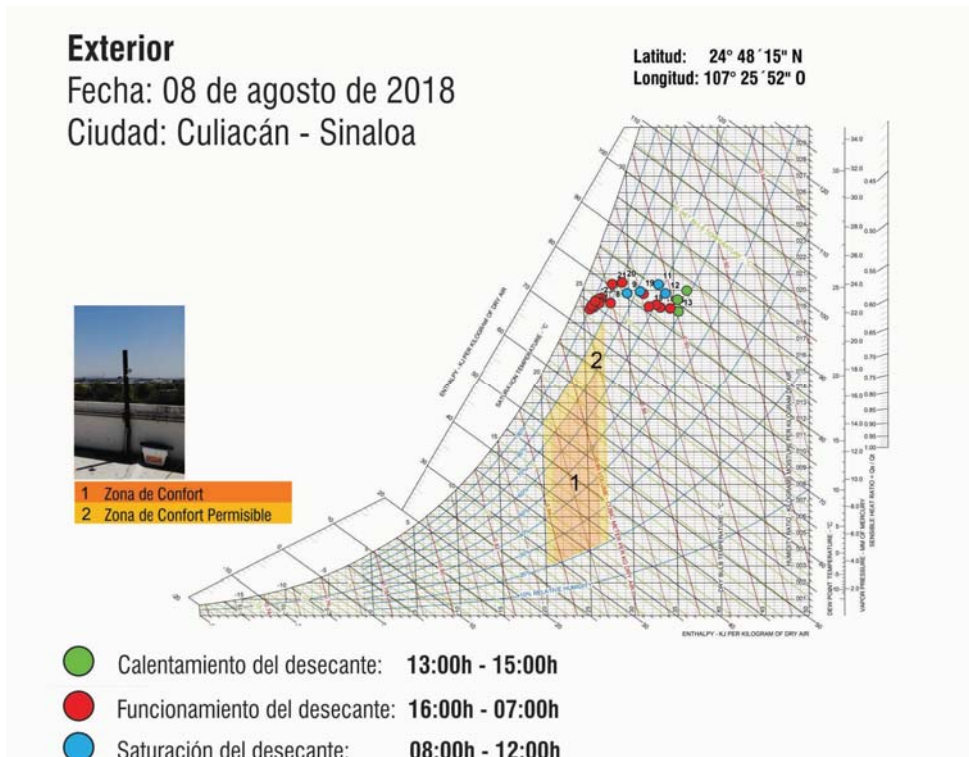


Fig. 203. Análisis diagrama psicrométrico, exterior prueba V. 08 de agosto de 2018. Fuente: Propia.

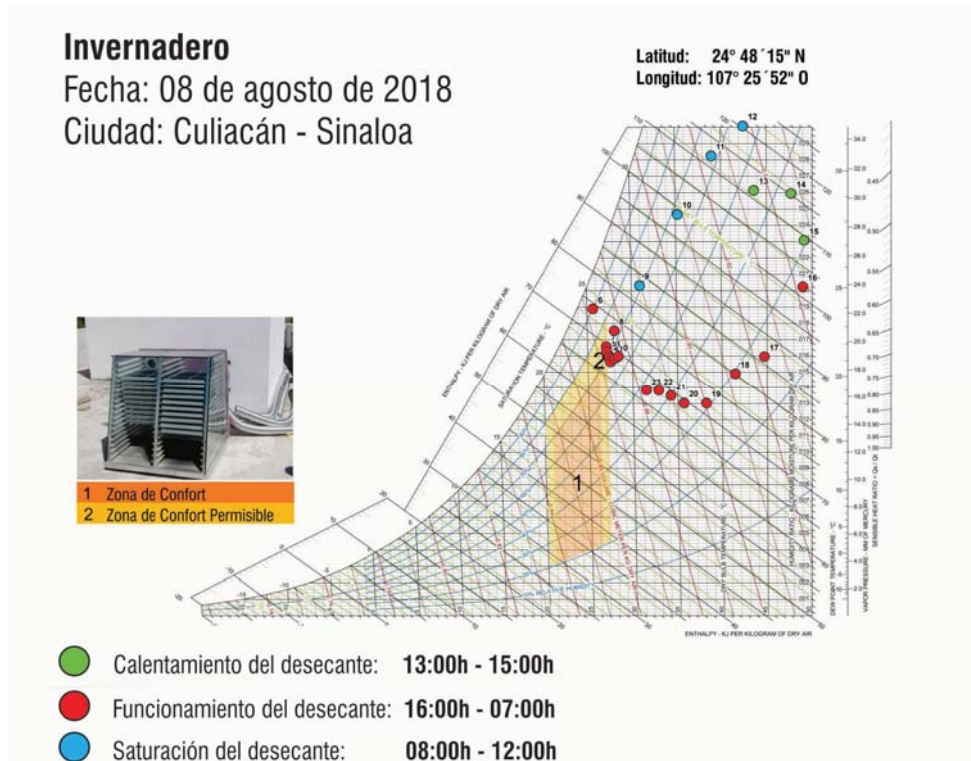


Fig. 204. Análisis diagrama psicrométrico, invernadero prueba V. 08 de agosto de 2018. Fuente: Propia.

Para ninguna de las variables se hallaron puntos dentro de la zona de confort; el desempeño de los puntos en el módulo de control y el exterior fue muy similar. En el módulo experimental, a las 08:00 h, se observó un punto en el límite superior de la zona de confort. Las estrategias requeridas están dirigidas hacia refrigeración por aire acondicionado.

4.21 Análisis humedad absoluta y diagrama psicrométrico proceso experimental Prueba VI

Fecha inicio de análisis: 8 de septiembre de 2018

Fecha final: 8 de octubre de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos

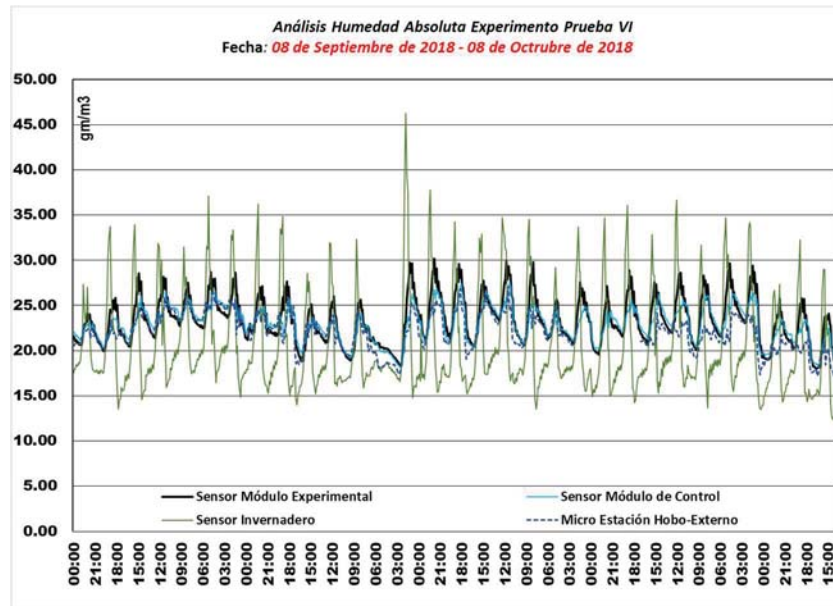


Fig. 205. Análisis humedad absoluta prueba VI. Fuente: Propia.

Para la prueba VI, los datos registrados en la gráfica que señalan las humedades absolutas más altas y con menor valor se hallaron en el invernadero en los rangos de 13.54 gr/m³ y 46.22 gr/m³. Los valores del invernadero, del módulo experimental y del ambiente exterior estuvieron en los rangos de 17.82 gr/m³ y 30.42 gr/m³. El valor promedio de humedad absoluta en el exterior fue 22.08 gr/m³; en el módulo de control, 22.92 gr/m³; en el invernadero, 20.53 gr/m³, y en el módulo experimental, 23.33 gr/m³. Según estos valores, la humedad absoluta en el módulo experimental fue 1.25 gr/m³ más alta que en el exterior. En el módulo de control la humedad absoluta estuvo 0.84 gr/m³ más alta que el ambiente exterior.

El valor mínimo en el exterior fue 17.10 gr/m³; en el módulo de control, 18.09 gr/m³; en el invernadero, 12.32 gr/m³, y en el módulo experimental, 17.97 gr/m³. El valor máximo de la prueba en el exterior fue 27.07 gr/m³; en el módulo de control, 27.39 gr/m³; en el invernadero, 46.22 gr/m³, y en el módulo experimental, 30.15 gr/m³. En la Prueba VI se registraron 744 horas que arrojaron el siguiente balance: en el módulo de control se presentaron 148 horas en que la humedad absoluta estuvo por debajo de los valores externos; en el módulo experimental se contabilizaron 177 horas con valores menores que el exterior, y en el invernadero se presentaron 501 horas por debajo del exterior.

El máximo valor de reducción de humedad absoluta, con respecto al exterior en el módulo de control, fue 1.82 gr/m³; en el módulo experimental llegó a 2.43 gr/m³, y en el invernadero a 10.46 gr/m³. El mínimo valor de reducción de humedad absoluta comparada con el exterior en

el módulo de control fue 0.0006 gr/m³; en el módulo experimental, 0.01 gr/m³, y en el invernadero, 0.01 gr/m³.

Con respecto a otras pruebas, en esta se observaron pocas horas donde la humedad absoluta fuera menor que el ambiente exterior. La estación climatológica de la Escuela de Biología, de la UAS, registró en sus bitácoras mensuales que se presentaron nueve días seminublados, siete días nublados y 14 días despejados para el mes de septiembre de 2018. La precipitación mensual en septiembre fue de 440.7 mm; se piensa entonces que la totalidad de días nublados y la gran cantidad de lluvias en el mes no solo hicieron que el sistema de deshumidificación no tuviera un desempeño correcto, sino que la humedad, que queda atrapada dentro del block de concreto, no alcanzara a evaporarse y por ello los valores de humedad en ambos módulos resultaron más altos que los del exterior.

A continuación, se grafica el día 20 de septiembre, este día presentó la humedad relativa más alta de toda la prueba. Se debe precisar, además, que este fue el día más lluvioso del año con una precipitación de 224 mm por 24 h. Por consiguiente, se observó que los valores de todas las variables presentaron pocas diferencias entre sí; la mayor se halló en el periodo comprendido entre las 00:00 h y 08:00 h, cuando los valores del invernadero estaban por debajo de las otras tres variables, con una diferencia promedio con el exterior de 1.79 gr/m³.

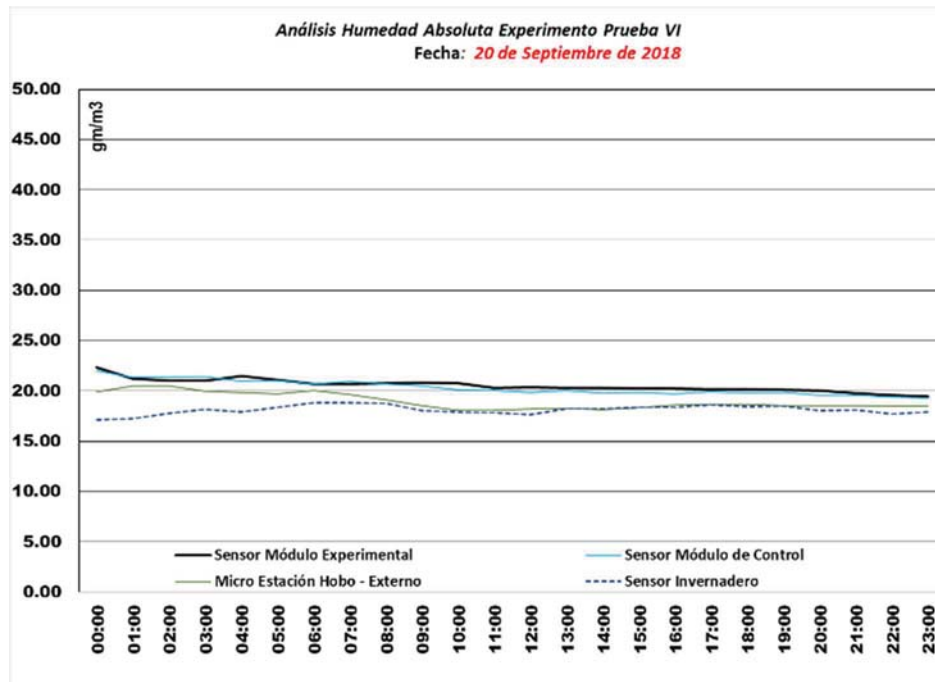


Fig. 206. Análisis humedad absoluta, 20 de Septiembre de 2018. Fuente: Propia.

El promedio de humedad absoluta en el exterior fue 18.99 gr/m³; en el invernadero, 18.15 gr/m³; en el módulo experimental, 20.57 gr/m³, y en el módulo de control, 20.34 gr/m³. Los máximos valores en el módulo de control: 22.04 gr/m³ y en el módulo experimental: 22.38 gr/m³ se presentaron a las 00:00 h. En el exterior el máximo valor se generó a la 01:00 h con 20.54 gr/m³; en el invernadero el máximo valor se produjo a las 06:00 h con 18.82 gr/m³. El mínimo valor en el exterior fue de 18.08 gr/m³ y se presentó a las 10:00 h. En el invernadero

esto sucedió a las 00:00 h con 17.12 gr/m^3 . En el módulo de control y en el módulo experimental se presentaron al finalizar la noche con 19.34 gr/m^3 y 19.46 gr/m^3 respectivamente.

Es importante anotar que durante las 24 horas del día no se obtuvieron valores por debajo del ambiente exterior; por el contrario, ambos módulos presentaron humedades más altas. En el invernadero se registraron 22 horas en que la humedad absoluta estuvo por debajo del exterior con un valor promedio de reducción de 0.95 gr/m^3 . En esta gráfica se observa claramente que cuando se presentaron lluvias el sistema de deshumidificación se vio afectado, además de la humedad del ambiente, por la alta nubosidad, y la falta de radiación solar que, al no generar calor, influyó en la activación de las propiedades absorbentes de la zeolita.

Análisis Diagrama Psicrométrico – Prueba VI

Día de análisis: 20 de septiembre de 2018, día de mayor humedad relativa en el exterior

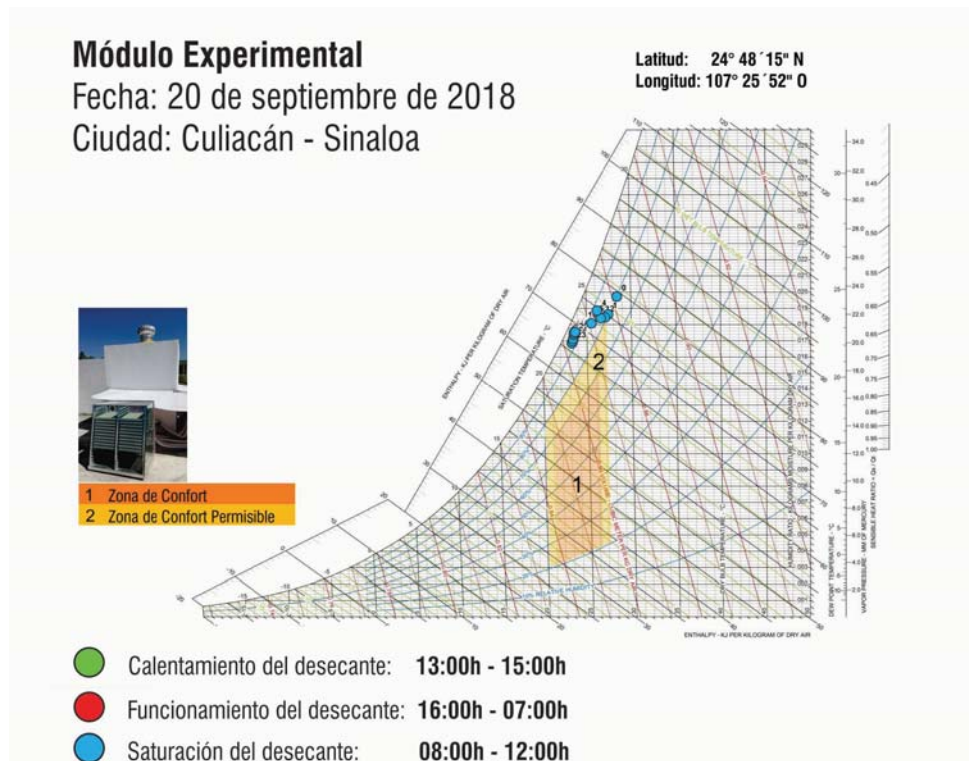


Fig. 207. Análisis diagrama psicrométrico, módulo experimental prueba VI. 20 de septiembre de 2018.

Fuente: Propia.

Para este día los puntos de humedad relativa y temperatura del módulo experimental, del módulo de control y del invernadero se situaron en la parte superior de la zona de confort. A las 03:00 h se observó un punto en el borde de la zona límite de confort del módulo experimental, es decir, se localizaron en la zona que se sugiere la estrategia de refrigeración por ventilación natural y mecánica. En el módulo de control ninguno de los puntos se ubicó en el interior de la zona de confort; en el exterior ocurrió lo mismo y los puntos quedaron en la zona donde se requiere la estrategia de refrigeración por ventilación natural y mecánica.

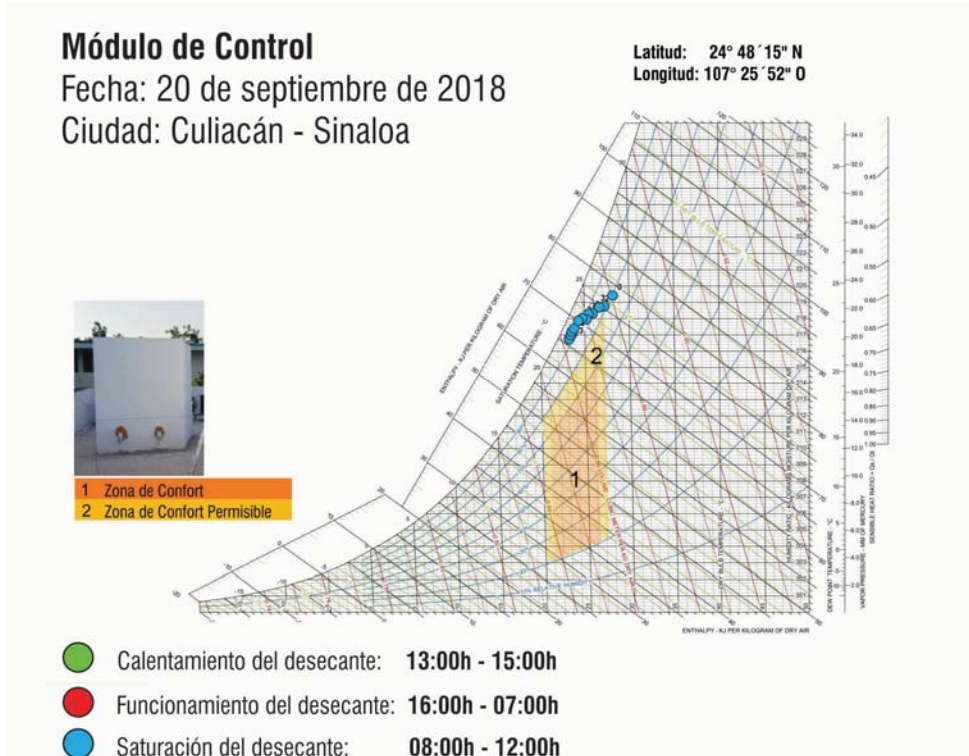


Fig. 208. Análisis diagrama psicrométrico, módulo de control prueba VI. 20 de septiembre de 2018. Fuente: Propia.

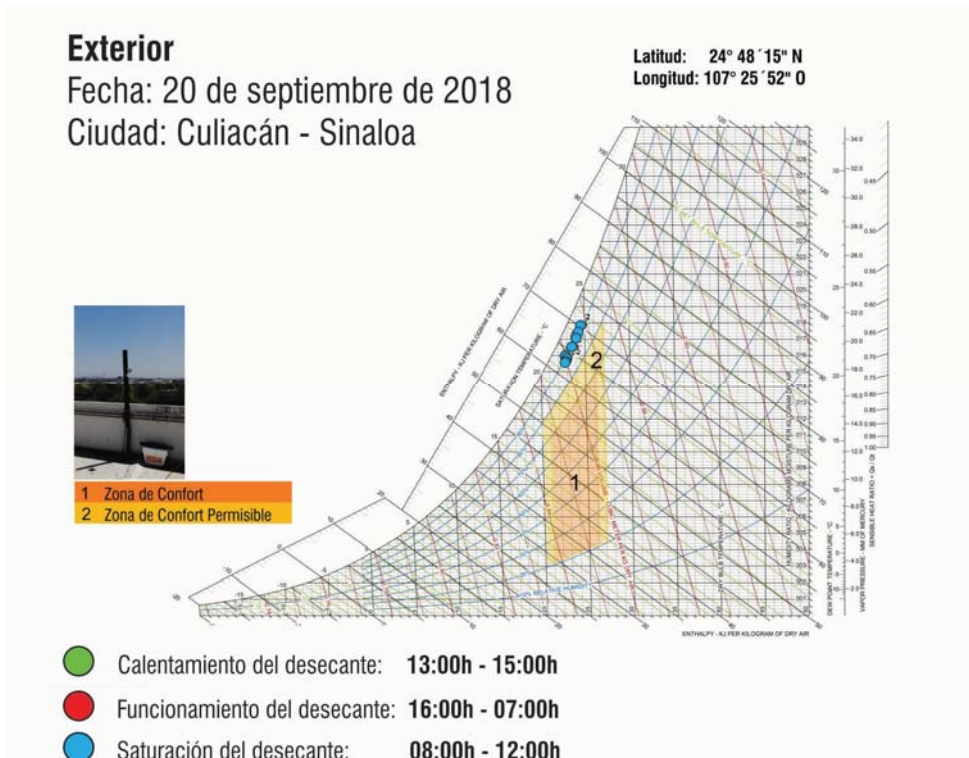


Fig. 209. Análisis diagrama psicrométrico, exterior prueba VI. 20 de septiembre de 2018. Fuente: Propia.

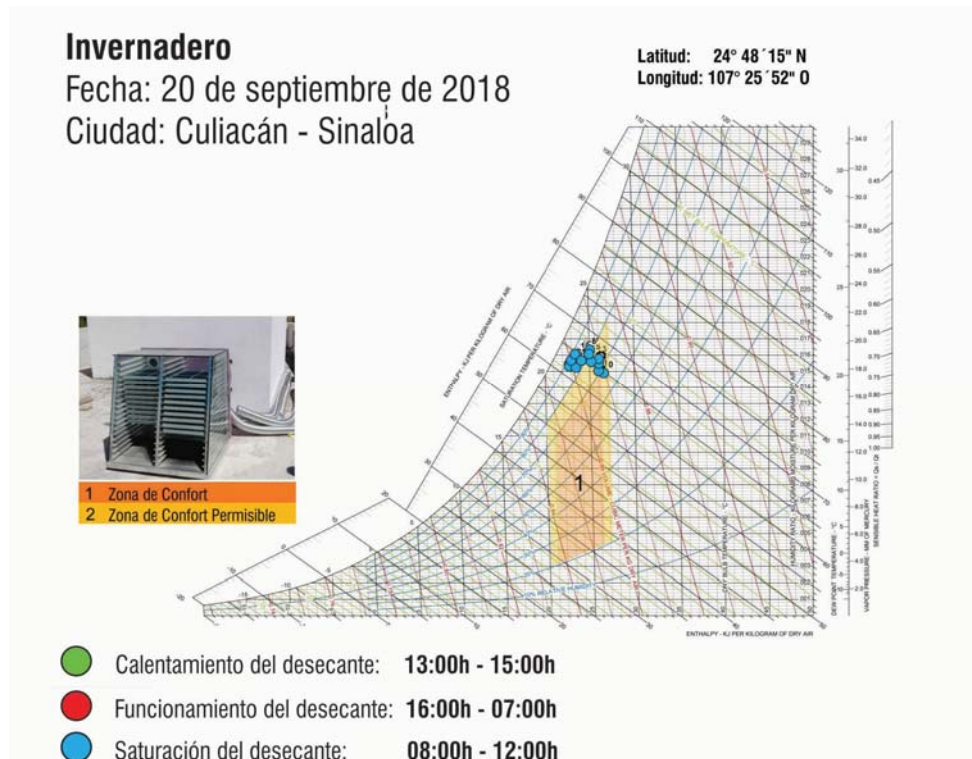


Fig. 210. Análisis diagrama psicrométrico, invernadero prueba VI. 20 de septiembre de 2018. Fuente: Propia.

En el invernadero se observó que los puntos clasificados entre las 00:00 h y las 06:00 h se encontraron dentro de la zona de confort. El resto de puntos se ubicaron muy cerca de la zona límite de confort; allí también se sugiere la refrigeración por ventilación; sin embargo, es importante anotar que para este día en el invernadero no se generó la deshumidificación en la zeolita debido a la falta de calor que activara las propiedades absorbentes del material.

4.22 Análisis humedad absoluta y diagrama psicrométrico proceso experimental Prueba VII

Fecha inicio de análisis: 9 de octubre de 2018
Fecha final: 9 de noviembre de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos

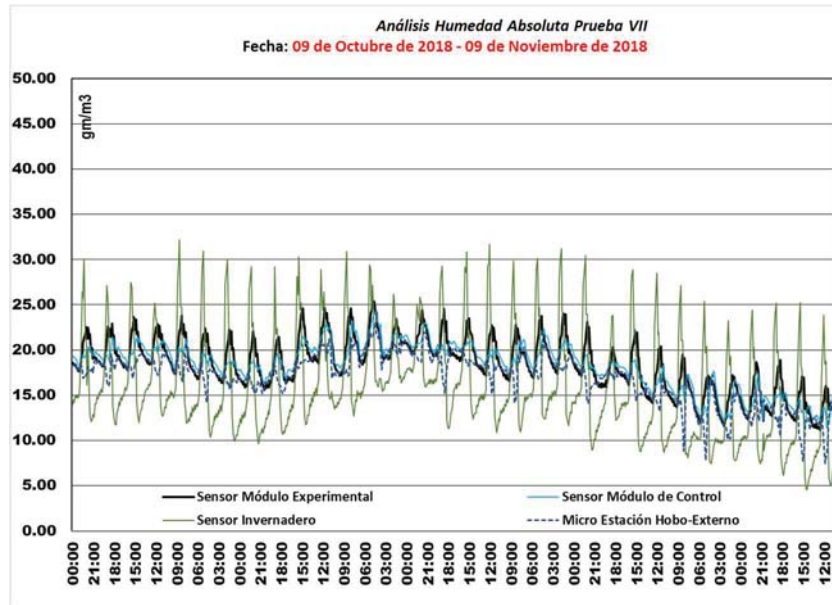


Fig. 211. Análisis humedad absoluta prueba VII. Fuente: Propia.

En la prueba VII se observó una disminución clara de los valores de humedades absolutas. Los valores máximos y mínimos, como en pruebas anteriores, correspondieron al invernadero en los rangos de 4.0 gr/m³ y 33.00 gr/m³. Los valores en ambos módulos y en el exterior se situaron entre los rangos de 7.0 gr/m³ y 18.50 gr/m³.

El valor promedio de humedad absoluta en el exterior fue de 16.91 gr/m³; en el módulo de control, 18.25 gr/m³; en el invernadero, 15.92 gr/m³, y en el módulo experimental, 18.36 gr/m³. En el módulo de control la humedad estuvo 1.34 gr/m³ más alta que el exterior; en el invernadero fue 0.99 gr/m³ más baja que en el exterior; y en el módulo experimental la humedad absoluta fue 1.45 gr/m³ más alta que en el ambiente.

El máximo valor registrado en el exterior fue 23.01 gr/m³; en el módulo de control, 24.35 gr/m³; en el invernadero, 32.15 gr/m³, y en el módulo experimental, 25.59 gr/m³. Los valores mínimos registrados para las variables fueron los siguientes: exterior: 7.45 gr/m³, módulo de control: 11.39 gr/m³, invernadero: 4.48 gr/m³ y módulo experimental: 11.12 gr/m³.

Para esta prueba se monitorizaron un total de 768 horas a las variables evaluadas; de este total en el módulo de experimental se registraron 267 horas donde los valores de humedad absoluta fueron menores que en el exterior. En el módulo de control se registraron solamente 45 horas donde los valores estuvieron por debajo del exterior y en el invernadero se registraron 530 horas por debajo del exterior.

Entre el módulo experimental y el módulo de control se registraron 491 horas, donde la humedad absoluta fue menor en el módulo experimental. El promedio de absorción entre el módulo experimental y el exterior fue de 0.46 gr/m³; en el módulo de control, 0.43 gr/m³, y en el invernadero, 4.29 gr/m³.

El valor máximo de absorción entre el módulo experimental y el exterior fue de 2.17 gr/m³, en el módulo de control fue de 3.08 gr/m³ y en el invernadero fue de 9.59 gr/m³. Entre el exterior y cada una de las variables se registró un mínimo de absorción en el módulo experimental de 0.83 gr/m³, en el módulo de control fue de 0.009 gr/m³ y en el invernadero fue de 0.03 gr/m³.

Con el fin de observar mejor el desempeño de la humedad absoluta se grafica el comportamiento del día 9 de noviembre de 2018, durante esta jornada se presentó el valor mínimo de humedad relativa exterior para esta prueba. De las 00:00 h hasta las 06:00 h, se observaron las líneas del exterior, del módulo de control y del módulo experimental muy cercanas. La línea del módulo de control fue la que registró mayor humedad absoluta, seguida por el exterior y los valores del módulo experimental. La línea con menores valores de humedad fue la del invernadero, su diferencia con respecto al exterior fue de 6.0 gr/m³.

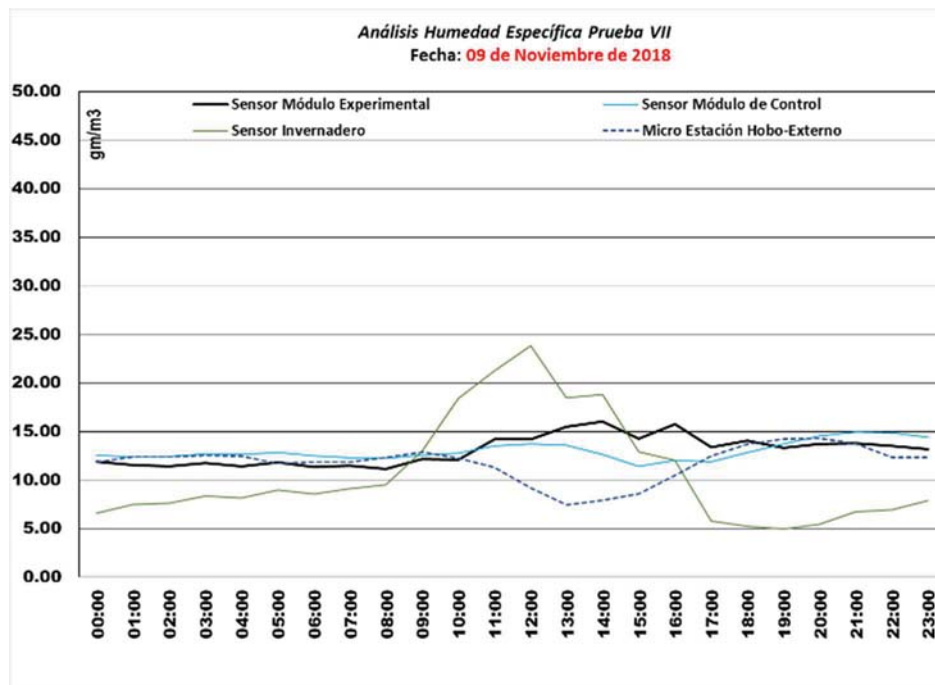


Fig. 212. Análisis humedad absoluta, 09 de Noviembre de 2018. Fuente: Propia

A las 08:00 h la línea del invernadero cruzó la línea de las otras variables y se posicionó, a las 09:00 h, como la variable con mayor humedad absoluta del experimento. A esta misma hora se presentó el mínimo valor de humedad absoluta en el módulo experimental con 11.11 gr/m³, además, los valores empezaron a ascender y cruzaron las líneas del módulo de control y del exterior. A las 11:00 h los valores del módulo experimental se ubicaron como la segunda variable con mayor humedad absoluta después del invernadero, seguida por los valores del módulo de control y el ambiente exterior.

A las 12:00 h se presentó el máximo valor de humedad absoluta en el invernadero con 23.84 gr/m³, a las 13:00 h se registró el valor mínimo en el exterior con 7.45 gr/m³. A las 14:00 h se produjo el máximo valor en el módulo experimental con 16.05 gr/m³ y a las 15:00 h se generó el valor mínimo en el módulo de control con 11.39 gr/m³.

A las 15:00 h la línea del invernadero descendió, cruzó las líneas de las variables y a las 17:00 h se estableció como la variable con menor humedad absoluta. A lo largo de toda la tarde la línea del módulo experimental tuvo valores descendentes y a las 19:00 h se ubicó por debajo de las líneas del módulo del exterior, del módulo de control, pero por encima del invernadero. A las 19:00 h se registró el mínimo valor en el invernadero con 5.0 gr/m³; a las 20:00 h se halló el máximo valor en el exterior con 14.28 gr/m³, y a las 21:00 h se presentó el máximo valor en el módulo de control con 14.94 gr/m³.

Se registraron 12 horas en que la humedad absoluta fue menor en el módulo experimental comparado con el exterior, esto se dio en dos horarios, el primero de 01:00 h a 09:00 h y el segundo de 19:00 h a 21:00 h. En el módulo de control se presentaron seis horas en que la humedad absoluta fue menor que en el exterior, esto sucedió a la 01:00 h, las 07:00 h, las 08:00 h y de las 17:00 h a las 19:00 h. En el invernadero, durante ocho horas la humedad absoluta estuvo por encima de los valores del exterior, esto ocurrió entre las 09:00 h y 16:00 h; el resto de las horas la humedad fue menor comparada con el exterior.

Análisis Diagrama Psicrométrico – Prueba VII

Día de análisis: 09 de noviembre de 2018, día de menor humedad relativa en el exterior

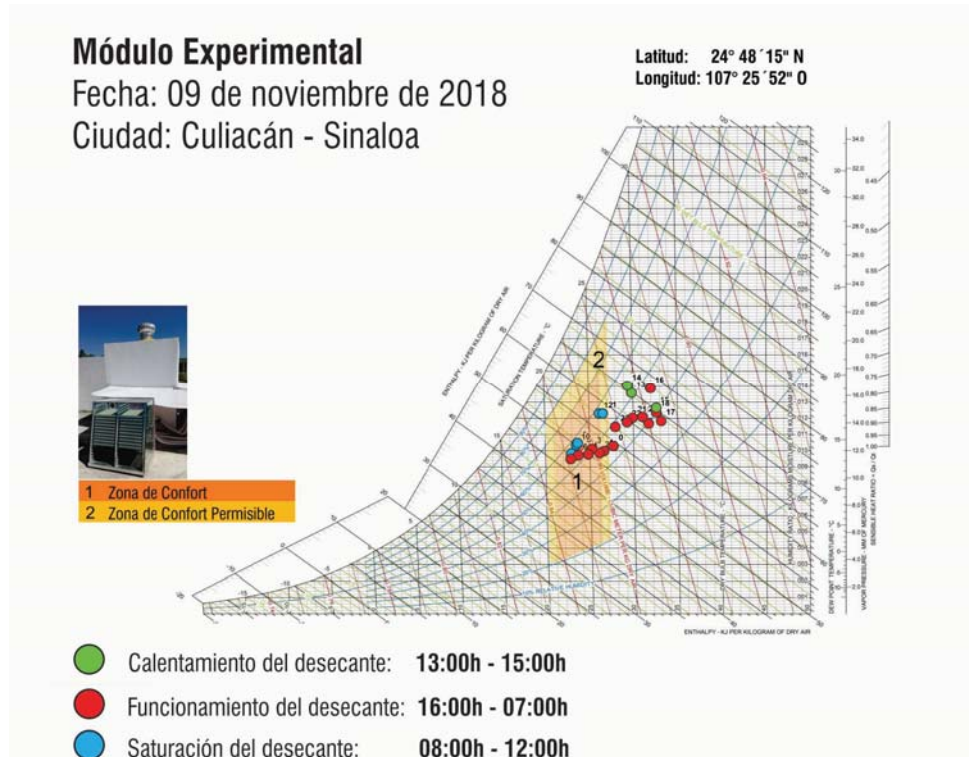


Fig. 213. Análisis diagrama psicrométrico, módulo experimental prueba VII. 9 de noviembre de 2018.
Fuente: Propia.

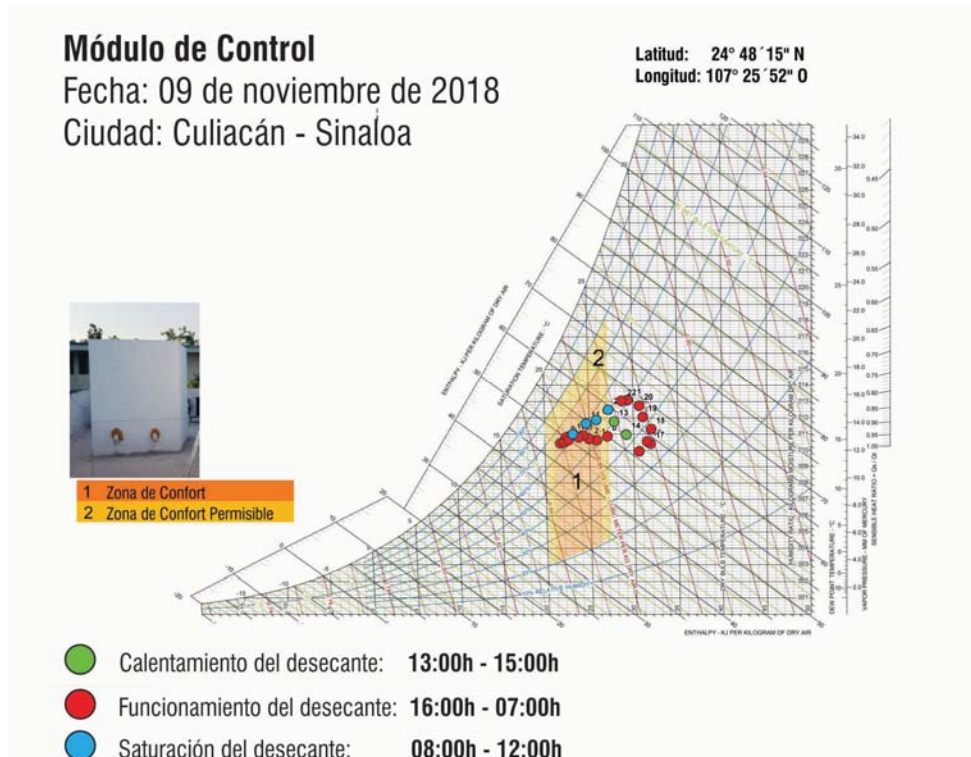


Fig. 214. Análisis diagrama psicrométrico, módulo de control prueba VII. 9 de noviembre de 2018. Fuente: Propia.

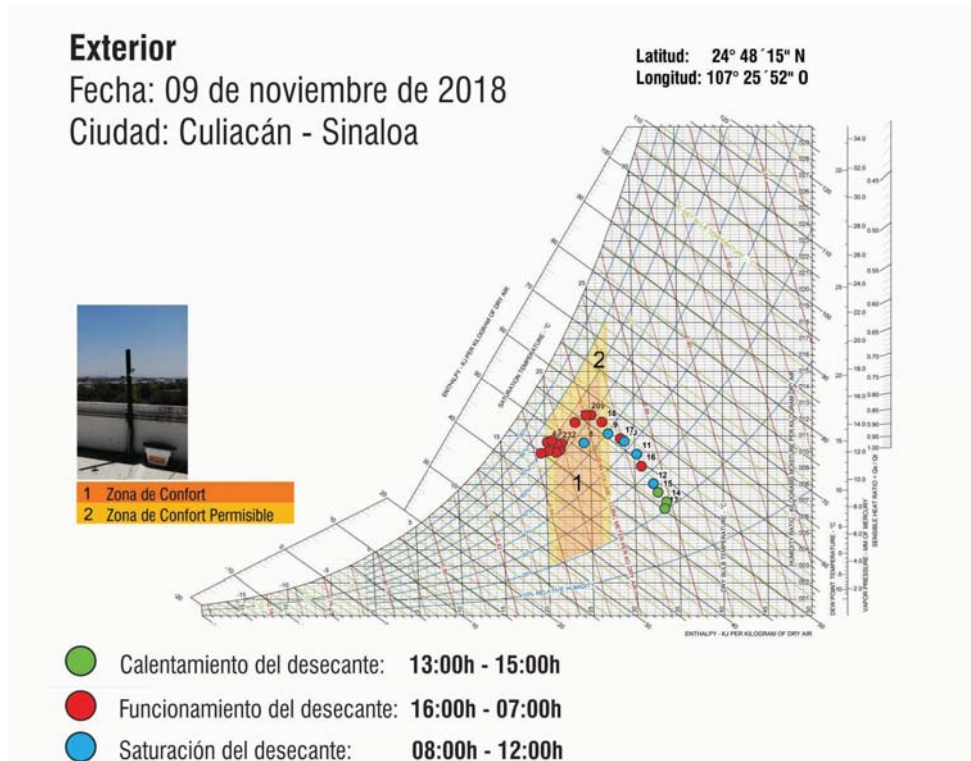


Fig. 215. Análisis diagrama psicrométrico, exterior prueba VII. 9 de noviembre de 2018. Fuente: Propia.

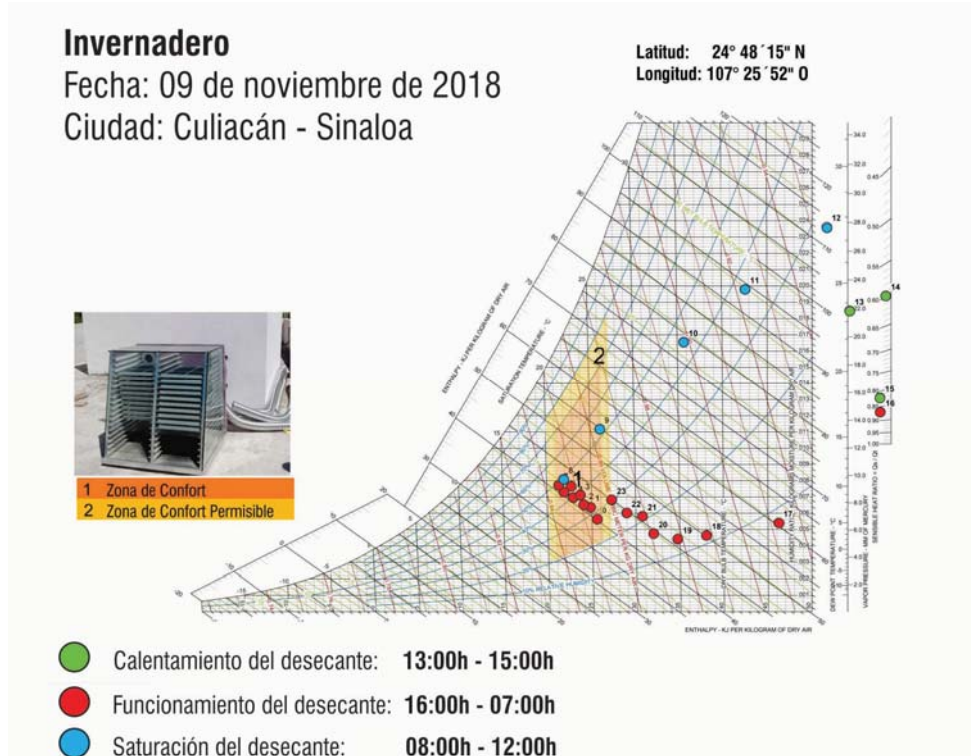


Fig. 216. Análisis diagrama psicrométrico, invernadero prueba VII. 9 de noviembre de 2018. Fuente: Propia.

En el módulo experimental desde las 01:00 h hasta las 12:00 h los puntos estuvieron en el centro de la zona de confort. Para el resto del día los puntos se ubicaron en la zona que requiere la estrategia refrigeración por alta masa térmica. En el módulo de control, los puntos desde las 01:00 h hasta las 12:00 h se encontraron en la zona de confort; como en el caso anterior, en las horas restantes los puntos se ubicaron en la zona de refrigeración por alta masa térmica. En el exterior los puntos en la zona de confort se encontraron desde las 02:00 h hasta las 08:00 h y desde las 19:00 h hasta las 23:00 h. Los puntos restantes se ubicaron en la misma estrategia definida para ambos módulos.

4.23 Análisis humedad absoluta y diagrama psicrométrico proceso experimental Prueba VIII

Fecha inicio de análisis: 10 de noviembre de 2018

Fecha final: 4 de diciembre de 2018

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos

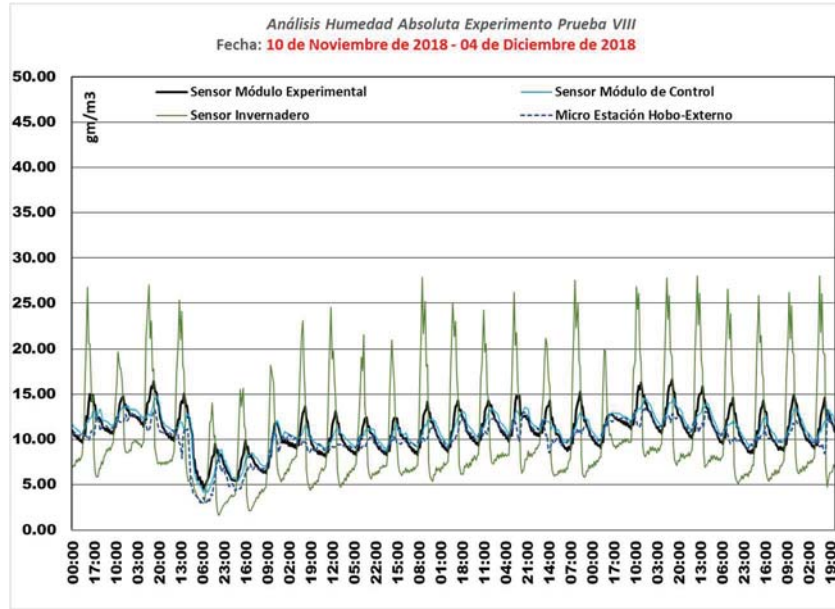


Fig. 217. Análisis humedad absoluta prueba VIII. Fuente: Propia.

Como consecuencia del cambio de estación climática, para la prueba VIII se observó una disminución drástica en los valores de la humedad absoluta para todas las variables. Dos días (14 y 15 de noviembre) tuvieron humedades absolutas muy bajas, los valores máximos no superaron los 15.00 gr/m³. Los mayores valores y los menores valores de humedad absoluta de la prueba se apreciaron en la variable del invernadero, que se mantuvo entre los 1.70 gr/m³ y 27.0 gr/m³. El registro de datos para ambos módulos y para el exterior se situó en medio de las trayectorias de la línea del invernadero, los rangos de estos se presentaron entre 3.0 gr/m³ y 18.0 gr/m³.

El promedio de humedad absoluta en el exterior fue de 11.79 gr/m³; en el módulo de control, 12.70 gr/m³; en el invernadero, 10.90 gr/m³, y en el módulo experimental, 12.61 gr/m³. Basados en estos promedios la humedad absoluta en el módulo de control fue 0.91 gr/m³ más alta que el exterior; y en el módulo experimental la humedad estuvo 0.82 gr/m³ por encima del ambiente exterior.

El valor máximo de humedad absoluta en el exterior fue 15.50 gr/m³; en el módulo experimental, 18.72 gr/m³; en el módulo de control, 16.46 gr/m³, y en el invernadero, 26.72 gr/m³. En el caso de los valores mínimos, en el exterior se registró 3.53 gr/m³; en el módulo experimental, 5.33 gr/m³; en el módulo de control, 4.84 gr/m³, y para el invernadero, 1.80 gr/m³. El valor más alto se encontró en el módulo experimental con una diferencia de 3.22 gr/m³ con respecto al exterior, y 2.26 gr/m³ por arriba del módulo de control. Comparando los valores mínimos entre sí, el más alto se presentó en el módulo experimental con 1.8 gr/m³ por encima del exterior, y 0.49 gr/m³ más alto que el módulo de control.

La monitorización de esta prueba se hizo por 600 horas, de las cuales 280 se registraron en el módulo experimental con valores por debajo del exterior; en el módulo de control se presentaron 74 horas en que la humedad absoluta fue menor que la exterior, y en el invernadero fueron 406 horas con valores por debajo del exterior.

En el módulo experimental el promedio de absorción de humedad absoluta con respecto al exterior fue de 0.63 gr/m^3 ; en el módulo de control, 0.24 gr/m^3 , y en el invernadero, 4.0 gr/m^3 . El valor máximo de reducción de humedad absoluta con respecto al exterior en el módulo experimental fue 1.86 gr/m^3 ; en el módulo de control llegó a los 2.15 gr/m^3 y en el invernadero a los 10.19 gr/m^3 .

El valor mínimo de humedad absoluta que se redujo con respecto al exterior en el módulo experimental fue de 0.019 gr/m^3 , en el módulo de control fue de 0.001 gr/m^3 y en el invernadero, 0.002 gr/m^3 .

A continuación, se grafican los valores de humedad absoluta para el día 1 de diciembre, por ser la jornada en que se registró mayor valor de humedad relativa en el exterior para la prueba VIII. En el rango de las 00:00 h hasta las 07:00 h, las variables con mayor de humedad absoluta fueron las del ambiente exterior y las del módulo de control. A las 00:00 h se presentó el máximo valor de humedad absoluta en el módulo de control con 14.08 gr/m^3 y en el exterior con 13.14 gr/m^3 . Las líneas del exterior y del módulo de control tuvieron valores muy similares, razón por la cual desarrollan la misma trayectoria; a las 03:00 h las líneas se separaron, los valores del módulo experimental se posicionaron por debajo de esta última. La línea con los valores del invernadero tuvo los menores valores de humedad absoluta para este rango de tiempo.

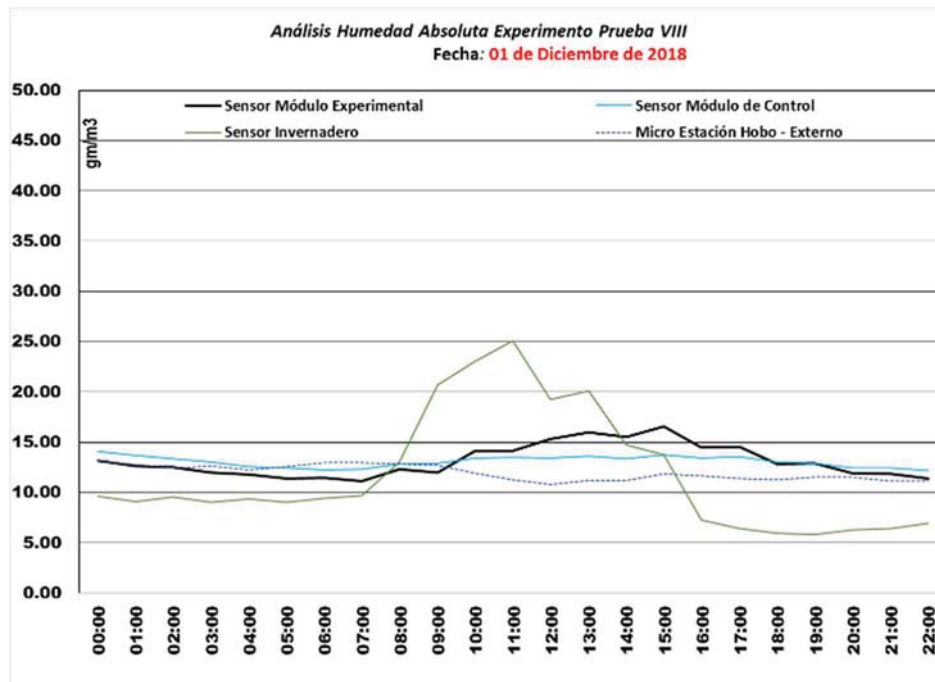


Fig. 218. Análisis humedad absoluta, 1 de diciembre de 2018. Fuente: Propia

A las 07:00 h los valores en la línea del invernadero ascendieron y a las 08:00 h se establece como la variable con mayor humedad absoluta del experimento. En el módulo experimental se presentó el mínimo valor a las 07:00 con 11.15 gr/m^3 , a partir de allí los valores se elevaron y a las 10:00 h fueron la segunda variable con mayor humedad absoluta, seguida por los valores

del módulo de control y por el ambiente exterior. A las 11:00 h se presentó el máximo valor de humedad absoluta en el invernadero con 25.13 gr/m³, para ese momento la variable con menor humedad absoluta era la del exterior y por encima de ella se encontraban los valores del módulo de control. En el exterior el valor mínimo se presentó a las 13:00 h con 10.83 gr/m³. A las 14:00 h la humedad absoluta en el invernadero descendió y cruzó las líneas de las variables, a las 16:00 h se estableció como la variable con menor humedad absoluta. En el módulo experimental el máximo valor de humedad se presentó a las 15:00 h con 16.57 gr/m³ y esta variable se posicionó en el primer lugar con las mayores humedades absolutas, seguida por el módulo de control y después el exterior. A las 19:00 h se presentó el mínimo valor de humedad absoluta en el invernadero con 5.85 gr/m³. A esta misma hora los valores en el módulo experimental descendieron y cruzaron las líneas del módulo de control, pero a las 20:00 h se posicionaron por debajo hasta finalizar la noche. A las 23:00 h se presentó el mínimo valor de humedad absoluta en el módulo de control con 11.95 gr/m³.

En el módulo experimental se presentaron 10 horas, en que la humedad absoluta fue menor que en el exterior, esto sucedió entre las 00:00 h y las 09:00 h. En el módulo de control se registraron cuatro horas en que la humedad estuvo por debajo del exterior, lo cual se evidenció entre las 06:00 h y las 09:00 h. En el invernadero se presentaron 16 horas en que la humedad estuvo por debajo del ambiente exterior, esto ocurrió entre las 00:00 h y las 07:00 h y entre las 16:00 h y las 23:00 h.

Análisis Diagrama Psicrométrico – Prueba VIII

Día de análisis: 01 de diciembre de 2018, día de mayor humedad relativa en el exterior

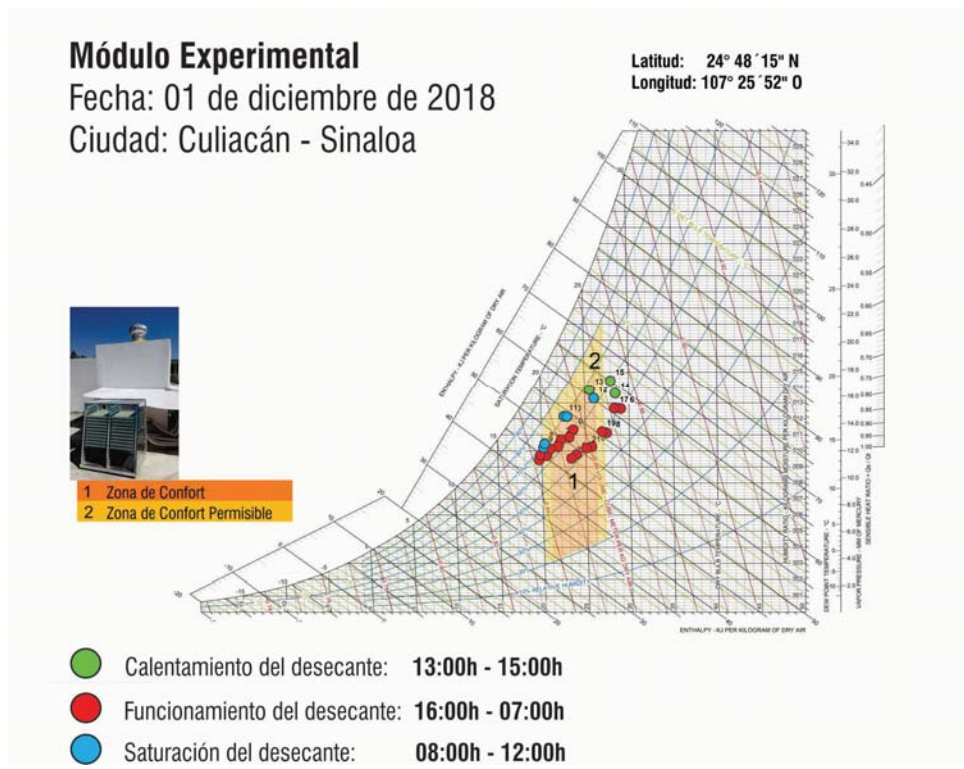


Fig. 219. Análisis diagrama psicrométrico, módulo experimental prueba VIII. 01 de diciembre de 2018.
Fuente: Propia.

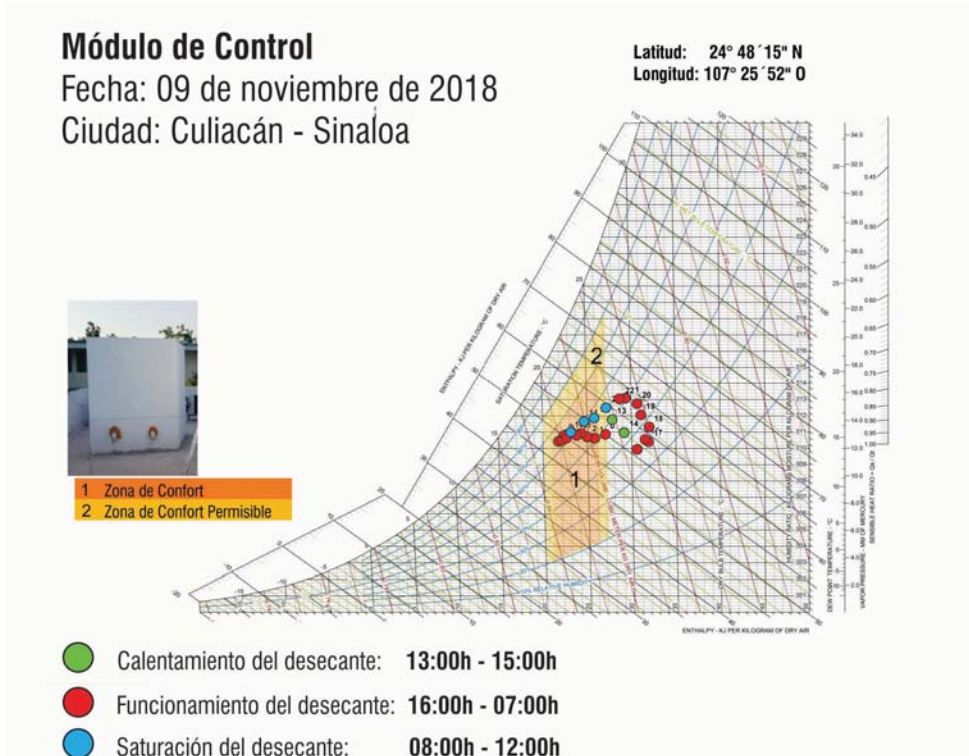


Fig. 220. Análisis diagrama psicrométrico, módulo de control prueba VIII. 01 de diciembre de 2018. Fuente: Propia.

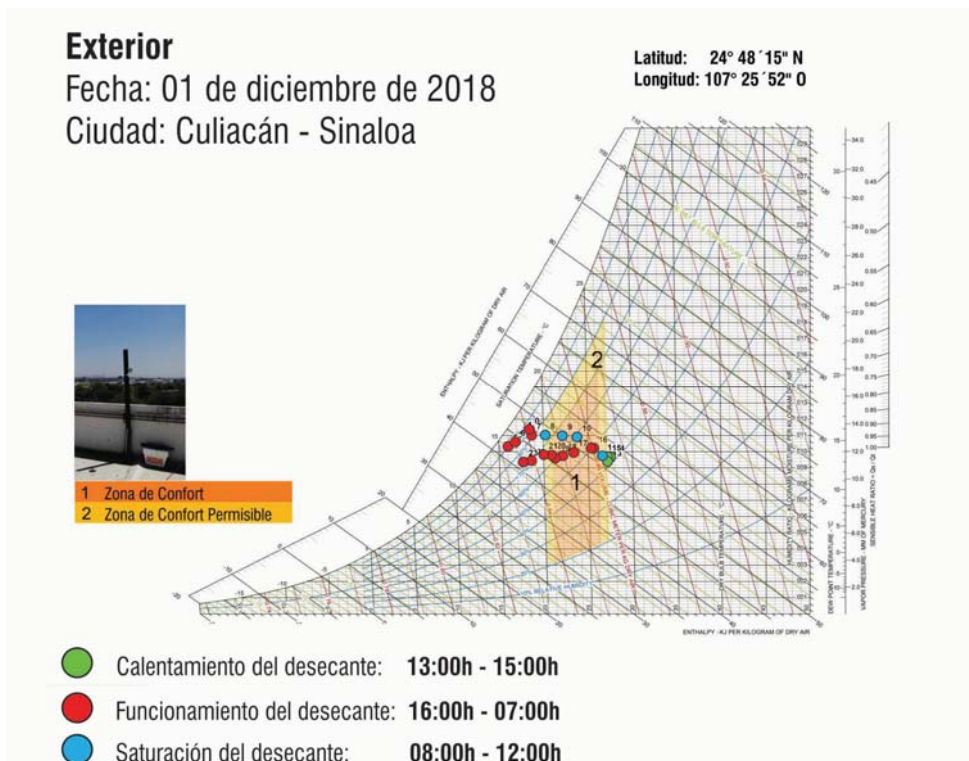


Fig. 221. Análisis diagrama psicrométrico, exterior prueba VIII. 01 de diciembre de 2018. Fuente: Propia.

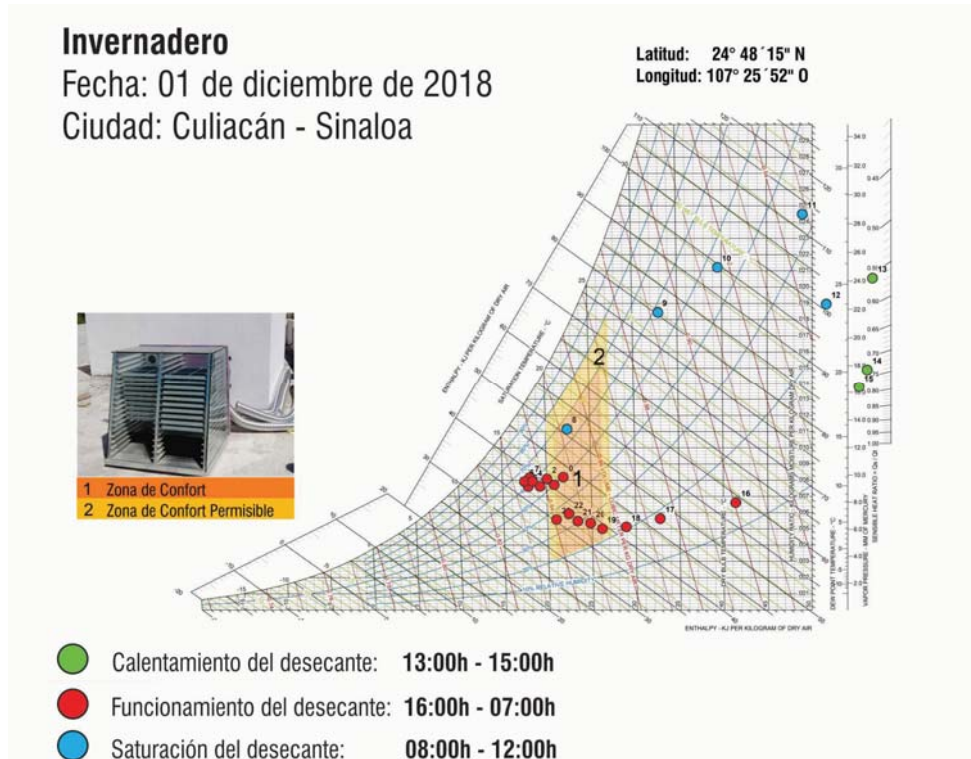


Fig. 222. Análisis diagrama psicrométrico, invernadero prueba VIII. 01 de diciembre de 2018. Fuente: Propia.

En el módulo experimental y en el módulo de control, de las 14:00 a las 19:00 h, los puntos estuvieron por fuera de la zona de confort, pero el resto de horas sí estuvieron dentro de la zona. En el exterior, de la 01:00 h a las 07:00 h, y de las 22:00 h a las 23:00 h, los puntos quedaron por fuera de la zona de confort. En ambos módulos, se requiere refrigeración por alta masa térmica, mientras que en el exterior se sugiere calefacción por ganancias internas. Los puntos en el invernadero estuvieron de acuerdo con el funcionamiento del sistema de deshumidificación.

4.24 Análisis humedad absoluta y diagrama psicrométrico proceso experimental Prueba IX

Fecha inicio de análisis: 5 de diciembre de 2018

Fecha final: 5 de enero de 2019

Frecuencia en la toma de datos: 5 minutos

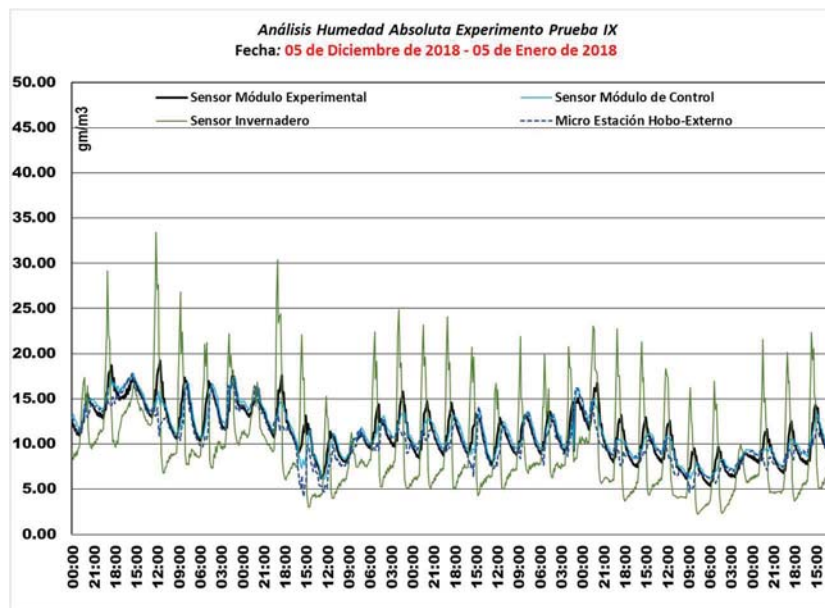


Fig. 223. Análisis humedad absoluta prueba IX. Fuente: Propia.

En la prueba IX se observó un desempeño normal de la humedad absoluta en cada una de las variables evaluadas. En este caso, como en los anteriores estudiados, los mayores y los menores valores se encontraron en la línea del invernadero, entre los rangos de 2.0 gr/m³ y 34.0 gr/m³. Los valores en el exterior y en ambos módulos mostraron diferencias en su desempeño en diferentes horas del día, con reducciones importantes de humedad absoluta en el módulo experimental en horas de la noche, la madrugada y al finalizar la tarde.

El promedio de humedad absoluta en el exterior fue 10.53 gr/m³; en el módulo de control, 11.30 gr/m³; en el invernadero, 9.81 gr/m³, y en el módulo experimental, 11.25 gr/m³. Con base en este promedio, la humedad absoluta en el módulo experimental estuvo 0.72 gr/m³ por encima del exterior; en el módulo de control la humedad se ubicó 0.77 gr/m³ por arriba del ambiente exterior; y en el invernadero fue 0.72 gr/m³ más baja que el exterior.

El valor máximo registrado en el exterior fue 17.75 gr/m³; en el módulo de control, 17.85 gr/m³; en el invernadero, 33.40 gr/m³, y en el módulo experimental, 19.22 gr/m³. Por su parte, los valores mínimos resultaron los siguientes datos: módulo de control: 6.08 gr/m³, módulo experimental: 5.34 gr/m³, exterior: 4.19 gr/m³, e invernadero: 2.25 gr/m³.

Para esta prueba se efectuó una monitorización de 755 horas, de las cuales 315 se registraron en el módulo experimental con valores por debajo del exterior; en el módulo de control se presentaron 93 horas con valores por debajo del ambiente exterior y en el invernadero fueron 441 horas con valores por debajo del exterior.

El valor máximo promedio en que se redujo la humedad absoluta con respecto al exterior fue 5.31 gr/m^3 ; en el módulo de control fue 5.11 gr/m^3 y en el invernadero fue 9.62 gr/m^3 . El valor mínimo promedio en que se redujo la humedad absoluta con respecto al exterior para las variables evaluadas es el siguiente: módulo experimental: 0.002 gr/m^3 ; módulo de control: 0.006 gr/m^3 ; invernadero: 0.11 gr/m^3 .

Se calcularon los valores de humedad absoluta para el 14 de diciembre; ese día se eligió ya que presentó los mínimos valores de humedad relativa exterior para esta prueba. El promedio de humedad absoluta para el exterior fue 8.03 gr/m^3 ; en el módulo de control, a 9.71 gr/m^3 ; en el módulo experimental, 10.56 gr/m^3 , y en el invernadero, 8.74 gr/m^3 .

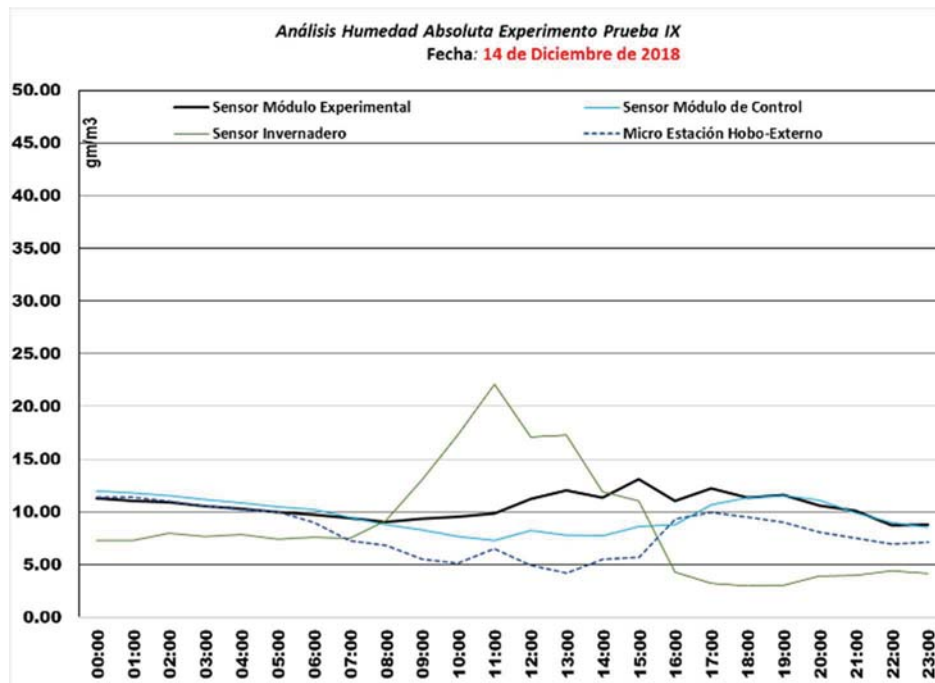


Fig. 224. Análisis humedad absoluta, 14 de Diciembre de 2018. Fuente: Propia

De las 00:00 h hasta las 07:00 h se observó que la línea del invernadero tuvo los menores valores de humedad absoluta; por encima de esta línea se encontraron los valores de ambos módulos y del exterior, todos con valores muy similares. A las 00:00 h se presentó el máximo valor en el exterior con 11.40 gr/m^3 , y también en el módulo de control con 12.01 gr/m^3 .

A las 07:00 h la línea de los datos del exterior descendió y a las 08:00 fue la variable con los menores valores de humedad absoluta del experimento. Con el invernadero pasó todo lo contrario, los valores se elevaron y se posicionó como los de mayor humedad absoluta del experimento, seguidos por el módulo experimental.

A las 11:00 h se produjo el mínimo valor de humedad absoluta en el módulo de control con 7.30 gr/m^3 ; a pesar de ser un valor pequeño, esta variable se mantuvo por debajo de los valores del invernadero y del módulo experimental, y sus valores no le permitieron posicionarse como la variable con menor humedad absoluta. A esta misma hora se presentó el máximo valor de humedad absoluta en el invernadero con 22.09 gr/m^3 , en ese momento los valores comenzaron a descender y a las 15:00 h cruzaron las líneas del módulo experimental que presentó su

máximo valor con 13.13 gr/m^3 , y se posicionó por encima de todas las variables alrededor de tres horas.

A las 13:00 h se generó el valor mínimo en el exterior con 4.19 gr/m^3 , en ese momento la línea comenzó su ascenso, a las 16:00 h cruzó la línea del invernadero y se ubicó por encima de esta. A las 18:00 h se evidenció el mínimo valor de humedad absoluta en el invernadero con 2.97 gr/m^3 , el resto de la noche la línea registró pocas variaciones importantes y se mantuvo como la variable con los menores valores de humedad absoluta.

A las 22:00 h se encontró el mínimo valor de humedad absoluta en el exterior con 8.71 gr/m^3 , esta línea descendió y se posicionó por debajo de la línea del módulo de control; en ese momento la humedad más alta del experimento se presentó en el módulo de control y al final de la noche se observó una tendencia ascendente en la línea de los valores del exterior.

Para este día se registraron solo cuatro horas en que la humedad absoluta se mantuvo por debajo de la exterior, esto sucedió desde las 00:00 hasta las 04:00 h. En el módulo de control solamente se presentó una hora en que la humedad fue más baja que el exterior y en el invernadero se presentaron 15 horas con valores por debajo del exterior, de las 00:00 h a las 06:00 h y de las 16:00 h a las 23:00 h.

Análisis Diagrama Psicrométrico – Prueba VIII

Día de análisis: 14 de diciembre de 2018, día de menor humedad relativa en el exterior

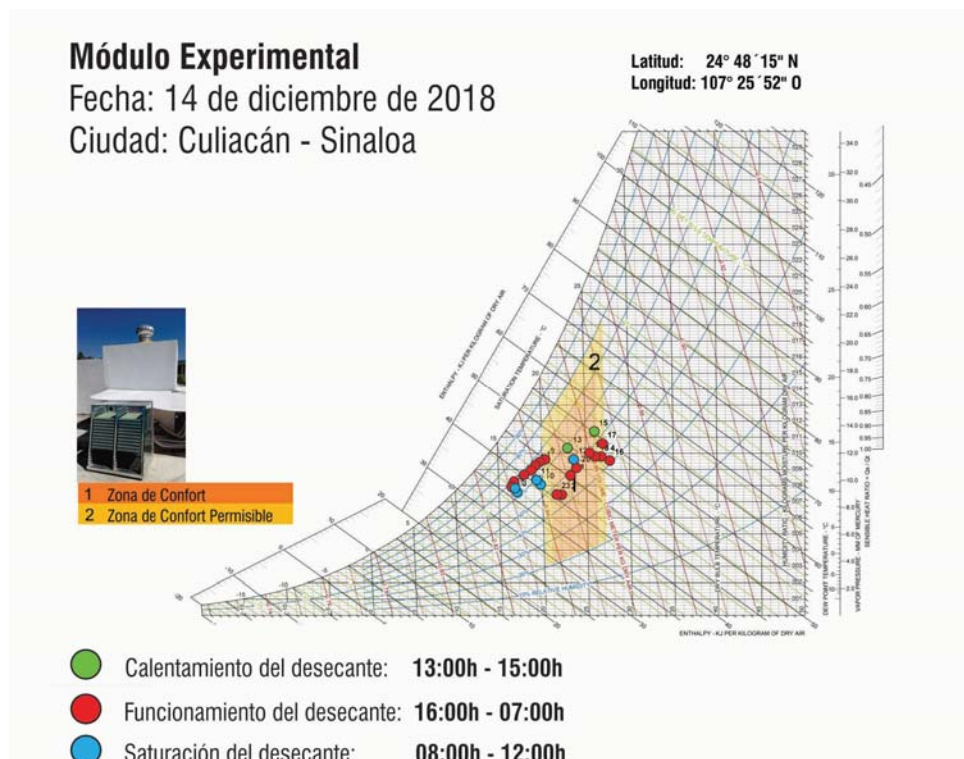


Fig. 225. Análisis diagrama psicrométrico, módulo experimental prueba IX. 14 de diciembre de 2018. Fuente: Propia.

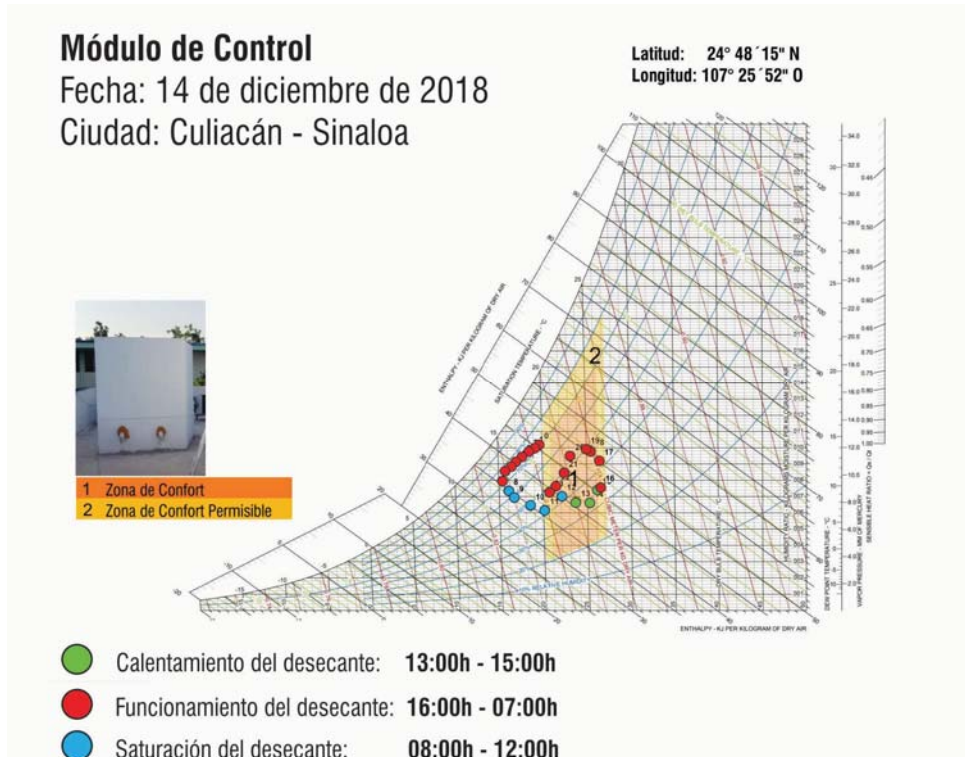


Fig. 226. Análisis diagrama psicrométrico, módulo de control prueba IX. 14 de diciembre de 2018. Fuente: Propia.

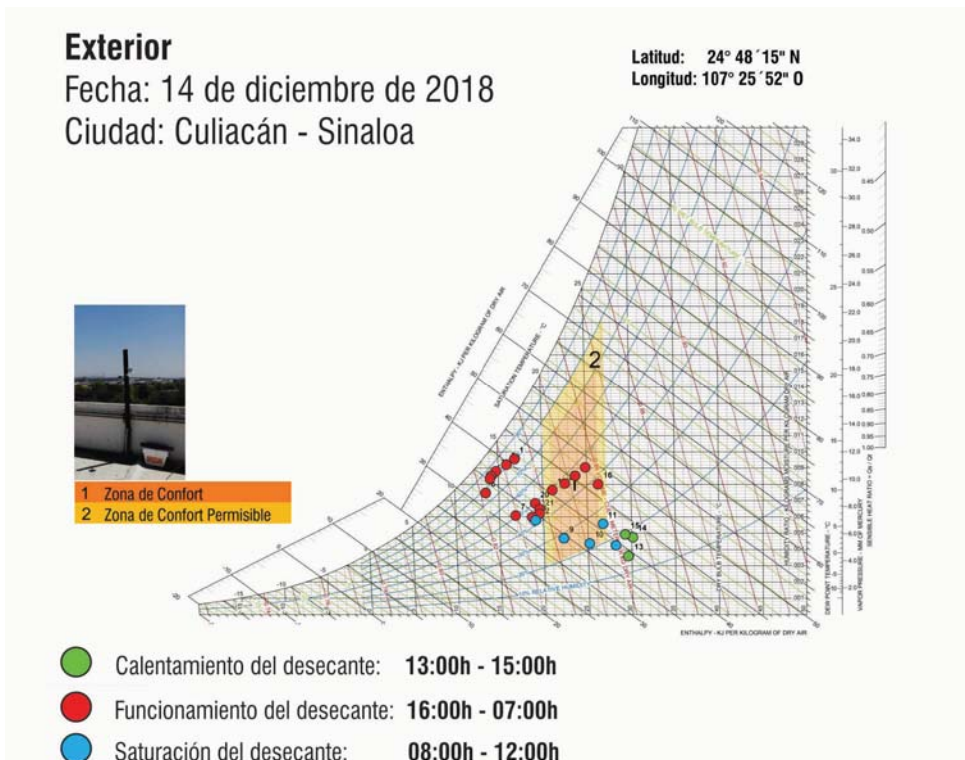


Fig. 227. Análisis diagrama psicrométrico, exterior prueba IX. 14 de diciembre de 2018. Fuente: Propia.

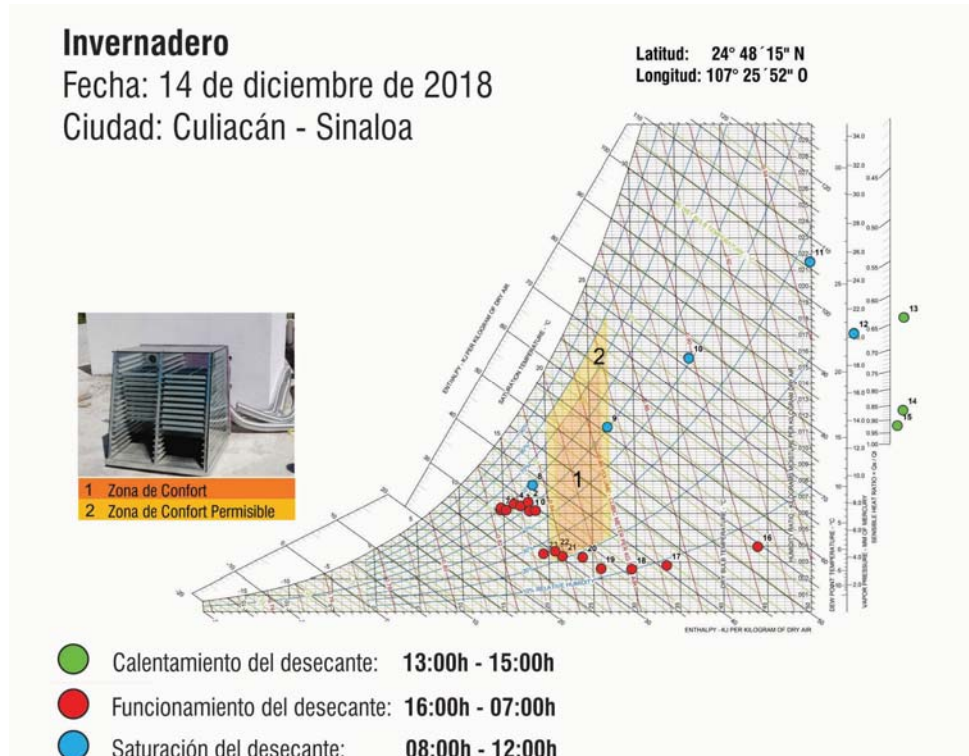


Fig. 228. Análisis diagrama psicrométrico, invernadero prueba IX. 14 de diciembre de 2018. Fuente: Propia.

Para el día 14 de diciembre en el módulo experimental los puntos desde la 1:00 h hasta las 11:00 h se ubicaron en la estrategia que requiere calefacción por ganancias internas; a las 17:00 h hay un punto que se sale de la zona de confort y se situó en la estrategia refrigeración por alta masa térmica. Para el resto de las horas los puntos estuvieron en el centro de la zona de confort. En el módulo de control, desde las 11:00 h hasta las 23:00 h, los puntos permanecieron en la zona de confort, como en el caso anterior los puntos de fuera requieren calefacción por ganancias internas.

En el exterior solo cinco puntos quedaron dentro de la zona de confort, de 09:00 h a 10:00 h, y en la noche de las 17:00 h a las 20:00 h. En lo madrugada entre la 01:00 h y las 08:00 h la estrategia a utilizar debe ser la calefacción; en la tarde los puntos se ubicaron en la estrategia refrigeración por alta masa térmica.

5. Conclusiones

La hipótesis establece que *“aprovechar las propiedades de absorción de humedad de la zeolita permiten aplicarla a un sistema de deshumidificación de espacios arquitectónicos en climas cálidos húmedos y por lo tanto ayudan a mejorar el ambiente higrotérmico”*.

Esta hipótesis sí se cumplió debido a que los análisis del proceso experimental muestran lo siguiente:

En cuanto a la **humedad relativa** para los días en que no se presentaron lluvias se encuentra un patrón repetitivo entre las variables evaluadas:

Desde la madrugada hasta las 08:00 h, la humedad relativa en el exterior es la de mayor valor, por debajo se encuentran los valores del módulo de control, seguidos de los valores del módulo experimental. Cuando se presenta el máximo valor de humedad absoluta en el exterior, los valores de esta disminuyen y entre las 07:00 h u 08:00 h, cuando se presenta el valor máximo de humedad en los módulos, la línea del exterior se posiciona con los valores más bajos de humedad relativa del experimento.

El módulo de control se convierte entonces en la variable con mayor humedad absoluta. Entre las 10:00 h y las 11:00 h la línea del módulo experimental sobrepasa los valores de control y se posiciona como la variable con mayor humedad relativa por alrededor de cinco horas. En este lapso se observa que los valores del invernadero están por encima de los del exterior.

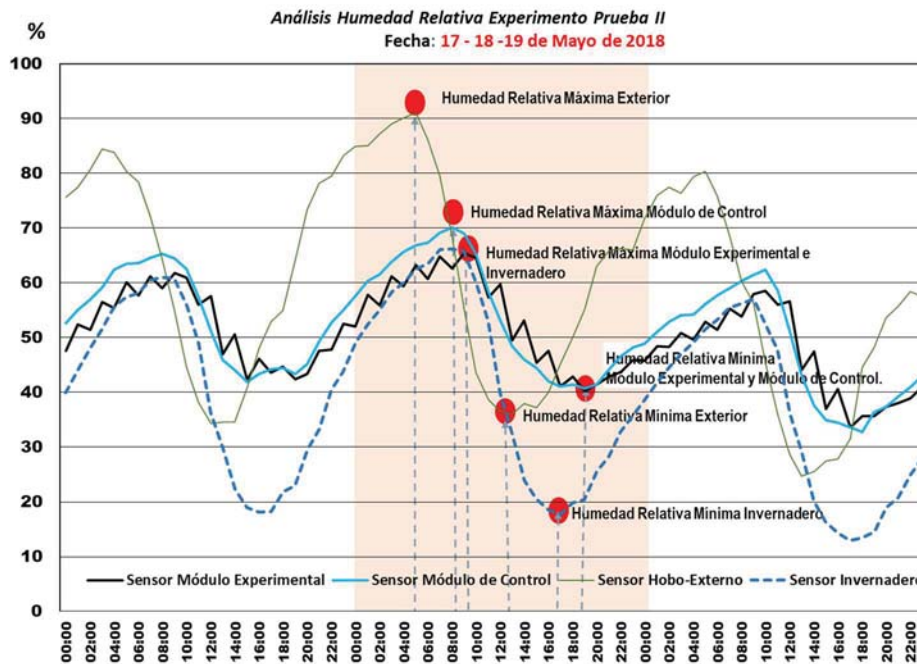


Fig. 229. Análisis diagrama psicrométrico, experimento prueba IX. 14 de diciembre de 2018. Fuente: Propia.

Cuando se presenta el valor mínimo en el exterior, los valores en los módulos siguen disminuyendo y en el exterior comienzan a aumentar, además, entre las 17:00 h y las 18:00 h los valores de humedad relativa en el exterior vuelven a posicionarse como los de mayor valor de todo el experimento.

Los valores máximos de humedad relativa exterior se presentan entre las 05:00 h y las 06:00 h, mientras que en el módulo experimental y de control se registran entre las 08:00 h y 09:00 h. Los valores mínimos de humedad exterior se presentan entre las 13:00 h y las 15:00 h, cuando

esto sucede los valores del invernadero se posicionan por debajo de los valores del exterior. En el módulo experimental y en el módulo de control los valores mínimos se presentan entre las 17:00 h y las 19:00 h. En el invernadero los máximos valores se registran entre las 07:00 h y 08:00 h, y los valores mínimos entre las 16:00 h y las 17:00 h.

Cuando se presenta el valor mínimo de humedad relativa en el invernadero, los valores del módulo experimental se posicionan por debajo de los valores del exterior que, para ese momento, se posicionan como la variable con mayor humedad relativa; seguida del módulo de control. En la noche se observa que para los días en que no se presenta lluvia o días muy nublados, la zeolita se activa en el invernadero y los valores del módulo experimental se posicionan por debajo del exterior y del módulo de control.

Se realizó una gráfica de barras donde se resume el desempeño de los ocho meses de pruebas para las diferentes variables del experimento, se graficaron los valores de promedio de humedad relativa, así como el valor máximo promedio y el valor mínimo promedio.

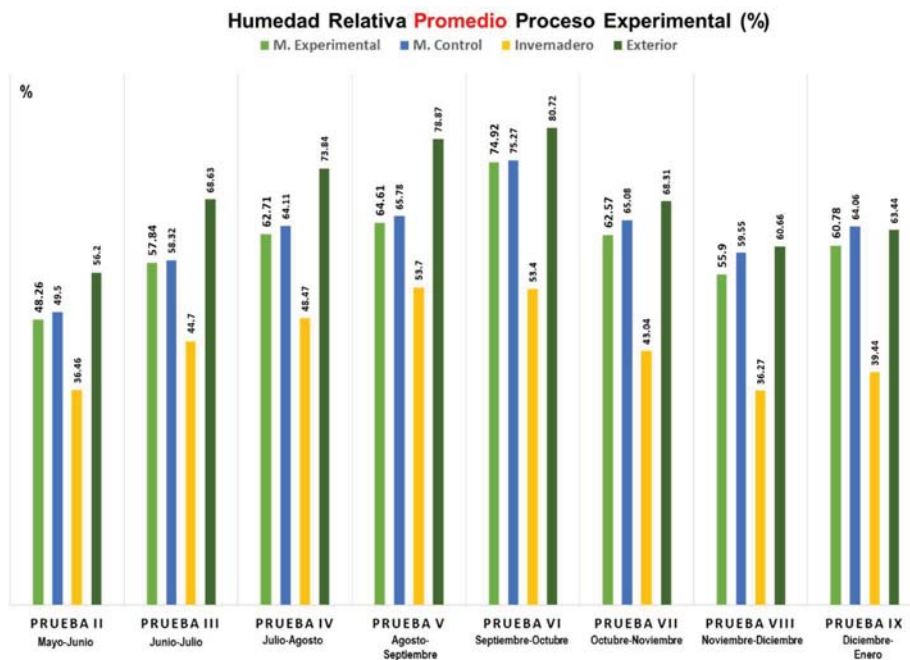


Fig. 230. Humedad relativa promedio para todas las pruebas experimentales. Fuente: Propia.

En las nueve pruebas que se realizaron se observa que la humedad relativa del exterior estuvo por encima de las variables evaluadas en todas las ocasiones. La humedad en el módulo experimental en todas las pruebas estuvo por debajo de los valores del módulo de control y del exterior. Se aprecia, además, que de mayo a septiembre la diferencia entre el módulo experimental es de 1 y 2 % por debajo de los valores del módulo de control, sin embargo, entre octubre y diciembre, esta diferencia puede llegar hasta un 5 %.

Comparado con el exterior, se observa que se presenta una importante reducción de humedad relativa en aquellos meses donde la humedad en el ambiente sobrepasa el 65 %. Por ejemplo, en el mes de agosto el valor promedio de la humedad relativa exterior es 78.87 % y en el módulo experimental, 64.61 % esto representa una reducción de 14.26 % de humedad relativa comparada con el ambiente exterior. En los meses de noviembre y diciembre esta diferencia es menor y la reducción de humedad relativa está entre un 5 % y un 3 %; también es importante

anotar que los valores de humedad relativa del ambiente disminuyen. En mayo, aunque la humedad relativa es 56.2 %, se presenta una reducción en el módulo experimental de 7.94 %; se deduce que esta reducción está relacionada con los factores climáticos con: alta radiación solar, escasa nubosidad y duración de la luz natural (alrededor de 13 horas); mientras que en los meses de noviembre y diciembre hubo días con lluvias, en diciembre se presentaron diez días nublados y las horas de luz natural se reducen a nueve horas.

El funcionamiento del invernadero, en cuanto a la absorción de humedad relativa, es efectivo, ya que la diferencia con el exterior es entre 14 y 27 % menos que en el exterior.

En cuanto a los valores máximos promedio, en cinco de las pruebas el valor más alto se presentó en el exterior. Es importante anotar que las máximas en el ambiente se registraron en la madrugada, mientras que en ambos módulos y en el invernadero se encontraron entre dos horas o dos horas y media después. Esta situación ocurre para un día sin lluvias, pero en los días en que llueve los valores máximos se registran en la hora de la precipitación. En solo dos pruebas, la tercera y la sexta, los valores máximos del módulo experimental fueron los mayores con respecto a las otras variables; esto se atribuye en que en estos meses se registraron días con intensas lluvias, mucha nubosidad y poca radiación solar.

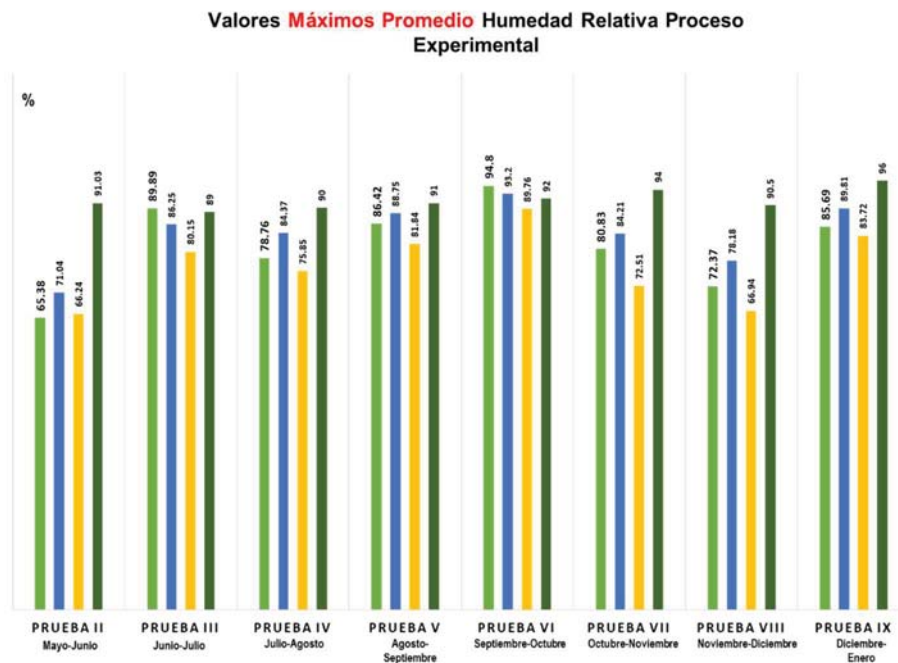


Fig. 231. Valores máximos promedio de humedad relativa para todo el proceso experimental. Fuente: Propia.

Los valores máximos del módulo de control se posicionaron en el segundo lugar después del exterior con mayor humedad relativa. Entre ambos módulos la diferencia que se presentó fue de 6 %, siendo menor la humedad en el módulo experimental. Los valores máximos en el invernadero sobrepasaron el 50 % de humedad relativa, sin embargo, para ninguna de las pruebas sobrepasaron los valores de los módulos y del ambiente exterior.

En el caso de los valores mínimos promedio, en seis de las pruebas los registros más altos se presentan en el módulo experimental, y en segundo lugar se encuentran los valores del módulo de control. Entre estos se evidencian pocas diferencias.

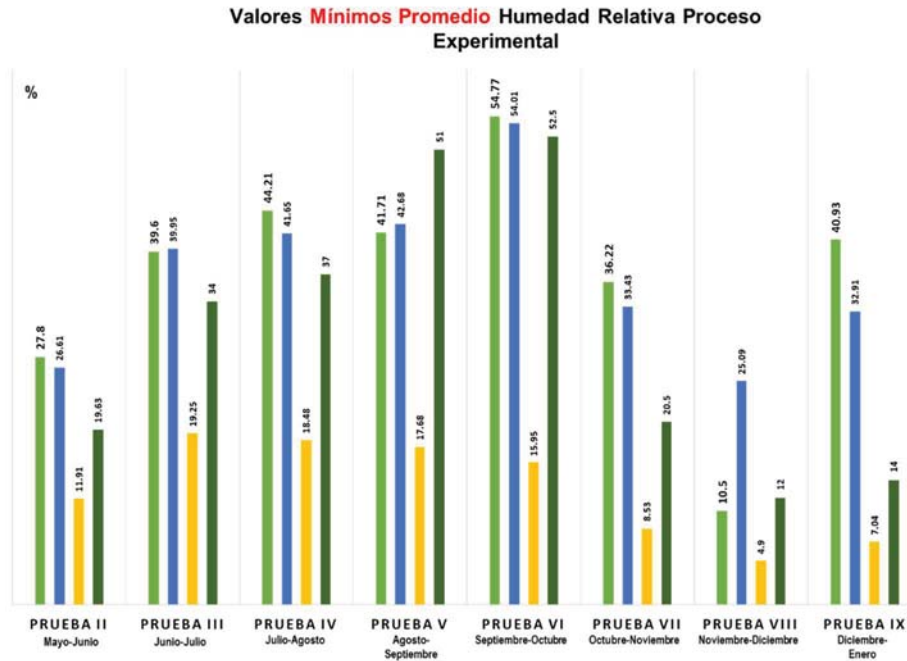


Fig. 232. Valores mínimos promedio humedad relativa para todo el proceso experimental. Fuente: Propia.

En las pruebas IV, VI, VII y IX los valores máximos más altos se registraron en el módulo experimental, como en el caso anterior, esto se debe a que en esos meses hubo días de lluvias intensas que vienen acompañadas de mucha nubosidad, y poca radiación solar, situación que afectó el desempeño del sistema de deshumidificación. En el invernadero los valores mínimos no sobrepasan el 20 % de humedad relativa, esto ratifica su correcta absorción.

Fue recurrente encontrar que, en la mayor parte de las pruebas, el horario de mayor disminución de humedad relativa se dio entre las 19:00 h y las 10:00 h del día siguiente. Así mismo, entre las 11:00 h y las 18:00 h la humedad el módulo experimental presentó el máximo de humedad relativa comparada con el resto de variables del experimento. En el caso del invernadero el horario en que se registró la mayor absorción con respecto al exterior fue entre las 15:00 h y las 10:00 h del día siguiente.

En el módulo de control, la mayor absorción, comparada con el exterior, se da entre las 20:00 h y las 10:00 h del día siguiente; hay un segundo intervalo donde se vuelve a presentar este fenómeno: el mediodía. Se realizó una tabla resumen donde se contabiliza el número total de horas que tuvo cada prueba, y el número de horas en que la humedad relativa fue menor en el módulo experimental, en el módulo de control y en el invernadero comparada con el ambiente exterior.

Tabla 44. Número de horas de humedad relativa que se encontraron por debajo de los valores exteriores.
Fuente: Propia.

NÚMERO DE HORAS DE HUMEDAD RELATIVA (%) POR DEBAJO DE LOS VALORES EXTERIORES					
		M. Experimental	M. Control	Invernadero	Hrs Total Prueba
PRUEBA II	May - Jun	480 horas	472 horas	644 horas	740 horas
PRUEBA III	Jun - Jul	574 horas	597 horas	703 horas	718 horas
PRUEBA IV	Jul - Ago	585 horas	618 horas	757 horas	768 horas
PRUEBA V	Ago - Sept	327 horas	329 horas	405 horas	408 horas
PRUEBA VI	Sept - Oct	481 horas	497 horas	678 horas	744 horas
PRUEBA VII	Oct - Nov	512 horas	495 horas	744 horas	768 horas
PRUEBA VIII	Nov - Dic	378 horas	351 horas	563 horas	600 horas
PRUEBA IX	Dic - Ene	477 horas	429 horas	717 horas	755 horas

Para las nueve pruebas se observan cinco meses en que, en el módulo experimental, comparado con el módulo de control, tiene más horas con menos humedad relativa. En las pruebas III, IV y V se aprecian más horas en que el módulo de control tiene menores valores comparados con el módulo experimental. Sin embargo, por promedio se identifica que para todas las pruebas el módulo experimental tiene mejor desempeño en cuanto a la absorción de humedad relativa.

En el tema de la **temperatura** también se observaron patrones repetitivos para las pruebas que se realizaron:

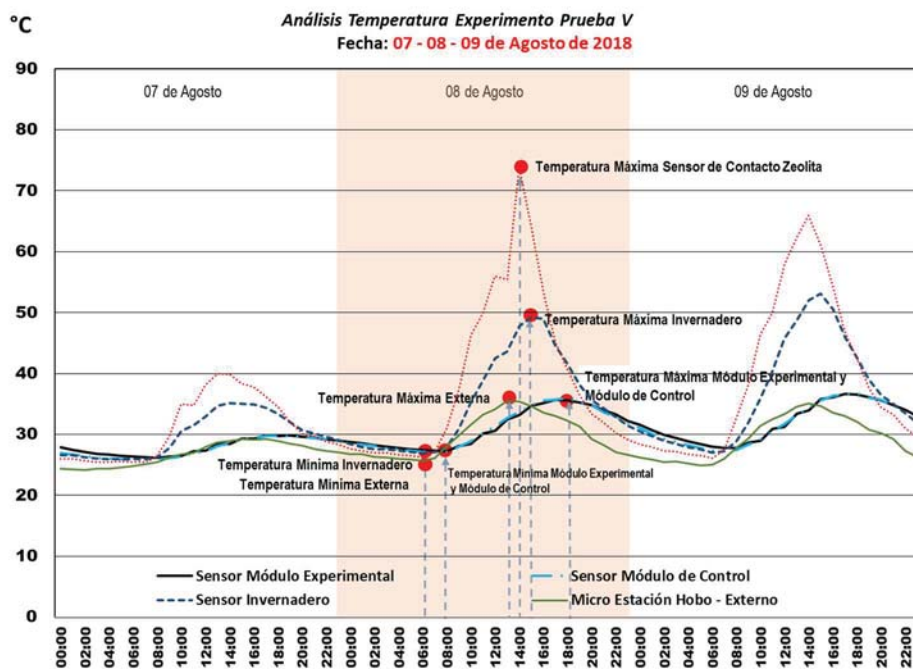


Fig. 233. Análisis temperatura experimento prueba V, 08 de agosto de 2018. Fuente: Propia.

Las temperaturas mínimas en el exterior se pueden presentar entre las 05:00 h y las 06:00 h, en ese intervalo el sensor de contacto de la zeolita registra su valor mínimo. En el invernadero la mínima se encuentra entre las 06:00 h y las 07:00 h; en el módulo experimental y en el de control se presenta entre las 07:00 h y 08:00 h.

Las temperaturas máximas en el exterior se registran entre las 13:00 h y 14:00 h; en el sensor de contacto de la zeolita se detectan las máximas entre las 13:00 h y las 15:00 h. En el invernadero se pueden presentar entre las 15:00 h y las 16:00 h, y en el módulo experimental y de control las máximas generalmente se presentan entre las 18:00 h y las 19:00 h.

En cuanto al desempeño de la temperatura a lo largo del día, en la madrugada los menores valores se evidenciaron en el exterior, por encima de estos se encuentran los valores del sensor de contacto, los del invernadero y con mayor temperatura se encuentran los módulos. Es importante precisar que se observó para este lapso, la diferencia entre las variables evaluadas no es muy grande.

A partir de que se presentan las temperaturas mínimas, se observa que todos los valores ascienden, y las diferencias numéricas entre las variables son importantes. En el periodo en que la temperatura exterior asciende y llega a su máximo, los valores de temperatura en ambos módulos se posicionan como los menores del experimento. Cuando la temperatura en el exterior desciende, los valores en el interior se posicionan por debajo de los datos del sensor de contacto y del invernadero, además las diferencias de temperatura entre el interior con el exterior pueden estar entre los 3 y los 5 °C. En la noche los valores de temperatura disminuyen y los valores del exterior son menores que en los módulos.

Se observó a lo largo del experimento que la temperatura entre ambos módulos es muy similar y tienen poca diferencia, de hecho, hay momentos en que la temperatura del módulo experimental es un poco más alta que el módulo de control, esto se debe al efecto que ocurre cuando el desecante se activa y a que la temperatura alrededor se incrementa.

La temperatura máxima en el invernadero y en el sensor de contacto de la zeolita se presenta entre las 14:00 h y 16:00 h; y es hasta las 18:00 h que se observan por los datos de humedad relativa que la zeolita empieza a absorber humedad durante la noche y en la madrugada, esto ocurre hasta que se presenta el valor de humedad máxima en el invernadero para ese momento la zeolita se satura; por ello los valores de humedad relativa se posicionan por encima de los valores exteriores.

Se realizó una gráfica de barras con los promedios de temperatura para el módulo experimental, el módulo de control, el invernadero y el exterior. Se observa que los valores más altos de todas las pruebas corresponden al invernadero, allí los valores estuvieron entre los 26 y 36 °C.

Entre mayo y agosto la diferencia entre el invernadero y el exterior representa alrededor de 6 °C, sin embargo, entre octubre y diciembre esta diferencia se amplía entre 8 y 10 °C; esto se debe a que las temperaturas en el exterior disminuyen y en el invernadero la temperatura sigue siendo alta.

Los rangos de temperatura para el módulo de control y el módulo experimental estuvieron entre los 20 y los 32 °C. En el exterior los rangos estuvieron entre los 19 y los 30 °C. De mayo a julio la diferencia entre ambos módulos y el exterior está entre 2 y 3 °C, siendo más cálida en los módulos. En agosto, esta diferencia es de milésimas de grados Celsius. De septiembre a

diciembre, la diferencia con el exterior sigue siendo entre 1 y 3 °C siendo la temperatura más alta en ambos módulos.

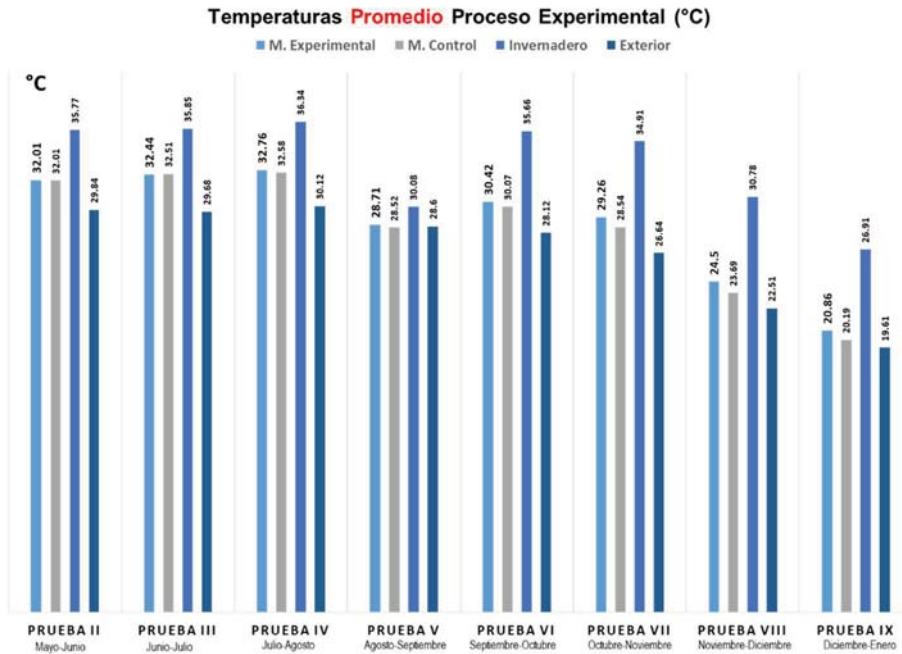


Fig. 234. Temperatura promedio para todo el proceso experimental. Fuente: Propia.

Comparando la temperatura entre ambos módulos, la diferencia es muy pequeña, oscila entre 0.1 y 0.5 °C. Para los meses de octubre, noviembre y diciembre la diferencia es mucho más clara y el módulo experimental es el que contiene los valores más altos, comparados con el módulo de control y los datos del ambiente exterior.

En el caso de los valores de las temperaturas máximas promedio, se observó que, para los meses de las pruebas, hubo un verano muy cálido que por sus valores reflejados se extiende hasta octubre; y una parte del otoño e invierno con temperaturas mucho más agradables.

Los rangos de las temperaturas máximas en el exterior estuvieron entre los 31 y los 39 °C; en los módulos este rango en verano estuvo entre los 37 y los 39 °C, en otoño e invierno se ubicaron entre los 36 y los 30 °C. En el invernadero las máximas estuvieron entre los 52 y los 62 °C.

Los valores máximos promedio muestran que las temperaturas más altas se encuentran en el invernadero; y las más bajas están en el ambiente exterior. Las temperaturas en ambos módulos son de valores similares, entre mayo y julio en el módulo experimental es menor que en el módulo de control con 0.20 °C de diferencia; mientras que de septiembre hasta diciembre es más alta en el módulo experimental con 0.8 °C por encima. La diferencia de temperaturas entre los módulos y el exterior es 1 °C más cálida que el exterior.

En el exterior las temperaturas mínimas promedio estuvieron entre los rangos de los 7 y 14 °C en noviembre y diciembre; entre mayo y octubre estuvieron entre los 18 y los 22 °C. La variable del ambiente exterior en todas las pruebas se posiciona con el menor valor de temperatura, seguida por los valores del invernadero.

Los valores mínimos promedio más altos se encontraron en ambos módulos y, como en análisis anteriores, estos dos tienen valores de temperatura muy similares.

En la mayoría de los casos la diferencia entre la temperatura de los módulos y el exterior está entre 2 y 4 °C, siendo más cálida en los módulos. El rango de diferencia que se presenta entre el módulo de control y el módulo experimental está entre 0.5 y 1 °C, siendo la temperatura más alta en el módulo experimental.

La mayor diferencia de temperaturas mínimas promedio que se presenta entre los módulos y el exterior fue 5.84 °C, siendo más alta en los módulos; esto se evidenció en la prueba II durante el mes de mayo. Entre los meses de junio y septiembre la diferencia se ubicó entre 1 y 2 °C, siendo más alta en los módulos. A partir de octubre y hasta diciembre esta diferencia se amplía a 3 °C, y los módulos siguen siendo los que contienen la temperatura más alta.

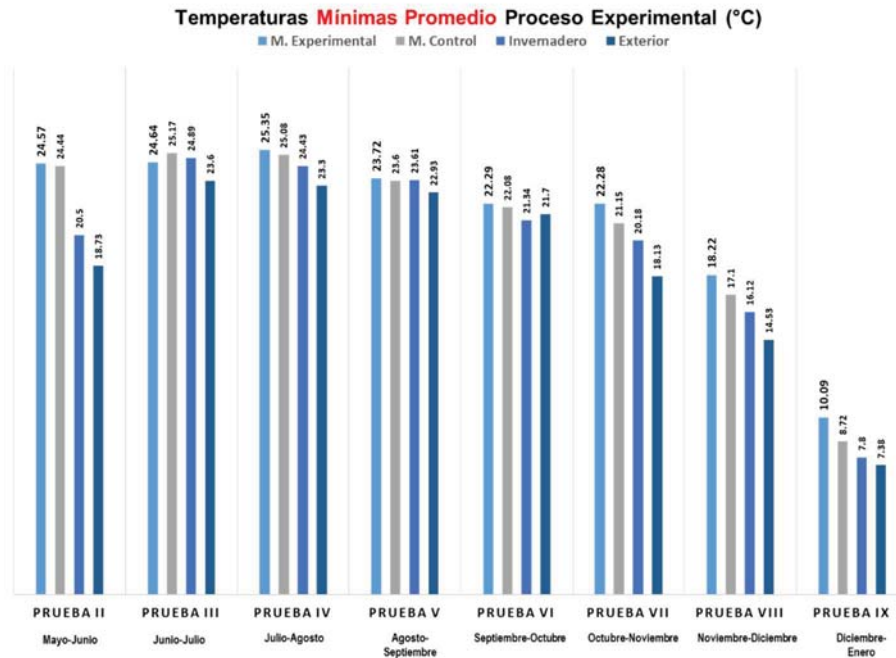


Fig. 235. Temperatura mínima promedio para todo el proceso experimental. Fuente: Propia.

Se realizó un cuadro resumen del número de horas en que la temperatura de las variables del módulo experimental, del módulo de control y del invernadero presentaron menores valores que el exterior.

POR DEBAJO DE LOS VALORES EXTERIORES					
		M. Experimental	M. Control	Invernadero	Hrs Total Prueba
PRUEBA II	May - Jun	258 horas	264 horas	110 horas	740 horas
PRUEBA III	Jun - Jul	126 horas	143 horas	1 horas	718 horas
PRUEBA IV	Jul - Ago	180 horas	187 horas	4 horas	768 horas
PRUEBA V	Ago - Sept	86 horas	100 horas	8 horas	408 horas
PRUEBA VI	Sept - Oct	121 horas	166 horas	10 horas	744 horas
PRUEBA VII	Oct - Nov	162 horas	223 horas	19 horas	768 horas
PRUEBA VIII	Nov - Dic	173 horas	209 horas	35 horas	600 horas
PRUEBA IX	Dic - Ene	234 horas	267 horas	46 horas	755 horas

Tabla 45. Número de horas de temperatura en los valores medidos estuvieron por debajo de los valores exteriores. Fuente: Propia.

El módulo de control tiene el mayor número de horas con temperaturas menores que el exterior. Al comparar el tiempo en que la temperatura del módulo experimental estuvo por debajo del módulo de control se encontraron los siguientes resultados: 4 horas en la Prueba II, 17 horas en la Prueba III, 7 horas en la Prueba IV, 3 horas en la Prueba V, 45 horas en la prueba VI, 61 horas en la prueba VII, 36 horas en la Prueba VIII, y 33 horas en la Prueba IX.

La diferencia entre el número de horas con menor temperatura, entre ambos módulos en los meses de verano, es poca. A partir de septiembre esta diferencia se hace más amplia; esto se debe a que la temperatura exterior influye en el desempeño de la temperatura interior de los módulos; esto quiere decir que, si el aire que rodea el edificio está fresco, el interior puede enfriarse de forma natural. En el módulo experimental, cuando la zeolita se activa la temperatura se incrementa, además los tubos que transportan el aire al módulo transfieren el calor del ambiente y del piso donde se encuentran, y esto aunado a la alta conductividad del block de concreto, hace que el resultado presente temperaturas más altas que el módulo de control.

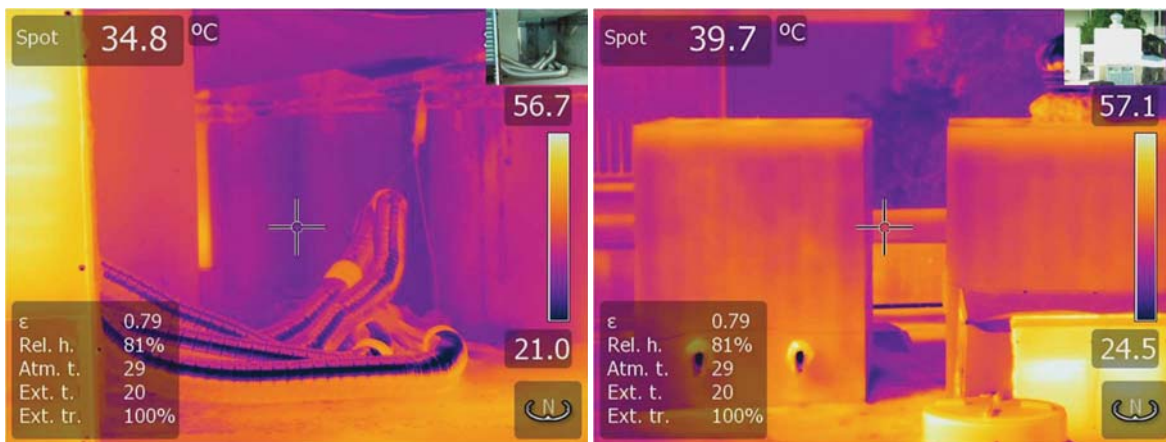


Fig. 236. Termografías en el montaje experimental, vista posterior. Fuente: propia

Se toman imágenes con la cámara termográfica en el mes de septiembre, en la imagen izquierda se observa como la mitad del tubo que transporta el aire al módulo experimental tiene la misma temperatura del piso donde está apoyado, y esto sucede durante todo el día. Esto influye para que la temperatura en el módulo experimental presente valores más altos. En la imagen derecha se hace una toma de la fachada posterior del experimento.

La superficie de la zeolita registró temperaturas máximas entre los 78 y los 89.5 °C; y los valores mínimos estuvieron entre los 8 °C en diciembre, y los 24 °C en verano. De acuerdo con lo estudiado, la zeolita se activa entre los 42 °C y los 43 °C; en la pruebas las temperaturas mínimas en la superficie de contacto se presentan entre las 06:00 h y las 07:00 h, y alcanza su máximo entre las 13:00 h y las 14:00 h, se observó que la monitorización de datos a partir de los 40 °C comienza entre las 09:00 h o 10:00 h y termina entre las 16:00 h y las 17:00 h.

En este sentido se deduce que en la primera mitad del día la zeolita entra en su etapa de saturación (absorbe en la noche humedad del ambiente) y se regenera, a partir de las 12:00 h empieza activarse con el calor del ambiente exterior además de la radiación y hasta las 19:00 h el resultado de este proceso se ve reflejado en los valores de humedad relativa del módulo experimental.

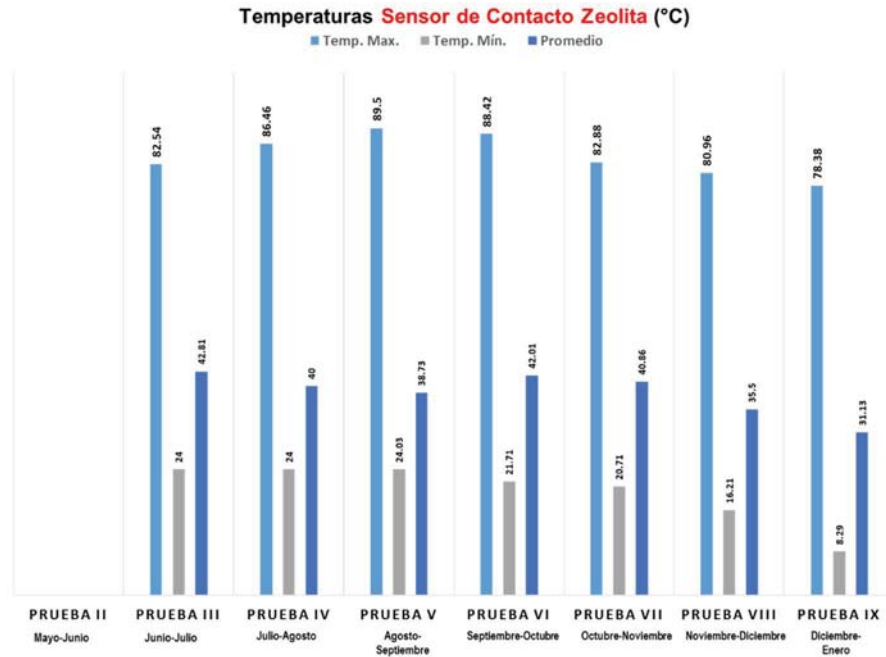


Fig. 237. Temperaturas registradas en el sensor de contacto para todo el proceso experimental. Fuente: propia

Se realizaron tomas con la cámara termográfica del invernadero; allí se observaron las altas temperaturas que alcanza la superficie de la zeolita que se elevan a más de 55 °C

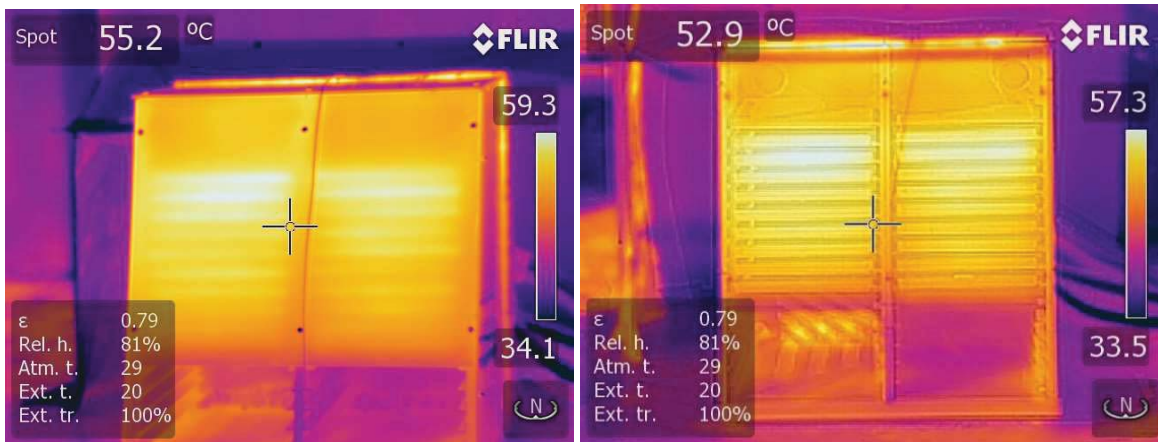


Fig. 238. Termografías en el invernadero. Fuente: propia

En el tema de humedad absoluta también hay patrones repetitivos en las pruebas, por ejemplo:

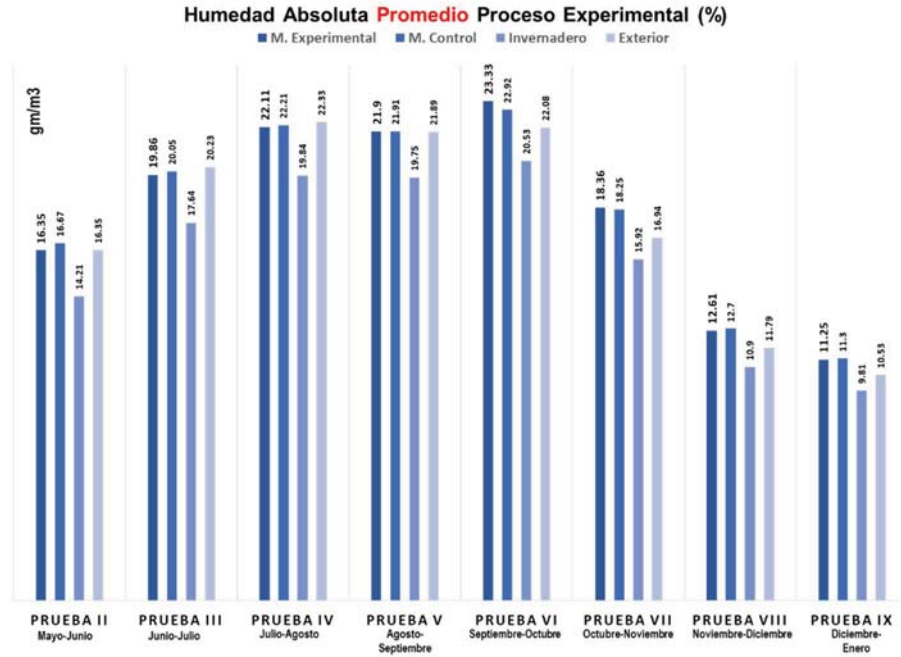


Fig. 239. Valores de humedad absoluta promedio en las pruebas experimentales. Fuente: Propia.

Se observó que los valores máximos se presentan en el invernadero entre las 12:00 h y las 13:00 h; en el módulo experimental se dan entre las 16:00 h y las 17:00 h; en el exterior entre las 17:00 h y las 18:00 h, y en el módulo de control entre las 18:00 h y las 19:00 h. Los valores mínimos en el invernadero se presentaron entre las 05:00 h y las 06:00 h; en el módulo experimental entre las 07:00 h y las 08:00 h; en el exterior entre las 12:00 h y las 13:00 h, y en el módulo de control entre las 13:00 h y las 14:00 h.

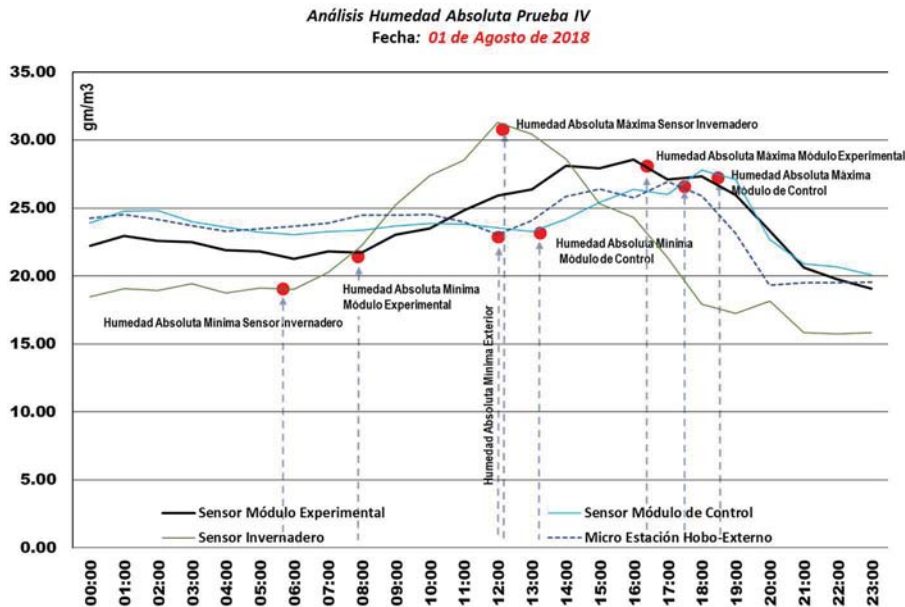


Fig. 240. Puntos donde se presentan las humedades absolutas máximas y mínimas en la prueba experimental. Fuente: Propia.

Cuando no se presentan lluvias el desempeño de las variables muestra que en las primeras horas del día los menores valores de humedad absoluta se registran en el invernadero y por encima de estos están los valores del módulo experimental; los valores del módulo de control y del exterior son los que contienen mayor humedad absoluta. Cuando se registra el mínimo valor en el invernadero, los valores ascienden hasta llegar a la máxima al mediodía, esto mismo ocurre en el módulo experimental, pero la línea que asciende hasta llegar a la máxima se amplía hasta llegar a las 16:00 h. El desempeño en la madrugada y en las primeras horas del día en el módulo de control y del exterior son líneas continuas con poca ondulación, con valores muy similares y donde su valor mínimo ocurre al mediodía, allí los valores muestran líneas ascendentes y llegan a su máximo al finalizar la tarde.

Entre 3 y 4 horas después de que se presenta el máximo valor en el invernadero, esta variable se posiciona como la de menor valor en el experimento. En el módulo experimental se debe esperar entre seis o siete horas, después de que aparece el valor máximo, para apreciar la absorción de humedad dentro del módulo.

Con respecto al promedio de humedad absoluta, de mayo a agosto se observa que los valores más altos se encuentran en las columnas que corresponden al módulo de control y al exterior; de septiembre hasta diciembre los valores más altos se registran en ambos módulos; en el mes de septiembre se observa que el módulo experimental tiene una amplia diferencia con respecto a las otras variables, esto se debe a que en ese mes se presentó la mayor precipitación del año. De acuerdo con este análisis, se puede deducir que el sistema de deshumidificación trabaja mejor cuando hay altas temperaturas y altos valores de humedad, ya que a partir de que comienzan a disminuir las temperaturas en el ambiente, los valores promedio de humedad en el módulo experimental son más altos que en el módulo de control, en el invernadero y en el exterior.

Se presentan a continuación las tablas que contienen los valores de absorción de humedad absoluta, que se calcularon a partir de las diferencias entre el módulo experimental, el módulo de control y el invernadero con el exterior:

Tabla 46. Valores de absorción de humedad absoluta calculadas a partir de las diferencias presentadas entre el Módulo Experimental y el Exterior. Fuente: Propia.

VALORES DE ABSORCIÓN DE HUMEDAD ABSOLUTA MÓDULO EXPERIMENTAL								
COMPARADA CON EL EXTERIOR								
Unidad : grm/m3	May - Jun	Jun - Jul	Jul - Ago	Ago - Sept	Sept - Oct	Oct - Nov	Nov - Dic	Dic - Ene
	Prueba II	Prueba III	Prueba IV	Prueba V	Prueba VI	Prueba VII	Prueba VIII	Prueba IX
Máximo Valor de Absorción	5.85	4.24	4.31	7.94	2.43	2.17	1.86	5.31
Mínimo Valor de Absorción	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.83	0.01	0.00
Promedio de Absorción	1.52	1.30	1.50	1.22	0.61	0.46	0.63	0.57

Tabla 47. Valores de absorción de humedad absoluta calculadas a partir de las diferencias presentadas entre el Módulo de Control y el Exterior. Fuente: Propia.

VALORES DE ABSORCIÓN DE HUMEDAD ABSOLUTA MÓDULO DE CONTROL								
COMPARADA CON EL EXTERIOR								
Unidad : grm/m3	May - Jun	Jun - Jul	Jul - Ago	Ago - Sept	Sept - Oct	Oct - Nov	Nov - Dic	Dic - Ene
	Prueba II	Prueba III	Prueba IV	Prueba V	Prueba VI	Prueba VII	Prueba VIII	Prueba IX
Máximo Valor de Absorción	4.28	2.57	7.44	7.80	1.82	3.08	2.15	5.11
Mínimo Valor de Absorción	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
Promedio de Absorción	1.07	0.69	0.70	0.95	0.55	0.43	0.24	0.45

Tabla 48. Valores de absorción de humedad absoluta calculadas a partir de las diferencias presentadas entre el Invernadero y el Exterior. Fuente: Propia.

VALORES DE ABSORCIÓN DE HUMEDAD ABSOLUTA INVERNADERO								
COMPARADA CON EL EXTERIOR								
Unidad : grm/m ³	May - Jun	Jun - Jul	Jul - Ago	Ago - Sept	Sept - Oct	Oct - Nov	Nov - Dic	Dic - Ene
	Prueba II	Prueba III	Prueba IV	Prueba V	Prueba VI	Prueba VII	Prueba VIII	Prueba IX
Máximo Valor de Absorción	9.48	8.92	9.42	9.67	10.46	9.59	10.19	9.62
Mínimo Valor de Absorción	0.04	0.01	0.00	0.13	0.01	0.03	0.00	0.11
Promedio de Absorción	4.52	4.45	4.63	4.38	4.07	4.29	4.00	3.42

Según los datos anteriores, en los meses de mayo, junio y agosto, el módulo experimental tuvo mejor desempeño que el módulo de control, ya que los valores de absorción del módulo experimental fueron mayores. En julio en el valor máximo se observa que el módulo de control tuvo mejor desempeño, se piensa que esto se debe a la influencia de la lluvia que aumenta la humedad en ambos módulos, sin embargo, en el módulo de control la evaporación sucede más rápido que en el módulo experimental; cuenta de ello es que en los días posteriores a la lluvia se presentan dos intervalos en el día y en la tarde en que la humedad es menor que en el exterior, mientras que en el módulo experimental solo ocurre desde el final de la tarde hasta la madrugada. Al comparar los promedios entre los módulos en esa prueba tuvo mejor desempeño el módulo experimental

En octubre y noviembre, en el módulo experimental se presenta una diferencia mayor de 1 gr/m³ con respecto al módulo experimental, mientras que en diciembre el desempeño del módulo experimental vuelve a tener mejor desempeño que el módulo de control.

Los valores del invernadero muestran su correcto funcionamiento, ya que los máximos, los mínimos, y el promedio están por debajo del exterior y por debajo del módulo experimental y de control.

Se contabilizó el número de horas en que la humedad absoluta fue menor que los valores del exterior, el mejor desempeño entre los módulos se presenta en el experimental, ya que este tiene mayor número de horas en que la humedad es menor.

Los meses en que la diferencia del número de horas entre ambos módulos es mayor en el módulo experimental son: mayo, octubre, noviembre y diciembre. Los meses en que la diferencia no es tan amplia, coinciden con la elevada humedad en el ambiente de los meses de verano.

El número de horas en el invernadero en que la humedad absoluta estuvo por debajo del exterior sobrepasa las horas del módulo experimental y del módulo de control; la diferencia con el exterior está entre las 100 y las 314 horas. En diciembre se observa que el número de horas de absorción en el invernadero se ve afectado porque las horas de radiación solar disminuyen, por ello la diferencia es más amplia con el exterior en invierno.

Tabla 49. Número de horas en que la humedad absoluta estuvo por debajo de los valores exteriores.
Fuente: Propia.

NÚMERO DE HORAS DE HUMEDAD ABSOLUTA (grm/m ³) POR DEBAJO DE LOS VALORES EXTERIORES					
		M. Experimental	M. Control	Invernadero	Hrs Total Prueba
PRUEBA II	May - Jun	401 horas	288 horas	511 horas	740 horas
PRUEBA III	Jun - Jul	479 horas	464 horas	538 horas	718 horas
PRUEBA IV	Jul - Ago	489 horas	463 horas	592 horas	768 horas
PRUEBA V	Ago - Sept	242 horas	184 horas	308 horas	408 horas
PRUEBA VI	Sept - Oct	177 horas	148 horas	501 horas	744 horas
PRUEBA VII	Oct - Nov	267 horas	45 horas	530 horas	768 horas
PRUEBA VIII	Nov - Dic	280 horas	74 horas	406 horas	600 horas
PRUEBA IX	Dic - Ene	315 horas	93 horas	441 horas	755 horas

Entre los días analizados en el módulo experimental y comparado con todas las variables de las pruebas; donde se observó mejora del ambiente higrotérmico interior corresponde a los días: 9 de noviembre, 1 de diciembre y 14 de diciembre. El día 20 de septiembre los puntos están cerca de la zona límite de confort, este día fue clasificado como el día de mayor precipitación del 2018.

El día 8 de agosto, el desempeño del módulo de control y exterior fue muy similar como en el caso anterior, en cuanto la ubicación de los puntos, ninguno de ellos se ubicó de la zona de confort. Para este día en el módulo experimental, los puntos que corresponden a la madrugada se posicionan muy cerca de la zona límite de confort, sin embargo, entre las 13:00 h y las 18:00 h los puntos se alejan de la zona de confort debido a la alta humedad relativa que presentó en el módulo.

Para el día 1 de agosto, hay incomodidad térmica para todas las variables del experimento, los puntos que corresponden a las horas entre las 22:00 h y las 23:00 h son los únicos que están cercanos a la zona de confort.

El día 15 de junio se ubicaron puntos del exterior dentro de la zona de confort, en el horario comprendido entre las 19:00 h y las 23:00 h; en el módulo experimental y de control los puntos que estuvieron en el límite de la zona de confort corresponden a los puntos que están entre las 00:00 h y las 11:00 h y un segundo intervalo entre las 19:00 h y 23:00 h, en la tarde se presenta incomodidad térmica.

El día 18 de mayo, entre las 21:00 h y las 23:00 h se registró comodidad térmica en el ambiente exterior, para el resto del día los puntos estuvieron por fuera de la zona de confort. En el módulo de control y experimental el desempeño fue muy parecido, los puntos establecen que hubo incomodidad térmica por 24 horas, sin embargo, se observa que en el módulo experimental entre las 14:00 h y las 17:00 h los puntos se alejan más de la zona de confort que a esa misma hora en el módulo de control.

En el diagrama psicrométrico se observa el proceso de deshumidificación en el invernadero: el inicio de la deshumidificación del aire inicia en el punto "A", entre las 13:00 h y las 14:00 h se activa la zeolita por el calor generado por la radiación solar y la temperatura, a partir de esta hora se observa la reducción de humedad en el invernadero; en la línea del punto "B" sigue la absorción de humedad durante el final de la tarde, la noche y parte de la madrugada; en la línea "C" el desecante se satura y esto le lleva entre las 07:00 h y las 13:00 h.

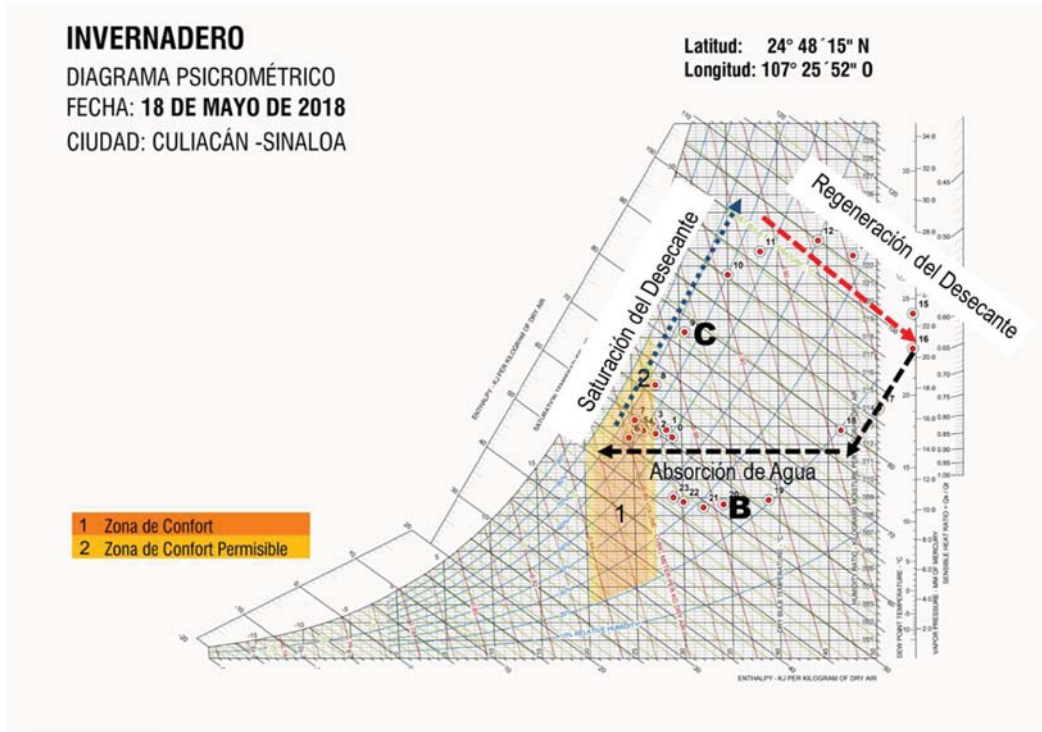


Fig. 241. Análisis diagrama psicrométrico en el invernadero. Fuente: Propia

El módulo experimental recibe el aire que contiene el invernadero; en el diagrama psicrométrico se identifican los puntos cuando la humedad relativa disminuye con respecto al exterior, esto se da entre las 19:00 h y las 07:00 h del día siguiente; sin embargo, el fenómeno de la refrigeración con el sistema pasivo no es suficiente y se deben implementar estrategias para mejorarlo.

Cuando el desecante se está regenerando, se observó un incremento de la temperatura dentro del módulo, esto es normal a causa de que el desecante se está activando y como resultado el aire circundante eleva la temperatura.

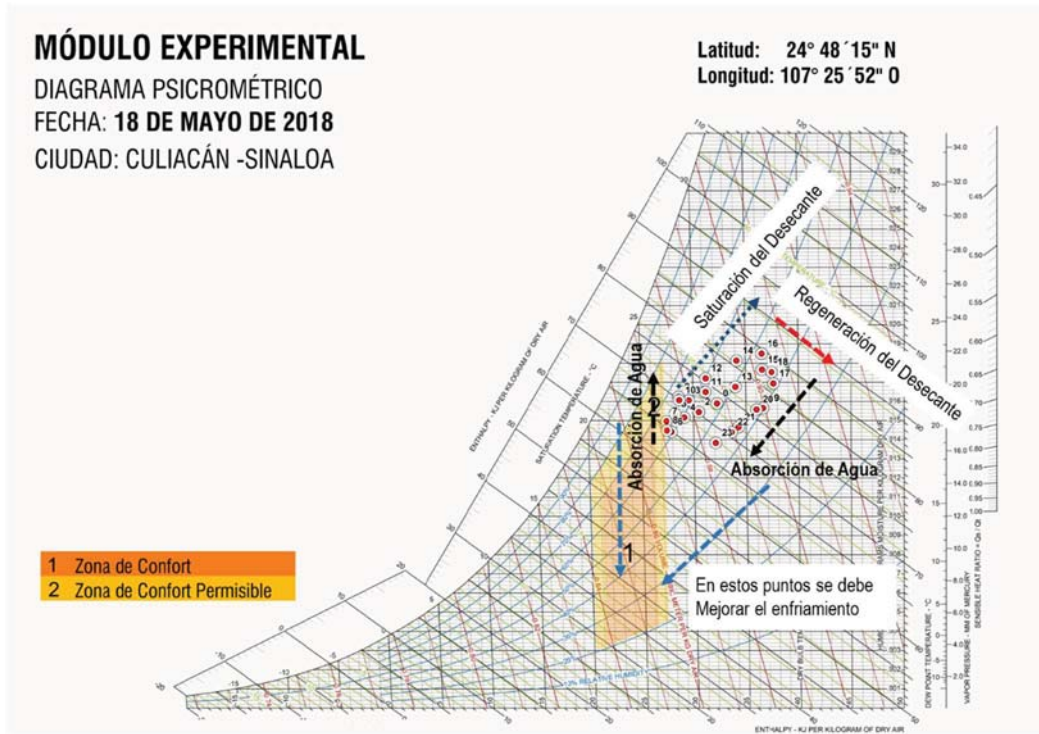


Fig. 242. Análisis diagrama psicrométrico en el módulo experimental. Fuente: Propia

Se retoman también los cuestionamientos iniciales del planteamiento del problema:

¿Cuál es la colocación óptima de la zeolita en el sistema de deshumidificación para cerrar el ciclo termodinámico, regenerar el desecante, mantener la humedad relativa y la temperatura cercana a la zona de confort en la arquitectura del trópico cálido húmedo?

La colocación de la zeolita en el invernadero fue la óptima ya que se aprovechó la potencia de la radiación solar y las altas temperaturas generadas en el invernadero que se presentaron a lo largo de los 8 meses, en los cuales la activación de las propiedades absorbentes de la zeolita se presentan a partir de las 12:00h; es importante recalcar que no se utilizó sistemas mecánicos de calentamiento, el funcionamiento del sistema de deshumidificación se hizo de forma natural.

La humedad se acumula donde hay poco viento ¿Cuáles son las formas pasivas de enfriar el aire?

El movimiento del aire cuando los valores de humedad relativa en el ambiente sobrepasan 70% es prácticamente nulo, esto se hizo evidente en las pruebas experimentales. Es por ello que se tomó la decisión de instalar ventiladores que permitieran el movimiento de aire al interior de los módulos.

Enfriar el aire de forma pasiva muchas veces no es suficiente para alcanzar índices de confort idóneos, ya que en campo los flujos de ventilación son cambiantes en su dirección, velocidad y continuidad.

La norma ISO 7730 establece que el confort “es la condición de la mente en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico”, para climas cálidos húmedos Salazar (2001) menciona

que el movimiento del aire es el único elemento ambiental que alivia la sensación incómoda que se presenta en este tipo de clima. Así que llegar a los estándares de confort utilizando estrategias pasivas es todo un reto.

La norma ISO 7730 señala que en los seres humanos hay una adaptación climática además de la ropa, postura del cuerpo entre otras y es importante mencionar que las personas que viven en localidades con temperaturas altas desarrollan una adaptación a este ambiente por lo que los rangos de confort climático son más amplios que por ejemplo una persona que vive en climas templados o fríos. (Normas ISO 7933, ISO 7243)

A partir de estas conclusiones se derivan estas líneas de investigación:

Con el fin de mejorar el desempeño de la temperatura al interior del módulo experimental se debe profundizar en el uso de refrigeración solar como propuesta de enfriamiento pasivo:

La *fundación de la energía de la Comunidad de Madrid* realiza La *Guía del Frío Solar del 2011*, destaca que para lograr esta forma de enfriamiento se debe considerar este proceso como un proceso donde se elimina calor de un cuerpo o un espacio, bajando la temperatura sin que se modifique su estado físico, logrando que la temperatura sea inferior a la de su entorno. Existen procesos naturales en pérdida de calor ya sea por convección-evaporación (enfriamiento evaporativo), radiación (enfriamiento radiactivo) y conducción (contacto entre diferentes cuerpos con menor temperatura).

Los procesos artificiales utilizan distintos tipos de fluidos con propiedades termodinámicas, procesos químicos con transiciones de cambio de fase de uno de sus elementos: fusión, evaporación, sublimación y estas pueden ocurrir a baja temperatura. También existen los procesos mecánicos como expansión de gases que anteriormente estuvieron comprimidos, procesos termoacústicos y termoeléctricos. En el siguiente esquema se observan las diferentes tecnologías que se facilitan para trabajar con la energía solar.

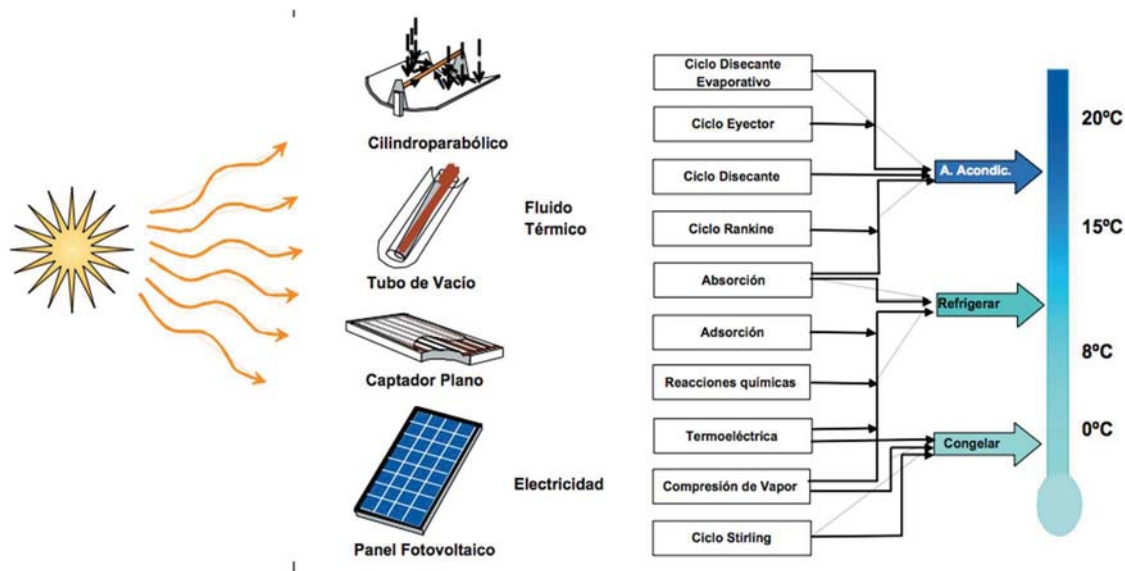


Fig. 243. Esquema de las diferentes tecnologías que se facilitan trabajar con energía solar. Fuente: Fenercom (2011)

Para el caso de esta tesis, los autores de este proyecto recomiendan la tecnología que va encaminada a la refrigeración: absorción, adsorción y reacciones químicas. El sistema de absorción funciona en forma de contenedor donde se hace un vacío al que se introduce un elemento que puede ser agua, este se evaporaría quitando calor al entorno (evaporador). Para absorber el vapor de agua se introduce un elemento que absorba el vapor de agua, como puede ser el amoniaco (absorbedor). Para liberar ese vapor se debe calentar y en este momento se aplica el calor de energía solar (generador). En esta etapa los elementos se separan, el uno vuelve al absorbedor y la otra parte debe ser condensada (Condensador) para volver al evaporador:

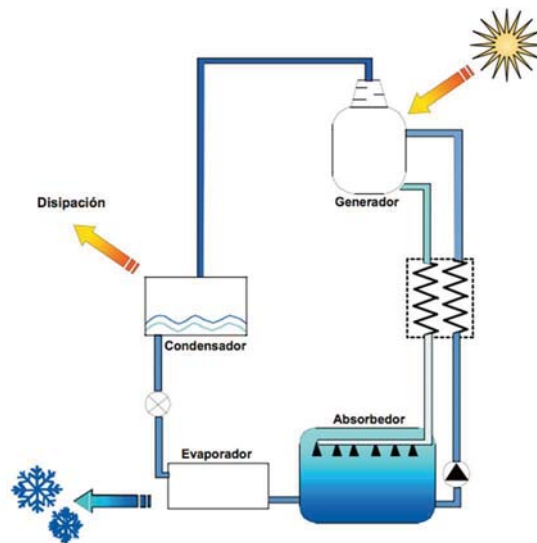


Fig. 244. Sistema de refrigeración por absorción. Fuente: Fenercom (2011)

Los autores señalan que el calor de la energía solar se aplica a la parte del sistema que llama “*generador*” (temperatura puede ser menor de 100 °C), en cuanto es menor la temperatura del generador mayor debe ser la superficie de intercambio. Este tipo de sistemas pueden tener modificaciones según el requerimiento, por ejemplo:

- **Sistemas de multiefecto:** la fuente necesaria para hacer funcionar el sistema debe ser superior a los 120 °C.
- **Ciclo de absorción por difusión:** la diferencia que tiene este sistema es que incorpora un gas inerte, por ejemplo, el hidrógeno con el fin de que mantenga la presión constante del circuito. Así que en las zonas en el sistema que eran de alta y baja presión, se mantienen constante.
- **Generador termoquímico:** Este sistema se acerca a la saturación llegando a la formación de cristales sólidos que hacen que el sistema almacene energía a través del proceso.
- **Ciclos Intermitentes:** En este sistema el captador solar se utiliza como generador, no utiliza bombas.

Los **Sistemas de Adsorción Sólida y Reacción Química** también pueden funcionar con energía solar a través de un sistema cerrado con dos fases en la etapa de refrigeración: Refrigeración /Adsorción y Regeneración/deserción. El funcionamiento se da cuando el refrigerante es evaporado en el generador (o evaporador) y es adsorbido por una sustancia sólida que tenga una alta porosidad microscópica; en el proceso de regeneración, el absorbedor se calienta hasta

conseguir que el refrigerante se desorba volviendo al evaporador (que actúa como condensador). Ejemplos de este sistema como pares refrigerantes son; Agua/Zeolita, metanol/carbón activado.

Es importante entender para este trabajo que los autores afirman la diferencia entre los procesos de adsorción y las reacciones químicas; estas diferencias están en los ciclos: mientras que las fuerzas que actúan en la adsorción son fuerzas físicas, las que causan la adsorción de los procesos químicos son químicas. En este sentido hay varias soluciones:

- **Ciclo de adsorción intermitente.** Este sistema integra el adsorbente en el captador, se utiliza carbón activado y metanol. (Produce hielo)
- **Sistemas continuos de adsorción.** Este sistema se hace continuo haciendo uso del condensador, un evaporador, un reactor de porción, una válvula de mariposa y un elemento de expansión.

Otro sistema que menciona este documento son los **sistemas de refrigeración desecantes**, donde se combinan los procesos de deshumidificación y refrigeración evaporativa. Este sistema funciona de la siguiente manera: en (1) se extrae la humedad del aire a través de un material desecante, para eliminar la carga de calor latente. El aire caliente (2) se enfría en la rueda del intercambiador (3). La temperatura del aire se baja y humedece por medio de un proceso de enfriamiento evaporativo. Esta publicación afirma que los materiales desecantes se pueden regenerar aplicándoles calor desde los captadores solares. Sin embargo, se advierte que este sistema no funciona en zonas con humedad relativa elevada.

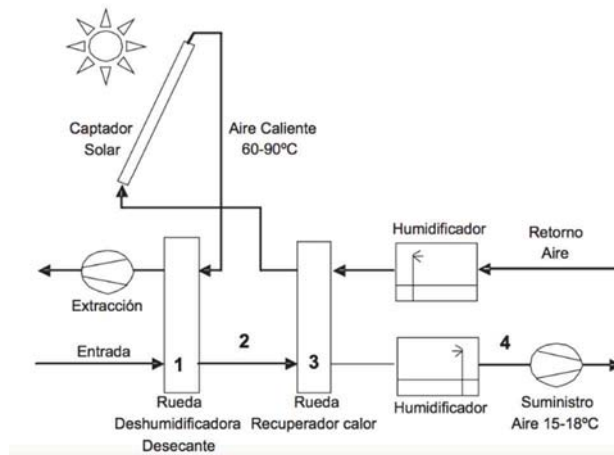


Fig. 245. Sistema de refrigeración con desecantes. Fuente: Fenercom (2011)

El **sistema Rankine- Dúplex**, es un modelo demostrativo indica lugares donde hay alta radiación y altas demandas de refrigeración. Está acoplado a un sistema de refrigeración por compresión de vapor. Utiliza el vapor a alta presión como fluido que mueve una turbina en el ciclo de potencia, esa turbina mueve al mismo tiempo un compresor para el ciclo del refrigerador. Se recomienda para aplicarlo en grandes sistemas de refrigeración

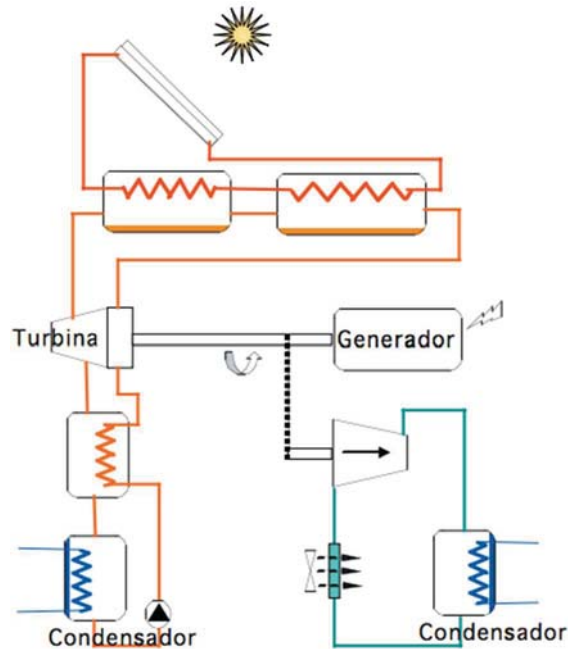


Fig. 246. Descripción del sistema Rankine- Dúplex. Fuente: Fenercom (2011).

El **sistema de compresión de vapor con energía solar** está compuesto de un sistema de compresión de vapor y un sistema fotovoltaico, estos pueden trabajar en temperaturas entre 0 y 8 °C. El inconveniente de este sistema es su alto costo.

El **sistema de refrigeración con sistema Stirling está** indicado para lugares que necesiten bajas temperaturas. El principio de este sistema es el cambio de volumen producido por un pistón lo que induce un cambio de presión y temperatura de un gas, sin cambio de fase. Se requieren captadores solares de alta calidad, ya que el motor necesita una temperatura del entorno de 600 °C.

Los **sistemas de refrigeración por células termoeléctricas** utilizan celdas Peltier que se pueden aplicar a pequeños proyectos. El frío se obtiene haciendo pasar corriente eléctrica a través de un circuito o dispositivo electrónico con diferentes uniones metálicas de ciertos elementos semiconductores.

El sistema de **refrigeración de ciclo de eyección** produce una aspiración desde el evaporador de baja presión, para que el vapor llegue a ese estado debe tomar calor del agua que se pulveriza. El agua se enfría y vuelve al evaporador con algunos grados más y se vuelve a utilizar. El vapor de agua se mezcla en la tobera fluye a gran velocidad y se transforma su energía cinética en presión para conseguir la condensación de esta agua fría por lo que esta presión debe ser alta. El condensador es devuelto al evaporador para formar parte del ciclo.

Sistema de deshumidificación natural a partir de la intervención con zeolita. Caso: trópico cálido húmedo.

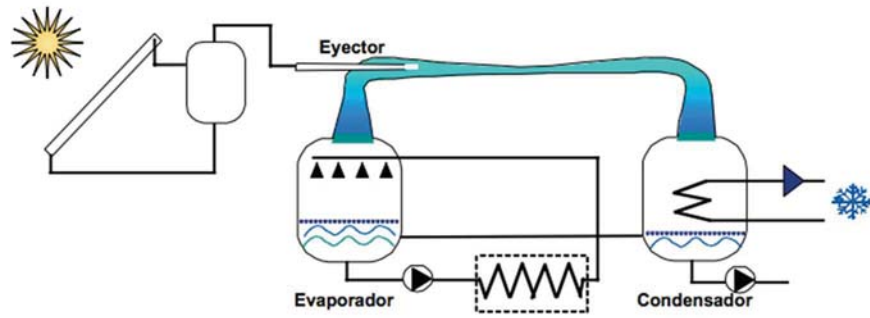


Fig. 247. Esquema del sistema de compresión de vapor por eyector del compresor de vapor.
Fuente: Fenercom (2011).

6. Bibliografía

Alizadeh, S. (2007). *Performance of a solar liquid desiccant air conditioner – An experimental and theoretical approach*. Revista Solar Energy. Volume 82, Issue 6, June 2008, Pages 563–572

ASHRAE. 2009. *ANSI /ASHRAE Standard 62.1-2009, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc.

Carbonell M. Tania, López A Leonart, Quesada R Guillermo. (2010) Artículo: *Utilización de las ruedas desecantes entálpicas y sensibles en el tratamiento del aire en Cuba*. CETER. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana-Cuba.

Castro. H. Pedro A. Gaspar Vázquez J. Luis. (2009). *Manual de fabricación de tabicón sólido de concreto*. Facultad de Ingeniería y Ciencias Sociales Administrativas. Instituto Politécnico Nacional. México, DF.

Chang SC. Roux JA. (1985). *Thermodynamic analysis of a solar zeolite refrigeration system*. Journal of Solar Energy Engineering. V107 N3.

Chester W. Arthur, Derouane E.G. (2011). *Zeolite characterization and catalysis: a tutorial*. Dept. Of Chemical and Biochemical Engineering. Rutgers University. Piscataway, NJ 08854. USA.

Collier R., Arnold F., R. Barlow. (1981) *An overview of open cycle desiccant cooling systems and materials*. journal of solar energy engineering. SERI/TP-631-1065.

Cruz, A. Hernández, HH. Bonifacio, H. Morillón, D. (2006). *Enfriamiento y deshumidificación pasiva de una casa habitación para la localidad de Bahía Banderas, Jalisco*. XXIX Semana De La Energía Solar. Congreso llevado a cabo en Chiapas, México.

Edwards, Brian (2008) *Guía básica de la sostenibilidad*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona.

Escuela de Biología, Universidad Autónoma de Sinaloa (2018). *Boletín climático mensual*. Recuperado el 01 de enero de 2019. <http://www.uas.edu.mx/servicios/clima/boletines>

FENERCOM (2011). *Guía del frío solar. Ahorro y eficiencia energética con refrigeración solar*. Recuperado el 15 de agosto de 2017. www.fenercom.com.

Fernández Hernández, Francisco; Cejudo López, José Manuel; Domínguez Muñoz, Fernando; Carrillo Andrés, Antonio. (2013). *Modelo de fachada ventilada con desecante para*

acondicionamiento del aire exterior de ventilación. VIII Congreso Internacional De Ingeniería Termodinámica. Congreso llevado a cabo en Burgos, España.

Fonseca Díaz, Néstor. (2009). *Rendimientos de deshumidificación del aire mediante sales desecantes en aplicaciones Hvac/R*. Scientia et Technica Año XV, No 43. Universidad Tecnológica de Pereira Colombia ISSN 0122-1701.

Fuentes Víctor. (2002). *Metodología de diseño bioclimático, el análisis climático*. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco.

Fuentes Víctor. (2004). *Clima y arquitectura*. Ed. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. México.

Fuentes Víctor. (2005). *Viento y arquitectura, el viento como factor de diseño arquitectónico*. Editorial Trillas. México.

Fuentes Víctor. (2009). *Modelo de análisis climático y definición de estrategias de diseño bioclimático para diferentes regiones de la República Mexicana*. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco.

García R. José L. (2008). *Manual técnico de construcción Holcim Apasco*. Editorial Porrúa. México.

González E (1989) *Evaluación de sistemas pasivos de enfriamiento y su aplicación en el diseño de viviendas*. Informe de Investigación CONDES. Universidad de Zulia, Venezuela.

González García Sabrina Isabella (2010). Tesis: *Estudio experimental del comportamiento térmico de sistemas pasivos en enfriamiento en clima cálido-húmedo*. VIII Maestría en energías renovables: arquitectura y urbanismo. La ciudad sostenible. Universidad Internacional de Andalucía.

González Castaño, Alexander (2010) *Manual de prácticas para el diseño sostenible*. Área metropolitana del Valle de Aburrá. Medellín, Colombia

González, E. (2001). *Enfriamiento radiactivo en edificaciones*, Curso-Taller de la Red RIRAS del CYTED. Guadalajara. México.

Gómez M. Claudia Juliana (2013). *Evaluación de la zeolita como desecante aplicado a la arquitectura del clima tropical cálido húmedo*. Tesis de Maestría. Posgrado en Arquitectura UNAM, Facultad de Arquitectura Universidad Nacional Autónoma de México.

Guimarães M. Mariana (2008). *Confort térmico y tipología arquitectónica en clima cálido húmedo, análisis térmico de la cubierta ventilada*. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Catalunya.

Hernández-Gómez V.H., Morillón-Gálvez D., Best R., Almanza R., Chargoy N., Fernández-Zayas J.L. (2006). *Experimental and numerical model of wall like solar heat discharge passive system*. [Versión electrónica]. Applied Thermal Engineering 26 (2006) 2464-2469.

Hernández-Gómez V.H., Contreras-Espinosa J.J., González-Ortiz G., Morillón-Gálvez D., Fernández-Zayas J.L. (2012). *Modelo analítico que describe el comportamiento térmico de un sistema de descarga de calor en techos*. [Versión electrónica]. Ingeniería Investigación y tecnología vol.13 no.1 México.

Hobaica, Maria Elena. Sosa griffin, Maria Eugenia. Siem, Geovanni. (2000). *Manual de diseño para edificaciones energéticamente eficientes*. IDEC: Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Central de Venezuela.

Huelsz G., Sierra J.A., (2013) *Hacia edificaciones más sustentables*. [Versión electrónica]. Revista Universitaria Digital. Vol. 14, Núm. 9.

Jain S., Wolfe E. I. (2000) *Measurements of Effectiveness in a Silica Gel Rotary Exchanger*. Applied Thermal Engineering. Vol. 20. pp. 309-322

López Cervantes, Aída (2010). *Sistema de aireación inducida para disminuir riesgos de humedad intramuros: Caso de estudio para el trópico húmedo*. Tesis Doctoral. Doctorado en Arquitectura-UNAM, Facultad de Arquitectura. Universidad Nacional Autónoma de México.

López Villada, Jesús (2010). *Integración de sistemas de refrigeración solar en redes de distrito de frío y de calor*. Tesis Doctoral. Tarragona, España: Universitat Rovira I Virgili.

Lorrio Domeme, Laura (2011). Tesis de Maestría: *Análisis del comportamiento térmico de las zeolitas como material ligero, alternativo a la arcilla expandida, en hormigones para formación de pendientes*. EU De Arquitectura Técnica, Universidad Politécnica de Madrid.

Marincic I., Ochoa J.M, Alpuche M.G., Duarte A., González Ileana (2012). *Análisis de temperaturas superficiales en la envolvente de una vivienda mediante imágenes termográficas*. [Versión electrónica]. Memoria 36 Semana Nacional de Energía Solar. ANES. Cuernavaca, Mor. 1-5 de octubre de 2012. Energía Sostenible para todos. Pág. 203-208.

Martín Herrera, Daniela. Velázquez Giraldo, Martha (2012). Artículo: “*Comparación de dos muestras de zeolita en la adsorción de humedad y remoción de olores*”. Artículos Científicos, INFOMIN. Vol 4. Enero – Junio 2012

Martínez, P., Sarmiento P., Urquieta W., (2005) *Evaluación de la humedad por condensación dentro de viviendas sociales*. Revista INVI, Vol 20. No. 55.

Morillón, Gálvez David (1993). *Introducción a los sistemas pasivos de enfriamiento*. Ponencia Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco- México.

Morillón D., Sámano D., Fernández J.L. (1995). *Muro escudo a la radiación solar. Memorias Semana Nacional de la Energía Solar*, (ANES). México.

Morillón, Gálvez David (2004). *Diseño bioclimático de la vivienda*. [Versión electrónica].

Recuperado el 10 de diciembre de 2016.

http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/si/si_03/te_01/ar_05.pdf

Mumpton Frederick A. (1999). *La roca mágica: Uses of natural zeolites in agriculture and industry*. [Versión electrónica]. Proc Natl Acad Sci U S A. 1999 Mar 30; 96(7): 3463–3470.

Niu J.L., Zhang L.Z., Zuo H.G., (2001). *Energy savings potential of chilled-ceiling combined with desiccant cooling in hot and humid climates*. [Versión electrónica]. Energy and Buildings, Volume 34, Issue 5, June 2002, Pages 487-495

Norma NMX-C-038-ONNCCE-2004. *Norma mexicana “Industria de la construcción-determinación de las dimensiones de ladrillos, tabiques, bloques y tabicones para la construcción”*

Norma Oficial Mexicana Nom-020-Ener-1997, *Eficiencia energética en edificaciones. - envolvente de edificios para uso habitacional*. Diario Oficial De La Federación. México.

Norma UNE-ISO 77-30:2006. *Ergonomía del ambiente térmico*.

Olgay, Víctor (1998) *Arquitectura y clima*. Barcelona, Editorial Gustavo Gili.

Olgún, Gutiérrez María Teresa (2002). *Zeolitas características y propiedades*. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México, D. F. México

Ostrooumov Mikhail. (2010). *Zeolitas de México: Diversidad mineralógica y aplicaciones*. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo

Ríos G. Ezequiel (2013) *Diseño y análisis de un sistema cuasi-pasivo para la deshumidificación de espacios*. Tesis de Maestría. Maestría Ingeniería Energía, UNAM, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

Rodríguez V., Fuentes V. (2008) *Introducción a la Bioclimática*. Editorial Limusa.

Rogers, S. Tyler (1951) *Design of insulated buildings for various climates*. Architectural Record Book, Nueva York.

Sánchez, Corral Javier (2012). *La vivienda "social" en México*. [Versión electrónica]. Recuperado el 20 de febrero de 2012, de <http://conurbamx.com/home/wp-content/uploads/2015/05/libro-vivienda-social.pdf>.

Sánchez, Parrao Roger (2002). *Deshumidificación y enfriamiento*. Universidad de Campeche, México.

Salazar, Jorge Hernán (2001). *Manual de buenas prácticas arquitectónicas para el clima tropical cálido húmedo*. Ed. Universidad Nacional de Colombia.

Salazar, Jorge Hernán. Atehortúa, Rafael Hernán (2002) *Construcción de normas urbanísticas para el ahorro energético en climas tropicales*. Grupo EMAT, Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.

Suzuki, Eimi Veridiane (2012). *Avaliação do potencial de aquecimento/resfriamento de um sistema de climatização passiva*. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba-Brasil.

Sánchez Corral Javier (2012). *La vivienda "social" en México, pasado-presente-futuro*. Sistema nacional de creadores de arte emisión 2008. Editorial JSa. México, DF.

Sudaporn Chungloo, Bundit Limmeechokchai. (2006). *Application of passive cooling systems in the hot and humid climate: The case study of solar chimney and wetted roof in Thailand*. [Versión electrónica]. Building and Environment, Volume 42, Issue 9, pp 3341-3351.

US Environmental Protection Agency, (1999). *Zeolita: un adsorbente de contaminantes del aire versátil*. Office of Air Quality EPA 456/F-99-003. Environmental Protection Planning and Standards May 1999. Agency Research Triangle Park. NC 27711.

Yadav Avadhesh, Bajpai V.L. (2012) *Experimental comparison of various solid desiccants for regeneration by evacuated solar air collector and air dehumidification. Drying Technology.* Vol.30, No, 5, pp 516-525.

