

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO INTEGRAL  
REGIONAL, UNIDAD OAXACA.**



Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales  
(Ingeniería de procesos)

---

**VIVIENDA BIOCLIMÁTICA CON PANELES MODULARES DE  
FERROCEMENTO Y MATERIALES AISLANTES ALTERNATIVOS PARA  
LA CIUDAD DE OAXACA, OAX.**

---

T e s i s

Que para obtener el grado de  
Maestro en ciencias

Presenta:

S i l d i a M e c o t t G ó m e z

Director: Dr. P.Felipe de Jesús Cano Barrita

Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, octubre de 2007



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
**SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO**

*ACTA DE REVISION DE TESIS*

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 23 del mes de Octubre del 2007 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: **“Vivienda bioclimática con paneles modulares de ferrocemento y materiales aislantes alternativos para la ciudad de Oaxaca, Oax.”**

Presentada por el alumno:

**Mecott**  
Apellido paterno

**Gómez**  
materno

**Sildia**  
nombre(s)

Con registro: 

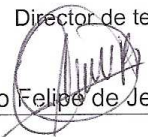
B	0	5	1	3	1	8
---	---	---	---	---	---	---

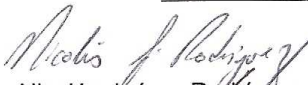
aspirante al grado de: **MAESTRO EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

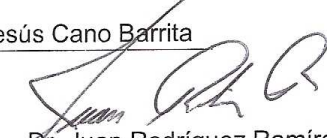
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis

  
 Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

  
 Dr. Nicolás Juárez Rodríguez


  
 Dr. Juan Rodríguez Ramírez

  
 Dr. Pedro Montes García

  
 Dr. Magdalena Caballero Caballero



LA PRESIDENTA DEL COLEGIO

  
 Dra. María del Rosario Arnaud Viñas



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESION DE DERECHOS**

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 23 del mes Octubre del año 2007, el (la) que suscribe **MECOTT GÓMEZ SILDIA** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **B051318**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita y cede los derechos del trabajo titulado **“Vivienda bioclimática con paneles modulares de ferrocemento y materiales aislantes alternativos para la ciudad de Oaxaca, Oax.”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: [posgrado@ipn.mx](mailto:posgrado@ipn.mx) ó [mecott@hotmail.com](mailto:mecott@hotmail.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



INSTITUTO POLITÉCNICO  
NACIONAL  
CIBIM-UNIDAD-OAXACA

---

**MECOTT GÓMEZ SILDIA**

# Resumen

---

Las propuestas arquitectónicas en México generalmente no consideran el diseño y los materiales adecuados al contexto climático, para propiciar condiciones de confort térmico y ahorro de energía por climatización artificial, en beneficio de los usuarios. Debido a lo anterior, en este trabajo se diseñó una vivienda con criterios de Arquitectura Bioclimática, para la ciudad de Oaxaca, Oaxaca, con un sistema constructivo de paneles modulares de ferrocemento en muros y cubierta. También se evaluó el uso del olote de maíz y vidrio volcánico mezclados con pasta de cemento para obtener aislantes que coadyuven a conseguir condiciones térmicas adecuadas para el usuario. Con el objeto de lograr esto, se realizó un estudio climático para la ciudad de Oaxaca, Oaxaca y se establecieron estrategias de adecuación ambiental basadas en una carta psicrométrica y un modelo de confort térmico. Se determinaron las propiedades térmicas de los materiales aislantes que contienen olote de maíz y vidrio volcánico con un conductivímetro de placa caliente. Posteriormente se evaluó el diseño de la vivienda, el sistema constructivo y los materiales propuestos con simulación térmica dinámica. Los resultados indican que el aislamiento térmico con vidrio volcánico tiene 9.7% mayor ahorro energético comparado con el que contiene olote, y 17.87% comparado con el aire como aislante y tablaroca en la cara interior. El diseño bioclimático y el sistema constructivo de muros y cubierta de paneles modulares de ferrocemento y vidrio volcánico-cemento generan un ahorro del 47% de energía, comparado con una vivienda convencional con muros de bloque de cemento y cubierta de concreto reforzado aligerada con casetones de poliestireno.

# Abstract

---

Housing design in Mexico does not consider alternative architectural solutions or construction materials suitable for specific climatic conditions to provide thermal comfort while saving energy used for artificial air conditioning, which would benefit users. In this work a house suitable for the climate of Oaxaca City, Oaxaca, was designed using bioclimatic architecture criteria applied to a low-cost building system based on modular ferrocement panels for walls and roof. Also, there was evaluated the potential use of corn cob and volcanic glass as insulating materials to provide adequate thermal comfort for users. In order to achieve this, a climatic study was undertaken for the city of Oaxaca, Oaxaca and there were obtained strategies for interior building environment improvement, based on a psychometric chart and a model of thermal comfort. The thermal properties of the insulating materials containing corn cob and volcanic glass were determined using a hot plate conductivimeter. Then there was evaluated the house design, the building system and the proposed insulating materials through a dynamic thermal simulation. The results indicate that the insulating material containing volcanic glass has 9.7 % more energy saving compared to the one containing corn cob, and 17.87% compared to the insulation provided with only air and gyprock. The bioclimatic design and the building system based on modular ferrocement panels and insulation with volcanic glass-cement provide a saving of 47% of energy, compared to a conventional housing construction with walls of cement blocks and roof made of polystyrene and reinforced concrete.

Dedicado con todo el amor de mi ser a mi madre (Minerva Gómez) y hermanos (Ega, Zaidy, Roy, Chuy y Orla) por todo el apoyo incondicional que siempre me han brindado.

# Agradecimientos

---

**Al Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita**

Por compartir sus conocimientos, su tiempo y por adoptarme como su hija.

**Al M. D. Rafael Alavés Ramírez**

Por el apoyo proporcionado como asesor de este trabajo.

**Al M. Ing. Ricardo Gallegos Ortega**

Por su amistad y todo el apoyo brindado en el uso del programa DOE 2.1E.

**Al M. Arq. Gonzalo Bojórquez Morales**

Por su apoyo y disponibilidad en todo momento, la palabra gracias es pequeña.

**A mis asesores de tesis: P. Montes, N. Juárez, H. López y J. Rodríguez**

Por su actitud siempre crítica durante el desarrollo de este trabajo.

**A la Dra. Ramona Alicia Romero y al M. Arq. Aníbal Luna León**

Por permitirme ser parte del equipo de Bioclimática.

**A la Lic. Guieshuba Nieves García**

Por apoyarme y permanecer a mi lado en todo momento.

**Al M.A.I José Gustavo Pecero Villasana**

Por su apoyo, paciencia y comprensión.

**A mis compañeros del CIIDIR**

Por las horas de compañía, sus comentarios, apoyo y amistad brindada.

**Al Instituto Politécnico Nacional y al CIIDIR-IPN unidad Oaxaca**

Por todo el apoyo, tiempo de formación docente y por ser la casa de estudios.

**A la Facultad de Arquitectura y Diseño, de la Universidad Autónoma de Baja California**

Por aceptarme como alumna externa y cobijarme durante la estancia de investigación.

**Al Instituto de Investigaciones de Materiales de la UNAM**

Por permitirme realizar las pruebas de conductividad térmica.

**Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología**

Por la beca otorgada durante los estudios de la maestría.

**Al programa de movilidad estudiantil Santander ANUIES**

Por la beca otorgada durante la estancia de investigación.

**Al Programa Institucional de Formación de Investigadores**

Por la beca otorgada a través de los proyectos: Construcción de vivienda sismo-resistente utilizando bloques de ferrocemento con uniones atornilladas y Polímeros naturales y adiciones minerales para mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de materiales basados en cemento, con clave CGPI IPN: 20050141, 20060430 y 20070157.

**A la Fundación Alfredo Harp Helú**

Por el financiamiento 2006-2007 del proyecto “Alternativas de vivienda de bajo costo utilizando ferrocemento y adobe compactado.

**Al proyecto “Confort térmico y ahorro de energía en la vivienda económica en México: regiones de clima cálido seco y húmedo”, clave CONAFOVI 2004-01-20, por el apoyo para la estancia de investigación en la Facultad de Arquitectura y Diseño, de la Universidad Autónoma de Baja California.**

# Índice general

---

Índice general .....	i
Índice de tablas.....	iv
Índice de figuras .....	iv
Glosario.....	vii
Introducción.....	1
<b>Capítulo 1. Aspectos preliminares .....</b>	<b>3</b>
1.1 Planteamiento de la investigación .....	3
1.2 Antecedentes.....	5
1.2.1 Arquitectura bioclimática .....	5
1.2.2 Materiales aislantes.....	7
1.2.3 Simulación térmica .....	9
1.3 Objetivos .....	10
Objetivo general.....	10
Objetivos particulares.....	10
1.4 Hipótesis .....	11
<b>Capítulo 2. Marco teórico .....</b>	<b>12</b>
2.1 Clima.....	12
2.1.1 Temperatura del aire.....	14
2.1.2 Humedad relativa .....	14
2.1.3 Precipitación pluvial .....	14
2.1.4 Velocidad y dirección del viento.....	15
2.1.5 Presión atmosférica.....	15
2.1.6 Radiación solar.....	15
2.1.7 Asoleamiento.....	15
2.1.8 Nubosidad .....	15
2.2 Carta psicrométrica .....	16
2.3 Temperaturas neutrales.....	19
2.4 Movimientos característicos de la tierra .....	20
2.5 Transferencia de calor .....	22
2.5.1 Ley de Fourier- conducción.....	23



2.5.2 Ecuación de enfriamiento de Newton-Convección .....	24
2.5.3 Ley de Stefan-Boltzmann- Radiación .....	25
2.6 Propiedades termofísicas de los materiales .....	26
2.7 Simulación térmica.....	28
<b>Capítulo 3. Metodología.....</b>	<b>31</b>
3.1 Diseño bioclimático.....	33
3.1.1 Descripción climática .....	33
3.1.2 Análisis del sitio y confort térmico .....	34
3.1.3 Estrategias bioclimáticas.....	35
3.1.4 Diseño arquitectónico.....	43
3.2 Materiales aislantes alternativos.....	44
3.2.1 Diseño experimental .....	44
3.2.2 Selección y caracterización de materiales .....	46
3.2.3 Propiedades térmicas.....	47
3.3 Simulación térmica.....	56
3.3.1 Validación de la simulación .....	57
3.3.2 Estrategia de simulación .....	60
3.3.3 Caso de referencia.....	61
3.3.4 Eficiencia energética .....	63
3.3.5 Temperatura interior y confort térmico .....	64
3.3.6 Efectos de la carga térmica.....	64
<b>Capítulo 4. Resultados y discusión .....</b>	<b>65</b>
4.1 Diseño bioclimático.....	65
4.1.1 Descripción climática .....	65
4.1.2 Análisis del sitio y confort térmico .....	65
4.1.3 Estrategias bioclimáticas.....	72
4.1.4 Diseño arquitectónico.....	75
4.2 Materiales aislantes alternativos.....	84
4.2.1 Propiedades físicas.....	84
4.2.2 Propiedades térmicas.....	85
4.3.3 Estudio comparativo de propiedades termofísicas .....	86
4.3 Simulación térmica.....	88
4.3.1 Validación de la simulación .....	88

4.3.2 Eficiencia energética .....	91
4.3.3 Temperatura interior y confort térmico .....	98
4.3.4 Efectos de la carga térmica.....	101
4.3.5 Evaluación del diseño bioclimático.....	104
<b>Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>108</b>
5.1 Conclusiones .....	108
5.2 Recomendaciones.....	110
Referencias .....	111
Publicaciones realizadas con la presente investigación .....	118
Anexos.....	119

# Índice de tablas

---

Tabla 1. Propiedades térmicas de los materiales del caso de estudio .....	63
Tabla 2. Temperaturas horarias (°C).....	70
Tabla 3. Humedad relativa horaria (%).....	70
Tabla 4. Termopreferendum horario de espacios abiertos con viento y radiación solar.....	72
Tabla 5. Estrategias de diseño bioclimático en la edificación.....	74
Tabla 6. Propiedades físicas de los especímenes. ....	84
Tabla 7. Conductividad térmica de los materiales en estudio. ....	85
Tabla 8. Propiedades térmicas estimadas de los materiales en estudio. ....	86
Tabla 9. Análisis comparativo de las propiedades térmicas de materiales aislantes existentes en la literatura y obtenidas en este estudio.....	87

# Índice de figuras

---

<i>Figura 1. Carta psicrométrica para 83.90 kPa. Obtenida con el programa Psycho Tool (2006).....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2. Movimiento de la tierra con respecto al sol.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3. Plano de la eclíptica.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 4. Ruta aparente del sol (Ferreiro 1991).....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 5. Líneas imaginarias que definen las incidencias particulares de los rayos solares en la tierra.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 6. Periodos de incidencia normal de los rayos solares en la tierra.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 7. Mecanismos de transferencia de calor.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 8. Coeficiente de radiación superficial.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 9. Esquema general de la metodología.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 10. Diagrama de flujo del desarrollo de estrategias de adecuación bioclimática.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 11. Pasos para graficar la zona de confort térmico.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 12. Pasos para graficar la zona de masa térmica.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 13. Pasos para graficar la zona de ventilación.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 14. Pasos para graficar la zona de enfriamiento evaporativo.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 15. Pasos para graficar la zona de calentamiento solar.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 16. Metodología aplicada para el desarrollo y evaluación térmica de placas de aislantes a base: cemento-olote y cemento-vidrio volcánico.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 17. Equipo para estimar la conductividad térmica Dynatech R/D Co.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 18. Variación del tamaño del agregado.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 19. Trituración del olote.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 20. Especímenes elaborados.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 21. Proceso de secado.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 22. Obtención del peso de la masa sumergida en agua.....</i>	<i>51</i>

<i>Figura 23. Amplitud de onda senoidal para un ciclo de 24 horas.</i> .....	54
<i>Figura 24. Prototipo de vivienda económica de paneles modulares de ferrocemento.</i> .....	58
<i>Figura 25. Ubicación de los sensores interior y exterior en la planta arquitectónica del prototipo analizado.</i> .....	59
<i>Figura. 26 Sistemas constructivos analizados (1-Muros de bloque de concreto y cubierta de casetón de polietileno, 2- muros y cubierta de ferrocemento in situ, 3- muros y cubierta de paneles modulares de ferrocemento, 4-muros de ladrillo y cubierta de concreto armado)</i> .....	60
<i>Figura 27. Plantas arquitectónicas del prototipo de estudio. (a) Planta baja, (b) Planta alta.</i> .....	62
<i>Figura 28. Gráfica de radiación solar horaria en la ciudad de Oaxaca, a) Radiación global horizontal, b) Radiación difusa. Fuente: Obtenido a partir de la hoja de cálculo de Luna (2006).</i> .....	66
<i>Figura 29. Gráfica de radiación solar anual, horizontal y difusa en la ciudad de Oaxaca. Obtenido a partir de la hoja de cálculo de Luna (2006).</i> .....	67
<i>Figura 30. Velocidad media por orientación.</i> .....	67
<i>Figura 31. Rosa de los vientos de la ciudad de Oaxaca, Oax. Obtenido a partir de la hoja de cálculo de Fuentes (2002).</i> .....	68
<i>Figura 32. Gráfica de precipitación media anual de la ciudad de Oaxaca. Obtenido a partir de la hoja de cálculo de Fuentes (2002).</i> .....	69
<i>Figura 33. Diagrama estereográfica de la ciudad de Oaxaca, Oax. Obtenido del programa Solar tool (2006).</i> .....	71
<i>Figura 34. Gráfica de termoreferendum de temperaturas a lo largo del año. Obtenido a partir de la hoja de cálculo de Fuentes (2002).</i> .....	71
<i>Figura 35. Gráfica mensual de humedad relativa. Obtenido a partir de la hoja de cálculo de Fuentes (2002).</i> .....	72
<i>Figura 36. Carta Psicométrica con estrategias de adecuación ambiental para la edificación en la ciudad de Oaxaca, Oax. Programa Psycho Tools (2006).</i> .....	73
<i>Figura 37. Plantas arquitectónicas (a) planta baja, (b) planta alta (c) alzado frontal, posterior y planta de azoteas.</i> .....	77
<i>Figura 38. Corte y-y' de la vivienda con criterios bioclimáticos propuestos.</i> .....	78
<i>Figura 39. Incidencia de los rayos solares el 21. a) diciembre, b) junio, c) agosto.</i> ....	80
<i>Figura 40. Incidencia de los rayos solares a las 15:00 horas. a) marzo. b) junio</i> .....	81
<i>Figura 41. Imágenes de la circulación del viento a través de ventanas y puertas. a) Planta baja, b) Planta alta.</i> .....	82
<i>Figura 42. Fachada principal de vivienda en serie.</i> .....	83
<i>Figura 43. Perspectiva de sombreado a) invierno, b) verano.</i> .....	83
<i>Figura 44. Comparación de temperaturas registradas y simuladas.</i> .....	90
<i>Figura 45. Energía retirada y suministrada por cada sistema constructivo</i> .....	91
<i>Figura 46. Energía retirada y suministrada por cada aislante</i> .....	92
<i>Figura 47. Ganancia por conducción en muros- comparación sistemas constructivos.</i> .....	93
<i>Figura 48. Ganancia por conducción en muros- comparación aislantes.</i> .....	94

<i>Figura 49. Ganancia por conducción en cubiertas por sistema constructivo.....</i>	95
<i>Figura 50. Ganancia por conducción en cubiertas por cada aislante. ....</i>	96
<i>Figura 51. Enfriamiento máximo requerido.....</i>	97
<i>Figura 52. Enfriamiento máximo requerido por cada aislante.....</i>	98
<i>Figura 53. Temperatura interior promedio en planta baja, (a) sin considerar la carga interna, (b) considerando la carga interna. ....</i>	99
<i>Figura 55. Temperatura interior de un día promedio (10 de diciembre). a) planta alta-sistemas, b)planta baja-sistemas. ....</i>	103
<i>Figura 56. Conducción con y sin elementos de sombra.....</i>	104
<i>Figura 57. Comparación por orientación.....</i>	105
<i>Figura 58. Comparación de tamaño de ventanas.....</i>	105
<i>Figura 59. Gráfica comparativa de la cantidad de energía a retirar en MJ/ m<sup>3</sup> por diseño.....</i>	107
<i>Figura 60. Gráfica comparativa de la cantidad de energía a retirar en MJ/ m<sup>3</sup> por diseño y material. ....</i>	107

# Glosario

---

*Adiabático:* Se dice cuando el sistema y sus alrededores están a la misma temperatura o si el sistema en estudio está perfectamente aislado (Felder y Rousseau, 2005).

*Aislante térmico:* Es un material o una combinación de materiales cuya función es reducir la transferencia de calor por medio de la conducción, convección y radiación. Reduce la transferencia de calor dentro y fuera de un edificio debido a su alta resistencia térmica (American society of heating, refrigeration, and air conditioning Engineers, 2001).

*Año típico meteorológico (typical meteorological year, TMY):* Constituye las 8760 horas del año y son datos climatológicos horarios anexados representativamente para realizar el año típico en un periodo no mayor a 10 años, la mayor parte de estos datos son tomado del Archivo de balance de energía global (GEBA, por sus siglas en inglés), de las normales climatológicas 1961 - 1990 (Climatológico de World Meteorological Organization WMO / OMM) y de la base de datos Suiza compilada por MeteoSwiss Marion *et al.* 1995).

*Arquitectura bioclimática:* Es una corriente de diseño que considera la relación del edificio con los factores del clima y los recursos del entorno natural, para solucionar los problemas ambientales de las edificaciones a través de un diseño lógico que optimiza el uso de los sistemas energéticos tradicionales, y es capaz de proporcionar espacios dignos, confortables y saludables, desde un punto de vista fisiológico y psicológico (Fuentes, 2004).

*Calor:* Energía que se transfiere entre un sistema y sus alrededores como consecuencia de una diferencia de temperaturas. La dirección del flujo siempre es de la temperatura más alta a la más baja (Felder y Rousseau, 2005).

*Calor específico:* Cantidad de energía necesaria para aumentar en 1 °C la temperatura de un metro cúbico de un material.

*Confort térmico:* Es el estado físico y mental en el que el individuo expresa bienestar y satisfacción con el medio ambiente circundante (Koenisberger, 1977). Es aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico (ISO 7730).

*Conductividad térmica:* Propiedad termofísica de los materiales que se determina al conocer la cantidad de calor que fluye a través de una materia cuando existe una diferencia de temperaturas. La conductividad térmica se puede determinar si se mide la distribución de temperatura y el flujo de calor en condiciones de estado permanente (Lienhard *et al.* 2006).

*Difusividad térmica:* Representa la velocidad lineal a la que ocurren los cambios de temperatura en una masa determinada, en función de su espesor.

*Ferrocemento:* es un material basado en cemento con espesores comúnmente de 0.025 m, en el cual el mortero hidráulico está reforzado con capas de mallas continuas (Olvera, 1994).

*Materiales alternativos:* Desde la perspectiva de este estudio, los materiales alternativos se definen como aquellos que aun siendo inferior en resultados técnicos a las gamas actuales de poliuretanos, poliestirenos, fibras minerales, etc., permita perfilar una solución original a problemas de aislamiento térmico en construcción, con menor impacto ambiental por su uso.

*Resistencia térmica:* Es una medida de la resistencia (oposición) de flujo de calor por conducción. La resistencia representa la capacidad de un material para evitar el flujo de calor a través del mismo y resulta de dividir el espesor del material entre el valor de conductividad.

*Simulación térmica:* Es la acción de predecir y estimar las cantidades operativas dentro de un sistema (presión, temperatura, energía y tasas de flujo de energía) de una condición donde todos los balances de energía y materiales y las características del funcionamiento de cada componente individual son satisfechos (ASHRAE, 2001).

*Toneladas nominales:* Capacidad estimada para un equipo de aire acondicionado bajo condiciones específicas de operación de las temperaturas en el condensador, evaporador y ambiente.

*Termoreferendum:* Es conocido como el punto optimo de temperatura para el desarrollo de un organismo. En este caso y bajo el enfoque de estudio de confort térmico de adaptación se considera como el rango de temperaturas en que el espacio presenta condiciones de confort para el usuario (Auliciem y Szokolay,1997).



# Introducción

---

La Arquitectura actualmente en su aplicación práctica presenta con frecuencia la falta de consideración de las condiciones climáticas del lugar y las características termofísicas de los materiales de construcción, por lo que se hace necesario el uso de sistemas de climatización artificial para tener condiciones de confort térmico en los espacios. Lo anterior repercute en altos consumos energéticos, problemas de salud, económicos y baja productividad de los usuarios.

Como una solución a lo anterior, la Arquitectura bioclimática propone edificios cuyos diseños se basan en el análisis del contexto donde se edifica y sus condiciones meteorológicas, se determinan estrategias de diseño que aprovechan los recursos naturales (radiación, viento y vegetación), y materiales de construcción adecuados para lograr espacios confortables con bajo consumo energético.

Una forma de evaluar la eficiencia energética de las propuestas arquitectónicas es con el uso de simuladores térmicos, ya que se pueden estimar los flujos energéticos de la envolvente de forma dinámica, así como las condiciones del ambiente térmico interior, que se ven determinados por el diseño, las estrategias de adecuación, los materiales y las condiciones meteorológicas.

Si se considera el déficit de vivienda que actualmente tiene el estado de Oaxaca, así como el consumo energético de estas construcciones debido al uso de diseños y materiales de construcción inadecuados al contexto climático local, es importante el desarrollo y evaluación de propuestas que ofrezcan soluciones integrales a la problemática antes planteada.

Con base en lo anterior, se presenta el estudio de una vivienda bioclimática para la ciudad de Oaxaca, que incluye el uso de un sistema constructivo para muros de paneles modulares de ferrocemento, así como de aislantes térmicos elaborados con

mezclas de olote-cemento y vidrio volcánico-cemento. Se presenta las propiedades térmicas de los materiales aislantes estudiados y su evaluación en la vivienda mediante simulación dinámica.

Este trabajo demuestra las ventajas del uso de tecnología constructiva y aislantes alternativos locales, integrados en un proyecto arquitectónico adecuado climáticamente, con lo que es posible ofrecer al usuario un espacio arquitectónico que no solo cumple con las necesidades mínimas de habitar, si no que ofrece además condiciones de confort térmico con un consumo energético menor a la oferta de vivienda actual.

Esta tesis está integrada por cinco capítulos. El primero presenta el planteamiento del problema y los antecedentes sobre Arquitectura Bioclimática, materiales aislantes y simulación térmica. El segundo capítulo trata sobre el marco teórico con base en consideraciones para el diseño bioclimático, confort térmico y simulación térmica. El tercer capítulo presenta la metodología de trabajo que consta de tres apartados: 1) Descripción climática y el diseño de una vivienda bioclimática de ferrocemento, 2) Programa experimental de los materiales naturales: olote y vidrio volcánico y 3) Simulación térmica. El cuarto capítulo contiene los resultados y discusión del diseño bioclimático, las propiedades termofísicas de los materiales aislantes y la simulación térmica. Finalmente el quinto capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

# Capítulo 1. Aspectos preliminares

---

## 1.1 Planteamiento de la investigación

En Arquitectura, es frecuente el uso de estilos arquitectónicos de regiones con latitudes y climas diferentes, por lo que es necesario el uso de sistemas de climatización artificial para tener condiciones de confort térmico en las edificaciones; lo que repercute en altos consumos energéticos.

Esto ocasiona que en muchos países los gastos por consumo de energía eléctrica sean elevados, como es el caso de México, que de acuerdo al Balance Nacional de energía, de la Secretaría de Energía, en el 2005 fue de 7,365 PJ (1 Peta Joule =  $10^{15}$  joule). Del consumo total de energía, el tercer lugar con 19.2% lo ocupa el sector residencial, comercial y público.

En ese sentido es notable que en general la Arquitectura contemporánea en México, no considere un diseño integral con el tipo de materiales adecuados que garanticen el confort térmico de los usuarios y el ahorro de energía, lo que hace necesario que en la mayoría de las construcciones se utilicen equipos de climatización artificial.

Lo anterior genera en el usuario problemas de salud, económicos y baja productividad, por lo que se hace indispensable dentro del diseño arquitectónico en general, un estudio de las condiciones climatológicas del sitio, proveer las estrategias de diseño y los materiales constructivos adecuados para lograr el confort térmico interior.

En los últimos años en la ciudad de Oaxaca, Oaxaca y municipios conurbados se han implementado proyectos de construcción de vivienda en serie, cuyos diseños no consideran el clima de las zonas donde se ubican. Por lo que se observan casas construidas tanto, en la región de la Costa como en la región del Valle de Oaxaca, que presentan las mismas características físicas y constructivas en condiciones climáticas diferentes.

El ferrocemento es un material basado en cemento con espesores comúnmente de 0.025 m, en el cual el mortero hidráulico está reforzado con capas de mallas continuas (Olvera, 1994).

La distribución uniforme y la relación alta entre el área superficial del refuerzo y el volumen del compuesto dan como resultado una mayor resistencia al surgimiento y a la propagación de grietas, lo que incrementa la resistencia a la tensión del material.

Sin embargo, el reducido espesor del ferrocemento causa una transferencia de calor alta del exterior al interior durante el verano y una pérdida alta del interior hacia el exterior durante la noche en los meses fríos del año. Estas ganancias y pérdidas de energía hacen que la edificación tenga condiciones de discomfort y provoca problemas de salud para los usuarios, así como también incrementa el consumo de energía eléctrica al utilizar equipos de climatización artificial para tener condiciones de confort térmico.

Aun así es potencialmente un material alternativo a los materiales convencionales que tiene ventajas en costo y resistencia mecánica, en la construcción de estructuras ligeras y resistentes para diferentes propósitos tales como vivienda, auditorios, escuelas, etc. (Fernández *et al.* 2001). Como ejemplo de aplicación, en el Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR unidad Oaxaca, se construyeron prototipos de vivienda y edificios públicos con el uso de tecnología del ferrocemento para disminuir los costos de la estructura en la edificación (Fernández *et al.* 2000).

Una posible solución a la aplicación del ferrocemento en construcción de vivienda en serie, podría ser integrar, como parte de un sistema constructivo, un material aislante que reduzca las ganancias y pérdidas de calor con el ambiente. Actualmente existen materiales aislantes como: poliuretano, poliestireno, espuma fenólica, lana de vidrio (fibra de vidrio), corcho comprimido, concreto celular, entre otros. Pero estos materiales impactan negativamente en el medio ambiente desde su producción hasta su disposición final como desechos (Papadopoulos, 2004). Sin embargo, y bajo una perspectiva de bajo impacto ambiental de la construcción, en Oaxaca, Oaxaca existen materiales locales de origen orgánico e inorgánico que tienen potencial como aislante.

Se han realizado trabajos de investigación aplicada combinados con industrializados sobre las características técnicas de los materiales que se utilizan en la construcción; pero, se encuentran pocos datos de propiedades térmicas de componentes constructivos de tipo alternativo. Con el conocimiento de dichas propiedades sería posible estimar el

comportamiento térmico de una edificación y hacer uso adecuado de los materiales en su aplicación a edificios.

## 1.2 Antecedentes

La literatura revisada se concentra en el uso de la Arquitectura bioclimática, los materiales aislantes y la simulación térmica.

### 1.2.1 Arquitectura bioclimática

Hasta antes de la década de los setentas, el diseño y la construcción de edificaciones solían utilizarse como indicador del progreso económico de una nación, aunque esto contribuyera al deterioro y la calidad del medio ambiente, debido a que para tener condiciones internas de confort térmico, los edificios utilizaban medios electromecánicos de climatización. Lo anterior fue parte importante de lo que originó una crisis energética mundial.

Olgyay en 1962 publicó la carta bioclimática, pero hasta la década de los setentas renace el interés sobre las cuestiones de ahorro energético. El nomograma de Olgyay consiste en una gráfica que relaciona las variables de temperatura de bulbo seco y humedad relativa, delimita una zona de confort térmico y especifica la cantidad de radiación solar, velocidad de viento y sombreado necesarios para mantenerse dentro del confort térmico, las condiciones específicas en esta gráfica son aplicables para las condiciones exteriores.

Con base en el trabajo de Olgyay, Givoni presentó en 1976, una carta bioclimática sobre consideraciones de diseño para tener condiciones de confort térmico en espacios interiores. Esta gráfica se basa en un diagrama psicrométrico, que relaciona las distintas propiedades del aire y que aplica un modelo de confort térmico con el enfoque de adaptación

Autores como Givoni (1998), Brow (1994) y Watson (1983), establecen que el diseño de una edificación adecuada a su entorno requiere de la aplicación de estrategias, principios, y técnicas de adecuación ambiental que respondan a condiciones y necesidades climáticas de cada lugar.

Los estudios de diseño bioclimático realizados por: Olgyay (1962), Givoni (1976), y Bansal (1994) afirman que es necesario conocer las condiciones de las variables climáticas (temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar y movimiento del aire) del sitio sobre el cual se construirán las edificaciones, con la finalidad de controlarlas en función de los requerimientos de confort térmico del usuario.

La Sociedad Americana de Ingeniería de Refrigeración, Calefacción y Aire Acondicionado (ASHRAE por sus siglas en inglés, 2001) ha desarrollado estándares, aplicables a espacios cerrados, que deben garantizar una situación de confort térmico, basados en modelos de predicción, al 90% de la población. Estos estándares estaban dirigidos a edificios con climatización artificial, sin embargo la norma ANSI/ASHRAE 55-2004, ya considera modelos de adaptación para edificios con ventilación natural (ASHRAE, 2004).

Actualmente se han realizado investigaciones para evaluar el confort térmico en los edificios. Wong *et al.* (2001), mencionan que en estudios de vivienda en Singapur, en clima cálido húmedo, la alta correlación entre el confort térmico y la sensación de la ventilación, revelan que debería considerarse más el manejo de la distribución de las áreas y las ventanas, lo cual puede crear movimiento de aire y de este modo incrementar el confort térmico en los usuarios.

Mwale (2002) afirma que para lograr condiciones de confort térmico en el interior es importante el conocimiento de las propiedades termofísicas de los materiales para reducir las pérdidas o ganancias térmicas por conducción y radiación que se dan a través de ellos.

Karlsson *et al.* (2002), hicieron un estudio para determinar cuál es la influencia del clima en los edificios. Dedujeron que el balance de la temperatura decrece con el incremento producido por el calor interno, el aislamiento térmico y la reducción de la ventilación, ya que la variación del balance de la temperatura depende de los componentes constructivos y varía en diferentes edificios, y el consumo energético de una vivienda bioclimática comparado con una “estándar” es menor.

Porta-Gángara *et al.* (2001), mencionan que las técnicas pasivas de diseño arquitectónico son: inercia térmica, orientación, sombras y uso de ventanas, y que deberán ser evaluadas

con base en la convección, difusión, radiación y los materiales. Deduce que el uso de elementos masivos en los edificios disminuyen las variaciones de las temperaturas interiores.

Sol (2006) menciona que las estrategias de diseño de la ciudad de Oaxaca y zona conurbada son: calentamiento por las mañanas y noches en los horarios de 21 a 11 horas en promedio y enfriamiento necesario en los horarios de 14:00 a 18:00 horas. También menciona que la mejor orientación de las ventanas es norte- sur y recomienda que el retardo térmico de muros, pisos y techumbres sea mayor a ocho horas.

## 1.2.2 Materiales aislantes

El uso de los materiales locales como aislantes en la construcción es importante, ya que disminuye el uso de energía en edificios. Según Morel *et al.* (2000) cada nuevo proyecto deberá que considerar específicamente los materiales locales a través del análisis particular de los materiales disponibles para reducir el impacto ambiental de construcción.

De acuerdo a Hernández (2006) el uso de desechos sólidos urbanos en estructuras de ferrocemento permite reducir la conductividad térmica en componentes multicompuestos hasta en un 54% en muros y hasta 86% en cubiertas comparados con muros de mampostería y cubiertas de concreto armado, utilizados comúnmente en el sistema de construcción en México.

Los aislantes industriales como cloruro de polivinilo, poseen características que los perfilan como aislantes térmico y acústico con gastos de mantenimiento casi nulos (Rodríguez, 2004). El poliestireno se destaca por su ligereza e inflamabilidad. Las poliamidas, por su alta resistencia a la corrosión.

El Estado del Arte en los aislantes térmicos, divide a los materiales en dos grupos, los materiales inorgánicos y los orgánicos. Los materiales aislantes no son independientes de la producción de energía y los sistemas de conservación; además un punto importante es que los materiales aislantes dependen de la adaptabilidad local.

Los materiales inorgánicos según Papadopoulos (2005) son: el vidrio y la piedra; los orgánicos son el poliestireno, poliuretano, corcho, melanine, lana, algodón, fibra de coco y celulosa; esta división está referida en materiales que pueden quemarse o no a temperaturas menores a 150 °C como es el caso del vidrio y la piedra. Los estudios que se han realizado en materiales como aislante térmico, muestran que existe una necesidad de protección térmica para lograr con costo bajo construcciones, rehabilitaciones o adecuaciones ambientales de edificios, con consumo energético menor y confort térmico con costo de operación bajo.

Alavéz (2005), hizo un estudio de materiales orgánicos e inorgánicos para su aplicación en cubiertas, los cuales son: fibra de coco, palma real, ferrocemento y fibra de vidrio. Los resultados reportados muestran una reducción del 62% de la carga térmica con respecto a una cubierta de concreto armado común.

Según Lira *et al.* (1998) es necesario conocer las propiedades térmicas (conductividad térmica, difusividad térmica y capacitancia calorífica específica), para un correcto análisis del comportamiento térmico de los materiales.

La obtención de dichas propiedades ayuda a la posibilidad de que los componentes constructivos cumplan con la regulación en materia ambiental (DIN,2002), que implica la consideración de materiales con baja difusividad térmica (Papadopoulos, 2001). Aunado a esto y con base a la conductividad y el calor específico se pueden calcular otras propiedades térmicas como la difusividad térmica, tiempo de retraso térmico, amortiguamiento térmico y resistencia térmica (Simonson, 1975).

Con lo antes mencionado se deduce que es indispensable conocer si los materiales son adecuados para la construcción de edificios confortables y de bajo consumo energético, por lo que es importante conocer sus propiedades termofísicas.

Según González (2002), las normativas térmicas vigentes en algunos países no consideran el efecto a favor que, sobre el confort térmico y el ahorro de energía, puede tener determinados tipos de materiales sobre otros, aplicados a las caras interiores o exteriores. Las normas promueven el uso de los materiales aislantes, sin hacer ninguna diferencia



entre ellos, solamente se considera su conductividad térmica. Por esa razón recomienda que cuando se trata de acondicionamiento natural o pasivo de edificaciones, deben de estar siempre referidas al conjunto de características térmicas externas y a las condiciones límites internas.

A pesar de que existen distintas normas que incorporan los materiales de construcción para edificaciones, éstas tradicionalmente se han centrado más en el ahorro de energía que en el uso apropiado de ésta.

La normatividad de la Sociedad Americana para pruebas y materiales (ASTM, por sus siglas en inglés), en su experiencia de más de 100 años, se ha distinguido por el manejo de normas de alta calidad comprobada por los expertos que colaboran con ellos. ASTM cuenta con normas específicas que son aplicadas a este estudio sobre las propiedades termofísicas, como son las normas ASTM-C 177-97, C-332-99, C-351-92 y C-518-98, entre otras.

### 1.2.3 Simulación térmica

Con el uso de los simuladores térmicos se puede estimar el comportamiento térmico de los edificios con la consideración del efecto de los elementos climáticos. La importancia de la modelación energética de las construcciones es estimar los flujos de energía de forma dinámica y entender la relación entre los parámetros de diseño y las características del uso de la energía en el edificio.

La simulación térmica es una herramienta analítica que se utiliza para investigaciones en materia energética y evaluación del diseño arquitectónico. Actualmente existen más de 200 programas de simulación, los cuales van desde el análisis para el cálculo del equipo de aire acondicionado (HVAC), hasta estimación de ventilación y acústica (Nyuk *et al.* 2000).

Algunos programas de simulación térmica son BILBO, BILGA, ENERGY10, CALPASS están basados en algoritmos simplificados y son de uso común por los diseñadores de edificios. Sin embargo, existen otros programas con mayor precisión debido a los métodos y

modelos matemáticos que utilizan, los cuales son: DOE-2, TRNSYS, SUNCODE, ABACUS, BLAST y ENERGY-PLUS.

Los programas más utilizados para la simulación en edificios con el propósito de investigación en México son DOE y TRNSYS. Sin embargo éstos han sido creados con herramientas y modelos de simulación distintos. Debido a que DOE 2.1E se enfoca en la simulación de la envolvente de los edificios, mientras que TRNSYS analiza el comportamiento de sistemas energéticos a detalle, así como un modulo operativo para el edificio también cuenta con la facilidad de añadir modelos matemáticos para resolver problemas complejos de otro tipo.

El simulador DOE-2.1E ha sido usado por más de 25 años para estudios de diseño de edificios, pruebas de estándares energéticos en edificios en los Estados Unidos y otros países; además, de ser una referencia obligada para la validación de otros simuladores (Crawley *et al.* 2005). Si el análisis de energía comienza en la fase de diseño entonces las consideraciones de flujos energéticos pueden ser integradas en la forma del edificio y el concepto de diseño (Nall y Crawley, 1983).

## 1.3 Objetivos

### Objetivo general

Diseñar una vivienda bioclimática con paneles modulares de ferrocemento y evaluar por medio de simulación térmica dinámica las ventajas de uso potencial como aislante del olote-cemento y el vidrio volcánico-cemento, como alternativa para lograr condiciones de confort térmico y ahorro energético en la ciudad de Oaxaca, Oax.

### Objetivos particulares

1. Establecer las estrategias de adecuación ambiental de la ciudad de Oaxaca, Oaxaca.
2. Estimar las propiedades térmicas del olote y vidrio volcánico, que serán utilizados como aislantes térmicos.

3. Diseñar un prototipo de vivienda bioclimática de construcción en serie con el uso de paneles modulares de ferrocemento.
4. Evaluar por simulación térmica en estado dinámico lo siguientes: 1) vivienda de construcción en serie representativa de la zona de estudio, con materiales convencionales para la región, 2) vivienda bioclimática de construcción en serie con paneles modulares de ferrocemento, que puede utilizarse como parte intermedia de los paneles: a) capa de aire, b) olote-cemento y c) vidrio volcánico-cemento.
5. Realizar un estudio comparativo del comportamiento térmico, eficiencia energética, ganancias por superficies, efectos de la carga térmica y la influencia del diseño bioclimático, de las viviendas analizadas con el programa DOE 2.1 e®.

## 1.4 Hipótesis

La utilización de estrategias bioclimáticas y materiales alternativos, tales como el olote y vidrio volcánico como recurso bioclimático, reducirán las cargas térmicas en la vivienda de paneles modulares de ferrocemento.

# Capítulo 2. Marco teórico

---

Para la realización de este trabajo es necesario conocer el enfoque de la Arquitectura Bioclimática y la teoría que sustenta la carta psicrométrica, ya que ésta es una herramienta fundamental para conocer las estrategias bioclimáticas. Es necesario conocer el comportamiento de la trayectoria solar, las ganancias solares, la transferencia de calor, las propiedades termofísicas de los materiales y los requerimientos para la simulación térmica en estado dinámico.

## 2.1 Clima

Marco Vitruvio Polión, arquitecto e ingeniero romano escribió: *“la medicina es necesaria al arquitecto para conocer cuáles son los aspectos del cielo, que los griegos llaman climas, las condiciones del aire en cada lugar; que parajes son nocivos, cuáles saludables, y qué propiedades tienen sus aguas, porque sin el conocimiento de estas circunstancias no es posible construir edificios sanos”*. En este punto Vitrubio relaciona la importancia de la Arquitectura con el ambiente y con la salud. (Siglo I (23 0 27) a.C. Traducción de Ortiz y Sanz, 1787).

La Arquitectura se considera como el arte de delimitar espacios útiles, resistentes y estéticos. Durante su historia se ha vinculado con el estudio de las condiciones geográficas que permitía dar soluciones particulares a los edificios, como es el caso de la Arquitectura Prehispánica en México, donde se consideraba la orientación, el entorno y la idiosincrasia como parte fundamental del diseño de sus edificaciones. Sin embargo, a medida que avanzaba la ciencia y la tecnología estas consideraciones se perdieron.

El movimiento moderno del siglo XX, dio origen al llamado estilo internacional, que se extendió por todo el planeta. Estaba compuesto por edificaciones acristaladas que no tomaban en cuenta las condiciones climáticas del lugar, ya que los problemas se podían resolver con el uso de sistemas artificiales de climatización e iluminación, lo cual trajo consigo el consumo excesivo de la energía eléctrica.

En particular, en el caso de las llamadas viviendas económicas y de interés social los arquitectos proponen sus diseños con materiales que permiten abaratar los costos de construcción, sin importar las condiciones de confort que se presente en el interior de ellas. Esto provoca en el usuario problemas de tipo fisiológico, psicológico y económico, por lo que es necesario hacer un estudio de las condiciones climáticas del sitio y proponer estrategias de adecuación al clima que propicien confort térmico interior.

La Arquitectura Bioclimática tiene por objetivo generar un nivel de confort integral (térmico, acústico, lumínico, ambiental) mediante la adecuación del diseño, la geometría, la orientación y el uso de materiales adecuados a las condiciones climáticas de su entorno. Se trata, de una Arquitectura que se adaptada al medio, sensible al impacto que provoca en la naturaleza, y que intenta minimizar el consumo energético y con él, el deterioro e impacto ambiental del edificio (Fuentes y Morillón, 2003).

Cuando se trata de diseñar edificios, en lo que respecta al confort integral, por lo general se elige la opción que representa el menor esfuerzo al diseñador: el uso de sistemas artificiales de climatización, pero que representa un costo operativo alto del edificio, que paga el usuario. Sin embargo, existen sistemas por medios pasivos, que pueden proporcionar los mismos resultados a un costo operativo menor.

Cuando se logra el diseño de un edificio en el cual no es necesaria la utilización de altos consumos energéticos para sentirse en confort térmico en el interior, entonces se puede hablar de una Arquitectura Bioclimática, debido a que ésta busca el uso eficiente de la energía, se integra al entorno natural para proporcionar espacios confortables y saludables para los usuarios (Fuentes y Morillón, 2003).

Los factores climáticos son las condiciones físicas que caracterizan a una región o un lugar en particular, y determinan su clima. Los principales factores son: latitud, altitud, relieve, distribución de tierra y agua y corrientes marinas.

Los elementos del clima más importantes para el proceso de diseño arquitectónico son: temperatura del aire, humedad relativa, precipitación pluvial, velocidad y dirección del

viento, presión atmosférica, nubosidad, radiación solar, visibilidad y fenómenos especiales. Cada uno de estos elementos se describe a continuación.

**2.1.1 Temperatura del aire:** Parámetro que determina la transmisión de calor de un cuerpo a otro en forma comparativa por medio de una escala. Se utilizan en general tres tipos de escalas termométricas: grados Centígrados, Kelvin y Fahrenheit (Pinazo, 1999).

En los elementos del clima o parámetros climatológicos es común encontrar los términos de temperatura media, máxima, máxima extrema, temperatura mínima y temperatura mínima extrema. Estos datos existen generalmente en forma mensual y anual. Para que tengan validez se requiere que sean datos “normalizados“, es decir, un año típico meteorológico.

La variación de la temperatura influye en el confort térmico del edificio, por lo que es necesario considerar los factores que hagan posible mantener una temperatura confortable en el interior, como es el caso de los materiales constructivos cuya ganancia o pérdida de energía se ve afectados por los cambios del clima.

**2.1.2 Humedad relativa:** Es la relación expresada en porcentaje de humedad que contiene el aire y la cantidad de agua necesaria para saturar a éste a una misma temperatura. Se llama relativa porque el aire tiene la característica de poder retener mayor contenido de humedad a mayor temperatura. Es un elemento que se encuentra ligado con la temperatura para lograr el confort higrotérmico en el interior de las edificaciones (Pinazo, 1999).

**2.1.3 Precipitación pluvial:** Es el agua procedente de la atmósfera que, en forma sólida o líquida, se deposita sobre la superficie de la tierra. La precipitación puede ser sensible o insensible, ya sea que tenga forma de lluvia, granizo, llovizna, nieve o rocío, bruma o niebla. Conocer la precipitación del lugar donde se diseña, ayuda entre otras cosas, a tener planteamientos óptimos en el diseño de cubiertas (Givoni, 1976).

**2.1.4 Velocidad y dirección del viento:** El viento se forma por corrientes de aire producidas en la atmósfera por causas naturales. Se mide en dirección horizontal. El viento tiene diversos atributos que lo caracterizan, como son dirección, frecuencia y velocidad. Los efectos del viento en la edificación deben de considerarse tanto en el interior como en el exterior debido a la transferencia de calor por convección y a la infiltración (Givoni, 1976).

**2.1.5 Presión atmosférica:** Se define como el peso del aire por unidad de superficie. Las diferencias de presión atmosférica dependen de la temperatura del aire y de la altitud del lugar. Influye en el efecto del ambiente térmico sobre el usuario, debido a la emisividad de los materiales y a las condiciones externas de temperatura y humedad (Pinazo, 1999, Givoni, 1976).

**2.1.6 Radiación solar:** La radiación global es la cantidad total de energía solar que alcanza una fracción de superficie terrestre en un plano horizontal. La radiación global se forma por dos componentes, uno es la radiación directa (I) y la otra es la radiación difusa o celeste (D). La ganancia por radiación en el edificio se da a través de ganancia directa sobre la envolvente y en especial sobre las áreas transparentes como las ventanas (Givoni, 1976).

**2.1.7 Asoleamiento:** La energía proveniente del sol es la fuente primaria de calor y la luz en la tierra. La acción del sol en la tierra trae beneficios al hombre desde los puntos de vista térmico, económico, higiénico y psicológico. La localización, orientación y forma de un edificio deben analizarse para obtener el máximo provecho de estos beneficios. Desde el punto de vista térmico los rayos solares deben penetrar y ser absorbidos en las edificaciones cuando se requiere y ser rechazados en verano o cuando no contribuye a la sensación de confort térmico (Givoni, 1976).

**2.1.8 Nubosidad:** La nubosidad está formada por un conjunto de partículas minúsculas de agua líquida o hielo suspendidas en la atmósfera en forma de masa, cuyo

color varía según la luz solar e influye en la cantidad de radiación que afecta o beneficia a la envolvente de los edificios (Givoni, 1976).

## 2.2 Carta psicrométrica

Según Pinazo (1999), la psicometría es el estudio de las propiedades termodinámicas del aire atmosférico. La carta psicrométrica es la representación gráfica de dichas propiedades. Es utilizada en el diseño bioclimático como una herramienta para proponer estrategias de adecuación climática y estimar condiciones de confort térmico en las edificaciones.

Existen varios diagramas del aire húmedo, que pueden representar diferentes condiciones y fases del agua en su mezcla con el aire seco, los más usados son los diagramas de Carrier, ASHRAE y el de Mollier (Pinazo, 1999).

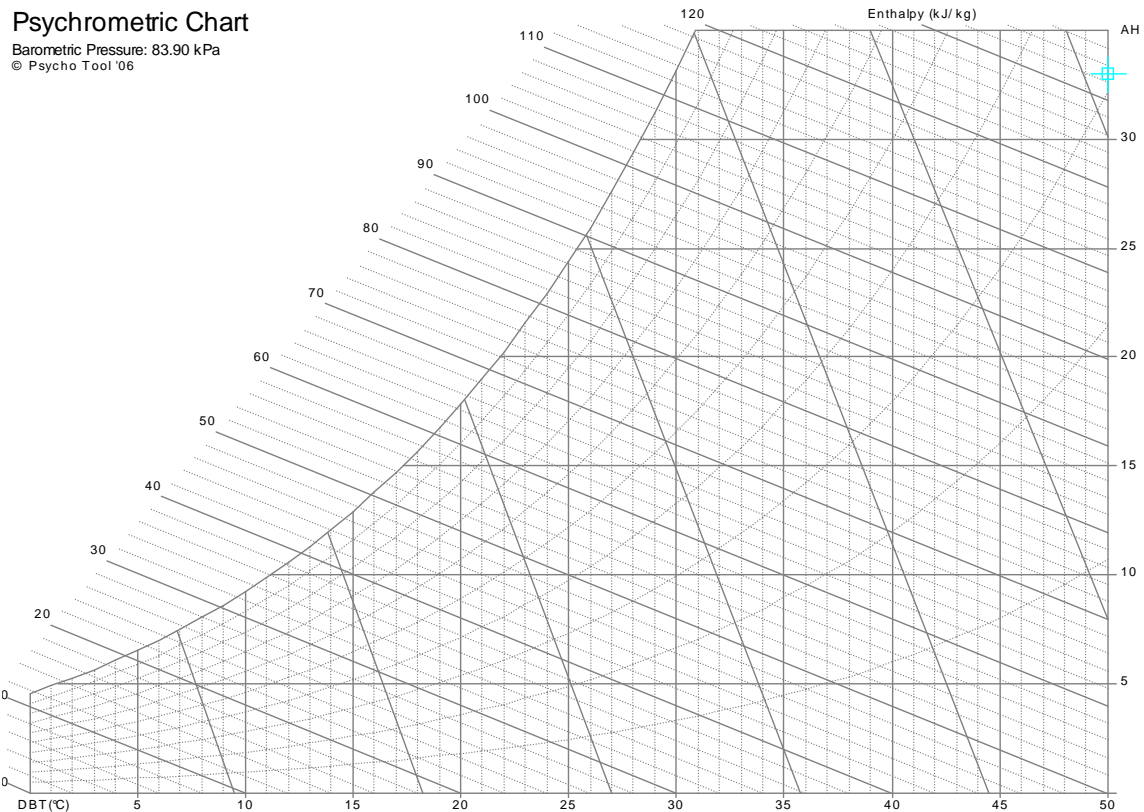
El diagrama psicrométrico de Carrier toma como variables independientes la temperatura del aire seco y la humedad absoluta, que es la relación de masa de vapor de agua con respecto a la masa de aire seco, representándose las demás variables en forma de parámetros. Los diagramas de Mollier y ASHRAE toman como variables independientes la entalpía y la humedad absoluta y al igual que la carta de Carrier, representa las demás variables como parámetros.

En el diagrama de Mollier es factible representar todos los estados de la mezcla agua-aire seco, por tanto el agua podría estar en estado gaseoso, líquido o sólido. Sin embargo, para este estudio es conveniente utilizar la carta publicada por ASHRAE, ya que muestra valores de entalpía a varias temperaturas y se considera una carta específica de acuerdo a la altitud que presenta el lugar de estudio.

Los gráficos psicrométricos dan las siguientes propiedades termodinámicas del aire húmedo a la atmósfera: temperatura de bulbo seco; temperatura de bulbo húmedo; temperatura de rocío (o saturación), humedad absoluta; humedad relativa; volumen específico y entalpía. Si se conocen dos de estas propiedades, puede determinarse el estado del aire con la carta psicrométrica, y pueden leerse los valores restantes en las líneas correspondientes que pasan por este punto.



Las cartas psicrométricas que se tienen en la literatura comúnmente corresponden al nivel del mar, el cual tiene una presión atmosférica de 101,325 Pa. Sin embargo, la ciudad de Oaxaca se encuentra a una altura de 1550 msnm con una presión atmosférica de 83,900 Pa. Se realizó una carta psicrométrica correspondiente a la ciudad de Oaxaca con la utilización del programa Psycho Tool (2006) (Figura 1).



*Figura 1. Carta psicrométrica para 83.90 kPa. Obtenida con el programa Psycho Tool (2006).*

Para ubicar en la gráfica las zonas de confort térmico que se basa en las temperaturas neutrales, es necesario tener los datos de las temperaturas medias de los 12 meses del año de la zona de estudio. Existen dos zonas de confort térmico la de invierno y la de verano, a partir de las cuales se definen las estrategias de adecuación ambiental a seguir; después de trazar las líneas que representan las condiciones climáticas de cada mes.

En la carta psicrométrica se dibujan las estrategias bioclimáticas de acuerdo al método de Docherty y Szokolay (1999), las cuales son: masa térmica, ventilación, calentamiento solar pasivo, enfriamiento evaporativo directo o indirecto.

Es importante aclarar que hay dos tipos de estrategias: 1) Las permanentes, que son aquellas que debido a su naturaleza constructiva no pueden ser removidas de la edificación, un ejemplo es la masa térmica y 2) las temporales que son aquellas que se utilizan conforme se requiere calentar o enfriar el edificio; como pueden ser el uso de la radiación solar, o la ventilación.

La masa térmica representa el uso de sistemas constructivos con materiales de alta masa volumétrica, lo que produce un retraso en la velocidad de flujo de energía calorífica por diferencial de temperatura exterior – interior.

La ventilación puede ser natural, conforme a la temperatura y velocidad del viento disponible en el exterior, o forzada con el uso de ventiladores que generen movimiento de masas de aire, aumentando los cambios de aire por hora de los espacios.

El calentamiento solar pasivo consiste en diseñar las ventanas o elementos transparentes, muros, y cubiertas conforme a: orientación, dimensiones y materiales, que permitan la ganancia de radiación solar cuando se requiera para tener condiciones de confort térmico. El principal efecto de esta estrategia es calentamiento a través de la radiación global recibida en las ventanas o elementos traslucidos de la construcción (si se considera que la solución es óptima).

El enfriamiento evaporativo directo, es el uso de sistemas de inyección de aire, con reducción de su temperatura mediante el incremento de su humedad (enfriador evaporativo también conocido como cooler o aire lavado), el enfriamiento evaporativo indirecto, utiliza agua como un sistema absorbedor de la energía del aire sin que esté en contacto directo con el agua, como en un techo estanque.

## 2.3 Temperaturas neutrales

El término confort, voz inglesa (comfort), se refiere en términos generales a un estado “ideal” del ser humano, un estado que supone bienestar, salud y comodidad. Un ambiente confortable es aquel donde no existe distracción y molestia, de tal manera que las actividades placenteras pueden realizarse sin perturbaciones físicas y mentales (Croome, 1977).

El confort ambiental es dividido en diferentes tipos de confort sensorial del ser humano, como son: Confort térmico, higrotérmico, acústico, lumínico, olfativo, visual y psicológico. Sin embargo, para este estudio se analiza únicamente el confort térmico debido a que es el que busca controlar el ambiente térmico en los espacios interiores y cuyas condiciones pueden requerir de climatización artificial y afectar en el ahorro energético.

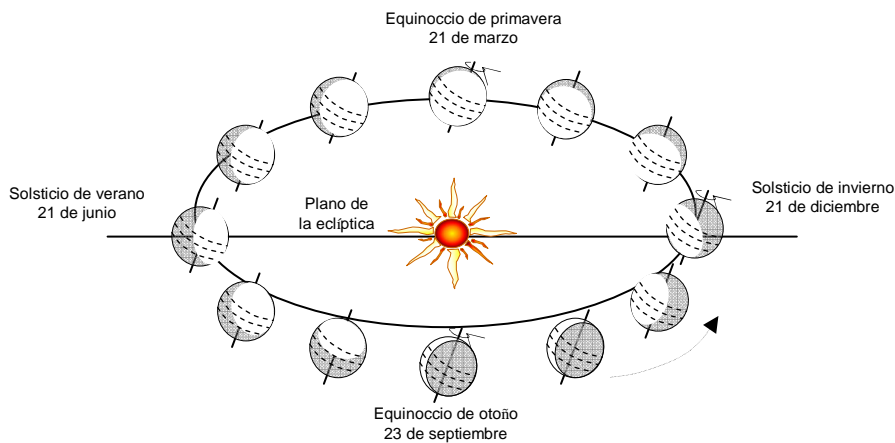
El enfoque de adaptación del confort térmico inicia con la publicación de Bedford en 1936, donde introduce el empleo de estudios de campo para investigar la relación entre el ambiente térmico y las sensaciones personales de confort térmico en un ambiente de trabajo. Humphreys *et al.* (1978), propusieron un modelo de adaptación que establece la dependencia de la temperatura de confort térmico sobre la temperatura media exterior.

Auliciems y de Dear (1998) contribuyeron a la reconciliación de los modelos empíricos y racionales ya que indicaron la existencia de niveles diferentes de adaptación (fisiológico y psicológico). En estudios de campo que realizaron los autores encontraron que las personas prefieren la sensación de “ligeramente frío” en vez de neutral en climas calientes, y de manera inversa, la sensación de “ligeramente caliente” en vez de neutral en climas fríos. Los resultados obtenidos en estos últimos años en los estudios de campo permitieron que el modelo de adaptación fuera incluido en el estándar ANSI/ASHRAE 55-2004 (Fernández, 2002).

El modelo de adaptación también conocido como modelo de neutralidad térmica es una pauta basada en resultados de estudios de confort térmico realizados en campo, y bajo una amplia gama de condiciones climáticas.

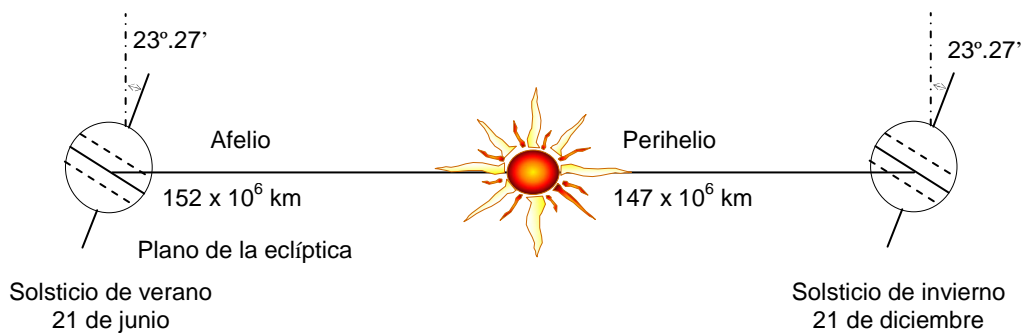
## 2.4 Movimientos característicos de la tierra

El movimiento de translación orbital alrededor del sol transcurre en un año solar de 365 días, 5 horas, 48 minutos, 46 segundos, con una velocidad de desplazamiento de 29 km/s (Figura 2). Este movimiento se describe en una órbita elíptica, que es resultado de la fuerza gravitacional solar y centrífuga debido a la inercia de la tierra. El movimiento de rotación se realiza al girar la tierra sobre su mismo eje en 24 horas. Este eje es una línea imaginaria que une los dos polos, norte y sur (Ferreiro *et al.*, 1991).



*Figura 2. Movimiento de la tierra con respecto al sol.*

Al realizar un giro completo, la tierra en su movimiento de translación describe un plano que contiene a su misma órbita (Figura 3). Este plano es llamado plano de la eclíptica, y forma un ángulo de  $23^{\circ} 26' 44.7''$  con respecto al eje vertical.



*Figura 3. Plano de la eclíptica.*

La intensidad de la radiación solar en la superficie terrestre variará según las condiciones atmosféricas y las coordenadas solares. Las variaciones climáticas estacionales se deben a la inclinación de la tierra (Figuras 4, 5 y 6).

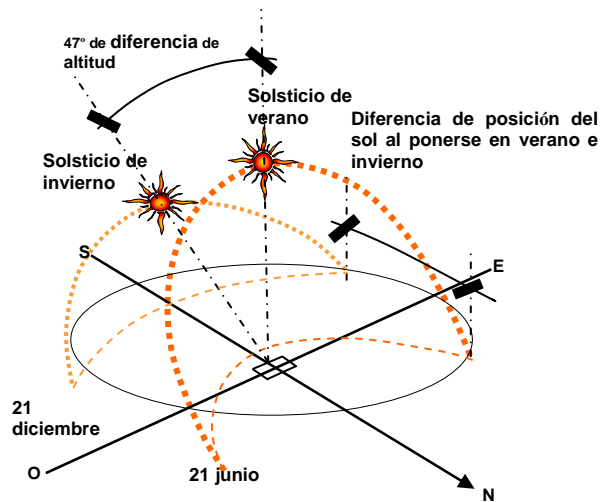


Figura 4. Ruta aparente del sol (Ferreiro 1991).

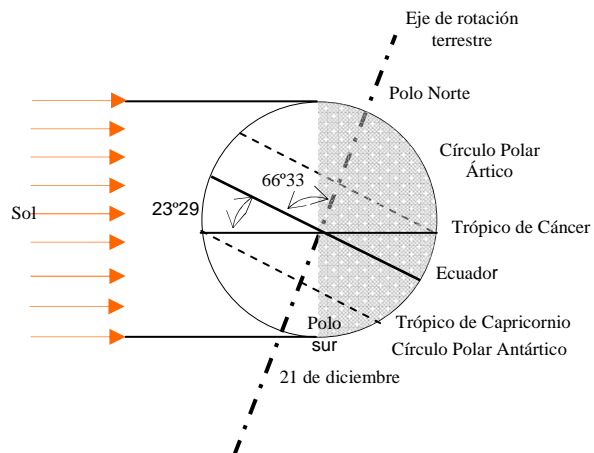
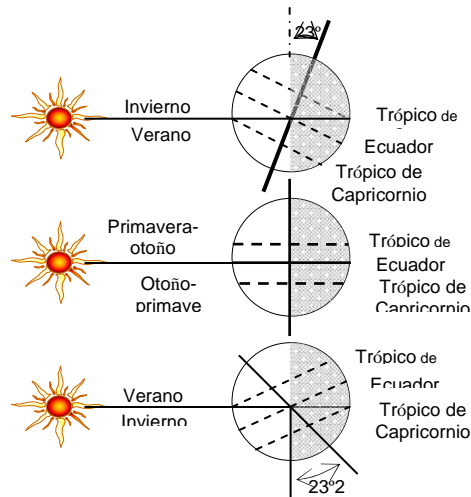


Figura 5. Líneas imaginarias que definen las incidencias particulares de los rayos solares en la tierra.



*Figura 6. Periodos de incidencia normal de los rayos solares en la tierra.*

La ganancia solar es un flujo de energía que solo puede ser positivo y se refiere a la aportación de calor por radiación solar, en este aspecto es importante considerar las variables siguientes: la forma de la envolvente arquitectónica y de la estructura, su relación superficie- volumen, su orientación, las aberturas y los dispositivos de control solar. Si se trata de ganancias por conducción, se debe destacar la relación superficie-volumen, las características termofísicas de los materiales y sistemas constructivos y la inercia térmica.

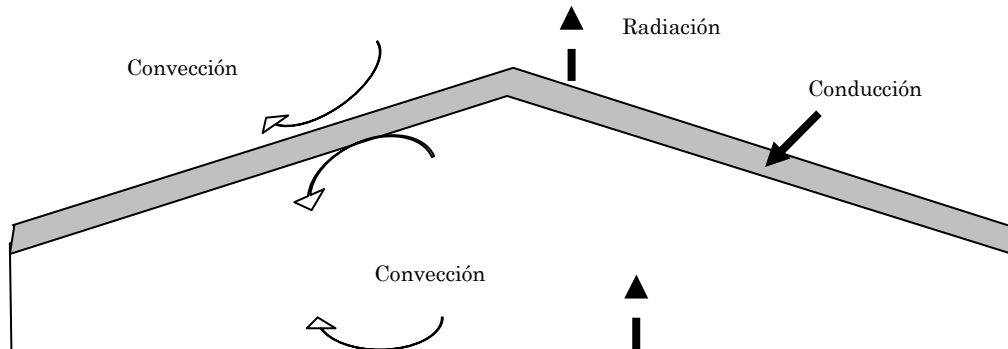
## 2.5 Transferencia de calor

Las leyes y ecuaciones que gobiernan los mecanismos de transferencia de calor son: 1) Ley de Fourier-conducción, 2) Ecuación de Enfriamiento de Newton-convección y 3) Ley de Stefan-Boltzmann-radiación.

El flujo de energía en una estructura o un equipo se basa en los principios de la termodinámica. La primera ley establece que la energía se transforma, no se crea ni se destruye. La cantidad de energía transferida a un sistema en forma de calor más la cantidad de energía transferida en forma de trabajo sobre el sistema debe ser igual al aumento de la energía interna del sistema (Mills, 1999).

La segunda ley dice que la energía calorífica siempre fluye de un cuerpo con mayor temperatura a otro con menor temperatura. La transferencia de calor se puede dar a través

de los tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación (figura 7) (Mills, 1999).



*Figura 7. Mecanismos de transferencia de calor.*

El efecto conjunto de las tres formas de transferencia de calor, se expresa mediante el coeficiente global de pérdidas de cierre, que representa la cantidad de energía calorífica disipada por segundo, por metro cuadrado de superficie y por cada grado centígrado de diferencia entre la temperatura exterior y la interior.

Una de las formas de conseguirlo es a través de la disminución del intercambio de calor entre el interior y el exterior, de forma que los muros, cubiertas, pisos, puertas y ventanas ejerzan una función de aislamiento térmico, que se logra de acuerdo al espesor y las propiedades termofísicas de los materiales que lo componen. Los intercambios térmicos del edificio con el ambiente se establecen a través de los tres mecanismos de transferencia de calor mencionados anteriormente.

### 2.5.1 Ley de Fourier- conducción

Es la ley física que describe matemáticamente el mecanismo de transferencia de calor por conducción. Es la transferencia de calor por actividad molecular que ocurre básicamente entre la materia sólida y se representa por la ecuación 1. Cuando las primeras moléculas se calientan, su energía se transfiere a las moléculas adyacentes. La velocidad con el cual se transmite calor a través de un material depende de la diferencia de la temperatura entre la fuente de calor y el material que es calentado, de la conductividad térmica de éste, de su espesor y del área expuesta (Simonson, 1975).

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{dx} \quad [1]$$

donde:

q= Flujo de energía calorífica por conducción (W/m<sup>2</sup>)

ΔT= Diferencia de temperaturas entre interior y exterior (K ó °C)

x= Espesor del elemento (m)

λ = Conductividad del material (W/m<sup>2</sup> °C)

## 2.5.2 Ecuación de enfriamiento de Newton-Convección

De acuerdo a esta ley, la razón con que cambia la temperatura de un objeto es proporcional a la diferencia entre su temperatura y la del medio que lo rodea, que es la temperatura ambiente. Esta ley contempla los efectos combinados de la conducción, convección y radiación.

La convección es la transferencia de calor entre líquidos y gases, lo cual da como resultado el movimiento del fluido. La convección se refiere a la transferencia de calor que ocurre entre la superficie de un material y un fluido (en el caso de los edificios, el aire). El fluido más denso y frío remplazará al más caliente y menos denso que sube. La convección se refiere a las pérdidas o ganancias de las energías caloríficas por intercambio de aire entre el exterior de un espacio ya sea por infiltración, exfiltración o ventilación natural o forzada y se representa con la ecuación 2 (ASHRAE, 2001).

$$Q_v = 1200 \cdot V \cdot \Delta T \quad [2]$$

donde:

Q<sub>v</sub>= Flujo calorífico por ventilación (W)

1,200= Calor específico volumétrico del aire (J/m<sup>3</sup> °C)

V= Tasa ventilación (m<sup>3</sup>/s)

ΔT= Diferencia de temperatura entre el aire exterior y el interior (°C)



### 2.5.3 Ley de Stefan-Boltzmann- Radiación

Establece que si un cuerpo se encuentra a una determinada temperatura, este emite energía que viene cuantificado por la ecuación 3. Esta ley aplica a los denominados cuerpos negros, que son aquellos que emiten la mayor cantidad de energía. Estos cuerpos son una idealización, en realidad los cuerpos reales solo emiten una fracción de la energía que emite un cuerpo negro.

$$q^{rad} = \sigma AT^4 \quad [3]$$

donde:

$q^{rad}$  = Flujo de calor por radiación, (W).

$T$  = Temperatura absoluta (°C).

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  (W/m<sup>2</sup>°C<sup>4</sup>)

La radiación es la transferencia de energía a través de ondas electromagnéticas en un medio heterogéneo, es decir, es aquella que es emitida por cualquier cuerpo cuyas moléculas han sido excitadas por energía térmica. El flujo de calor por radiación queda definido por la ecuación 4. La intensidad de radiación emitida por un objeto es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura, por lo que si la temperatura del cuerpo emisor se incrementa al doble, la intensidad de radiación aumentará 16 veces (Fuentes, 2003). El flujo depende de la temperatura del cuerpo radiante y del receptor, la distancia que tengan las superficies a su alrededor y la densidad del medio heterogéneo de transmisión (ASHRAE, 2001). El coeficiente de radiación superficial se muestra en la figura 8

$$Q_r = h_r \cdot A \cdot \Delta T \quad [4]$$

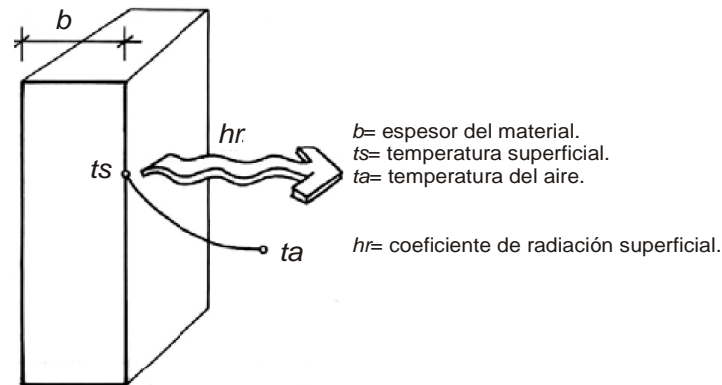
donde:

$Q_r$  = Flujo de calor por radiación (w)

$h_r$  = Coeficiente de radiación (W/m<sup>2</sup> °C)

$A$  = Área expuesta (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$  = Diferencia de temperatura (K ó °C).



*Figura 8. Coeficiente de radiación superficial.*

La edificación está sometida al efecto periódico principalmente de la temperatura exterior y la humedad relativa, bajo estas condiciones, los materiales utilizados en la construcción regulan las ganancias y pérdidas del flujo de calor.

Un material aislante tiene determinados valores de densidad y de calor específico que lo pueden diferenciar de otro aislante, aún cuando su conductividad sea igual, basta que la densidad de ambos sea diferente para que el comportamiento térmico sea distinto.

Es importante analizar los flujos de energía en una envolvente, porque a partir de ellos se pueden controlar las condiciones térmicas de los espacios interiores, y por tanto se conseguiría obtener condiciones de confort térmico. Lo importante es lograr un control térmico natural es decir de manera pasiva, o utilizar medios electromecánicos que propicien el ahorro energético.

## 2.6 Propiedades termofísicas de los materiales

Las principales características térmicas de los materiales son: conductividad térmica ( $\lambda$ ), densidad ( $\rho$ ), calor específico ( $C_p$ ), calor específico volumétrico ( $\rho C_p$ ), difusividad térmica ( $\alpha$ ), efusividad térmica ( $b$ ) y resistencia térmica ( $R$ ) (González, 2002).

La conductividad térmica ( $\lambda$ ) expresa la capacidad del material para conducir el calor, y es, el cociente de la densidad del flujo térmico y del gradiente de temperatura ( $W/m^{\circ}C$ ).

La densidad ( $\rho$ ), o masa volumétrica de un material, define el cociente entre la cantidad de masa (kg) que caracteriza el material y el volumen unitario ( $m^3$ ). Su valor se mide en ( $kg/m^3$ ).

El calor específico ( $C_p$ ) es la característica del material que expresa la cantidad de calor necesario para aumentar un grado centígrado la temperatura de una unidad de masa, se mide en  $J/kg^\circ C$ . Su valor depende del material, tiene un rango de variación pequeño para la mayoría de los materiales de construcción (uno a cuatro); el rango está comprendido entre 500 y 2000  $J/kgK$  y pocos materiales salen de este rango (González, 2002).

El calor específico volumétrico ( $\rho C_p$ ) caracteriza la capacidad de almacenamiento de calor o capacidad térmica volumétrica de un material. Dado que el calor específico varía muy poco entre los materiales, la capacidad de almacenamiento de éste depende de la densidad de los mismos.

La difusividad térmica es la noción de velocidad de difusión, que tiene que ver con la difusión de una temperatura en un material. Sometido a un cambio de temperatura, un material verá a ésta variar más rápidamente en la medida que mayor se su difusividad térmica (González, 2002).

La efusividad térmica ( $b$ ) tiene que ver con la efusión de una potencia térmica dentro de un material, es decir, el flujo de calor que el material absorbe de acuerdo con su estado térmico.

La inercia térmica se estima con base en la capacidad térmica ( $C$ ), a partir de la energía que puede retener un elemento por unidad de masa, al incrementar su temperatura un grado centígrado (González, 2002). Un ejemplo de la importancia de esta propiedad es cuando se utiliza la masa térmica para disminuir la velocidad de flujo de calor, almacenar energía y liberarla cuando la temperatura del entorno es menor a la temperatura de los materiales, así se puede evitar las variaciones de temperatura dentro del espacio.

## 2.7 Simulación térmica

La herramienta de simulación térmica usado en el presente estudio fue el programa DOE 2.1E® en su interface DOE-Plus desarrollado por el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley. Dicho programa trabaja bajo el modelo matemático de función de transferencia, el cual entrega la respuesta de un sistema a una señal de entrada o excitación exterior. Se consideran en principio los factores de respuesta que se resuelven con la función mencionada y también se consideran los factores de peso, que determinan las condiciones específicas de una simulación en particular, como puede ser el método de infiltración, características ópticas y térmicas del tipo de vidrio, propiedades de reflectividad de los perímetros de la edificación, entre otros.

La estructura interna del programa incluye: programa de análisis simplificado de energía (ASAM-2, ADM-2), programa para ASHRAE estándar 90.1 (ENVSTD), programa para análisis residencial (PEAR), opciones económicas de diseño energético (EEDO).

El sector privado ha adoptado DOE-2.1E interfaces que hacen más práctico el uso del programa, algunos ejemplos son: ADM-DOE2, CBIP, Compare-IT, CoolTools, COMPLY-24, DesiCalc, DOE-Plus, DOE2Parm, DrawBDL, Energy Gauge USA, EnergyPro, EZ-DOE, FTI/DOE2, Home Energy Saver (LBNL), Home Improvement Tool (LBNL), Perform 2001 PRC-DOE2, PRC-Tools, RIUSKA, RESFEN 3.1, VisualDOE 3.1, Visualize-IT.

La selección de un programa de simulación térmica debe basarse en: 1) El objetivo de la simulación, es decir lo que se desea conocer sobre el comportamiento térmico del edificio, 2) El nivel de detalle de la información y 3) El nivel de precisión de la información.

Existen otras variables indirectas que aún cuando no son las principales en la toma de decisiones si son significativas, como lo son: a) la disposición del programa y b) la asesoría especializada respecto a su uso.

Para el presente estudio, debido a que se deseaba evaluar el diseño arquitectónico de una vivienda, además de un sistema constructivo a base de los paneles modulares de

ferrocemento y materiales aislantes alternativos incorporados al sistema de paneles, marcó la pauta inicial en la selección del simulador ya que fue necesario tener un programa capaz de analizar propuestas de diseño bioclimático, flujos de energía a detalle, y condiciones de confort térmico interno, con un nivel de precisión considerable para el análisis de flujo por elementos constructivos.

Por otro lado, el análisis del comportamiento térmico de una vivienda, se puede realizar en estado estable o estado dinámico. El estado estable considera patrones de comportamiento de tipo puntual e incluye de manera aislada el efecto de la carga térmica por hora. El estado dinámico considera las ganancias y pérdidas por cargas térmicas acumuladas hora por hora.

Para realizar los cálculos de balance de energía es necesario conocer las características termofísicas de los materiales, de esta manera es posible analizar y proponer soluciones de comportamiento térmico adecuado al clima donde se construye.

La descripción del procesador del lenguaje del edificio (BDL) lee los datos de salida y el cálculo de las respuestas de los factores de la transición del flujo de calor en muros y factores de peso para la respuesta térmica de los espacios del edificio.

De acuerdo a Wilkelmann *et al.* (1993), DOE 2.1E predice el uso de la energía horaria y el costo de energía por hora de un edificio con un archivo meteorológico del lugar de estudio y la descripción del HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado por sus siglas en inglés) así como el periodo de uso. También se pueden determinar la selección de los parámetros de los edificios para mejorar la eficiencia energética y mantener el confort térmico y los costos reales. Otras de las herramientas de utilidad con que cuenta DOE 2.1E son los subprogramas de simulación: cargas, sistemas, plantas y económico.

En el caso de cálculos de cargas, sistemas y plantas son ejecutados en secuencia, los resultados de las salidas de las cargas, sirven de referencia para obtener los resultados de las salidas de los sistemas. Y en conjunto todas las salidas de los subprogramas determinan las condiciones de los resultados económicos. Cada subprograma de simulación produce reportes de los resultados de estos cálculos. El subprograma de cargas estima los flujos en

los componentes sensibles y latentes con base en el horario de las cargas de calentamiento o enfriamiento para cada espacio con temperatura constante toman en cuenta el archivo meteorológico y las características del edificio (Doe-plus, 1995).

El subprograma de sistemas estima el efecto de la ventilación (ventiladores, serpentines y ductos); esto corrige el cálculo de las cargas de temperatura constante por medio del subprograma de cargas toma en cuenta los requerimientos de aire exterior, operación del equipo por hora, estrategias de control del equipo y el punto de control del termostato.

El modelo de simulación que utiliza el DOE 2.1E, es el de cargas secuenciales, sistemas y cálculo de plantas. El simulador DOE 2.1E con su interfase DOE-Plus contiene una base de datos sobre información climatológica de diferentes ciudades de los Estados Unidos de América. Sin embargo, no considera ciudades de México, por lo que se requiere que esos datos sean anexados al archivo de climas del programa.

La simulación térmica tiene como objetivo principal caracterizar el comportamiento del edificio tomando como base tres aspectos (Heard, 1999):

1. Estimación del equipo de refrigeración, para evitar errores por cálculo, con esto se reducen las inversiones en cuanto a la capacidad del equipo sin afectar el confort térmico.
2. Estimación del consumo de energía por climatización artificial; con esto se puede estimar el impacto de medidas de ahorro de energía y facilita el análisis costo-beneficio.
3. Identificación de los flujos de energía en el edificio. Para diseñar un edificio, el conocer el flujo de la energía es un punto básico, ya que desde la forma arquitectónica hasta el material a utilizar en la envolvente pueden ser evaluados.

# Capítulo 3. Metodología

---

La metodología de trabajo estuvo conformada por tres etapas generales, que se muestran en la figura 9. En la primera etapa se realizaron las actividades correspondientes al diseño bioclimático, conforme al método propuesto por Morillón (2000) que considera el análisis del sitio y la preferencia térmica de los usuarios para obtener las estrategias bioclimáticas y realizar el anteproyecto Arquitectónico. Posteriormente se realizó la evaluación de asoleamiento y de los criterios de vientos. Se hizo la simulación térmica por diseño bioclimático y se realizaron las correcciones correspondientes para llegar al proyecto arquitectónico.

En la segunda etapa, se hizo un estudio de los materiales aislantes alternativos y trató los criterios de selección de materiales locales a evaluar y su caracterización, además de las actividades necesarias para la estimación de las propiedades termofísicas de los materiales seleccionados (datos que se requirieron para la simulación térmica) y la comparación con otros materiales aislantes.

La tercera etapa correspondió a la evaluación térmica con el programa DOE 2.1E®, por medio del cual se realizó un estudio comparativo por: sistemas constructivos, aplicación de los materiales alternativos propuestos, materiales aislantes y diseño bioclimático con respecto a un caso de referencia.

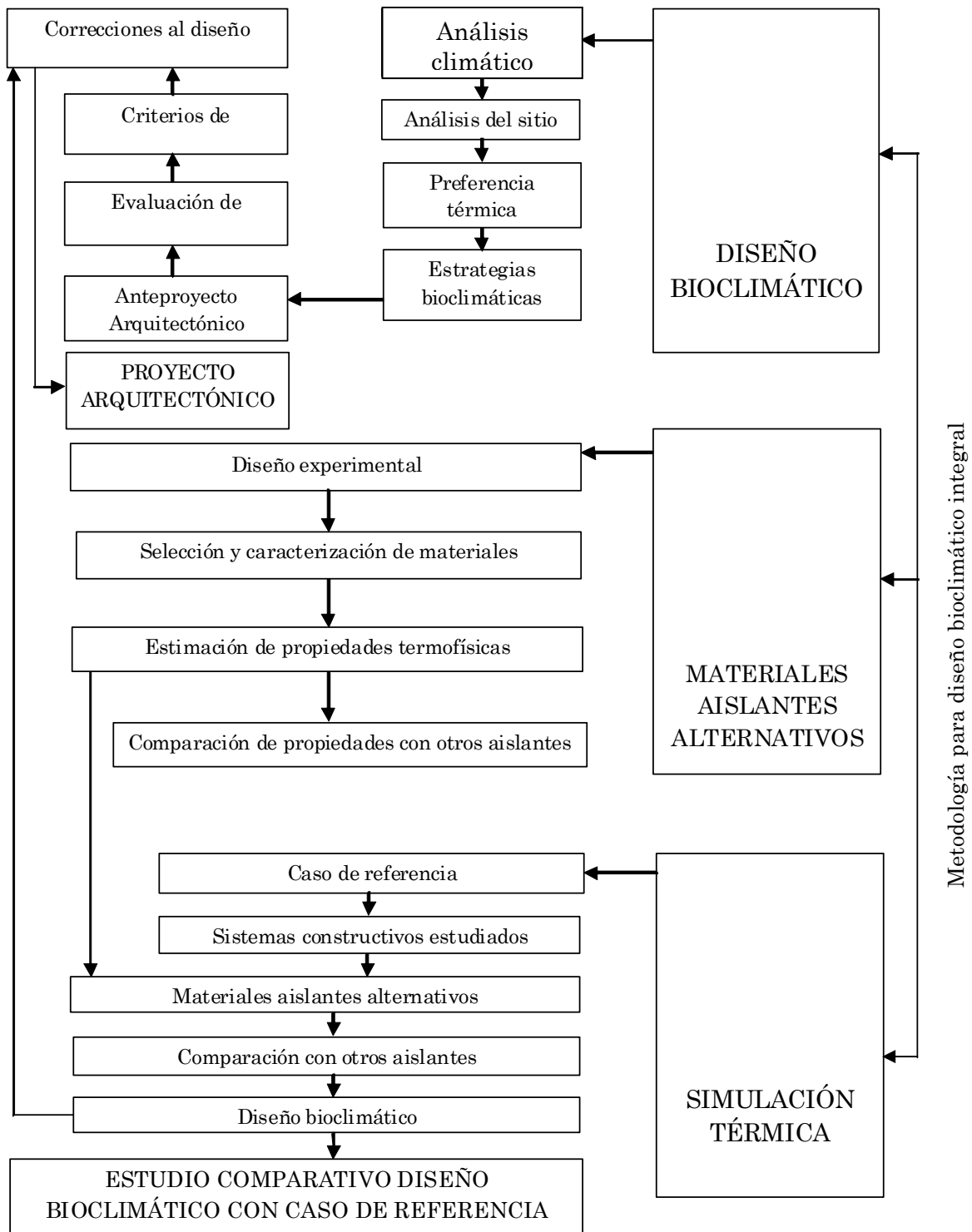


Figura 9. Esquema general de la metodología.



## 3.1 Diseño bioclimático

Este apartado se conforma de cuatro subtemas que integran los aspectos necesarios para realizar un diseño bioclimático, los cuales son los siguientes: el clima, el sitio, las estrategias de adecuación y el diseño arquitectónico.

### 3.1.1 Descripción climática

En el presente trabajo se estudiaron los datos del año típico de la ciudad de Oaxaca, Oaxaca. Estos datos fueron tomados del archivo meteorológico del programa Meteonorm 4®, que es una base de información y puede estimar datos climatológicos. El método de estimación se basa en una combinación de una base de datos y algoritmos según un esquema predeterminado. El usuario especifica una localización particular para la cual se requieran datos meteorológicos, y el programa entrega los datos en una estructura deseada y formato requerido tales como: TMY2, TRNSYS o DOE, entre otros (Remund *et al.*, 1999).

Aunque el programa se basa en datos medidos, los archivos meteorológicos generados tienen inconsistencias según sean elegidos para el cálculo el modelo mensual u horario. El modelo mensual sobrestima la radiación total en superficies inclinadas en 3% por mes y -2% para el promedio anual. El modelo horario (el cual se usó en este caso) subestima la radiación total en superficies inclinadas en 3% por mes en verano y +10% en invierno. Sin embargo, la radiación total en invierno es menor lo que repercute en un efecto en el promedio anual del orden del 2%.

Es importante mencionar que los datos utilizados para este estudio son de la estación meteorológica de Oaxaca que se encuentra a una altitud de 1558 msnm, longitud de 96° 41', 16°54' y uso horario de 6 horas con respecto al meridiano de Greenwich. Lo anterior debido a que esta estación cuenta con equipo acreditado por la Organización Meteorológica Mundial (WMO), se encuentra en la zona climática 503 y está incluida en el programa Meteonorm 4®. Para obtener los valores máximos y mínimos promedios de temperatura del aire, humedad relativa y radiación solar se usó una hoja de cálculo diseñada por Luna (2004).

### 3.1.2 Análisis del sitio y confort térmico

La clasificación climática se realizó de acuerdo al estudio de *Köppen* adaptado por García (1981), para la cual se utilizaron los datos de temperatura media y precipitación. Estos datos fueron tomados de las normales climatológicas, debido a que considera un periodo de 30 años que corresponden de 1960 a 1990.

El análisis de radiación solar se realizó con los datos de radiación global horizontal y radiación difusa, estos datos son valores horarios medidos por la estación meteorológica registrada en el programa *Meteonorm 4®*. Posteriormente los datos se procesaron en una hoja de cálculo de radiación diseñada por Luna (2006), para obtener los valores máximos y mínimos así como conocer el comportamiento a lo largo del año.

El análisis de viento se realizó de acuerdo a la velocidad y dirección del viento, así como la frecuencia y elementos de fenómenos especiales.

El análisis de temperatura del aire y humedad relativa consistió en tabular los parámetros de temperaturas promedio máximas y mínimas así como el promedio mensual, el promedio máximo y el promedio mínimo de la humedad relativa. Con esta información se determinó la zona de confort térmico para la Ciudad de Oaxaca. Para tal fin se utilizó el modelo de Auliciems (1981) para determinar la temperatura neutra.

$$T_n = 17.6 + 0.31T_m \quad [5]$$

donde:

$T_n$  = Temperatura neutra (°C)

$T_m$  = Temperatura media mensual (°C)

La zona de confort térmico ( $Z_{ct}$ ) se determinó de acuerdo a la ecuación (6),

$$Z_{ct} = T_n \pm 2.5^\circ C \quad [6]$$

Posteriormente, se elaboró la carta estereográfica con la utilización del programa Solar Tools (2006) para los meses críticos que son diciembre en invierno y agosto en verano. Se realizó esta gráfica con la finalidad de conocer el ángulo de inclinación horaria mensual y de esta forma definir la mejor orientación y ubicación de cada uno de los espacios en función de sus requerimientos térmicos.

### 3.1.3 Estrategias bioclimáticas

El proceso para establecer las estrategias de tipo bioclimático que se integraron al diseño arquitectónico se presentan en la figura 10. En un principio se trabajó con un modelo de confort térmico a partir del cual se establecieron los límites máximos y mínimos de confort para los usuarios, posteriormente con base en el análisis del clima se delimitó la zona de confort. A partir de los datos climáticos y la zona de confort térmico se definió en una carta psicométrica bajo qué condiciones se consideraba un espacio en confort. Las estrategias de adecuación fueron de tipo pasivas y son: masa térmica, ventilación, enfriamiento evaporativo directo e indirecto y calentamiento solar pasivo. El método de cálculo y delimitación de cada una de ellas se presenta a detalle más adelante.

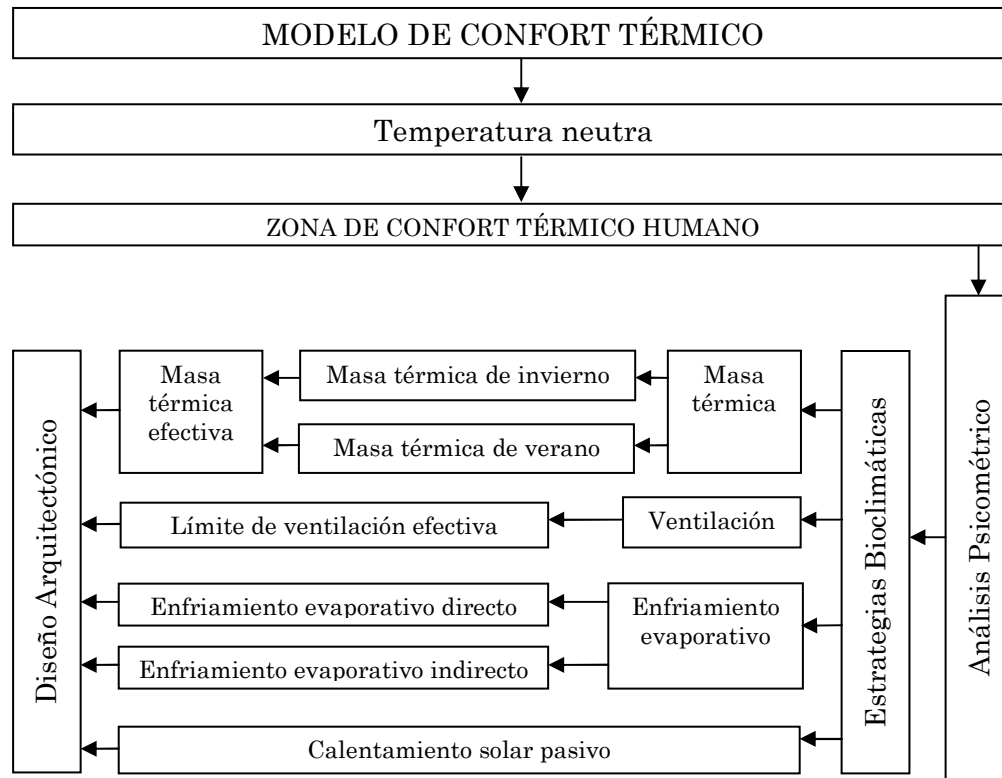


Figura 10. Diagrama de flujo del desarrollo de estrategias de adecuación bioclimática.

Para la obtención de las estrategias bioclimáticas se utilizó una hoja de cálculo en excel desarrollada por Luna (2005). Esta hoja está basada en el método propuesto por Docherty y Szokolay (1999). Con la aplicación de este método se consigue obtener criterios para la comprensión y la aplicación de los resultados aplicados en el diseño arquitectónico.

Las estrategias bioclimáticas están basadas de acuerdo al criterio de Docherty y Szokolay (1999). Se utilizó una hoja de cálculo de Luna (2005) en la que fue necesario ubicar los valores correspondientes a la de humedad absoluta en gr/kg a partir de los datos de la temperatura neutra generados con la ecuación 4, hasta interceptar con la curva de 50% de la humedad relativa (HR).

Introducidos estos valores en la hoja de cálculo, en cada una de las zonas: zona de confort térmico, masa térmica, ventilación, enfriamiento evaporativo y calentamiento pasivo, se procedió a dibujar sobre la carta psicrométrica, las zonas que delimitaban las estrategias bioclimáticas que a su vez generaron las recomendaciones de diseño bioclimático.

El primero en definir una zona de confort térmico con fines arquitectónicos a partir de una gráfica de temperaturas y humedades relativas fue Olgay (1963), sin embargo, en el presente trabajo se muestra la zona de confort térmico ajustada por Szokolay (1999). Se graficaron las líneas de temperatura y humedad relativa máximas y mínimas de cada mes en la carta psicrométrica y se establecieron los límites de funcionamiento de las estrategias bioclimáticas de diseño.

Para dibujar la zona de confort térmico de invierno y verano, se traza una línea de la temperatura neutra de acuerdo a la ecuación 4 correspondiente a cada periodo, hasta interceptar con la curva de 50% de humedad relativa, posteriormente se localiza el punto de temperatura efectiva y se une con el punto de la intersección anterior. Esta línea se proyecta hasta la línea de 12 gr/kg, y se corta en la línea de 4 gr/kg (ver figura 11).

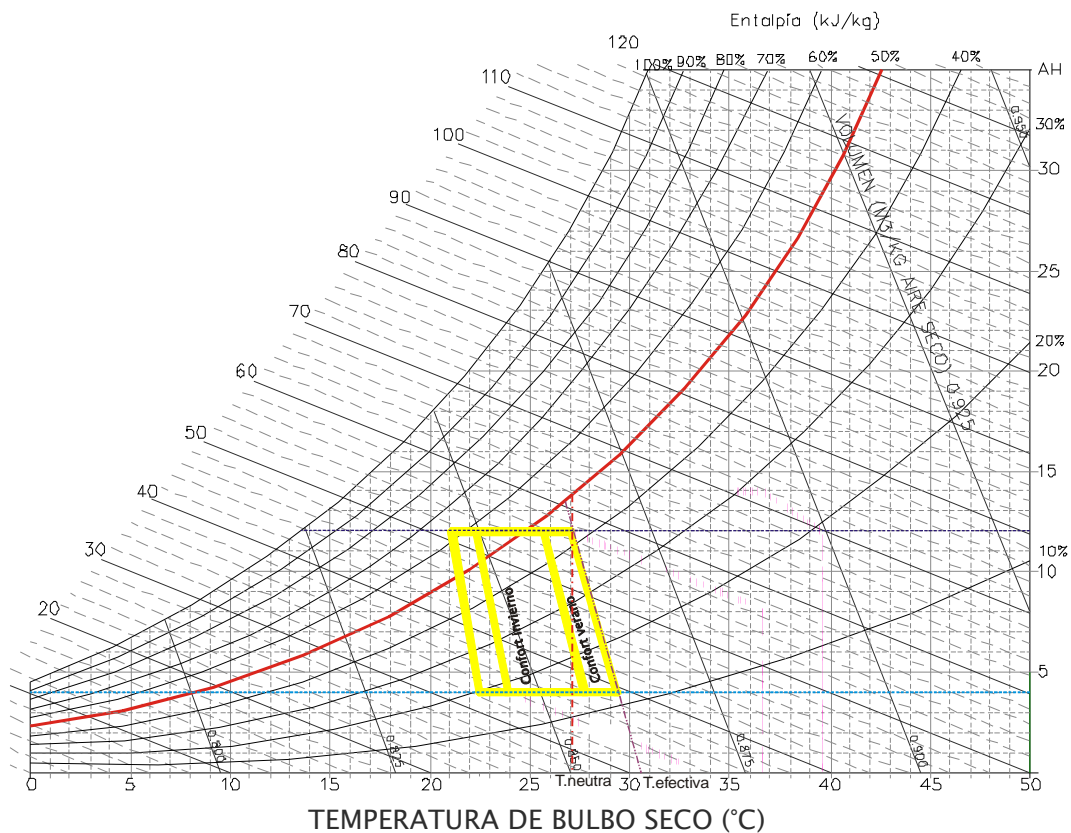


Figura 11. Pasos para graficar la zona de confort térmico.

La zona de masa térmica se dibujó con el valor correspondiente a cada temporada: invierno y verano. La temporada de verano se calculó de acuerdo a la ecuación 7:

$$MTv = Tn + 2 + (0.25 * dT) \quad [7]$$

donde:

$MTv$  = Masa térmica de verano

$Tn$  = Temperatura neutra

$dT$  = Diferencia de temperatura entre máximas y mínima mensual.

La temporada de invierno se calculó de acuerdo a la ecuación 8:

$$MTi = Tn - 2 + (0.4 * dT) \quad [8]$$

donde:

$MTi$  = Masa térmica de invierno

$Tn$  = Temperatura neutra

$dT$  = Diferencia de temperatura entre máxima y mínima

El límite de masa térmica con ventilación nocturna se calculó de acuerdo a la ecuación 9.

$$MTn = Tn + 2 + (0.45 * dT) \quad [9]$$

donde:

$MTn$  = Masa térmica con ventilación nocturna

$Tn$  = Temperatura neutra

$dT$  = Diferencias de temperaturas entre máximas y mínimas

Posteriormente se localiza el punto de masa efectiva de acuerdo a la ecuación 10 para los tres casos anteriores.

$$MTe = 0.023 (MT-14) (HA) \quad [10]$$

donde:

$Mte$  = Masa térmica efectiva

$MT$  = Masa térmica correspondiente al periodo que se evalúa,  $MTv$  para verano y  $MTi$  para invierno

$HA$  = Humedad absoluta en la línea de la intersección con 50% de humedad relativa

Se traza una línea de la intersección con el valor de  $MTv$  en la curva de los 50% de humedad relativa (HR), con el valor de  $MTe$  y se proyecta hasta la línea de 14 gr/kg de humedad absoluta (HA) y se corta en la línea de 4 gr/kg. De manera similar se dibuja la zona de masa térmica para invierno con el uso de los valores de  $MTi$  y los valores de masa térmica con ventilación nocturna y los valores de  $MTn$ . Finalmente se une donde inicia la zona de confort térmico de invierno y se sigue la trayectoria de la curva de humedad relativa más cercana (ver figura 12).

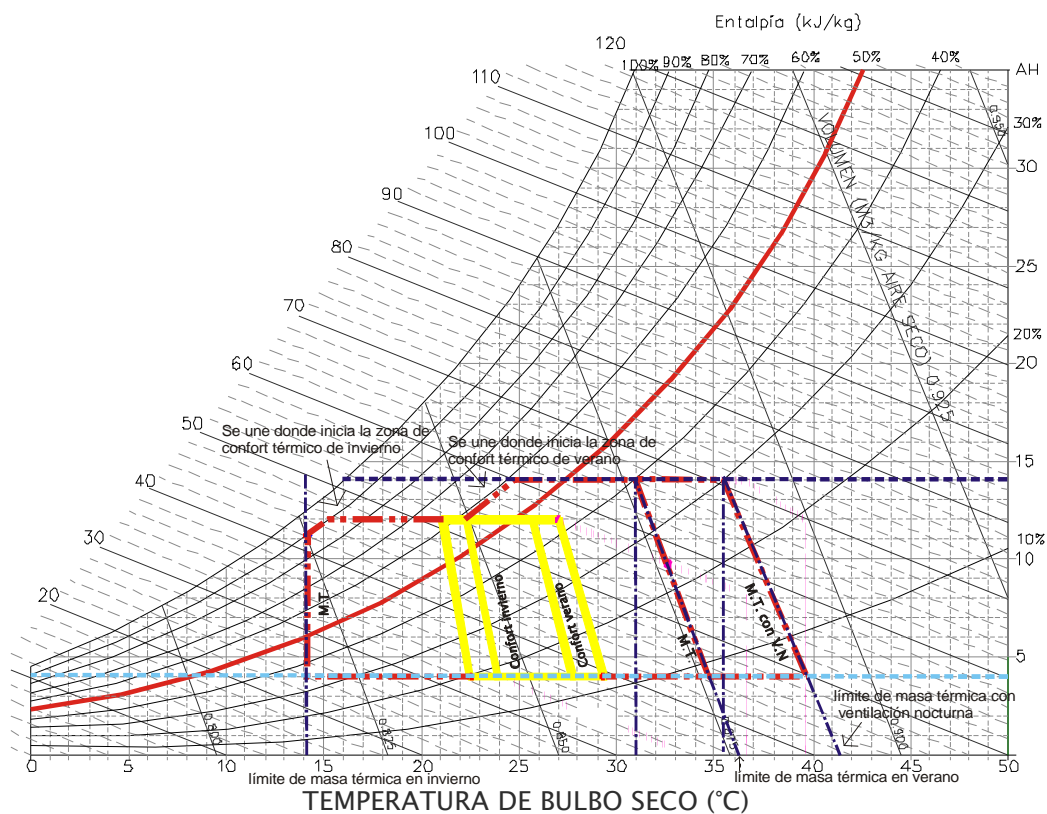


Figura 12. Pasos para graficar la zona de masa térmica.

La zona de ventilación se dibujó de acuerdo a la ecuación 11.

$$V = Tn + (6 * (ch - 0.2) - (ch - 0.2) * 2) \quad [11]$$

donde:

$V$  = Ventilación

$Tn$  = Temperatura neutral

$ch$  = Cambios de aire por hora

Posteriormente se calcula el punto de ventilación efectiva de acuerdo a la ecuación 12.

$$Ve = V + 0.023(V - 14) * HA \quad [12]$$

Se traza una línea de la intersección con el valor de  $V$  con la curva de 50% de humedad relativa, con el punto de  $Ve$  y se prolonga paralelo a las líneas de volumen de aire seco hasta la curva de 80% de humedad relativa (ver figura 13).

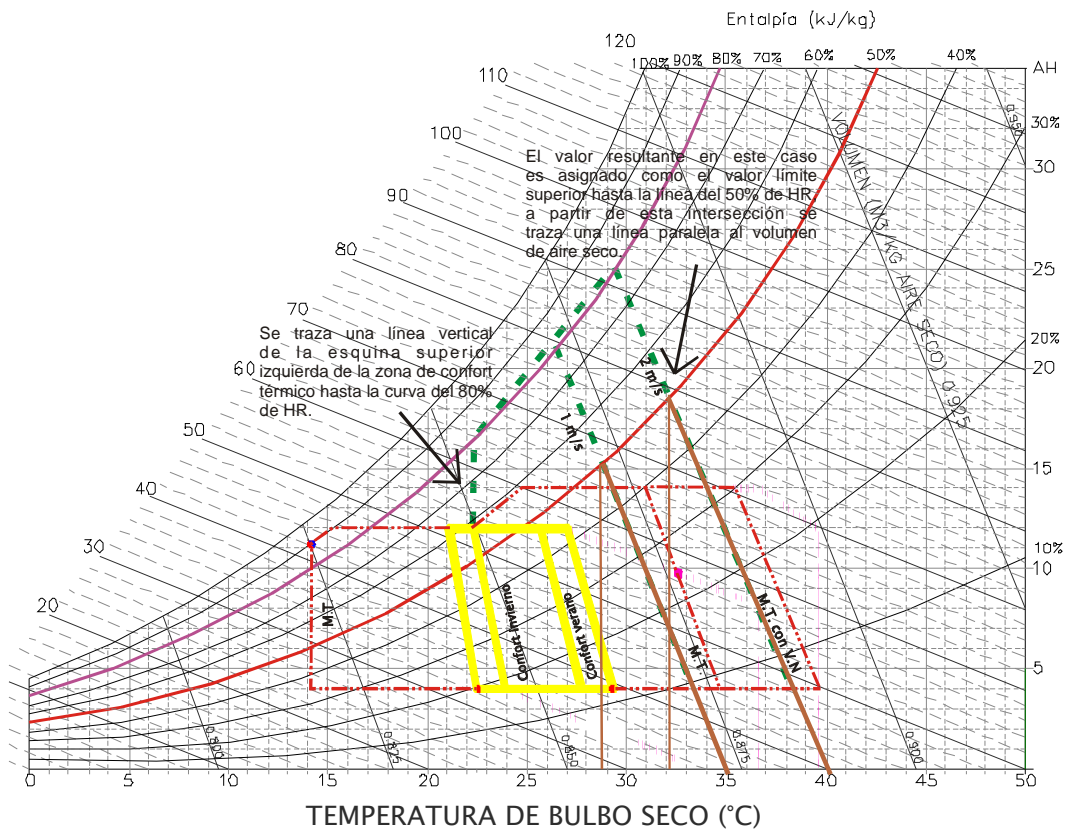


Figura 13. Pasos para graficar la zona de ventilación.



La zona de enfriamiento evaporativo directo se dibuja de acuerdo a la ecuación 13.

$$EE = Tn + C \quad [13]$$

donde:

$EE$  = Enfriamiento evaporativo

$Tn$  = Temperatura neutra

$C$  = Constante, (+12) para el enfriamiento evaporativo directo y (+15) para el enfriamiento evaporativo indirecto (Docherty y Szocolay, 1999).

Para la zona de enfriamiento evaporativo directo, se traza una línea hasta la intersección con la línea paralela de la esquina superior derecha de la zona de confort térmico de verano con la línea de la temperatura de bulbo húmedo. Esta zona se cierra con una línea que se traza de la esquina inferior derecha de la zona de confort térmico de verano hasta intersectar con la línea de las coordenadas en X.

La zona de enfriamiento evaporativo indirecto se dibuja con una línea del valor de enfriamiento evaporativo indirecto hasta unirse con la línea de 12 gr/kg y se traza una diagonal de este punto de intersección al punto donde intercepta el valor de enfriamiento evaporativo directo con la línea de 14 gr/kg (ver figura 14).

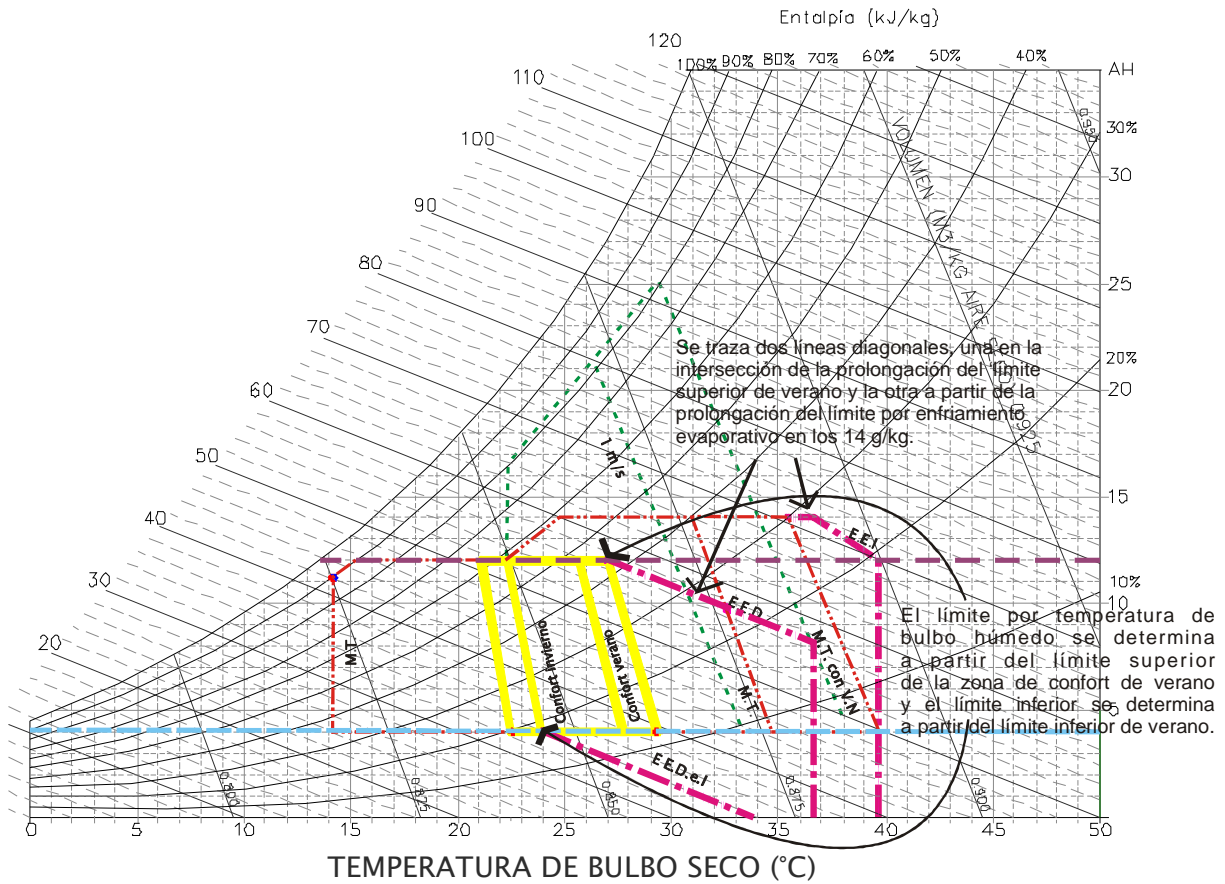


Figura 14. Pasos para graficar la zona de enfriamiento evaporativo.

El calentamiento solar pasivo se dibuja de acuerdo a la ecuación 14.

$$Sp = Tn - 2(0.0036 * 3315) \quad [14]$$

donde:

$Sp$  = Calentamiento solar pasivo

$Tn$  = Temperatura neutra

Se traza una línea con el valor de  $Sp$  hasta interceptar con la curva de 90% de humedad relativa y se cierra con una línea que se traza en la esquina inferior de la zona de confort térmico de invierno (ver figura 15).

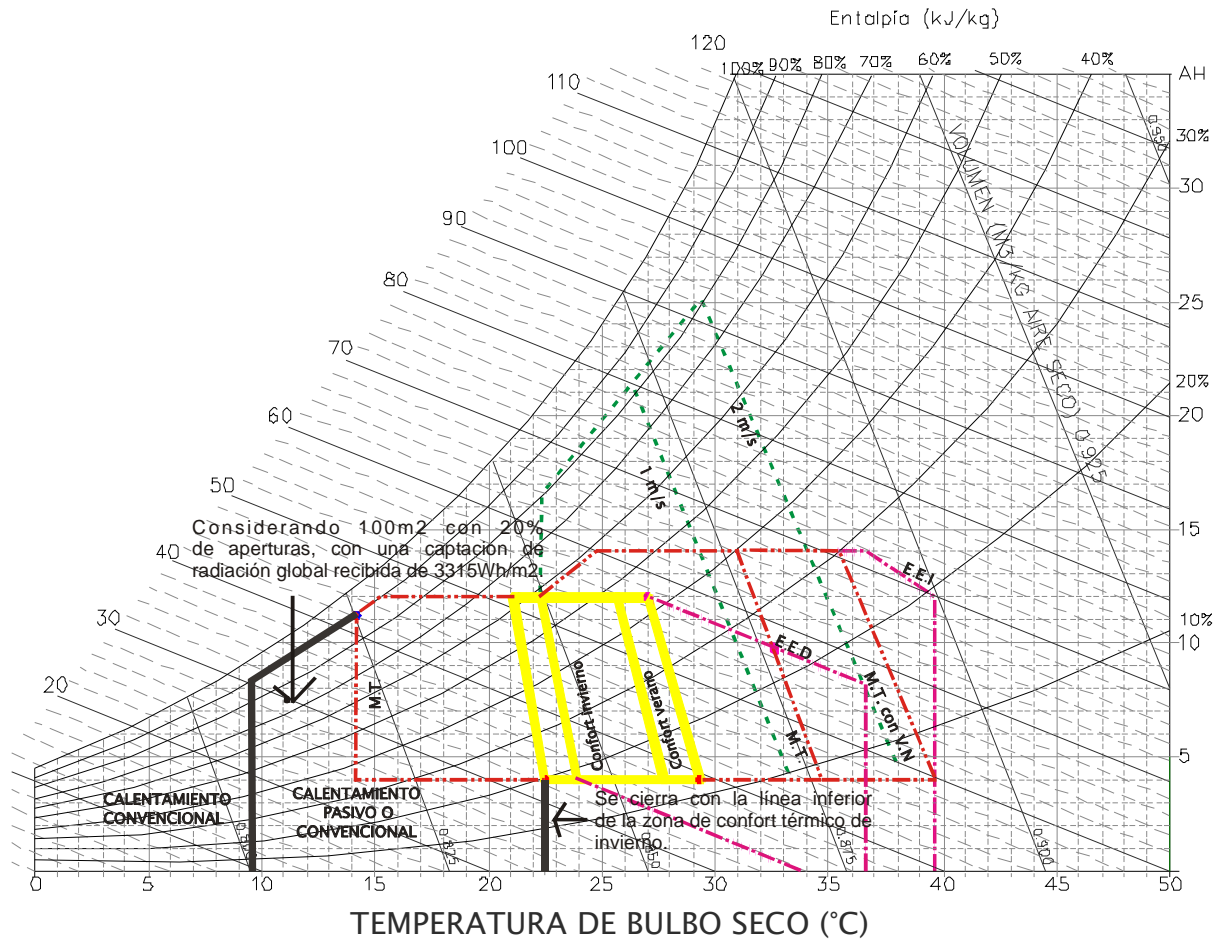


Figura 15. Pasos para graficar la zona de calentamiento solar.

### 3.1.4 Diseño arquitectónico

Se realizó el diseño arquitectónico con la consideración de criterios bioclimáticos de una vivienda de construcción en serie para un nivel económico tipo medio, debido a que la demanda en este rubro para la zona metropolitana de la ciudad de Oaxaca es de 45.97% y sus consumos energéticos son más altos, sin tomar en cuenta la demanda de vivienda de hogares con ingresos menores a 2 veces en salario mínimo ya que éstos son atendidos a través de apoyos gubernamentales (Hipotecaria Nacional, 2006).

Se utilizaron paneles modulares de ferrocemento, para muros y cubiertas, con uniones atornilladas de acuerdo al sistema constructivo propuesto por López (2005). La propuesta de vivienda se diseñó con base en las estrategias obtenidas en la etapa de análisis climático.

La vivienda constaba de dos plantas con 3 recamaras, baño, sala, comedor, cocina, patio de servicio y medio baño; en un terreno de 10 x 7 m, con 95 m<sup>2</sup> de construcción y 250.36 m<sup>3</sup> de volumen. Para reducir las cargas térmicas conforme a las estrategias de diseño, la orientación de la vivienda fue norte-sur. Se trabajó solo con esta orientación ya que la intención era demostrar el ahorro máximo a obtener con la propuesta de diseño, y por las investigaciones de Olgyay se ha demostrado que de esta manera se reduce la carga por radiación solar en el hemisferio norte. Por otro lado la propuesta de tesis resuelve el diseño de un prototipo, y por limitaciones de tiempo, no pretende resolver todo un conjunto habitacional completo, que implica otras consideraciones.

Al prototipo diseñado se le hizo un estudio de proyección de sombras con el uso del programa SketchUp 5.0 y el análisis de circulación del viento a través de los distintos espacios que conformaban la vivienda, de acuerdo a los criterios de circulación de vientos de Watson (1980).

## 3.2 Materiales aislantes alternativos

Para el estudio de los materiales locales con potencial aislante de tipo alternativo, se planteó en principio un diseño experimental, así como los criterios de selección y caracterización de materiales, además del proceso de estimación de propiedades térmicas.

### 3.2.1 Diseño experimental

El diseño experimental para el desarrollo de los materiales aislantes alternativos se basó los estudios sobre aislantes térmicos, concretos ligeros y el uso de agregados orgánicos. Además de métodos de evaluación y simulación térmica de materiales de construcción, así como normas y procedimientos especializados en las áreas mencionadas. Lo anterior se presenta en la figura 16.

Debido que los materiales aislantes alternativos formarían parte de un sistema constructivo de paneles de ferrocemento, fue necesario considerar como los materiales seleccionados se integrarían a este sistema, por lo que se consideró fueran parte de una mezcla con cemento.

En un principio se seleccionaron los agregados que servirían como aislante en la mezcla con cemento, los materiales seleccionados fueron vidrio volcánico y olote, éste último por ser un material de origen orgánico se le dió un tratamiento conocido como mineralización, para evitar que fuera dañado por organismos microbiológicos (Short, 1977).

Posteriormente se elaboraron especímenes con diferentes granulometrías de ambos materiales, y se estimaron sus propiedades térmicas, se seleccionó una mezcla de cada tipo con base en sus propiedades y granulometría. Finalmente se hizo un estudio comparativo de propiedades térmicas y comportamiento térmico en estado dinámico de un modelo de vivienda con criterios bioclimáticos en donde se aplicaban las mezclas con los aislantes alternativos.

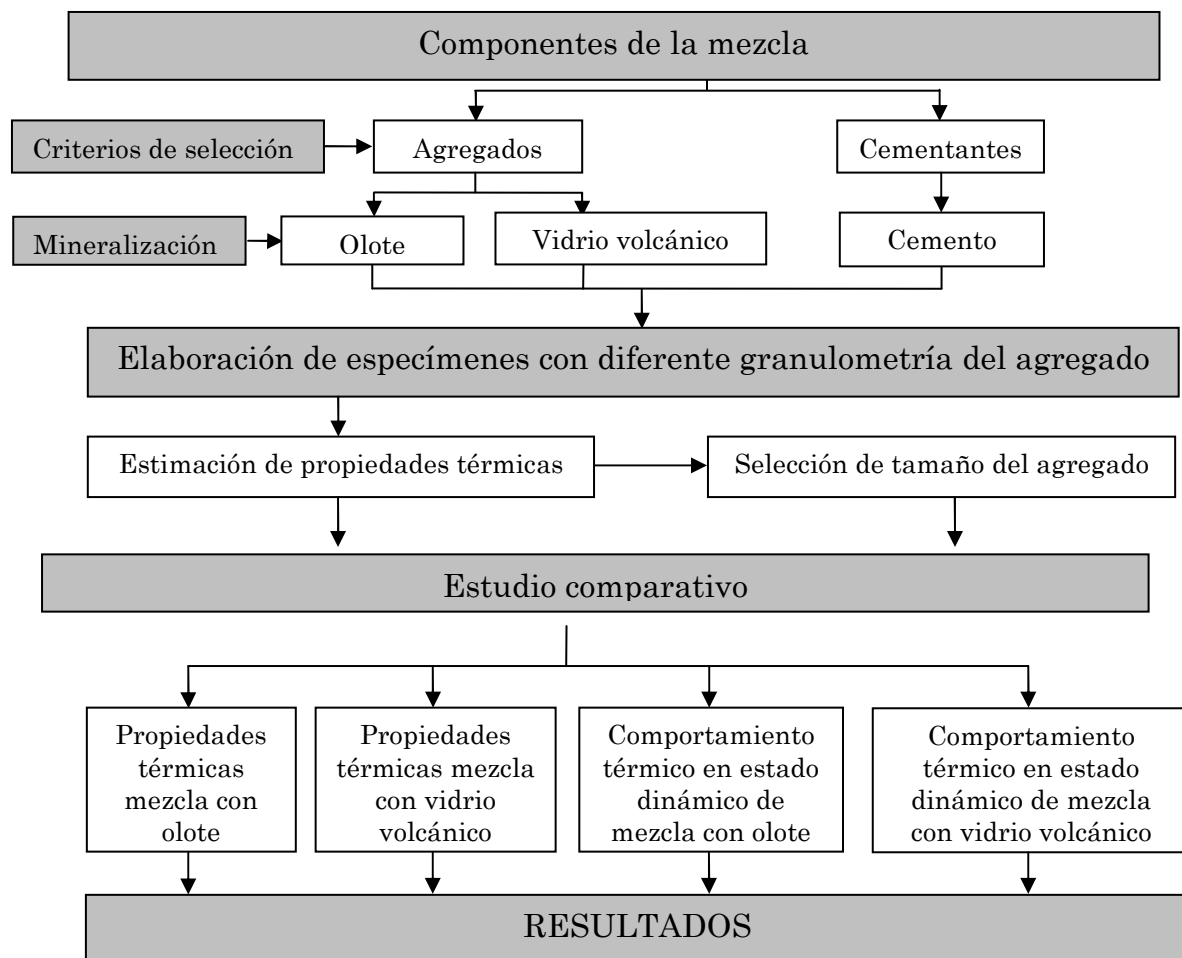


Figura 16. Metodología aplicada para el desarrollo y evaluación térmica de placas de aislantes a base: cemento-olote y cemento-vidrio volcánico.

### 3.2.2 Selección y caracterización de materiales

Los materiales locales, con potencial de aislamiento fueron seleccionados con base en los criterios siguientes:

- 1) Potencial térmico: Que el material tuviera un potencial térmico evaluado de forma cualitativa (peso, apariencia porosa, granulometría) para poder compararlo con materiales aislantes que existen actualmente en el mercado local.
- 2) Costo: Que el costo del material fuera menor a los materiales aislantes existentes en el mercado local.
- 3) Origen: Que fuera natural y que el proceso de industrialización fuera mínimo, para que la afectación al ambiente fuera menor.
- 4) Disponibilidad: Que este material estuviera disponible en la región.

Existe una cantidad considerable de materiales orgánicos y pétreos disponibles en el estado de Oaxaca, que podrían ser utilizados para la construcción de edificios, como son: carrizo, paja, olote, vidrio volcánico, fibra de coco, fibra de maguey, pergamino de café, cáscara de cacahuete, palma real, aserrín, etc.

Algunos de estos materiales han sido evaluados en otros estudios como es el caso de la fibra de coco y la palma real (Alavéz, 2005). La cáscara de cacahuete y el pergamino de café son materiales que se encuentran disponibles en la región, sin embargo, se requeriría de una cantidad considerable de ellos para utilizarlos como aislantes. Por lo que se eligieron de acuerdo a los criterios de selección de material, cuatro de ellos: olote, vidrio volcánico, paja y carrizo, pero para este trabajo se limitó el análisis a solo dos de ellos, el olote y vidrio volcánico, debido al tiempo que se requiere para hacer el estudio de las propiedades térmicas de cada uno de ellos.

Cabe mencionar que en el caso del olote por ser un material de origen orgánico tiene un efecto determinante sobre el fraguado y endurecimiento del concreto o mortero, y esto lo caracteriza como un agregado inestable porque hace variar sus propiedades, por lo que se utilizó un pretratamiento de mineralización para su estabilización.

Para la mineralización, se mezcló el olote con una solución de 10% por peso de la cal en agua, posteriormente se expuso al medio ambiente y se homogenizó el material durante 24 horas. Éste reaccionó con el bióxido de carbono y se estabilizó, es decir se volvió inerte a la reacción química con los microorganismos. Este efecto es similar al que sucede cuando la cal libre en un concreto mantiene la alcalinidad para evitar la corrosión en el acero de refuerzo.

### 3.2.3 Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas de un material influyen en el comportamiento de los flujos de energía a través de él, y determinan si se puede clasificar o no como aislante, además de si es posible utilizarlo para alguna estrategia de adecuación al clima, por lo que en este caso al desarrollar un material que puede ser utilizado como aislante fue necesario hacer estudios para conocer conductividad térmica, resistencia térmica, difusividad térmica y tiempo de retraso térmico.

#### 3.2.3.1 Equipo para estimación de propiedades térmicas

Para la estimación de la propiedad térmica de los especímenes se utilizó un equipo Dynatech R/D Co. Modelo Rapid K de placas calientes guardadas para medir la conductividad térmica. Este aparato fue facilitado por el Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Este dispositivo cumple con las especificaciones de la norma ASTM C 518-98 (ver figura 17). Las temperaturas de las placas tuvieron un mínimo de 20 °C y un máximo 60 °C de acuerdo a la norma ASTM C 1058-97.



*Figura 17. Equipo para estimar la conductividad térmica Dynatech R/D Co.*

### 3.2.3.2 Preparación de especímenes para pruebas térmicas

De acuerdo a la norma mexicana NMX-C-181-1984 sobre la industria de la construcción- materiales termoaislantes, dice que pueden usarse dos especímenes de cada muestra que sean idénticos en estructura, espesor y densidad, y éstos deben ser de un tamaño tal que cubran completamente las superficies de la placa fría y caliente.

Sin embargo, por la posible variación por contracción en la fabricación se realizaron tres especímenes de cada material por cada uno de los tamaños de los agregados estudiados (ver figura 18). Se analizaron cinco diferentes granulometrías: 1) Pasa por la malla #20 y se retiene en la malla #30, 2) Pasa por la malla #16 y se retiene en la malla #18, 3) Pasa por la malla #8 y se retiene en la malla #10, 4) Pasa por la malla de 3/8" y se retiene en la malla #4, 5) Pasa por la malla 1/2" y se retiene en la malla de 3/8".

La proporción en masa del olote con cemento fue 1:3:5 (olote, cemento, agua). La proporción en masa del vidrio volcánico con cemento fue 1:1:4 (vidrio volcánico, cemento, agua). Lo anterior debido a que en las pruebas piloto fueron los que presentaron mejor homogeneidad.





*Figura 18. Variación del tamaño del agregado.*

En la figura 19 se presenta el proceso de triturado para el caso del olote.



*Figura 19. Trituración del olote.*

Los especímenes se realizaron de acuerdo a las especificaciones de los equipos para medir la conductividad térmica, por lo que se elaboraron 30 especímenes en total (figura 20) y se caracterizaron en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).



*Figura 20. Especímenes elaborados.*

Los espesores del material multicompuesto de acuerdo al sistema constructivo propuesto por López (2005) es de 0.025 m de ferrocemento, 0.075 m de material orgánico o pétreo y 0.02 m de mortero.

El proceso de fabricación de los especímenes fue de acuerdo a la norma ASTM C 518. Las medidas de los especímenes fueron de 0.30x 0.30x 0.025 m. Se elaboraron moldes de madera con las respectivas dimensiones de los especímenes para utilizarlos como cimbra de colado.

Debido a que los especímenes se prepararon para las pruebas térmicas, no se les aplicó el curado en ambiente húmedo (CAH); en este caso se curó de acuerdo a la norma ASTM C 518 (curado para pruebas térmicas), con algunas modificaciones debido a que no se contaban con todas las condiciones técnicas requeridas, es decir los especímenes se envolvieron con sacos de ixtle húmedos porque no se contaba con el cuarto húmedo en condiciones de trabajo. Las placas estuvieron en un cuarto por no menos de 20 horas ni más de 48 horas posteriores al moldeo, por 7 días a  $23 \pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

A los 14 días las placas se secaron al horno a una temperatura de  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ , pesándose en una balanza digital, estas mediciones se realizaron cada 24 horas hasta que su peso fue constante y posteriormente se estimó la masa volumétrica de los especímenes (ver figura 21).



*Figura 21. Proceso de secado.*

Para medir la longitud en los especímenes se utilizó un Vernier analógico, se tomaron tres mediciones y se obtuvo un promedio en cada espécimen. La densidad del material seco y la densidad aparente se calcularon con los siguientes datos: masa del espécimen después de

secarse en el horno, masa en aire después de 24 horas de inmersión en agua, masa del espécimen pesado en agua después de 24 horas de inmersión (ver figura 22).



*Figura 22. Obtención del peso de la masa sumergida en agua.*

El cálculo de la absorción después de la inmersión de los especímenes en agua se realizó de acuerdo a la ecuación 15.

$$ADI = \left( \frac{B - A}{A} \right) 100 \quad [15]$$

donde:

$ADI$  = Absorción después de inmersión (%)

$A$  = Masa del espécimen secado al horno

$B$  = Masa del espécimen secado en aire después de 24 horas de inmersión

### 3.2.3.3 Estimación de propiedades térmicas

En principio, para la estimación de propiedades térmicas fue necesario establecer el estado estable térmico, que se consideró se lograba cuando ya no existían variaciones significativas en las temperaturas con respecto al tiempo. El tiempo requerido para alcanzar el estado permanente térmico varió de acuerdo a las características de la muestra.

Para la adquisición de datos de los especímenes, se conectaron 9 sensores tipo K en 0.075 m equidistantes. La conductividad térmica se estimó con la distribución de temperaturas en

estado estable, la potencia eléctrica suministrada, el área de la placa y su espesor, todo de acuerdo a la Ley de Fourier indicada en la ecuación 16.

$$\lambda = \frac{QL}{A * \Delta T} \quad [16]$$

donde:

$\lambda$  = Conductividad térmica (W/m°C)

$Q$  = Flujo de calor a través de la muestra (W)

$A$  = área de la sección transversal (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$  = Diferencia de temperatura a través de la muestra (°C)

$L$  = Espesor (m)

El calor específico se calculó de acuerdo a la ecuación 17, en la curva que corresponde al estado dinámico.

$$Cp = \frac{Q}{(m\Delta t)} \quad [17]$$

donde:

$Cp$  = Calor específico del material (J/kg °C)

$m$  = Masa del espécimen (kg)

$\Delta t$  = Diferencial de temperatura con respecto al tiempo (°C/s)

La difusividad térmica representa la velocidad lineal a la que ocurren los cambios de temperatura en una masa determinada, en función de su espesor. Para estimar la difusividad térmica se utilizó la ecuación 18.

$$\alpha = \frac{\lambda}{(\rho Cp)} \quad [18]$$

donde:

$\alpha$  = Difusividad térmica (m<sup>2</sup>/s)

$\lambda$  = Conductividad térmica (W/m°C)

$\rho$  = Densidad del espécimen (kg/m<sup>3</sup>)

$C_p$  = Calor específico (J/kg °C)

Para la estimación del tiempo de retraso térmico, se partió de la ecuación de difusión de calor en coordenadas rectangulares para una pared de acuerdo a la ecuación 19.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \alpha \left[ \frac{\partial^2 \theta}{\partial \chi^2} \right] \quad [19]$$

donde:

$\theta$  = Diferencia de temperatura con respecto al promedio (°C)

$\tau$  = Primer tiempo al que se presenta la temperatura promedio (s)

$\alpha$  = Difusividad térmica (m<sup>2</sup>/s)

$\chi$  = Espesor del material (m)

Dado que el tiempo de retraso térmico es la diferencia en el tiempo en que se obtiene la máxima amplitud en cada lado de una pared, se estimó el retraso térmico para un régimen senoidal con un periodo de 24 horas (ver figura 23), para la temperatura en la superficie exterior.

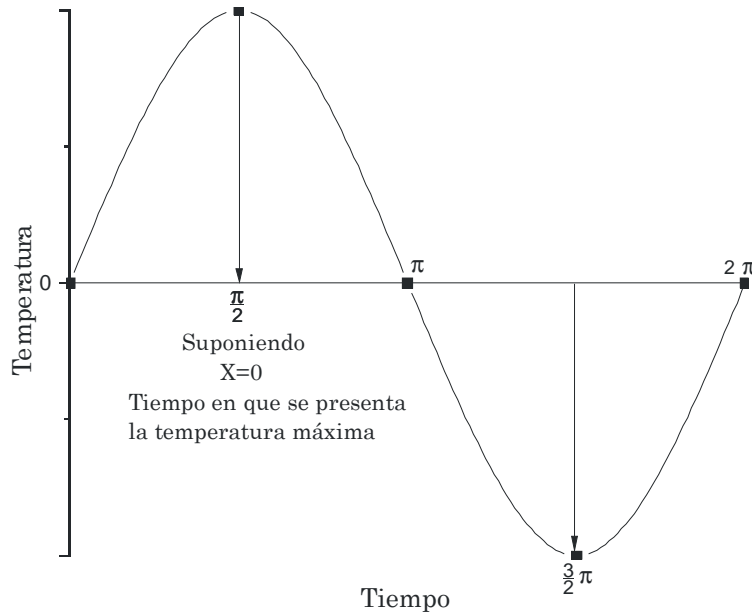


Figura 23. Amplitud de onda senoidal para un ciclo de 24 horas.

La solución de la ecuación 19 según Simonson (1975) es:

$$\theta = \theta m_o \left[ e \left( -\chi \left( \frac{\pi \omega}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right] \text{sen} \left[ 2\pi \omega \tau - \chi \left( \frac{\pi \omega}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad [20]$$

donde:

$\theta$  = Diferencial de temperatura con respecto al promedio (°C)

$\theta m_o$  = Máxima amplitud de onda senoidal en  $\chi = 0$

$\chi$  = Distancia o espesor de la pared (m)

$\omega$  = Frecuencia de la variación de la temperatura

$\alpha$  = Difusividad térmica (m<sup>2</sup>/s)

$\tau$  = Primer tiempo en la que se presenta la temperatura promedio (h)

Para obtener la diferencia de temperatura con respecto al promedio ( $\theta$ ), se consideró que la máxima amplitud de onda senoidal en  $\chi = 0(\theta_0)$ , y  $\chi = L(\theta_L)$ , es cuando:

$$\theta_{m_o} = \text{Sen} \left[ 2\pi\omega\tau - \chi \left( \frac{\pi\omega}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \right] = 1 \therefore 2\pi\omega\tau - \left[ \chi \left( \frac{\pi\omega}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \right] = \frac{\pi}{2} \quad [21]$$

De donde se obtuvo el tiempo para la máxima amplitud en  $\chi = 0, \tau = \tau_0 = \frac{1}{4\omega}$ . Donde  $\omega = \frac{1}{(24)(3600)}$  y  $\chi = L, \tau = \tau_L$ , con la ecuación 22.

$$\Delta\tau = 82.918L \left( \frac{1}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [22]$$

Al conocer el espesor para el cual se calculó, en este caso de 0.075 m y la difusividad térmica del material en estudio se obtuvo el valor del tiempo de retraso térmico.

El amortiguamiento térmico, es la relación entre el valor de la amplitud máxima en la superficie interior ( $\chi = L$ ) respecto a la amplitud máxima en la superficie exterior ( $\chi = 0$ ). Dado que el espesor del material, la difusividad térmica y la frecuencia de la variación de la temperatura eran conocidas, se estimó el valor de amortiguamiento térmico con la ecuación 23.

$$\varphi = e^{-L \left( \frac{\pi\omega}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad [23]$$

donde:

$\varphi$  = Amortiguamiento térmico

$L$  = Espesor del material (m)

$\omega$  = Frecuencia de la variación de la temperatura

$\alpha$  = Difusividad térmica

Para la estimación del retardo y amortiguamiento térmico se utilizó la hoja de cálculo Dinamic (Gallegos,1999).

La resistencia representa la capacidad de un material para evitar el flujo de calor a través del mismo, ésta se estimó a partir de la ecuación 24.

$$R = \frac{L}{\lambda} \quad [24]$$

donde:

R= Resistencia térmica (m<sup>2</sup> °C/W)

L= Espesor del material (m)

λ = Conductividad térmica (W/m°C)

### 3.3 Simulación térmica

La selección del uso del programa DOE 2.1E para la simulación térmica en estado dinámico, se debió a: a) Es una herramienta útil para cumplir con objetivo principal de la presente investigación; b) Fue diseñado para evaluación del edificio en su interacción dinámica con su entorno y fenómenos energéticos internos. Además que su nivel de precisión en estudios comparativos supera a otros simuladores (Sullivan, 1998), y c) influyeron las variables indirectas mencionadas ya que se requería tener acceso al programa seleccionado y a la asesoría especializada.

Se realizó la simulación térmica de la vivienda con criterios de diseño bioclimático con paneles modulares de ferrocemento fabricados con las mezclas en estudio; y se analizaron la energía a retirar y enfriamiento máximo requerido, temperatura interior, condiciones de confort térmico y efectos de la carga térmica.

Los parámetros analizados en la simulación se describen con más detalle a continuación:

- 1) Energía a retirar, la cual representa la cantidad de energía (kW) a retirar para alcanzar la temperatura de diseño en el interior.



- 2) Enfriamiento máximo requerido; que se determinó con base en el calor sensible (kW) a remover del espacio por enfriamiento; y que establece el máximo requerimiento en toneladas nominales de refrigeración.
- 3) Retardo térmico de los materiales; que indicó la capacidad de sus componentes (piso, muro, techo) en kW.

Se realizó un estudio comparativo para conocer el comportamiento del material desarrollado con respecto a otros sistemas constructivos comunes, tales como: bloques de concreto, ferrocemento y ladrillo rojo. También se realizó una comparación con otros materiales aislantes que presenta la literatura con su aplicación en el sistema constructivo de paneles modulares de ferrocemento, los materiales analizados fueron: cartón de yeso, lodo de papel, poliestireno expandido, poliuretano expandido, fibra de vidrio y fibra de coco con cemento.

La comparación se realizó con respecto a los parámetros siguientes: carga térmica total, ganancia por conducción por componentes (muros, cubierta, ventanas, puertas), energía a retirar o suministrar en el periodo, potencia de enfriamiento y calentamiento máximo requerido, retraso térmico y temperatura interior y condiciones de confort térmico.

### 3.3.1 Validación de la simulación

Según Eppel y Lomas (1995), la validación de un programa de simulación térmica para edificios contribuye a su credibilidad y confianza en su uso. Una de las técnicas utilizadas con este propósito es la llamada validación empírica, sobre la cual Lomas (1991a, 1991b) ha publicado varios trabajos.

La validación empírica consiste en medir *in situ* variables como temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar y velocidad de viento, posteriormente se introduce al programa a evaluar la información del edificio y se hace una simulación lo más similar a la realidad.

Posteriormente se comparan los resultados medidos con los simulados. Es importante mencionar la necesidad de un estudio de sensibilidad del equipo de medición a utilizar y considerar también posibles variaciones de los datos medidos con los simulados debido a errores implícitos en los métodos de cálculo del programa utilizado.

Con el objetivo de corroborar que los resultados de la simulación eran validos para la ciudad de Oaxaca, se realizó un estudio comparativo para el cual se tomo como caso de estudio un prototipo de vivienda económica de 30 m<sup>2</sup>, ubicada en el CIIDIR-IPN unidad Oaxaca (ver figura 24).

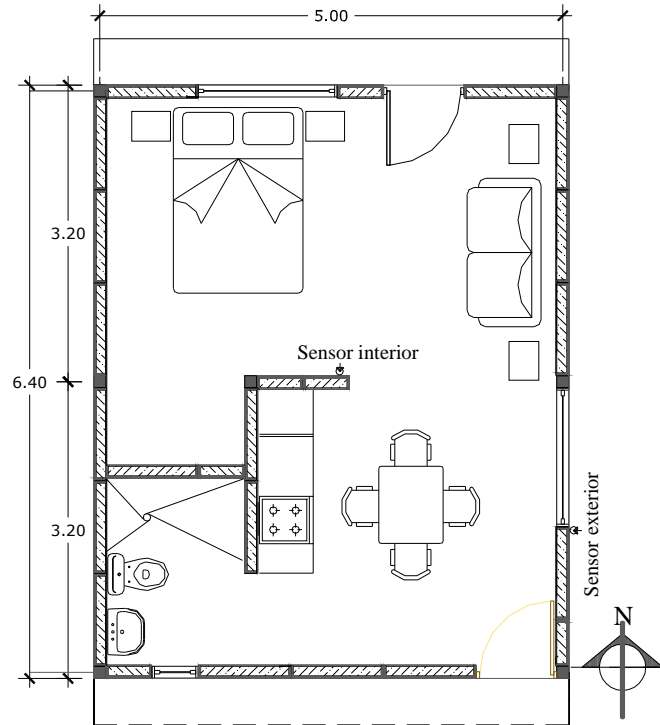


*Figura 24. Prototipo de vivienda económica de paneles modulares de ferrocemento.*

Los materiales del prototipo fueron: muros de paneles modulares de ferrocemento y cartón de yeso con pintura en color azul, en la cara interior, con mortero cemento-arena 1:3, pintado de blanco en el exterior. La cubierta era de estructura metálica y triplay de 13 mm de espesor y una placa de mortero de 25 mm proporción 1:3, con el interior a base de cartón de yeso pintado de color blanco y el acabado exterior de cartón arenado en color rojo. El piso era de concreto de 0.07 m de espesor, armado con malla electrosoldada de 0.10 x 0.10 m. Las ventanas eran a base de marco metálico en color negro y vidrio sencillo claro de 4 mm de espesor; y puertas metálicas en color negro con vidrio sencillo claro de 4 mm de espesor.

Se instalaron dos sensores tipo HOBO U12-006 para temperatura y humedad relativa, con un rango límite de -20 °C a 70 °C y una precisión de  $\pm 0.35$  °C. El sensor interior registraba datos de temperatura y humedad relativa, y su ubicación fue en el centro geométrico de la

vivienda sobre un muro interior a una altura de 1.80 m del nivel de piso terminado, como se presenta en la figura 25.



*Figura 25. Ubicación de los sensores interior y exterior en la planta arquitectónica del prototipo analizado.*

El sensor exterior se ubicó en el lado oeste, sin sombra, a 2.21 m de distancia del muro y a una altura de 1.20 m del nivel de terreno natural. El contexto exterior es de acabado natural del terreno que se conforma de tierra y pasto.

Los registros para ambos sensores fueron en intervalos de 1 minuto, y se obtuvieron promedios horarios, posteriormente se obtuvo el promedio diario, lo anterior se hizo debido a que el simulador genera sus resultados por hora; posteriormente se obtuvo el promedio diario para el estudio comparativo. El periodo de datos registrados fue del 6 al 31 de agosto del 2007.

Para la simulación se introdujeron los datos específicos del caso de estudio con las propiedades correspondientes de los materiales con que está construida, y se consideró una

vivienda desocupada. El archivo meteorológico es de tipo TMY (Typical Meteorological Year), tomado de la base de datos del programa Meteonorm 4®, cuya estación meteorológica es la del Aeropuerto de la ciudad de Oaxaca, y cuyo equipo cumple con las normas de la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, WMO). El periodo de simulación fue el mismo que el de datos registrados, del 6 al 31 de agosto.

El método de comparación fue con base en el promedio mensual del diferencial del promedio diario de temperatura ambiente exterior e interior registrado en los sensores y el promedio diario de la temperatura ambiente exterior e interior generados por la simulación con el programa de cómputo. En este análisis se consideró el margen de error del sensor utilizado.

### 3.3.2 Estrategia de simulación

Se realizaron simulaciones estado dinámico con el uso del programa DOE 2.1E® de la vivienda bioclimática y de la vivienda del caso de estudio, con y sin las cargas internas generadas por los equipos, iluminación y usuarios, así como simulaciones de un día tipo en invierno y verano. El análisis de los sistemas constructivos se realizó con un solo diseño de vivienda y se le cambiaron los materiales para ser simulados, estos sistemas constructivos analizados se presentan en la figura 26; sin embargo, se analizan los materiales como sistemas constructivos en muros y cubiertas, no los diseños que presentan las imágenes.



*Figura. 26 Sistemas constructivos analizados (1-Muros de bloque de concreto y cubierta de casetón de polietileno, 2- muros y cubierta de ferrocemento in situ, 3- muros y cubierta de paneles modulares de ferrocemento, 4-muros de ladrillo y cubierta de concreto armado).*

Para la simulación se requirió del archivo meteorológico correspondiente a la ciudad de Oaxaca, el cual se obtuvo por medio del programa Meteonorm® 4. El periodo de análisis para la simulación fue durante los doce meses del año.

Debido a la detallada información que requiere el programa se realizó una lista de las consideraciones para la simulación térmica, las cuales son las siguientes:

1. Se consideró que habitan en la vivienda 4 personas, debido a que este es el promedio de personas que habitan en una vivienda en la ciudad de Oaxaca (INEGI, 2005).
2. Se dividió la vivienda en dos zonas para la simulación: planta baja y planta alta.
3. Se elaboró un calendario de ocupación y actividades de los usuarios de la vivienda, de equipo y de iluminación para los días de la semana y los fines de semana para cada una de las zonas.
4. La temperatura de diseño fue de 23 °C, de acuerdo al modelo de confort térmico de Auliciems (1981).
5. Los intervalos de salida requeridos en las simulaciones térmicas fueron mensuales.

### 3.3.3 Caso de referencia

La vivienda representativa de construcción en serie es un prototipo de vivienda comúnmente utilizado en la zona de estudio. El área total del prototipo fue de 44.72 m<sup>2</sup> de lote, 44.88 m<sup>2</sup> de construcción, y 120.39 m<sup>3</sup> de volumen. Se encontraba orientado en el eje norte-sur, con la elevación principal al sur y el color de la fachada era naranja claro. En la figura 27 se presenta la planta arquitectónica del prototipo.

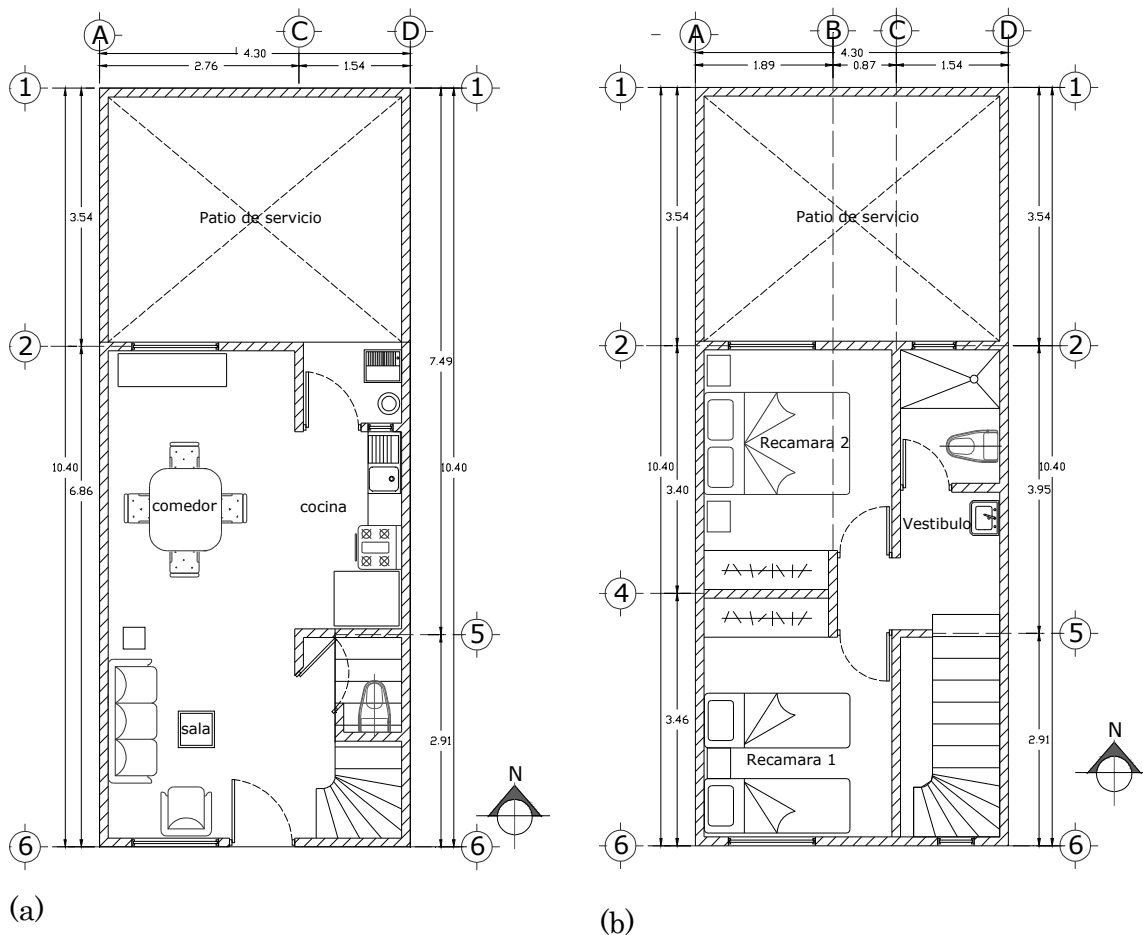


Figura 27. Plantas arquitectónicas del prototipo de estudio. (a) Planta baja, (b) Planta alta.

Para la estimación del comportamiento térmico en el caso de algunos materiales como el mortero de unión de la loseta, vidrio y aire, se consideró como resistencia térmica en lugar de las propiedades termofísicas, debido a que por su espesor no es significativo el almacenamiento de energía en ellos. Las propiedades térmicas de los materiales de construcción para los diferentes componentes de la envolvente arquitectónica se presentan en la tabla 1.

Los muros internos se simularon como muros adiabáticos porque los espacios interiores son pequeños (menores a  $25 \text{ m}^3$ ) y se consideraron como una zona. Se tomaron en cuenta las sombras exteriores propias de la vivienda, así como la barda perimetral, los arremetimientos de las ventanas y puertas, y la influencia de los edificios de las colindancias debido a que es un prototipo de vivienda de construcción en serie.

**Tabla 1.** Propiedades térmicas de los materiales del caso de estudio

Material	Conductividad térmica ( $\lambda$ ) (W/m°C)	Calor específico(Cp) (J/kg °C)	Densidad ( $\rho$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia térmica (R) (m <sup>2</sup> °C/W)	Espesor (m)	Absortividad
Losa						
Aire contenido entre la teja y la cubierta*				0.153		
Teja de Poliestireno***	0.034	1213	28.8		0.013	0.88
Losa de casetón con poliestireno*	0.45	837	1610		0.15	0.88
Concreto armado**	1.6	971	2400		0.1	
Espacio de aire inclinado y horizontal***				0.153		
Yeso ***	0.230	837	720		0.019	0.55
Muros						
Bloque de concreto común***	0.813	837	1610		0.10	0.85
Ladrillo común rojo común***	0.722	837	1920		0.14	
Ferrocemento+	1.26	837	2240		0.038	
Mortero***	0.63	837	2000		0.254	
Paneles modulares de ferrocemento*	1.26	837	2240		0.025	
Espacio de aire vertical***				0.157		
Pisos						
Firme de concreto***	1.73	850	2400		0.10	0.58
Mortero loseta***				0.037		
Loseta***	0.93	920	2300		0.092	0.58
Puertas y ventanas						
Acero***	45.3	800	7830		0.003	0.30
Poliuretano***	0.024	1590	24		0.025	0.30
Vidrio***				0.0021		

Fuentes: \*Estimación del autor.\*\* ASHRAE 2001, \*\*\*DOE 2.1E. +Ramírez 2005

### 3.3.4 Eficiencia energética

En este apartado se describen los resultados de la simulación térmica, en donde se consideró la energía a retirar o suministrar, conducción en muro y cubierta, el equipo requerido y el costo de operación de la vivienda con cada sistema constructivo.

### 3.3.5 Temperatura interior y confort térmico

Se realizó la simulación térmica incorporando un sistema de acondicionamiento (HVAC) sin operar el equipo. Esto con la finalidad de conocer la temperatura interior de la vivienda en la planta baja y planta alta y el comportamiento térmico comparado con la temperatura del ambiente a partir de la cual es posible estimar el confort térmico con base en la temperatura neutra.

### 3.3.6 Efectos de la carga térmica

Para evaluar los efectos de la carga térmica de los materiales fue necesario realizar la simulación por medio del día crítico de cada mes. Se analizó el 11 de junio para conocer el comportamiento en verano, y el 10 de diciembre para la de invierno. Las fechas se eligieron de acuerdo a los días promedios recomendados por Duffie *et al.* (1991).

Los datos que se requirieron para este análisis fueron: temperatura de bulbo seco, temperatura de rocío y el horario en que se presentaba el máximo y mínimo de la temperatura, también se requirieron los valores de velocidad y dirección del viento, la claridad de las nubes y la temperatura del suelo.



# Capítulo 4. Resultados y discusión

---

## 4.1 Diseño bioclimático

Como parte de los resultados se presentan tres apartados: 1) Diseño bioclimático, análisis del sitio y confort térmico, estrategias bioclimáticas y diseño arquitectónico, 2) materiales alternativos que incluye propiedades físicas y térmicas y estudio comparativo y 3) simulación térmica conformado por eficiencia energética, temperatura interior y confort térmico, efectos de la carga térmica, validación del simulador y evaluación del diseño bioclimático.

### 4.1.1 Descripción climática

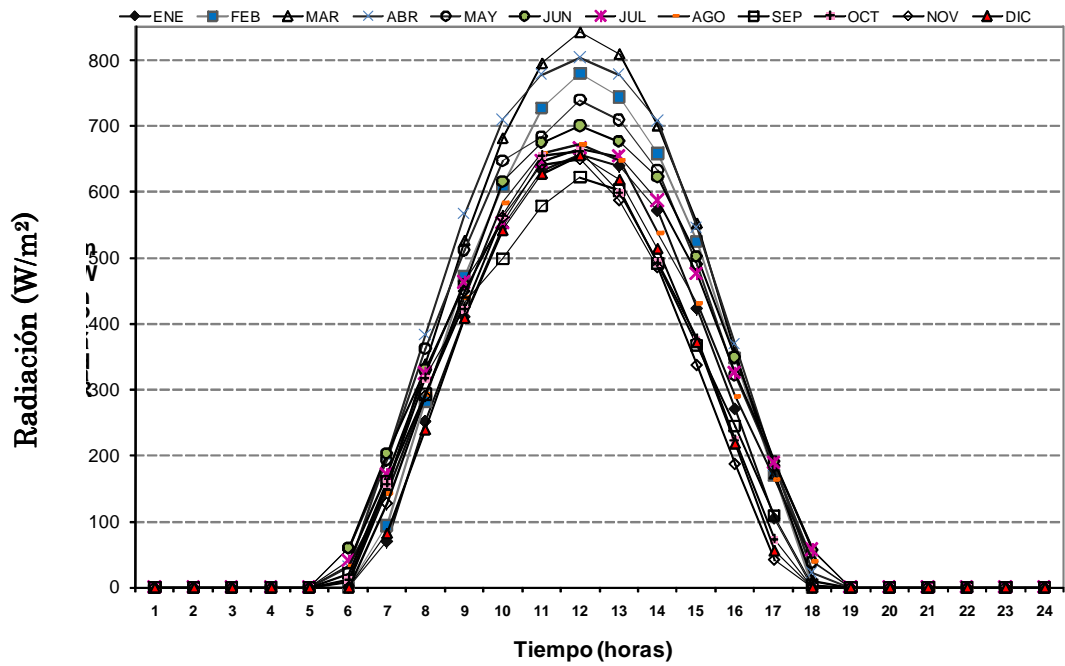
La ciudad de Oaxaca tiene una altitud de 1550 msnm y se encuentra ubicada a los 17° 09' latitud norte y 17° 02' latitud sur, 96° 41' longitud este y 96°46' longitud oeste. De acuerdo a la clasificación climática de Köppen adaptado por García (1981), la ciudad de Oaxaca presenta un clima tipo BS1hw(w)(i)gw"; lo que indica un clima seco con poca oscilación tipo gangas canícula y un bioclima templado seco.

### 4.1.2 Análisis del sitio y confort térmico

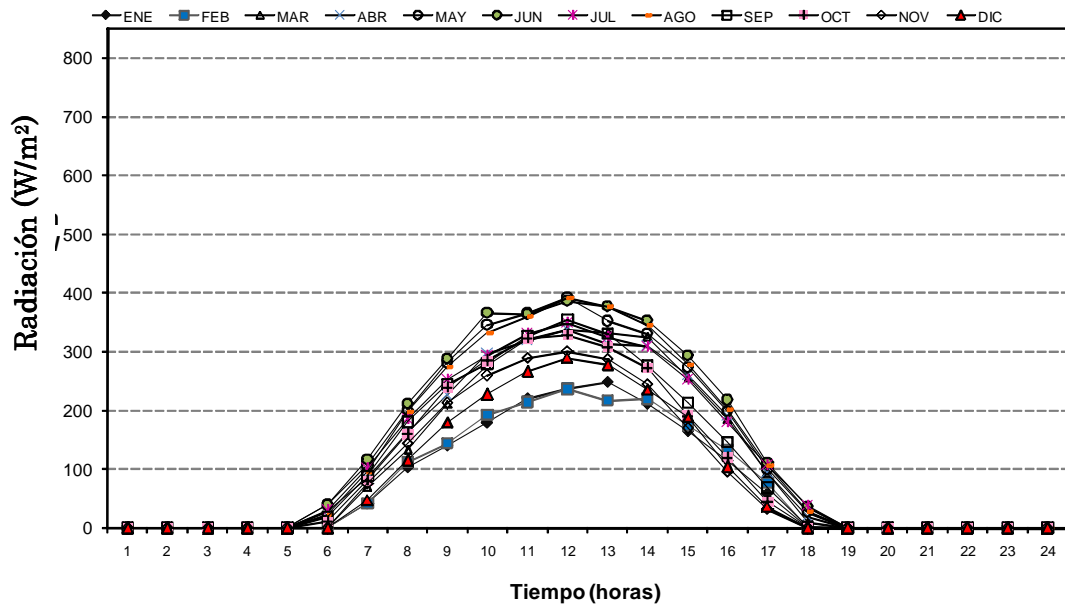
De acuerdo a los límites de separación de grupos y tipos climáticos, la ciudad de Oaxaca tiene un clima semicálido- semiseco. Tiene una precipitación anual de 29.92 mm. Presenta una oscilación de 5.2 °C y es temperatura tipo gangas, el cual se refiere a que el mes más caliente se presenta antes del solsticio de verano. Tiene presencia de canícula con régimen de temperaturas en verano; se llama canícula a la sequía de medio verano o sequía intraestival a una pequeña temporada menos húmeda que se presenta en la mitad caliente y lluviosa del año.

La radiación solar en la ciudad de Oaxaca presenta una máxima extrema de 1074 W/m<sup>2</sup> y se presenta en abril. Sin embargo, la radiación global horizontal máxima promedio es de 456.1

$W/m^2$  y se presenta en el mes de marzo, mientras que la máxima promedio de la radiación difusa es de  $226.2 W/m^2$  y se da en el mes de junio (ver figuras 28 y 29).



(a)



(b)

Figura 28. Gráfica de radiación solar horaria en la ciudad de Oaxaca, a) Radiación global horizontal, b) Radiación difusa. Fuente: Obtenido a partir de la hoja de cálculo de Luna (2006).

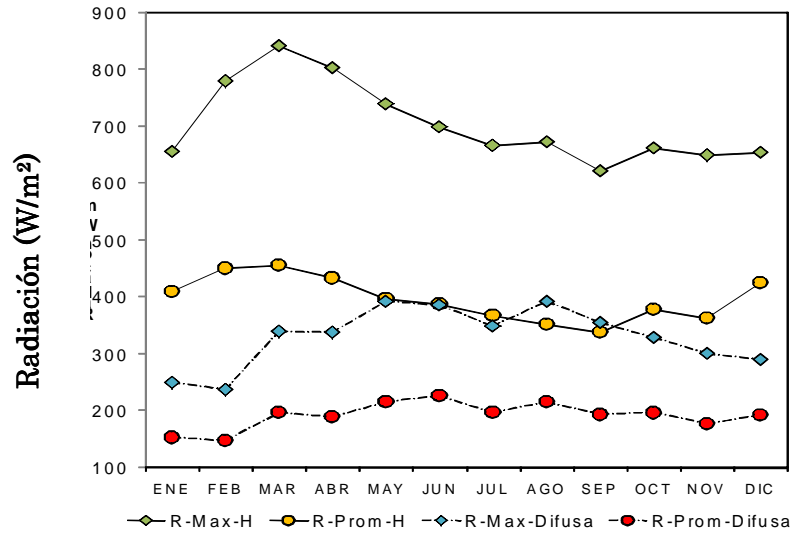


Figura 29. Gráfica de radiación solar anual, horizontal y difusa en la ciudad de Oaxaca. Obtenido a partir de la hoja de cálculo de Luna (2006).

En lo que respecta a los vientos con base en los datos del Atlas del Agua de la República Mexicana (Tamayo, 1976), se observa una tendencia general de velocidad de vientos mayor en el noroeste, este y sureste (figura 30). Las velocidades mayores se presentan en febrero, marzo y noviembre con 4 y 4.3 m/s, y los menores se dan en julio, agosto y septiembre con 3.2 m/s.

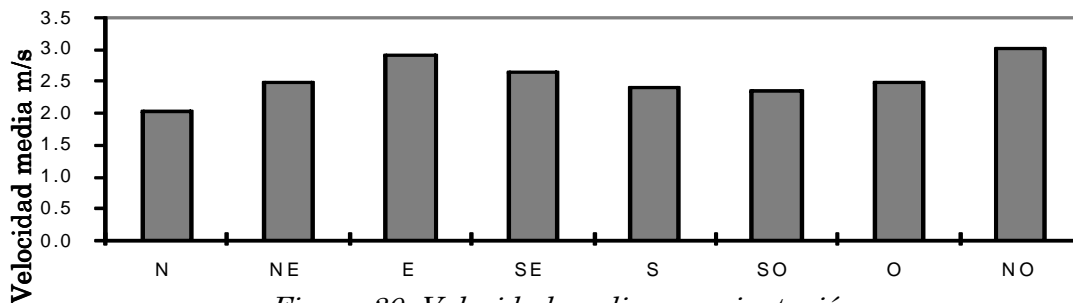


Figura 30. Velocidad media por orientación.

La dirección del promedio anual de los vientos se encuentra hacia el sureste. Cabe mencionar que estos datos son similares a los datos que maneja la estación meteorológica de la ciudad de Oaxaca que se encuentra indexado en el programa Meteonorm 4®. La dirección de los vientos de los meses de enero hasta abril se presenta hacia el sur. En mayo y junio presenta una dirección media hacia el sureste. El comportamiento en el segundo semestre del año, es diverso, debido a la dirección se enfatiza hacia el noroeste y el sur

(figura 31).

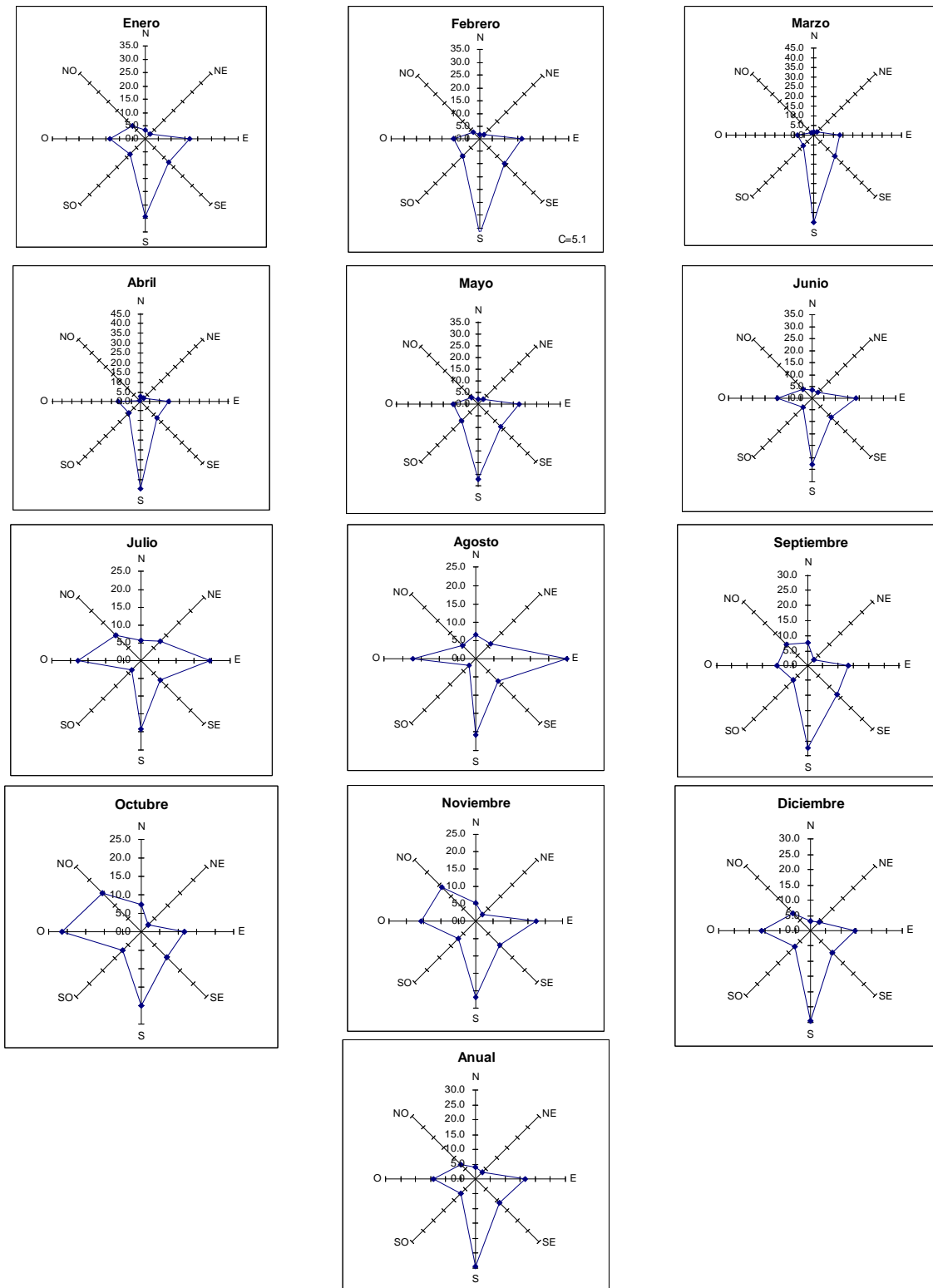


Figura 31. Rosa de los vientos de la ciudad de Oaxaca, Oax. Obtenido a partir de la hoja de cálculo de Fuentes (2002).

La precipitación total anual es de 607.4 mm. El mayor índice de precipitación media se da en junio, agosto y septiembre con 154, 115 y 107.2 mm respectivamente (figura 32). Tiene lluvias moderadas en abril, mayo, julio y septiembre con un rango de 23 a 86 mm y de noviembre a marzo con un promedio de 4 mm. En los meses de junio a octubre la evaporación es menor que la precipitación.

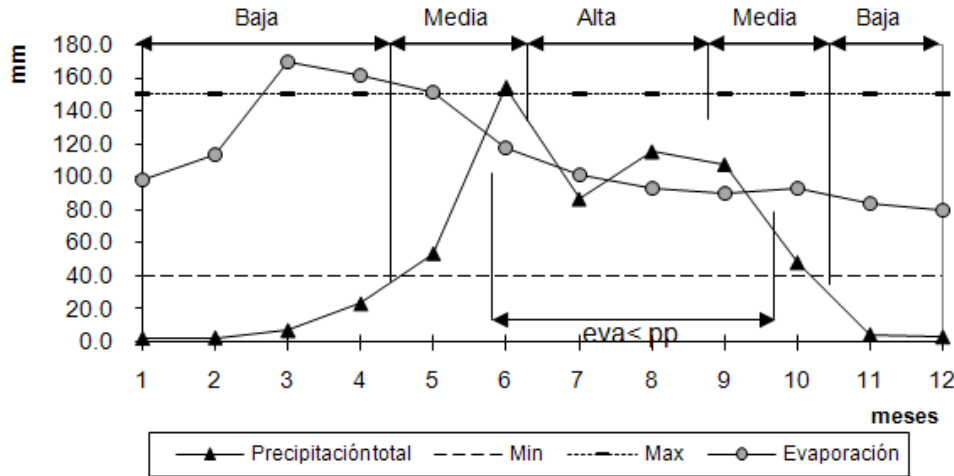


Figura 32. Gráfica de precipitación media anual de la ciudad de Oaxaca. Obtenido a partir de la hoja de cálculo de Fuentes (2002).

La temperatura promedio es de 22.6 °C en verano y 19.1°C en invierno. Existe un diferencial de temperaturas de 13.9 °C en verano y de 18.2 °C en invierno.

La humedad relativa media se encuentra dentro de la zona de confort térmico en todo el año, según el modelo utilizado. El valor máximo de humedad relativa lo alcanza en el mes de septiembre con 90% y el mínimo en enero y febrero con 29%.

En la tabla 2 se presentan las temperaturas horarias y se observa que durante las 14:00 a 17:00 horas en todo el año existe sobrecalentamiento representados por las áreas sombreadas en color claro y durante la noche se encuentra un bajo calentamiento representados con las áreas sombreadas de color oscuro.

**Tabla 2. Temperaturas horarias (°C).**

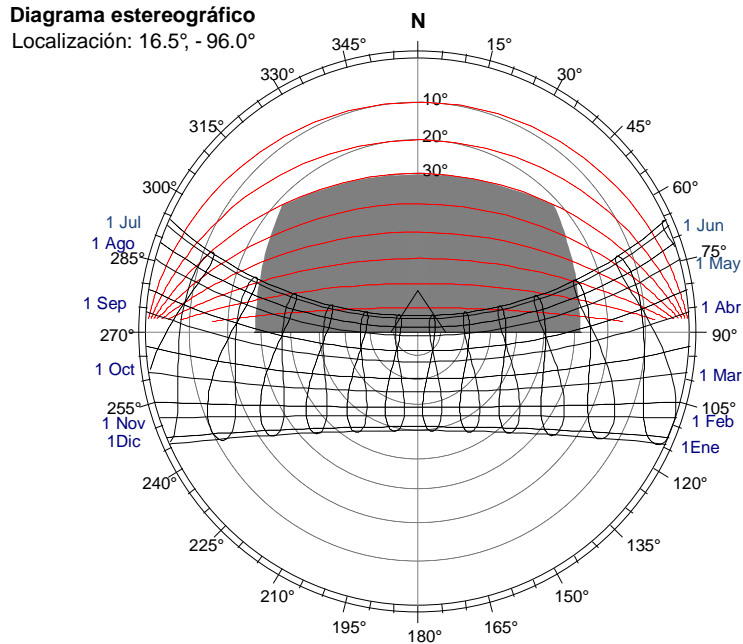
MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	PRO
ENE	8.7	8.3	8.0	7.7	7.6	7.5	7.6	8.1	8.7	9.5	13.1	19.1	23.9	27.1	28.2	27.8	26.6	24.7	22.2	19.1	15.6	11.9	9.7	9.2	15.0
FEB	9.6	8.9	8.3	7.9	7.6	7.5	7.7	8.5	9.5	10.9	14.4	19.7	24.1	26.9	27.9	27.5	26.5	24.8	22.5	19.8	16.7	13.3	11.2	10.4	15.5
MAR	14.8	14.0	13.3	12.7	12.4	12.3	12.6	13.5	14.8	16.5	19.3	22.9	25.9	27.8	28.5	28.3	27.5	26.4	24.8	22.9	20.8	18.5	16.8	15.8	19.3
ABR	16.4	15.5	14.8	14.3	13.9	13.8	14.1	15.0	16.4	18.1	20.8	24.3	27.0	28.9	29.5	29.3	28.6	27.5	26.0	24.3	22.3	20.1	18.5	17.4	20.7
MAY	18.5	17.7	17.0	16.5	16.2	16.1	16.4	17.2	18.5	20.1	22.5	25.6	28.2	29.8	30.4	30.2	29.6	28.6	27.3	25.7	23.8	21.9	20.4	19.4	22.4
JUN	18.6	17.7	17.0	16.5	16.2	16.1	16.4	17.3	18.6	20.2	22.6	25.5	27.8	29.4	29.9	29.7	29.1	28.2	27.0	25.5	23.8	22.0	20.5	19.5	22.3
JUL	17.7	16.9	16.2	15.7	15.4	15.3	15.6	16.4	17.7	19.2	21.6	24.5	26.9	28.5	29.0	28.8	28.2	27.3	26.0	24.5	22.8	21.0	19.6	18.6	21.4
AGO	17.3	16.6	15.9	15.5	15.2	15.1	15.4	16.1	17.3	18.7	21.1	24.2	26.7	28.3	28.9	28.7	28.1	27.1	25.8	24.2	22.4	20.5	19.1	18.2	21.1
SEP	15.4	14.6	13.9	13.4	13.1	13.0	13.3	14.1	15.4	16.9	19.4	22.7	25.4	27.1	27.7	27.5	26.8	25.8	24.4	22.7	20.8	18.8	17.2	16.3	19.4
OCT	13.9	13.1	12.4	11.9	11.6	11.5	11.8	12.6	13.8	15.4	18.3	22.1	25.3	27.4	28.1	27.8	27.1	25.8	24.2	22.2	19.9	17.5	15.7	14.8	18.5
NOV	8.5	8.0	7.5	7.2	7.0	6.9	7.1	7.6	8.5	9.5	13.2	19.0	23.8	26.9	28.0	27.6	26.5	24.6	22.1	19.1	15.7	12.0	9.8	9.1	14.8
DIC	8.7	8.3	8.0	7.7	7.6	7.5	7.6	8.0	8.7	9.4	12.9	18.8	23.5	26.6	27.7	27.3	26.2	24.3	21.8	18.8	15.4	11.7	9.6	9.1	14.8
ANUAL	14.0	13.3	12.7	12.3	12.0	11.9	12.1	12.9	14.0	15.4	18.3	22.4	25.7	27.9	28.7	28.4	27.6	26.3	24.5	22.4	20.0	17.4	15.7	14.8	18.8

Sin embargo, con respecto a la tabla 3, los horarios de confort térmico por humedad relativa son mayores, y se representan por las áreas que no se encuentran sombreadas, lo que indica que el mayor problema se encuentra en el control de la temperatura y no en la humedad.

**Tabla 3. Humedad relativa horaria (%).**

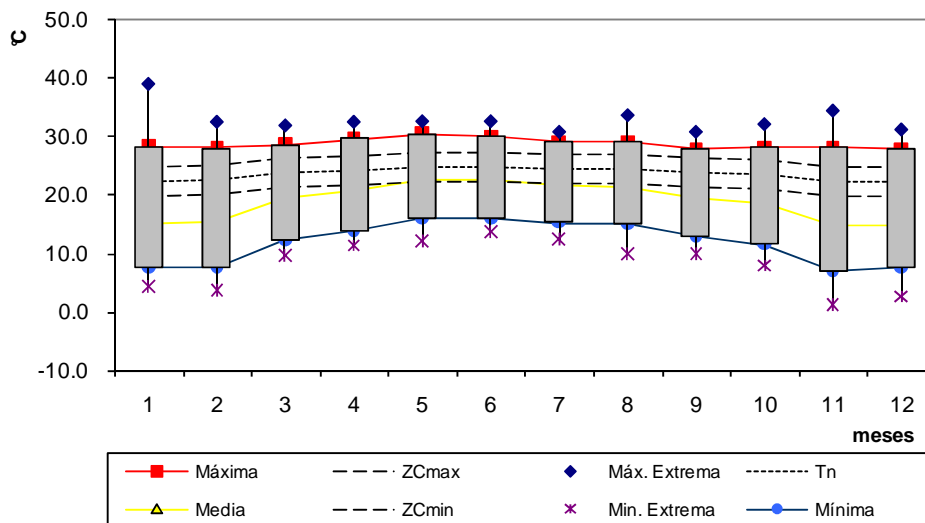
MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	PRO
ENE	65	69	72	75	76	77	76	71	65	57	49	41	34	30	29	29	31	33	37	41	45	50	55	60	53
FEB	64	68	71	74	75	76	74	70	64	56	48	40	34	30	29	29	31	33	36	40	45	50	55	59	52
MAR	59	62	65	67	68	69	67	64	59	52	46	39	34	31	30	30	31	33	36	39	43	47	51	55	49
ABR	61	65	68	70	71	72	71	67	61	54	47	40	34	30	29	29	31	33	36	40	44	48	53	57	50
MAY	65	68	71	74	75	76	74	71	65	58	51	44	38	34	33	34	35	37	40	44	48	52	57	61	54
JUN	74	78	81	83	85	85	84	80	74	67	59	51	45	41	40	41	42	44	48	51	56	60	65	70	63
JUL	77	81	84	86	88	88	87	83	77	69	61	54	48	44	42	43	44	47	50	54	58	63	68	72	65
AGO	75	79	83	85	86	87	86	82	75	68	60	52	46	42	41	41	43	45	49	52	57	62	66	71	64
SEP	78	82	86	88	90	90	89	85	78	70	62	54	47	43	41	42	44	46	50	54	58	63	68	73	66
OCT	75	79	83	86	87	88	86	82	75	66	57	49	42	38	36	37	38	41	45	49	54	59	65	70	62
NOV	70	74	78	81	82	83	81	77	70	62	53	44	37	33	31	32	34	36	40	44	49	54	60	65	57
DEC	68	72	75	78	80	80	79	74	68	60	51	43	36	32	30	31	33	35	39	43	48	53	58	63	55
ANUAL	69	73	76	79	80	81	79	75	69	62	54	46	40	36	34	35	36	39	42	46	50	55	60	65	58

En la carta estereográfica (figura 33) se muestra el ángulo de sombreado con las líneas punteadas en arco. A partir de esta gráfica se ocuparon los datos de altitud y hora local para conocer la trayectoria de los rayos solares durante un día. Se tomaron como referencia de diseño, la inclinación de los rayos solares críticos de verano (85.8°) e invierno (50°) (ver anexo 1).



*Figura 33. Diagrama estereográfica de la ciudad de Oaxaca, Oax. Obtenido del programa Solar tool (2006).*

La temperatura promedio se encuentra por debajo del límite mínimo de la zona de confort térmico mínimo en la mayoría de los meses. La temperatura neutra se encuentra dentro de los límites de confort térmico en todo el año (Figura 34).



*Figura 34. Gráfica de termoreferendum de temperaturas a lo largo del año. Obtenido a partir de la hoja de cálculo de Fuentes (2002).*

La humedad relativa máxima se mantiene en el rango de 75 a 90 % y la humedad relativa media se mantiene entre los 50 y 65% (figura 35).

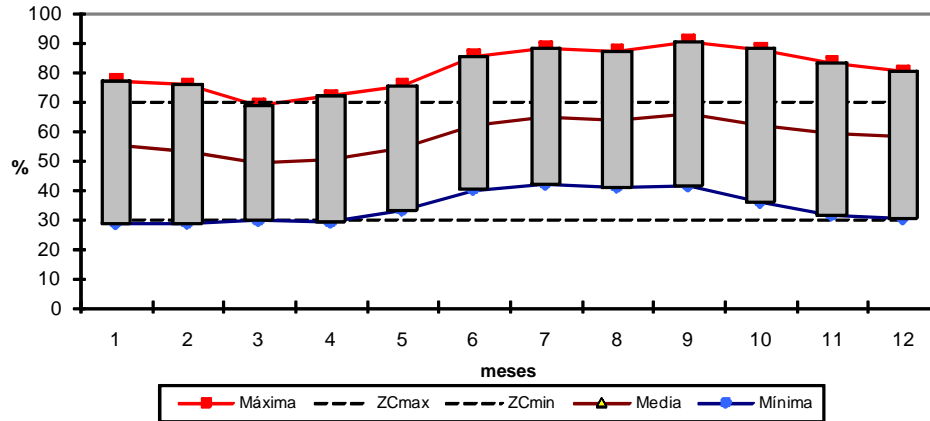


Figura 35. Gráfica mensual de humedad relativa. Obtenido a partir de la hoja de cálculo de Fuentes (2002).

### 4.1.3 Estrategias bioclimáticas

Se estimaron datos de confort térmico exterior e interior. Para lograr el confort exterior se requiere calentamiento hasta las 07:00 horas en promedio por todo el año, y se encuentra en confort térmico de 08:00 a las 16:00 horas (Tabla 4).

Tabla 4. Termopreferendum horario de espacios abiertos con viento y radiación solar

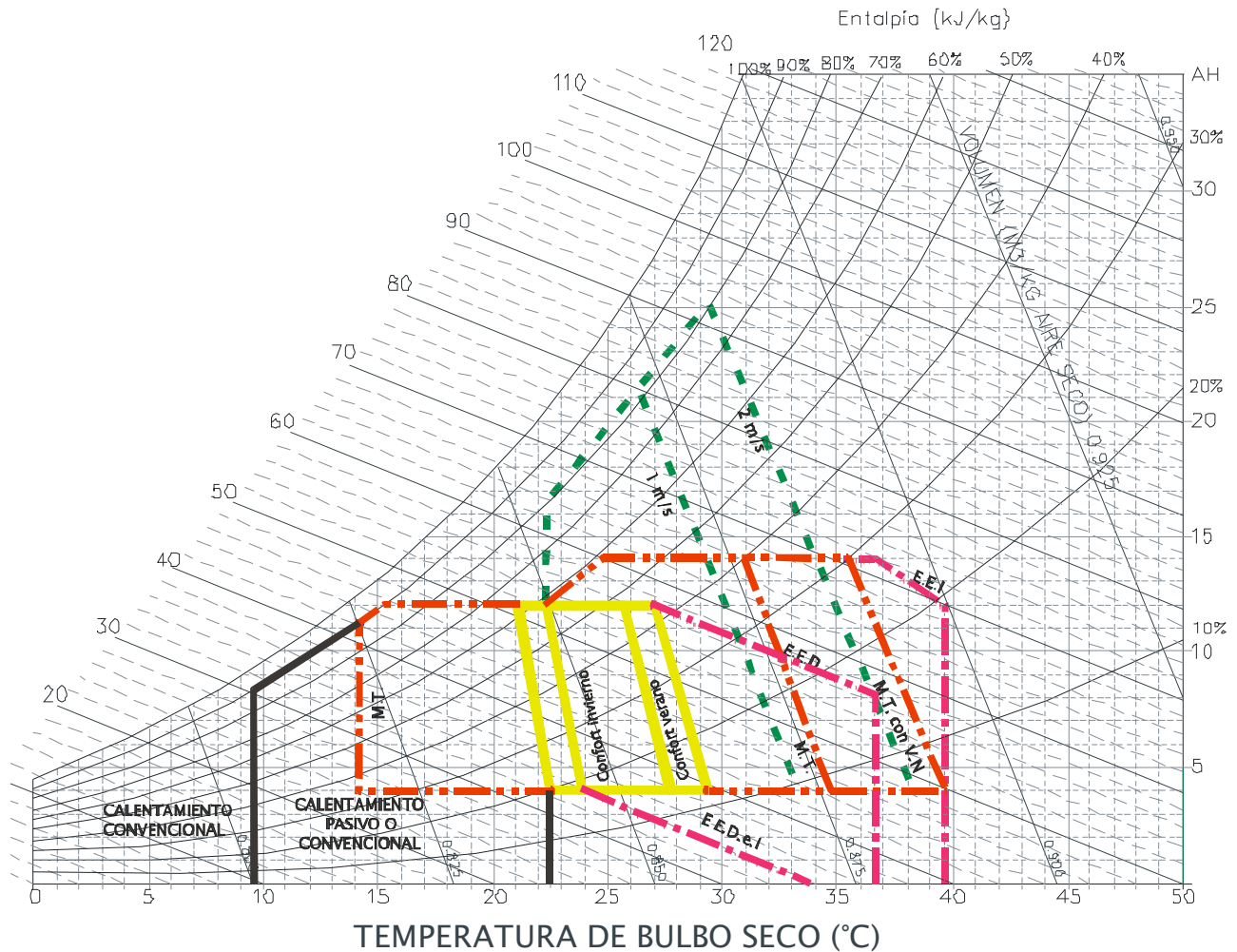
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0	F	F	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	F	F	F
1	F	F	F	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	F	F	F	F
2	F	F	F	F	CAL	CAL	CAL	CAL	F	F	F	F
3	F	F	F	F	CAL	CAL	CAL	CAL	F	F	F	F
4	F	F	F	F	CAL	CAL	CAL	F	F	F	F	F
5	F	F	F	F	CAL	CAL	F	F	F	F	F	F
6	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
7	F	F	F	F	CAL	CAL	CAL	CAL	F	F	F	F
8	F	F	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	F	F	F
9	CAL	CAL	CAL	CT	CT	CT	CT	CT	CAL	CAL	CAL	CAL
10	CAL	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CAL
11	CT	CT	CT	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	CT	CT	CT	CT
12	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE
13	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE
14	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE
15	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE	VIE
16	VIE	CT	CT	VIE	VIE	VIE	CT	CT	CT	CT	VIE	VIE
17	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT
18	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT
19	CAL	CAL	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CAL	CAL
20	CAL	CAL	CAL	CAL	CT	CT	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL
21	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL
22	CAL	F	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL
23	F	F	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	F	F

<b>F</b>	ZONA FRIA	<b>CT</b>	CONFORT TERMICO	<b>C</b>	ZONA CALIENTE
<b>CAL</b>	CON RADIACION SOLAR (CONFORT)	<b>CAL</b>	SIN RADIACION SOLAR (FRIO)		
<b>VIE</b>	CON VIENTOS HASTA 0.5 m/s (CONFORT)				



De acuerdo a los datos de la carta psicrométrica (figura 36), se obtuvo la tabla de confort térmico interior, con la cual se determinó las estrategias de diseño bioclimático en la edificación.

Las estrategias de diseño bioclimático para la ciudad de Oaxaca, Oax., son: masa térmica, radiación solar pasiva y ventilación.



Elaboración propia a partir de método de Docherty y Szokolay (1999)

*Figura 36. Carta Psicrométrica con estrategias de adecuación ambiental para la edificación en la ciudad de Oaxaca, Oax. Programa Psycho Tools (2006).*

En la tabla 5 se presentan las estrategias de diseño bioclimático en la edificación. En ella se muestra el mes y el horario cuando se requiere cada una de las estrategias obtenidas de la carta psicrométrica.

**Tabla 5.** Estrategias de diseño bioclimático en la edificación.

HORA		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0	T-0	12.8 °C	12.6 °C	16.2 °C	17.4 °C	19.2 °C	19.0 °C	18.2 °C	18.2 °C	16.4 °C	15.6 °C	12.3 °C	12.8 °C
	HR-0	65%	64%	59%	62%	66%	76%	78%	77%	79%	75%	70%	67%
1	T-1	11.9 °C	11.6 °C	15.4 °C	16.7 °C	18.6 °C	18.5 °C	17.7 °C	17.6 °C	15.8 °C	14.8 °C	11.3 °C	11.8 °C
	HR-1	67%	66%	61%	64%	68%	78%	80%	79%	81%	77%	72%	70%
2	T-2	11.0 °C	10.8 °C	14.8 °C	16.1 °C	18.1 °C	18.0 °C	17.2 °C	17.1 °C	15.2 °C	14.2 °C	10.4 °C	11.0 °C
	HR-2	69%	68%	62%	65%	69%	79%	82%	80%	83%	79%	74%	72%
3	T-3	10.3 °C	10.2 °C	14.3 °C	15.7 °C	17.7 °C	17.6 °C	16.8 °C	16.7 °C	14.8 °C	13.6 °C	9.8 °C	10.3 °C
	HR-3	70%	69%	64%	67%	71%	80%	83%	82%	84%	81%	76%	73%
4	T-4	9.8 °C	9.6 °C	13.9 °C	15.3 °C	17.4 °C	17.3 °C	16.5 °C	16.4 °C	14.4 °C	13.2 °C	9.2 °C	9.7 °C
	HR-4	72%	71%	65%	68%	72%	81%	84%	83%	86%	82%	77%	75%
5	T-5	9.3 °C	9.2 °C	13.6 °C	15.0 °C	17.1 °C	17.1 °C	16.3 °C	16.1 °C	14.1 °C	12.9 °C	8.7 °C	9.3 °C
	HR-5	73%	72%	65%	69%	72%	82%	85%	84%	87%	83%	79%	76%
6	T-6	8.9 °C	8.8 °C	13.3 °C	13.8 °C	16.2 °C	16.3 °C	15.5 °C	15.2 °C	13.0 °C	12.6 °C	8.3 °C	8.9 °C
	HR-6	74%	73%	66%	72%	75%	85%	88%	87%	90%	84%	79%	77%
7	T-7	7.9 °C	8.2 °C	13.3 °C	15.3 °C	18.0 °C	18.2 °C	17.3 °C	16.7 °C	14.1 °C	12.2 °C	7.4 °C	7.8 °C
	HR-7	76%	74%	66%	68%	70%	79%	82%	82%	87%	85%	82%	79%
8	T-8	10.9 °C	11.6 °C	16.3 °C	18.6 °C	21.1 °C	21.3 °C	20.3 °C	19.6 °C	17.0 °C	15.1 °C	10.6 °C	10.7 °C
	HR-8	69%	66%	59%	59%	61%	68%	71%	72%	77%	76%	74%	72%
9	T-9	15.6 °C	16.3 °C	20.1 °C	22.3 °C	24.5 °C	24.5 °C	23.5 °C	22.8 °C	20.5 °C	19.0 °C	15.4 °C	15.2 °C
	HR-9	58%	55%	50%	49%	51%	58%	61%	61%	66%	64%	62%	61%
10	T-10	20.4 °C	20.9 °C	23.6 °C	25.5 °C	27.2 °C	27.1 °C	26.1 °C	25.6 °C	23.6 °C	22.7 °C	20.2 °C	19.8 °C
	HR-10	47%	45%	41%	40%	42%	49%	52%	52%	55%	53%	50%	50%
11	T-11	24.2 °C	24.5 °C	26.3 °C	27.8 °C	29.2 °C	28.8 °C	27.9 °C	27.5 °C	25.9 °C	25.5 °C	24.1 °C	23.6 °C
	HR-11	38%	37%	35%	34%	37%	44%	46%	45%	48%	44%	41%	40%
12	T-12	26.7 °C	26.8 °C	27.8 °C	29.1 °C	30.2 °C	29.7 °C	28.8 °C	28.6 °C	27.2 °C	27.3 °C	26.6 °C	26.2 °C
	HR-12	32%	31%	31%	30%	34%	41%	43%	42%	43%	39%	35%	34%
13	T-13	28.0 °C	27.8 °C	28.4 °C	29.5 °C	30.3 °C	29.8 °C	28.9 °C	28.9 °C	27.7 °C	28.0 °C	27.8 °C	27.4 °C
	HR-13	29%	29%	30%	29%	33%	40%	42%	41%	42%	36%	32%	31%
14	T-14	28.1 °C	27.7 °C	28.2 °C	29.1 °C	29.8 °C	29.3 °C	28.5 °C	28.5 °C	27.4 °C	27.9 °C	27.8 °C	27.6 °C
	HR-14	29%	29%	30%	30%	35%	42%	44%	42%	42%	37%	32%	31%
15	T-15	27.3 °C	26.8 °C	27.4 °C	28.2 °C	29.0 °C	28.5 °C	27.6 °C	27.7 °C	26.6 °C	27.1 °C	27.0 °C	26.9 °C
	HR-15	31%	31%	32%	32%	37%	45%	47%	45%	45%	39%	34%	32%
16	T-16	25.9 °C	25.4 °C	26.2 °C	27.0 °C	27.9 °C	27.3 °C	26.5 °C	26.6 °C	25.5 °C	26.0 °C	25.6 °C	25.6 °C
	HR-16	34%	34%	35%	36%	41%	49%	51%	49%	49%	43%	37%	36%
17	T-17	24.2 °C	23.7 °C	24.8 °C	25.6 °C	26.6 °C	26.1 °C	25.2 °C	25.3 °C	24.2 °C	24.5 °C	23.8 °C	23.9 °C
	HR-17	38%	38%	38%	40%	44%	53%	55%	53%	53%	47%	42%	40%
18	T-18	22.3 °C	21.8 °C	23.3 °C	24.1 °C	25.2 °C	24.8 °C	24.0 °C	24.1 °C	22.9 °C	23.0 °C	21.9 °C	22.1 °C
	HR-18	42%	43%	42%	44%	48%	57%	59%	57%	58%	52%	46%	44%
19	T-19	20.4 °C	19.9 °C	21.8 °C	22.7 °C	24.0 °C	23.6 °C	22.8 °C	22.8 °C	21.5 °C	21.5 °C	20.0 °C	20.2 °C
	HR-19	47%	47%	46%	47%	52%	61%	63%	61%	62%	56%	51%	49%
20	T-20	18.6 °C	18.1 °C	20.4 °C	21.4 °C	22.8 °C	22.4 °C	21.6 °C	21.7 °C	20.3 °C	20.0 °C	18.1 °C	18.4 °C
	HR-20	51%	51%	49%	51%	56%	65%	67%	65%	66%	61%	56%	53%
21	T-21	16.9 °C	16.5 °C	19.2 °C	20.2 °C	21.7 °C	21.4 °C	20.6 °C	20.6 °C	19.1 °C	18.7 °C	16.4 °C	16.7 °C
	HR-21	55%	55%	52%	54%	59%	68%	70%	69%	70%	65%	60%	57%
22	T-22	15.3 °C	15.0 °C	18.0 °C	19.1 °C	20.7 °C	20.5 °C	19.7 °C	19.7 °C	18.1 °C	17.5 °C	14.8 °C	15.2 °C
	HR-22	59%	58%	55%	57%	62%	71%	73%	72%	73%	69%	64%	61%
23	T-23	14.0 °C	13.7 °C	17.0 °C	18.2 °C	19.9 °C	19.7 °C	18.9 °C	18.9 °C	17.2 °C	16.5 °C	13.5 °C	13.9 °C
	HR-23	62%	61%	57%	60%	64%	74%	76%	74%	76%	72%	67%	64%

Calentamiento convencional

Salida y puesta de sol

Calentamiento solar

Masa térmica

Confort térmico

Ventilación

Los meses fríos son en noviembre, diciembre, enero y febrero. En estos meses de las 23:00 a las 07:00 horas se requiere calentamiento solar pasivo. Sin embargo, debido al horario esta estrategia podría cambiar por calentamiento convencional, como puede ser el uso de ropa de invierno para dormir, cobertores o si es necesario calentadores eléctricos o a gas. A las 08:00

horas requiere calentamiento solar, de 09:00 a 10:00 horas masa térmica y de 11:00 a 18:00 horas se encuentra en confort térmico requiriendo masa térmica de 19:00 a 22:00 horas.

Los meses de transición invierno- verano son: marzo, abril. En el mes de marzo se necesita masa térmica de las 20:00 a la 01:00 horas, de 02:00 a 06:00 horas calentamiento convencional. A las 07:00 horas requiere de calentamiento solar. De 08:00 a 09:00 horas se es conveniente la masa térmica y de 10:00 a 19:00 horas se encuentra en confort térmico siempre y cuando de 13:00 a 14:00 horas exista ventilación. En abril es necesaria la masa térmica de las 21:00 a las 05:00 horas y el resto del día se encuentra en confort térmico si se tiene la ventilación natural de 12:00 a 15:00 horas.

Los meses de transición de verano a invierno son: septiembre y octubre. En el mes de septiembre se requiere masa térmica de las 20:00 a las 04:00 horas. Es necesario calentamiento convencional de 05:00 a 06:00 horas. A las 07:00 horas se necesita calentamiento solar pasivo y de 08:00 a 09:00 horas masa térmica. El resto del día se encuentra en confort térmico, siempre y cuando de 12:00 a 14:00 horas se tenga ventilación. En el mes de octubre requiere masa térmica de 20:00 a 02:00 horas. Calentamiento convencional de 03:00 a 06:00 horas. A las 07:00 horas radiación solar y de 08:00 a 09:00 masa térmica. El resto del día se encuentra en confort térmico, si de 13:00 a 14:00 horas se tiene ventilación.

Los meses cálidos son: mayo, junio, julio y agosto. En promedio requieren masa térmica de las 21:00 a 07:00 horas y el resto del día se encuentra en confort térmico siempre y cuando se tenga ventilación de 11:00 a 17:00 horas.

#### 4.1.4 Diseño arquitectónico

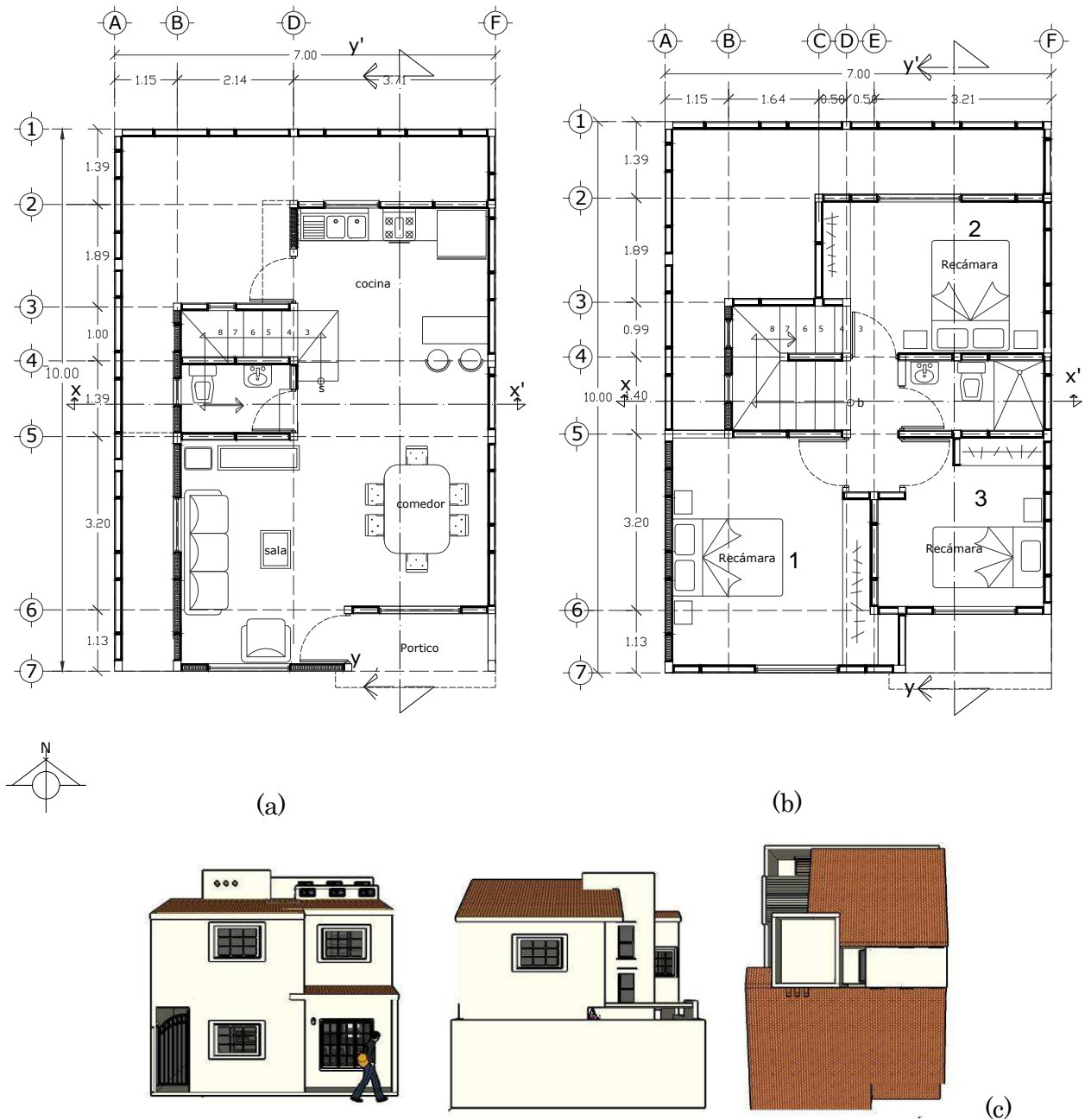
Se consideró el uso de ventanas medianas (máximo 2.25 m<sup>2</sup> de área), orientación norte-sur por los vientos dominantes, con el eje largo este-oeste que incluya ventilación constante y cruzada. Lo anterior debido a que se requirió calentamiento por las mañanas y noches, en el horario promedio de 23:00 a 07:00 horas y enfriamiento necesario en los horarios de 11:00 a 16:00 horas.

Se requirió utilizar técnicas de sombreado en la fachada oeste y sur con: vegetación caducifolia, elementos horizontales y verticales para sombreado (aleros, partesoles o pergolados). Fue necesario utilizar banquetas y corredores con cubre pisos vegetales para evitar la reflexión de los rayos solares al interior del espacio, debido a que cuando se introdujo más energía se requirió de medios mecánicos de climatización.

También fue necesario crear espacios abiertos para permitir la circulación de la ventilación. Diseñar techos abovedados o de dos aguas para reducir el área expuesta a la radiación solar. Lo anterior en caso de que el material de la cubierta no tuviera inercia térmica mayor a 8 horas.

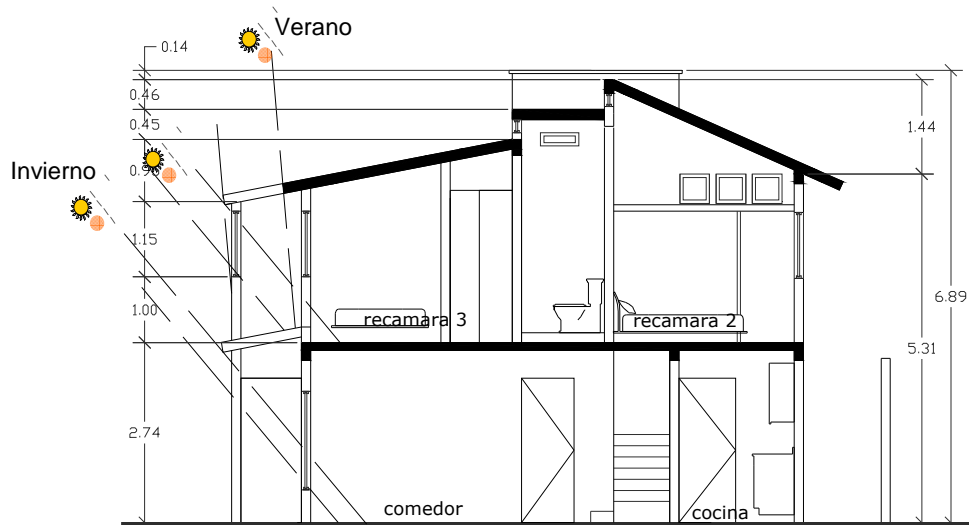
Otra recomendación de diseño fue incrementar la cantidad de ventilación natural con la altura de las habitaciones. Utilizar volados en muros que pudieran ayudar a atrapar la presión del aire bajo el alero, e incrementar la presión del flujo de aire hacia el interior. Dirigir el flujo de viento hacia el interior con la colocación de un panel o partesol vertical en el muro que ayudó a captar y dirigir los flujos de aire al interior.

El diseño de la vivienda con criterios bioclimáticos de paneles modulares de ferrocemento, es un prototipo que de acuerdo a los criterios del Instituto del Fondo Nacional para la Vivienda de los Trabajadores se puede clasificar como interés medio, y consta de dos plantas en un terreno de 70 m<sup>2</sup>. En la figura 37 se muestra las plantas arquitectónicas del proyecto, en el que se propone que los muros orientados hacia el oeste se construyan con paneles modulares de ferrocemento con aislante. La planta baja se conformó por sala, comedor, cocina, medio baño y patio de servicio. La planta alta se constituyó de 3 recámaras y un baño.



*Figura 37. Plantas arquitectónicas (a) planta baja, (b) planta alta (c) alzado frontal, posterior y planta de azoteas.*

En la figura 38 se muestra el corte longitudinal del proyecto de la vivienda y la longitud de los aleros. Estos ayudaron a controlar la radiación solar ya que permitieron la entrada de los rayos solares en invierno y evitaron los de verano. Se propuso las cubiertas inclinadas (25%) debido a la cantidad de precipitación (607.4 mm) que recibe la ciudad de Oaxaca a lo largo del año.



*Figura 38. Corte y-y' de la vivienda con criterios bioclimáticos propuestos.*

El mes crítico para el diseño de aleros y pérgolas es agosto, debido a que la inclinación de los rayos solares se encuentra a 2° más inclinado que el mes de junio, por lo que al diseñar para el mes de agosto se cubre toda la temporada de verano. Además con respecto a los resultados de la carta estereográfica, la trayectoria de la tierra con respecto al sol en esta latitud, hicieron necesario que la fachada norte se protegiera de la incidencia de los rayos solares en los meses de mayo, junio, julio y agosto.

#### 4.1.4.1 Orientación y volumetría

La orientación de la fachada principal fue hacia el sur, se propuso esta orientación debido a que se le pudo proporcionar iluminación natural y reducir la carga térmica crítica con el uso de materiales adecuados.

En lo que respecta a la orientación de espacios, se buscó proteger aquellos que tenían mayor uso por periodo de tiempo o que generaran más carga interna. En este caso, la sala tuvo una orientación suroeste, sin embargo, estaba protegida por un pasillo orientado al oeste. Lo anterior fue con la finalidad de disminuir la carga térmica de las superficies de la planta baja que se encontraban orientados al oeste.

El comedor se encuentra orientado al sureste para aprovechar los vientos dominantes en verano; sin embargo, los vientos fríos de invierno tienen una dirección dominante del

suroeste y sureste, por lo que se propone que en esta temporada las ventanas se encuentren cerradas para tener ganancia de radiación directa y evitar el enfriamiento convectivo.

La cocina se encuentra orientada hacia el norte, debido a que es el espacio donde se genera la mayor ganancia interna de calor por el uso de los equipos, por lo que está protegida de la radiación solar directa. Para este caso, en la temporada de verano se procura que la temperatura interior no se incremente más por las ganancias internas, y en la temporada de invierno se procura que la temperatura no disminuya más mediante el aprovechamiento de las ganancias internas.

En la planta alta el espacio más protegido es la recámara principal que se encuentra orientada hacia el suroeste. El muro oeste de la recámara principal, es de paneles modulares de ferrocemento con aislante, de esta forma se protege de la radiación solar directa. Por la colocación estratégica de las ventanas, se propicia la ventilación cruzada, aprovechando la iluminación natural en las mañanas.

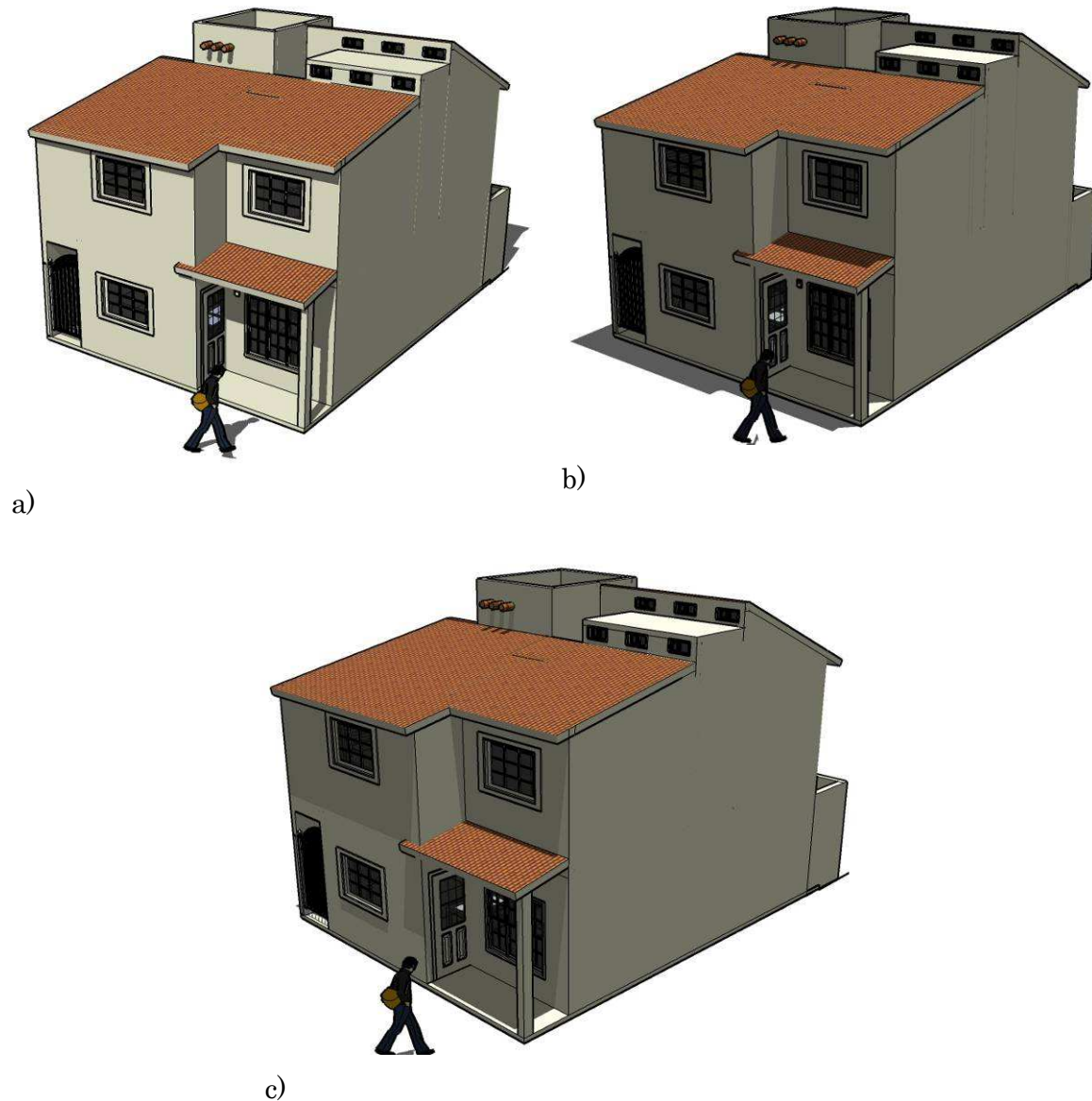
En la recámara sureste se propuso una ventilación cruzada colocando una rejilla en el interior, que propicia que la ventilación entre por la ventana de la recámara y salga por las ventanas del cubo de las escaleras.

La recámara norte, es el espacio más crítico en invierno, debido a que no cuenta con radiación solar directa; sin embargo, se propuso una serie de ventanas cenitales orientadas al sur que permitan la entrada de la radiación solar por reflexión. En verano, la radiación solar también se presenta en la fachada norte, por lo que se propuso aleros que eviten la incidencia de la radiación solar al interior de los espacios.

Con lo que respecta a la volumetría, las cubiertas se dispusieron de tal forma que la radiación solar en invierno logrará entrar en todos los espacios y que las fachadas se sombreen por sí mismas en verano. La cubierta del porche, en la planta baja es un aspecto estético con la finalidad de enfatizar el acceso principal.

Se demuestra con el modelo en tercera dimensión que el diseño de la fachada sur aprovecha la incidencia de los rayos solares en invierno y los evita en verano (figura 39). El análisis

que se presenta es a las 12:00 horas ya que a esta hora se tiene la inclinación promedio de los rayos solares.

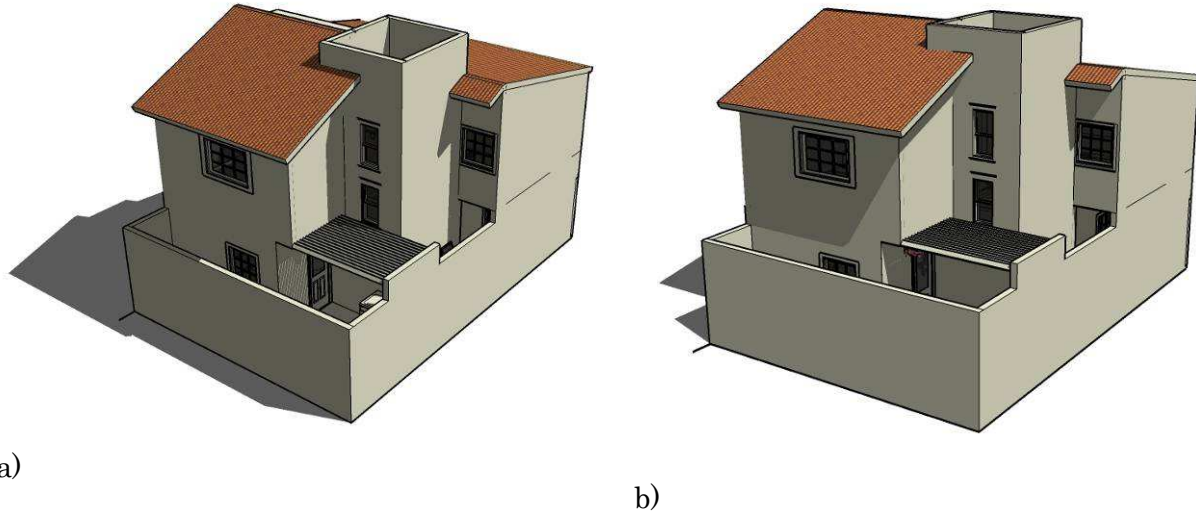


*Figura 39. Incidencia de los rayos solares el 21. a) diciembre, b) junio, c) agosto.*

En primavera y verano es importante reducir las ganancias de energía, por esta razón se evita la incidencia de los rayos solares. Sin embargo, la inclinación de los rayos solares para estos meses fue hacia el norte. De esta forma la fachada norte tuvo ventilación ya que se evita la entrada de los rayos solares durante las tardes. Se incorporó en el diseño aleros en la fachada norte y sirvieron para proteger las habitaciones de los rayos solares, después del



medio día en primavera y verano (Figura 40). Para este caso se presenta el análisis a las 15:00 horas ya que incide sobre la fachada norte.



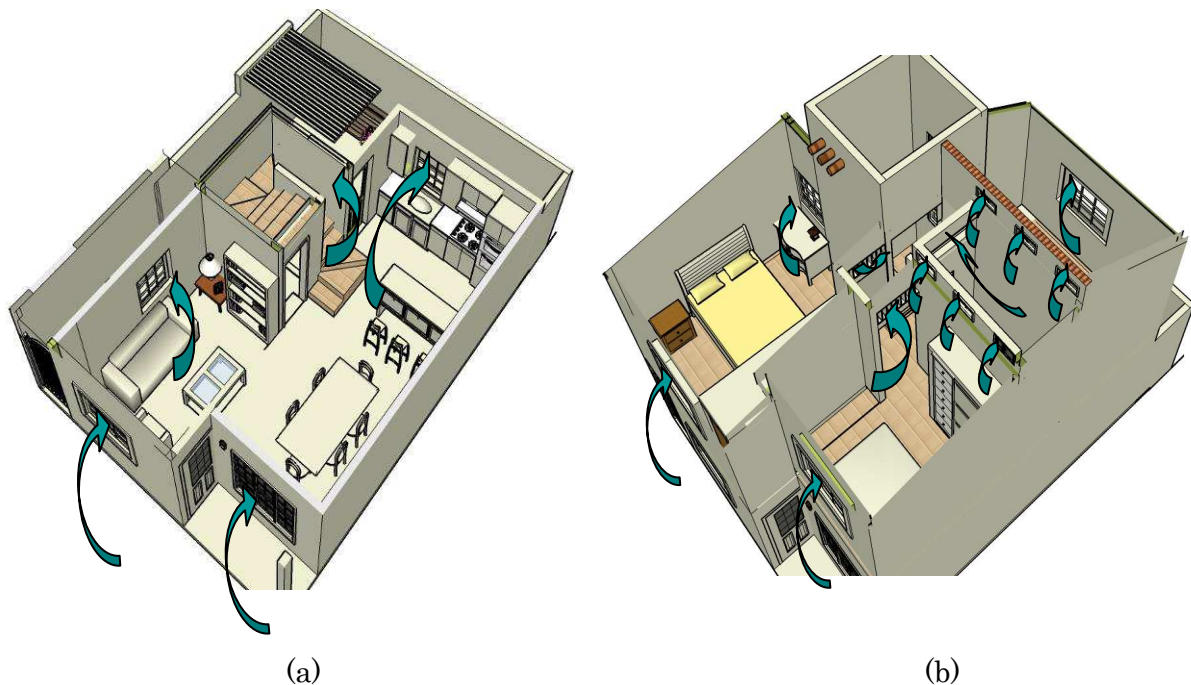
*Figura 40. Incidencia de los rayos solares a las 15:00 horas. a) marzo. b) junio*

El diseño del aprovechamiento de los vientos se realizó de acuerdo a la dirección de vientos dominantes. Debido a que el terreno representativo en un sembrado contaría con tres colindancias a su alrededor, la ventilación cruzada en sus espacios se limita a una sola dirección.

La ventilación cruzada fue una de las estrategias importantes para lograr el confort térmico y se enfatizó en los meses de primavera y verano, por lo que se propuso en fachada sur una serie de vanos de 0.50 m para ventilar el baño de la planta alta y la recámara 2 (noreste). La salida de aire de las recamaras 1(noroeste) y 3 (sureste) se ubicó en el cubo de la escalera. En el diseño propuesto se procuró que todos los espacios se encontraran ventilados y permitieran la renovación constante de aire al interior de la vivienda. La figura 34 muestra la circulación del eje eólico dominante del viento sobre la fachada sur.

El patio de servicio permite que se dé la ventilación cruzada, y es la sala la que recibe el mayor flujo de viento, y continua con el comedor, cocina y recámara (Figura 41a). En la

planta alta (Figura 41b) se muestra la circulación del aire a través de los espacios con lo que se produce la ventilación cruzada. En esta propuesta se consideraron las recomendaciones de diseño bioclimático y la importancia de proveer la ventilación suficiente para asegurar el control de calidad del aire y la humedad interna correcta, especialmente en edificios estrechos.

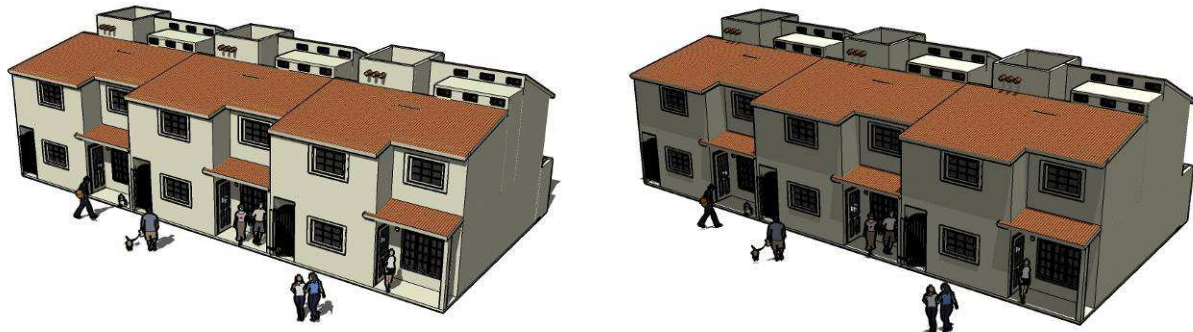


*Figura 41. Imágenes de la circulación del viento a través de ventanas y puertas. a) Planta baja, b) Planta alta.*

En la figura 42 se presenta la fachada principal con orientación sur en construcción en serie, en la que se visualiza que el diseño arquitectónico es integral, ya que el efecto de protección a la radiación solar no se da solo por elementos propios de la vivienda sola, si no que hay una relación entre una casa y la otra. El manejo de volúmenes está diseñado con la finalidad de aprovechar la incidencia de los rayos solares en invierno y evitarlos en verano (figura 43).



*Figura 42. Fachada principal de vivienda en serie.*



(a)

(b)

*Figura 43. Perspectiva de sombreado a) invierno, b) verano.*

#### 4.1.4.2 Estrategias y materiales constructivos

**CUBIERTAS.** Se diseñaron cubiertas inclinadas con el objetivo de reducir la cantidad de radiación solar directa. Se propuso el uso de teja de barro, ya que se aprovecha la forma cilíndrica para reducir el efecto de la radiación solar y el retardo térmico que tiene este material, por lo que la radiación que se transmite al interior es aprovechado en las horas de la noche. El sistema constructivo de la cubierta se propone a base de paneles modulares de ferrocemento.

**MUROS:** El sistema constructivo de los muros fue de paneles modulares de ferrocemento de 0.12 m de espesor. Se propuso utilizar aislante de 0.07 m de espesor para los muros con orientación oeste. La propuesta del color y la textura de los muros fueron con acabados exteriores a base de estuco y colores claros ya que tienen una mayor reflectancia. En el interior el acabado fue a base de aplanado mortero cemento-arena.

ELEMENTOS DE SOMBRA: Se manejaron además de los arremetimientos de las ventanas, elementos de sombra, los cuales fueron para la ventana norte de 0.60 m y las ventanas sur 0.40 m, esto con la finalidad de permitir la entrada de la radiación solar en invierno. En las ventanas del baño y la recamara norte en planta alta, se propuso que el marco de las ventanas funcionaran a la vez como elementos de sombreado, con la finalidad de ahorrar espacio. En el patio de servicio se propuso un pergolado que por la inclinación de los componentes, permitió la entrada de la radiación solar en invierno y la evitó en verano.

## 4.2 Materiales aislantes alternativos

En este apartado se describen los resultados obtenidos en la estimación de propiedades físicas y térmicas de los materiales aislantes alternativos estudiados.

### 4.2.1 Propiedades físicas

La densidad aún cuando es una propiedad física, está directamente relacionada con el comportamiento térmico de un material; por lo que se hizo un análisis de los resultados en los especímenes para pruebas térmicas. En la tabla 6 se presenta los resultados que se obtuvieron de las propiedades físicas de la mezcla de cemento con vidrio volcánico y cemento con olote.

**Tabla 6.** Propiedades físicas de los especímenes.

Pieza	Masa del espécimen (g)	Masa después de 24 horas de inmersión (g)	Masa aparente (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	ADI
*T.4.1	2165	2922	680.17	970	146	34.97
*T.5.2	2243	3029	656.11	950	141	35.04
*T.3.6	2357	3039	811.62	1006	153	28.94
+OL.5.3	2064	3074	798.27	910	163	48.93
+OL.4.6	2239	3297	932.05	950	171	47.25
+OL.3.1	2016	2912	653.70	890	148	44.44

Donde:

\* T= Espécimen de vidrio volcánico con cemento

+OL= Espécimen de olote con cemento

ADI= Absorción después de inmersión, %

## 4.2.2 Propiedades térmicas

La conductividad térmica se calculó con la fase estable de las temperaturas registradas en los sensores, la cual se logró aproximadamente después de las 4 horas de medición (ver anexo 2). La conductividad térmica se midió con un rango de temperaturas de 40 °C, con las cuales se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 7.

Los resultados se encuentran divididos en grupos de acuerdo al tamaño de los agregados: 5) pasa el tamiz de ½”y se retiene en la de 3/8”, 4) pasa el tamiz 3/8”y se retiene en la #4, 3) Pasa el tamiz #4 y se retiene en la del #8. La desviación estándar de la conductividad térmica obtenida para la mezcla del olote con cemento es menor a 0.02 % y para la mezcla de vidrio volcánico con cemento es menor a 0.05%.

**Tabla 7.** Conductividad térmica de los materiales en estudio.

<b>Espécimen</b>	<b>Calor suministrado (W)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Conductividad térmica (<math>\lambda</math>) W/m°C</b>	<b>Valor promedio de <math>\lambda</math> W/m°C</b>
OL.5.1	35.6226	0.0897	0.26186	
OL.5.2	35.5661	0.08933	0.26938	
OL.5.3	35.6093	0.08947	0.25806	0.2631 ± 0.00576
OL.4.4	35.6436	0.08266	0.27895	
OL.4.5	35.6234	0.08906	0.26999	
OL.4.6	35.7117	0.08895	0.25405	0.2676 ± 0.01261
OL.3.1	35.6999	0.09	0.25188	
OL.3.2	35.5712	0.09	0.25097	0.2514 ± 0.00064
T.5.1	35.7233	0.09045	0.27523	
T.5.2	35.5722	0.08977	0.25817	
T.5.3	35.5905	0.09019	0.27562	0.2697 ± 0.00996
T.4.1	35.6588	0.08977	0.25880	
T.4.3	35.6226	0.08944	0.24894	0.2539 ± 0.00697
T.3.1	35.7338	0.09022	0.23082	
T.3.2	35.617	0.08909	0.25350	
T.3.3	35.5551	0.08913	0.24217	0.2421 ± 0.01134

El criterio de selección fue basado en que a una menor conductividad se tendría menor flujo de energía, lo anterior lo afirma González (2002), en el caso del vidrio volcánico es la mezcla con el agregado mínimo estudiado, que se conforma con partículas que pasan el tamiz #4 y se retiene en la #8. En el caso de la mezcla con olote el resultado fue el mismo, el material con menor conductividad corresponde al grupo 3 que están conformados por partículas que pasan el tamiz #4 y se retiene en la #8; sin embargo, no fue posible utilizar esta

granulometría debido a que los especímenes se deshacía con facilidad por lo que se seleccionó la mezcla con agregados que pasan el tamiz de 1/2” y se retiene en el de 3/8”.

El calor específico se obtuvo de la literatura de los materiales basados en cemento por lo que se utilizó el valor que presenta Doe 2.1E el cual es de 837 J/kg°C. Las propiedades térmicas estimadas a partir de estos datos se presentan en la tabla 8.

**Tabla 8.** Propiedades térmicas estimadas de los materiales en estudio.

<b>Propiedad térmica</b>	<b>Cemento mezclado con olote</b>	<b>Cemento mezclado con vidrio volcánico</b>
Conductividad térmica (W/m°C)	0.2631	0.2421
Difusividad térmica(m <sup>2</sup> /s)	3.4542x10 <sup>-7</sup>	2.7287x10 <sup>-6</sup>
Tiempo de retraso térmico* (horas)	2:56	3:00
Amortiguamiento térmico* (%)	70	72
Resistencia térmica* (m <sup>2</sup> °C/W)	0.2851	0.3098

\*Estimado para un espesor de 0.075 m

De acuerdo al valor de conductividad térmica del olote-cemento y vidrio volcánico-cemento, estos materiales se caracterizan como agregado ligero para concreto aislante según norma ASTM C 332-99, y se encuentra en el grupo II que contempla materiales con valor de conductividad térmica de 0.15 a 0.43 W/m°C.

### 4.3.3 Estudio comparativo de propiedades termofísicas

Se hizo un análisis comparativo de tipo físico y térmico entre los materiales en estudio y aislantes orgánicos e industriales que presenta la literatura, para conocer las ventajas y desventajas de los materiales propuestos con respecto a otros (Ver tabla 9).

Los materiales aislantes analizados están divididos en dos grupos: los orgánicos (poliestireno, poliuretano, corcho, fibra de coco, olote, cartón de yeso y lodo de papel), y los inorgánicos (vidrio volcánico y fibra de vidrio). El poliestireno y poliuretano son los que presentaron mejores resultados debido a que tienen menor conductividad térmica (0.0346 y 0.024 W/m°C); sin embargo, son materiales altamente contaminantes desde su producción hasta su desecho (Papadoloupus, 2004).

**Tabla 9.** Análisis comparativo de las propiedades térmicas de materiales aislantes existentes en la literatura y obtenidas en este estudio.

MATERIAL	Masa volumétrica kg/m <sup>3</sup>	Conductividad térmica ( $\lambda$ )(W/m°C)	Calor específico (J/kg°C)	Difusividad térmica( $\alpha$ ) (m <sup>2</sup> /s)	Retraso térmico☼ (horas)	Amortiguamiento☼ térmico* (%)	Resistencia térmica (m <sup>2</sup> C/W)
Olote con cemento	910	0.2631	837	3.45x10 <sup>-7</sup>	2:56	70	0.2851
Vidrio volcánico con cemento	106	0.2421	837	2.72x10 <sup>-6</sup>	3:00	72	0.3098
Lodo de papel+	1219	0.847	1279	5.43x10 <sup>-7</sup>	4:41	29	0.0885
Cartón de yeso*	800	0.1156	837	1.76x10 <sup>-7</sup>	4:09	78	0.6488
Poliestireno expandido*	28.8	0.0346	1213	9.92x10 <sup>-7</sup>	1:00	59	2.1639
Poliuretano expandido*	24	0.0240	1590	6.30x10 <sup>-6</sup>	2:10	64	3.1185
Fibra de vidrio <sup>□</sup>	16	0.046	835	3.4x10 <sup>-6</sup>	0:55	49	1.6304
Corcho■	86	0.048	2030	2.75x10 <sup>-6</sup>	3:17	73	1.5625
Fibra de coco con cemento♣	1040	0.40	837	4.59x10 <sup>-7</sup>	2:32	67	0.1875

+Bojórquez, 1999, \*Doe 2.1, <sup>□</sup> Mills, 1999, ■ ASHRAE, 2001, ♣Asasutjarit C. *et al.* 2007 (con proporción 2:1:2, cemento, fibra de coco y agua; largo de la fibra de 1-6 cm). ☼Para 0.075m de espesor.

La fibra de vidrio también tiene una conductividad térmica baja (0.046 W/m°C) y con menor masa volumétrica que los materiales anteriores (16 kg/m<sup>3</sup>), esto debido al alto contenido de sílice que es considerado uno de los mejores aislantes térmicos existentes en el mercado, según Short y Kinninburg (1977).

El lodo de papel es el material que presenta mayor conductividad térmica (0.847 W/m°C) y mayor retardo térmico (4:41 horas), lo anterior se debe a que los datos de bibliografía son de una mezcla con mortero cemento-arena desarrollada por Bojórquez (1999). De los aislantes analizados, el cartón de yeso es el que presenta mayor amortiguamiento térmico (78%); sin embargo, es analizado con un espesor de 0.075 m y comúnmente el espesor de este material es de 0.01 m, por lo que el retraso térmico reduce a 0:33 horas y el amortiguamiento térmico a 44%.

## 4.3 Simulación térmica

Los resultados de la simulación térmica se presentan en 5 apartados, en los que se analiza el comportamiento de los materiales en estudio con respecto a otros sistemas constructivos comunes en la región de estudio y otros materiales aislantes.

El primer apartado presenta una validación empírica de la simulación mediante la comparación de datos reales medidos con los registradores de datos HOBO U12-006 para temperatura y humedad relativa con un rango de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $70^{\circ}\text{C}$  y una precisión de  $\pm 0.35^{\circ}\text{C}$  con respecto a los datos de temperatura interior y temperatura ambiente obtenidos con el simulador DOE 2.1E.

El segundo apartado trata de la energía que se requiere suministrar o retirar para tener condiciones de confort térmico en los espacios interiores. El tercer apartado se refiere al efecto de cambio de temperatura interior por el tipo de envolvente arquitectónica y las condiciones de confort térmico, así como el efecto de la carga térmica interna producida por las ganancias de los equipos, iluminación y usuarios, en planta baja y planta alta.

El cuarto apartado trata sobre el efecto de carga térmica en la envolvente de cada uno de los materiales estudiados. Y finalmente el quinto apartado es la evaluación del diseño bioclimático por medio de la energía que se requiere para lograr el confort térmico en el interior comparado con el diseño de vivienda en serie comúnmente construido en la zona de estudio.

### 4.3.1 Validación de la simulación

En la figura 44, se presentan los resultados de los promedios diarios registrados y simulados de las temperaturas exterior e interior. En lo que respecta a la temperatura interior registrada comparada con la temperatura interior simulada presentó una variación máxima de  $4.46^{\circ}\text{C}$  y una mínima de  $0.13^{\circ}\text{C}$ . La variación promedio mensual fue con un rango de  $0.0547$  a  $0.7547^{\circ}\text{C}$ , con la inclusión del error del sensor utilizado (ver anexo 3). Esta variación aún cuando no es significativa, ya que es menor a  $1^{\circ}\text{C}$ , puede deberse a la



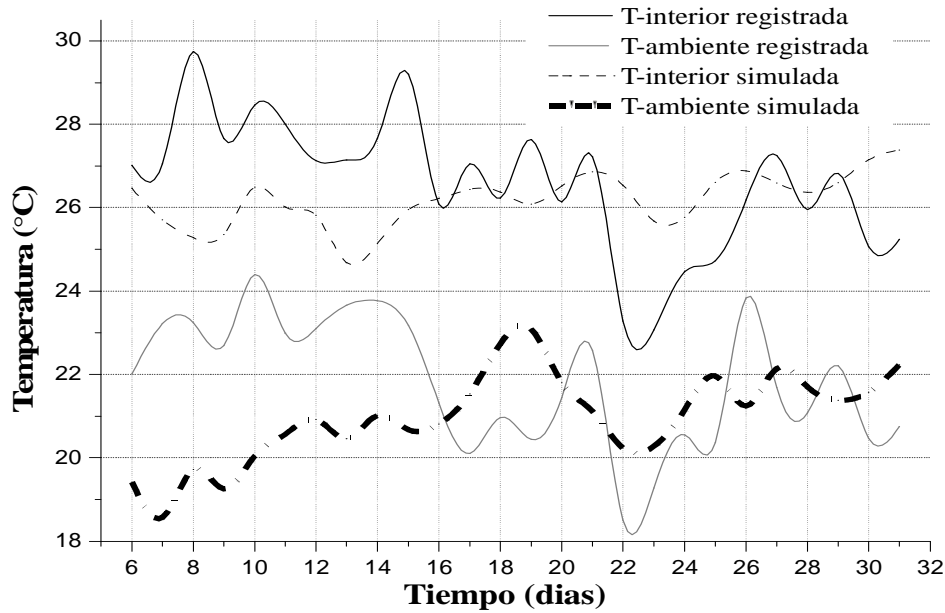
carga térmica por infiltración, que según ASHRAE (2001) puede representar hasta el 40%, ya que solo se estimaron los cambios de aire por hora, debido a que no se cuenta con el equipo de puertas de presurización para medir experimentalmente ese dato.

Se observó que la variación existente en los datos puede deberse a tres tipos de situaciones:

1) Los HOBOS utilizados para registros de temperatura no cumplen con las especificaciones de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés), mientras que los sensores de la estación meteorológica donde se obtuvieron los datos para el año típico meteorológico simulado, sí cumplen con ese nivel de calidad.

2) El año simulado es un año típico meteorológico, por lo que habrá variaciones con respecto a la información registrada en tiempo real en la temperatura ambiente exterior, que afecta a su vez a la temperatura interior.

3) Los vientos del periodo medio y del año típico meteorológico pueden presentar diferencias significativas por variación de trayectorias y velocidades debido a cambios en el entorno inmediato natural y construido. Lo anterior afecta el enfriamiento convectivo en el modulo de referencia estudiado.



*Figura 44. Comparación de temperaturas registradas y simuladas.*

En lo que respecta a la temperatura ambiente registrada en comparación con la temperatura ambiente simulada, presentó una variación promedio mensual con un rango de 0.5050 a 1.2050 °C, con la inclusión del error del sensor utilizado.

Esta variación es consistente si se considera que: a) Los sensores utilizados para registro de datos no cumplen con el total de las normas de la WMO, mientras que los del año simulado sí. b) El año simulado es un año típico, no el año medido en tiempo real, por lo tanto habrá diferencias en los datos de temperatura ambiente, que a su vez afectarán a la temperatura interior; y c) Los patrones de vientos no son similares de un año a otro, además de que sufren cambios en sus trayectorias y velocidad por modificaciones en el entorno natural y construido.

Se considera que si bien los datos registrados no fueron idénticos a los simulados, la variación no es significativa, y están identificadas las posibles causas de esta, por lo que se valida la aplicación de la simulación térmica para el caso de estudio en específico y la ciudad de Oaxaca en general.

### 4.3.2 Eficiencia energética

Con el objetivo de estimar la cantidad de energía que se debe de suministrar o retirar a la vivienda para lograr las condiciones de confort térmico en el interior, se analizó el resultado de la simulación térmica de acuerdo a la carga total de enfriamiento (energía a retirar) o calentamiento (energía a suministrar) que se requiere para cada sistema constructivo y para cada tipo de aislante. En la figura 45, se muestran los resultados obtenidos en la simulación en comparación con otros sistemas constructivos.

Los siguientes resultados se compararon con el sistema constructivo de muros y cubierta de ferrocemento *in situ*. El resultado indica que al utilizar el sistema constructivo de muros de bloque de concreto común y cubierta de casetón de poliestireno, la energía a retirar fue 25% menos, el sistema constructivo de muros y cubierta de paneles modulares de ferrocemento fue 18.70% menos, el sistema constructivo de muros de ladrillo rojo común y cubierta de concreto armado fue 34.50% menos, el sistema constructivo de paneles modulares de ferrocemento con olote-cemento fue 26.75% menos y el sistema constructivo de paneles modulares de ferrocemento con vidrio volcánico-cemento fue 28.30% menos.

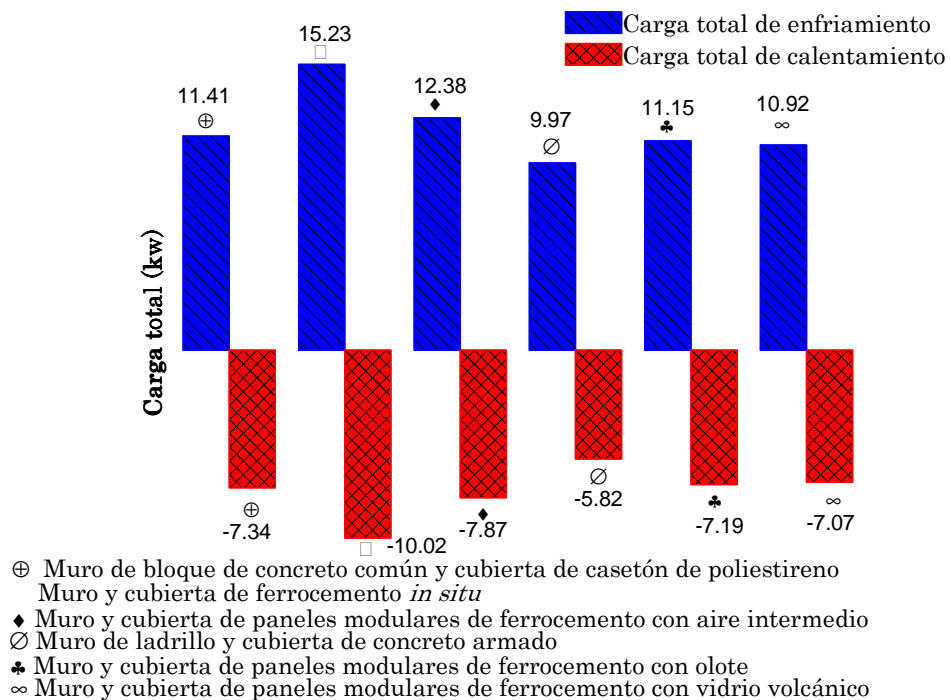


Figura 45. Energía retirada y suministrada por cada sistema constructivo

En lo referente a la energía suministrada para calentamiento, se observó que comparados con la vivienda construida con el sistema constructivo de muros y cubierta de ferrocemento *in situ*, la vivienda de muros de bloque de concreto común y cubierta de casetón de poliestireno requirió 26.74% menos energía, el sistema constructivo de muros y cubierta de paneles modulares de ferrocemento fue 21.44%, el sistema constructivo de muros de ladrillo rojo común y cubierta de concreto armado 41.91%, el sistema constructivo de paneles modulares de ferrocemento con olote-cemento fue 28.32% y el sistema de paneles modulares con vidrio volcánico-cemento 29.46%.

Con respecto a otros materiales aislantes (figura 46), se toma como base de comparación los paneles modulares de ferrocemento con aire intermedio y cartón de yeso en cara interior. El lodo de papel requiere 2.97% menos energía, fibra de coco-cemento 5.6%, olote-cemento 8.15%, vidrio volcánico 10.1%, poliestireno 20%, fibra de vidrio 23%, corcho 24.5% y poliuretano 17.21%. Los materiales aislantes que más energía ahorran son corcho y fibra de vidrio. De los materiales propuestos en este estudio el vidrio volcánico es el que presenta mayor ahorro energético por encima del olote-cemento, fibra de coco-cemento y lodo de papel.

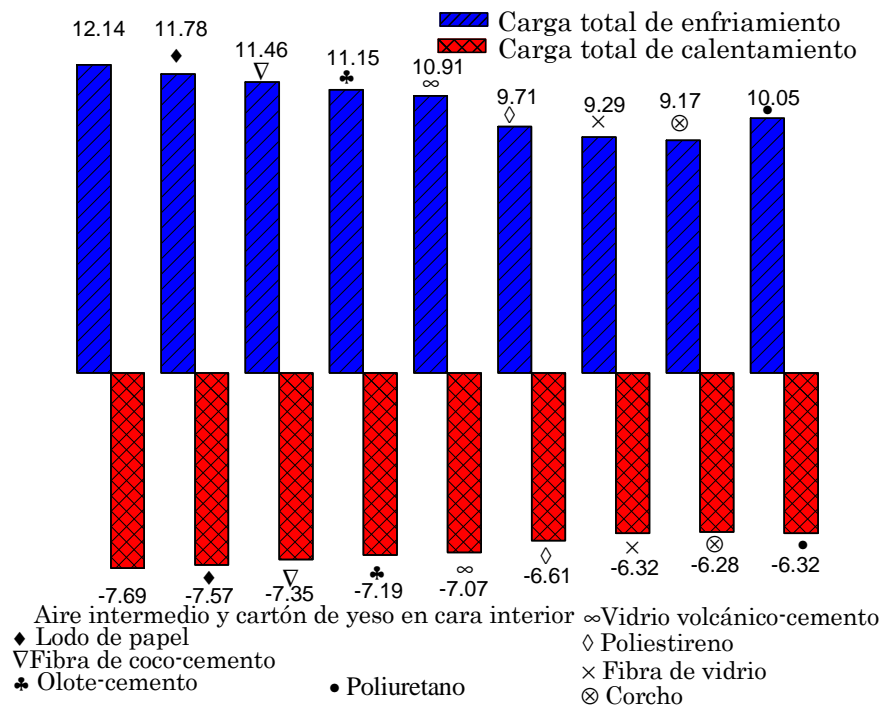


Figura 46. Energía retirada y suministrada por cada aislante

En la figura 47 se observa que los muros de ferrocemento *in situ* son los que presentan mayor carga por conducción, seguido por los paneles modulares de ferrocemento y el bloque de concreto común. Los materiales que presentaron menor carga por conducción son paneles modulares de ferrocemento con olote-cemento, paneles modulares de ferrocemento con vidrio volcánico-cemento y ladrillo rojo común.

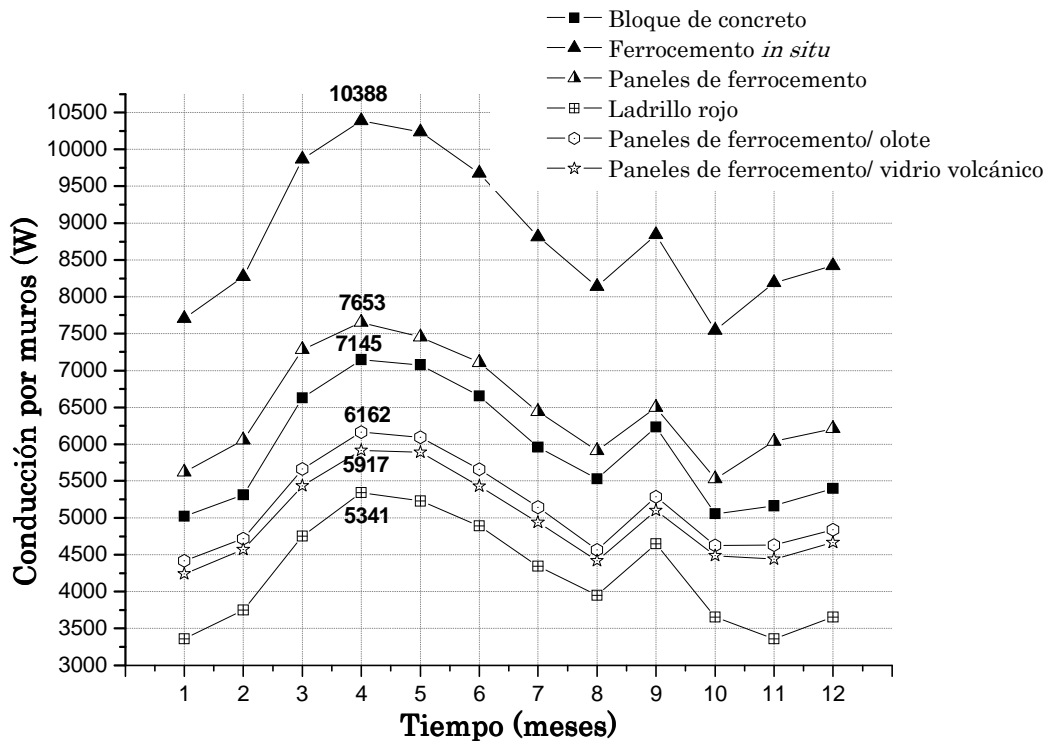


Figura 47. Ganancia por conducción en muros- comparación sistemas constructivos.

Durante los meses de marzo, abril, mayo y junio se presentaron las mayores ganancias por conducción en muros. En un comparativo con la carga máxima por conducción en muros generada, y con base en el ferrocemento *in situ* como referencia, se observó que el bloque de concreto es 31.21% menor, los paneles modulares de ferrocemento 26.32% menor, ladrillo rojo común 48.58% menor, paneles de ferrocemento con olote-cemento 40.68% menor y paneles modulares de ferrocemento con vidrio volcánico-cemento 43.04% menor.

En la comparación con otros materiales aislantes (figura 48), la conducción que se da a través de los muros fue menor cuando se utiliza el poliuretano y mayor cuando se utiliza los paneles modulares de ferrocemento con aire intermedio y cartón de yeso en la cara interior.

En comparación con los paneles modulares de ferrocemento con aire intermedio y cartón de yeso en cara interior, el lodo de papel es 7.86% menor, olote-cemento 16.48%, vidrio volcánico-cemento 17.87%, poliestireno 27.42%, poliuretano 36.64%, fibra de vidrio 31.89%, fibra de coco-cemento 12.54% y corcho 33.85%.

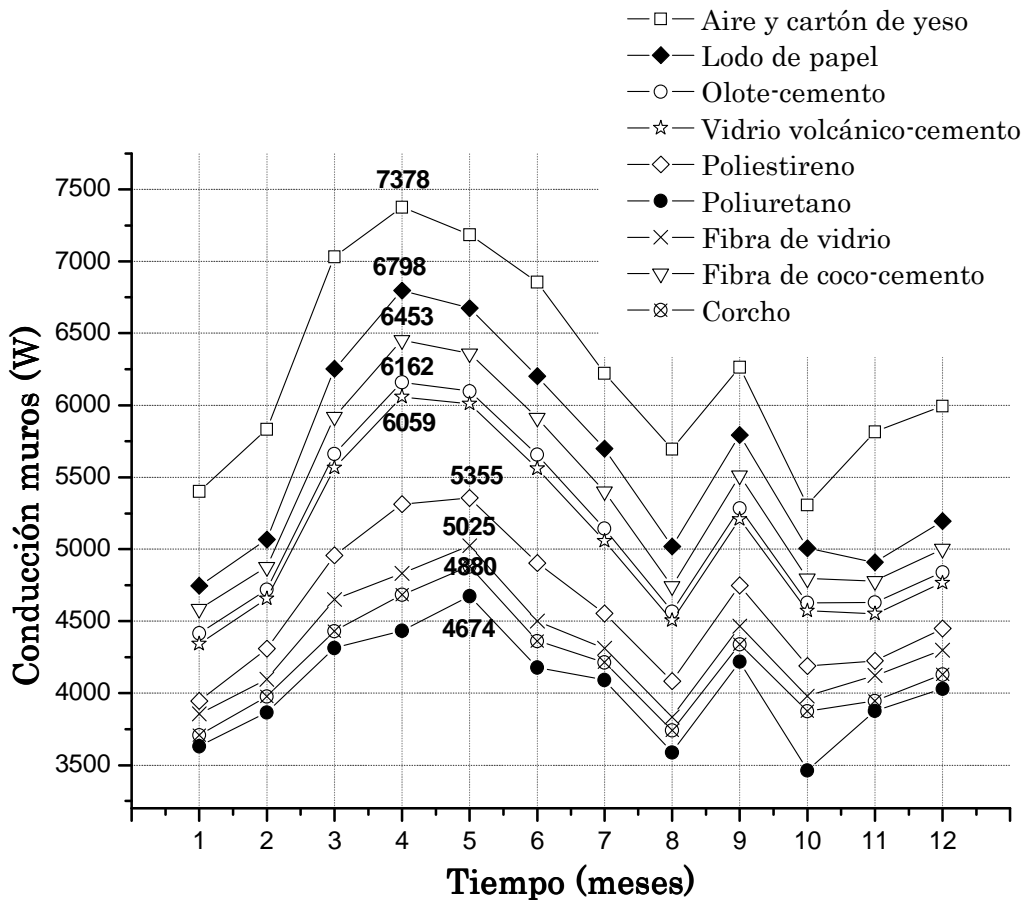


Figura 48. Ganancia por conducción en muros- comparación aislantes

En la figura 49 se presentan las ganancias por conducción en cubiertas y se observó que la mayor carga por conducción se da en la cubierta de ferrocemento *in situ*, seguida por la cubierta de paneles modulares de ferrocemento.

En el caso de la conducción a través de las cubiertas comparados con el sistema de ferrocemento *in situ* se observó que la cubierta de casetón de poliestireno presenta 51.46% menos, los paneles modulares de ferrocemento 18.39% menos carga, los paneles modulares

de ferrocemento con olote-cemento 43,79%, menos, los paneles modulares de ferrocemento con vidrio volcánico-cemento 47.06% menos y la cubierta de concreto armado 41.98% menos. Los meses con mayor ganancia por conducción en cubierta son: abril, mayo y junio.

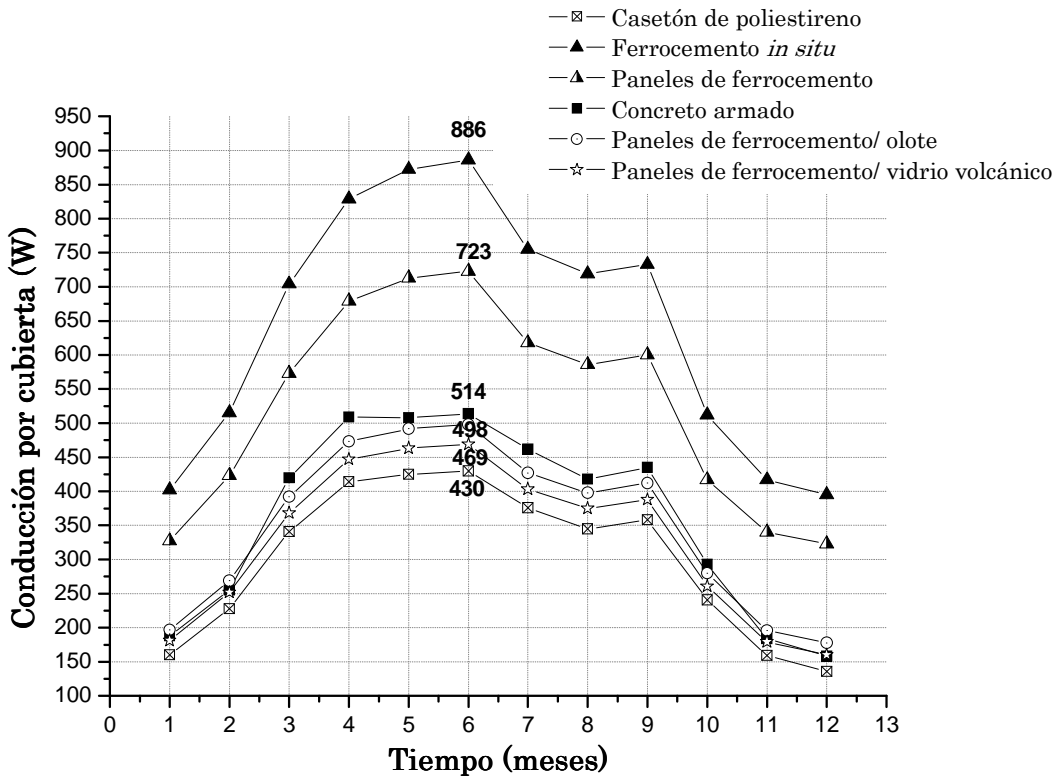


Figura 49. Ganancia por conducción en cubiertas por sistema constructivo

En la figura 50 se presentan las ganancias por conducción en cubiertas de los diferentes aislantes. Comparados con el aire intermedio y cartón de yeso, todos fueron menores en los porcentajes siguientes: lodo de papel 29.82%, olote-cemento 33.68%, vidrio volcánico-cemento 35.28%, poliestireno 74.43%, poliuretano 81.76%, fibra de vidrio 68.84%, fibra de coco-cemento 29.96% y corcho 69.77%. Lo anterior indica que los paneles modulares de ferrocemento con poliuretano intermedio presentan mayor ahorro energético.

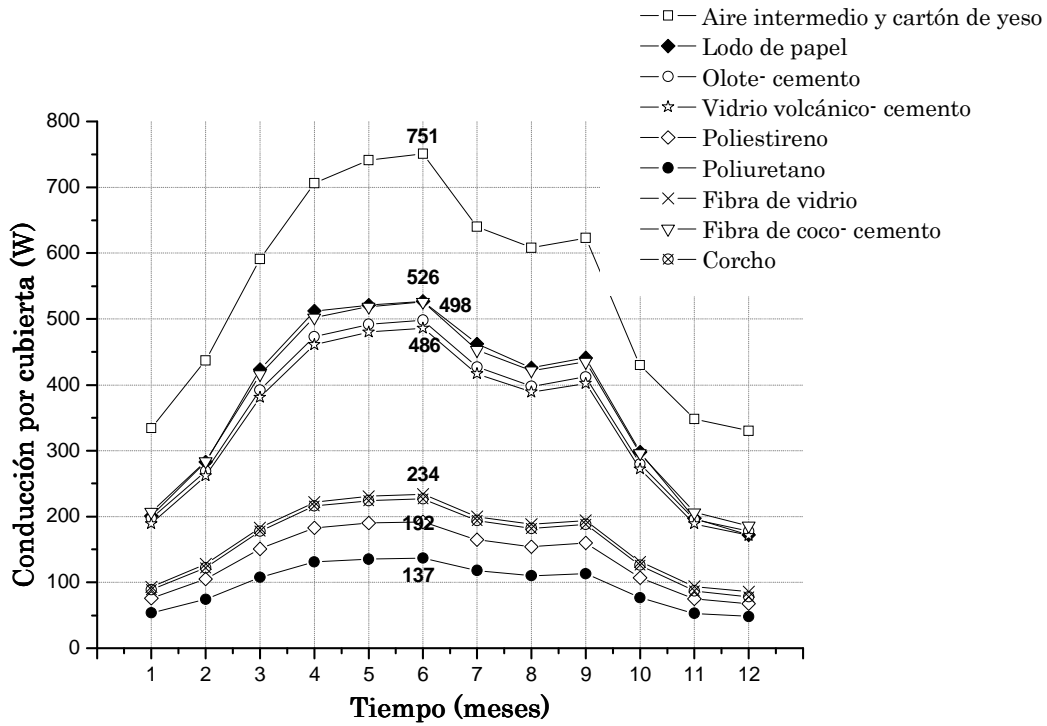


Figura 50. Ganancia por conducción en cubiertas por cada aislante.

El enfriamiento máximo requerido comparado con el sistema constructivo de muros y cubierta de ferrocemento *in situ* (figura 51), fue 24.8% menor en el sistema constructivo de muros de bloque de concreto y cubierta de casetón de poliestireno, 21.5% menor en el sistema constructivo de muros y cubierta de paneles modulares de ferrocemento, 35.6% menor en el sistema constructivo de muros de ladrillo y cubierta de concreto armado, 33% menor en el sistema constructivo de muros y cubierta de paneles modulares de ferrocemento con olote-cemento y 34.8% menor que el sistema constructivo de muros y cubierta de paneles modulares de ferrocemento con vidrio volcánico-cemento.



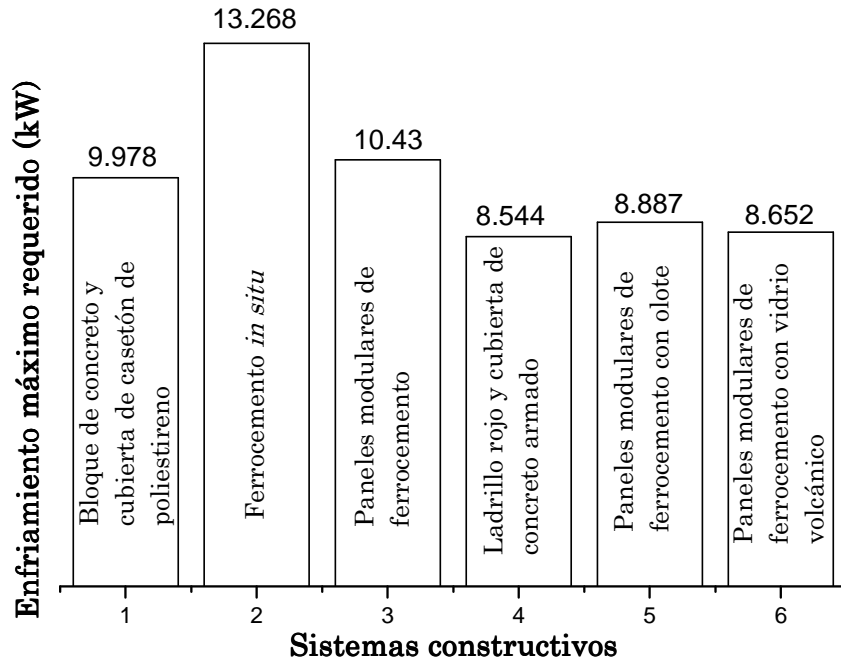


Figura 51. Enfriamiento máximo requerido.

En este sentido, para lograr condiciones de confort térmico en la vivienda simulada con el sistema constructivo de muros y cubierta de ferrocemento se requirió de un equipo de refrigeración con capacidad aproximada de 3.77 toneladas nominales de refrigeración, mientras que para lograr condiciones de confort térmico con el sistema constructivo de bloque de concreto común y cubierta de vigueta y casetón de poliestireno 2.84 toneladas nominales de refrigeración, y el sistema constructivo de muros y cubierta de paneles modulares de ferrocemento 2.96, el sistema constructivo de paneles modulares de ferrocemento con olote-cemento 2.53, los paneles modulares con vidrio volcánico-cemento y el sistema constructivo de muros de ladrillo rojo común y cubierta de concreto armado es de 2.46 y 2.43 toneladas nominales de refrigeración respectivamente.

En el caso de los materiales aislantes comparados con el aire intermedio y cartón de yeso, el lodo de papel fue 6.55% menos, olote-cemento 12.72% menos, vidrio volcánico-cemento 15.03% menos, poliestireno 23.90% menos, poliuretano 32.20% menos, fibra de vidrio 27.96% menos, fibra de coco-cemento 9.68% menos y corcho 29.24% menos carga.

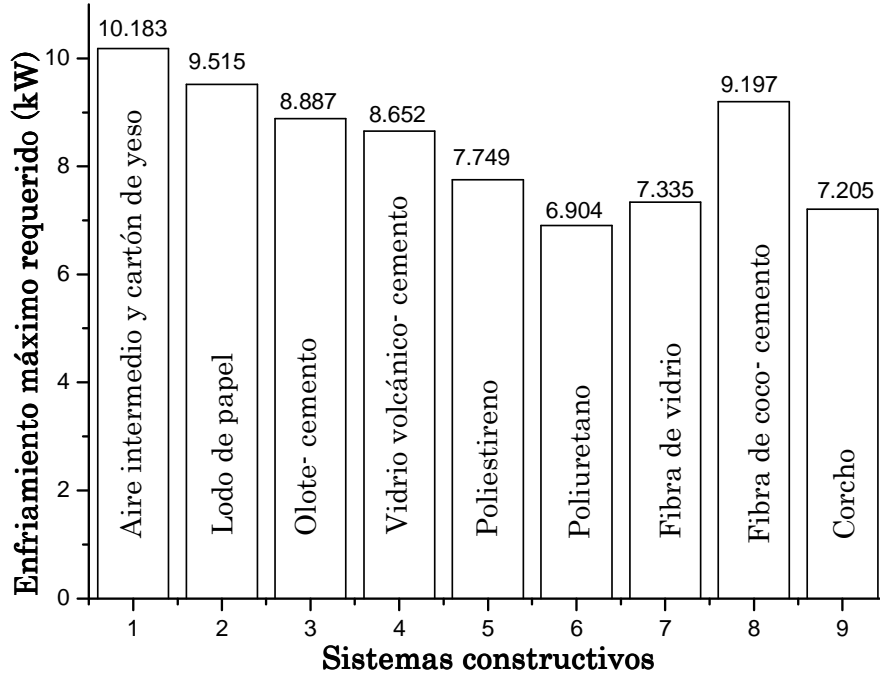
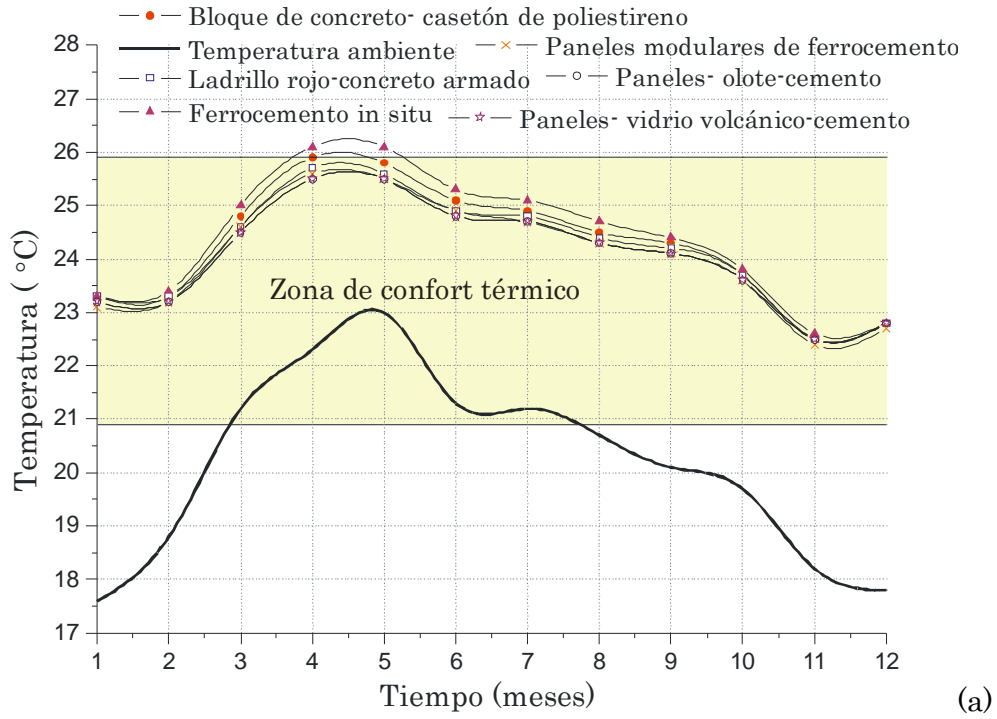


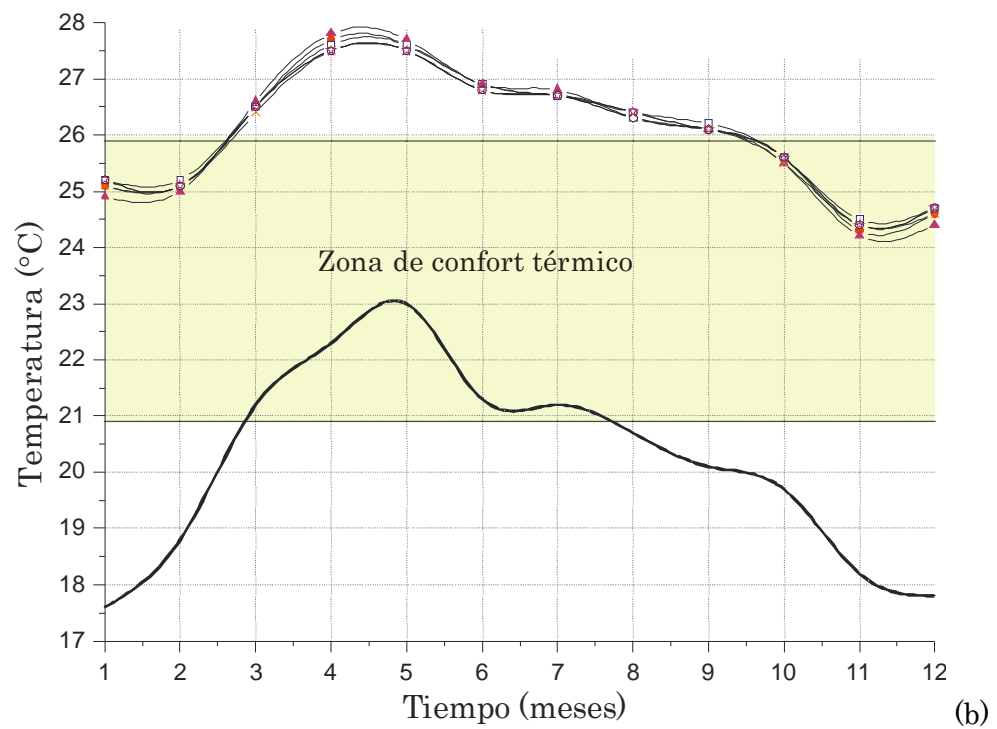
Figura 52. Enfriamiento máximo requerido por cada aislante.

### 4.3.3 Temperatura interior y confort térmico

La figura 53 muestra el comportamiento promedio de la temperatura interior en planta baja, (a) sin considerar la carga interna, (b) considerando la carga interna (cargas generadas por iluminación, equipo y personas). Cuando no se considera la carga interna, se visualizó que debido al amortiguamiento térmico que representa la planta alta para la planta baja, las temperaturas de los meses de enero a marzo y de junio a diciembre, se encontraron dentro del rango de confort térmico conforme al modelo utilizado.



(a)



(b)

Figura 53. Temperatura interior promedio en planta baja, (a) sin considerar la carga interna, (b) considerando la carga interna.

La temperatura interior máxima promedio se presentó al utilizar muros y cubierta de ferrocemento, y la temperatura mínima promedio se presentó al utilizar este mismo material. Lo anterior debido a que la transferencia de calor en el ferrocemento ocurre con mayor velocidad comparado con el bloque de concreto común, ladrillo común y paneles modulares de ferrocemento. La figura 45 b muestra los resultados cuando se toma en cuenta las ganancias internas por equipo (238.86 W/m<sup>2</sup>), iluminación (20.50 W/m<sup>2</sup>) y usuarios (185 W/persona).

El resultado indica que en los meses de mayo y junio las temperaturas se encontraron fuera del rango de confort térmico por 2 °C y abril, junio, julio, agosto y septiembre por menos de 1 °C. Comparado con resultados de Mecott *et al* (2007a) de una vivienda sin consideraciones bioclimáticas, el comportamiento es favorable por más de 3 °C ya que éstas tienen temperaturas hasta de 29.5 °C y se encuentran en disconfort durante todo el año.

Al considerar las cargas internas la temperatura se incremento hasta 2 °C en la planta baja y el comportamiento de los materiales de acuerdo al uso en condiciones reales del edificio, se manifestó de la manera siguiente:

1. La vivienda simulada con el sistema constructivo de muros de bloque de concreto común y cubierta de vigueta y casetón de poliestireno, aumentó 1.3 °C.
2. La vivienda simulada con el sistema constructivo de muros y cubierta de ferrocemento *in situ*, aumentó 1.7 °C.
3. La vivienda simulada con el sistema constructivo de muros y cubierta de paneles modulares de ferrocemento incrementó 1.9 °C, en los meses críticos de verano.
4. La vivienda simulada con el sistema constructivo de muros de ladrillo rojo común y cubierta de concreto armado incrementó 1.9 °C.
5. La vivienda simulada con paneles modulares de ferrocemento con olote-cemento incrementa 2 °C.
6. La vivienda simulada con paneles modulares de ferrocemento con vidrio volcánico-cemento incrementó 2 °C.

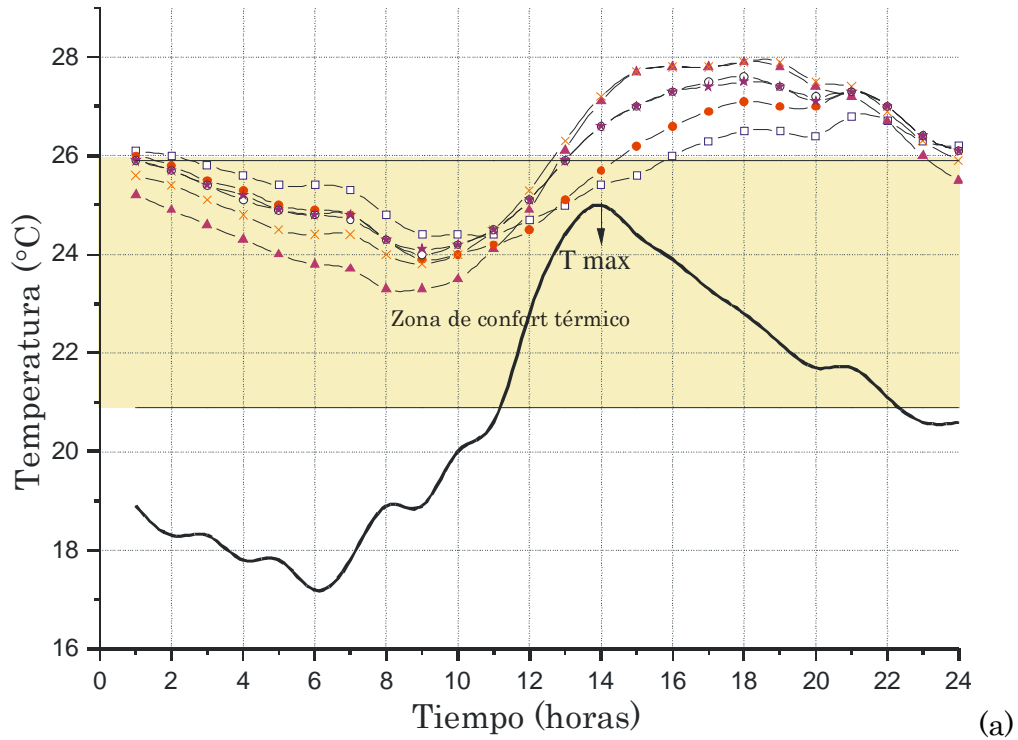
La planta alta presentó un comportamiento similar a la planta baja; sin embargo, la planta alta se enfría más rápido que la planta baja por la absortividad y el efecto del enfriamiento radiactivo nocturno, y como el ferrocemento es el que presenta menor retardo térmico, la diferencia de la temperatura ambiente y la temperatura interior, es menor.

#### 4.3.4 Efectos de la carga térmica

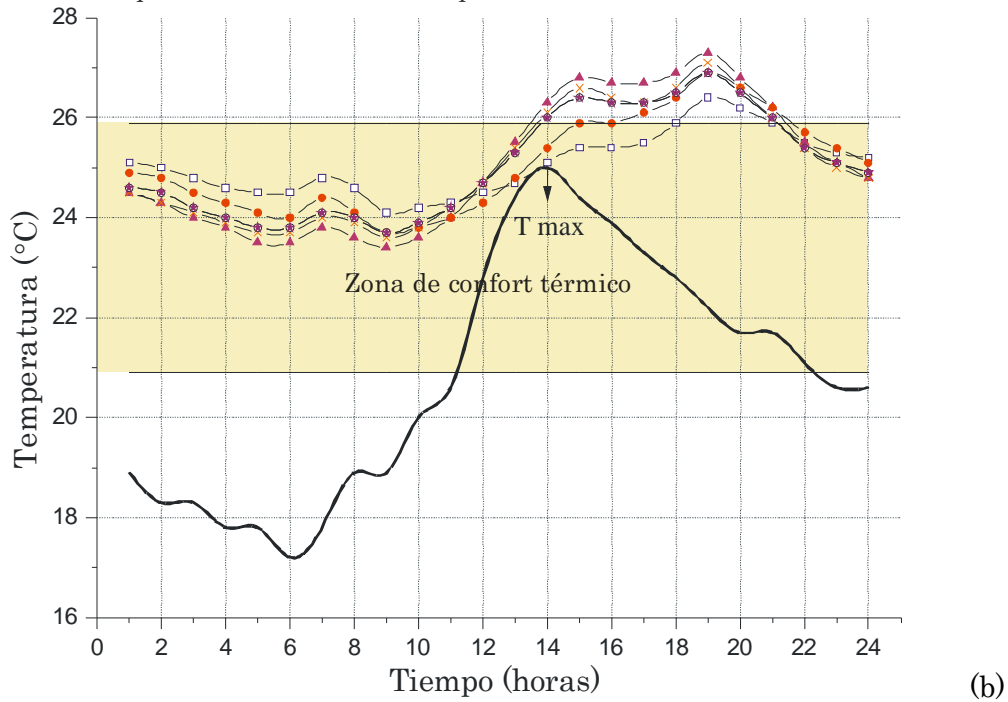
Uno de los datos clave para este análisis es el horario en que se presentan las temperaturas máximas y mínimas, el caso de junio es de 9 horas y de diciembre 7 horas. En la figura 54 se muestra la temperatura interior del 11 de junio en planta alta y planta baja.

De acuerdo al método gráfico por diferencial de temperaturas exterior e interior, las viviendas simuladas con el sistema constructivo de muros de bloque de concreto común y cubierta de casetón de poliestireno y muros de ladrillo rojo con cubierta de concreto armado presentan siete horas de retraso térmico, el sistema constructivo de muros y cubierta de ferrocemento *in situ*, paneles modulares de ferrocemento con aire, olote-cemento, vidrio volcánico-cemento, presentan cuatro horas de retraso térmico.

El comportamiento de los aislantes fue similar para todos los casos, cuatro horas de retardo térmico, esto debido a que se simularon con el mismo sistema constructivo de muros y cubiertas de paneles modulares de ferrocemento.



- Temperatura ambiente
- ◻ — Ladrillo rojo- concreto armado
- ▲ — Ferrocemento *in situ*
- ● — Bloque de concreto- casetón de poliestireno
- × — Paneles modulares de ferrocemento
- ○ — Paneles- olote cemento
- \* — Paneles- vidrio volcánico cemento



54. Temperatura interior de un día promedio (11 de junio). a) planta alta-sistemas, b)planta baja-sistemas.

En la figura 55 se muestra el retraso térmico para invierno, donde se comprueba que es menor para los meses de invierno debido a que se reduce tres horas. En el caso de la comparación con los aislantes se reduce dos horas, pero el comportamiento es igual que en verano.

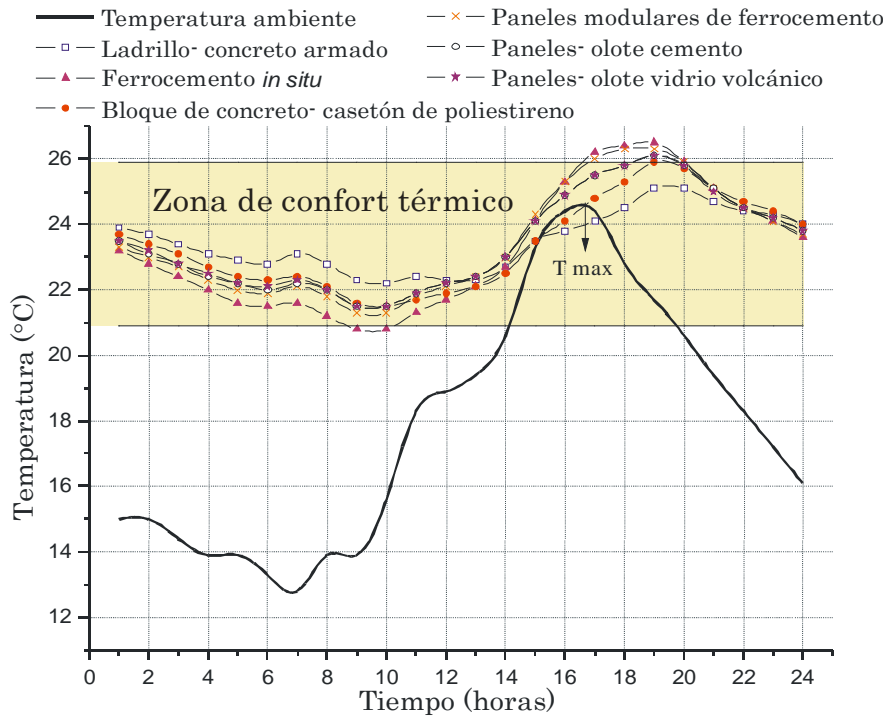
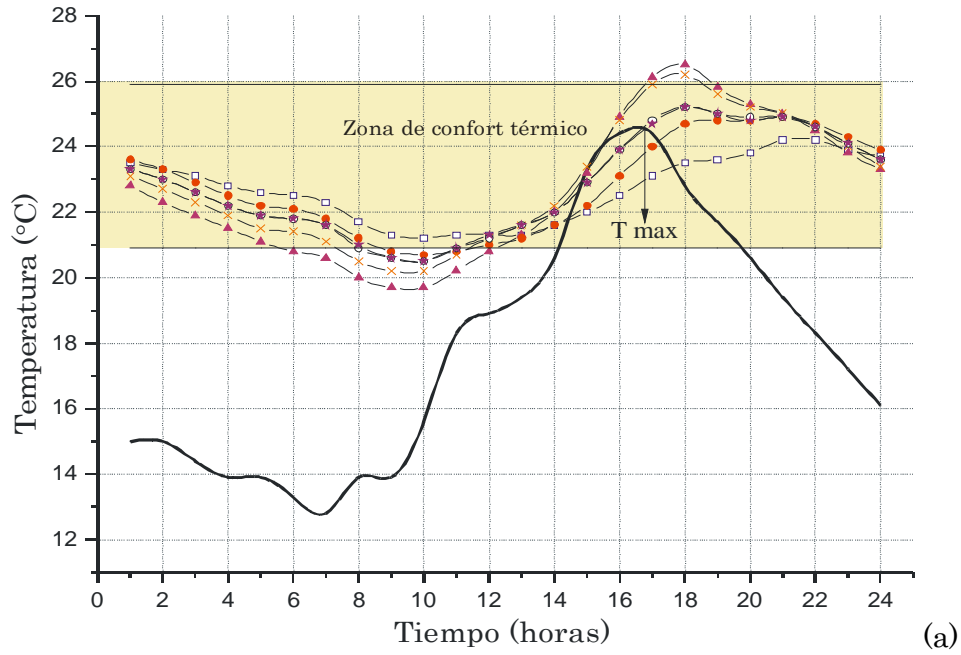


Figura 55. Temperatura interior de un día promedio (10 de diciembre). a) planta alta-sistemas, b) planta baja-sistemas.

### 4.3.5 Evaluación del diseño bioclimático

Para comprobar que se tomaron las decisiones correctas de diseño bioclimático, se evaluó en cuatro apartados: 1) elementos de sombra, 2) por orientación de la fachada principal, 3) tamaño de ventanas y 4) cantidad de energía requerida para lograr el confort térmico por diseño, sistema constructivo y material aislante.

#### 4.3.5.1 Elementos de sombra

El resultado de la simulación térmica señala que la vivienda consume mayor energía sin el uso de elementos de sombra debido a que la conducción por muros es 8.76% mayor y por ventanas 1.58% mayor que con el uso de aleros (ver figura 56). Por lo que el uso de este tipo de dispositivos ayudó a aumentar la eficiencia energética por diseño.

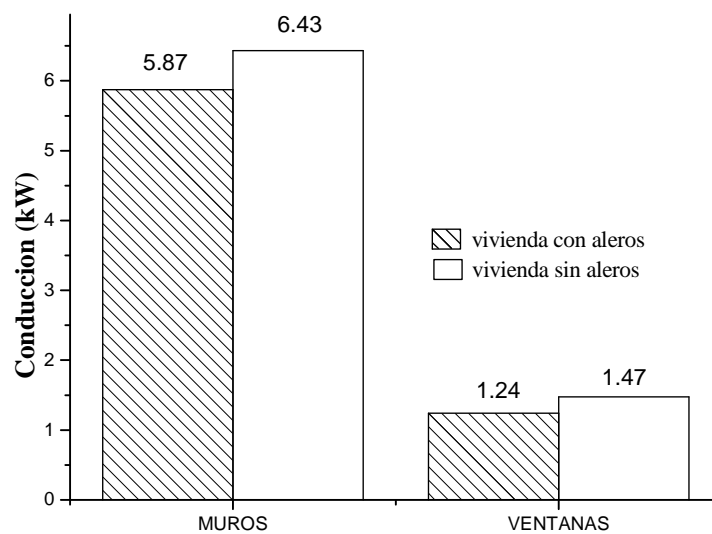


Figura 56. Conducción con y sin elementos de sombra.

#### 4.3.5.2 Orientación

De acuerdo a los resultados de la simulación térmica, la orientación con mayor ahorro energético es la fachada principal hacia el sur, debido a que la fachada norte tiene 8.16% más de carga total de enfriamiento, la fachada este 7.5% y la fachado oeste 6.28% (ver figura 57).



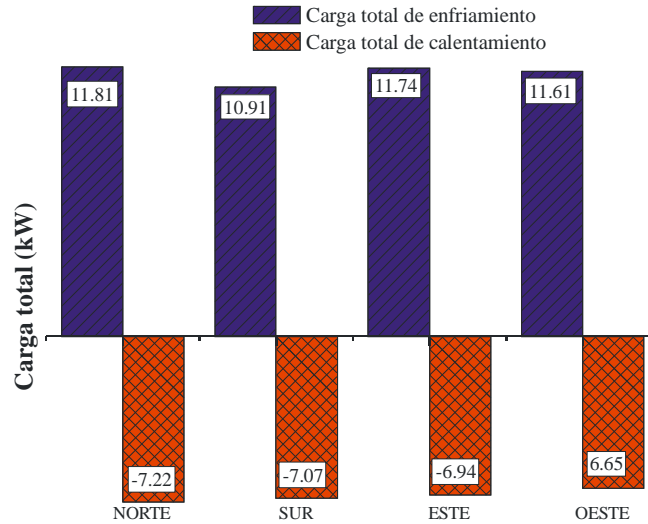


Figura 57. Comparación por orientación.

#### 4.3.5.3 Ventanas

Para la evaluación con respecto al tamaño de las ventanas se consideraron grandes (1.20 m x 2.00 m), medianas (1.00 m x 1.50 m) y chicas (0.60 m x 0.60 m). El resultado indica que la carga total por ventanas es menor con el tamaño chico (ver figura 58); sin embargo, no proporciona la cantidad de luxes requerido para los espacios interiores, por lo que se optó por el uso de las ventanas medianas que presentó menor carga térmica con respecto a las grandes y mantuvo iluminados los espacios interiores.

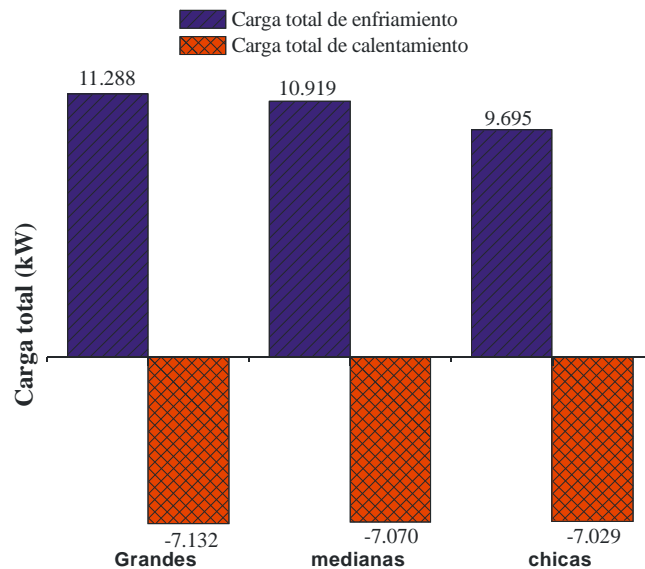


Figura 58. Comparación de tamaño de ventanas

#### 4.3.5.4 Energía

Para evaluar el efecto del diseño bioclimático en el ahorro de energía, se realizó una simulación del prototipo de vivienda bioclimática comparada con el prototipo de vivienda de construcción en serie, ambas simulaciones se hicieron con las mismas condiciones, (materiales constructivos y archivo meteorológico). Posteriormente se realizó una simulación del prototipo de vivienda de construcción en serie que comúnmente se construye en la zona de estudio, en donde se consideró el sistema constructivo de muro de bloque de concreto común y cubierta de vigueta y casetón de poliestireno. Se determinó el máximo requerimiento de energía a retirar por m<sup>3</sup> y finalmente se hizo un análisis comparativo.

En la evaluación por simulación de la vivienda con criterios bioclimáticos, se tuvo una eficiencia del 43% (ver figura 59), y en los casos donde se evaluó el efecto por el uso del sistema constructivo se observó una mejora de hasta 4% (ver figura 60). Lo anterior mostró una reducción de carga térmica significativa por las estrategias bioclimáticas de diseño como lo fueron: a) las dimensiones y sombreado de ventanas con lo que se redujo la ganancia por radiación solar directa y conducción por área de vidrio, b) la reducción de áreas de muros expuestos a la radiación solar directa en orientaciones este y oeste, y c) así como la inclinación de cubiertas con lo que se redujo la radiación directa.

Por lo que se observó que conforme a los estudios realizados por Mecott et al. (2007b), y los resultados obtenidos en este caso de estudio, entre más deficiente sea el diseño arquitectónico con respecto a su adecuación al clima, el efecto en la carga térmica por uso de materiales serán más significativo, lo que demuestra que solo con un diseño adecuado se puede tener ahorro sin hacer cambios considerables en el tipo de materiales.

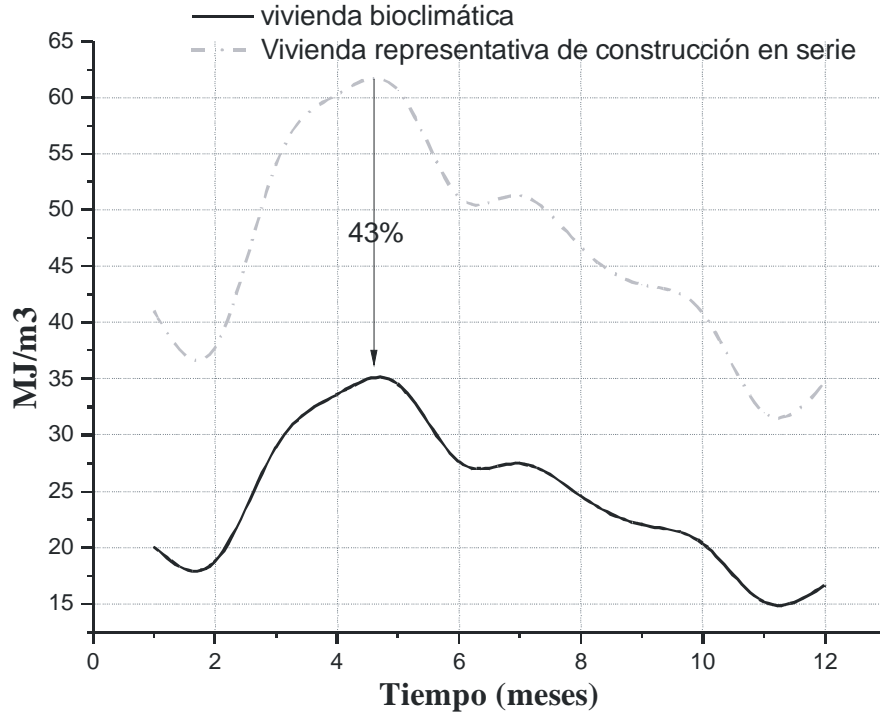


Figura 59. Gráfica comparativa de la cantidad de energía a retirar en MJ/ m<sup>3</sup> por diseño

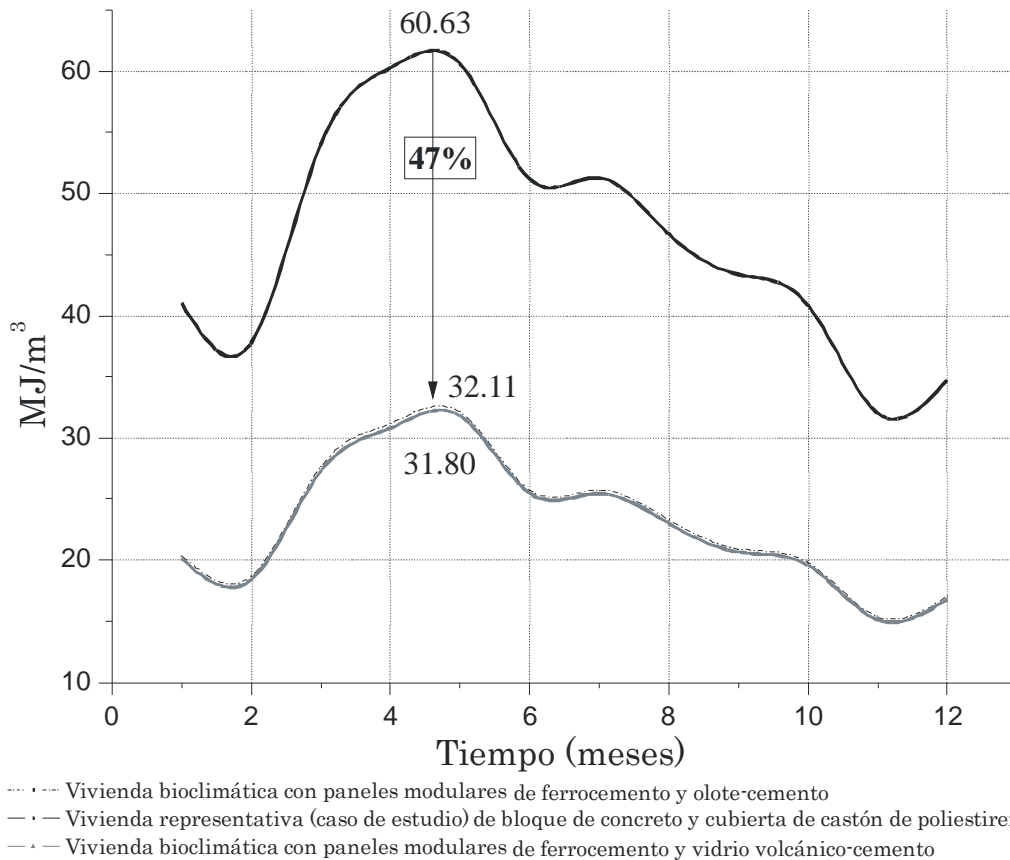


Figura 60. Gráfica comparativa de la cantidad de energía a retirar en MJ/ m<sup>3</sup> por diseño y material.

# Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

---

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones originadas con base en el proceso del estudio realizado y los resultados obtenidos:

## 5.1 Conclusiones

- Las estrategias pasivas de adecuación al clima aplicables a la ciudad de Oaxaca son: 1) Masa térmica, 2) Ventilación natural y 3) Calentamiento solar pasivo.
- La ventilación natural se debe considerar en el diseño arquitectónico durante todo el año en los horarios de 14:00 a 17:00 horas por medio de ventilación cruzada.
- Las estrategias de diseño que presentaron una menor carga térmica fueron: 1) reducción de área de envolvente expuesta orientada al oeste, 2) ubicación hacia el norte de los espacios generadores de carga interna (cocina), 3) Uso de amortiguamiento térmico con espacios como pasillos y guardarropa, 4) aplicación de materiales aislantes en los muros de mayor exposición a la radiación solar directa y 5) la orientación de ventanas y rejillas móviles de verano a invierno para propiciar la ventilación cruzada en todos los espacios.
- De acuerdo a la norma ASTM C 332-99, las mezclas olote-cemento y vidrio volcánico-cemento analizados se encontraron en el grupo II de aislantes que contempla materiales con valor de conductividad térmica de 0.15 a 0.43 W/m°C.
- El sistema constructivo de muros y cubierta de paneles modulares de ferrocemento con olote-cemento presenta 26.7% mejor eficiencia energética que el sistema constructivo de muros y cubierta de ferrocemento *in situ*, y 10 % que el sistema constructivo de muros y cubierta de paneles modulares de ferrocemento con aire intermedio. Con respecto al sistema constructivo de muros de bloque de concreto y cubierta de polietileno presenta 3% mejor eficiencia energética y comparado con el

sistema constructivo de muros de ladrillo rojo y cubierta de concreto armado 10% menor eficiencia energética.

- El sistema constructivo de muros y cubierta de paneles modulares de ferrocemento con vidrio volcánico-cemento presenta 28.30% mejor eficiencia energética que el sistema constructivo de muros y cubierta de ferrocemento *in situ* y 11.80% que el sistema constructivo de muros y cubierta de paneles modulares de ferrocemento con aire intermedio. Con respecto al sistema constructivo de muros de bloque de concreto y cubierta de polietileno presenta 4% mejor eficiencia energética y comparado con el sistema constructivo de muros de ladrillo rojo y cubierta de concreto armado 9% menor eficiencia energética.
- Los materiales analizados reducen mayor carga energética que la fibra de coco-cemento y lodo de papel y menor que el poliuretano, polietileno, fibra de vidrio y corcho.
- Con el uso del diseño bioclimático y el sistema constructivo de muros y cubierta de paneles modulares de ferrocemento y vidrio volcánico-cemento se tuvo un ahorro de 47% de energía, comparado con la vivienda representativa de construcción en serie de muros de bloque de concreto y cubierta de casetón de polietileno.
- Con el presente estudio se demostró que es posible que por medio de la adecuación del diseño arquitectónico al clima, con estrategias pasivas y uso de materiales constructivos, con aislantes alternativos de origen local, se puedan tener condiciones de confort térmico del usuario, así como ahorros por consumo energético para climatización artificial.

## 5.2 Recomendaciones

Las recomendaciones que aquí se presentan, pretenden servir para mejorar aspectos del estudio realizado, y realizar otros estudios que den aportaciones en el área del diseño bioclimático y desarrollo de materiales para construcción.

- Aún cuando se hicieron propuestas de adecuación pasiva para el diseño bioclimático desarrollado, es importante la evaluación *in situ* de estrategias y/o dispositivos pasivos de adecuación climática.
- Debido a que por limitaciones de tiempo, la propuesta resuelve el diseño de un solo prototipo, es necesario realizar estudios sobre el diseño de conjuntos habitacionales completos, que implican otras consideraciones.
- Es necesario realizar estudios que consideren el desarrollo de materiales para construcción desde un punto de vista térmico y estructural.
- Se recomienda hacer estudios de caracterización térmica de carrizo, paja, bagazo de maguey y fibra de coco, debido al potencial observado cualitativamente como aislantes alternativos.
- Es necesaria la estimación de propiedades térmicas de materiales de construcción locales o regionales, para una mejor simulación de comportamiento térmico de los edificios que se diseñe o construya.

# Referencias

Alavéz, R. R. (2004) Análisis termofísico de materiales vegetales e industrializados aplicados a techumbres, como recurso bioclimático en el pacífico sur del estado de Oaxaca. Tesis de maestría Universidad Autónoma Metropolitana.

Al-Jabri K.S, Hago A.W, Al-Nuaimi A.S, Al-Saidy A.H. (2005) Concrete block for thermal insulation in hot climate. *Journal cement and concrete research*, 35,pp. 1472-1479.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2001) ASHRAE Handbook of fundamentals. Atlanta.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2004) ANSI/ASHRAE 55-2004: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta.

ASTM-C 177-97 Standard test method for steady-state heat flux measurement and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus.

ASTM-C 332-99 Standard specification for lightweight aggregates for insulation concrete.

ASTM-C 351-92 Standard test method for mean specific heat of thermal insulation

ASTM-C 518-98 Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus.

ASTM-C 1058-97 Standard practice for selecting temperatures for evaluating and reporting thermal properties of thermal insulation.

Auliciems, A (1981) Towards a psycho-physiological model of thermal perception, *Int.J. of Biometerology*. 26 Pp. 69-86.

Auliciems, A, Dear R.(1998) Thermal adaptation and variable indoor climate control. *Advances in Bioclimatology 5. Human Bioclimatology*. Sydney.

Auliciems, A. Szokolay, S. (1997) *Thermal Comfort. Notes of Passive and Low Energy Architecture International*. Brisbane: PLEA- University of Queensland.

Bansal, N, BERD, H, Minke, G (1994) *Passive Building Design. A Handbook of Natural Climatic Control*. Elsevier Science B.V. Amsterdam, London, New York, Tokyo.

Bedford, T (1936). *The warmth factor in comfort at work: a physiological study of heating and ventilation*. Industrial Health Research Board Report N°76.

Bojórquez ,G., Gallegos, R., Luna A. (1998) Evaluación térmica experimental de un concreto ligero con agregado residual de origen orgánico. XXII Semana Nacional de Energía Solar (ANES), Mexicali B.C.

Bojórquez M., G. (1999) Lodo de papel: Propuesta de un concreto ligero para bloques de mampostería y su evaluación térmica. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Baja California.

Bojórquez G, Luna A, Gallegos R, (2000) Estudio de comportamiento térmico de tres prototipos de vivienda para un clima desértico. Memoria millenium Solar forum 2000 International Solar Energy Society. México, D.F.

Brow, G (1994) Sol, Luz y Viento: estrategias para el diseño. Editorial Trillas. México, D.F.

Chancellor, W. 1996 Ferrocement floating house: thermal comfort. Journal de Ferrocement. 26 Pp. 251 -257

Crawley, B. Drury, Hand Jon W., Kummert, Michaël, Griffith, Brent T. (2005) Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Report by department of energy the United States of America, The University of Stratholyde and the University of Wisconsin.

DIN V18165-1. (2002) Prenorm or fibrous insulation materials. Berlín

Docherty, M., Szokolay V. (1999) Climate analysis. Pasive and Low Energy Architecture International (PLEA). The University of Queensland Printery. Brisbane, Australia.pp.23.

Duffie, J.A., Beckman, W.A (1991) Solar engineering of thermal processes. Ed. Wiley Interscience. P. 14.

Eppel, H. and Lomas, K. (1995) Empirical validation of three simulation programs using data from a passive solar building. In International Building Performance Simulation Association (Ed) Proceedings of the Building Simulation 1995. Madison. Pp. 588-595.

Felder, R.M. y Rousseau, R.W, (2005) Principios elementales de los procesos químicos. Editorial Limusa, wiley. 3a. Ed, México.

Fernández, A (1996) Ferrocement research and development in Oaxaca, *Journal of ferrocemento*, 26, Pp. 259-266

Fernández, A. y Montes, P., (2000) A monolithic ferrocement auditorium, Journal of Ferrocement. 30, Pp. 59-68

Fernández, A., Alavez, R. and Montes, P., (2001) Small, resistant, durable and low cost houses, Proceedings of the 7° International Symposium on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites, (ed. M.A. Mansur and K.C.G.Ong) National University of Singapore, Pp. 307-316.

Fernández, A., Juarez, L. and Cano, F. (1998) A resistant, comfortable and economical school of ferrocement, Journal of Ferrocement, vol. 28, n° 4, Oct, pp. 351-57.



Ferreiro, L, Fuentes, V.A, García, J. Gutierrez, S. (1991) Manual de arquitectura solar. Trillas, Mexico D.F.

Fuentes F. V. (1994) Metodología de Diseño Bioclimático, Tesis Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana. México.P, 247.

Fuentes, V., Morillon, D. (2003) Notas del curso Arquitectura Bioclimática. Asociación Nacional de Energía Solar (ANES).

Fuentes V. (2002) Hoja de cálculo de análisis climático. Universidad Autónoma Metropolitana.

Fernández A (2001) Propuesta de un modelo de adaptación para predecir la temperatura de neutralidad en edificios de oficinas ventilados de manera natural con base a los resultados del proyecto de investigación ASHRAE RP\_884. 26 semana Nacional de Energía Solar (ANES).

García, E. (1981) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Editorial Trillas, México D.F.

Gallegos, R (2001) Dinamic, hoja de cálculo para flujo de calor y temperaturas en muros en estado dinámico. Comunicación personal. Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Arquitectura. Mexicali, Baja California.

Gallegos R, Luna A, Bojórquez G (1997) Estimación experimental de conductividad térmica en materiales de construcción. XXI Semana Nacional de Energía Solar. Asociación Nacional de Energía Solar. Chihuahua, Chih.

Gallegos R, Ochoa A, Bojórquez G, Luna A. (2003) Determinación experimental del grado de sellado de la vivienda de Mexicali. XXVII Semana Nacional de Energía Solar. Asociación Nacional de Energía Solar. Chihuahua, Chih.

Gallegos R, Bojórquez G, Luna A, Romero R, Corral M. (2005) Evaluación térmica mediante simulación de un edificio educativo en Mexicali Baja California. COTEDI 2005, Mexico D.F.

Givony, B (1969) Man, climate and Architecture. New York: Van Nostrand Reinhold.

Givony, B (1998) Climate consideration in building and urban design. Jhon Wiley & Sons New York.

González C.E. (2002) Selección de materiales en la concepción arquitectónica bioclimática. En Rodriguez M. (Ed). Estudios de Arquitectura Bioclimática, vol. IV. Limusa. Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México.

Heard, C. (199) Modelado de cargas térmicas en edificios, Documento (mimeo) Instituto de Investigaciones Eléctricas, México.

Hernández Ruíz Joel (2006) Tesis de maestría en Ciencias. Instituto Politécnico Nacional – CIIDIR unidad Oaxaca. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca.

Humphreys, M, Nicol, J. (1978) Understanding the adaptive approach to thermal comfort, ASHRAE Technical Bulletin 14.

International Organization for Standardization (2005). ISO 7730: 2005 (E) Ergonomic of the thermal environment analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Ed. International Organization for Standardization. Ginebra.

ITEM Systems (1995) DOE-Plus User's manual, Innovative Technologies for Energy Management. U.S.A.

Karlsson, J, Ross, A, Karlsson, B. (2002) Building and climate influence on the balance temperature of buildings. Journal Building and environment 38 Pp. 75-81.

Koenisberger, Ingersol, Mayhew, Szokolay (1977) Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales. Paraninfo, Madrid España.

Lienhard IV J.H. y Lienhard V J.H. (2006) A heat transfer text book. Tercera edición, Phlogiston press, Cambridge Massachusetts. Pp. 10-17.

Lira, C. L., Morales, R.J.M., Chavéz, C.I. (1998) Equipo de medición de conductividad térmica para materiales de construcción desarrollado en el CENIDET. XXII Semana Nacional de Energía Solar (ANES), Mexicali B.C.

Lomas, K. (1991a) Dynamic thermal simulation models of buildings: New method for empirical validation. BSER&T 12 (1). Pp 25-37.

Lomas, K. (1991b) Availability of monitored hourly building performance data for validating dynamic thermal models of buildings. BSER&T 12 (1). Pp. 71-74.

López C. H. (2005) Desarrollo de un sistema constructivo modular de mortero armado para vivienda de interés social. Tesis de postgrado, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.

Luna A. (1999) Sílice de cerro prieto como agregado para la elaboración de elementos constructivos. Tesis de maestría en Arquitectura. Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Arquitectura. Mexicali, Baja California.

Luna A. (2005) Hoja de cálculo para determinar las estrategias de diseño bioclimático. Comunicación Personal. Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Arquitectura. Mexicali, Baja California.

Luna, A. (2006) Hoja de cálculo para procesamiento de datos meteorológicos. Comunicación Personal. Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Arquitectura. Mexicali, Baja California.

M.Resheidat, N. Al-Araji, M.Ghanma (2002) Effect of charcoal on the porosity and properties of concrete. Journal Innovation and developments in concrete materials and construction, Thomas Telford, UK, pp. 615-624.

Marion, W. y Urban, K, (1995) User's Manual for TMY2s Typical Meteorological Years, NREL/SP-463-7668, National Renewable Energy Laboratory.

Masmoudi Soraya, Mazouz Said, (2004) Relation of geometry, vegetation and thermal comfort around buildings in urban settings, the case of hot arid regions. Journal energy and buildings,36,pp.710-719

Mills. A.F. 1999. *Heat Transfer*. Second edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Mathews, E.H. Richards, P.D. (1993) An efficient tool for future building design. Building and environment, 28 Pp. 409-417.

Mecott, S. Gallegos, R. Bojórquez, G. Luna, A. Alavéz, R, Cano P.F. (2007a) Eficiencia energética de cuatro sistemas constructivos. Congreso Internacional de Aislamiento Térmico y Acústico CIATEA. Gijón España.

Mecott-Gómez, S. Cano-Barrita, P.F. Alavéz-Ramírez, R. Gallegos-Ortega, R. Bojórquez-Morales, G. Luna-León, A. (2007b) Comportamiento térmico y diseño bioclimático de un prototipo de vivienda para Oaxaca, Oaxaca. XXXI Semana Nacional de Energía Solar. Zacatecas, Zac. Pp 161-166.

Mills, A.F. (1999) Heat transfer. Second edition, Prentice Hall. USA.

Morel, J, Mesbah, A, Oggero, M, Walker, P. (2000) Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction. Journal Building environment. 36 Pp. 1119-1126.

Morales ,V, Domínguez, M.,Ortiz G, Ramírez A (2005) Conferencia internacional de ecomateriales. Cuba.

Morillón, G.D. (2000) Metodología para el diseño bioclimático. México, Asociación Nacional de Energía Solar. Mexico, D.F.

Morillón D., Fuentes V. (2003). Notas del curso Arquitectura Bioclimática. Asociación Nacional de Energía Solar.

Mwale, O. D. (2002) Predicting ondoor temperatures in closed buildings with high thermal mass. Journal of Energy and building, 35 Pp. 851-862.

Nalls, D.H, Crawley, D.B (1983) Energy simulation in the building design process, ASHRAE Journals. 25 Pp. 28-32.

Norma Mexicana – NMX C 126. Materiales termoaislantes en forma de bloque o placa- densidad- determinación.

Norma Mexicana – NMX C 181-1984 Materiales termoaislantes

Nyuk, H. W., Khee, P. L., Feriadi, H. (2000) The use of performance based simulation tools for building design and evaluation- a Singapore perspective. *Journal Building and Environment*. 35 Pp. 709-736.

Oligay, V (1963) *Desing with the climate: bioclimatic approach to architectural regionalism*. New Jersey: Princenton, University Prees.

Olvera, A. (1994) *El Ferrocemento y sus aplicaciones*. Ed. Instituto Politécnico Nacional. México D.F.

Papadopoulos, A.M. (2005) State of art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Journal Energy and buildings*, 37. Pp 77-86.

Porta- Gángara, Rubio, E, Fernández, L., Gómez, M. (2001) Effect of passive techniques on interior temperatura in small houses in the dry, hot climate of Nortwestern México. *Journal Renewable energy*. 26 Pp. 121-135.

Pinazo, J. (1999) *Manual de climatización, Tomo 1: Transformaciones psicrométricas*. Universidad Politécnica de Valencia, España.

R.Demirboga, R. Gul, (2003). The effect of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. *Journal cement and concrete research* 33, pp. 723-727.

Remund J., Lang R.,Kunz S.(1999). *METEONORM*, Global meteorological database for solar energy and applied climatology. Meteotest, Fabrikstrasse 14, CH-3012 Bern, Switzerland.

Salas, J (1992) *Contra el hambre de vivienda, soluciones tecnológicas latinoamericanas*. Ed. Escala, Colombia.

Schjetman, M. (1984) *Principios de diseño urbano ambiental*. Trillas, Mexico, D.F.

Simonson, J (1975) *Engineering Heat Transfer*. Mac Millan Press LTD. London, England.

Short, A, Kinninburg, W. (1977). *Concreto ligero: cálculo, fabricación, diseño y aplicaciones*. Limusa. Cd. de México.

Sol Sampedro Francisco J. (2006) *Estrategias de diseño bioclimático y zona conurbada*. Tesis de maestría en Ciencias. Instituto Politécnico Nacional - CIIDIR-Unidad Oaxaca. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca.

Sullivan, R (1998) *Validation Studies of the DOE-2 Building, Energy Simulation Program*. Laurence Berkeley National Laboratory, University of California Berkeley.

Szokolay, S.V. (1984a). *Passive and Low energy Design for Thermal and visual comfort*. PLEA 84 Pergamon Press. p11-28. N.Y. USA.

Szokolay, S. V. (1984b) *Energetic in designs*. University of Queensland, Australia

United States Department of Energy (1982) *Doe-2: Engineers Manual Version 2.1A*. Technical Information Center. Lawrence Berkeley Laboratory, Los Alamos National Laboratory.

Viqueira, R. (2001) *Introducción a la arquitectura bioclimática*. Trillas, Mexico, D.F.

Vitruvio, M. (Siglo I a.C). *Los diez libros de la Arquitectura*. (Reproducción digital basada en la edición de Madrid, en la Imprenta Real, 1787). Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes, 2002.

Watson and Labs (1983) *Climatic Building Design. Energy Efficient building principles and practice*. McGraw Hill. USA.

Watson, D, Labs, Kenneth (1980) *Climatic design for home building*. Guilford, CT.

Wong, N., Feriadi, H, Lim, P., Tham, K, Sekhar, C, Cheong, K. (2001) *Thermal comfort evaluation of naturally ventiled public housing in Singapore*. *Journal of Building and environment*, Vol 37. Pp 1267-1277.

Winkelman, F.C., Birdsall, B.E. , Buhl, W.F. , Ellington, K.L. , Erdem, A.E. , Hirschu, J.J. , Gates, S. (1993) *DOE-2 Supplement version 2.1E, LBL-34 947*, Lawrence Berkeley National Laboratory. Springfield: National Technical Information Service.

Yeang, Ken. 1999. *Proyectar con la naturaleza*. Ed. Trillas, Mexico. D.F

## Publicaciones realizadas con la presente investigación

**Mecott-Gómez S**, Alavéz Ramirez R, Cano Barrita P.F de J. (2005). *Diseño bioclimático de una vivienda de ferrocemento, para un clima templado seco, en la ciudad de Oaxaca*. Primer simposio de estudiantes del CIIDIR-IPN Oaxaca.

**Mecott-Gómez S**, Alavéz Ramirez R, Cano Barrita P.F de J. (2006). *Diseño bioclimático de una vivienda de ferrocemento, para un clima templado seco, en la ciudad de Oaxaca*. V congreso Internacional y XI congreso Nacional De Ciencias Ambientales, Oaxtepec, Morelos, México

**Mecott S**, Cano J, Gallegos R, Alavés R, Bojórquez G, Luna A. (2007). *Eficiencia energética en cuatro sistemas constructivos y la influencia del diseño bioclimático*. VI Congreso Internacional y XII Congreso Nacional De Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de Chihuahua y La Academia Nacional de Ciencias Ambientales

**Mecott Gómez Sildia** (2007). *Diseño bioclimático y eficiencia energética*. Tercera reunión de aspirantes al posgrado en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales (2007). CIIDIR-IPN unidad Oaxaca

**Mecott-Gómez S**, Gallegos-Ortega R, Bojórquez-Morales G, Luna-León A, Alavés-Ramirez R, Cano-Barrita P.F de J. (2007). *Eficiencia energética de cuatro sistemas constructivos*. Congreso Internacional de Aislamiento Térmico y Acústico. Universidad de Oviedo, Gijón, España.

**Mecott-Gómez S**, Cano-Barrita J, Alavés-Ramírez R, Gallegos-Ortega R, Bojórquez-Morales G, Luna-León A. (2007). *Comportamiento térmico y diseño bioclimático de un prototipo de vivienda, para Oaxaca, Oax*. XXXI Semana Nacional de Energía Solar. Universidad Autónoma de Zacatecas.

Alavés-Ramirez R, **Mecott-Gómez S** y Montes-García P. (2007). *Simulación del comportamiento térmico de una sala de juntas que utiliza materiales de reuso*. Congreso Internacional de Aislamiento Térmico y Acústico. Universidad de Oviedo, Gijón, España.

Cano-Barrita P.F.de J, Fernández-Gonzáles A, López-Calvo H.Z, Alavés-Ramírez R, **Mecott-Gómez S**, Jiménez-Quero V.G.(2006). *Technologies with low environmental impact suitable for civil engineering applications*. International Civil Engineering Education Congress 2006 (ICEEC 2006) and 7<sup>th</sup> National Civil Engineering Education Congress. Angeles University Foundation, Angeles City, Philippines

# Anexos

## Anexo 1

### Datos solares horarios del 21 de diciembre

Latitud: 16.5°

Longitud: -96.6°

Zona horaria: -90.0° (-6.0 hrs)

Orientación: 0.0°

Fecha: 21 Diciembre

Salida del sol: 06:53

Puesta del sol: 17:54

Corrección local: -24.3 min

Ecuación de tiempo: 2.1 min

Declinación: -23.5°

Local	(Solar)	Azimut	Altitud	Ángulo solar horizontal	Ángulo solar vertical	% de sombreado
07:00	(06:35)	115.0°	1.3°	115.0°	176.8°	-
07:30	(07:05)	117.4°	7.8°	117.4°	163.4°	-
08:00	(07:35)	120.2°	14.1°	120.2°	153.5°	-
08:30	(08:05)	123.5°	20.2°	123.5°	146.3°	-
09:00	(08:35)	127.4°	26.1°	127.4°	141.2°	-
09:30	(09:05)	132.1°	31.6°	132.1°	137.4°	-
10:00	(09:35)	137.6°	36.7°	137.6°	134.7°	-
10:30	(10:05)	144.3°	41.2°	144.3°	132.8°	-
11:00	(10:35)	152.2°	45.0°	152.2°	131.5°	-
11:30	(11:05)	161.3°	47.9°	161.3°	130.6°	-
12:00	(11:35)	171.4°	49.6°	171.4°	130.1°	-
12:30	(12:05)	-178.0°	50.0°	-178.0°	130.0°	-
13:00	(12:35)	-167.5°	49.1°	-167.5°	130.2°	-
13:30	(13:05)	-157.7°	46.9°	-157.7°	130.9°	-
14:00	(13:35)	-149.0°	43.7°	-149.0°	131.9°	-
14:30	(14:05)	-141.6°	39.6°	-141.6°	133.5°	-
15:00	(14:35)	-135.4°	34.8°	-135.4°	135.7°	-
15:30	(15:05)	-130.2°	29.5°	-130.2°	138.7°	-
16:00	(15:35)	-125.8°	23.9°	-125.8°	142.9°	-
16:30	(16:05)	-122.2°	17.9°	-122.2°	148.7°	-
17:00	(16:35)	-119.1°	11.7°	-119.1°	156.9°	-
17:30	(17:05)	-116.4°	5.4°	-116.4°	168.1°	-

### Datos solares horarios del 21 de agosto

Latitud: 16.5°  
 Longitud: -96.6°  
 Zona horaria: -90.0° (-6.0 hrs)  
 Orientación: 0.0°

Fecha: 21 Agosto  
 Salida del sol: 06:14  
 Puesta del sol: 18:44

Corrección local: -29.5 min  
 Ecuación de tiempo: -3.1 min  
 Declinación: 12.4°

Local	(Solar)	Azimut	Altitud	Ángulo solar horizontal	Ángulo solar vertical	% de sombreado
06:30	(06:00)	78.1°	3.6°	78.1°	17.1°	0%
07:00	(06:30)	80.1°	10.7°	80.1°	47.6°	14%
07:30	(07:00)	82.0°	17.8°	82.0°	66.4°	26%
08:00	(07:30)	83.7°	24.9°	83.7°	76.8°	38%
08:30	(08:00)	85.5°	32.1°	85.5°	82.9°	61%
09:00	(08:30)	87.3°	39.2°	87.3°	86.7°	66%
09:30	(09:00)	89.2°	46.4°	89.2°	89.3°	79%
10:00	(09:30)	91.4°	53.6°	91.4°	91.0°	-
10:30	(10:00)	94.1°	60.8°	94.1°	92.3°	-
11:00	(10:30)	97.8°	68.0°	97.8°	93.1°	-
11:30	(11:00)	104.0°	75.0°	104.0°	93.7°	-
12:00	(11:30)	119.0°	81.8°	119.0°	94.0°	-
12:30	(12:00)	-178.3°	85.9°	-178.3°	94.1°	-
13:00	(12:30)	-118.1°	81.5°	-118.1°	94.0°	-
13:30	(13:00)	-103.7°	74.8°	-103.7°	93.7°	-
14:00	(13:30)	-97.6°	67.7°	-97.6°	93.1°	-
14:30	(14:00)	-94.0°	60.6°	-94.0°	92.2°	-
15:00	(14:30)	-91.3°	53.4°	-91.3°	91.0°	-
15:30	(15:00)	-89.2°	46.2°	-89.2°	89.2°	78%
16:00	(15:30)	-87.2°	39.0°	-87.2°	86.6°	66%
16:30	(16:00)	-85.4°	31.8°	-85.4°	82.7°	58%
17:00	(16:30)	-83.7°	24.7°	-83.7°	76.5°	39%
17:30	(17:00)	-81.9°	17.5°	-81.9°	65.9°	26%
18:00	(17:30)	-80.0°	10.4°	-80.0°	46.8°	14%
18:30	(18:00)	-78.1°	3.4°	-78.1°	15.9°	0%

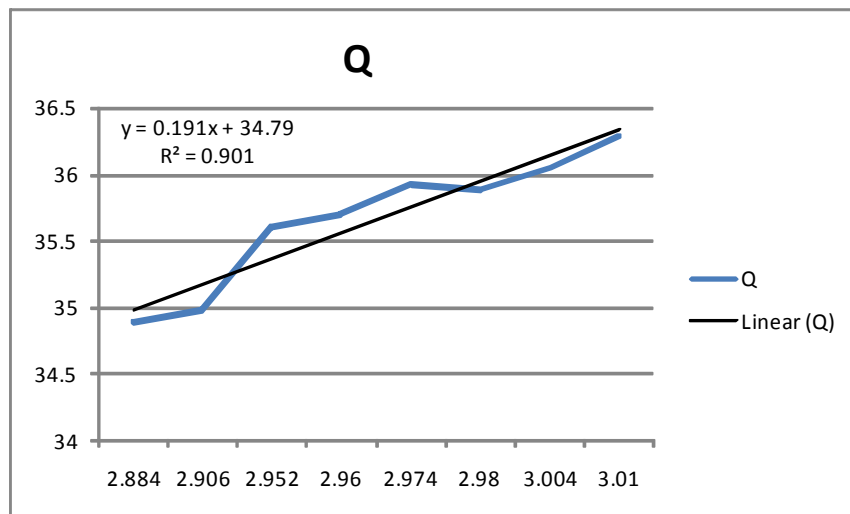


## Anexo 2

Estimación de la conductividad térmica a partir de la energía suministrada.

Datos promediado en milivots en estado estable				Q	A	ΔT	λ	λ
MATERIAL	ESTABLE Mv	k(Btu.in/ft2.h.°F)	L (m)	W	m2	°C	W/m°C	W/m°C(PROM)
O.5.1	4.3595	5.4924	0.026375	35.6227	0.0897	40	0.2619	
O.5.2	4.0634	5.4838	0.027063	35.5661	0.0893	40	0.2694	
O.5.3	4.2896	5.4904	0.025938	35.6093	0.0895	40	0.2581	0.26310
O.4.4	4.4691	5.4956	0.025875	35.6436	0.0827	40	0.2789	
O.4.5	4.3665	5.4926	0.027	35.6240	0.0891	40	0.2700	
O.4.6	4.8257	5.5059	0.025313	35.7117	0.0890	40	0.2541	0.26766
O.3.1	4.7638	5.5041	0.0254	35.6999	0.0900	40	0.2519	
O.3.2	4.0900	5.4846	0.0254	35.5712	0.0900	40	0.2510	0.25143
T.5.1	4.8862	5.5077	0.027875	35.7233	0.0904	40	0.2752	
T.5.2	4.0953	5.4848	0.026063	35.5722	0.0898	40	0.2582	
T.5.3	4.1912	5.4875	0.027938	35.5905	0.0902	40	0.2756	0.26968
T.4.1	4.5486	5.4979	0.026063	35.6588	0.0898	40	0.2588	
T.4.3	4.3595	5.4924	0.025	35.6227	0.0894	40	0.2489	0.25388
T.3.1	4.9414	5.5093	0.023313	35.7338	0.0902	40	0.2308	
T.3.2	4.3300	5.4916	0.026	35.6170	0.0891	41	0.2535	
T.3.3	4.0060	5.4822	0.0255	35.5551	0.0891	42	0.2422	0.24217

El flujo de calor se determinó por medio de una correlación de valores obtenidos de otros materiales medidos con el conductivímetro de placas calientes del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM.



## Anexo 3

### Datos de las temperaturas registradas y simuladas.

dia	T-interior-real	Ta-real	T-interior	Ta-sim	Diferencia	PROM	PROM	prom-error(resta)	prom-error(resta)	prom-error (suma)	prom-error
6	27.0132	22.0160	26.4667	19.4208	0.5465	0.5465	2.5952	0.1965	2.2452	0.8965	2.9452
7	27.0516	23.2180	25.7042	18.5708	1.3474	1.3474	4.6472	0.9974	4.2972	1.6974	4.9972
8	29.7388	23.2363	25.2750	19.7250	4.4638	4.4638	3.5113	4.1138	3.1613	4.8138	3.8613
9	27.6579	22.6942	25.3542	19.2542	2.3037	2.3037	3.4400	1.9537	3.0900	2.6537	3.7900
10	28.4633	24.3970	26.4958	20.0417	1.9674	1.9674	4.3553	1.6174	4.0053	2.3174	4.7053
11	28.0026	22.9917	26.0167	20.5667	1.9859	1.9859	2.4250	1.6359	2.0750	2.3359	2.7750
12	27.1219	23.1000	25.8125	20.9208	1.3094	1.3094	2.1792	0.9594	1.8292	1.6594	2.5292
13	27.1412	23.6599	24.6792	20.4583	2.4620	2.4620	3.2016	2.1120	2.8516	2.8120	3.5516
14	27.6626	23.7708	25.1375	21.0167	2.5251	2.5251	2.7541	2.1751	2.4041	2.8751	3.1041
15	29.1989	23.1789	25.9542	20.6750	3.2448	3.2448	2.5039	2.8948	2.1539	3.5948	2.8539
16	26.0842	21.3152	26.2208	20.8125	-0.1367	-0.1367	0.5027	-0.4867	0.1527	0.2133	0.8527
17	27.0539	20.1088	26.4333	21.5292	0.6205	0.6205	-1.4203	0.2705	-1.7703	0.9705	-1.0703
18	26.2259	20.9686	26.3792	22.7292	-0.1532	-0.1532	-1.7606	-0.5032	-2.1106	0.1968	-1.4106
19	27.6389	20.4398	26.0833	23.0875	1.5555	1.5555	-2.6477	1.2055	-2.9977	1.9055	-2.2977
20	26.1439	21.4466	26.5208	21.8042	-0.3770	-0.3770	-0.3575	-0.7270	-0.7075	-0.0270	-0.0075
21	27.2243	22.5769	26.8542	21.1167	0.3701	0.3701	1.4602	0.0201	1.1102	0.7201	1.8102
22	23.2876	18.5049	26.5333	20.2292	-3.2457	-3.2457	-1.7243	-3.5957	-2.0743	-2.8957	-1.3743
23	23.0668	19.2804	25.6792	20.2833	-2.6124	-2.6124	-1.0029	-2.9624	-1.3529	-2.2624	-0.6529
24	24.4633	20.5574	25.7708	21.1500	-1.3076	-1.3076	-0.5926	-1.6576	-0.9426	-0.9576	-0.2426
25	24.7230	20.3705	26.6125	21.9667	-1.8895	-1.8895	-1.5962	-2.2395	-1.9462	-1.5395	-1.2462
26	26.1830	23.8375	26.8750	21.2458	-0.6920	-0.6920	2.5917	-1.0420	2.2417	-0.3420	2.9417
27	27.2509	21.6913	26.5917	22.1375	0.6592	0.6592	-0.4462	0.3092	-0.7962	1.0092	-0.0962
28	25.9558	21.0756	26.3708	21.6958	-0.4150	-0.4150	-0.6202	-0.7650	-0.9702	-0.0650	-0.2702
29	26.8202	22.2032	26.6000	21.3833	0.2202	0.2202	0.8199	-0.1298	0.4699	0.5702	1.1699
30	25.0662	20.4664	27.1542	21.5708	-2.0879	-2.0879	-1.1045	-2.4379	-1.4545	-1.7379	-0.7545
31	25.2344	20.7495	27.3750	22.2333	-2.1406	-2.1406	-1.4839	-2.4906	-1.8339	-1.7906	-1.1339
MENSUAL	26.5952	21.8406	26.1904	20.9856	4.4638	0.4048	0.8550	0.0548	0.5050	0.7548	1.2050
	T-interior-real	Ta-real	interior-si	Ta-sim	Dif-max			T-interior	Ta	T-interior	Ta
<b>DIFERENCIA</b>	0.404772127	0.85502			<b>DIFERENCIA -0.35</b>						
<b>DIFERENCIA PROMEDIO</b>			0.450248		<b>DIFERENCIA +0.35</b>						