

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MEXICO



“MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE CASAS EN ZONAS CÁLIDO HÚMEDAS Y CÁLIDO SUBHÚMEDAS”

Aplicación de Técnicas Pasivas en los Techos de Casas Existentes en Mérida para Lograr un
Mejor Confort Térmico y Disminuir la Necesidad de Usar Sistemas Activos de Aire
Acondicionamiento

Andreas Schumann

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura

2011





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

**“MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE CASAS
EN ZONAS
CÁLIDO HÚMEDAS Y CÁLIDO SUBHÚMEDAS”**

**Aplicación de Técnicas Pasivas en los Techos de Casas Existentes en Mérida
para Lograr un Mejor Confort Térmico y Disminuir la Necesidad de Usar
Sistemas Activos de Aire Acondicionamiento**

Tesis para obtener el grado de Maestro en Arquitectura

Presentado por:

Andreas Schumann

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura

2011

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Miguel Arzate Pérez

(Universidad Nacional Autónoma de México)

SINODALES:

Dra. María Milagrosa Pérez Sánchez

(Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán)

Dra. Azucena Escobedo Izquierdo

(Facultad de Ingeniería, UNAM)

Dr. Fidel Sánchez Bautista

(Centro de Investigaciones en el Posgrado de Arquitectura, UNAM)

Dr. Jorge Rojas Menéndez

(Centro de Investigaciones en Energía, UNAM)

DEDICO ESTE TRABAJO AL ARQUITECTO
QUE ME LLEVÓ A MÉXICO
Y
A LA MUJER QUE HIZO QUE ME
QUEDARA.

Contenido

OBJETIVOS.....	1
HIPÓTESIS.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
1 BASES CIENTÍFICAS.....	5
1.1 CLIMA.....	6
1.1.1 Clasificación del Clima Mundial según Köppen.....	7
1.1.2 Clasificación del Clima de México por García (según Clasificación de Köppen)	10
1.1.3 Cambio Climático	11
1.2 ENERGÍA EN MÉXICO.....	20
1.2.1 Generación y distribución de Energía Eléctrica.....	20
1.2.2 Perspectiva.....	22
1.2.3 Impacto de los sistemas activos de aire acondicionado en el consumo energético	23
1.2.4 Impacto de los refrigerantes en el Cambio Climático	26
1.3 ZONA DE CONFORT TÉRMICO.....	28
1.3.1 Salud y Confort térmico	31
1.3.2 Medición de la zona de confort.....	33
1.3.3 Predicción de la Zona de Confort	34
1.3.4 Normas	47
1.4 LA FÍSICA DEL CALOR.....	50
1.4.1 Temperatura.....	50
1.4.2 Formas de transmisión de Calor.....	56
1.4.3 Datos básicos en la Climatización.....	61
1.5 SISTEMAS PASIVOS DE CLIMATIZACIÓN.....	63
1.5.1 ...basados en Ventilación.....	64
1.5.2 ...basados en la Radiación	67
1.5.3 ...basados en la Evaporación	70

1.5.4	...basados en la Nivelación de la Ondulación de la Temperatura (Masa Térmica, Inercia, Amortiguamiento).....	71
2	EXPERIMENTO	75
2.1	INTRODUCCIÓN AL EXPERIMENTO	75
2.2	MÉRIDA/ YUCATÁN	76
2.2.1	Clima	76
2.2.2	La Zona de Confort en Mérida.....	84
2.2.3	Geografía	87
2.2.4	Situación de la Vivienda	88
2.3	PREPARACIÓN DEL EXPERIMENTO	93
2.3.1	Instrumentos	93
2.3.2	Casa	96
2.3.3	Modelo	101
2.4	RESULTADOS	106
2.4.1	Resultados de las Casas	106
2.4.2	Resultados de los Maqueta	114
2.5	COMPARACIÓN CASA, MAQUETA	119
2.6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	123
2.6.1	Eficiencia de diferentes materiales del techo	123
2.6.2	El valor informativo de los datos obtenidos en maquetas.....	126
2.6.3	Recomendaciones generales.....	127
2.6.4	Propuestas para investigaciones futuras	127
	BIBLIOGRAFIA	i
	ABREVIACIONES	ix
	GLOSARIO	x
	ANEXO	xv

OBJETIVOS

El trabajo presente tiene como objetivo mostrar que es factible lograr una disminución relevante de la temperatura interior en casas construidas en zonas tropicales por modificación de sus techos. De tal manera se trata de mejorar el confort térmico de las habitantes de dichas casas y disminuir la necesidad de emplear sistemas de climatización activos que consumen grandes cantidades de energía eléctrica y contienen poderosos Gases de Efecto Invernadero. La introducción de métodos alternos de climatización disminuye el gasto monetario de los dueños, pone menos presión sobre la red eléctrica del país al consumir menos energía (subsidiada) y de tal manera contribuye a la disminución de la emisión de Gases de Efecto Invernadero.

En la parte que trata de la comparabilidad de los datos obtenidos en la maqueta y el edificio real “de prueba” se trata de comprobar que es válida la experimentación con maquetas para obtener datos correctos de aplicación a la situación térmica del edificio real “de prueba”.

HIPÓTESIS

- A) Se puede lograr confort térmico en el interior de casas construidas sin consideraciones bioclimáticas, en zonas tropicales, mediante la modificación de sus techos.
- B) Los datos obtenidos por mediciones en maquetas que componen de las mismas pautas que un edificio real pero en escala, son transferibles al edificio real.

INTRODUCCIÓN

El ser humano necesita para su bienestar un ambiente térmicamente agradable. En la cuna del hombre, África, existía un clima muy favorable. Mientras nuestros ancestros empezaron desplegarse para habitar casi todo el mundo, desde los desiertos hasta las zonas nórdicas, hubo la necesidad de adaptarse al clima prevaleciente. Para protegerse de los extremos del clima confeccionó ropa, construyó hogares y desarrolló una ciencia para predecir el clima. Esas necesidades se presentaron más urgentemente en los climas fríos debido a su efecto mortal de no haberse aplicado métodos para mantener la temperatura del cuerpo. En las zonas frías del mundo la arquitectura se preocupó en gran parte en captar y mantener el calor en el interior de las casas, mientras en las zonas calientes nunca había el peligro de morir por frío. Se puede decir que en esas zonas la arquitectura vernácula más bien tomó un papel más leve, el de dar *confort* térmico, de mitigar la ganancia de calor excesiva. Para lograr ese fin los métodos aplicados son muy distintos. En una zona seca como los desiertos, con una variación de temperatura importante entre día y noche, construir con una alta masa térmica (como son los anchos muros de adobe) es un método excelente mientras ese tipo de construcción no parece ser capaz de lograr un bienestar térmico en zonas cálido- húmedas. Esas zonas cuentan con alta humedad y una ondulación de la temperatura día/ noche menos destacada.

Se puede plantear que el tipo de clima ha sido, y en menor medida sigue siendo, un factor determinante de tipo de civilización que se desarrolla en las diferentes zonas climáticas del mundo. O, de una perspectiva muy euro-centrista y en las palabras del Dr. Pettenkoffer: „Hielo es civilización”¹

En una zona como Yucatán/ México, en donde se ubica mi investigación, los constructores de las casas vernáculas aprovecharon de su conocimiento del clima y de los materiales para construir casas ligeras, bien ventiladas con techos inclinados y con espacios sombreados. Mientras que esas casas estaban bien adaptadas al clima tropical, su abandono y desvaloración por parte de los habitantes hicieron que hoy en día la gran mayoría de las casas construidas no sigan esas recomendaciones bioclimáticas. Los motivos del abandono de esas reglas del “bien construir bioclimático” suelen ser varios. Parece ser difícil reconstruir las razones de cada uno en contra de ese estilo de construir pero no hay duda que las nuevas opciones técnicas (equipos de aire acondicionado), la moda (“Casas vernáculas son casas pobres!”) y desventajas reales como la poca

¹ Max von Pettenkoffer durante su visita a la primera fábrica de hielo en Alemania, 1881

protección en contra de los insectos, el polvo y el ruido como la menor privacidad jueguen un papel importante en esas decisiones.

Si no se toma en cuenta las reglas de la construcción bioclimática, la única opción de mantener un clima agradable adentro de un edificio es mediante la instalación de equipos de aire acondicionado. Dichos equipos contribuyen en gran parte al consumo eléctrico, lo que se traduce en un gran gasto en electricidad por parte de los dueños y en la necesidad de ampliar la red y la producción de electricidad por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Además de incrementar la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) o aumentar el monto de desechos nucleares por la producción de la energía consumida con el fin de climatizar, casi todos los equipos de aire acondicionado contienen refrigerantes muy poderosos, con respecto al daño climático que causan.

Con el aumento de la temperatura por el cambio climático se prevé un aumento del consumo eléctrico considerable en las zonas tropicales por razones de climatización. Para lograr la meta del Gobierno Mexicano de una sociedad que no emite más que 2,8t/CO_{2eq} es indispensable cambiar radicalmente la manera como se produce y consume energía en México. Debido a todos esos efectos negativos que provienen de la ignorancia con respecto a un diseño bioclimático, lo que hace indispensable el aprovechamiento de la climatización activa, la construcción de nuevas casas debe enfocarse radicalmente en un diseño bioclimático. Mientras un cambio en el reglamento de construcción puede dar una nueva dirección a cómo se construirán edificios en el futuro, por muchos años las casas ya construidas van a jugar un papel determinante.

Desde esas consideraciones mi investigación trata de desarrollar estrategias de mejoramiento térmico para edificios ya construidos.

En Mérida, también conocida como “La Ciudad Blanca” por el acabado blanco de muchas casas tradicionales,² se cuenta con un clima cálido- sub húmedo con sólo una temporada altamente cálida y húmeda en verano. Debido a que los experimentos son realizados en esa temporada extremosa los resultados pueden ser aprovechados en cualquier zona cálido- (sub)húmeda, independiente de su distribución durante el año.

La investigación busca maneras aplicables y económicas para mejorar el desempeño térmico de casas construidas sin consideraciones bioclimáticas. Uno de los métodos utilizados es el mejoramiento de la reflectancia del envolvente, lo que puede realizarse pintando la casa en un

² Eso es la explicación común, aunque según información del Dr. Pablo Chico de Ponce de León las casas del centro frecuentemente estaban pintadas de colores ocre- rojo o azules. Otra explicación del atributo “Ciudad Blanca” da la canción del mismo nombre y se refiere a la ropa blanca que usaba la ciudadanía

color claro y que ya es aprovechada tradicionalmente en Mérida. El otro es dar sombra a la fachada para disminuir la ganancia térmica. En ambos casos se mide la temperatura y humedad del interior de la casa y de la superficie de la pared/ techo antes y después de la aplicación de los cambios. Simultáneamente se miden esos parámetros en modelos dotados con las mismas aplicaciones. Los datos obtenidos se comparan entre ellos y con los cálculos respectivos.

1 BASES CIENTÍFICAS

La primera parte de mi tesis trata de las bases científicas necesarias para entender conceptos vinculados con el comportamiento térmico de un edificio y de la percepción de temperatura por el ser humano.

Debido a que el clima predominante de un lugar tiene el impacto más relevante sobre el cómo construir bioclimáticamente correcto, se habla primero de dicho tema. Se debe de tomar en cuenta que en muchas regiones del mundo se puede observar ya un cambio del clima local, antes estable, que provoca nuevas estrategias de adaptación. Muy probablemente la Península de Yucatán va a padecer un cambio climático desde un clima cálido (sub)húmedo hacia un clima semi-árido. No obstante hay otro resultado que impacta más sobre la importancia de esta investigación: por un lado los sistemas de aire acondicionado emiten Gases de Efecto Invernadero (GEI) por medio de la energía que consumen y los refrigerantes empleados. Esos gases aceleran en calentamiento global. Por otro lado el calentamiento global genera más necesidad de emplear sistemas de aire acondicionado o dar más enfoque en un diseño bioclimático que aprovecharía la climatización natural. Con el experimento realizado, y de lo cual se habla en la segunda parte de mi tesis, trato de mejorar el conocimiento y la validación de posibles métodos de climatización pasiva.

El tema “Energía en México” es relevante para la justificación de mi trabajo, dado a que la climatización artificial basada en el uso de energía renovable y refrigerantes no dañinos no causa gran molestia. No obstante ni el primero ni el segundo de esos prerrequisitos aplica a la situación real en México, ni en ninguna otra parte del mundo. Así es indispensable abarcar este tema.

La climatización, sea artificial o natural, tiene como fin de establecer un entorno higrotérmico agradable al hombre. La discusión científica actual abarca muchas perspectivas diferentes acerca del tema de “Confort Térmico”. Por eso presento en esa tesis los conceptos mejor fundamentados sin que me haga partidario de un concepto en particular. Conociendo la discusión con respecto a este tema me parece arbitrario adoptar un concepto en particular para tener un sólo punto de referencia. Todos esos conceptos tienen sus puntos fuertes y débiles. Por lo cual se comparan los resultados obtenidos en el experimento con varios de los conceptos presentados en capítulo uno. Para entender los factores físicos que impacten sobre un edificio y sobre la concepción hidrotérmica del hombre se habla en el capítulo “La física del calor” sobre esos factores.

La primera parte de la tesis termina con la presentación de los varios conceptos bajo los cuales se puede lograr una climatización pasiva de edificios en diferentes condiciones climáticas.

Es indispensable entender esos conceptos teóricos antes de dar un enfoque en el análisis de una situación en particular, lo cual hago en la segunda parte de mi tesis.

1.1 CLIMA

Como “clima” se entiende el conjunto de datos meteorológicos de condiciones atmosféricas, como el viento, la temperatura, la radiación, la humedad, la presión y la precipitación principalmente, que se observa sobre un largo tiempo y que forma un patrón específico que se repite frecuentemente en una cierta región. La diferencia entre clima y tiempo meteorológico está basada en la duración de los fenómenos que les definen. El tiempo puede cambiar varias veces al día mientras el clima es estable sobre un largo período. Para determinar la zona climática normalmente se observa un período de lo menos 30 años, no obstante las zonas climáticas no cambien sustancialmente en períodos más largos; siglos o milenios.

El último gran cambio climático de escala global ocurrió hace 12,000 años con el fin de la última era de hielo. Hay fuerte evidencia de que hoy en día vivimos en una época de otro cambio climático acelerado y, si se confirman las predicciones del Panel Intergubernamental del Cambio Climático, sin precedente alguno.

A nivel micro climático el clima puede ser menos estable; la tala masiva de árboles, la construcción de presas y la rápida urbanización³ frecuentemente causan un cambio en los patrones climáticos de la región en donde ocurren esos fenómenos. Si desarrollamos un proyecto basado en datos meteorológicos de una estación que no está exactamente en el lugar de estudio los datos particulares del sitio pueden variar considerablemente.

Los factores naturales que afectan al clima son la latitud, altitud, relieve, corrientes marinas, vientos y vegetación . Según se refiera al mundo, a una zona o región, o a una localidad concreta se habla de clima global, zona, regional o local (microclima), respectivamente.

Unas de las organizaciones que se dedican a la recolección y el análisis de datos climatológicos son la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de México de las cuales provienen la mayoría de los datos utilizados en esa investigación.

³ según Ernesto Jáuregui Ostos del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM el clima de DF ha aumentado de 0.52°C cada diez años a partir de 1950, las aguaceros han quintuplicado y el patrón igual que la cantidad de las precipitaciones han cambiado debido a la urbanización –menos espacios verdes-, un cambio de la dirección del viento (viene con mayor frecuencia desde el oeste) y el calentamiento global que ha ocasionada cambios en los patrones climáticos/ Gaceta 17.08.2009 pag 13)

Hay varios sistemas de clasificación del clima⁴. De ellas la clasificación de Köppen (difundido por Geiger, por eso también llamada “Mapa de Köppen- Geiger”) es la más reconocida a nivel mundial.

1.1.1 Clasificación del Clima Mundial según Köppen

Wladimir Peter Köppen (1848- 1940) fue un meteorólogo Ruso-Alemán que en 1936 publicó su clasificación del clima mundial⁵, de la cual todavía se saca provecho en nuestra época.

Él clasifica el clima según la temperatura, la cantidad de la precipitación y la ubicación en el año de la precipitación. En ella también entra la distribución de la vegetación.

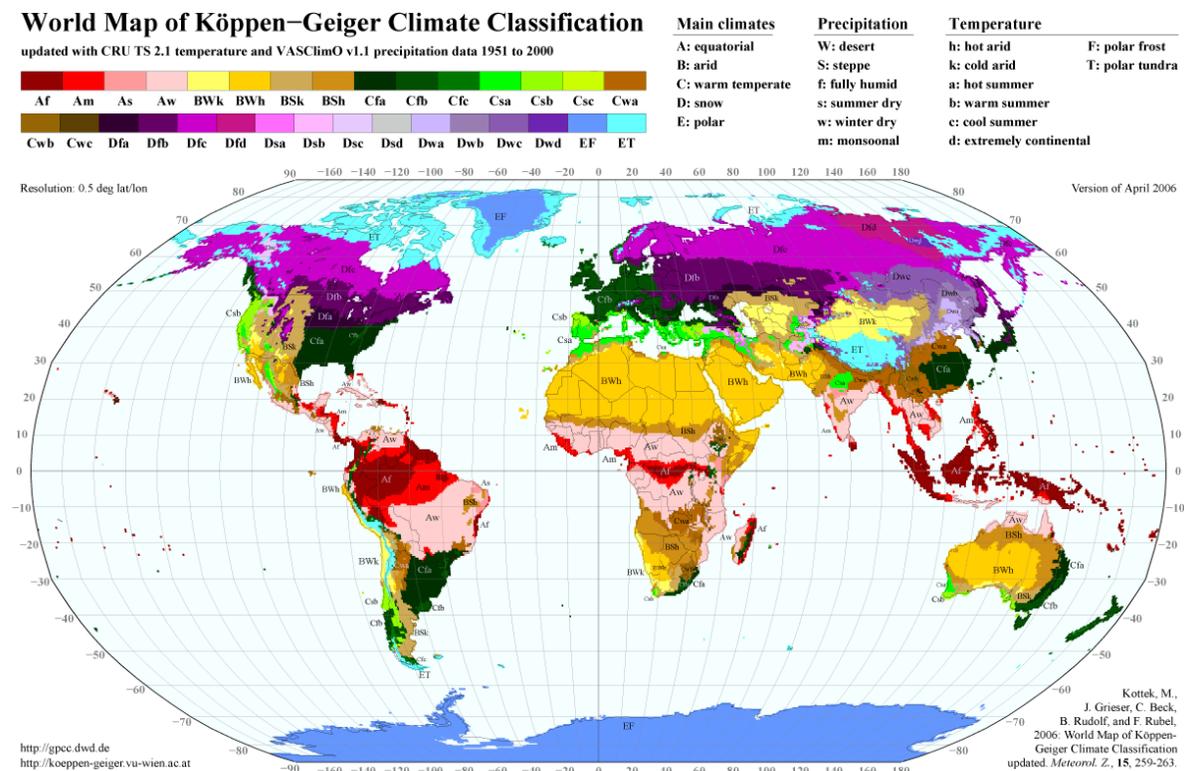


Ilustración 1: Mapa mundial de la clasificación Köppen - Geiger actualizada por la Universidad de Viena, Kottek, et al., con datos de la segunda mitad del siglo XX

Su climatología distingue entre cinco zonas principales; la tropical lluviosa, la seca, la templada-lluviosa, la boreal, el clima frío y polar, las cuales se subdividen en varios sub-grupos. La siguiente tabla lo presenta en detalle:

⁴ Por ejemplo: Flohn, Neef, Troll, Paffen y Köppen

⁵ “Sistemas geográficas de los climas” o “*Geografisches System der Klimate*” en su versión original . Schumann/ TESIS/ 2011/ “*Mejoramiento del Diseño Térmico...*”

Tabla 1: zonas climáticas principales según Köppen

A	Clima tropical lluvioso	El promedio del mes más frío es $\geq 18^{\circ}\text{C}$
B	Clima seco	Un clima árido o semi-árido
C	Clima templado lluvioso	El mes más frío entre $+18^{\circ}\text{C}$ y -3°C
D	Clima boreal	El mes más frío $\leq -3^{\circ}\text{C}$, el mes más cálido $\geq 10^{\circ}\text{C}$
E	Clima frío o polar	El mes más cálido $\leq 10^{\circ}\text{C}$

Los siguientes tipos de clima;

Tabla 2: tipos del clima según Köppen

	Tipo de clima	Ocurre en:
f	Sin temporada seca (siempre húmedo)	A,C,D
w	Seco en invierno	A,C,D
s	Seco en verano	A,C,D
m	Forma intermedio entre "s" y "w"	A
S	Semiárido	B
W	Árido	B
T	Mes más caliente entre 0°C y 10°C	E
F	Todas las meses $\leq 0^{\circ}\text{C}$	E

Y los siguientes sub tipos;

Tabla 3: sub tipos del clima según Köppen

	Sub tipo de clima	Ocurre en:
h	Cálido, temperatura promedio anual $\geq 18^{\circ}\text{C}$	B
k	Frío, temperatura promedio anual $\leq 18^{\circ}\text{C}$	B
a	Verano muy cálido, mes más caliente $\geq 22^{\circ}\text{C}$	C,D
b	Verano cálido, mes más caliente $\leq 22^{\circ}\text{C}$	C,D
c	Verano corto, menos que 4 meses con una temperatura $\geq 10^{\circ}\text{C}$	C,D
d	Invierno muy frío, mes más frío $\leq -38^{\circ}\text{C}$	D

El “nabo climático” presenta las diferentes zonas climáticas terrestres según su distribución sobre la tierra en relación con el porcentaje que ocupa de la tierra en cada latitud. Así se puede ver que el clima A, tropical lluvioso, es lo dominante en la zona entre el trópico de cáncer y el trópico de capricornio.

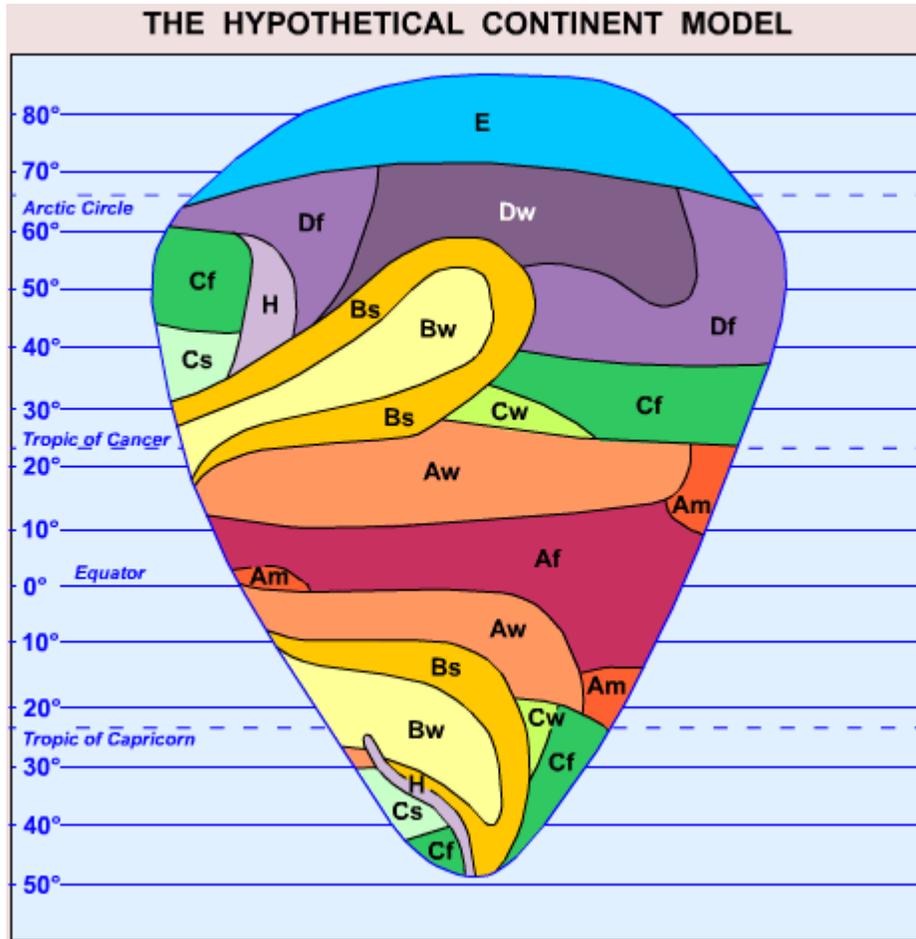


Ilustración 2: zonas climáticas sobre la tierra, modelo hipotético de contenido

El lugar de estudios, Mérida, se encuentra, según Köppen, en un clima tropical-lluvioso (A) con la temporada seca en invierno (w). El clima de Mérida se analiza con más detalle en el siguiente párrafo y en la descripción de Mérida en 2.1.1.

1.1.2 Clasificación del Clima de México por García (según Clasificación de Köppen)

En 1973 Enriqueta García publicó su clasificación del clima de México. En lo general ella sigue la clasificación de Köppen pero la modifica debido a que la ubicación y topografía de México es tan particular que la aceptación del sistema de Köppen llevaría a una inexactitud de la definición de las zonas climáticas en México.

Sus cambios, además de ajustar algunos límites de temperatura (22°C en lugar de 18°C) y relaciones de temperatura y precipitación, son novedosos por la introducción de la *tendencia* del clima, marcado con una letra que denomina el clima que a su vez indica hacia dónde va el clima dominante entre paréntesis. Un clima A(C) entonces significa un clima tropical lluvioso con el mes más frío de $\geq 22^{\circ}\text{C}$ pero con una tendencia hasta un clima templado lluvioso.

Debido a que mi estudio es aplicable a todas las zonas tropicales lluviosas o, según García, cálido-húmedas y cálido sub-húmedas, enseguida explico solo los diferentes subsistemas de la zona A, lluvioso con el mes más frío $\geq 22^{\circ}\text{C}$:

Tabla 4: definición de los subsistemas cálidos húmedos según E. García

Af	precipitación del mes más seco $\geq 60\text{mm}$
A(f)	%lluvia invernal con respecto al anual: $\geq 18\%$
Af(m)	$\leq 18\%$
Am(f)	$\geq 10,2\%$
Am	Entre 5% y 10,2%
Am(w)	$\leq 5\%$
Aw	Tipo de clima Aw de Koeppen (sub-húmedo con lluvias en verano) por lo menos diez veces mayor cantidad de lluvia en el mes más húmedo de la mitad caliente del año que en el más seco
Awo	Precipitación anual en mm/Temperatura media anual en $^{\circ}\text{C}$ $\leq 43,2$
Aw1	Precipitación anual en mm/Temperatura media anual en $^{\circ}\text{C}$ entre 43,2 y 55,3
Aw2	Precipitación anual en mm/Temperatura media anual en $^{\circ}\text{C}$ $\geq 55,3$

A nivel nacional las zonas cálidas (sub-)húmedas cubren casi toda la parte sur de la república, la península de Yucatán, el estado de Tabasco y Veracruz y las zonas costeras de Chiapas, Oaxaca,

Guerrero, Michoacán, Jalisco y Nayarit, siendo el estado de Tabasco el más cálido húmedo. El siguiente mapa muestra la distribución climática en la República Mexicana:



Ilustración 3: zonas climáticas de la República Mexicana, Azul (1): Cálido Húmedo, Naranja (2): Cálido Sub-Húmedo, Rosa (3): Seco, Amarillo (4): Muy Seco, Verde (5): Templado Súb-Húmedo y Azul Ligera (6): Templado Húmedo, fuente: INEGI, 2011

1.1.3 Cambio Climático

El cambio climático no es nada nuevo en la historia del planeta. El ser humano ha presenciado en su trayectoria de casi 160 000 años en la tierra varios cambios climáticos. El último cambio en la historia fue la pequeña era de hielo en el siglo XVI y XVII. En esa época las temperaturas promedio estaban cerca de 1°C más bajo que 600 años antes. Esa disminución en la temperatura tuvo un impacto fuerte sobre la civilización de aquella época.

Sin embargo si hablamos hoy en día del cambio climático casi siempre pensamos que éste es causado por las actividades del humano, el cambio climático antropógeno.

Es casi seguro que en los próximos pocos siglos el ser humano tenga que adaptarse a un cambio climático nunca antes ocurrido durante su estancia en la tierra. Las predicciones del Panel

Intergubernamental del Cambio Climático (PICC)⁶ plantean ya que para el fin de ese siglo un incremento en la temperatura promedio de la tierra de entre 1.8 y 6.4°C [IPCC, 2007]. Estudios recientes sugieren que la meta de un aumento en sólo 2°C ya no se logra [ídem]. De los doce últimos años (1995-2006), once figuran entre los doce más cálidos en los registros instrumentales de la temperatura de la superficie mundial desde 1850 [ídem]. La temperatura superficial promedio de la tierra ha aumentado cerca de 0.74°C en los últimos 150 años. Sin embargo con un patrón diverso sobre toda la tierra; más acentuado sobre las áreas terrestres y más fuerte en la homósfera norte que en la homósfera del sur.

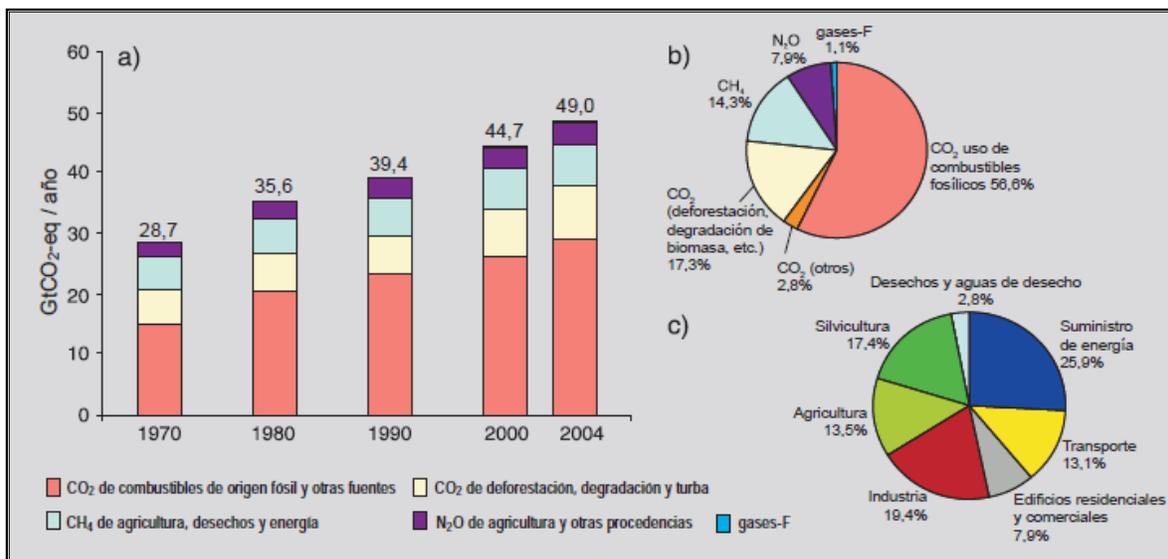


Ilustración 4: a) Emisiones anuales mundiales de GEI antropógenos entre 1970 y 2004. b) parte proporcional que representan diferentes GEI antropógenos respecto de las emisiones totales en 2004, en CO₂-eq. c) parte proporcional que presentan diferentes sectores en las emisiones totales de GEI antropógeno en 2004 (en CO₂-eq). En el sector silvicultura se incluye la deforestación. fuente: IPCC, 4th AR, 2007, Fig.2.1

Se correlaciona ese aumento en la temperatura el aumento de los Gases de Efecto Invernadero (GEI)⁷ en la atmósfera a partir de la revolución industrial. Mientras en 1750 la concentración del dióxido de carbono era de alrededor de 280ppm, la concentración actual⁸ es de 385ppm con un

⁶ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) en inglés, fue establecido conjuntamente en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial y el programa de la ONU para el Medio Ambiente con el mandato de analizar la información científica sobre el cambio climático y evaluar sus consecuencias socioeconómicas y medioambientales. El PICC publica informes sobre la situación actual del cambio climático. El último informe de evaluación (4th Assessment Report) que se publicó en 2007. Los escenarios de cambio climático (ECC) usados para describir un posible estado futuro del mundo se puede ver en el anexo.

⁷ El Protocolo de Kyoto define un grupo de 6 Gases de Efecto de Invernadero. Para hacer comparable su efecto de calentamiento global esos gases se convierte a unidades de Dióxido de Carbono Equivalentes, según la potencia de cada uno de ellos.

⁸ Año 2009

crecimiento de 2.2ppm anual. Para mitigar el aumento de la temperatura en 2°C ⁹ la concentración no debe superar 450ppm. Los aumentos de la concentración mundial de CO₂ se deben principalmente a la utilización de combustibles de origen fósil y, en una parte apreciable pero menor, a los cambios de uso de la tierra.

Tabla 5: potencial de calentamiento de los principales gases de efecto invernadero, fuente: Revista de Ingeniería UNAM, Vol XI, #1, p.37

Especie	Tiempo de vida	Potencial de 20 años	Calentamiento 100 años	Global 500 años
CO ₂	variable	1	1	1
CH ₄	12±3	56	21	6.5
N ₂ O	120	280	310	170
HFC-23	264	9100	11700	9800
HFC-32	5.6	2100	650	200
SF ₆	3200	16300	23900	34900
Perfluorometano	50000	4400	6500	10000
Perfluoroetano	10000	6200	9200	14000
Perfluorohexano	3200	5000	7400	10700

Para el IPCC la escala regional para los estudios de cambio climático está definida como aquella que describe el clima en un rango de 10⁴ a 10⁷ km². El límite superior de este rango es llamado escala sub-continental, y su alcance está limitado por las inhomogeneidades climáticas que ocurren a esa escala. Las condiciones que ocurren a escalas mayores a 10⁷ km² se denominan de escala planetaria, y están dominadas por los procesos de circulación general y sus interacciones. El límite inferior (10⁴km²) es representativo de las escalas que utilizan los modelos regionales. Menores escalas que la anterior se denomina escala regional.

Las principales fuentes de incertidumbre en los escenarios de cambio climático (utilizados para evaluar los impactos potenciales) son:

- incertidumbre en las emisiones de GEI reales,
- incertidumbres en la variabilidad natural
- incertidumbres asociadas a los modelos de circulación general, que son los modelos climáticos más completos y complejos con los que se cuenta en la actualidad.

⁹ La meta de 2K está establecida por que los modelos muestran de que un calentamiento de más que 2K puede iniciar procesos autoalimentables y no controlables que pueden acelera el calentamiento aun más, p.ej. la liberación de metan que sigue estando atrapado en los suelos de hielo permanente en Siberia.

El cambio de las temperaturas a nivel mundial también presenta su efecto sobre pautas cambiantes de la precipitación mundial, no obstante dichos modelos siguen siendo todavía más imprecisos que los modelos de predicción de temperatura.

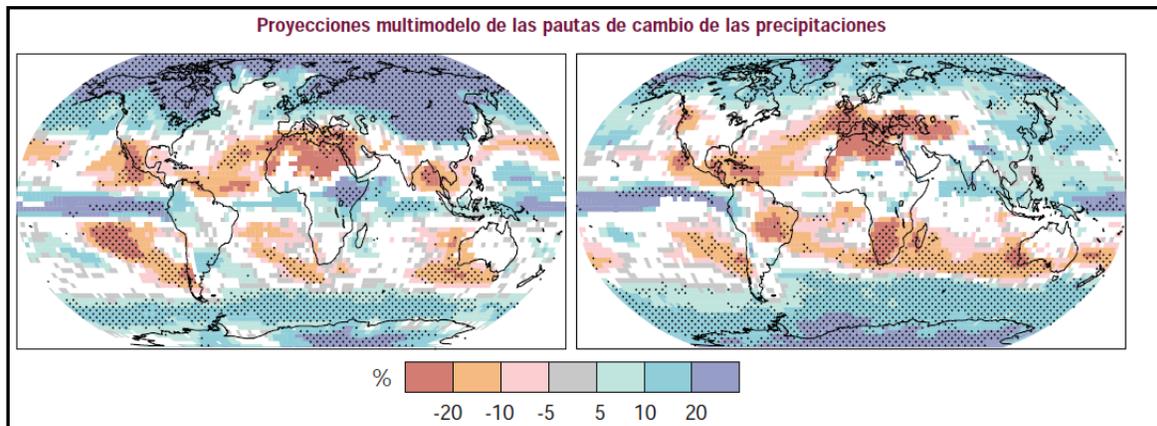


Ilustración 5: Cambios de la precipitación en valores porcentuales para el periodo 2090-2099, respecto al periodo 1980-1999. Los valores son promedios multimodelo basados en el escenario A1B para los periodos diciembre-febrero (izquierda) y junio-agosto (derecha)

Los impactos previstos por el IPCC para América Latina y América del Norte son los siguientes:

- Hasta mediados del siglo XIX, los aumentos de temperatura y las correspondientes disminuciones de la humedad del suelo originarían una sustitución gradual de los bosques tropicales por las sabanas en el este del Amazonas. La vegetación semiárida sería sustituida por vegetación de tierras áridas.
- Podrían experimentarse pérdidas de diversidad biológica importantes con la extinción de especies en muchas áreas de AL tropical.
- La productividad de algunos cultivos importantes y de la pecuaria disminuiría. En las zonas templadas mejoraría el rendimiento de los cultivos de soya.
- Los cambios en las pautas de precipitación y la desaparición de los glaciares afectarían notablemente a la disponibilidad de agua para el consumo humano, la agrícola y la hidroeléctrica.
- Las ciudades que actualmente padecen olas de calor estarían expuestas a un aumento de éstas con una intensidad y duración con efectos adversos sobre su salud.
- Las comunidades y hábitats costeros tendrían mayores dificultades, debido a la interacción de los efectos del cambio climático con el desarrollo de la población.

Mientras no se puede atribuir cada uno de los extremos climáticos actuales, como las inundaciones en Australia, Paquistán y México o las ondas de calor en Rusia, Europa y Australia, al

cauce de cambio climático antropógeno, su intensidad, persistencia y periodicidad indican fuertemente su presencia en las pautas climáticas actuales.

1.1.3.1 Impacto del cambio climático al clima de México

Se espera que México esté entre los países más afectados por el cambio climático [Jáuregui, 2009] lo que lleva al gobierno federal a jugar un papel activo en las negociaciones a nivel internacional para la mitigación de la emisión de GEI. Los efectos del cambio climático en México son tales que se considera un tema de la seguridad nacional [ENCC, 2007]. México tiene un alto índice de vulnerabilidad y el 68.2% de la población será impactada por el cambio climático [Cárdenas, 2009]. Gay [2006] predice para 2050 un clima normal en México que pareciera a las anormalidades causadas por el impacto del fenómeno *El Niño* en la actualidad. En entrevista con la “Gaceta” el investigador del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, Ernesto Jáuregui Ostos [2009] explica, que la disminución de las lluvias aprovechables, se debe en parte ya al cambio climático antropógeno mundial.

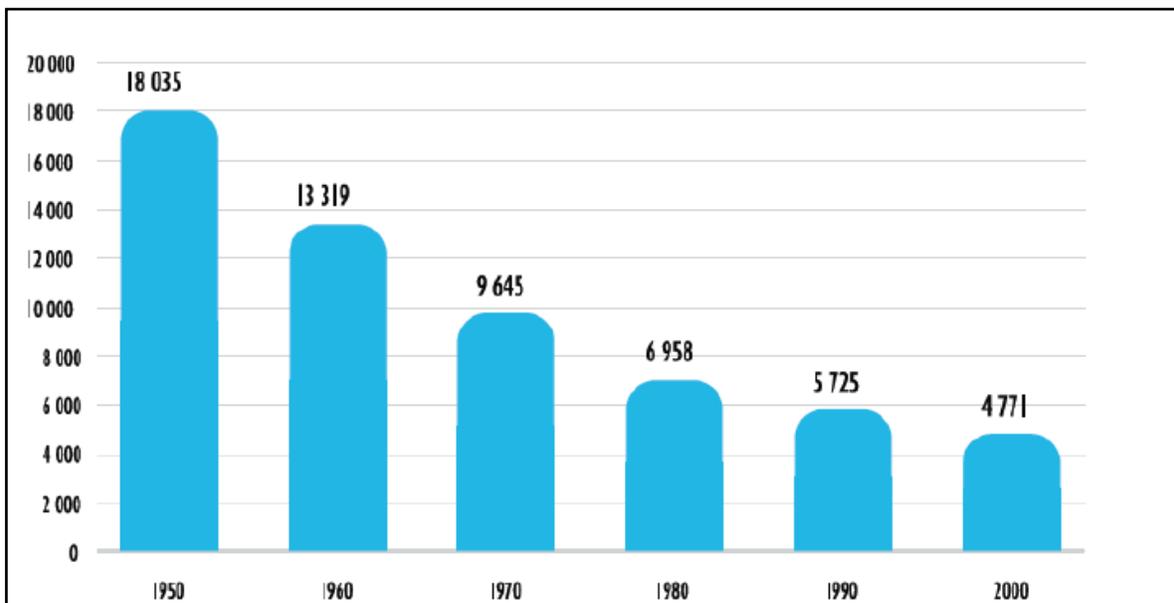
Tabla 6: Calentamiento del país durante el siglo XX y el proyectado para el siglo XXI para México fuente: Gay et al. 2006:2-10

Consumo “C”, emisiones t/capita	Siglo XX calentamiento en °C	Siglo XXI calentamiento mínimo (°C)	Siglo XXI calentamiento promedio (°C)	Siglo XXI calentamiento máximo (°C)	Vulnerabilidad en dólares/°C /capita
1.06	-0.12	3.8	4.3	4.8	\$2000

México fue el primer país “en desarrollo” que se obligó a disminuir sus emisiones de GEI hasta en un 7% en 2012 y hasta un 50% en 2050. En mayo de 2007, el Presidente de la República presentó públicamente la Estrategia Nacional de Cambio Climático, y publicó un Programa Especial de Cambio Climático (PECC) 2008 – 2012, en el marco del Plan Nacional de Desarrollo 2007 – 2012 en el cual se menciona una meta de 270 millones de toneladas de reducción de emisiones de GEI. Pero ya en la versión publicada en el Diario Oficial de la Federación, publicado 5 meses después, el monto se recorta a menos de la mitad, 130 millones de toneladas [Cárdenas, 2009]. No obstante hay varios proyectos prometedores en particular en el sector eléctrico del país, el sector de transporte y la porcicultura.

1.1.3.1.1 Recursos hídricos

Uno de los efectos más graves al que debe de adaptarse el país a corto plazo es la muy probable disminución en la precipitación en el país. Lo que agrava esa situación es que se prevé que la precipitación no sólo va a disminuir pero también va a ocurrir de forma más extrema. Las tormentas y ciclones van a aumentar en cantidad y fuerza lo que pone en peligro de inundaciones y daños en especial las zonas laterales del país. En un estudio del IPCC del año 2008, "Climat Change and Water" [Bates et al., 2008] se llega a la conclusión de que durante el siglo XX las precipitaciones aumentaron en la latitudes altas del hemisferio norte pero disminuyeron en la zona tropical del mundo, de entre 30°N y 10°S. Esos datos son congruentes con los programas climáticos que proyectan una disminución de la precipitación para México, ubicado de entre 33°N y 15°N. La gráfica #1 muestra la disminución de la disponibilidad de agua per cápita. Aún tomando en cuenta que gran parte de la disminución se debe al crecimientos demográfico el problema se plantea fuertemente frente a una esperada disminución pluvial en un futuro cercano.



Gráfica 1: variación de la disponibilidad natural media de agua per cápita 1950 a 2000 (m³/hab./año) fuente: CONAGUA, 2007, Subdirección General Técnica

1.1.3.1.2 Aumento del Mar

También se espera que el aumento del nivel del mar se acelere aun más por la expansión del agua de los océanos debido a que sube su temperatura con el consecuente deshielo de los glaciares y placas de hielo. "En promedio, se calcula un aumento del nivel del Golfo en su parte mexicana del orden de los 13 cm durante los 40 años comprendidos entre 1950 y 1990. Una proyección lineal indica que el alza del mar lograría 36 cm más hacia el 2100." [PVCC, Junio 2009]

Tabla 7: Elevación del mar y fuentes de origen según sus contribuciones estimadas, fuente: PVCC, 2009

Origen del aumento del nivel del mar		Elevación del nivel del mar (milímetros por año)	
		1961 - 2003	1993 - 2003
a	Expansión térmica	0.42 ± 0.12	1.6 ± 0.5
b	Glaciares y casquetes de hielo	0.50 ± 0.18	0.77 ± 0.22
c	Placas de hielo de Groenlandia	0.5 ± 1.2	2.1 ± 0.7
d	Placas de hielo de la Antártica	1.4 ± 4.1	2.1 ± 3.5
e	Suma de las contribuciones individuales	1.1 ± 0.5	2.8 ± 0.7
f	Aumento total observado del nivel del mar	1.8 ± 0.5	3.1 ± 0.7
g	Diferencia (f-e)	0.7 ± 0.7	1.6 ± 0.5

“De manera combinada, el ascenso del mar,..., y la presión humana sobre las costas de todo el país,..., ponen en peligro creciente la integridad de las costas y la producción sustentable de decenas de especies de pesquerías costeras...” [Ezcurra, 2010]

1.1.3.1.3 Costos del cambio climático en México

Con el reporte Stern [2007] el tema del costo del cambio climático vs su costo de mitigación se empezó a estudiar más profundamente. El mismo año un estudio del INE y la Universidad Ibero [Ibarrarán, 2007] señaló que los impactos del cambio climático en la producción agrícola del país serán del orden de entre 16 y 22 mil millones de pesos anuales. Se prevé una disminución de la producción de café de cerca 75%, de maíz de entre 30 y 45% y de frijol de 30% con respecto a la producción actual. Sólo la producción de naranjas puede aumentar considerablemente. Otros eventos causados o intensificados por el cambio climático como incendios forestales, pérdida de suelo, bienes y vida humana por inundaciones etc. aumentan su costo a la economía nacional. Esos efectos alcanzan, según el estudio por Ibarrarán, un impacto del 6.22% del PIB Nacional actual mientras los costos de mitigación a un 50% de la emisiones nacionales de GEI para 2050 se calcula entre 0.7 y 2.21% del PIB.

1.1.3.1.4 Impactos sociales/ Migración

Por siempre el ser humano se vio obligado a modificar su estilo de vida, de cambiar de lugar o de desaparecer. No obstante muchos de los efectos que originaban dicho comportamiento eran locales en su origen y en sus consecuencias. Sin embargo, el cambio climático no está comprometido a esos límites. Se calcula que en 1995 habría en el mundo 25 millones de

migrantes exclusivamente por motivos ambientales [Graizbord, 2010] lo que podría aumentar hasta 200 millones en 2050 [Myers, 2005].

En México, cerca de 36 millones, una tercera parte de la población nacional, vive en municipios costeros propicios a sufrir las consecuencias de los ciclones tropicales, un número parecido está expuesto a inundaciones, 42 millones viven en zonas de sequía y de esos 11 millones se encuentran en zonas de extrema sequía. La presión ambiental sobre esa población aumento por efectos del cambio climático directo (menos precipitación, aumento de eventos climáticos extremos, inundaciones etc.) e indirecto (menor productividad agrícola, caída del PIB) lo que va a aumentar la migración interna y externa del país.

1.1.3.1.5 Temperatura

Aunque las predicciones pluviales en especial por las zonas tropicales todavía contienen cierta incertidumbre, las predicciones con respecto al aumento de la temperatura están muy bien fundamentadas.

Si no cambiamos la manera en que construimos las casas, si no mejoramos su desempeño térmico por parte del diseño y la aplicación de tecnologías pasivas de climatización la demanda de electricidad para climatizar va a aumentar fuertemente. Y eso sólo para mitigar el efecto del calentamiento global.

1.1.3.1.6 Salud y cambio climático

Con el cambio de las pautas climáticas ya se pueden observar organismos causantes de enfermedades no conocidos antes en esas zonas. La malaria y el dengue, endémico de Europa hasta el siglo XIX y después erradicado, está regresando al continente debido al cambio de las pautas climáticas en Europa. No obstante la (re-) aparición o intensificación de esas enfermedades no sólo sucede en Europa sino en México también. Otro impacto que se vincula con el cambio climático es el aumento en la presentación de ondas de calor. En 2003 un verano extremadamente caluroso causo la muerte de entre 35,000 personas¹⁰ y 70,000 personas¹¹ y un daño económico de US\$ 13,000 millones en Europa. Los cambios bruscos previstos en las pautas climáticas tienden a tener su impacto más grave sobre la parte de la población más susceptible. Mayor riesgo de mortalidad por causas térmicas, defunciones, lesiones e infecciones, y de enfermedades respiratorias y de la piel especialmente entre los ancianos, los enfermos crónicos, los niños pequeños y las personas socialmente aisladas.

¹⁰ Según el *World Disasters Report 2004* de la Cruz Roja

¹¹ Según un estudio para el *EU Community Action Programme for Public Health*

1.1.3.2 Impacto del cambio climático al clima de Yucatán

La Península de Yucatán es una de las zonas más vulnerable a los efectos del cambio climático en México. El aumento en los acontecimientos extremos del clima y el aumento del nivel del mar previsto ponen una extrema presión sobre sus zonas costeras, debilitando la vegetación limítrofe protectora (manglares) y causando pérdidas de las playas arenosas no sólo en sus zonas de infraestructura turística. El ya observable aumento en la intensidad y secuencia de los ciclones se puede incrementar causando daños también en zonas alejadas de la costa.

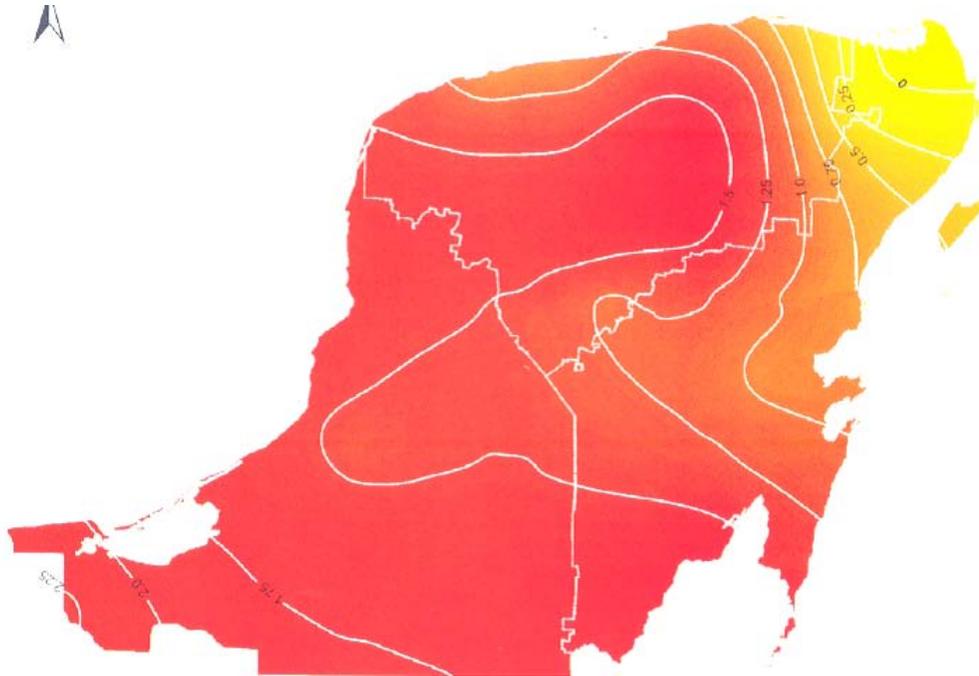


Ilustración 6: Cambios en temperatura en la Península de Yucatán en 2020 en comparación con los Normales de 1961-1990, calculado con el programa canadiense HADCM3 y el escenario del IPCC #B2, fuente: Orellana, 2009

Un estudio [Orellana 2009] indica un aumento en la temperatura peninsular de hasta 2°C para el año 2020 en comparación con los datos normales de 1961-1990. El mismo cálculo indica una disminución de la precipitación de entre 100 y 300mm anuales en la península y un aumento de entre 200 y 500mm para la zona colindante de Tabasco. Ese cambio en las pautas climáticas, sobre todo de la precipitación, suele tener un impacto grave sobre la agricultura y apicultura. Las inundaciones en Tabasco se van a intensificar mientras gran parte de la península¹² va a padecer un clima Cálido-Seco¹³. El aumento en las temperaturas también incrementará el estrés térmico sobre las personas lo que hace aún más necesario disminuir la carga térmica en las edificaciones.

¹² Con excepción del extremo oriental

¹³ BW en el norte y BS₀ y BS₁ en la parte central

1.2 ENERGÍA EN MÉXICO

México es un país fuertemente dependiente de su sector petrolero. Sólo los impuestos petroleros generan entre 24% y 47% del presupuesto federal [Estrada, J., 2009]. La paraestatal Petróleos Mexicanos (PEMEX) genera alrededor de 40% de los ingresos del gobierno federal y la CFE contribuyendo con casi 10%. Es decir, la mitad de los ingresos financieros del Gobierno Federal provienen del sector energético paraestatal [Herrera, V., 2009]. Los recursos petroleros probados son muy pocos y alcanzarán para menos de 10 años [ENE, 2010]. Entre 60 y 70% del petróleo de los yacimientos explotados no se extrae. Hasta un 17% de los combustibles recuperados de los yacimientos se quema sin aprovecharlos. La capacidad nacional para refinar aumentó muy poco en los últimos 25 años lo que genera una creciente dependencia de gasolina importada. En 2009 se importó 310 mil barriles diarios o un 39.5% de la demanda total. El gas natural (en su forma de gas natural licuado, LNG), uno de los combustibles fósiles menos contaminantes y con creciente importancia en la generación eléctrica del país, es importado de Perú y Bolivia.

1.2.1 Generación y distribución de Energía Eléctrica

Si hablamos de energía es importante distinguir entre energía primaria; petróleo, nuclear, eólica, carbón, leña, gas, etc. Y energía secundaria, p.ej. electricidad¹⁴. En el proceso de transformación de energía primaria en electricidad las diferentes centrales logran generar electricidad con cierta

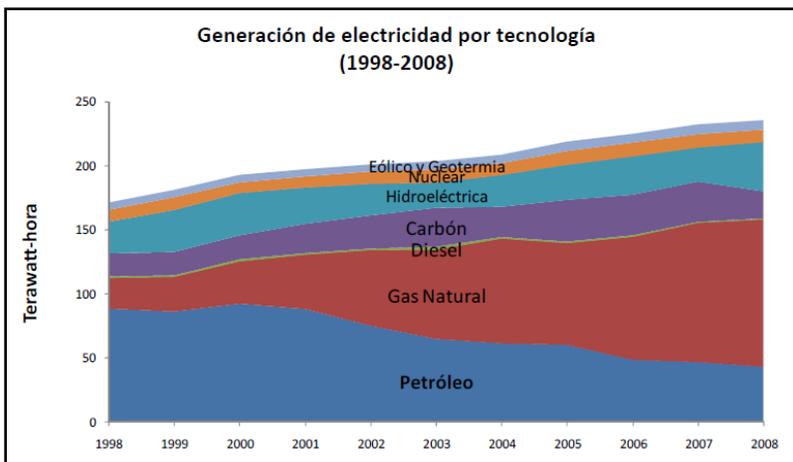


Ilustración 7: fuentes de energía primaria usados en la generación de electricidad en México de 1998 hasta 2008, fuente: Herrera, 2009

eficiencia. Por lo general en centrales termoeléctricas esa eficiencia está entre 30 y 40% con la excepción de las centrales de ciclo combinado¹⁵, las cuales alcanzan una eficiencia (térmica) de 52% con la meta de aumentarla hasta

55% hasta 2018. [Reynosa,

¹⁴ Por razones estadísticas muchas fuentes de energía renovable son subrepresentadas si se trata de energía primaria. Con la Eólica, la Solar y la Hidroeléctrica se toma el valor de la producción neta como valor primario mientras para las fuentes no renovables (incluida la nuclear) el factor de presentación es cerca de tres veces más alto

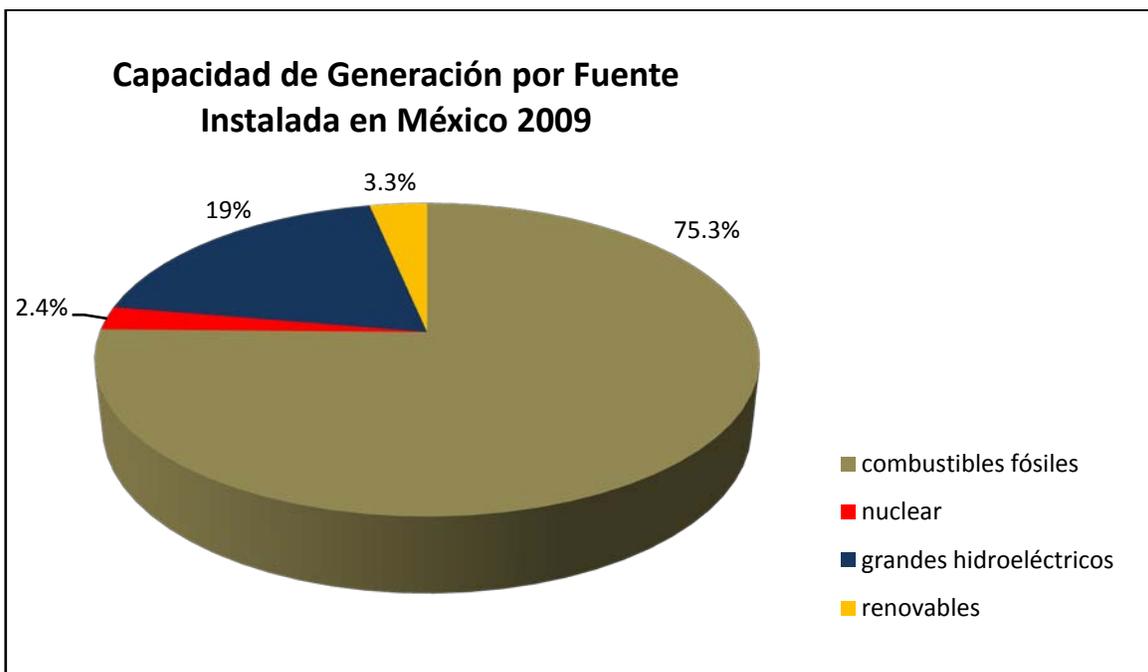
¹⁵ Las que generan electricidad por turbinas de gas y subsecuentemente por turbinas de vapor.

2010].

En México el alto porcentaje del gas natural (ciclo combinado) y el poco uso del carbón en la generación nacional de electricidad se traducen a un ligeramente mejor aprovechamiento de la energía primaria en comparación con la mezcla de EE.UU. o de la U.E. En 2003 la eficiencia bruta de los termoeléctricos en México (incluido los de ciclo combinado) alcanzó un $\eta=39.7\%$ [Llamas, 2003] Sin embargo, tomando en cuenta el autoconsumo de las centrales y las pérdidas de la red, sólo un poco más de una tercera parte de la energía invertida en una central termoeléctrica llega en forma de electricidad al consumidor. Con las restantes $2/3$ se calienta la atmosfera, los ríos o el mar. Es fundamental tomar eso en cuenta si hablamos del impacto ambiental de energía, bombas de calor o autos de electricidad.

Las emisiones de CO_2 por GWh_{el} se encuentra en alrededor de 500 toneladas¹⁶ [Reynosa, 2010]

Todavía de 5 a 6 millones Mexicanos no cuentan con acceso a una red eléctrica.



Gráfica 2: capacidad de generación eléctrica instalada en México en 2009, fuente: ponencia de Blanco, J.M., en el IV Simposio Latinoamericano de Energía, 25.08.2009

En 2009, la venta de electricidad por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la extinta Luz y Fuerza del Centro (LyF)¹⁷ fue de 181.5 GWh con una capacidad instalada de 62.108 GW. [Reynosa, 2010]

¹⁶ Lo que es relevantemente por debajo de la tasa de emisión por Gwh generada de EE.UU., China la U.E.

¹⁷ Decreto publicada el 11.10.2009 en el Diario Oficial de la Federación

1.2.2 Perspectiva

La Comisión Federal de Electricidad (CFE), empresa responsable de la generación y distribución de energía eléctrica en México, estima que necesitará aumentar la capacidad de generación anualmente en alrededor de 2.500 MW_e. A partir de qué fuente se va a generar esa cantidad de Electricidad todavía no está claro.

También existen grandes posibilidades de ahorro de energía en el país. Varias instituciones gubernamentales, iniciativas privadas y de la sociedad además de un extenso marco legal y de normatividad tratan de insertar una cultura de ahorro energético. En 2009 el desplome de la economía nacional genera poca demanda en el mercado energético lo que deja tiempo para elaborar bien las diferentes posibilidades.

Varios proyectos para modificar el marco legal del sector energético están en proceso. Dependiendo de su materialización los efectos al desarrollo del mercado eléctrico nacional podrían ser sustanciales. Actualmente la Comisión Regulatoria de Energía (CRE) en colaboración con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) desarrollan un sistema para incluir los costos externos, las externalidades¹⁸ de la generación de electricidad en su precio, lo cual podría fortalecer la posición de las energías renovables. Actualmente la Comisión Federal de Electricidad está obligada por ley comprar o producir al precio mínimo su electricidad.

México cuenta con recursos naturales excelentes para la generación de electricidad a partir de fuentes renovables como la eólica, solar, geotérmica e hidroeléctrica. En el Istmo las condiciones del viento están entre las más aprovechables del mundo para las centrales eólicas¹⁹. La energía fotovoltaica puede ser una fuente adicional importante debido a que ya en la actualidad puede producir electricidad a un precio de por abajo de \$ 1NM/ kwh en zonas de preferencia en el país²⁰. México cuenta con una radiación alta de en promedio 5.5kWh/día, así como también con excelentes condiciones para aprovechar la energía geotérmica y con una amplia experiencia en esa tecnología. En los setentas México estaba entre los países más avanzados en ese campo.

El cambio del sector eléctrico, de un sector muy dependiente de los combustibles fósiles a un sector con baja emisión de CO₂, no sólo depende de los precios actuales de cada fuente de energía pero también de perspectivas y condiciones administrativas/ legales del sector energético.

¹⁸ Externalidades son costos macroeconómicos que todavía no se reflejan en el precio de generación, como destrucción de recursos naturales, aumento en enfermedades debido a sustancias tóxicas proveniente de las centrales, etc.

¹⁹ Lo cual complementará bien a las existentes presas hidroeléctricas.

²⁰ Tomando una radiación de por arriba de 2000kwh/año y un precio de la instalación de 1.700€/kw_{peak}

Mitigar el consumo de energía es una de las bases para un cambio exitoso a una sociedad de baja emisión de GEI. Esto no necesariamente implica que el crecimiento de la economía mengue como lo demuestra el ejemplo de Alemania.

Con esta investigación se trata de mostrar posibilidades de mitigar el consumo energético en la climatización de edificios sin sacrificar el confort. Se calcula que hasta el año 2050, se tendrá que instalar cerca de 100,000MW, o cada año más de 2 centrales grandes, y que no hay combustibles nacionales suficientes para la demanda futura, así se da la oportunidad de cambiar la estructura del mercado hacia un mercado bajo en emisiones de dióxido de carbono.

1.2.3 Impacto de los sistemas activos de aire acondicionado en el consumo energético

Vivir en lugares frescos, el vivir en el sur, es un deseo del hombre ya desde hace miles de años. En la epopeya Gilgamesch se les promete a los guerreros caídos durante la guerra la resurrección en un *locum refrigerii*, en el Islam el paraíso es refrescante. En regiones sin existencia de hielo natural se aprovechó la refrigeración por evaporación y radiación nocturna para producir hielo (Sierra Madre cerca de Oaxaca, culturas del Nilo e Hindú). A partir del siglo XIX se empezó a experimentar con procesos industriales para la refrigeración y el aire acondicionado. El ingeniero J.Gorrie obtiene en 1851 el primer patente americano para una *máquina del frío* y la empresa alemana Linde instala el primer sistema de aire acondicionado en una casa en Frankfurt en 1894. [Hellmann, 1990]

En 1881, después de visitar una fábrica de hielo, el Dr. Max von Pettenkofer exclama que

“Esa nueva tecnología está destinada a llevar la cultura a los regiones tropicales igual que la calefacción jugaba un papel importante en la civilización del Norte.” y “¡Hielo es civilización!”²¹[idem]

No obstante dicha forma de prestar confort térmico en zonas calientes requiere una fuerte inversión en energía. Según datos de la Administración de Información Energética de EE.UU. (EIA, 2011) unos 518.5 mil millones kilowatt-horas (kWh) se gastaron en el sector residencial y comercial para aire acondicionado y ventilación en 2008. De eso, 227 mil millones o un 16% del consumo total del sector, fueron gastados para aire acondicionado en el sector residencial. Los

²¹ „Diese neue Technik der Kälte scheint berufen, als Träger der Kultur in den tropischen Gebieten zu wirken wie die Technik der Heizung in den alten Kulturländern.“ Y „Eis ist Zivilisation“

faltantes 291 mil millones kWh del sector comercial se traducen a un 22% del gasto eléctrico del sector. Esos 518.5 mil millones horas kilowatt equivalen a un 17.6% del consumo eléctrico estadounidense y no incluyen todavía el consumo en fábricas²².

Para el Estado de Veracruz, con un clima muy parecido al clima del Estado de Yucatán, se espera un aumento en la demanda eléctrica en 2020 de 35%, de esa cantidad un 28% debido al cambio climático.

“En suma, para la década del 2020, el consumo eléctrico doméstico se incrementará en un 35%: 7% debido al crecimiento poblacional y 28% al cambio climático. Para los 2050 la población aportará el 62% y por el cambio climático el 65% (para un incremento total del 127% respecto al presente). Como se espera que la población disminuya su ritmo de crecimiento hacia mediados del siglo, para la década de los 2080 los consumos eléctricos habrían aumentado con relación a la actualidad en un 62% por factores demográficos (ya considerados para el periodo de 2050), más un 93% por el cambio climático global, para hacer un incremento total del 155% respecto del presente.” [PVCC, 2009]

Es siguiente cuadro presenta algunos datos relativos a escenarios de consumo eléctrico doméstico por climatización de viviendas.

Tabla 8: Incrementos en los consumos eléctricos del sector residencial por estrato altitudinal para los escenarios 2020, 2050 y 2080 fuente: PVCC, 2009

	KWh/ Usuario año			GWh/ año		
	2020	2050	2080	2020	2050	2080
>899m	0.43	3.18	9.20	517	782	805
450-899m	1.98	6.36	13.76	103	156	157
150-449m	5.18	16.45	41.40	277	459	478
0-149m	18.54	36.00	78.12	2257	3902	4508
Total Estatal	26.12	61.99	142.48	3154	5299	5948

La tabla muestra claramente un aumento llamativo en el gasto eléctrico de las zonas costeras mientras el aumento está menos pronunciado en las zonas montañosas. Tan sólo para el gasto eléctrico para aire acondicionado en el Estado de Veracruz se espera un gasto adicional de 3,154 millones de kWh en el año 2020, o un casi 8 mil millones de pesos (a precios actuales) adicionales.

²² Eso equivale casi a la electricidad generado por todos los 104 reactores nucleares en EE.UU.

Según datos presentado en el curso Air Acondicionado²³, un equipo de aire acondicionado de expansión directa cuesta alrededor de US\$ 1,500.00 por tonelada de refrigeración (TR), con un gasto de 1.1 kWh/TR y un costo en mantenimiento de \$300.00/TR/mes. Un equipo de agua helada²⁴ cuesta US\$ 2,200.00 por TR mientras gasta 1.7kWh/ TR y \$450.00/TR/mes en mantenimiento.

Esos datos indican claramente el potencial que tienen otros métodos de climatización.

²³ Impartido por el Maestro en Arq. Antonio Javier Kuri, PDMA, UNAM, 24.11.2009

²⁴ No recomendable por zonas de alta humedad relativa

. Schumann/ TESIS/ 2011/ "Mejoramiento del Diseño Térmico..."

1.2.4 Impacto de los refrigerantes en el Cambio Climático

Además de su consumo energético, por lo regular eléctrico, lo cual genera emisiones de GEI relevantes²⁵, los mismos sistemas de aire acondicionado operan con refrigerantes altamente poderosos con respecto a su potencial de calentamiento global, o CO₂-eq, lo cual significa que la

Tabla 9: potencial GEI y de destrucción de la capa de ozono de diferentes refrigerantes en CO₂-eq, p.ej. 1kg de R-11 equivale a 4 toneladas de CO₂, fuente: Energytoolbox, 2011

Refrigerante	Potencial de Destrucción de la Capa de Ozono	Potencial GEI
R-11 Trichlorofluoromethano	1.0	4000
R-12 Dichlorodifluoromethano	1.0	2400
R-13 B1 Bromotrifluoromethano	10	
R-22 Chlorodifluoromethano	0.05	1700
R-32 Difluoromethano	0	650
R-113 Trichlorotrifluoroethano	0.8	4800
R-114 Dichlorotetrafluoroethano	1.0	3.9
R-123 Dichlorotrifluoroethano	0.02	0.02
R-124 Chlorotetrafluoroethano	0.02	620
R-125 Pentafluoroethano	0	3400
R-134a Tetrafluoroethano	0	1300
R-143a Trifluoroethano	0	4300
R-152a Difluoroethano	0	120
R-245a Pentafluoropropano	0	
R-401A (53% R-22, 34% R-124, 13% R-152a)	0.37	1100
R-401B (61% R-22, 28% R-124, 11% R-152a)	0.04	1200
R-402A (38% R-22, 60% R-125, 2% R-290)	0.02	2600
R-404A (44% R-125, 52% R-143a, R-134a)	0	3300
R-407A (20% R-32, 40% R-125, 40% R-134a)	0	2000
R-407C (23% R-32, 25% R-125, 52% R-134a)	0	1600
R-502 (48.8% R-22, 51.2% R-115)	0.283	4.1
R-507 (45% R-125, 55% R-143)	0	3300
R-717 Amoniaco - NH ₃	0	0
R-718 Agua - H ₂ O	0	
R-729 Aire	0	
R-744 Dióxido de Carbono - CO ₂		1

²⁵ La emisión promedio del sector eléctrico en EE.UU es de 588.3g CO₂/kWh (2010). Así la energía requerida para operar los sistemas de aire acondicionado en aquel país emite 305,000,000 toneladas de CO₂ anualmente

fuga de dichos refrigerantes y su emisión hacia la atmósfera atribuye al calentamiento global de manera relevante.

Mientras sistemas de aire acondicionado operan con sistemas cerrados que, en teoría, no emiten sus refrigerantes a la atmósfera, en realidad el porcentaje de reciclaje es mínimo. Es decir, que la gran mayoría de los refrigerantes son finalmente emitidos a la atmósfera, ya sea por fugas durante el tiempo de operación, de mantenimiento o del trato de los sistemas desechados.

El refrigerante R22 es el hasta ahora más usado en México, aunque a partir de este año (2011) la producción de equipos que usan dicho refrigerante está prohibida previendo el año 2031 como el último año en el cual se puede usar dicho refrigerante. Los nuevos equipos van a emplear el refrigerante R410A.

R11 ya está prohibido en la Unión Europea desde hace varios años mientras que para el R22 hay un acuerdo de transformación lo que introduce la exclusión de R22 sucesivamente hasta 2015, año en que tampoco el R22 reciclado puede ser usado ni por razones de mantenimiento. [Comfort, 2011]. Datos sobre la pérdida de refrigerantes durante la vida útil de los sistemas de aire acondicionado son escasos, pero los datos reportados por obligación legal en una región del sur-este de los EE.UU. nos pueden dar una idea de la magnitud del problema: se reporta que anualmente en 29% de los sistemas grandes, con más que 25kg de refrigerante, ocurre una fuga con un promedio de pérdida del refrigerante de un 65%²⁶ [CCR, s/a]. La venta en la Unión Europea en el año 2002 alcanzó alrededor de 3 millones de unidades en el rango menor a 10kW. Su contenido de refrigerante era en promedio 1.5kg, cerca de 70% R410A y 30% R407A. La vida útil se calculó en 12 años. Por todo el ciclo de vida se calculó que en las unidades de solo enfriamiento cerca de 65% de emisiones de GEI serán por consumo eléctrico, lo faltante por emisión de refrigerantes [Ecoaircon, 2011]. Según el Mtro. Kuri²⁷, especialista en sistemas de aire acondicionado en la UNAM, no hay ningún programa de reciclaje de refrigerantes existente en México, lo que significa, que el 100% de los refrigerantes empleados en los sistemas de aire acondicionado finalmente escapan a la atmósfera. La situación en otros países es similar.

²⁶ "Of all refrigeration systems using more than 50 pounds of a high-GWP refrigerant that were reported to the South Coast Air Quality Management District (SCAQMD) under their Rule 1415, on average, 29 percent leak annually. These leaking refrigeration systems lost, on average, 65 percent of their refrigerant charge annually.

²⁷ entrevista el 10.02.2011

1.3 ZONA DE CONFORT TÉRMICO

Como zona de confort térmico se entiende un rango de temperaturas en las cuales el ser humano se siente térmicamente confortable. La norma ISO 7730 la define como “Aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico.”

El confort térmico es uno de los factores centrales que determinan el bienestar del ser humano y su capacidad de rendimiento mental y físico. Aunque frecuentemente hablamos sólo de la temperatura, hay otros factores que determinan la zona de confort térmico como radiación, humedad relativa y movimiento del aire. Houghton y Yaglou establecen en los años veinte la “Temperatura Efectiva (TE)”, una medición psicológica que incluye la humedad y el movimiento del aire. A partir de entonces hay un amplio interés en establecer zonas de confort aplicables a diferentes zonas climáticas y tipos de actividades lo cual resultó en una gran cantidad de métodos para indicar la zona de confort. En particular con respecto a climas extremosos, como es el cálido húmedo, sus resultados indican diferentes zonas de confort que a veces son muy distintas entre si. (comparar ASHRAE y Koenigsberger en la ilustración siguiente)

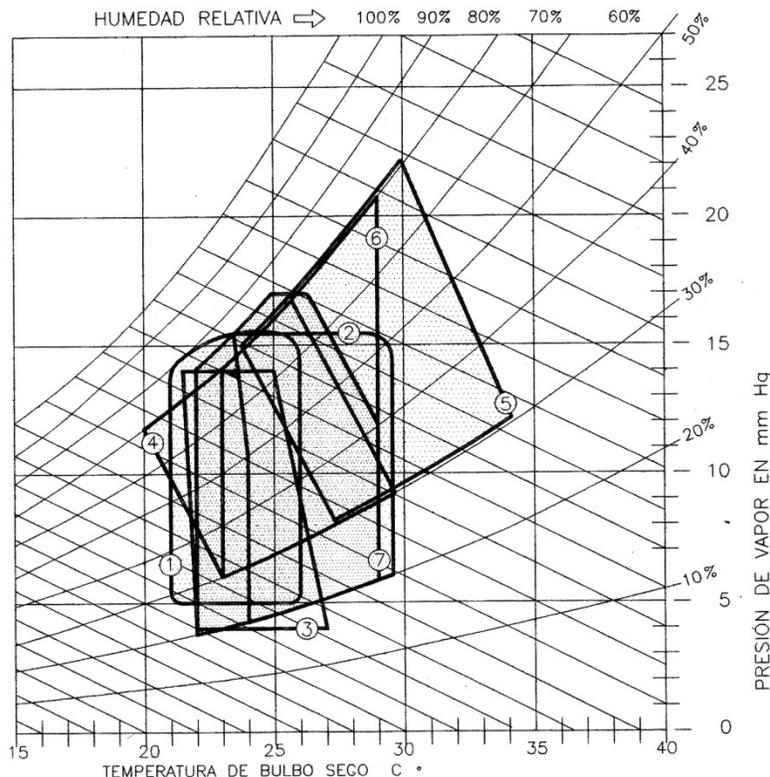


Figura 1.3.1. Comparación de las zonas de bienestar térmico para regiones tropicales, propuestas por investigadores: (1) B. Gviony; (2) V. Olgay (3) ASHRAE ; (4) Yaglou - Drinker (5) Koenigsberger; (6) C. E. Brooks (7) E. González

Ilustración 8: comparación de propuestas para diferentes zonas de confort para un clima tropical. Fuente: Canto, 1997

No obstante el sentimiento térmico confortable es subjetivo. La zona de confort varía según los individuos, las actividades que realizan, la manera como se visten y otros factores. Mientras los Inuit pueden tener una sensación de calor cuando hay 15°C, personas que radiquen en el Caribe van a tener una sensación muy diferente con esas temperaturas. Una mujer delgada tiene una sensación diferente con respecto a las temperaturas que un varón gordo, una jovencita anda en

una playera mientras una señora tiene que vestirse de abrigo para el mismo sentido de confort térmico. Alexander von Humboldt²⁸ observó durante sus viajes a Nueva España que “En el clima extremadamente caluroso de Guayaquil (puerto en Ecuador) los pueblos originarios se lamentan del frío severo en cuando el termómetro de cien (grados centígrados) de repente baja hasta 24° mientras por el resto del día se quedo en 30°.” (Humboldt, 1984:70). Así la definición exacta y generalizable de la zona de confort todavía está pendiente. La gráfica 9 muestra algunas propuestas por diferentes autores.

Otro factor que determina las temperaturas en las cuales la mayoría de la gente se siente confortable es psicológico; gente que trabajan en un edificio de oficinas climatizadas artificialmente sienten confort térmico a temperaturas más bajas que gente que trabajan en edificios sin climatización activa. Varios estudios comprueban que temperaturas arriba del 30°C pueden ser comfortable en ciertas poblaciones [Roaf, 2010; García Gómez, 2010]. Esa temperatura es muy por arriba de la temperatura de 20°C a 22°C comúnmente manejado por la industria de climatización. Cândido et.al. [2011] mantiene que en un clima cálido húmedo siempre se debe que tomar en cuenta no sólo la temperatura del ambiente sino también la velocidad del aire que puede ser deseable hasta una velocidad de 1m/s con temperaturas por arriba de los 30°C. Olgay [1998] declara que

“La franja de confort no tiene límites reales. A partir de una zona central la neutralidad deriva sutilmente hacia un cierto grado de tensión y de éste pasa directamente a alcanzar la situación de incomodidad. Como consecuencia, cualquier perímetro definitivo del confort estará basado en asunciones arbitrarias”

Otro factor que apoya a establecer temperaturas de confort térmico más hacia el límite de los márgenes establecidos en los modelos prevalecientes se deriva de que según Hunn [1996] el cambio y la velocidad del cambio de la temperatura también juega un papel importante en la percepción térmica: si alguien viene de un ambiente de 34°C y entra a un espacio climatizado a 22°C la sensación generalmente no es de confort sino de un choque térmico.

²⁸ “In dem brennenden Klima Guayaquil (Puerto en Ecuador, Amn. Der Red.) klagen die Eingeborenen über heftige Kälte, wenn der hundertteilige Thermometer plötzlich auf 24° fällt, während er den übrigen Teil des Tages auf 30° steht”

“investigaciones llevadas a cabo por Rohles et al., en 1980 sobre los efectos de las fluctuaciones cíclicas de la temperatura sobre el confort térmico, los resultados indican que el ambiente térmico se mantendrá en condiciones aceptables, siempre que la velocidad de cambio no exceda de los 3.3°C/h y la amplitud entre un extremo y otro de la curva de temperatura sea menor o igual a 3.3°C. Una conclusión adicional es que si se desciende desde una temperatura determinada, la sensación no es la misma que ascendiendo hacia la misma temperatura.” [Hunn,1996]

Más sin embargo, la definición de una zona de confort es una herramienta muy válida siempre y cuando estemos atentos de que se trata de una sensación bastante subjetiva de cada persona y de cada situación en la que se encuentra esa persona en el momento dado. Aunque los cálculos pueden darnos la décima parte de un grado para separar la zona de confort de la zona de desconfort, en realidad esa línea es muchísimo más sutil.

Aunque Fanger mantiene la posición que hay una sola zona de confort para todos los seres humanos la gran mayoría de los sistemas actuales tratan de adaptarse a situaciones particulares del clima predominante en una zona y la adopción de la gente que viven en esa zona.

“La magnitud relativa actual de la producción del calor humano y del intercambio de calor con el ambiente puede oscilar entre unos límites muy amplios. Los procesos vitales del cuerpo van acompañados de una transformación de calor considerable. El 20% del rendimiento de esta energía procede de la oxidación de los alimentos, el 80% se expelle en forma de calor. Incluso cuando nuestro cuerpo se encuentra en completo reposo en un entorno térmico adecuado, su producción de calor se mantiene por encima de un nivel mínimo –el metabolismo base- es decir 73kcal/h aproximadamente para una persona media. Este índice alcanza las 100.83kcal/h en actividades sedentarias, las 191.6kcal/h caminando a 3km/h, las 353kcal/h a 6km/h, y las 756.225-1210kcal/h realizando un máximo esfuerzo.” [Olgay, 1998:17]

El confort térmico es un estado de equilibrio resultante del balance de las cargas térmicas intercambiadas entre el cuerpo humano y su ambiente inmediato en donde los factores externos son la temperatura, la radiación, la humedad relativa y el movimiento del aire y las funciones del cuerpo humano son la termorregulación fisiológica, por comportamiento y expectativas psicológicas.

La percepción del ambiente térmico según ISO 10551 se analiza por:

- 1) Sensación térmica,
- 2) Sensación de humedad,
- 3) Preferencia térmica,
- 4) Aceptación personal del ambiente y
- 5) Tolerancia personal.

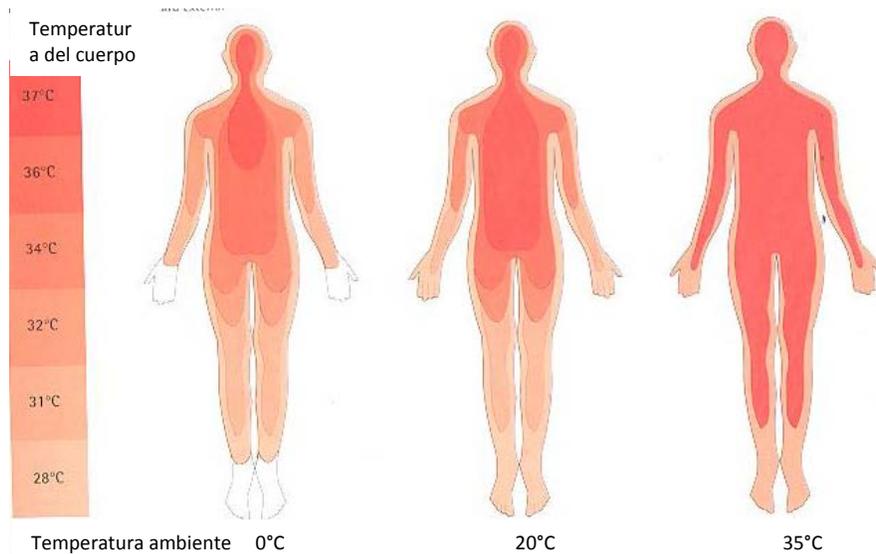


Ilustración 9: temperaturas corporales en relación con las temperaturas exteriores. Fuente: Behling 1996:37

1.3.1 Salud y Confort térmico

Ya en la época de los romanos claramente se entendía y hablaba, condimentado con algo de arrogancia, de los habitantes de otras regiones o zonas climáticas y del impacto que las condiciones climáticas de las viviendas tienen sobre el bienestar y la salud humana. Vitruvio escribe en su Libro Sexto sobre “Las condiciones climáticas y la disposición de los edificios”:

“No nos causa ninguna admiración que el clima cálido agudice la mente de los hombres...

Ciertamente que los pueblos del mediodía (del sur) estén dotados de una inteligencia muy aguda, de una extraordinaria habilidad para tomar decisiones, pero cuando se trata de emprender acciones que requieren fortaleza, acaban rindiéndose, ya que su fuerza de ánimo está muy mermada por el sol;...

Más si las regiones son diferentes debido a las diversas clases de climas,..., no podemos poner en duda que la situación de los edificios debe adaptarse a las peculiaridades de cada nación y de cada pueblo,... “ [Vitruvio, s/a: 231]

Ya desde entonces muchos estudios y patrones se han desarrollados para aprovechar o crear un clima “saludable”, desde los temazcales de los Aztecas hasta los sistemas de cura médica de Kneipp y Bilz. Actualmente y con respecto al estudio nos interesa el impacto que tienen los sistemas de aire acondicionado activo sobre la salud humana. En su aplicación en hospitales de la zona tropical seguramente un impacto positivo. No obstante también hay impactos nocivos vinculados con el uso de sistemas de aire acondicionado. Algunos de dichos impactos se presentan o agravan por el mal mantenimiento (o falta del mismo) que muchas veces se da a los equipos. Seppanen y Fisk analizaron varias investigaciones sobre el tema y concluyeron que los síntomas del Sick Building Syndrome (SBS) son de entre 30% y 200% más elevados en edificios con aire acondicionado en comparación con edificios naturalmente ventilados [citado por Roaf,S. et.al, 2010]. Si la toma del aire fresco/ exterior se encuentra a menos que 60m arriba del nivel del terreno el impacto negativo sobre la salud de los sistemas de aire acondicionado se presenta claramente, según un estudio de la BASE. Mendel et.al [2008] encuentra en un estudio de 2008 que los sistemas de humidificación en combinación con un mal mantenimiento causan significantes problemas respiratorios, en los ojos, la piel y disminuyen la actividad general (fatiga) [citado por Roaf,S. et.al, 2010]. En los años 50 del último siglo el arquitecto Carlos Obregón Santacilia [1952] plantea que

“Ninguno de los equipos modernos para la arquitectura ha estado en México, durante años, en manos más inpreparados e ineficaces como el clima artificial y la calefacción”

Situación que, según el Maestro Kuri [2009], no ha cambiado mucho durante los últimos seis décadas.

En el “Primer Diagnostico de Salud Ambiental y Ocupación de la Comisión Federal para la protección contra riesgos sanitarios” de Dr. Julio Frenk Mora [2002] vemos que la tasa de enfermedades respiratorias en la República, en especial asma, es la más alta en Yucatán. Con una morbilidad por asma en niños menores de cinco años (datos de 2000) de 250 casos anuales por 10,000 personas el estado de Yucatán se ubica en primer lugar y muy por arriba del promedio nacional (49.18 casos / 10,000).

“...se observa que los habitantes de las entidades costeras manifiestan mayor número de casos de asma, posiblemente debido a la humedad del ambiente, ... también se ha atribuido su mayor frecuencia en estas regiones al empleo de sistemas de aire acondicionado que guardan una gran cantidad de polvo y hongos que actúan como factores desencadenantes de la crisis. Este es el caso de los estados de Yucatán, Tabasco, Quintana Roo, Tamaulipas, Colima y Campeche, que registran tasas por arriba de la tasa nacional.” [ibid, sin página].

El Dr. Manuel Baeza Bacab, especialista de enfermedades alérgicas de la Facultad de Medicina de la UADY, confirma la opinión empírica de varios doctores y habitantes entrevistados, que la prevalencia de altas tasas de asma y rinitis alérgica en Mérida se debe al clima y la climatización por equipos de aire acondicionado pero desconoce si hay alguna investigación hecha con respecto al tema a nivel regional o nacional.

1.3.2 Medición de la zona de confort

La zona de confort se mide por medio de encuestas en la cuales la gente responde al encuestador como se siente bajo cierta circunstancia climática.

Hay ciertas particularidades en la medición entre los dos diferentes conceptos climáticos: el cuantitativo y el cualitativo.

El *cualitativo* da más importancia a la naturalidad de la situación en donde se ejecuta la investigación. Se entrevista a la gente en su contexto común, ya sea en su casa o en su lugar de trabajo, bajo condiciones no modificadas. Los investigados deben seguir un ritmo cotidiano, vestir como les parece adecuado, modificar su entorno a su gusto (por ej. abrir o cerrar ventanas, cerrar cortinas etc.) o tomar bebidas refrescantes. Para una mejor comparabilidad se propone que la actividad principal sea ligera y sin cambio en los 15 minutos anteriores.

La medición en un contexto *cuantitativo* es basada en una metodología fenomenológica. El investigador define las condición bajo las cuales el sujeto de prueba que se está investigado. Por lo general dichas condiciones no corresponden al contexto normal del sujeto de prueba. Muchos de esos estudios, y sobre todo los de Fanger, aprovecharon cámaras climáticas para regular exactamente el entorno térmico durante la investigación. Para validar la investigación el investigador debe de hacer estimaciones sobre el nivel de actividad ejecutado por el sujeto de

prueba, su vestimenta y su nivel de digestión. Todos esos factores, además de la temperatura y velocidad del aire influyen en el proceso de medición.

En los dos sistemas los investigados normalmente tendrán que ubicar su sensación térmica entre 5 o 7 rangos. La tabla de 5 zonas atribuye al número 0 la sensación neutro o bien, el comprobante se siente cómodo, el 1 y -1 refieren a sentidos ligeramente caliente o frío respectivamente y el 2 y -2 refieren a una sensación caliente y frío respectivamente. La tabla de 7 rangos es algo más diferenciada y al mismo tiempo da espacio a la discusión de hasta dónde va la zona de confort. Debido a que el rango va desde -3 hasta 3 se puede preguntar cuales son las sensaciones que todavía caen a dentro de la zona de confort. Por lo general el rango -1, 0, y 1 (en la tabla de 7) se considera como confortable.

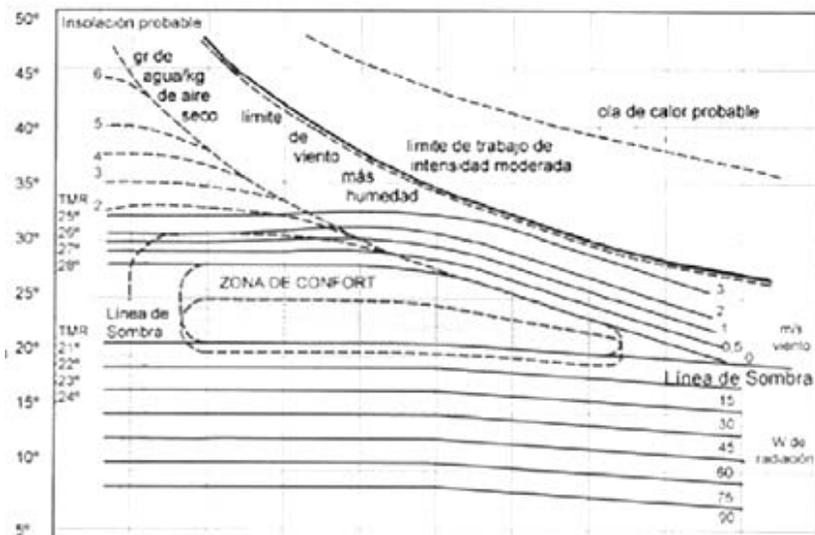
Tabla 10: escala de valoración térmica basado en 7 puntos (TSENS)

Escala de valoración térmica de Bedford usado por Fanger (1970)		
3	Hot	Sofocante
2	Warm	Calurosa
1	Slightly warm	Ligeramente calurosa
0	Neutral	Neutral
-1	Slightly cool	Ligeramente fresco
-2	Cool	Fresco
-3	Cold	Frío

Los resultados subsecuentemente se comparan con los datos observados y medidos por el investigador, indicando así un rango de condiciones exteriores que corresponden con una sensación dada por la mayoría de las personas entrevistadas.

1.3.3 Predicción de la Zona de Confort

Basado en las observaciones y una cantidad inmensa de datos acumulados con respeto al bienestar térmico de las personas varios investigadores trataron de extraer reglas con las cuales se puede predecir el bienestar térmico de personas que van a vivir, trabajar o pasar cierto tiempo en un edificio dado. El valor de dicha predicción está en la posibilidad de introducir o cambiar ciertos elementos del edificio para lograr un buen clima ya en la fase de planeación. Con los actuales programas de cálculo térmico de edificios se puede calcular hasta en detalle el efecto



Gráfica 3: Zona de confort según Olgay

que van a tener diferentes cambios en la planeación del edificio. Uno de los puntos que siempre va a venir con cierta incertidumbre es el efecto del viento. Debido a que el viento, la ventilación, juega un papel central en la climatización pasiva pero en la mayoría de los lugares no cuenta con un

patrón rígido y predecible en detalle, el cálculo con promedios llevará a predicciones poco exactas.

Debido a que parece imposible establecer una zona de confort que abarca la totalidad de las personas dadas se incluye un margen de exclusión de por lo general 10%. Es decir que un 90% de las personas usando el espacio en planeación van a experimentar una sensación térmica confortable mientras los restantes 10% van a sentir o demasiado frío o demasiado calor. También hay modelos de predicción que establecen un margen de desconfort de 20%, ampliando así el rango de confort en el modelo.

Existen dos modelos muy distintos con respecto a su metodología, aplicabilidad a diferentes condiciones climáticas y de actividad que suelen resultar en zonas de confort muy distintas en particular si se trata de condiciones climáticas extremas como suele ser el clima cálido húmedo.

1.3.3.1 Concepto del Voto Medio Previsto y Porcentaje de Personas Insatisfechas (PMV-PPD) / Fanger

El concepto PMV-PPD es un concepto con un enfoque cuantitativo cuyo representante más destacado es el danés Povl Ole Fanger. Basándose en los trabajos de Houghton y Miller de los años veinte que resultaron en establecer la idea de una escala de temperatura efectiva²⁹ y la

²⁹ La "effective temperatura" o ET tiene como base el intercambio de calor entre ser humano y su medioambiente a una temperatura dada y a 50% de HR y se compara a estas las demás constelaciones temperatura/humedad relativa

escala de siete puntos de valoración del ambiente térmico lo que estableció Bedford en los años cuarenta, Fanger desarrolló su propia ecuación en los años setenta del siglo pasado.

$$Lo = H - Ed - Esw - Ere - L - R - C$$

En donde

Lo	=	Acumulación de calor en el cuerpo
H	=	Producción interna de calor
Ed	=	Pérdidas de calor por la difusión de vapor de agua por la piel
Esw	=	Perdidas de calor debidas a la sudoración
Ere	=	Pérdidas de calor latente debidas a la respiración
L	=	Perdidas de calor por respiración seca
R	=	Pérdidas de calor por radiación de la superficie del cuerpo vestido
C	=	Pérdidas de calor por convección de la superficie del cuerpo vestido

Tomando como base el equilibrio térmico entre las pérdidas y las ganancias de calor del cuerpo humano³⁰ establece un vínculo con las sensaciones térmicas de su grupo en prueba. Las respuestas a la escala de 7 de Bedford (ver tabla #8) le llama “voto” con la definición de que el “voto” a la escala: ligeramente calurosa (+1), neutral (0) y ligeramente fresco (-1) coincide con el *comfort térmico*. Con esta idea Fanger inicia los modelos que se han denominado de predicción. Convirtiendo la carga térmica acumulada en el cuerpo a un valor de “voto”, Fanger estableció la ecuación del *Voto Medio Previsto (Predicted Mean Vote, PMV)*:

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.012)Lo$$

En donde

PMV	=	Voto medio previsto
M	=	Tasa metabólica
Lo	=	Acumulación de calor en el cuerpo

Derivando del *Voto Medio Previsto*, Fanger establece otra ecuación más, el *Porcentaje de Personas Insatisfechas Previsto o Predicted Percentage Dissatisfied, PPD*:

³⁰ Debido al proceso de metabolismo y la termorregulación como procesos internos del cuerpo en respuesta a los factores externos; temperatura, radiación, humedad y velocidad del aire equilibrados por la vestimenta.

$$PPD = 100 - 95e^{-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)}$$

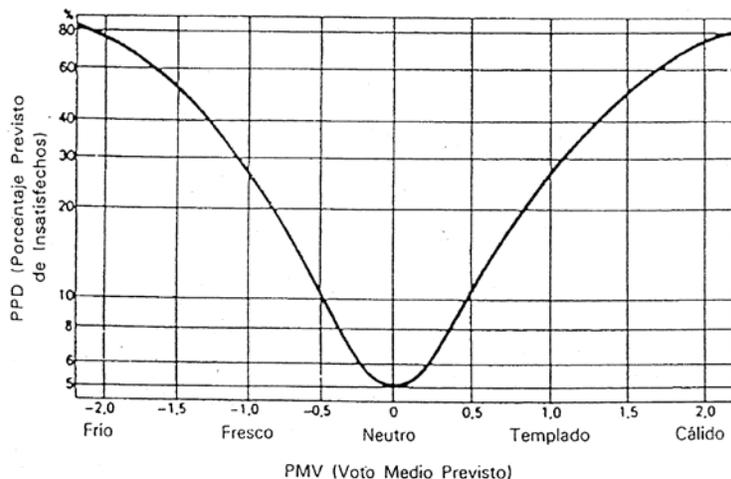
En donde

PPD = Porcentaje de personas insatisfechas previsto

PMV = Voto medio previsto

Cuando el *Voto Medio Previsto* se aleja del valor neutral, se incrementa el *Porcentaje de Personas Insatisfechas Previsto*. En la aplicación de dichas ecuaciones se establece un límite del porcentaje de personas insatisfechas lo cual por lo general es de 10%. En algunos modelos ese valor puede aumentar hasta 20%.

No obstante de su concepto elaborado el enfoque cuantitativo encuentra sus límites. Aunque



Fanger concluye que su ecuación es universalmente aplicable y que las diferencias del resultado no son significantes por motivo de región, sexo, tiempo y edad, varios estudios indicaron que su carácter no era universal. En particular en zonas tropicales y bajo circunstancias de

Gráfica 4: La gráfica muestra el incremento del PPD en relación con el PMV

ventilación natural de los edificios los resultados previstos de las

ecuaciones de Fanger no coincidieron de manera satisfactoria con los resultados obtenidos en estudios de campo bajo condiciones reales. Esos estudios indicaron que factores socio-económicos, culturales, geográficos y climáticos tenían un impacto relevante en los resultados. La crítica principal al “Sistema Fanger” se concentró en tres puntos principales:

- Que los datos base son obtenidos en circunstancias artificiales, por lo general en cámaras climáticas
- La aplicación de valores típicos para el metabolismo y vestimenta del sujeto de prueba falsifica o hace incorrecto el resultado de las ecuaciones

- No se toma en cuenta los componentes de aclimatación y expectativa, lo que tiene un impacto relevante en particular en edificios naturalmente ventilados

Mientras el modelo de Fanger sigue siendo válido bajo las circunstancias de un clima templado con adaptación de la población a un clima modificado dentro de las casas, como se presenta en Europa y América del Norte, ese modelo no es aprovechable en el contexto de la investigación presente debido a que esa se realiza en una zona tropical y con enfoque en edificios no artificialmente climatizados. Una debilidad del sistema Fanger aún en zonas templadas es su dependencia de valores de la tasa del metabolismo y de la vestimenta estimada (también ver ISO 8996 y 9920, pp.43ff). La siguiente tabla muestra la variación de resultados por el PMV y PPD tomando un margen de error de sólo 15% en la estimación del metabolismo y de la vestimenta.

Tabla 11: La influencia de una margen de 15% en la estimación de los valores “vestimenta” y “metabolismo” sobre los resultados de PMV y PPD. Fuente: Parsons, s.a.

$t_a = t_r = 24\text{ }^\circ\text{C}; Pa = 1000 Pa; v = 0.15\text{ }ms^{-1}$			
M	Clo	PMV	PPD
Wm^{-2}	$m^2\text{ }^\circ\text{C } W^{-1}$		%
50	0.130	-1.0	27.7
58	0.155	0.0	5.0
66	0.180	0.4	8.8
85	0.130	0.5	10.5
100	0.155	0.9	22.6
115	0.180	1.2	36.4

Se puede observar que el valor central en la parte superior de la tabla (M=58, Clo=0.155) resulta en un porcentaje excelente de personas no satisfechas de sólo 5%. Es decir que 95% de las personas deben sentirse bien bajo esas condiciones. Mientras un error de 15% en la estimación de los valores “metabolismo” y “vestimenta” resulta en un porcentaje de personas no satisfechas de 27.7%, un porcentaje demasiado alto bajo todas las normas.

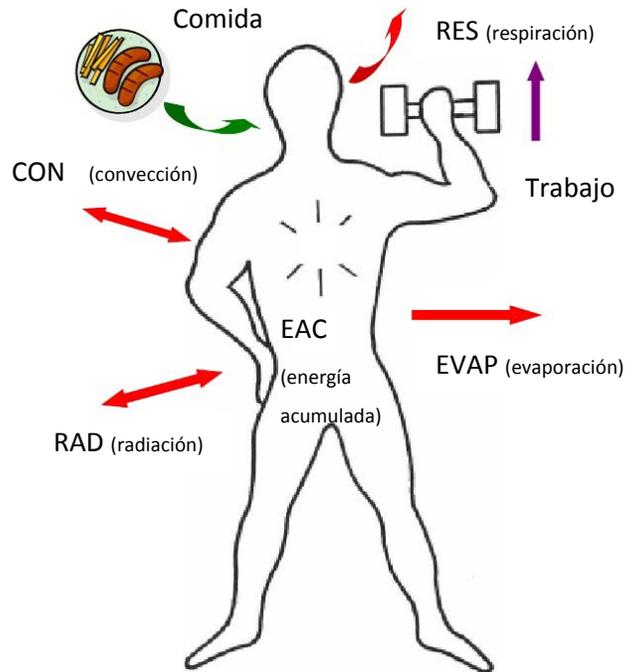


Ilustración 10: Balance térmico del cuerpo humano, $M = Con + Rad + Evap + Res + Ac$ fuente: McPherson, 1993

1.3.3.2 Concepto adaptativo/ Webb, Auliciems, de Dear, Nicols, Humphreys

Al contrario a los datos usados por Fanger, proviniendo de investigaciones aprovechando cámaras de condiciones climáticas controladas, el modelo adaptativo se basa en mediciones obtenidas en “el campo”. Se llama adaptativo porque se considera a las personas expuestas a una estimulación térmica no como un ser pasivo sino le da la opción de adaptarse a las nuevas condiciones. El concepto adaptativo se acerca al tema del confort térmico por un enfoque cualitativo considerado más eficaz para investigar sistemas complejos con muchos componentes interrelacionados cuya explicación sencilla por medio de herramientas de la “ciencia dura” no parece viable. Generalmente no propone principios universales sino interpretaciones teóricas múltiples. La estructura sigue una investigación de “caja negra” en donde son conocidos los impactos y los resultados pero no el proceso interno del ajuste.

El confort térmico, bajo esta vista, es concebido como un estado mental con variables subjetivas y no sólo como el resultado objetivo de un balance energético entre el cuerpo humano y su entorno. El comportamiento humano es un aspecto determinante en la búsqueda y la adquisición del confort térmico en el concepto adaptativo. El lema central de dicho concepto se puede

articular así: “Si ocurre un cambio que produce un malestar, las personas tratan de restablecer su confort.”

Eso se puede lograr por diferentes medidas:

Comportamiento: Unos de los decisiones que tomamos cada día el elegir la ropa apropiada para las actividades previstas. Una de las informaciones más importantes acerca de esa decisión es la que poseemos acerca de la predicción del clima. Nos vestimos con ropa aislante mientras el clima es frío mientras en climas cálidos tratamos de usar ropa ligera. Aún la ropa elegida se adapta a su vestimenta durante el día, abriendo o cerrando el botón de la camisa, cerrando o abriendo el cierre de la chamarra, etc. Otra manera de lograr un confort térmico es aumentando o disminuyendo nuestra actividad física, cerrar ventanas, buscar un lugar más favorable, tomar una postura diferente, acercarse o alejarse de fuentes de calor, entre ellos otras personas, usar ventilación artificial y equipos activos de climatización o hasta modificar el edificio.



Ilustración 11: mujer inuit, adaptado a un clima frío
fuente: <http://eqtvconnect.ning.com>



Ilustración 12: mujeres en la playa, adaptadas a un clima caliente
fuente: <http://www.trendencias.com>

Fisiológico: Adaptación al frío incluye la vasoconstricción, tensión muscular (tiritar), erizar la piel y aumentar el metabolismo por comer más alimentos o tomar bebidas calientes mientras la adaptación al calor se da por vasodilatación, sudar, bajar la temperatura interior del centro del cuerpo, tomar bebidas frías o las que apoyan al proceso de la sudoración (café, té, comida picante) y comer menos comida o comida ligera. Mientras el aclimatizarse al calor está bien investigado (en general se requiere el tiempo de una semana) el si existe una aclimatización al frío por medio de la reconfiguración metabólica no está comprobada. [Roaf, 2010]

Psicológico: el aspecto psicológico apenas se está investigando, no obstante hay varios estudios [García Gómez,2010; Cândido,2010; Baird,2009] que indican que la expectativa y percepción de control que tiene la gente sobre su clima próximo tiene un impacto relevante en su sentimiento de confort térmico. Se ve que personas que tienen la *opción* de tomar decisiones sobre su entorno inmediato (por ejemplo que podrían abrir o cerrar ventanas, cambiar la temperatura del sistema de climatización etc.) no las aprovechan, pareciera que el sólo hecho de saber que las tienen incrementa su tolerancia hacia un margen de temperaturas más amplias por zona de confort .

Los estudios encontraron, además de la implicación de acciones adaptativas por parte de los ocupantes entrevistados, que la temperatura media exterior tiene un impacto relevante en la temperatura de neutralidad, es decir la temperatura en donde se siente térmicamente confortable. De esta manera se han desarrollado modelos que determinan la temperatura de confort como función de la temperatura media exterior³¹ . En la siguiente fórmula se basan todos los estudios con un enfoque cuantitativo, dando valores ligeramente diferentes a “b” y a “m”.

$$T_n = b + m (T_{me})$$

En donde

T_n = Temperatura de neutralidad (confort)

b = Punto de cruce entre eje de las ordenadas y recta de regresión

m = Pendiente de la recta de regresión

T_{me} =Temperatura media exterior

³¹ Sigue vigente la discusión científica si la temperatura media exterior anual, mensual, semanal, diaria u horario es la más apropiada para este cálculo.

Gómez-Azpeitia [2007] presenta la siguiente tabla con los valores b y m usados por los diferentes investigadores internacionales. Las diferentes temperaturas resultantes del clima de Mérida³² por cálculo propio:

Tabla 12: valores “b” y “m” establecidos por diferentes investigadores

Autor	b	m	Tn anual en °C (Mérida)
Humphreys (1976)	11.9	0.534	26.2
Auliciems (1981)	17.6	0.31	25.9
Griffiths (1990)	12.1	0.534	26.4
Nicol et al. (1993)	17.0	0.38	27.2
Brager- De Dear (1998)	17.8	0.31	26.1
Humphreys – Nicol (2000)	13.5	0.54	28.0

A pesar de que los modelos de adaptación presentan un sistema muy avanzado para la determinación del confort térmico hay varias debilidades vinculadas con este acercamiento:

El problema de la subjetividad: Los críticos consideran que gran parte de los fundamentos adaptativos son especulativos y están basados en suposiciones, presumiendo que la ciencias derivadas del enfoque cualitativo son “inexactas” por la interpretación múltiple de los datos con los que se llega a los resultados. [Ídem]

El problema del margen de la zona de confort: La temperatura neutra se considera como el punto central de un margen de temperaturas confortables que se extienden por arriba y debajo de dicha temperatura. Comúnmente se considera que el margen tiene la misma amplitud por arriba como por abajo. No obstante hay investigaciones que indican que, al menos en zonas tropicales, el margen de tolerancia por temperaturas arriba de la temperatura neutra es más grande que el margen por temperaturas bajas, es decir que los límites de variación de confort no son equidistantes a la temperatura de neutralidad. La desviación de la temperatura neutra que todavía está aceptado como zona de confort es variable según los diferentes autores, puede ser tan mínima como 1.75°C o tan alta como 5°C. En general se acepta una margen de 2°C de desviación de la Tn., es decir un rango de 4°C.

El problema de la base de datos: debido a que el concepto adaptativo no acepta la generalización de datos y comportamiento por una sola raza igualitaria, sino diferencia la percepción térmica por

³² Calculado con la Tme *anual* de 26.8°C

factores de región climática, situación socio-económica, de género etc. requiere una base de datos altamente extensa. Aunque se hizo una amplia cantidad de estudios en los últimos años todavía faltan datos por muchos subgrupos y contextos.

El problema de la participación del habitante: los factores “estáticos” como temperatura y velocidad del aire pueden ser menos determinantes que en el sistema estático de Fanger debido a que el “hombre adaptable” puede padecer una amplia gama de diferencias entre esos factores en un tiempo limitado debido a su posibilidad de cambios. La combinación de dichos factores puede causar el bienestar térmico.

El problema de la adaptación a sistemas activos de climatización: hay estudios que indican que la generalización del aire acondicionado como dispositivo de climatización artificial y la condiciones de hermeticidad que implica su funcionamiento, reducen su capacidad natural de adaptación [Höppe citado por Gómez Azpeitia, 2007]. Cândido [2010] muestra que sujetos de prueba expuestos a AA durante su trabajo o en casa tienden a preferir una temperatura baja y más estática, es decir su confort térmico no está tan vinculado con la temperatura exterior como en el caso de los sujetos de prueba acostumbrados a edificios climatizados naturalmente.

1.3.3.3 Otros conceptos de confort

ET (Temperatura Efectiva)

La **Temperatura Efectiva** (Effective Temperature, ET) es la temperatura de un ambiente con 50% de humedad relativa en el que una persona experimente la misma cantidad de pérdidas que en el ambiente actual. Su definición es de una temperatura de aire saturado (húmedo) que da la misma sensación térmica inmediata que la temperatura bajo consideración. La ecuación, ó más fácilmente tablas establecidas a base de la ecuación, permitieron convertir cualquier temperatura de bulbo seco, de bulbo húmedo y velocidad de viento dado a la Temperatura Efectiva. Para la **Temperatura Efectiva Corregida** se toma en cuenta adicionalmente el efecto de la radiación, se mide la temperatura global en lugar de la temperatura de bulbo seco. No obstante debido a varias limitaciones del concepto discutidas desde la década de los Setentas en la actualidad ya casi no se usa dicho concepto.

ET*-DISC

Es un modelo más reciente en donde ET* significa Temperatura Efectiva Nueva. Es un índice que incluye la transferencia de calor mediante la radiación (como en la temperatura efectiva

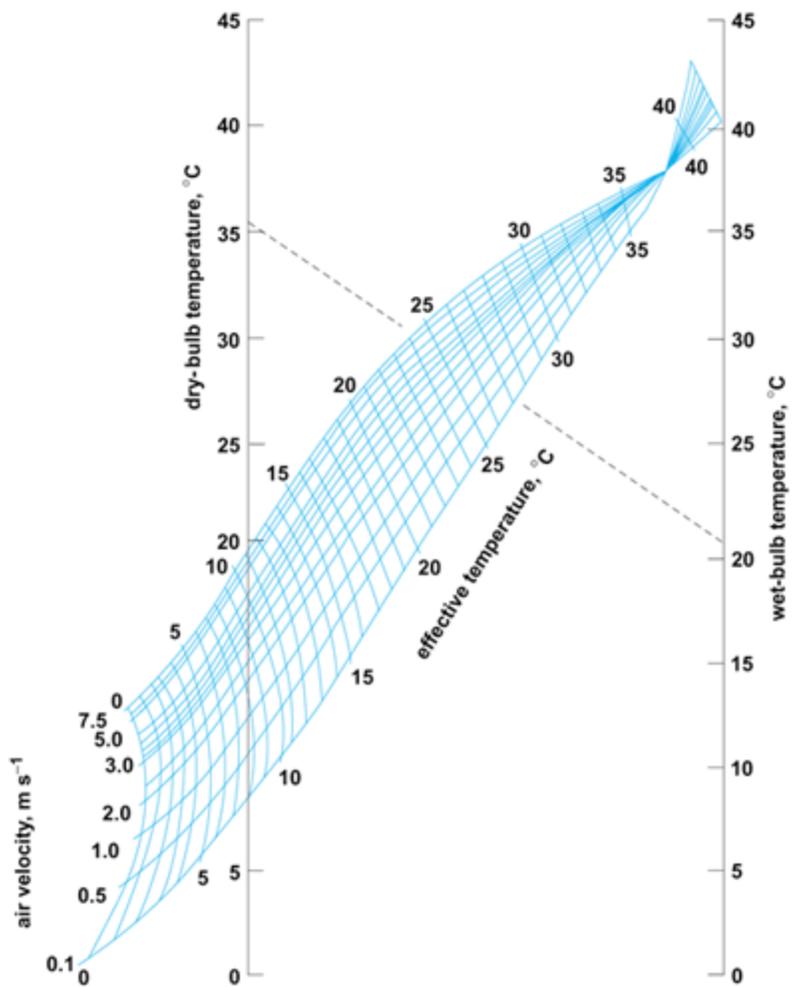


Tabla 13: Temperatura efectiva (escala normal) para una persona vestido ligeramente

pero también toma en cuenta la transferencia del calor latente. El método DISC toma la temperatura de la piel y su humedad (sudor) para predecir el desconfort térmico³³. El ET*-DISC también usa el “2 node” modelo establecido por Fanger en donde se divide térmicamente el cuerpo en dos cilindros; el “cilindro” central que abarca el mayor volumen del cuerpo y que está envuelto en otro “cilindro”, que se compone básicamente por la piel. La interacción térmica se establece básicamente entre esos dos “cilindros” y el

medio ambiente. Mientras en el modelo de voto previsto (PMV) de Fanger no toma en cuenta el tiempo como factor de adaptación, el ET*-DISC sí calcula la transferencia de calor entre cuerpo y medio ambiente tomando en cuenta el tiempo. Por lo general después de 60 minutos se establece un equilibrio, es decir el cuerpo se equilibró con la nueva situación higo-térmico de su entorno. La temperatura ya equilibrada en conjunto con la humedad de la piel (DISC) se traduce después en una Temperatura Efectiva.

SET* (Strain New Effective Temperature)

El SET* establece numéricamente el impacto de cansancio de una persona “estándar” en un clima “estándar”. Basándose en esta ecuación se puede comparar diferentes situaciones climáticas

³³ Más adecuado para climas húmedos

entre sí, es decir el cansancio que una persona estándar va a experimentar en un desierto o en el trópico, pero esto se limita solamente a una persona estándar.

PMV* (New Predicted Mean Vote)

Adaptación del modelo de Fanger incluyendo la humedad de la piel en sus ecuaciones establecidas. Más adecuada para el uso del sistema PMV (Fanger) en climas húmedos.

TSENS (índice)

Índice que usa la *sensación térmica* en una escala de siete puntos (sofocante hasta frío). Es el índice establecido primera vez por Bedford y ampliamente usado en estudios del confort térmico.

DISC (índice)

Índice que indica el “*discomfort*” *térmico* en una escala de cinco puntos (intolerable, muy inconfortable, inconfortable, un poco inconfortable, confortable). Fue necesario estableciendo este índice, que es relativamente nuevo, dándose cuenta que la sensación térmica no siempre corresponde con el confort/ discomfort térmico que experimenta una persona.

TS (Thermal Sensation)

Es una ecuación que trata de predecir la sensación térmica (TSENS) basándose en la temperatura del aire y la presión de vapor. ($TS=0.245Ta+0.248p-6.475$, Ta =temp. del air en °C, p = presión del vapor en kpa)

PD (Predicted Percent Dissatisfied due to Draft)

El PD indica el porcentaje de personas que sienten molestia debido al movimiento del aire (tira), causa de enfriamiento local indeseado. Esa sensación depende de la temperatura del aire, la velocidad del aire y su turbulencia. Se puede calcular por medio de la siguiente fórmula:

$$PD=3.413(34-Ta)(v-0.05)^{0.622}+0.369vTu(34-Ta)(v-0.05)^{0.622}$$

En donde

Tu = intensidad de la turbulencia [%]

V = velocidad del aire [ms^{-1}]

Ta= temperatura del aire [°C]

PS is a fit to data of comfortable persons choosing air velocity levels. The inputs to PS are operative temperature and air velocity.

PS

El PS indica el porcentaje de personas que bajo las mismas condiciones higo-térmico y en control de aparatos de ventilación eligen el mismo grado de ventilación/ velocidad del aire. Con la

siguiente ecuación se puede calcular la velocidad del aire preferible para una persona si esta persona tiene control sobre el ventilador:

$$PS=1.13\text{SQRT}(Top)-0.24Top+2.7\text{SQRT}(v)-0.99v$$

En donde:

SQRT = raíz cuadrada (square root)

Top = temperatura [°C]

V = velocidad del aire [ms^{-1}]

1.3.4 Normas

En México no hay Normas Oficiales (NOM)³⁴ que establezcan un rango de confort térmico para edificios. Debido a eso se hace referencia a las normas vigentes en EE.UU. (ANSI/ ASHRAE 55) y varias normas internacionales.

1.3.4.1 ANSI/ASHRAE 55-2010 Thermal Environment Conditions for Human Occupancy

La Norma 55-2010 de la ASHRAE define *Confort Térmico* como “la condición de la mente que exprese satisfacción con su entorno térmico.”

Se basa predominantemente en el rango de confort establecido por Fanger en 1970, el Voto Medio Previsto³⁵ y el Porcentaje de Personas Insatisfechas Previstas³⁶. Los rangos de la zona de confort basado en esas ecuaciones se puede ver en la Tabla siguiente:

Tabla 14: Rangos de confort según ASHRAE55-2010,[traducido del inglés por el autor] fuente: http://www.ccohs.ca/oshanswers/phys_agents/thermal_comfort.html

Rangos de Confort para Temperatura y Humedad Relativa			
Condiciones	Humedad Relativa	Temperaturas Aceptables	
		°C	°F
Verano (ropa ligera)	si 30%:	24.5 - 28	76 - 82
	si 60%:	23 - 25.5	74 - 78
Invierno (ropa abrigadora)	si 30%:	20.5 - 25.5	69 - 78
	si 60%:	20 - 24	68 - 75

Por primera vez la Norma ASHRAE 55 incluye la posibilidad de usar los rangos de confort como es indicado por los modelos adaptativos para edificios con climatización/ ventilación natural, que por lo general permiten un rango de confort más amplio que la definición establecida por Fanger.

³⁴ Según información obtenida en entrevista con Arq. H. Ferreiro, especialista en normas para la construcción, el 22.03.2011

³⁵ Predicted Mean Vote (PMV) en Ingles

³⁶ Percentage of People Dissatisfied (PPD) en Ingles

1.3.4.2 ISO 7730: Ergonomics of the Thermal Environment—Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria.

La norma 7730 “Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local” se basa en el concepto PMV y PPD establecido por Fanger en 1970 estableciendo condiciones aceptables para el confort térmico. La norma opera con la escala de sensación térmica de 7 puntos (+3 = sofocante -3 = frío). Un índice establece valores de tira (ventilación) aceptable basándose en una ecuación que toma en cuenta la temperatura del aire, velocidad del aire y la intensidad de turbulencia. También se toma en cuenta radiación asimétrica la presencia de diferentes zonas de temperaturas en el espacio habitado. Su mejor aplicación es sobre gente de zonas templadas, sedentarias y vestimenta ligera.

En el anexo “D” la norma ISO 7730 propone las siguientes condiciones de comodidad térmica para un lugar ocupado por una persona realizando una actividad sedentaria:

- $-0.5 < PMV < +0.5$
- $DR < 15\%$ en el cuello y el tobillo.
- Diferencia Vertical de Temperatura del Aire entre el cuello y el tobillo menor de 3°C.
- Asimetría de Temperatura Radiante por ventanas frías menor de 10°C.
- Asimetría de Temperatura Radiante por techos calientes menor de 5°C.
- Temperatura del Suelo entre 19°C y 29°C.
- Humedad Relativa entre 30% y 70%.

Debido a que esta norma refleja el concepto establecido por Fanger aplican los mismos puntos de crítica como la discrepancia entre los resultados obtenidos en diferentes zonas climáticas³⁷ y su enfoque en una situación térmica y de comportamiento estrechamente controlado (cámara climática).

“Laboratory studies have often supported the validity of ISO 7730 whereas field studies have not.”
[Parsons, s/a]

³⁷ Las investigaciones de Fanger se realizaron predominantemente en Europa occidental y los EE.UU, ambos ubicados en zonas templadas

1.3.4.3 ISO 8996: Ergonomics – Determination of metabolic heat production

La norma 8996 “Ergonomía – Determinación de la tasa metabólica en la generación de calor” establece seis métodos para estimar la tasa metabólica que se requiere para los cálculos de la norma ISO 7730 dedicado al confort térmico. Todos los cálculos se hace en base de una persona estandarizada (hombre: 70 Kg, 1.8 m²; mujer: 60 Kg, 1.6 m²) y la unidad es Watts per m². Hay tres niveles de estimación según la exactitud de sus resultados.

Nivel I: Presenta una tabla de diferentes actividades con sus tasas metabólicas correspondientes. Hay un muy grande margen de error en tal nivel.

Nivel II: Presenta una tabla de diferentes actividades con sus tasas metabólicas en combinación con el latido de corazón. Hay un gran margen de error en tal nivel ($\pm 15\%$).

Nivel III: Calcula la tasa metabólica basándose en la medición y analiza del contenido de oxígeno en el aire exhalado. El margen de error es menor ($\pm 5\%$).

Debido al potencial de interpretación errónea que tiene la tasa metabólica en el cálculo del PMV se recomienda usar sólo el método de nivel III. Con un solo 15% de desviación (nivel II) el resultado del cálculo del PMV (con PMV=0.7 hasta 1.1) ya es poco confiable.

1.3.4.4 ISO 9920: Ergonomics of the thermal environment - Estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble.

ISO 9920 presenta una tabla extensa de valores de aislamiento térmico (con la unidad “Clo”³⁸) de diferentes piezas de vestimenta. El valor de un *Clo* equivale al aislamiento que proporciona la ropa normal de un hombre manteniendo el confort a una temperatura exterior de 21.1°C sin movimiento de aire, con una humedad relativa menor del 50% y sin demasiada actividad física. El de la prenda de vestir más cálida es de 4.5 *Clo*.

Se basa en valores obtenidos por mediciones en maniqués. Mientras dicha metodología se presta para obtener datos muy exactos, la aplicación a la situación real presenta muchos problemas. El impacto del movimiento del vestido, la sudoración, la nieve o la lluvia presentan algunos retos a este concepto.

³⁸ “Clothing” en ingles

1.4 LA FÍSICA DEL CALOR

Si hablamos del término *calor* en el contexto físico eso no se debe confundir con lo que cotidianamente nos referimos al decir “*Hace calor!*”. El calor como término físico se refiere a una forma de energía mientras el decir calor de una manera cotidiana se refiere a una sensación. En el capítulo que trata de la zona de confort térmico sí hablamos de calor cómo sensación.

La energía del calor proviene del movimiento de los átomos y moléculas. Esa energía tiene dos formas; una parte cinética y una parte potencial. En los gases la segunda casi no existe debido a su poca masa molecular. Mientras aumenta la energía de una sustancia aumenta la oscilación de sus átomos o moléculas lo que se traduce a una distancia más amplia entre cada una de ellas. Lo que vemos, en un conjunto de un sinnúmero de esas partículas, es la expansión por calor de casi todos los materiales. Lo más obvio es el líquido (mercurio o alcohol) usado en un termómetro. Otro ejemplo en el contexto de construcción es la sustitución de hierro usado en las primeras construcciones de hormigón por acero debido a que el hormigón y acero tienen el mismo factor de extensión por calor.

Hay tres leyes principales con respecto a la termodinámica. La primera establece que “La energía no puede crearse ni destruirse sino solo convertirse de una forma a otra” mientras la segunda establece que, sin imposición exterior, el calor no puede transmitirse de un cuerpo a otro con mayor temperatura. También implica que la conversión de calor a trabajo no se da con una eficiencia de 100%, es decir, no todo el calor se puede convertir en trabajo. La tercera dice que no es posible llegar al punto de cero de movimiento molecular, a 0 Kelvin.

1.4.1 Temperatura

El punto en que ese movimiento de las partículas cese se encuentra en $-273,15^{\circ}\text{C}$, o 0 Kelvin (K). Aunque logre acercarse por fracciones a un Kelvin a esa temperatura, la Tercera Ley Termodinámica plantea que no es posible alcanzar el punto de cero absoluto.

No obstante en el contexto de ese trabajo el rango de temperaturas que nos interesa es muchísimo más estrecho. En la zona climática donde está ubicado el experimento la temperatura casi nunca va por debajo de 5°C y sólo pocas veces por encima de 40°C .

De la energía interceptada por la Tierra, el 60% es reflejada por la atmósfera, el 16% contribuye a la evaporación de los océanos, al origen del ciclo del agua y de la energía hidráulica, el 11,5% es reflejada a la superficie de la Tierra (según su coeficiente de albedo), solamente un 9,5% es absorbida por la masa terrestre y las masas de aire y alrededor de un 3% alimenta la fotosíntesis

(terrestre y acuática). Una ínfima parte participa en la reserva de energía fósil (0,02%) [Urgate, s/a]

La gran parte de la energía que recibe la tierra proviene del sol y llega hasta la tierra por medio de radiación, por eso decimos “radiación solar”. La superficie del sol tiene una temperatura de alrededor de 5800K. Teóricamente cada metro cuadrado de tierra recibe 1367W/m^2 ; la constante solar (E_0). Esa es la energía antes de pasar la atmósfera. Debido a eso la radiación que al fin llega a la superficie de la tierra es menor, dicha energía se llama *radiación global*. La radiación promedio diaria que recibe Mérida es de $4.69\text{kWh/m}^2/\text{día}$. La otra fuente del calor que recibimos es por la tierra misma debido a que en su núcleo prevalece materia con una temperatura de entre 4000 y 5000K. No obstante esa fuente contribuye con un solo 0,02%.

La sensación de calor es, como hemos visto, subjetiva. No obstante se puede decir que una persona siente frío cuando su metabolismo no alcanza sustituir las pérdidas calóricas del cuerpo. De igual manera se siente calor cuando no puede perder suficiente energía por medio de evaporación y radiación debido a una alta humedad y/o temperatura alrededor del cuerpo.

La cantidad de calor necesario para cambiar la temperatura de una materia (p.ej. el muro de una casa) depende de la masa, el grado del aumento de la temperatura de la materia y un factor específico de cada material, la capacidad específica calórica expresado con la letra “c”³⁹

$$Q = m * c * \Delta\theta = m * c * \Delta T$$

Donde

Q = cantidad de calor necesario para cambiar la temperatura de una materia

M = masa del material

C = capacidad térmica del material

$\Delta\theta/\Delta T$ = diferencia de temperatura inicial y final

Esa ley tiene un impacto deseado cuando hablamos de almacenar p.ej. agua calentada por calentadores solares o en el efecto de la inercia, aprovechado en climas con una ondulación grande de temperatura entre día y noche (desierto), por masa térmica.

La unidad del calor es “J” (Joul)⁴⁰

³⁹ El valor “c” de una materia puede variar dependiendo de su temperatura.

Anteriormente se usaba la unidad “cal”. Una cal es la energía necesaria para calentar 1g de Agua por grado centígrado. $1\text{cal}=4,1868\text{J}=4,1868\text{Ws}=4,1868\text{Nm}$

Se puede medir la temperatura por diferentes métodos: Mientras no importe la humedad del aire, lo que es el caso con los termómetros comunes, se habla de la temperatura del bulbo seco. Al contrario la temperatura del bulbo húmedo mide la temperatura tomando en cuenta la capacidad de enfriamiento por evaporación. A 100% HR la temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco son iguales mientras con 0%HR divergen en su máximo. La temperatura del bulbo húmedo siempre (excepción: 100%HR) es más baja que la temperatura del bulbo seco. Esas dos temperaturas son los conceptos más simples.

Otros sistemas de temperatura tratan de incluir el impacto sobre el cuerpo incluyendo además factores como la radiación, el metabolismo, el viento etc. La nueva temperatura efectiva (New Effective Temperature, ET*) es la temperatura de un ambiente con 50% HR en el que una persona experimenta la misma cantidad de pérdida de calor que en el ambiente actual. La Temperatura Radiante Media, TRM (Mean Radiant Temperature, MRT) es la temperatura promedio de todos los objetos que intercambian calor por medio de radiación con un cuerpo. Si la temperatura de los objetos circundantes es más alto que la piel del cuerpo es positiva, si es más bajo es negativa. La definición técnica es que “la MRT es la temperatura uniforme de los objetos circundantes con radiación de un cuerpo negro ($\epsilon = 1$) que resulta en la misma ganancia térmica en el cuerpo humano como los flujos radiantes normales”. La MRT se mide con un termómetro de bulbo seco adentro de un globo de cobre de 150mm pintado de negro mate.

La Temperatura Sol-Aire (T_{S-A}) incluye, además de la temperatura de bulbo seco, las ganancias por radiación solar y radiación infrarroja, por eso siempre se encuentra por arriba de la temperatura medida por termómetro (bulbo seco). En el cálculo térmico de un edificio es importante calcular con T_{S-A} debido a que puede presentar un margen de error relevante si se ignora el impacto de la radiación que fácilmente puede superar un 10K.

$$T_{S-A} = T_o + \frac{a * I - \Delta Q_{ir}}{h_o}$$

Donde

T_{S-A} = Temperatura Sol-Aire [°C]

T_o = Temperatura Exterior de bulbo seco [°C]

A = Absorción de radiación de la superficie [-]

⁴⁰ Por medio de experimentos (en 1841 y 1843) James Joule se dio cuenta de que todo trabajo mecánico puede convertirse en una cantidad de calor. Esa observación fue respaldado teóricamente por Robert Mayer en 1845

I =Radiación Global [W/m^2]

ΔQ_{ir} =Radiación infrarrojo adicional debido a la diferencia entre temp. exterior y temp. del cielo ($\Delta Q_{ir}=F_r \cdot h_r \cdot \Delta T_{o-cielo}$) [W/m^2]

h_o =Coeficiente de transferencia de calor por radiación de onda larga y convección [W/m^2K]

1.4.1.1 Unidades de medición

En 1948 se adoptó internacionalmente una nueva escala termométrica denominada „grados Celsius“ a diferencia de la “escala centígrada” basada en el punto triple⁴¹.

El “Kelvin”(K) es la unidad actual usada en el ámbito científico la cual se adoptó en 1967 como unidad internacional⁴². Cero Kelvin representa la temperatura teórica en donde se para el movimiento molecular (mientras más grande dicha actividad molecular, más alta la temperatura). Aunque se ha acercado a ese punto por menos de una fracción de un Kelvin es prácticamente imposible lograr enfriar materia a ese punto. La temperatura de congelación de agua es de 273.15K mientras la ebullición es de 373.15K. Hay que considerar que existe una mínima diferencia entre la temperatura basada en la congelación/ ebullición y la del punto triple del agua, la cual se encuentra en 273.16K (273.15° más 0.0074°C).

En el sistema ingles todavía se usa un sistema basado en grados Fahrenheit (°F). El agua se congela a 32°F y embulle en 212°F. -459,67 °F es igual a Cero Kelvin. La temperatura absoluta no es representada en °F sino en Rankine (R)

Tabla 15: Representación de las diferentes fases de agua por medio de diferentes escalas termométricas (datos a nivel del mar, presión: 101,325kPa

	Kelvin (K)	Celsius (°C)	Fahrenheit (°F)	Rankine (R)
Cero absoluto	0	-273.16	-459,67	0
Congelación del agua	273.15	0	32	491.67
Ebullición del agua	373.15	100	212	671.67

⁴¹ La intersección de las tres curvas de fusión, vaporización y sublimación del agua, que es de apenas 0.0074°C diferente a la anterior medición basada en la congelación y la ebullición del agua al nivel del mar.

⁴² Antes “grados Kelvin”, °K

1.4.1.2 ESTIMACIONES DE LA TEMPERATURA:

Reducción de la temperatura a nivel del mar:

Debido a que la temperatura depende de la presión atmosférica y esta depende en gran medida de la altura del lugar en donde se mide la temperatura. Es recomendable que para comparar temperaturas tomadas de diferentes lugares con diferentes alturas se reduzca la temperatura a un nivel de altitud (es igual a presión) común. Como nivel común está establecido el nivel del mar (101,325kPa, igual como en las escalas termométricas). La temperatura atmosférica disminuye con un promedio de 6.4K por cada 1000m de altura, es decir en el pico del Popocatepetl (5,462m) la temperatura disminuiría en un 20K con respecto a la Ciudad de México⁴³ sólo debido a su altura, no tomando en cuenta otros factores como viento, vegetación, absorción del suelo etc. La temperatura por gradiente térmico se puede establecer por medio de la siguiente fórmula:

$$T_r = T_m + T_{gt}$$

Donde

- T_r es la temperatura reducida al nivel del mar
 T_m es la temperatura medida en la localidad
 T_{gt} es la temperatura por gradiente térmico

Estimación de la temperatura de un lugar por dos lugares adyacentes

También es posible extrapolar la temperatura de un lugar conocido en su altura a partir de dos lugares cercanos a él. Sin embargo otros factores más que la altura influyen en la temperatura de un lugar lo que implica que los datos obtenidos, aunque cercanos a la realidad, no la reflejan completamente. Si se usan datos extrapolados se debe de aclarar que no se trata de datos medidos sino extrapolados.

$$G_{tr} = \Delta t / \Delta h$$

$$T_{gt} = \Delta h * G_{tr}$$

$$T_{ele} = T_{rle} - T_{gt}$$

$$T_{elb} = T_{rlb} + T_{gt}$$

Donde

- G_{tr} es el Gradiente térmico regional

⁴³ Si en el pico del Popocatepetl se mide una temperatura de -2.3°C su temperatura reducida al nivel del mar será 32.6°C

- Δt es la diferencia de temperatura entre las dos localidades
- Δh es la diferencia de altitud entre las dos localidades
- T_{ele} es la temperatura estimada del lugar más elevado
- T_{rle} es la temperatura de referencia del lugar más elevado
- T_{elb} es la temperatura estimada del lugar más bajo
- T_{rlb} es la temperatura de referencia del lugar más bajo

Tabla 16: Conversión de Unidades

Magnitud	SISTEMA		
	SI	Métrico	Ingles
Energía, trabajo, calor	J (joule)	Kcal (kilocaloría)	Btu (British Thermal Unit)
Potencia, flujo de calor	W (watt)	Kcal/h	Btu/h
Irradiancia, densidad de flujo de calor	W/m ²	Kcal/(m ² .h)	Btu/ft ² .h)

1.4.2 Formas de transmisión de Calor

1.4.2.1 Convección

La convección se realiza a través del movimiento de un fluido. En el contexto de la climatización



Ilustración 13: “Blower Door Test” en una casa de madera en Dresden, Alemania foto: A. Schumann, 2007

de edificios el fluido por lo general es el aire y la convección se realiza a través del viento. Es decir el traslado de una molécula con su propia energía interna a otro lugar cambia las pautas energéticas de dicho lugar. La convección se puede dar por dos maneras: el caso de la convección natural se da por el calentamiento de un fluido lo cual cambia a la densidad del material así generando una circulación. Dicho efecto es responsable de sistemas meteorológicos grandes como los corrientes en los océanos pero también se presenta en una casa. En una casa alta sin mucha agitación del aire interior el aire caliente se concentra en la parte superior de dicha casa mientras el aire frío se encuentra en la parte inferior. Tal efecto se aprovecha en la climatización pasiva por medio

de torres de sol. Gómez Amador et al. [2006] han comprobado que dicho efecto también se presenta en las ventanas de la zona sub-tropical de Colima, México. La convección forzada se da cuando una fuerza exterior penetra un espacio por aberturas en su envolvente y es aprovechada por los torres de viento. La convección es muy aprovechada en la climatización pasiva pero se convierte en un problema grave de desperdicio de energía en espacios artificialmente climatizados. La inyección de aire frío por sistemas de aire acondicionado también es una forma de convección. En los edificios en zonas templadas la convección no controlada puede causar daños estructurales irreversibles por presencia de rocío. La norma alemana para casas de “cero gasto energético”⁴⁴ establece que la tasa de cambio de aire por hora no controlada no puede superar el $0.6h^{-1}$. La infiltración se puede medir por medio de un “blower door test”⁴⁵. La convección también se puede dar entre dos capas de muro (bloque hueco) o cristales (ventana de doble vidrio) en tanto la distancia entre los dos supera cierta distancia. En dicha circunstancia la

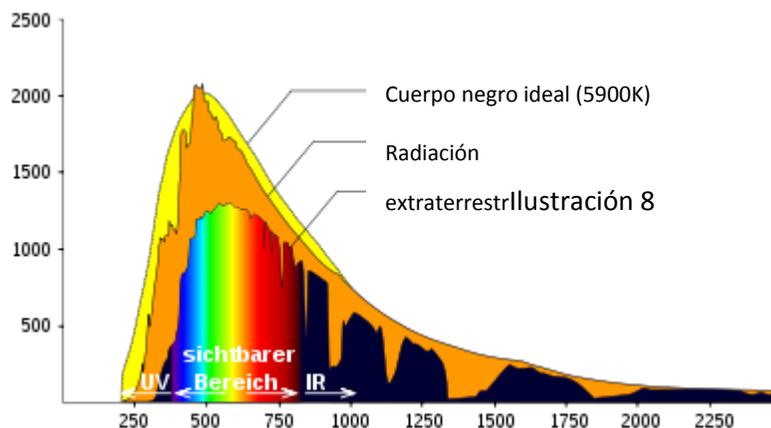
⁴⁴ “Passivhausstandard”, no es una casa verdaderamente de cero gasto energético sino que requiere menos que 15kWh energía primaria para la calefacción por m^2 y año.

⁴⁵ En el “blower door test” un ventilador exprime e inserta aire de/a la casa. La filtración se puede calcular por medio de la energía necesaria de mantener una sobr-/ baja presión estable.

convección elimina el efecto deseado de aislamiento térmico. La convección se mide por volumen desplazado, por medida de tiempo y las condiciones térmicas (calor latente y sensible) bajo las cuales se encuentra la sustancia desplazada.

1.4.2.2 Radiación

Todos los cuerpos poseen de energía interna. Parte de esa energía es emitida por ondas electromagnéticas, la energía de radiación. Dicha energía se desplaza a la velocidad de la luz (300,000km/s)⁴⁶ El ojo humano no puede detectar todo el rango de esas ondas electromagnética sino sólo las onda con una longitud de cerca 380nm hasta 760nm. Este rango incluye tan sólo 47.5% de la intensidad energética de la radiación solar que pasa por la atmósfera. Más que la mitad de la radiación solar no es detectable por el ojo humano. En la mayor parte dicha energía (45.5%) llega en forma de ondas infrarrojas⁴⁷ mientras un 7% llega en forma de ondas ultravioletas⁴⁸.



Gráfica 5: composición energética de la radiación solar, a) cuerpo negro, b) radiación extraterrestre (AM0), c) radiación terrestre (AM 1.5), eje "x" en nm, eje "y" en $W/m^2\mu m$, fuente: <http://de.wikipedia.org>

La radiación es una energía compuesta por pequeños fotones y su masa es inversamente proporcional a la longitud de onda. Las ondas electromagnéticas se desplazan en todas direcciones, y en línea recta a partir de la superficie emisora. Las radiaciones siguen las leyes de la óptica, es decir pueden ser absorbidas, reflejadas o transmitidas. La absorción, supone que la energía es absorbida por el cuerpo interpuesto en su recorrido y por lo tanto producirá un aumento de su temperatura. Se debe que tener en cuenta que ese incremento de temperatura hará que el cuerpo emita energía por radiación con la longitud de onda variable pero siempre

⁴⁶ Que significa que la luz corre entre el sol y la tierra en casi 500 segundos.

⁴⁷ Por arriba de 760nm hasta cerca de 3000nm

⁴⁸ Entre 300nm y 380nm.

muy superior a la longitud de la onda recibida del sol. La Reflexión supone que la energía incidente es reflejada sin ver alterada su longitud y la transmisión supone que la energía atraviesa el cuerpo interpuesto. Por lo general todos esos tres factores se puede observar en los diferentes materiales con diferentes aportes porcentuales.

Cada cuerpo es, a la vez, emisor y receptor de energía. Toda la energía radiante absorbida se transforma en calor. Esto aplica a cualquier longitud de onda. El aire es casi transparente a la energía radiante; su capacidad de emitir o absorber este tipo de energía es insignificante.

“Los problemas de la energía radiante se ven muy simplificados para el arquitecto desde que tiene que considerar sólo dos fuentes principales de emisión: una es del sol, o cuerpo de alta temperatura (radiación del sol entre 0.3 y 3 μm , $\lambda_e=0.5 \mu\text{m}$), que para nosotros será un emisor de ondas cortas; la otra está compuesta por todos los cuerpos que nos rodean, o fuentes de baja temperatura (radiación, λ_e cerca 10 μm), que emiten ondas largas. “ [Rivero, 1988:12]

La emisividad de un cuerpo se determina por la relación entre su irradiancia y la del cuerpo negro.

$$\varepsilon = H_r/H_{rn}$$

donde

ε es la emisividad

H_r es la irradiancia de un cuerpo

H_{rn} es la irradiancia de un cuerpo negro

Los valores de emisividad dependen de la superficie de un cuerpo y de su temperatura y siempre son comprendidos, por definición, de entre 0 y 1.

De lo que nos interesa hay solo dos grupos de materiales diferentes con respecto a su emisividad: los metales con una emisividad ε de entre casi cero (metal pulido) y 0.3 (metal oxidado) y por el otro lado los no metálicos con una emisividad mucho más alta, de entre 0.85 y casi 1.0.

La relación entre el espectro de ondas emitidas nos da la siguiente ecuación⁴⁹:

⁴⁹ De esa manera un cuerpo de 20°C tiene un λ_e de 9.89 μm mientras el sol con 5778K temperatura en su superficie tiene un λ_e de 0.5 μm . Los cuerpos a baja temperatura emiten energía radiante de onda larga mientras los cuerpos a alta temperatura emiten energía radiante de onda corta.

La radiación reflejada y la transmitida (que pasa por el vidrio, p.ej.) no se transforma de ninguna manera (no cambia su longitudes de ondas) mientras la radiación absorbida se convierte en energía térmica (calor).

$$\lambda_e = 2900/T$$

donde

λ_e = valor máximo de la composición de diferentes ondas

T = la Temperatura del objeto emisor en Kelvin

Los materiales se comportan selectivamente con respecto a la radiación incidente, lo que significa que dependiendo de cada longitud de la onda electromagnética recibida los valores para la reflexión, transmisión y absorción son diferentes. Con respecto a la radiación solar (onda corta por la alta temperatura de la superficie del sol) los colores claros son buenos reflectantes mientras los colores oscuros son malos reflectantes. Con respecto a la radiación proveniente de cuerpos con una temperatura baja (tierra, asfalto, edificios) las superficies metálicas son buenas reflectantes mientras las no-metálicas absorben dicha energía de onda corta⁵⁰. Eso es importante en el diseño de casas bioclimáticamente optimizadas pero también se puede aprovechar en sistemas de climatización pasiva como el enfriamiento por radiación nocturna en zonas con un cielo despejado.

La piel humana tiene un índice extremadamente alto de absorción y emisividad ($\epsilon = 0.97$), más alto que casi todos los materiales conocidos, el negro mate incluido. Así los cambios en la radiación que recibimos nos afectan fuertemente [Healthy Heating, s/a].

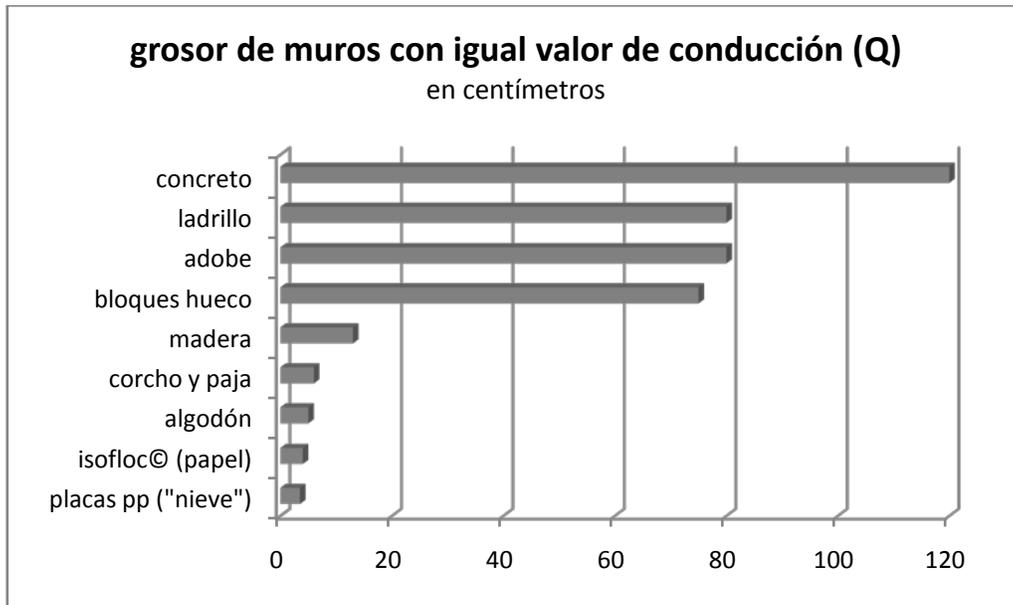
1.4.2.3 Conducción

La transmisión del calor por conducción se realiza por contacto entre las moléculas del material dado, es decir, que no se da un desplazamiento de las moléculas como en la convección sino se transmite el calor por pasar parte de la energía interna de una molécula a otra, "golpeándola". De eso se deriva que mientras más distancia entre las moléculas y menos su ondulación⁵¹, de menor manera se da la conducción, siendo el vacío completo el aislante térmico ideal, pues no permite ninguna transferencia de calor por conducción. Esa transferencia siempre se da desde el lado con temperatura más alta hacia el lado con temperatura más baja. Los aislantes térmicos son materiales que por su composición frenan dicha transferencia de calor. Dado que el aire estático es un excelente aislante térmico, es decir limita la transmisión de calor por conducción, casi todos

⁵⁰ Es decir que una pared pintada de blanco refleja muy bien la radiación solar, incluyendo la infrarroja ($0.76 \mu m$ hasta $\approx 2.2 \mu m$), pero absorbe mucho de la energía de onda larga proveniente de los objetos circundantes ($\approx 8 \mu m$ hasta $\approx 10 \mu m$)

⁵¹ Por lo general en gases.

los materiales aislantes funcionan por la cantidad de aire encerrado en el material. El material “envolvente” de las burbujas de aire tiene ninguna otra función que prohibir un desplazamiento o movimiento del aire encerrada. Así mientras menor contenido de material envolvente y menores sus propios valores de transmisión de calor, mejor el valor aislante del material compuesto.



Gráfica 6: La tabla muestra valores de aislamiento térmico aproximadas de diferentes materiales empleadas en la construcción. Una pared de 13cm de madera seca tiene la misma resistencia térmica como un muro de concreto de 120cm de anchura o una placa de 4cm de polipropileno (“nieve”) seco fuente: Heywang et al. 1992

En su definición física valorada la convección de un material está definido por la cantidad de calor (Q) que pasa por un área del material (A) en un tiempo dado (t) con una diferencia de temperatura a los dos lados del material ($\Delta\theta$). También el grosor (d) del material importa.

$$\lambda = \frac{Q d}{A t \Delta\theta} = \left[\frac{Ws m}{m^2 s K} \right] = \left[\frac{W}{m K} \right]$$

$$Q = \frac{\lambda A t \Delta\theta}{d} = \left[\frac{W m^2 s K}{m K m} \right] = [Ws]$$

Así por un metro cuadrado de una pared de madera ($\lambda = 0.13$) con un grosor de 20cm (0.2m) y una temperatura exterior de $-5^{\circ}C$ y interior de $21^{\circ}C$ ($\Delta\theta = 26K$) pasa durante una hora (3600s) una cantidad de calor de 16.9W.⁵² Por la misma pared hecha de concreto ($\lambda = 1.2$) pasará casi diez veces más calor: 156W.

⁵² Cálculo simplificado por razones didácticas. El cálculo completo incluiría las capas de aire adyacentes a la pared que también contribuyen algo al aislamiento térmico del conjunto “pared”, no obstante para explicar las valores de los materiales es válido.

1.4.3 Datos básicos en la Climatización

En el campo de la climatización, en particular la climatización activa, se emplea cierta terminología especializada. Mientras algunas de las unidades empleadas se basan en el sistema internacional de medidas (SI) por su cercanía al mercado de EE.UU. en México se emplea ampliamente unidades del sistema imperial en el cálculo de sistemas de aire acondicionado. Además algunas unidades llevan diferentes valores dependiendo del sistema empleado. Mientras la capacidad de enfriamiento se mide por lo general en toneladas de refrigeración, su valor es diferente en caso de refrigeración por agua helada o refrigeración por compresión. Mientras una tonelada de agua helada (ton_{ah}) equivale a 12,000 Btu/h o 12,661kJ/h se debe multiplicar este valor por 1.25 para obtener una tonelada de refrigeración por compresión (15,000 Btu/h o 15,826kJ/h).⁵³ En sistemas grandes de aire acondicionado⁵⁴ se habla de kWh per ton, es decir cuánta energía, por lo general electricidad, se requiere para disminuir el calor en una tonelada de refrigeración⁵⁵. Mientras menor el valor, más eficiente en proceso. En sistemas de agua helada ese valor es de 1.7kWh/ton mientras sistemas de expansión directa requieren 1.1kWh/ton [Kuri 2009]. El valor generalmente usado para determinar la eficiencia del sistema se llama Coefficient of Performance (COP). Representa la relación entre la energía necesaria de operar el sistema y la cantidad de disminución de calor por el sistema.

$$COP = E_u / E_a$$

donde

E_u = cantidad de disminución de calor

E_a = energía necesaria de operar el sistema

No obstante debido a que no hay una norma legalmente obligatoria que defina exactamente el reglamento bajo el cual se debe calcular el COP esos valores no son comparables entre sí. Pueden incluir o no la energía necesaria para operar el sistema completo (incluyendo sistemas auxiliares como ventiladores externos o internos, bombas etc.) o sólo parte de él (el compresor), pueden ser tomadas de experimentos bajo condiciones de temperatura y humedad estandarizadas o no, o pueden sólo indicar lo mejor de las condiciones de operación del sistema. Sin embargo para ser

⁵³ Btu = British Thermal Unit

⁵⁴ Centros comerciales, fábricas, conjuntos de oficinas, etc.

⁵⁵ Una tonelada de refrigeración equivale a la energía necesaria para derretir un bloque de hielo de una tonelada/un metro cúbico en 24horas

representativo el COP debe reflejar todos los valores y condiciones de los cuales depende su funcionamiento bajo las condiciones climáticas diversas de un año común. En Alemania se llama a este forma claramente definida del COP el Valor de Trabajo Anual⁵⁶ que para la mayoría de los sistemas tiene un valor de 2.5 hasta 3.5, es decir que se requiere 1 unidad de electricidad para generar 2.5 hasta 3.5 unidades de “frío”. Se debe tomar en cuenta, que para generar una unidad de electricidad y transmitirla al lugar de consumo se requiere alrededor de 3 unidades de energía primaria. Para hacer la situación aún más confusa también se puede emplear el valor de la relación de la Eficiencia Energética ó Energy Efficiency Ratio (*EER*) en inglés.

$$EER = E_c / P_a$$

donde

EER = energy efficient ratio (Btu/Wh)

E_c = capacidad de enfriamiento neta (Btu/h)

P_a = energía eléctrica consumada (Watts)

El EER por lo general incluye el gasto energético en sistemas auxiliares. Para convertir el COP (que debe incluir los gastos energéticos para sus sistemas auxiliares) al EER se multiplica con 3.412⁵⁷:

$$EER = COP \times 3.412$$

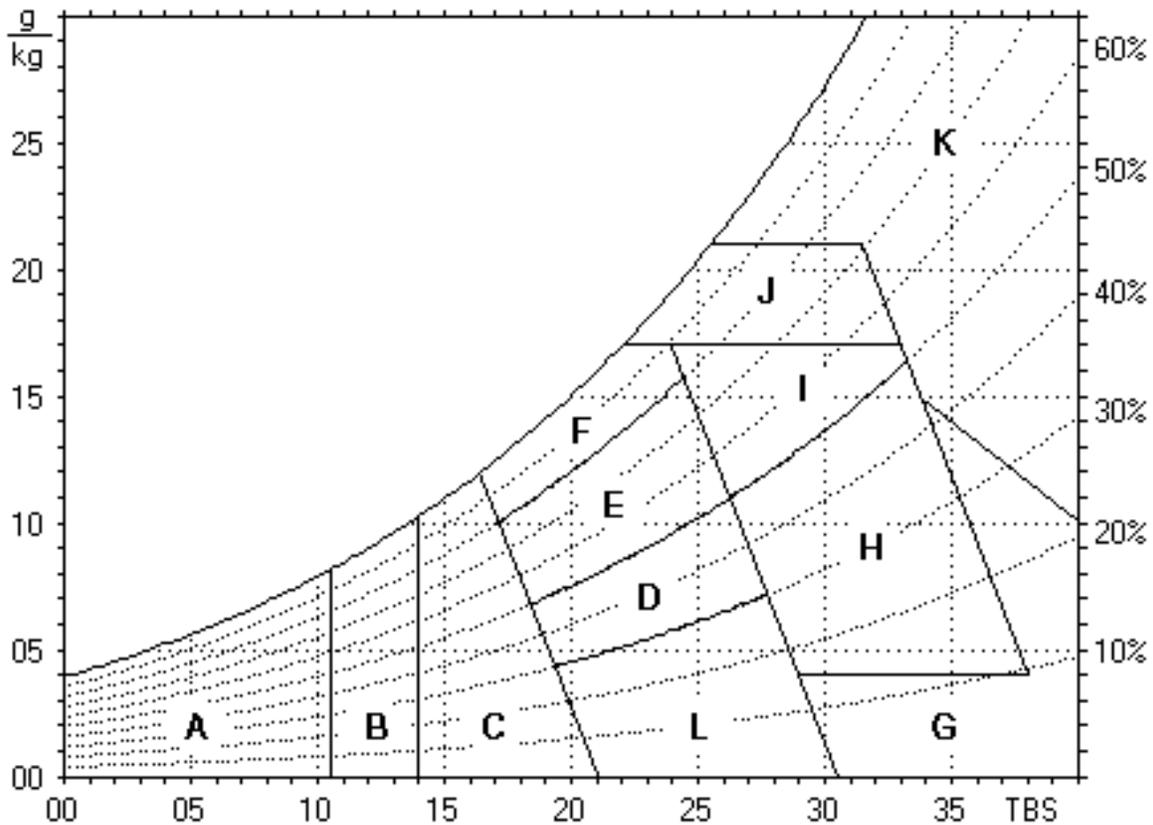
Mientras más alto el COP o EER, más eficiente el sistema.

⁵⁶ Jahresarbeitszahl, JAZ

⁵⁷ 1kWh = 3,412 Btu/h

1.5 SISTEMAS PASIVOS DE CLIMATIZACIÓN

En la climatización pasiva intervienen diversos parámetros. Numerosos factores arquitectónicos, desde la forma, orientación, inclinación de los muros y su tamaño al igual que la ubicación de



Gráfica 7: Carta bioclimática de Olgay con la proposición de diferentes sistemas de climatización dependiendo de la zona higro- térmico. A) Corresponde a la necesidad de emplear sistemas de calefacción artificial, B) Calefacción solar, C) Emplear sistemas de masa térmica (p.ej.muro trombe), D) Ninguna necesidad (humedad baja), E) Ninguna necesidad, F) deshumificación, L) humificación, G y H) enfriamiento evaporativo, H y I) masa térmica y radiación nocturna, I y J) ventilación y finalmente K) enfriamiento artificial

aperturas, hasta las superficies y materiales constituyentes de su envolvente y estructura, con sus combinaciones posibles, condicionan su comportamiento. Sin embargo, lo que tal vez hace un edificio naturalmente climatizado tan diferente a su contraparte, con acondicionamiento artificial, es el papel que juega el usuario. “Edificios pasivos requieren usuarios activos” suele ser un enunciado frecuentemente articulado si se habla de la climatización pasiva, en particular si se entiende con climatización pasiva a sistemas con ningún grado de mecanización. Si involucrar al usuario en el ajuste térmico del edificio se traduce a un “darle poder de influenciar sobre su entorno climático” o al contrario resulta en un “obligar” depende de las preferencias de los habitantes y es un aspecto poco investigado. Lo que si se entiende bien es la insatisfacción de muchos usuarios con sistemas centralizados de climatización espacial. El construir bajo

consideraciones bioclimáticas puede, en algunas zonas extremas o bajo necesidades particulares⁵⁸, no resultar lo suficientemente eficaz para alcanzar el fin deseado. Sin embargo en la mayoría de los casos el resultado puede ser mejor que en la construcción que aprovecha sistemas activos de climatización ignorando el potencial natural.

“Los edificios privados estarán correctamente ubicados si se tiene en cuenta, en primer lugar, la latitud y la orientación donde van a levantarse./.../ Como la disposición de la bóveda celeste respecto a la tierra se posiciona según la inclinación del zodiaco y el curso del sol, adquiriendo características muy distintas, exactamente de la misma manera se debe orientar la disposición de los edificios, atendiendo a las peculiaridades de cada región y a los diferentes climas./.../ De igual modo se irán adaptando las construcciones en otras regiones, siempre en relación con sus climas diversos y con su latitud.” [Vitruvio, s/a:229]

1.5.1 ...basados en Ventilación

La ventilación es una de las primeras fuentes de climatización pasiva en varias zonas climáticas, sin embargo llega a ser la forma indispensable, junto con la protección solar, en zonas cálidas húmedas.

Como recibe el ser humano la ventilación, o más bien los movimientos del aire, depende de la velocidad del aire, la temperatura y humedad del aire, la fluctuación de la velocidad y factores personales como la adaptación, nivel y tipo de vestimenta, de donde viene el viento, la tasa metabólica (la actividad física) y la sensación térmica, es decir, si la persona ya siente frío o calor sin el impacto del viento. El viento sobre la piel desplaza las capas calientes y saturadas de humedad (sudor) que se encuentran cerca de la piel. En condiciones cálidas eso apoya a los mecanismos corporales de auto enfriamiento. Ese efecto se puede aprovechar sin restricciones mientras el aire sea más frío y menos húmedo que la capa envolvente del cuerpo. Pero también en condiciones de un aire seco y caliente en donde mejorará la ventilación a la evaporación, así disminuyendo la temperatura corporal. La velocidad del aire entonces impacta sobre las pérdidas de calor corporal por medio de la convección y evaporación.

Varios estudios han tratado de cuantificar dicho impacto y establecer límites a partir de los cuales la velocidad del aire resulta incómoda. El ASHRAE Standard 55 establece el límite máximo en 0.8ms^{-1} mientras Cândido *et al.* [2010] concluye de su estudio extenso en un clima cálido húmedo

⁵⁸ Enfriar centros de computación, hospitales etc.

de Brasil, que más bien el límite mínimo será de 1.2ms^{-1} . Otro estudio de ella [Cândido *et al.* 2011] establece la velocidad *mínima* del aire adecuado para temperaturas arriba de 29°C en 0.81ms^{-1} . Hay otros estudios [Toftum, 2004] que establecen un rango de entre 0.2ms^{-1} y tan alto como 1.5ms^{-1} . No obstante es bien conocido que gente en condiciones de calor con disponibilidad de ventiladores los ponen a velocidades aun más altas.

Por lo general se distingue sólo entre dos formas de ventilación: la natural y la artificial. Dicha categorización no parece lo suficientemente detallada para explicar las diferentes formas de ventilación en particular de la natural. Muchos sistemas avanzados de ventilación natural requieren diferentes niveles de mecanización, a veces altamente elaborados. Mientras que no incluyen un ventilador si pueden aprovechar de sistemas automatizados que bajo ciertas condiciones abren o cierran aberturas, giran al edificio o a dispositivos que protegen o abren el edificio al viento debido a las necesidades y corrientes prevaletientes. Así será más adecuado hablar de sistemas de ventilación natural convencional y por otro lado de sistemas de ventilación natural mecanizados o avanzados.

Mientras en climas fríos la gente trataba de limitar la ventilación en sus casas aguantando niveles altos de humo y otros aerosoles mal olientes y nocivos para la salud, en climas cálidos siempre se trataba de aprovechar aún la mínima actividad del viento. Las primeras “casas” eran nada más un techo de materia orgánica que sirvió para protegerse de los aguaceros inhibiendo de nada la ventilación horizontal entre sus “paredes”. Más tarde y dependiendo de las zonas se diversificó la construcción: plataformas elevadas para protegerse de inundaciones, animales y levantarse a un



Ilustración 14: Badgir en Yazd, Iran

nivel mejor alcanzado por el viento, paredes de palos u hojas de plantas entretrejidas y formas de casas que dejaron pasar fácilmente el viento. Por lo general todas esas estructuras en zonas cálido-húmedas consistieron de materiales ligeros y con muchos espacios ahuecados.

En zonas cálido-secas, áridas, las culturas antiguas desarrollaron conceptos ingeniosos para ventilar sus espacios interiores. Los *badgir*, o “torres de viento” de Irán todavía muestran dicha capacidad de crear espacios cómodos por medio de ventilación natural. Dichas “torres” son solamente la parte más visible de un sistema complejo. La torre consiste por lo general en una estructura rectangular que sobresale

del terreno y las construcciones circundantes. Tiene aberturas en su parte superior en uno hasta

cuatro direcciones las cuales se pueden cerrar dependiendo de donde venga el viento fresco⁵⁹. Una vez “atrapado” por las torres es dirigido hacia una fuente en la parte inferior de la casa y desde allí distribuido por todo el edificio. Dichas “torres de viento” no se pueden confundir con las torres solares o *solar towers*, las cuales tienen una apariencia similar pero su funcionamiento se basa en un concepto físico distinto. Aprovechando que el aire caliente es más ligero que el aire frío, generando un efecto de tiraje, la torre funciona como un extractor de aire caliente. Para mejorar su funcionamiento se recomienda pintar la parte superior y que esté dirigida hacia el sol de un color absorbente. Si se combina ese efecto térmico con la infiltración forzada de aire fresco al edificio, por ejemplo por medio de un ducto enterrado, se puede alcanzar niveles confortables aún en zonas extremosas. El ducto enterrado aprovecha que el suelo a cierta profundidad en muchas zonas climáticas⁶⁰ es más frío que el aire radiante. Así, la entrada ubicada en un lugar sombreado⁶¹, el aire que pasa por el tubo se enfría y cuando entra al edificio lo climatiza.



Ilustración 95: La primera fábrica semi-automatizada de celdas fotovoltaicas, la “Solar-Fabrik” en Friburgo, Alemania, está diseñada para climatización natural, aprovechando ductos enterrados, espejos de agua etc., foto: A.Schumann 1998

⁵⁹ En la ciudad de Yazd, Irán, con el viento frío siempre proviene del noreste se construye los “badgir” con sólo una abertura hacia el noreste mientras en otras zonas con direcciones de vientos frescos cambiantes se construye torres con más aberturas.

⁶⁰ En zonas con poca ondulación de la temperatura estacional o diario ese efecto no se puede aprovechar bien, debido a que la temperatura del suelo por lo general también es elevada. Así en zonas tropicales casi no se puede aprovechar.

⁶¹ Si se planta un arbusto aromático, p.ej. jazmín, cerca de la entrada del tubo se puede aromatizar el aire

1.5.2 ...basados en la Radiación

Los sistemas de climatización pasiva basados en la radiación pueden, por un lado, tratar de proteger el envolvente de la casa y lo circundante de la radiación solar, pero también de la radiación de onda larga emitida por materiales adyacentes. Por otro lado se puede aprovechar la radiación nocturna para bajar la temperatura de un objeto o material por debajo de su temperatura ambiental. En seguida se habla de las protecciones de casas o edificios por el enfoque del estudio presente, sin embargo hay otros lugares como parques, calles o callejones o plazas que de igual manera pueden aprovechar la protección solar para crear un ambiente térmicamente más agradable.

1.5.2.1 Protección de la radiación solar

La radiación solar es la principal fuente de energía en nuestro planeta. Así la protección solar es la principal estrategia en zonas cálidas para el diseño bioclimático. En zonas templadas o frías el diseño debe tratar de aprovechar el sol al máximo. Diseñando con o en contra del sol tenemos



Ilustración 16: Puerta en Colima, permite ventilación y da sombra

que tratar de resolver tres puntos principales: mantener un nivel de iluminación natural interior suficientemente alto, no obstruir inadecuadamente la visión hacia el exterior y, en zonas con estaciones térmicamente diferentes, no inhibir los deseables aportes térmicos en épocas frías. En zonas cálidas húmedas el enfoque del diseño bioclimático se resta principalmente en una protección de los rayos solares que ignora la importancia de la iluminación del espacio. Mientras bajo este concepto las cargas externas (penetración de los rayos solares) se pueden minimizar puede implicar un aumento en las cargas internas debido a la necesidad de aplicar una iluminación artificial [David *et. al*, 2011].

Debido a su valoración en reflexión, transmisión y absorción diferentes materiales pueden ser aprovechadas para ganar calor o fungir como protección solar. El vidrio tiene una alta transmisibilidad hacia la radiación solar⁶² mientras para las ondas largas emitidas a más bajas

⁶² La transmisividad del vidrio se reduce radicalmente cuando el ángulo de incidencia se separa de la perpendicular 70° para el vidrio sencillo y 60° para el doble

temperaturas es muy opaco. Sin embargo el ángulo de incidencia modifica este valor considerablemente, así el vidrio es bueno para realizar ganancias de calor pero requiere protección solar donde eso no es deseable. La gran mayoría de los demás materiales empleados en la construcción casi no permiten transmisión alguna sino varios niveles de reflexión y absorción. Mientras más reflexivo el material menos ganancias caloríficas obtendría y mientras más alta su absorción más aumentará su temperatura⁶³. El techo de una casa es la parte del envolvente que recibe la mayor parte de la radiación solar.

El funcionamiento de las protecciones solares depende de su material y de su ubicación con respecto a la casa. Una manera de protección solar, bajo la vista tecnológica muchas veces menospreciada, es el impacto que tienen árboles sobre su alrededor. Un estudio en Grecia [Limor

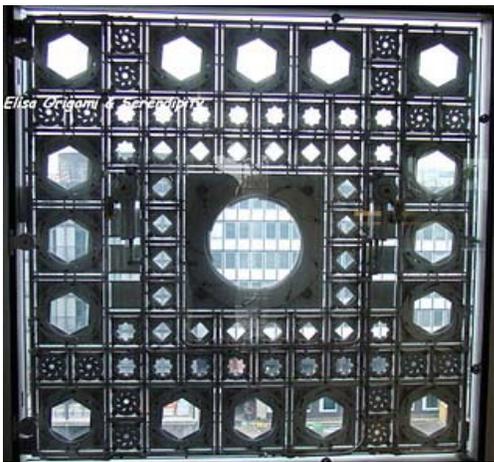


Ilustración 17: "Mashrabije" en el centro de la cultura Árabe en París

Shashura et al. 2010] muestra que el follaje de los árboles puede disminuir la temperatura de medio día en un 5K. El color del envolvente, el material empleado, el tamaño y la ubicación de las aberturas y la geometría de los edificios toman un papel importante en la protección solar. Debido a la función transmisora de los vidrios su ubicación y protección es lo más importante. Protecciones exteriores; protecciones fijas, orientables, escamoteables, son las más eficientes con respecto a la protección solar pero debido a que están expuestos a la intemperie

requieren mayor atención de mantenimiento y planeación. Lo mejor es un material con una baja emisividad colocado un poco separado de la ventana para permitir la ventilación. Si por razones constructivas, financieras, estéticas o permisivas no se puede aplicar protecciones exteriores se debe tomar en cuenta lo siguiente en las protecciones interiores: en la medida en que la protección absorba calor se convertirá en un radiador en el interior del local y la radiación emitida que tiene una longitud de onda muy por arriba a la recibida no podrá atravesar de nuevo el vidrio así generando un efecto invernadero. Lo mejor sería un material opaco a los infrarrojos y muy reflectante. El aluminio pulido se acerca a esta definición, pero cualquier otro material de color claro tendrá propiedades adecuadas, incluso una cortina clara, de buen espesor para reducir la transmisión, será efectiva.

⁶³ Lo cual se aprovecha en los calentadores solares cuya superficie debe que tener una absorción alta, el negro mate llega a una absorción de 97%

“Como este cambio de longitud de onda no se da para la energía directamente reflejada este fenómeno quedará muy minimizado si utilizamos materiales muy reflectivos y poco absorbentes...” [Paricio, 1999, p. 27]

En zonas climáticas que presentan épocas de lluvia solían aprovecharse las partes del techo muy sobresalientes, que por un lado daban protección de los rayos solares pero también de la lluvia. En zonas áridas se limitó a aberturas exteriores diminutas o protegidas por celosías finamente elaboradas: las *mashrabijas*

Los toldos son telas de protección exterior igual a las persianas, las hay de diferentes formas:

Marco rígido: a) marco practicable b) correderas

Enrollables: a) de cuerda b) de bombo (enrollable integral)

Plegables: a) librillo, la persiana de librillo está formada por una serie de marcos que se pliegan girando alternativamente sobre ejes verticales (persianas de lamas)
b) apilables

1.5.2.2 Enfriamiento por radiación nocturna

La radiación nocturna o radiación efectiva es el saldo de la radiación que recibe una superficie horizontal de la tierra durante la noche y la radiación de onda larga que emite hacia la atmósfera. El intercambio de las radiaciones se ve afectado por diferentes contenidos de la atmósfera debido a que algunos gases atmosféricos, como el vapor de agua y el dióxido de carbono, el CO₂, absorben radiación en diferentes longitudes de onda. No obstante, esos gases sólo absorben o reflejan ciertas partes espectrales de ondas, permitiendo la transmisión de algunos rangos de radiación proveniente de la superficie terrestre. Dichas “ventanas” se encuentran en los rangos de 3.5µm a 4µm, a 4.7µm y, la más amplia, de 8.5µm a 12.5µm.

Por lo general dicha relación resulta en una pérdida de calor durante la noche mientras no hay obstáculos, como nubes interpuestas en la trayectoria de las ondas. Es decir las ganancias de calor son menores a las pérdidas. Además de la nubosidad depende de la temperatura superficial de la tierra y la humedad relativa del aire.

“La radiación nocturna que llega en días claros y secos tiene, como función de la longitud de onda, una intensidad cuya forma no corresponde a la distribución de un cuerpo negro sino que presenta varias ventanas, la principal de las cuáles se

encuentra entre los 8 μm y 13 μm . Este apartamiento del comportamiento de un cuerpo negro depende fuertemente de la humedad y de la temperatura: cuanto más seco más se diferencia. En este rango de longitudes de onda, si se define como temperatura de cielo la de un cuerpo negro con una emisión de potencia por unidad de superficie igual a la que recibe la Tierra en la misma área, resulta que ésta temperatura es invariablemente inferior a la temperatura ambiente” (Frigerio, s/a)

Así en días despejados y en climas secos el cielo se puede usar como sumidero de calor para fuentes radiantes sobre la superficie terrestre. Dicho efecto no es de nada nuevo dado que ya en épocas precoloniales las culturas del Valle de Oaxaca, igual que las civilizaciones del Nilo y del Hindus, aprovechaban la radiación nocturna para producir hielo. [Hellmann, 1990:30]

Un experimento realizado en el Centro de Investigaciones Energéticas de la UNAM en Temixco [Pilatosky et al., 2010] realiza un abatimiento máximo en la superficies de los radiadores de 12 K por debajo de la temperatura ambiente, con humedades relativas entre 30 y 65% y con temperaturas del aire entre 25 y 13 °C y para periodos nocturnos de 10 a 12 horas. Más, como he mencionado antes, su empleo en zonas tropicales es muy restringido debido a las condiciones climáticas prevaletientes.

1.5.3 ...basados en la Evaporación



Ilustración 18: adentro de la estructura blanco se encuentra una jarra de barro llena de agua fresca por evaporación

La climatización basada en la evaporación de agua consiste en uno de los primeros métodos para enfriar espacios en climas cálidos secos siempre y cuando haya disponibilidad de agua. En climas con una humedad relativa alta en el aire dicha forma de climatizar sólo funciona en combinación con un secado del aire húmedo. En la climatización por evaporación del agua se aprovecha que en el proceso de evaporación se requiere una gran cantidad de energía que se extrae del entorno. Mientras que el agua ya en sí tiene una alta capacidad térmica, también sus cambios de fase⁶⁴ son procesos con alta demanda/ liberación de energía calorífica. Para evaporar un gramo de agua

⁶⁴ El cambio de fase es el proceso de cambio entre los estados líquido, sólido o gaseoso y depende de la temperatura y la presión. La energía empleada se requiere o libera para reajustar las fuerzas internas entre las moléculas y en esta estatus no tiene impacto sobre la temperatura de la sustancia

a temperatura corporal se requiere 2.409 kJ⁶⁵. La energía necesaria para evaporar una cantidad de agua a partir de una temperatura dada se llama la entalpía de la evaporación de agua. Dicha energía se extrae del entorno, lo que resulta en un enfriamiento del mismo y mientras menos saturado el aire de humedad y mejor la ventilación más alta la evaporación. Ese proceso se aprovecha en la arquitectura vernácula en zonas áridas desde hace ya miles de años, empleando espejos de agua o fuentes en la climatización. Construir con materiales hidrófilos y dejar mojar esos materiales también tiene un efecto de enfriamiento.

También la capacidad de los árboles de evaporar agua mediante su follaje resulta en una disminución de la temperatura rodante [Shashura *et al.* 2010].

1.5.4 ...basados en la Nivelación de la Ondulación de la Temperatura (Masa Térmica, Inercia, Amortiguamiento)

Las diferentes zonas climáticas muestran una diferencia en la distribución de la temperatura

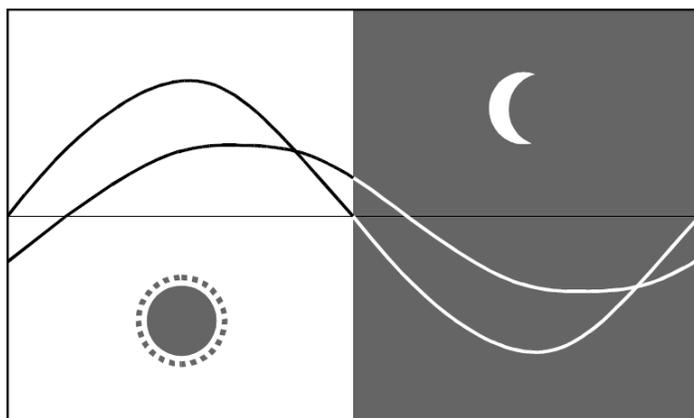


Ilustración 19: Imagen que muestra la idea principal con respecto al amortiguamiento, fuente: Marincic, 1999

extrema exterior. En algunas zonas ésta diferencia está muy marcada entre la temperatura diurna y la nocturna (climas cálidos secos, - áridos-) o entre las diferentes estaciones del año (zonas templadas). Mientras existe dicha ondulación de la temperatura exterior es posible aprovechar ciertos comportamientos de algunos

materiales para equilibrar esos extremos en la temperatura. En el caso de la ondulación de temperatura exterior diaria por lo general es suficiente hacer uso de materiales de construcción adecuados mientras en el caso de la ondulación de la temperatura exterior estacional se requiere de un medio más inerte: el suelo a cierta profundidad⁶⁶.

Tomando como ejemplo un clima árido, con una temperatura exterior en medio día de 40°C y un mínimo en la madrugada de 5°C. Si fuera posible promediar esas dos temperaturas por métodos constructivos se alcanzaría una temperatura interna casi ideal: 22.5°C. Para acercarse a ese valor

⁶⁵ H_{vap} del H_2O a 36.5°C = 43,410 J mol⁻¹ y 18.02g mol⁻¹, 2,500Jg⁻¹ a 0°C, 2,441Jg⁻¹ a 25°C

⁶⁶ Con una profundidad de 2 a 3m, en zonas templadas, ya se realiza un amortiguamiento bastante estable

se debe aprovechar lo que se llama capacidad térmica de los materiales. La capacidad térmica de los materiales NO es la capacidad de aislamiento térmico de los materiales sino, en cierta medida lo contrario. Mientras en el caso del aislamiento térmico la *resistencia* de un material al traspaso de calor, lo que se logra con materiales de baja densidad (=bajo peso), es importante. En el caso de la capacidad térmica lo que es de trascendencia es la capacidad de *almacenar* calor en un material, lo que se logra predominantemente por un peso alto del material. Además del peso del material también interesa un valor específico de cada material; el calor específico del material denominado con "c". La inercia está relacionada con el peso del envolvente, ya que el calor específico de los materiales de construcción es similar con un valor "c" de entre 1.7 hasta 2.7 kJ(kgK)⁻¹ para la madera y 0.8 hasta 2.0 kJ(kgK)⁻¹ para un muro de tabique y 0.9 kJ(kgK)⁻¹ para el cemento y 1.2 kJ(kgK)⁻¹ para el poliestereno expandido [Schneider, 1996]. El agua tiene, con un c = 4.19 kJ(kgK)⁻¹, el calor específico más alto de las materiales comunes por lo cual es ampliamente utilizada para almacenar energía.

El calor específico es la cantidad de energía que es necesaria para levantar la temperatura de un kilogramo de un material en un Kelvin:

$$c = \frac{\Delta E_i}{m * \Delta \vartheta} = [c] = \left[\frac{J}{kg * K} \right]$$

Donde

c = calor específico

ΔE_i = cambio de la energía interna

m = masa

$\Delta \vartheta$ =diferencia en la temperatura

El amortiguamiento (μ) se da por el efecto de que una gran parte de la energía que recibe el envolvente de una casa no se transmite directamente hacia adentro de la casa sino que esa energía se requiere para subir sucesivamente la temperatura de la pared antes de penetrar al interior. Debido a que paredes anchas de materiales pesados requieren una alta cantidad de energía para subir su temperatura ese proceso se tarda horas. Así la energía captada durante el día se mantiene en la pared hasta las horas de la noche disminuyéndose poco a poco por radiación y convección hacia adentro y afuera, manteniendo así una temperatura más alta que la temperatura exterior en su cercanía durante la noche.

$$\mu = \frac{A_{\text{sup int}}}{A_{\text{sup ext}}}$$

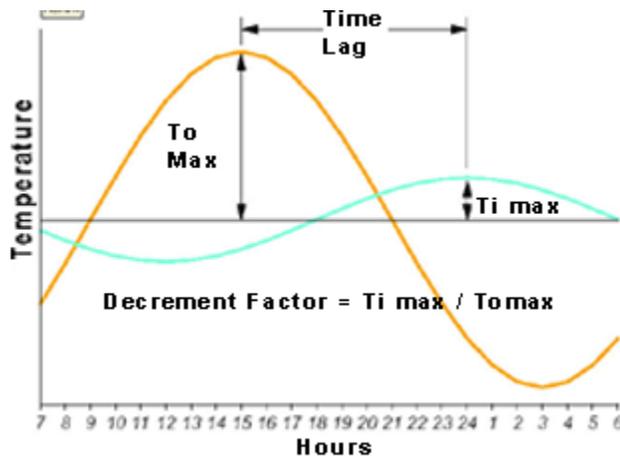
Donde

μ = medida del amortiguamiento del cerramiento: a menor valor mayor es el amortiguamiento.

$A_{\text{sup int}}$ = diferencia máxima de temperatura superficial interior de un envolvente a lo largo de un día

$A_{\text{sup ext}}$ = diferencia máxima de temperatura superficial exterior de un envolvente a lo largo de un día

Otro efecto vinculado con el efecto del amortiguamiento es el desfase. Con la palabra “desfase” se describe un proceso similar al del amortiguamiento. Mientras el amortiguamiento es una función de la temperatura (la distancia entre T_{max} y T_{min} disminuye), el desfase es una función del



Gráfica 8: La gráfica muestra el impacto de la masa térmica sobre las temperaturas máximas interiores y exteriores igual que el desfase

tiempo y describe la diferencia en horas pico de temperatura exterior y pico de temperatura interior, siempre siendo la T_{max} exterior más alto que la T_{max} interior.

Mientras más alta la capacidad térmica del envolvente mejor el efecto del amortiguamiento y más prolongado el desfase. La ventaja del desfase se presenta en el hecho de que el interior de la casa se

mantiene a bajas temperaturas mientras la temperatura exterior es la más alta y en la tarde, cuando la temperatura interior alcanza su máximo ya se puede abrir ventanas o salir de la casa para aprovechar de la temperatura exterior ya fresca. Un desfase ideal se encuentra de entre 7 a 10 horas.



Ilustración 20: Vista de la ciudad de Shibam en Yemen, densa construcción con materiales pesadas (adobe) y las partes superiores de las casas pintadas en color reflectante. Foto: A. Schumann, 2000

Ese efecto, muy deseado en las zonas áridas y templadas no se puede aprovechar en las zonas tropicales debido a su poca ondulación de temperatura. Los materiales pesados son contraproducidos en esas zonas debido a que siguen radiando calor hacia sus cercanías en la tarde/noche mientras se trata de aprovechar el aire fresco de la noche.

2 EXPERIMENTO

2.1 INTRODUCCIÓN AL EXPERIMENTO

Con el experimento se trata de comprobar que es posible bajar la temperatura interna de casas ya construidas mediante la aplicación de modificaciones en su envolvente.

Para establecer el contexto en el cual se realizó el experimento se aplica la sistematización del clima, explicada en la primera parte de la tesis, a la situación local de Mérida, Yucatán. También se abarca la situación de la vivienda en la Península. Enseguida se explican los pasos de la preparación del experimento. Los resultados obtenidos se presentan en el siguiente capítulo, explicando por separado los resultados de las maquetas y de las casas. En ese capítulo se encuentra la respuesta a la primer hipótesis, o sea que sí es posible bajar la temperatura interna de las casas por medio de modificaciones en el techo. Las mediciones en las maquetas muestran algunos resultados prometedores con respecto al uso de un techo estanque.

Enseguida se hace una comparación entre los resultados obtenidos en las maquetas con los resultados de las casas. Esa parte da una respuesta a la hipótesis dos que anuncia que “Los datos obtenidos por mediciones en maqueta son transferibles al edificio.” Debido a que el techo es la parte de la envolvente que recibe la mayor carga térmica, en el experimento se limita a modificar dicha parte. Se mide la temperatura interior de cuatro casas iguales de interés social con techos modificados durante el mes más caliente en Mérida en 2010 que fue en Junio. Esas mediciones se realizaron bajo dos condiciones diferentes: A) sin ventilación (puertas y ventanas cerradas todo el tiempo) y B) con ventilación nocturna (puertas y ventanas abiertas durante las horas de la noche). Con unas semanas de anterioridad de las mediciones en las casas, se construyó con los mismos materiales usados en las casas reales tres maquetas en el campus de la Facultad de Ingeniería de la UADY. Esas maquetas reprodujeron a escala 1:4 la sala-comedor de las casas. Mientras se proceso la preparación y modificación de las casas para el experimento se aprovechó el tiempo para realizar algunos experimentos secundarios en las maquetas.

Una vez preparadas las casas para el experimento se aplicaron las mismas modificaciones hechas en los techos de las casas a los techos de las maquetas. De tal manera las maquetas representaron exactamente las mismas pautas que las casas excepto su menor escala. La intención de esa medida era comprobar la comparabilidad de los datos obtenidos en las mediciones en las maquetas con la situación real de las casas.

Se desarrolló el experimento e interpretó sus resultados basándose en los conceptos explicados en la primera parte de la tesis.

2.2 MÉRIDA/ YUCATÁN

2.2.1 Clima

El siguiente texto está basado en la evaluación climática por Roger Orellana y Isabel Bañuelos, publicada en el “Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán” [Chico Ponce de León, 1999]

La Península de Yucatán no es solamente una entidad fisiográficamente sino también desde la perspectiva climatológica. Los elementos del tiempo y el clima en esta región están altamente influenciados por las siguientes circunstancias particulares de los factores climáticos:

- 1) Una fuerte influencia de presiones altas (celda anticiclónica) del Atlántico que ocasiona una apreciable gradiente barométrica. Esta es la base de muchos de los procesos atmosféricos que influyen el clima y tiempo de la península
- 2) La presencia en verano de los vientos alisios procedentes de la Celda Bermuda Azores trae la principal cantidad de lluvias del verano. Estos vientos proceden del noroeste y se dirigen hacia el suroeste. El sobrecalentamiento del mar en el verano ocasiona que estos viento se saturen con nubosidad y se enfríen al chocar con los continentes por lo que provocan las lluvias de verano. Los meses más afectadas por este fenómeno están de mayo a octubre.
- 3) La llegada de vaguadas polares, inestabilidades atmosféricas de las capas altas provenientes de los polos, a medio verano que generan la sequía intraestival. Este fenómeno impide que lleguen los vientos alisios con lo que disminuye considerablemente la precipitación a mitad de verano (indicado por la w'' en la tipología del clima de Mérida). Este fenómeno varía en su intensidad cada año y puede durar de uno a tres meses.
- 4) El advenimiento a partir del Octubre de las masas de aire polar, los 'nortes', con abatimiento térmico en la región, vientos fuertes y lluvia invernal. Al chocar frontalmente masas de aire provenientes de EE.UU. y Canadá con el aire tropical de la región, se originan frentes. En su traspaso por el Golfo de México y el Mar de las Antillas se saturan con agua que después recibe la península en forma de lluvia.
- 5) La importante influencia de las corrientes marítimas de agua cálidas que rodean el litoral, proveniente de ramales de la corriente ecuatorial (Caribe) que se desplazan hacia el norte. A partir de la trayectoria de estos ramales en el noroeste de la península, se genera la Corriente del Golfo.
- 6) Las ondas del este y depresiones como las tormentas tropicales y ciclones tropicales o huracanes que se presentan a partir de agosto y en algunas zonas de la península siguen

hasta octubre. Este patrón es más fuerte en septiembre, de tal manera que este es considerado como 'el mes de los huracanes'. En el hemisferio norte las tormentas y huracanes se desplazan en el sentido contrario al reloj con una trayectoria de este a oeste y posteriormente hacia el norte.

En términos generales, la península tiene un clima cálido subhúmedo con una pequeña franja de clima cálido semiárido hasta árido en el noroeste. La intensidad de la precipitación disminuye hacia el norte y sube hacia el sur. Las cantidades de lluvia provienen de nubes formadas sobre el Mar Caribe y el Océano Atlántico. Los vientos alisios, las depresiones tropicales y las masas de aire polar le rigen. Tres procesos atmosféricos definen el patrón de la precipitación en la Península:

- I) Existe un marco gradiente barométrico desde la zona de altas presiones del Atlántico hacia las bajas presiones. La condición anticiclónica provoca sequía.
- II) Al no existir marcada orografía en la península, las masas de aire cargadas de nubes no precipitan de forma frontal
- III) Sin embargo, el ascenso por calentamiento de estas masas de aire, seguido por enfriamiento adiabático y posterior descenso con precipitación, son fenómenos muy comunes denominadas lluvias convectivas

Cualquier modificación a las casas con el fin de disminuir las ganancias térmicas por medio de lonas o aplicación de estructuras ligeras sobrepuestas sobre la estructura original tiene que tomar en cuenta la susceptibilidad de la península al impacto de los huracanes. Los últimos dos fuertes huracanes⁶⁷ causaron graves daños en particular en las estructuras ligeras no estaban bien contruidos.

⁶⁷ Isidoro en 2002 y Gilberto en 1988

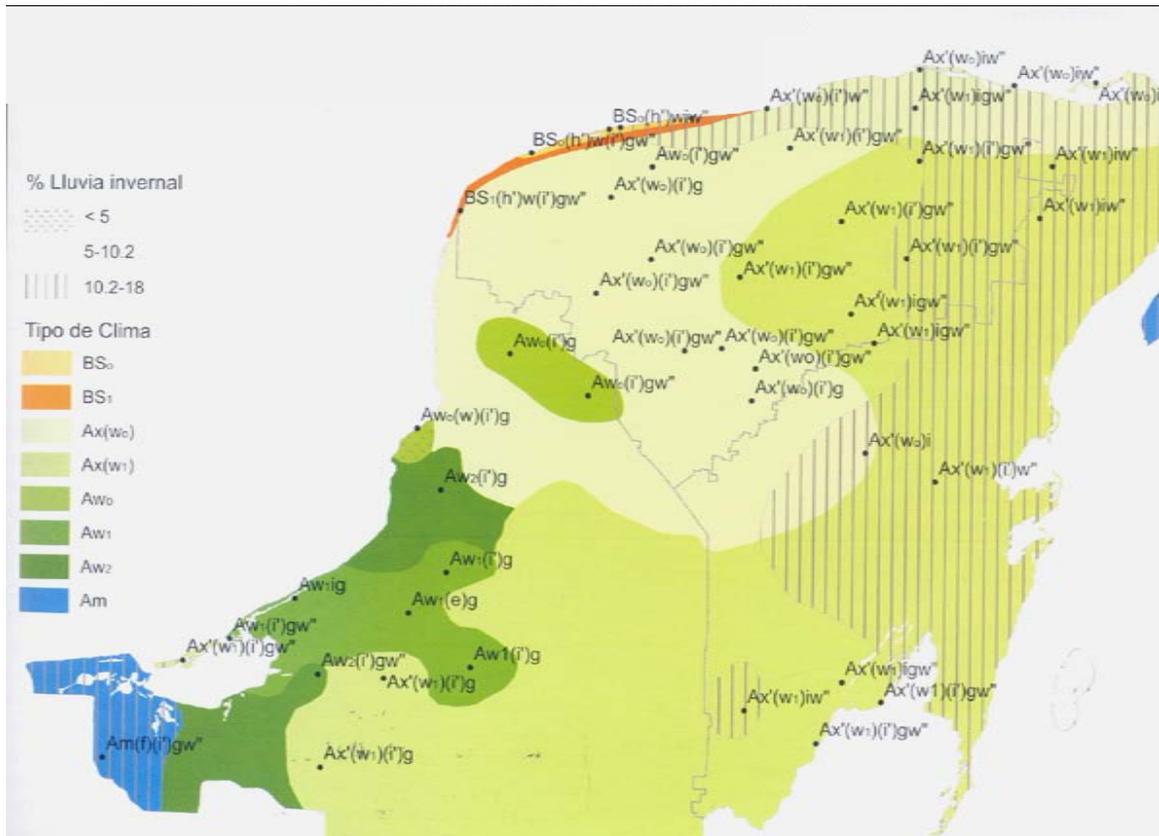


Ilustración 21: Tipos climáticos de Yucatán, años base 1961-1990, fuente: Orellana, 2009

Aw''o (x')(i')g Mérida

Aw = época seca en la mitad del año en que se encuentra el invierno

Aw0 = Precipitación anual en mm/Temperatura media anual en °C $\leq 43,2$

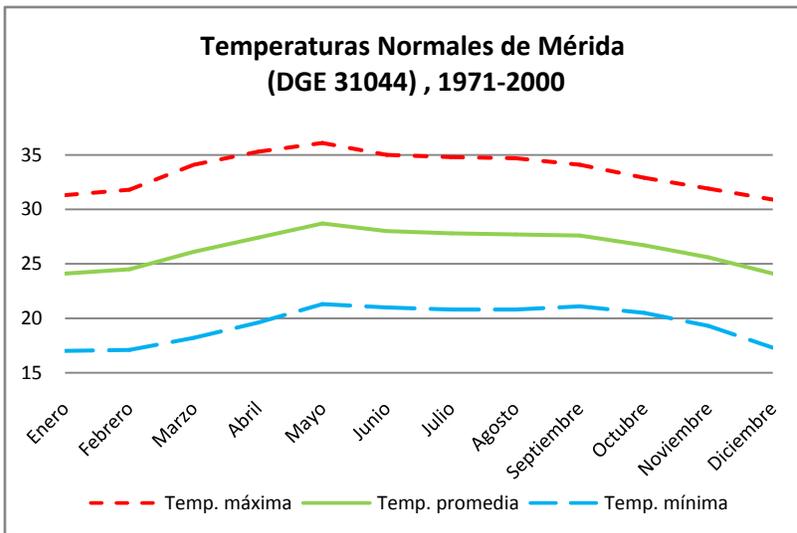
x' = falta de época seca (porcentaje de lluvias de invierno mayor de 10.2 de la anual)

w'' = ubicación en el año de la época seca (además de una marcada en el invierno, una corta en el verano)

i' = amplitud de temperatura media anual (oscilación entre 5 y 7°C)

g = marcha anual de la temperatura (Temperatura media del mes más caliente antes del solsticio de verano)

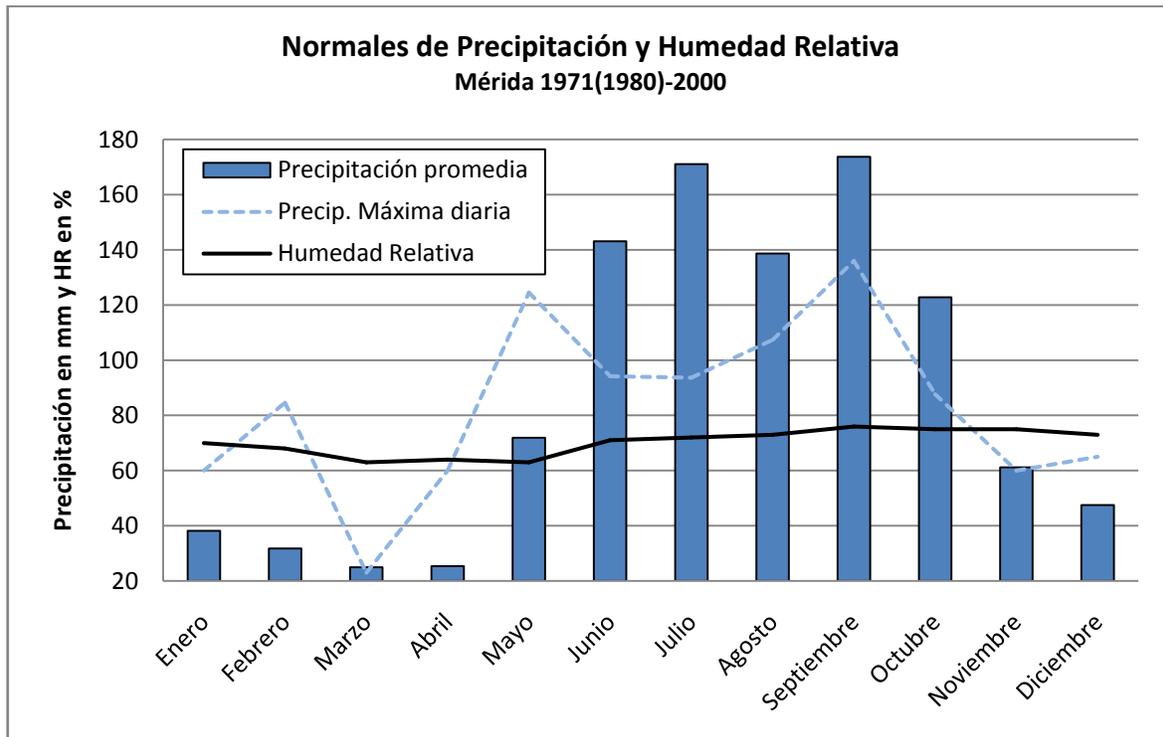
Los datos meteorológicos usados en la tesis presente provienen de tres estaciones meteorológicas diferentes. Para los normales de Mérida se recurre a los datos de la Estación Mérida DGE 31044 del Sistema Nacional de Meteorología (SNM) debido a que tenga los datos más fidedignos sobre el tiempo más extenso de todas las estaciones de Mérida. La estación se encuentra en 20°59' N y 89°38' Oeste a una altura de 22msnm. La gráfica #9 muestra las temperaturas normales de 1971-2000 de dicha estación. Durante estas tres décadas la



Gráfica 9: Temperaturas normales máximas, promedias y mínimas de Mérida

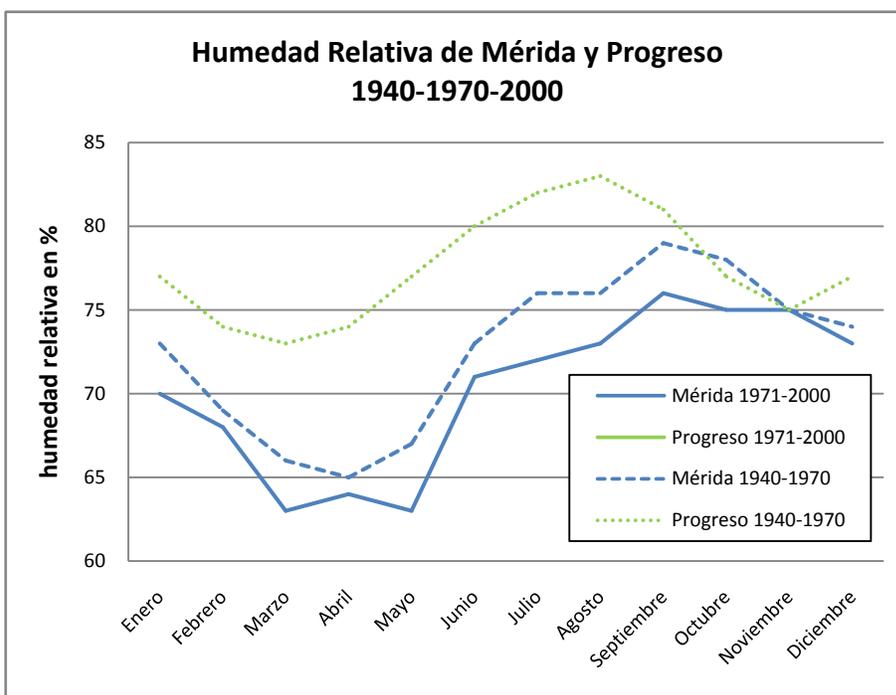
temperatura máxima promedio se presentaba en Mayo con un valor de 28.7°C mientras la temperatura mínima promedio se presenta en los meses de Diciembre y Enero con 24.1°C. La ondulación de temperatura anual alcanza apenas 4.6°C. Eso es típico para una zona tropical. La línea roja

punteada presenta las temperaturas máximas normales que alcanzan 36.1°C también en mayo y 30.9°C en diciembre. Las mínimas tienen un rango de entre 17°C en enero y 21.3°C en mayo. Es decir las pautas climáticas del lugar indican una alta necesidad de enfriamiento y una muy diminuta necesidad de calefacción.



Gráfica 10: Normales de precipitación (DGE #31044, 1971-2000) y humedad relativa (Sinoptico, 1980-2000) de Mérida

La gráfica #10 presenta las normales de la precipitación mensual y las máximas diarias durante los años 1971 hasta 2000 de la estación DGE de Mérida. Se puede observar que la temporada de lluvias se encuentra entre junio y octubre con muy poca precipitación entre enero y abril. Lo que destaca es la posibilidad de recibir una cantidad de lluvia superior al promedio mensual en un sólo día. En febrero, abril y mayo la precipitación máxima diaria puede ser dos a tres veces más alta que el promedio mensual, cual se debe a las fuertes lluvias durante tormentas tropicales extraestacionales. Dicho patrón está aún más pronunciado en los datos de la estación meteorológica Aeropuerto (#76644), la cual también pertenece al SNM y se encuentra en 20°57' Norte, 89°39' Oeste⁶⁸ con elevación de 11msnm. De esta estación se tomaron los valores de la humedad relativa que se encuentra por arriba de 70% durante los meses Junio hasta enero con



los valores más bajas alcanzando 63 ó 64% (marzo hasta mayo), siendo el mes septiembre el más húmedo con 76%HR.

Como se puede ver en la gráfica #11 hay una tendencia hacia un clima menos húmedo si se comparan las

Gráfica 11: Las normales de humedad relativa de dos estaciones (Mérida y Puerto Progreso) durante las épocas de 1940-1970 y 1971-2000, los valores 1971-2000 son iguales entre Mérida y Progreso fuente: <http://smn.conagua.gob.mx>

normales climatológicos de

1971-2000 con los normales de 1940-1970 [Capel Molina, s/a]. Este cambio climático se profundizará en el futuro según un estudio de la CINESTAV/ Mérida [Orellana, 2009]. Sin embargo se puede observar cierta discordancia entre los valores presentados por el SNM, debido a que parece poco creíble que los normales de Puerto Progreso para el periodo 1971-2000 sean exactamente iguales a los datos de la estación de Mérida.

También se puede notar que el clima en Progreso, 30km al norte de Mérida, está más o igual de húmedo que en Mérida. Eso es más notable debido a que Progreso se encuentra en una franja de

⁶⁸ Con 4km de distancia hacia la estación DGE.

la península con clima cálido semi-árido según la clasificación de E. García [1973]. No obstante para construir con consideraciones bioclimáticas, lo que importa es la temperatura del lugar y su humedad relativa y no la precipitación, lo cual se da en los normales climáticos. Eso nos muestra, como lo he explicado en la primera parte de esta tesis, que la zona climática tiene valor informativo limitado si tratamos de construir bajo consideraciones bioclimáticas. En el caso de Progreso su cercanía al mar y su colindancia con otro espejo de agua, la ciénaga, tienen más impacto que la precipitación anual.

2.2.1.1 El clima en Mérida durante el Experimento

Para comparar los datos de las mediciones en las casas y en las maquetas se hace referencia a la estación meteorológica IYUCATNM2 (CINESTAV2) debido a que ésta se encuentra convenientemente ubicada entre el lugar de las casas (Ciudad Cautel) y la Facultad de Ingeniería de la UADY en donde se encuentran las maquetas.

Tabla 17: Datos climáticos de Mérida Junio 2010

Datos Climáticos Mérida Junio 2010 , Estación IYUCATNM2, N21°1'15'', W89°37'34', altura 11msnm			
	Máximo:	Mínimo:	Promedio:
Temperatura:	38.6 ° C	24.2 ° C	29.4 ° C
Punto de rocío:	28.8 ° C	20.6 ° C	25.5 ° C
Humedad:	100.0%	39.0%	81.3%
Viento:	-	-	ESE
Presión:	1016.1hPa	1000.2hPa	-
Precipitación:	-	-	123.4mm
fuente: http://www.wunderground.com/weatherstation/WXDailyHistory.asp?ID=IYUCATNM2&graphspan			

Se puede ver que la temperatura promedio del mes de Junio 2010 (29.4°C) de la estación del CINESTAV se encuentra por arriba de la temperatura máxima de las normales (28.7°C en mayo) igual que la humedad relativa, alcanzando un 81.3% en comparación con el 76% de los normales de 1971-2000. Con eso, y siendo el mes más caliente durante 2010, se presentaron condiciones ideales para el experimento. Dada la alta humedad y temperatura durante el experimento, es posible aplicar los resultados aún a la situación en climas más extremos (Af y Am) como son los de Tabasco, parte de Chiapas y Veracruz.

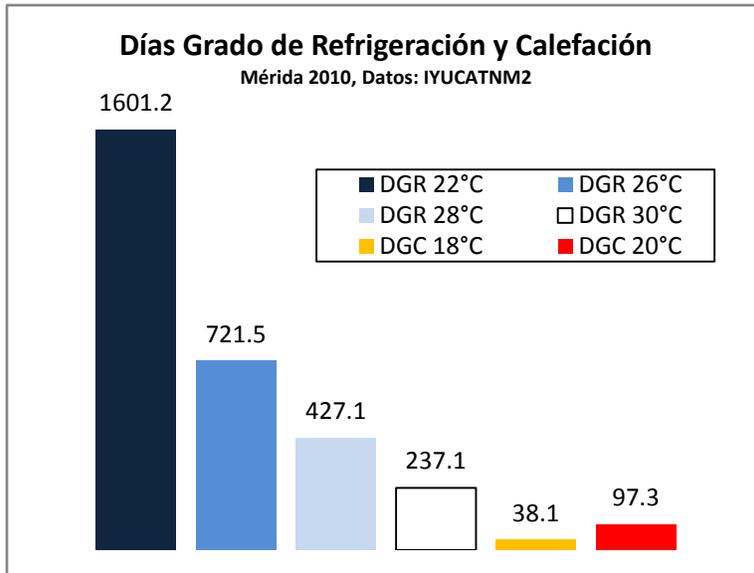
Enseguida presento la tabla con las temperaturas promedios diarias de 2010 de la estación IYUCATNM2. Se observa que la temporada más caliente en 2010 empieza durante la última semana de abril y llega hasta mitad de septiembre con las temperaturas más altas en mayo y junio.

Tabla 18: Temperaturas promedios diarias en 2010, Estación Meteorológica: IYUCATNM2

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	23	23	24	26	34	32	28	29	28	26	26	23
2	21	24	21	29	30	29	30	28	26	26	27	22
3	21	26	19	28	31	34	28	28	28	26	26	21
4	21	26	19	27	30	32	27	29	28	26	24	21
5	19	23	21	26	31	31	30	29	29	25	22	22
6	18	21	22	27	32	32	27	29	30	25	20	21
7	21	17	23	29	31	31	26	28	27	25	21	21
8	21	27	23	28	30	31	28	29	28	25	23	21
9	17	25	26	28	29	30	27	28	29	23	23	21
10	17	22	27	28	29	29	27	28	27	25	24	20
11	18	23	28	27	30	31	28	29	29	25	25	21
12	18	22	24	26	30	30	28	29	29	25	24	21
13	19	20	21	24	30	29	29	30	29	26	24	19
14	20	16	22	24	30	26	29	29	27	26	25	19
15	23	17	24	26	30	31	28	28	27	27	26	20
16	22	18	24	25	28	30	27	27	29	25	26	22
17	21	18	20	23	26	30	27	27	28	24	26	22
18	23	18	20	24	26	30	26	28	26	25	25	22
19	25	20	20	25	26	29	27	28	27	25	25	22
20	26	24	27	25	28	30	27	26	27	26	25	21
21	29	27	21	26	29	28	26	28	26	25	25	21
22	25	26	20	30	28	29	28	26	27	26	26	21
23	22	25	22	31	29	29	28	30	28	26	25	22
24	20	20	26	31	31	28	28	26	26	27	26	23
25	23	19	28	31	28	28	28	26	27	26	27	22
26	23	20	25	26	28	27	26	27	28	27	26	20
27	29	21	29	26	28	26	29	28	28	29	26	18
28	25	20	28	27	28	27	29	27	28	28	26	19
29	21		22	30	28	29	28	28	27	27	26	21
30	22		21	31	28	29	28	28	27	26	25	25
31			25		29		29	29		27		28

2.2.1.2 Días Grado de Refrigeración o Calefacción

El concepto de “días grado” es una manera fácil de indicar la magnitud en la cual el clima dado de un lugar se encuentra fuera de un rango de temperaturas preferibles para el bienestar del



Gráfica 12: Grados Día de Refrigeración y Calefacción, Mérida, Yuc. 2010

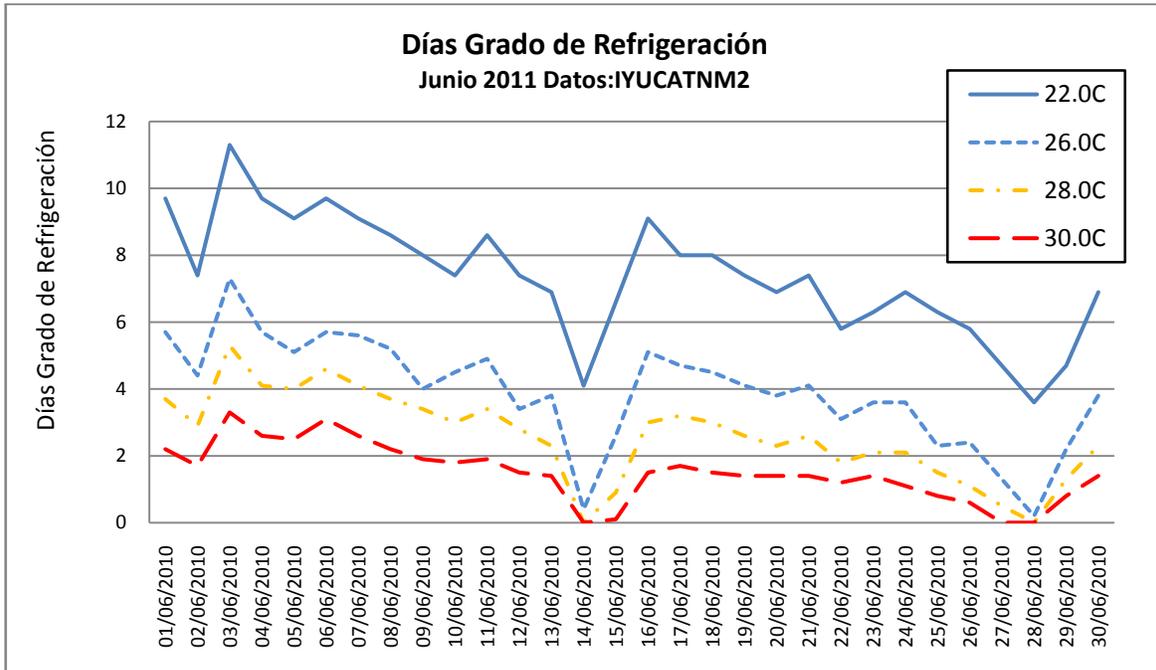
hombre. El análisis del clima de Mérida indica que casi no hay necesidad de calefacción.

Si se toma un valor mínimo de 18°C como límite inferior para calentar se requiere de la calefacción sólo en muy escasas situaciones. Con unos 38.1 Días Grado de Calefacción (DGC) su aplicación es irrelevante.

Con respecto a la refrigeración se presentan valores mucho

más relevantes. No obstante la necesidad de enfriar disminuye en gran medida si se establece una temperatura cerca de lo máximo permisible bajo los conceptos adaptativos de la zona de confort en comparación con las temperaturas recomendadas por la industria de equipos de aire acondicionados. Mientras con temperaturas aceptables de hasta 30°C, sólo existe la necesidad de emplear sistemas de enfriamiento si la temperatura supera los 30°C, existen 240 Grados Día de Refrigeración (GDR). Con una temperatura máxima permisible de 22°C eso aumenta a 1600 GDR. En el caso de la existencia de sistemas de aire acondicionado una temperatura base de 22°C en lugar de 30°C requiere una inversión energética casi siete veces mayor. Para aprovechar esa información en el diseño de sistemas pasivos, el valor obtenido (los GDR o GDC) nos indica en que magnitud nos encontramos fuera de un clima aceptable

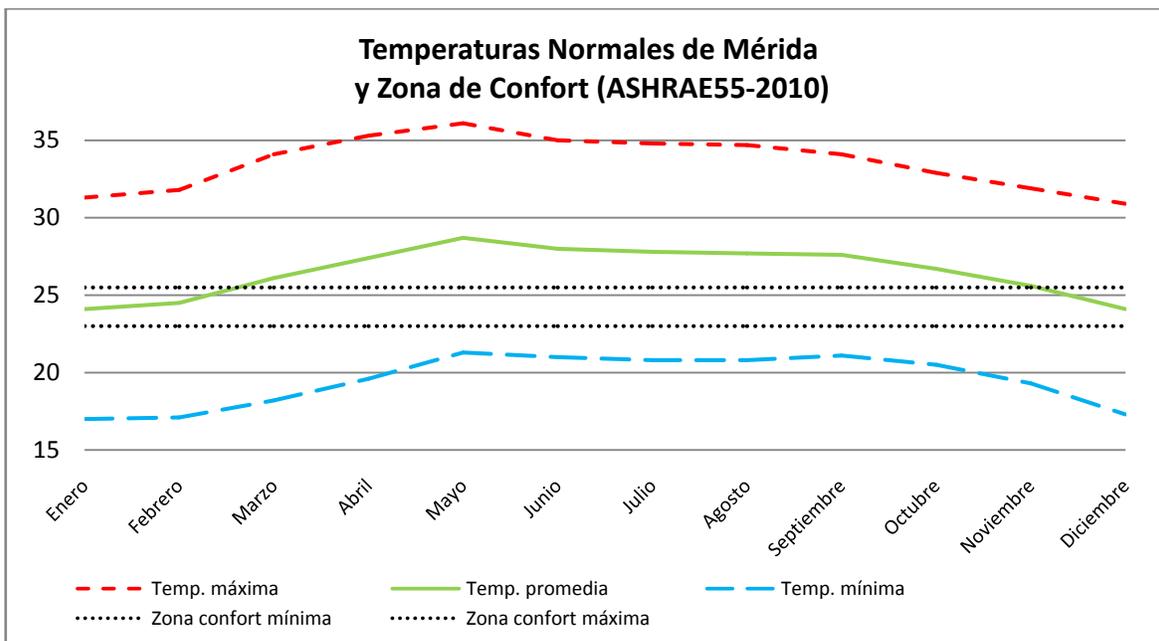
Para el mes de junio 2010 no existía ninguna necesidad de calefacción de lo que se precisaba era de enfriar el ambiente. La gráfica #13 muestra la magnitud de la necesidad dependiendo de la temperatura base permisible.



Gráfica 13: Grados Día de Refrigeración en Mérida, Yuc. En Junio 2010 con diferentes temperaturas base

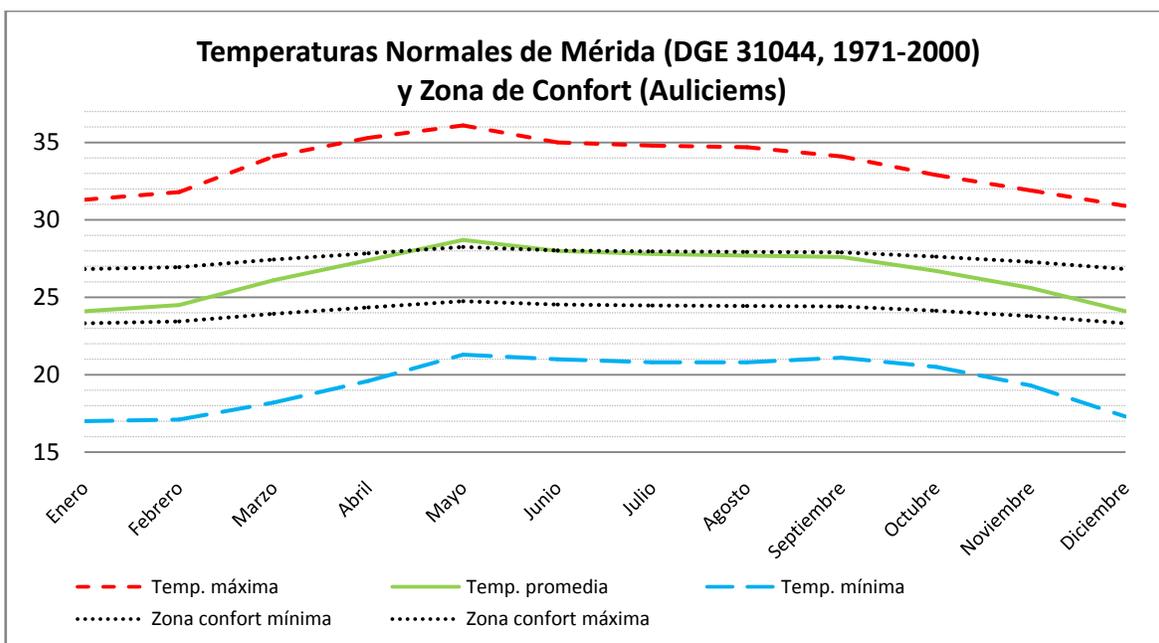
2.2.2 La Zona de Confort en Mérida

Cómo se explico anteriormente no hay opinión unánime entre los investigadores acerca de en que rango de temperaturas y humedades relativas se encuentra la zona de confort. Esa divergencia de opiniones esta aun más pronunciada si se trata de la zona de confort en climas tropicales. Por eso en este trabajo no se inclina hacia un investigador o una norma en particular sino que se presenta a algunos de ellos aplicados a la situación climática prevaleciente en Mérida. Conviene resaltar que en un clima extremoso cualquier acercamiento hacia una temperatura más balanceada significa un mejoramiento de la condición hidrotérmica del hombre, aún no se logra llegar a temperaturas que se encuentren dentro de la zona de confort. Las siguientes gráficas presentan las temperaturas normales máximas, medias y mínimas mensuales de la estación meteorológica DGE, #31044 para el periodo de 1971-2000. La zona de confort se calcula en base de las normales medias mensuales (en dónde aplica). Se debe de tomar en cuenta que las temperaturas internas de los edificios en Mérida por lo general presentan temperaturas por arriba de la temperatura exterior promedio.



Gráfica 14 : Zona de Confort en Mérida según ASHRAE 55-2010

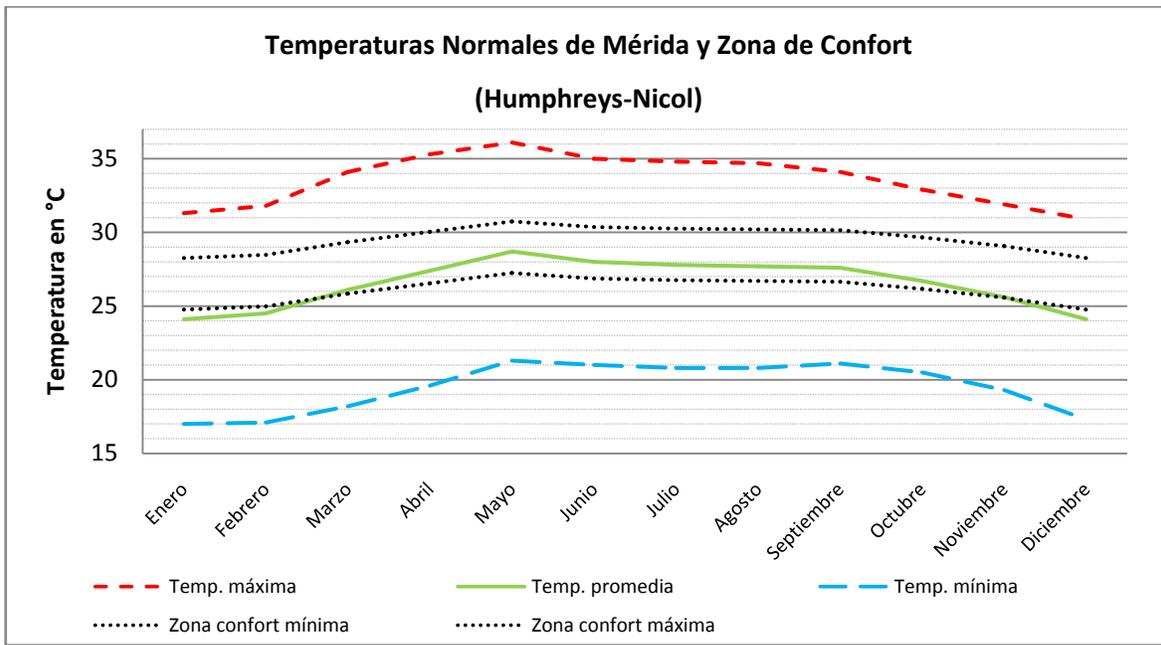
El rango de confort no adaptativo⁶⁹ de la norma ASHRAE 55-2010 indica que la temperatura del lugar está afuera de la zona de confort durante casi todo el año.



Gráfica 15: Zona de Confort en Mérida según Auliciems/ 1981 ($T_n=17.6+0.31 \cdot T_{me}$)

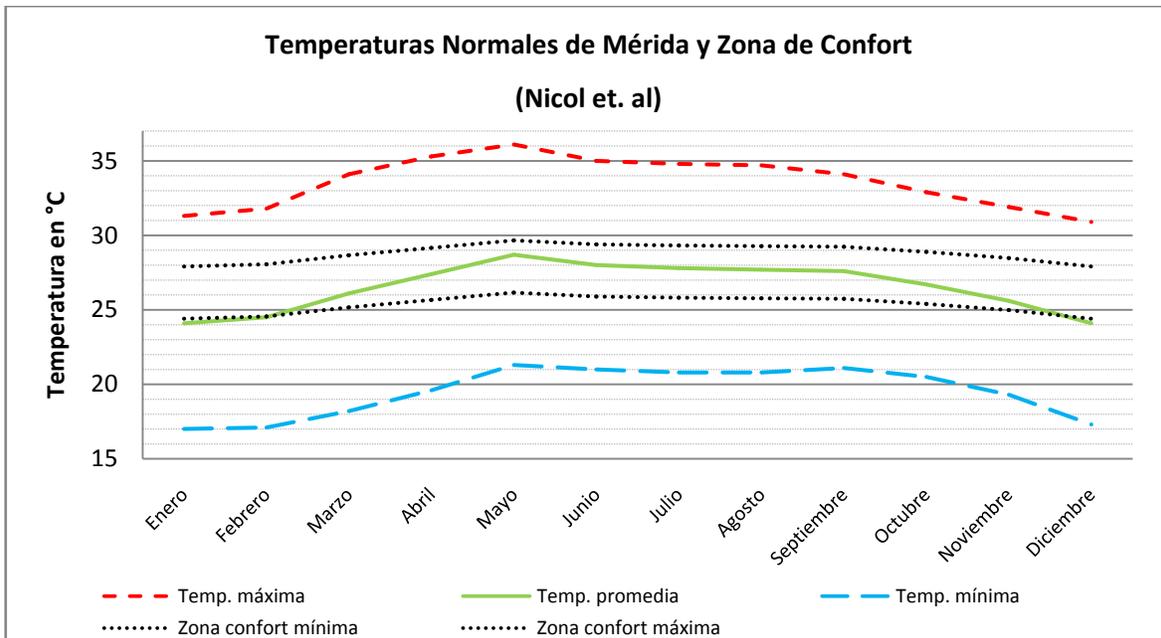
El rango de confort por Auliciems indica que la temperatura del lugar está adentro de la zona de confort. Sólo en mayo la temperatura exterior se encuentra levemente por arriba de la zona.

⁶⁹ A partir de ASHRAE 55-2004 se incluyó la posibilidad de calcular también con un concepto adaptativo muy parecida al de Auliciems.



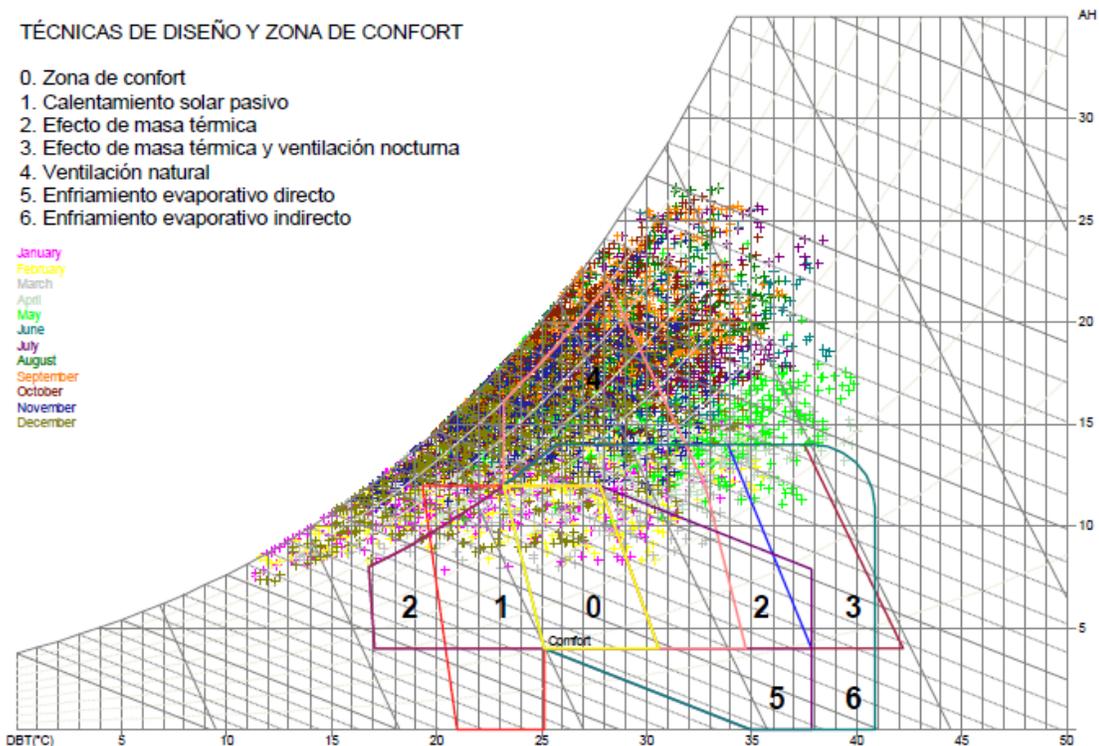
Gráfica 16: Zona de Confort en Mérida según Humphreys /2000 ($T_n=13.5+0.54*T_{me}$)

El rango de confort por Humphreys (2000), que establece valores por arriba al rango de Auliciems, indica que la temperatura del lugar está dentro de la zona de confort por casi todo el año. Durante los meses de diciembre –febrero la temperatura exterior se encuentra levemente por debajo de la zona de confort.



Gráfica 17: Zona de Confort en Mérida según Nicol / 1993 ($T_n=17+0.38*T_{me}$)

El rango de confort de Nicol indica que la temperatura del lugar está dentro de la zona de confort por casi todo el año y solo excede levemente sus límites inferiores durante invierno.



Gráfica 18: Distribución de temperatura y humedad relativa en Mérida con indicación de la zona de confort basado en el concepto de Givoni, fuente: Canto, 2009

El diagrama psicrométrico presenta de manera muy visual la distribución de las temperaturas promedio de Mérida con respecto a su humedad relativa. Los diferentes colores representan diferentes meses. No obstante, debido a que casi todos los valores se concentran en un rango muy limitado de la relación temperatura/ humedad no se puede distinguir cada valor. La gráfica también indica el rango de confort propuesto por Givoni y la extensión del rango por métodos de climatización pasiva, igualmente se puede ver que la única opción válida según este concepto es la ventilación. Sin embargo, según esa propuesta por Givoni, hay un amplio margen de temperaturas y humedades que quedan fuera de las posibilidades de climatización pasiva.

2.2.3 Geografía

La península de Yucatán bordeada por las aguas de dos mares del Océano Atlántico: del Golfo de México por el occidente y norte, y del Mar de las Antillas o Caribe por el oriente, representa el extremo oriental del territorio mexicano. Comprende además, el territorio de Belice y norte de Guatemala. Es una unidad o provincia fisiográfica con formas cársticas (cenotes y depresiones

alargadas) formados por el impacto de un meteoro (Cráter de Chicxulub). La morfología de la península es de grandes planicies estructurales y lomeríos que superan los 400m en el sur, la vegetación actual consiste de arbustos y bosques de altura baja. En la zona costera se encuentran manglares.

A la misma latitud que Mérida se encuentra: Nuadibú (Mauritania), Meca (Arabia Saudita), Jaipur (India), Hanói (Vietnam), Hong-Kong, Sur de Taiwán, Honolulu y Guanajuato (México)

2.2.4 Situación de la Vivienda

La situación de la vivienda en Yucatán está determinada por una casi completa ausencia de construcciones nuevas de casas vernáculas de "tipo Maya" excepto en construcciones con fines turísticas. En áreas rurales no obstante se da mantenimiento a las casas vernáculas existentes, mientras nuevas casas son construidas en casi su totalidad por medio de bloques huecos de concreto y un techo de vigas y bovedilla. Según el "Segundo Censo de Población y Vivienda 2005" [INEGI, 2008] existen 435,000 viviendas en el estado de Yucatán con un promedio de 4.2 personas en cada una. La gran mayoría de ello cuenta con servicio de electricidad (96.1%), 92.7% con agua entubado (en la vivienda o en el predio) y 81.3 con servicios sanitarios. El servicio de drenaje efectivo es casi inexistente. Aunque un 70.6% cuenta con este servicio según los datos del INEGI, de este 70.6% sólo un 2.7%⁷⁰ cuenta con una conexión a una red pública de drenaje⁷¹. Es decir que casi no existe ningún tipo de tratamiento y que casi todas las aguas residuales contaminan a los mantos acuíferos, fuente única del agua potable y abastecedor de los magníficos cenotes.

Un solo 4.4% de las viviendas cuenta con piso de tierra mientras que la mitad de los pisos (50.3%) es de madera, mosaico u otro material y 44.4% son de Cemento o firme según el censo del INEGI [2008].

2.2.4.1 Vivienda vernácula/ Casa Maya

La vivienda vernácula, o casa maya, tiene su origen en la época anterior a la llegada de los españoles a la península y todavía mantiene una presencia fuerte en la región. Mientras que en los alrededores de la zona metropolitana de Mérida su presencia está en clara decadencia con respecto a la cantidad y el grado de mantenimiento dado a tales casas, en zonas más alejadas de la influencia urbanizadora de Mérida ese tipo de construcción todavía es dominante. Esta vivienda

⁷⁰ Valor en decremento, dado a que el censo de 2000 da un valor de 3.5%

⁷¹ 96.9% cuentan con fosa séptica y 0.4% con "drenaje" a una grieta, barranca, lago o mar

presenta una identidad específica muy fuerte por ser un producto decantado de la experiencia de siglos, derivada de la transmisión de habilidades y conocimientos que han respetado las características ambientales (clima, imagen, recursos naturales) y socioculturales. La casa maya es una vivienda autoconstruida y su elaboración toma un papel importante en la organización maya, donde cada miembro de la familia toma su particular papel en la construcción, en la cual se emplean materiales provenientes de la región: piedras o bajareque en los muros, tierra en los pisos, guano en la techumbre y morillos de madera en la estructura.



Ilustración 22: Casa Maya en Tahdziu, Peto, Yuc. Foto: Hector Cabañas 2007

Originalmente la vivienda vernácula maya no tenía más que dos vanos: la puerta frontal y la posterior. Con las puertas cerradas los rayos del sol no pueden penetrar al interior, limitando así la ganancia térmica de la casa. El techo inclinado y cubierto con material vegetal (guano) logró una buena ventilación e impermeabilización del mismo, al igual que en la

evaporación de la humedad atrapada en el material orgánico lo que ayudó con la climatización de la casa. Actualmente muchas de las casas mayas en los alrededores de los centros urbanos se encuentran recubiertas con láminas de chapopote que no sólo causa un acelerado deterioro del material vegetal que está debajo del chapopote sino también limita el efecto de la ventilación y aumenta gravemente las ganancias por radiación solar (las placas negras casi no reflejan los rayos del sol). La poca densidad de construcciones en el solar maya resultó en una mejor ventilación y la evaporación de agua por el follaje de los árboles plantados en el solar, junto con la sombra que proporcionaban, también contribuyeron en la estabilización de un microclima menos cálido.

“la manera (que los indios tenían de) hacer sus casas era cubrirlas de paja, que tienen muy buena y mucha, o con hojas de palma, que es propia para esto; y que tenían muy grandes corrientes para que no se lluevan, y que después echan una pared de por medio

y a lo largo, que divide toda la casa y en esta pared dejan algunas puertas para la mitad que llaman las espaldas de la casa...”[Landa, p.34]



Ilustración 23: Casa Maya en el siglo XVI. Fuente: Baños, p15

“y aunque pudiendo hacerlas de cal y canto, dicen que no son buenas por hacer tanto calor como hace desde el mes de marzo hasta todo septiembre” [Relaciones, 1984:149, citado en Baños, 2010:15]

2.2.4.2 *Vivienda de Madera*

Aunque la madera siempre jugó un papel importante en la construcción de la vivienda en Yucatán, generalmente la mampostería dominaba como material de los muros y de la capa de los techos



Ilustración 24: Casa de madera con techo de guano en Chicxulub, Yuc.

planos (bah-pek). No obstante con el auge del comercio henequenero en la segunda mitad del siglo XIX se empezaron a importar casas de madera prefabricadas en EE.UU. Pero con el paso del ciclón Gilberto en 1988 y la subsecuente inundación de Progreso desaparecieron muchas de las restantes casas de madera en ese municipio, que fue el puerto

principal de Mérida desde los setentas del siglo XIX y desde luego punto de entrada de dichas casas importadas. Aún con una vida de cerca de 100 años todavía se encuentran algunos de ellas en buen estado.

La ventaja de la madera desde el punto de vista climática en las zonas tropicales consiste en su mínima capacidad de almacenar calor⁷², su capacidad de aislante térmico (el calor penetra más lento la pared). La madera también se presta para construir un envolvente bien ventilado.

La imagen muestra una casa en Chicxulub que además de los materiales empleadas en su construcción presenta otros factores más de interés bioclimático: el pasillo hacia la puerta principal está protegido contra la lluvia con un techo liviano que también da sombra, al igual que un árbol grande en la colindancia que cumple el mismo objetivo.

2.2.4.3 Vivienda Actual

Aunque no existen estadísticas al respecto, se puede decir que el material predominantemente usado en la construcción de las viviendas actuales es el cemento. Por lo general esas casas no tienen sótano dado a la dificultad de excavar en el terreno rocoso. Sobre una cimentación de poca profundidad, generalmente hechas de mampostería consistiendo de piedras locales (calizo) y masas de cemento, se levanta las paredes con bloques huecos de concreto, apoyados en columnas de concreto reforzado terminando las paredes con un anillo de durmientes del mismo material. Sobre el durmiente se coloca vigas de concreto reforzado prefabricadas de forma “T” (inversa) entre las cuales se pone “bovedillas” (bloques hueco de 62 centímetros de ancho y una altura de aproximadamente 15cm, con forma de “media luna”). Sobre esas bovedillas se cola una capa de concreto.



Ilustración 25: Casas en obra negra, Candel, Mérida foto: A. Schumann 2010

⁷² lo que se traduce a que los muros no se sobrecalientan y de esa manera los habitantes pueden aprovechar en las horas de la noche el aire fresco

Los impermeabilizantes usadas en los techos son una mezcla de pegamiento para madera (Resistol®) con cal o cemento blanco, o impermeabilizantes acrílicos. Rara vez se usa chapopote. Esta manera de construir está la más común, casi la única, en todo el estado y para casi todas las diferentes clases de construcción de vivienda, no importa si se trata de vivienda rural, muchos veces anexos a casas vernáculas, vivienda urbana de interés social o vivienda de alto prestigio. El empleo de bloques huecos en la construcción mejora un poco el comportamiento térmico de las viviendas en comparación con edificios construidas completamente en cemento, no obstante su alta masa térmica igual que su poca resistencia a la transmisión de calor no les hacen favorables para la construcción en una zona tropical. Otro inconveniente que se puede observar en particular en construcciones cerca del mar es su poca durabilidad. Dado el empleo de agua salada en la elaboración del concreto, la poca densidad del colado y la mala ubicación de los barras de acero el deterioro de las construcciones esta acelerado.

2.3 PREPARACIÓN DEL EXPERIMENTO



Ilustración 26: Bambú para marco de lona

Debido a que en el clima tropical de Mérida el enfoque de la construcción bioclimática es la mitigación del sobrecalentamiento de los edificios, el experimento se preparó durante la época más calurosa del año, que se presenta durante los meses mayo (28.7°C promedio mensual) y junio (28.0°C promedio mensual). Una vez establecida la ubicación, posición y tipo de construcción de las casas que van a servir para el experimento se empezó a tramitar los permisos para construir las maquetas en el campo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán con los mismos patrones; la orientación, tamaño en escala, materiales y conjunto de construcción.

2.3.1 Instrumentos

2.3.1.1 Descripción de los Instrumentos/Hobo©

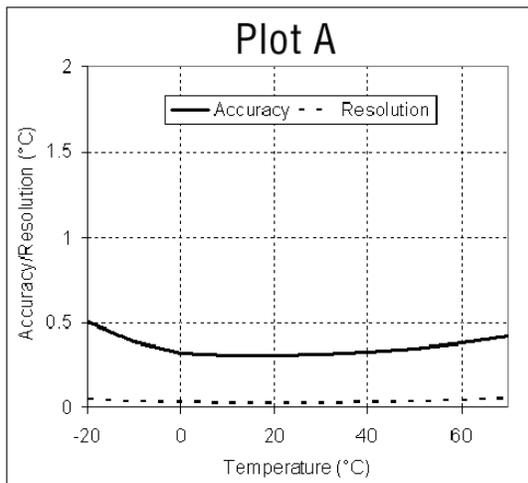


Ilustración 27: Hobo© U12-001
funete: onsetcomp.com

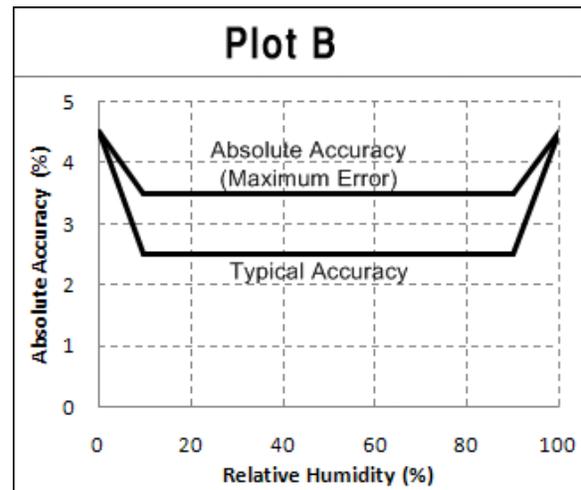
Las mediciones se realizaron por medio de medidores tipo Hobo© U12 - 011 (miden temperatura y humedad relativa) y U12 - 012 (miden temp., HR, intensidad de luz). Estos madereros son los más usados en investigaciones bioclimáticas debido a su funcionalidad, exactitud y accesibilidad. Los medidores del tipo U12 miden un rango de temperatura de -20°C hasta 70°C con una exactitud de 0.3 hasta 0.4K en el rango de 20 a 40°C, logrando así suficiente

exactitud para el fin del experimento. La humedad relativa se mide en un rango de 5% HR hasta 95% HR con una exactitud de 2.5%. Se puede programar el intervalo en el que se toman las mediciones automáticas de 1 segundo hasta 18 horas. Con un poder de almacenaje de hasta 43,000 medidas se pueden

obtener datos de temperatura u humedad relativa por medio año consecutivo (intervalo de 15 minutos) sin atender al maderero. Con mediciones por segundo el lapso mengua a las 6 horas.



Gráfica 19: Exactitud y resolución del Hobo® tipo U12 con respecto a la temperatura

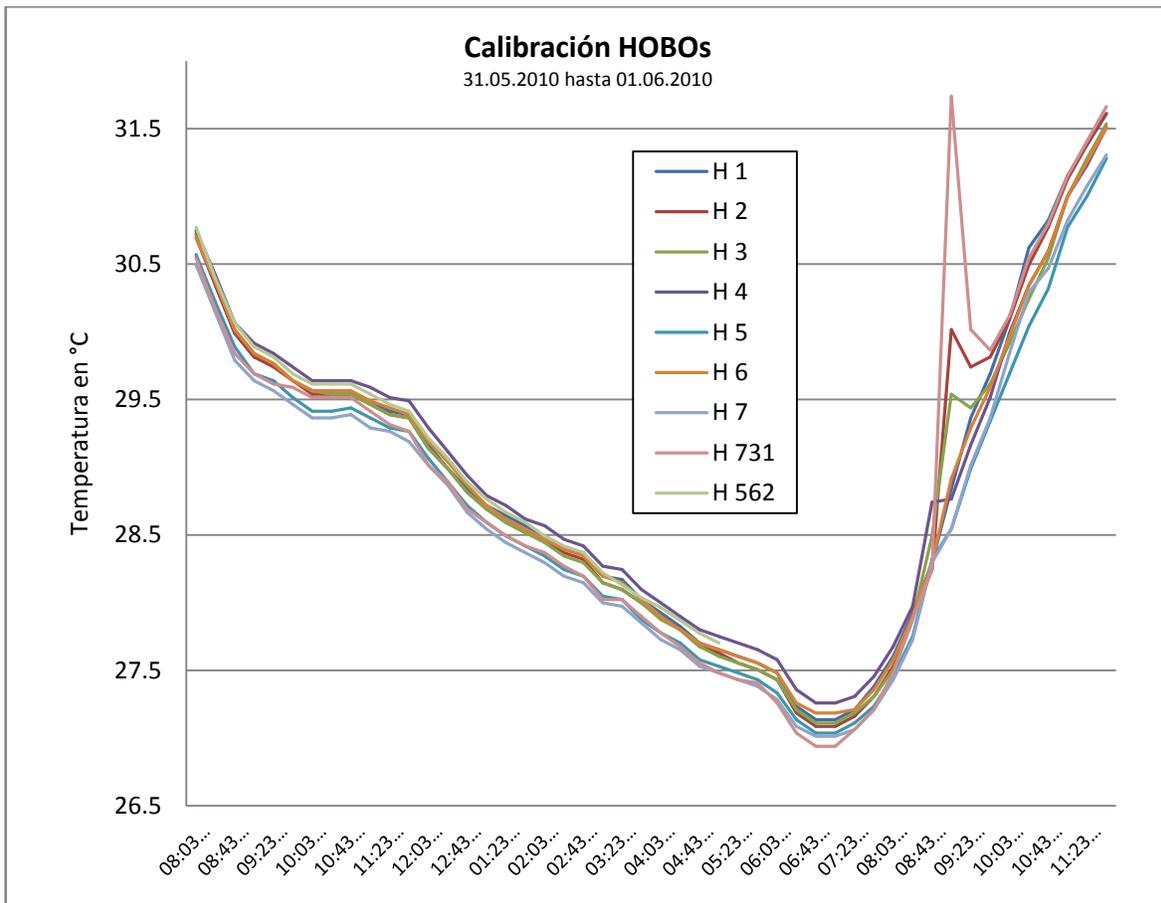


Gráfica 20: Exactitud del Hobo® tipo U12 con respecto a la humedad relativa

2.3.1.2 Calibración de los Hobos®

Para asegurar la comparabilidad de los datos obtenidos durante las mediciones entrantes se tuvo que calibrar los sensores. Por falta de disponibilidad de un termómetro u hidrómetro aforado se retrocedió a la comparación de las mediciones de cada uno de los medidores obtenidos en condiciones exactamente iguales y la comparación entre sí. Se coloca los 9 Hobos® disponibles en una mesa con tabla de cristal, ubicada a tal distancia de las ventanas, y centradas entre las paredes, para que en ningún momento los rayos del sol legaron a ellas. Así se grabó temperatura y humedad relativa durante 20 horas (20:03h hasta 16:03h). Los resultados obtenidos indicaron una divergencia de no más que 0.357°C, siendo un 1.13% entre el valor mínimo (31.306°C del Hobo® #5 en punto 48) y el valor máximo del Hobo® # 562 (31.663°C en punto 48). Eso coincide con el margen de 0.3 a 0.4°C establecido en el manual técnico del medidor.

Hay una desviación notable entre los Hobos® #2, 3 y 562 a las 8:43h. Eso se debe a un impacto extraordinario sobre esos sensores lo cual no afecta a su comportamiento normal. No obstante los resultados indicaron que del sensor #731 se obtuvo temperaturas menos precisas que de los demás sensores, por lo cual fue excluido de las mediciones precisas y aprovechado para mediciones secundarias (temperatura externa local)



Gráfica 21: Calibración de los HOBOS

2.3.2 Casa

Las casas del experimento forman parte del nuevo desarrollo habitacional para gente de bajos recursos en lo que es Ciudad Caucel. Hasta el momento del experimento la empresa Promotores de Vivienda de Caucel S.A. de C.V. habrán terminado la primera fase de construcción consistiendo en 981 casas. Se estaba empezando con la segunda fase de construcción.

2.3.2.1 Ubicación de las Casas

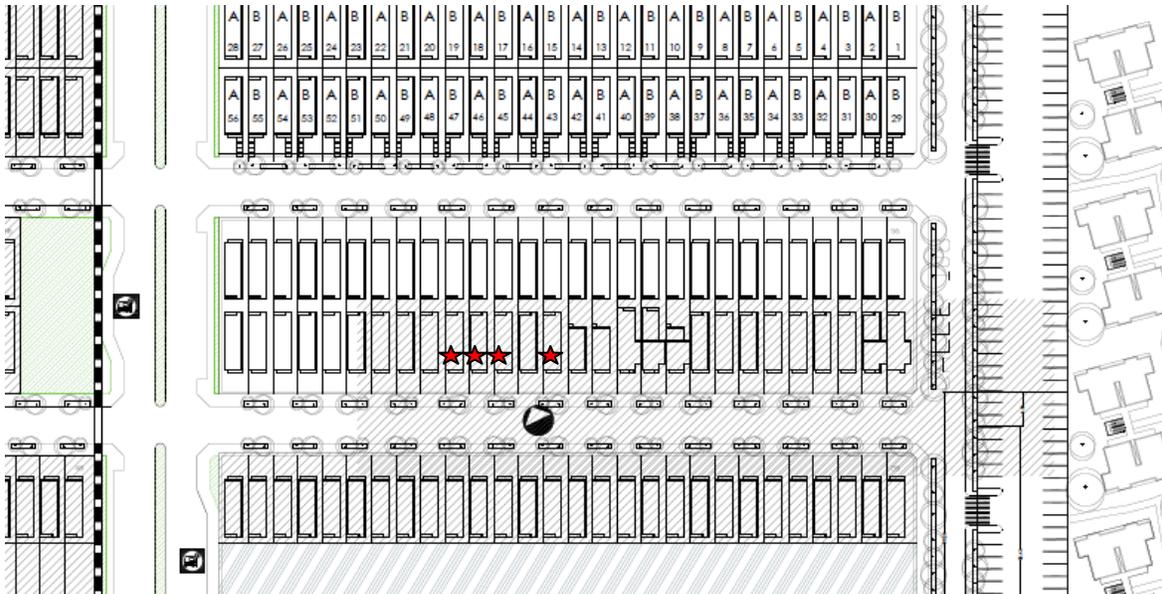


Ilustración 28: Fracción del plan urbano de Caucel con casas del experimento indicado



Ilustración 29: Vista areal al conjunto de casas investigadas en Caucel, la línea roja marca las casas del experimento, fuente: Google Earth 2010

Las casas estudiadas se encuentran en el noreste de la Ciudad Caucel y en la actualidad forman el límite de la nueva urbanización hacia el pueblo Caucel. Sus coordenadas son $21^{\circ}00'36''N$ y $89^{\circ}42'59''O$, altura 8 msnm con la orientación de la fachada a 113 grados (SSW) o un 23° hacia el occidente. [Google Earth, versión 2010]. El terreno es llano y los únicos objetos que sobresalen la altura de las casas son tres casas de dos niveles a una distancia de 25 metros hacia el sureste y unas casas de 3 niveles a 120 metros también hacia el sureste. La casa está construida sobre un terreno de 5m por 18m ($90m^2$) así que por primera vez las normas de construcción en

Mérida/ Yucatán permiten terrenos menores a 8m por 20m. La casa (con volados) ocupa un 50% del terreno. La distancia lateral entre las casas es de 1.3 metros.

2.3.2.2 Descripción de la Casa

El acceso a las casas se da por una calle asfaltada de 7.5m de anchura a 7.5m de la fachada de la casa. Adyacente a la calle hay una banqueta cementada (2.5m) seguida por una franja de pasto (que se puede convertir en estacionamiento) de 5 metros.



Ilustración 30: Fachada de una de las casas aprovechadas en el experimento

La casa propia está construida de bloques de cemento de 10 cm de anchura (estabilizados por columnas de concreto reforzadas) y un techo de viga y bovedilla cubierto con una capa de concreto. El techo tiene un grosor de 20 cm en total. Las cimentaciones consisten de piedras locales. Se eleva el piso de las casas llenando el interior de los muros de cimentación con escombros y tierra rocosa local. El piso está terminando con una capa de cemento. Los acabados consisten en una capa de marcilla, lozas interiores y pintura. La fachada está pintada con colores intensos (verde, marrón, amarillo, ocre), el alero de blanco y los demás muros de un amarillo claro. Por buena intención pero falta de conocimiento

en las fachadas se utilizó una pintura especial reflectante que después fue cubierto por pinturas de color oscuro y así con una baja reflectancia. El techo se pintó con la misma pintura reflectante. La puerta es de madera (un marco de madera sólida con las dos caras en placas de madera contrachapeada de 6mm c/u) y las ventanas de un solo cristal en un marco de aluminio sin ventilas abatibles.

La casa de 37.5m² superficie aprovechable consiste de una sala-comedor (13m²), un baño (6.5m²) y una recámara (13m²). Hay tres diferentes tipos de fachadas distinguibles por el diseño diferente

de la cornisa. Un detalle bioclimático es la ubicación de un alero de concreto con 60cm de profundidad para proteger la ventana de la fachada del sol de la tarde y de mediodía.

2.3.2.3 Colocación de los Instrumentos



Los sensores calibrados se colocaron en la sala-comedor de las casas a una altura de 1.5m y a una distancia de 1.5m de la ventana orientada hacia el sur en la mitad entre las paredes laterales. Asegurando así que a ninguna hora del día el sol pegue en los Hobos® y manteniendo el efecto de radiación de las paredes adyacentes equilibrado. En la foto colindante se puede observar que el medidor se encuentra colocado por medio de una cinta canela en una posición igual en todas las casas.

Ilustración 31: Ubicación de los Hobos en la casa

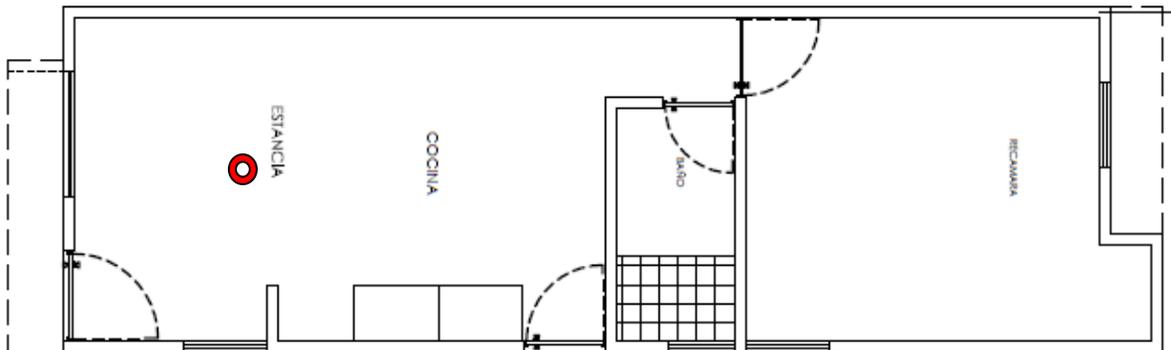
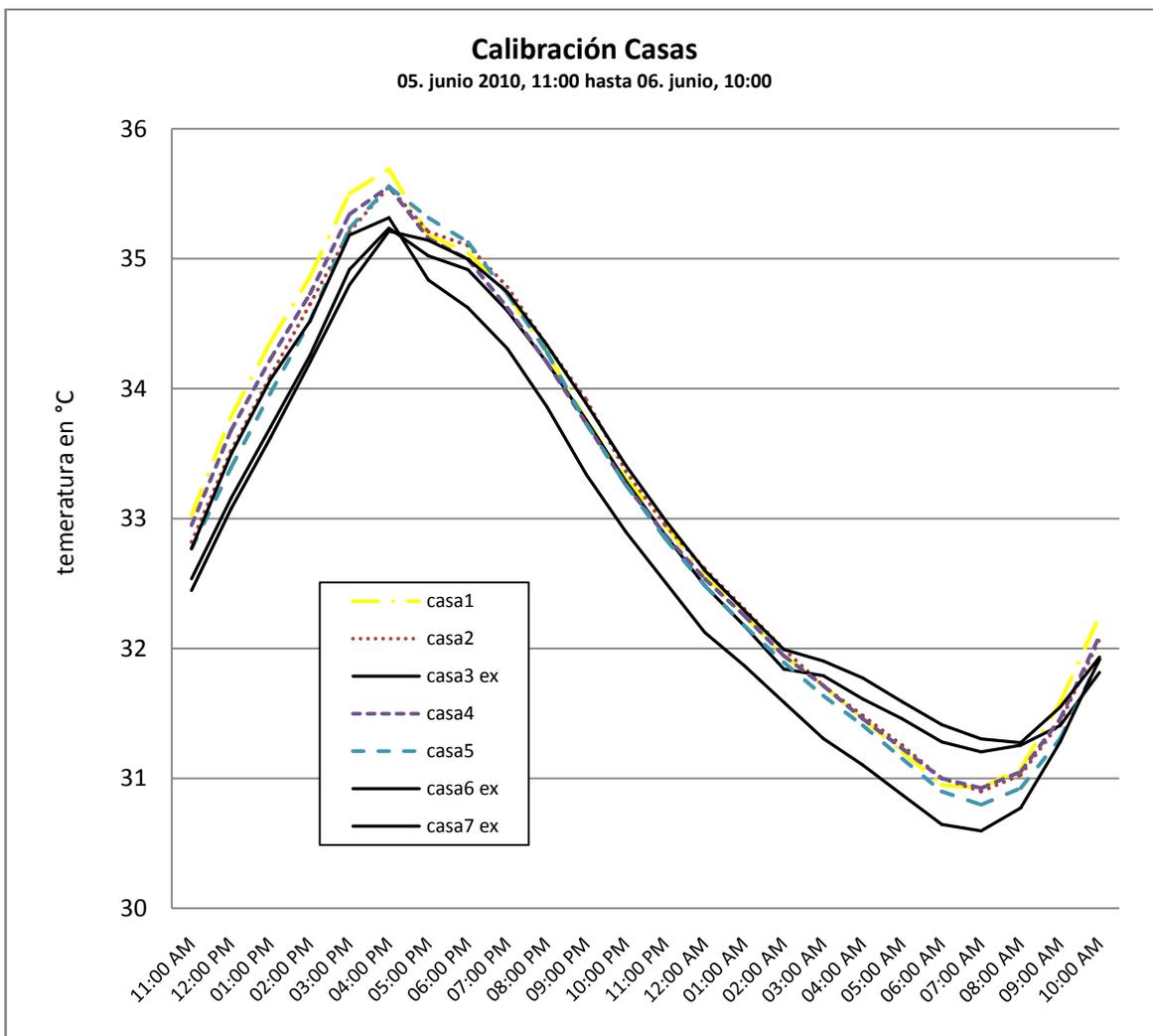


Ilustración 32: Ubicación de los Hobos en Plan

2.3.2.4 Descripción del proceso de medir

Antes de empezar con la modificación de las casas se eligieron siete casas en las cuales se colocaron sensores. Las mediciones obtenidas de ese modo mostraron una buena concordancia de comportamiento térmico entre cuatro de ellas. Las tres casas (#3, #6, #7) que no seguían la misma pauta térmica se excluyeron para no contrahacer los datos más adelante obtenidos por emplear una base de casas no comparables entre sí.

La gráfica #22 muestra el comportamiento térmico durante ese proceso de mediciones de comparación. Las líneas sólidas y negras (casa 3, 6, 7 -ex) representan las casas que posteriormente fueron excluidas por su poca compatibilidad con las casas 1, 2, 4 y 5. La máxima diferencia en temperatura entre las casas elegidas por el experimento consistió en $\Delta T = 0.32^\circ\text{C}$ a las 15:00 del 05.06.2010 y se dio entre la casa#1 y la casa #2.



Gráfica 22: Calibración de las casas

A tres de las cuatro casas, elegidas por su comparable comportamiento térmico, se aplicó una modificación en los techos (#2: techo rojo, #1: con hojas de palma, y #4: lona) mientras los sensores seguían midiendo. A la casa #5 no se le aplicaron modificaciones para mantenerla como casa de referencia.

Un retraso de pocas horas entre la aplicación de las modificaciones y la equilibración térmica de las casas bajo las nuevas condiciones prohíbe aprovechar los datos obtenidos durante las primeras horas. En seguida los sensores se mantenían en su lugar grabando temperatura y humedad relativa sin interrupción mientras los diferentes cambios se hicieron en la envolvente. En el Anexo se encuentra el plan de trabajo durante los 16 días.

2.3.3 Modelo



Ilustración 33: Materiales empleadas en la construcción de las maquetas

Una vez establecida la estructura del experimento, las mediciones de las casas reales y el número de maquetas a construir se solicitó el permiso para construir las mismas en el campo de la Facultad de Ingeniería de la UADY. Los materiales principales como son los bloques huecos, los bloques de bovedilla y las vigas se consiguieron de los escombros del laboratorio de estructuras de la misma facultad, mientras la masa, la marquilla, la pintura y el impermeabilizante se compraron de proveedores de materiales de construcción locales.

2.3.3.1 Ubicación del modelo

Los modelos se ubican en la Facultad de Ingeniería de la UADY a 8.5 kilómetros de las casas de Ciudad Candel. Sus coordenadas son $21^{\circ}02'56.2''N$ y $89^{\circ}38'37.6''O$, altura 6 msnm con la



Ilustración 34: Vista aérea, área de ubicación de las maquetas indicado por rectángulo amarilla

orientación de la fachada a 113 grados (SSW) o un 23° hacia el occidente.

A 12 metros se encuentra la estación meteorológica del Centro de Investigación en Energía. Hacia el oriente se encuentra un edificio de dos niveles a 16m de distancia mientras el Laboratorio de Energía con la misma altura se encuentra a 27m hacia el sur. De los edificios rodantes sólo el mástil de celosía, ubicado a 18m hacia el suroeste daba sombra parcial durante la tarde. Hacia el norte colinda con un

terreno baldío y llano.



Ilustración 35: Vista de las maquetas hacia el norte, enfrente se puede ver la estación meteorológica

La situación de los modelos con respecto a su orientación y asoleamiento es igual o muy parecida a la situación de las casas en Ciudad Cautel. Con respecto al viento proveniente del sur u oriente los edificios adyacentes dan cierta protección a los modelos, situación no comparable con las condiciones en Ciudad Cautel.

La estación de meteorología del CINESTAV (IYUCATNM2) se encuentra a 4 km hacia el Sur de los modelos mientras la estación meteorológica del aeropuerto de Mérida (MMMD) se encuentra a 12km igual al Sur.

2.3.3.2 Descripción los maquetas

Con los mismos materiales con las que se construyeron las casas, es decir no escalada de 1 a 4, se construyeron las tres maquetas. Los materiales son: bloques huecos de concreto de 10 centímetros de ancho y un techo de vigueta y bovedilla. El aplanado es de marcilla con una

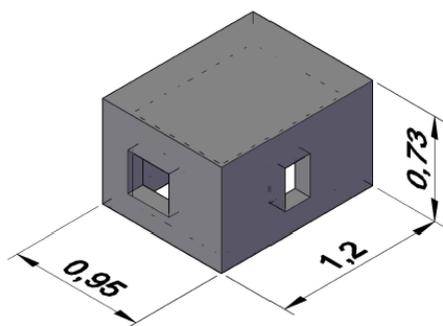


Ilustración 36: Borrador de las maquetas

El aplanado es de marcilla con una pintura amarilla clara en las cuatro paredes de las maquetas. Por razones prácticas se construyó sólo la parte de la casa que corresponde a la sala-comedor debido a que es la parte más impactada por el sol y la única parte que se mide en las casas. La escala es de 1 a 4. Así las maquetas tienen un ancho de 0.95m por 0.73m de altura y 1.2m de profundidad que corresponde a las 3.7m por 2.6m por 4.75m de la sala-comedor de las casas.

Colindante a las tres maquetas se construyó una pared en cada lado para imitar las casas colindantes con su impacto de dar sombra y dirigir el viento. Las ventanas consisten en un cristal de 4mm y las puertas son de madera contrachapeada de 21mm. Para soportar el alero de las maquetas se colocan tres barras de acero sobre las cuales se ponen dos tablas en forma de “L” de madera de 15 centímetros de ancho y un grueso de 21mm, es decir la protección solar de la ventana y la puerta de la fachada sobresale en un 15cm la fachada sur.

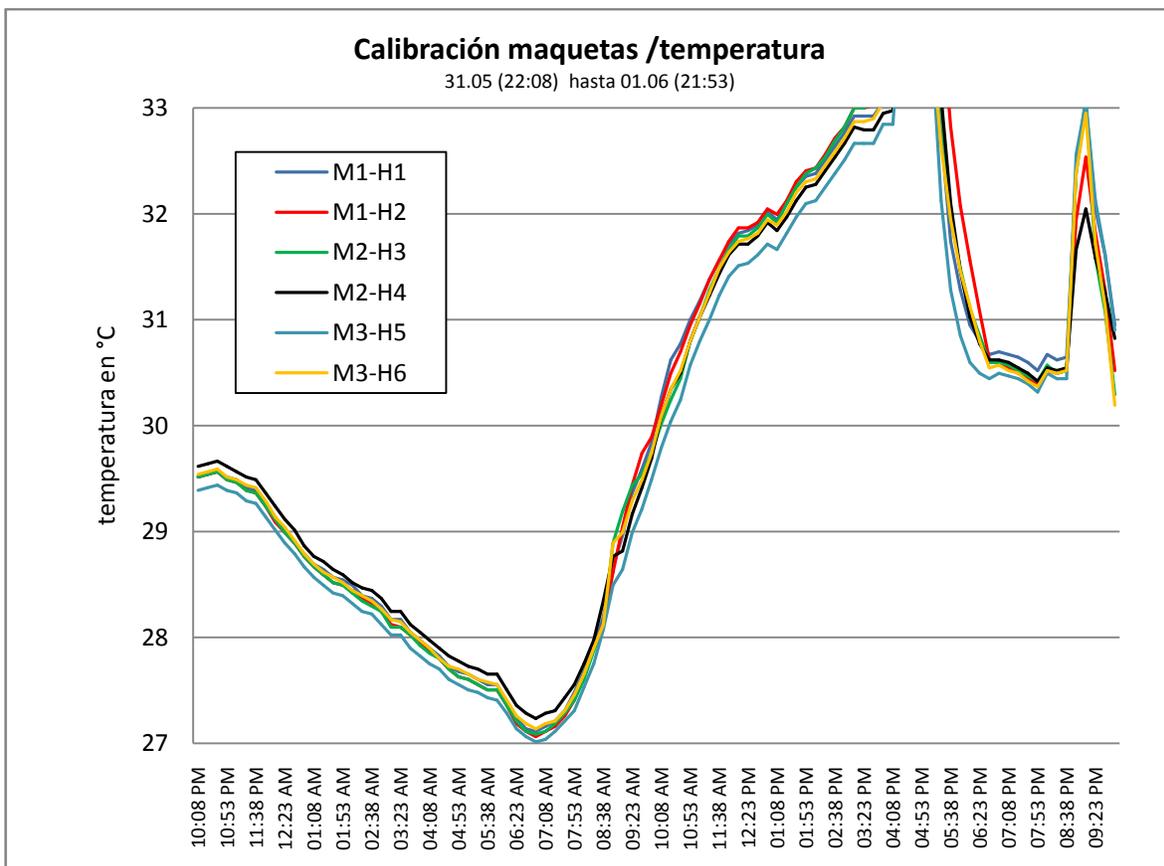
El suelo frente a las maquetas consiste de grava y gravilla, igual que en las casas.

2.3.3.3 Colocación de los Instrumentos

Los sensores se colocaron colgando de un alambre en medio de las maquetas estableciendo distancia equiparable hacia las cuatro paredes a una altura de 40 cm sobre el suelo. En ningún momento del día el sol le pegó a los Hobos[®]. Durante la calibración de las maquetas el 31 de mayo se colocaron dos Hobos[®] “espalda a espalda” en cada una de las maquetas con un par extra en la ventana de la maqueta #2, expuesto al sol. Los Hobos[®] se quedaron desde el día siete de junio hasta el fin de las mediciones el día 21 de junio.

2.3.3.4 Descripción del proceso de medir

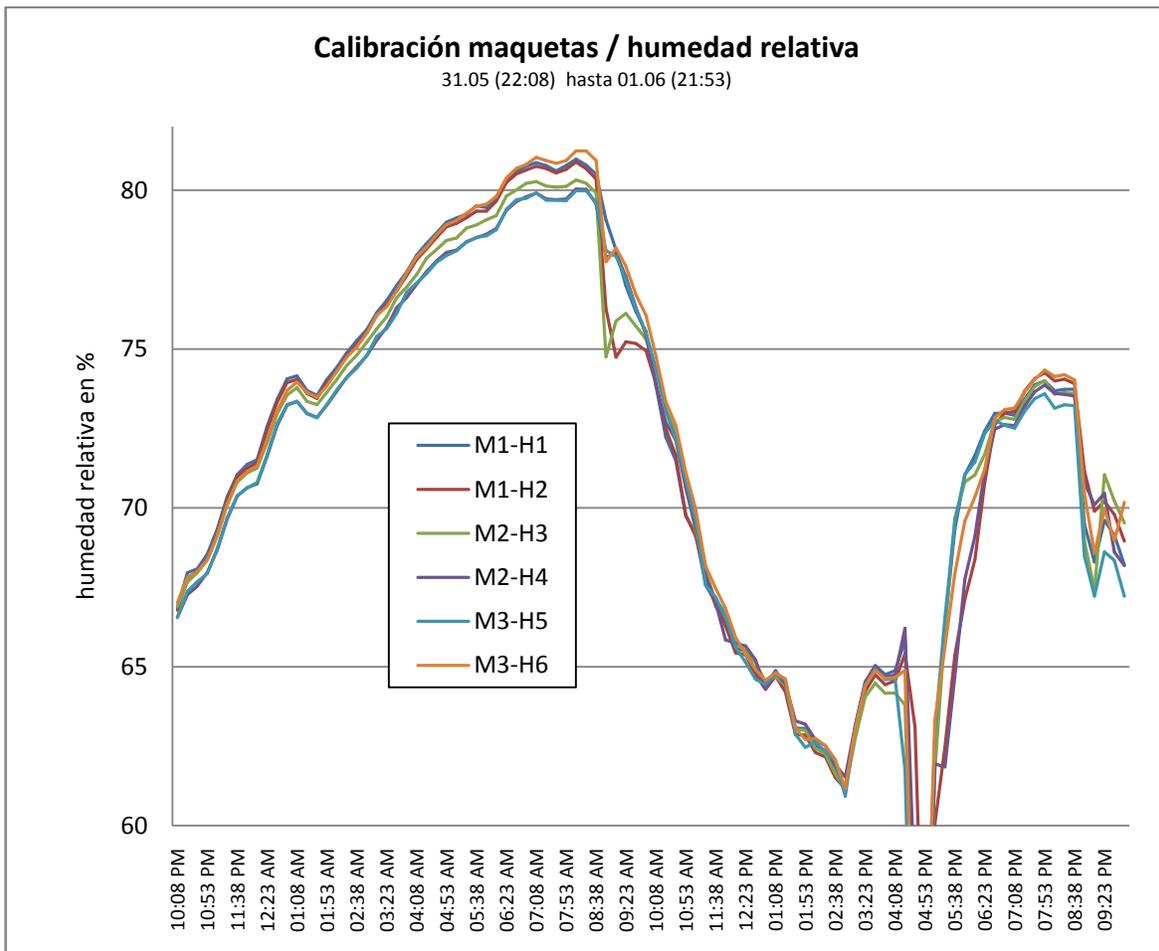
Unos días después de la construcción de las maquetas se colocaron dos Hobos[®] en cada una de las maquetas para comprobar su comportamiento térmico sin discordancia relevante.



Gráfica 23: Calibración de la temperatura de las maquetas, no se grafica el pico máximo entre 16:15 y 17:15 para lograr una mejor escala, M=# de maqueta, H= # del Hobo[®]

La gráfica #16 muestra los valores de las temperaturas obtenidas durante el proceso de calibración de las maquetas. Se puede observar que su comportamiento térmico es muy parecido entre ellos con las diferencias más influenciadas por el margen de tolerancia de los Hobos[®] que de las maquetas mismas. Los Hobos[®] H5 y H6, colocados en la misma maqueta (#3) presentan un $\Delta T = 0.204^{\circ}\text{C}$ a las 12:38 mientras la máxima diferencia entre las tres maquetas se da a la misma hora y que representa un $\Delta T = 0.307^{\circ}\text{C}$. Negando el valor medido por el H5 en la maqueta #3 por su baja concordancia durante las mediciones de calibración que puede ser atribuible al Hobo[®] empleado se da una muy buena concordancia entre las tres maquetas. El valor máximo (M1H2, 31.919°C) y el valor mínimo (M2H4, 31.791°C) a las 12:38 no divergen más que 0.128°C .

Se esperaba que la humedad relativa adentro de las maquetas tuviera una pauta menos equilibrada debido al corto tiempo entre la construcción de las maquetas y su calibración. No obstante la gráfica #24 muestra un patrón muy parecido entre las tres maquetas.



Gráfica 24: Calibración de la humedad relativa de las maquetas, no se grafica el pico máximo entre 16:15 y 17:15 para lograr una mejor escala

Igual que con la temperatura se puede observar que las mediciones en la maqueta #3 por medio del Hobo[®] 5 presentan los valores más diversos dentro de la misma maqueta lo que indica cierto margen de error por parte del Hobo[®] 5. A las 7:08 el M3H5 muestra el valor más bajo de 79.911%HR mientras M3H6 presenta el valor más alto de las tres maquetas con 81.033%HR siendo las dos mediciones tomadas en la misma posición de la misma maqueta. No obstante la diferencia de 1.12%HR entre las mediciones representa una similitud entre las tres maquetas de muy alta calidad.

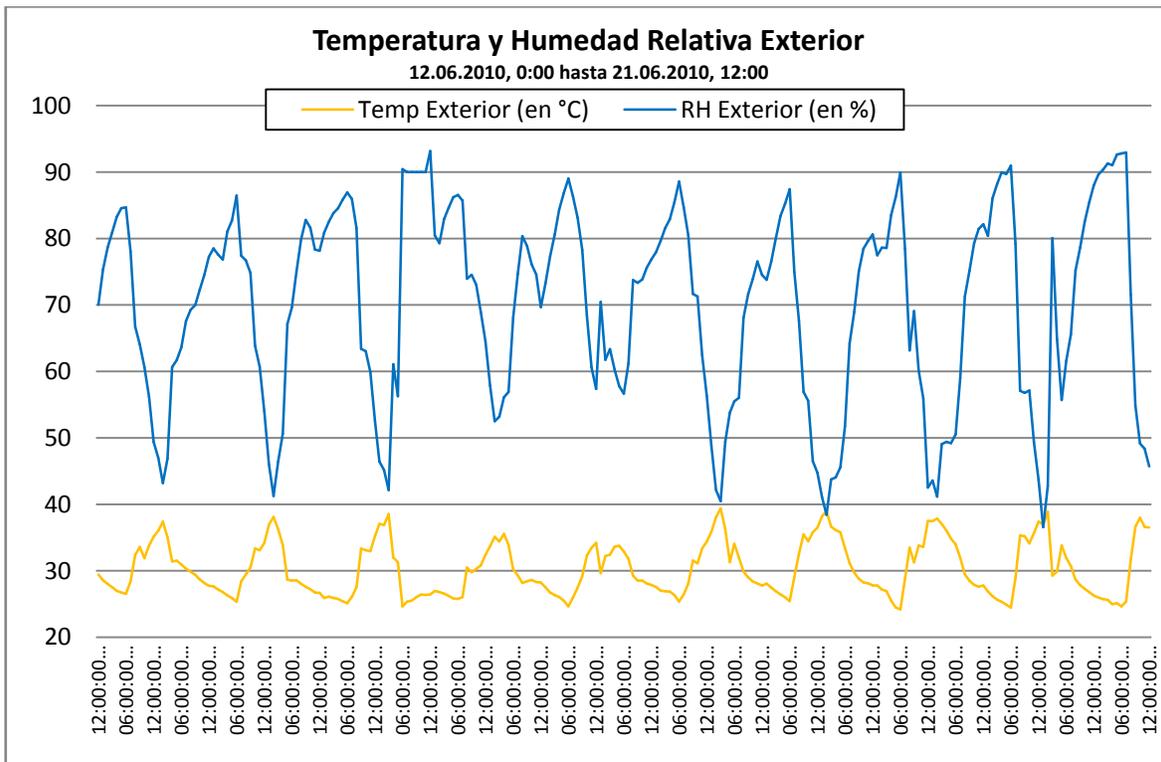
Una vez obtenidos los resultados se empezó a modificar el techo de las maquetas, a partir de eso midiendo los datos con sólo un Hobo[®] en cada una de las maquetas. En seguida los sensores se mantenían en su lugar grabando temperatura y humedad relativa ininterrumpidamente mientras los diferentes cambios se hicieron en la envolvente. En el anexo se puede encontrar la tabla con el plan de trabajo durante los 20 días.

2.4 RESULTADOS

Las mediciones se llevaron a cabo durante el mes de Junio de 2010 en Mérida, Yucatán. La temperatura promedio durante ese tiempo fue de 29.4°C lo que es casi un 1K por arriba de la temperatura promedio del mes más caluroso (mayo, 28.7°C) en Mérida según las Normales de la Estación Meteorológico del Aeropuerto de Mérida (MMMD). La Humedad Relativa alcanzó un 81.3%, lo cual está por arriba del promedio máximo anual del 72% y también está por encima del máximo mensual, que alcanza un 76% en el mes de Septiembre. [SNM, 2011]

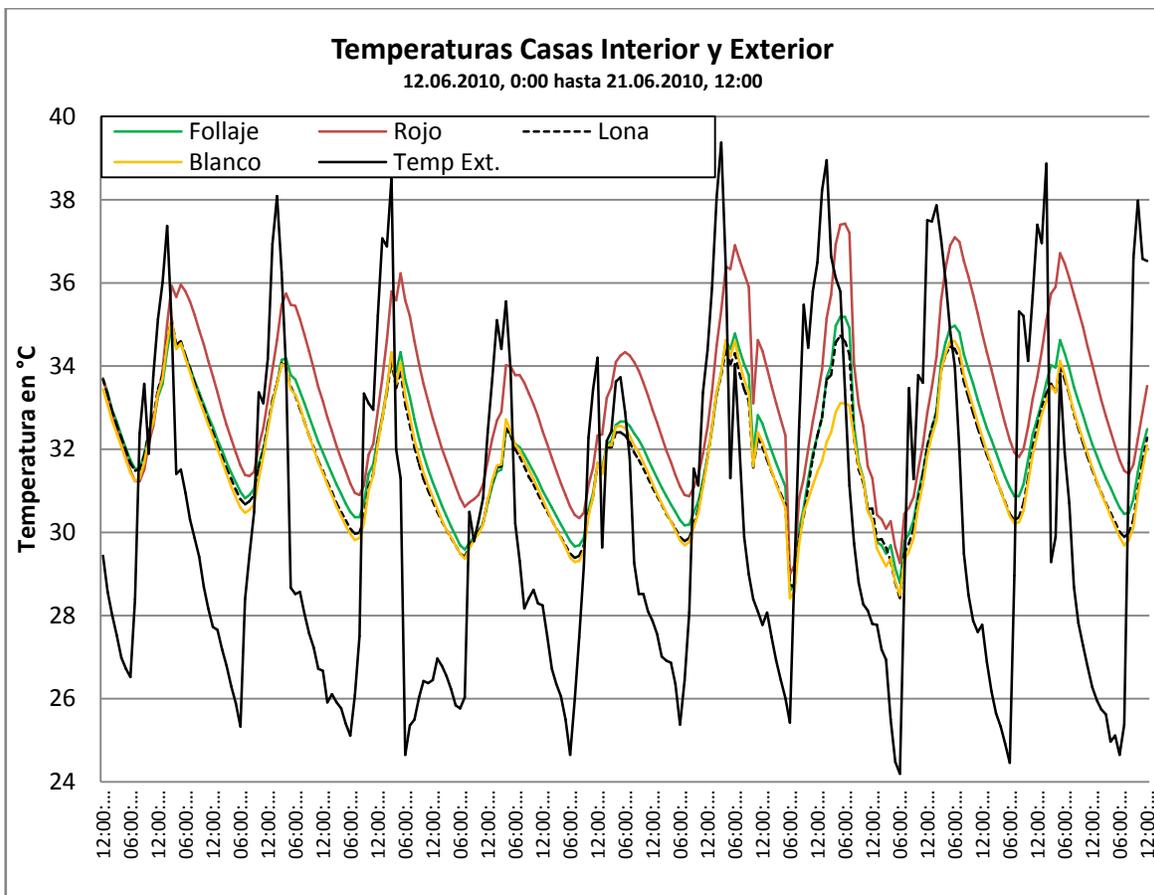
2.4.1 Resultados de las Casas

Las casas presentan la base real sobre la cual se desarrolla el experimento. No obstante debido a que no estaban habitadas durante la fase de mediciones, la carga térmica interior durante la temporada de mediciones es diferente a la carga térmica en estado de ocupación. Es muy probable que las temperaturas internas reales de las casas, estando habitadas, alcancen un nivel aún mayor a las 31.65°C promedio medido durante el experimento en la casa sin modificaciones del techo.



Gráfica 25: Comparación de la temperatura exterior con la humedad relativa exterior cerca de las casas durante la temporada de mediciones medido por Hobo®

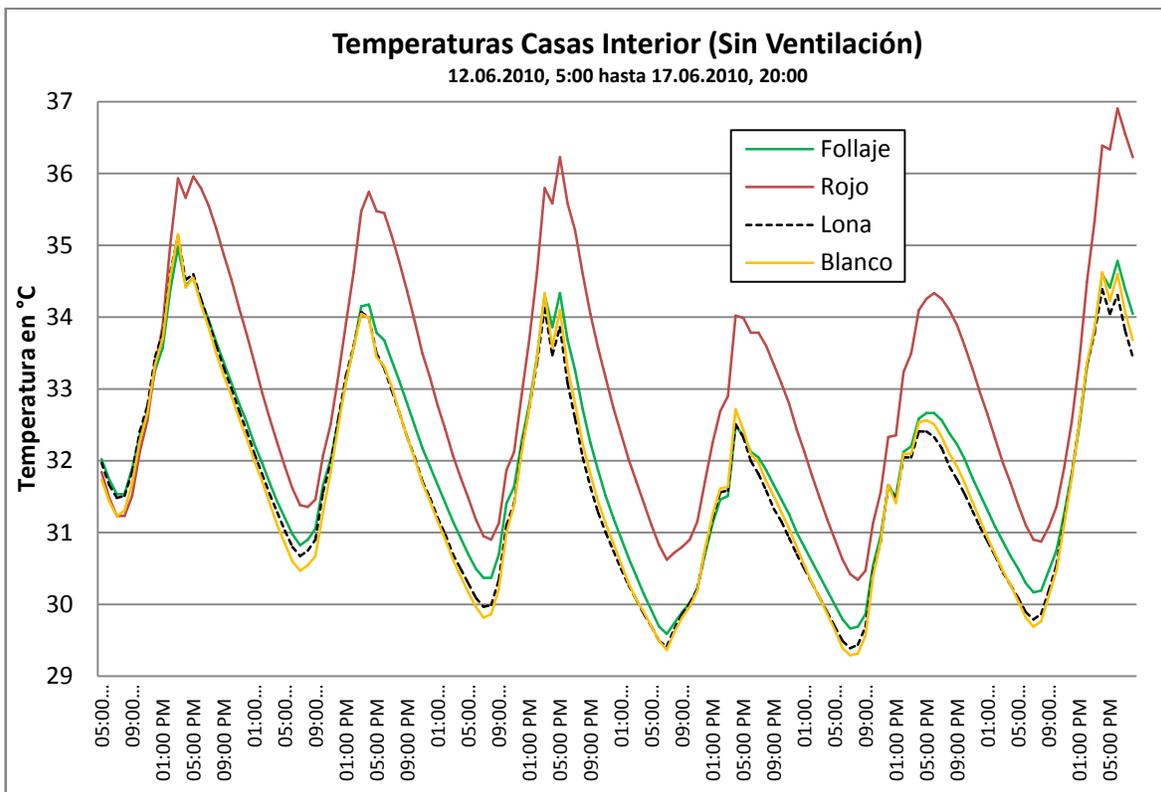
Las mediciones de la temperatura y humedad interior de las casas se llevaron a cabo durante los días 13 de junio hasta 23 de junio. La temperatura promedio medida cerca de las casas durante ese tiempo fue de 30.15°C lo que es casi un 1.5°C por arriba de la temperatura promedio del mes más caluroso (mayo, 28.7°C) en Mérida. La Humedad Relativa alcanzó un promedio de 69.8%, lo cual está por debajo del promedio anual en Mérida (72%). La temperatura exterior más baja durante el tiempo de mediciones llegó a un 23.4°C (14 de junio, 5:40) y la más alta alcanzó 42.2°C (20 de junio, 13:50) en mediciones con intervalos de 5 minutos mientras la temperatura promediado por hora llegó a 24.2°C (19.06, 6:00) y las máximas a 39.38°C (17.06, 15:00). La gráfica anterior muestra la temperatura y humedad relativa externa durante el tiempo de mediciones. Se tomaron esos valores por medio de un Hobo® U12-11 ubicado en el techo del edificio de referencia, colocado en un lugar ventilado y no asoleado abajo del soporte del tinaco. La grafica #26 presenta los valores de la temperatura exterior medida en el lugar en comparación con los valores interiores de las casas durante todo el tiempo en el cual se aplicaron modificaciones en el techo de las casas.



Gráfica 26: Comparación de temperaturas exteriores e interiores durante el experimento, temperatura por hora promediada

Según las normas de la ASHRAE que establecen una temperatura máxima de la zona de confort bajo las condiciones dadas de 25.5°C, ni durante la noche más fresca se alcanza a llegar a una temperatura confortable.

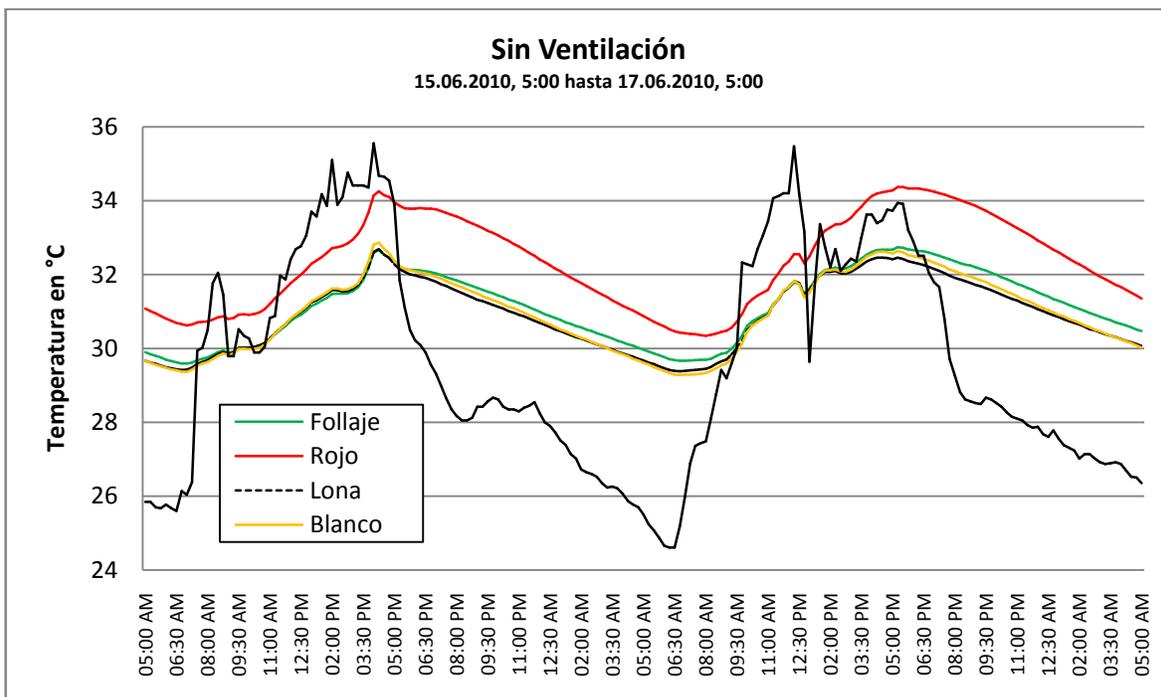
En la gráfica #28 el rango de datos permite distinguir mejor entre las diferentes temperaturas dentro de las casas durante los días en los que no se ventila. Esta gráfica también se basa en las temperaturas promediadas por hora. Se puede observar que la estructura del calentamiento es igual en todas las casas, llegando a su temperatura máxima interior alrededor de las 17:00 de la tarde. Sin embargo, la amplitud de las temperaturas alcanzadas durante la tarde muestra una diferencia pronunciada entre la casa con el techo pintado con impermeabilizante rojo en comparación con las otras tres casas.



Gráfica 17: Temperaturas internas durante los días sin ventilación, temperatura por hora promediada

La grafica que sigue muestra con más detalle esa pauta. En contraste con la gráfica #28, las temperaturas de la gráfica #29 no son promediadas en base a una hora, sino en base a 15 minutos, lo cual puede resultar en valores no exactamente iguales. Se puede observar que el calentamiento de las cuatro casas sigue muy de cerca el aumento de la temperatura exterior con

un desfase de 2 – 3 horas. En las horas de la tarde y la noche, las horas más importantes para el bienestar térmico debido a que a esa hora los ocupantes generalmente se encuentran en la casa, la desventaja de la casa roja es aún más pronunciada. La diferencia con las demás casas alcanza un 2°C alrededor de las cuatro de la tarde. Esa diferencia disminuye paulatinamente hasta las ocho de la mañana. En esa hora la diferencia todavía se mantiene en 0.5 – 1.0°C. La temperatura interior de la casa con techo rojo se mantiene arriba de 30.5°C aún en las horas más frescas siendo los dos días que abarca la gráfica los más frescos de su temperatura máxima de mediodía exterior. Las temperaturas de las otras tres casas muestran una temperatura un poco por debajo de los 29.5°C.

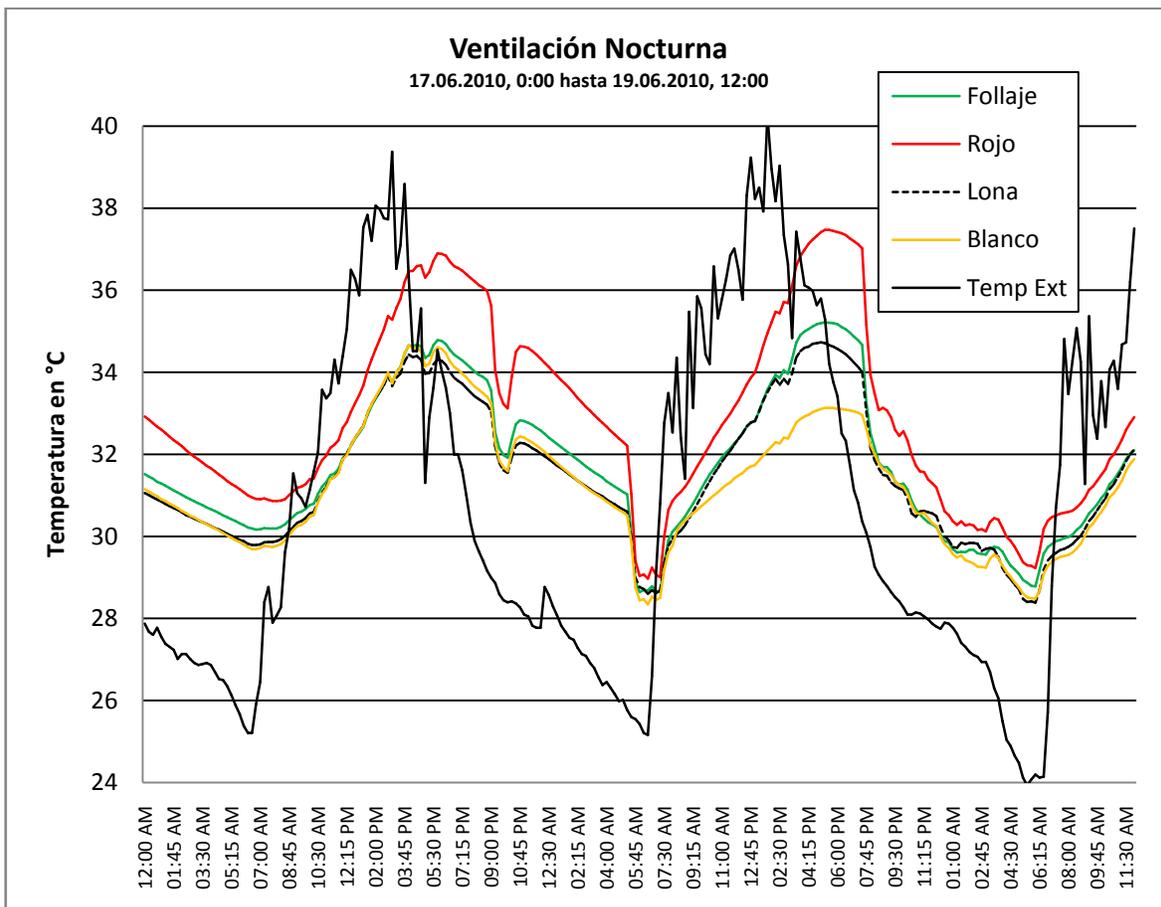


Gráfica 18: las temperaturas interiores de las casas modificadas sin ventilación, la línea negra presenta la temperatura exterior, temperatura por 15min promediada

Así pues, se puede esperar que una ventilación apropiada pueda mitigar dicho efecto. Para verificarlo se miden los impactos de dos diferentes maneras de ventilación. Durante la primera noche se abre las puertas y ventanas sólo durante un tiempo limitado en la noche (21:10h hasta 22:10h) y en la madrugada (5:30h hasta 7:20h) suponiendo que los ocupantes prefieren no dormir con ventanas y puertas abiertas por razones higiénicas o de seguridad. La mitigación en la temperatura está pronunciada en las cuatro casas pero regresa a valores altos cuando la ventilación es interrumpida durante la noche.

La parte derecha de la gráfica #30 muestra los resultados obtenidos durante la noche con ventilación no-interrumpida. A partir de las 19:45 del 19 de junio se abren todas las ventanas y

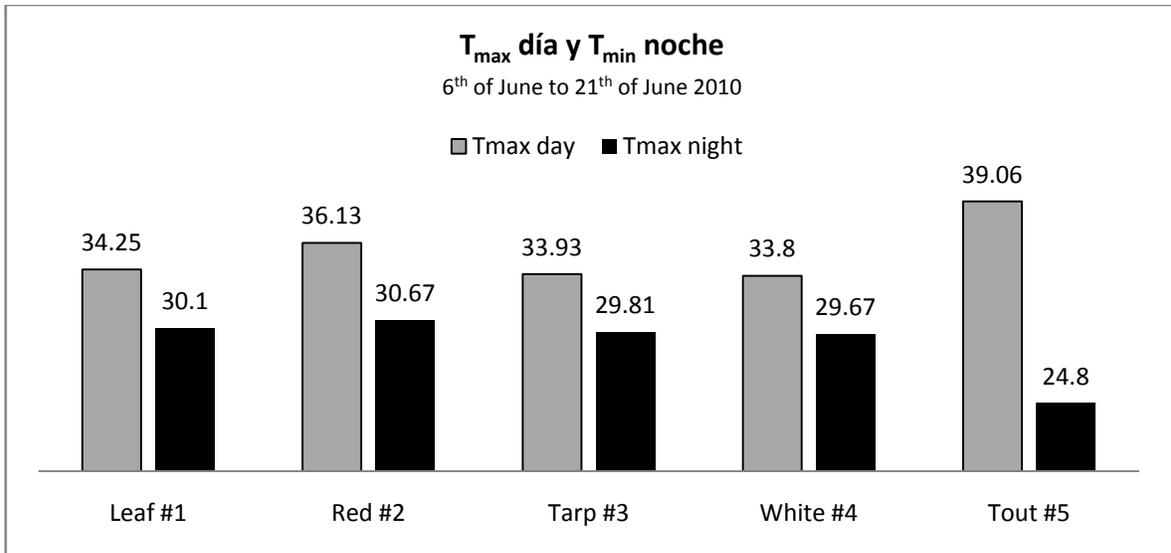
puertas y se las mantiene abiertas hasta las 7:00 de la siguiente mañana. La caída en la temperatura interna de las cuatro casas es rápida y pronunciada. La temperatura interna se mantiene a 2°C por arriba de la temperatura externa durante casi toda la noche. Con la caída de la temperatura exterior un poco antes del amanecer la diferencia aumenta a 4.6°C. La casa con el techo rojo mantiene la temperatura interior más alta pero la diferencia es menos pronunciada que en el caso de la no-ventilación. Más pronunciado que en los otros casos, la temperatura interior en la tarde de la casa con techo blanco mantiene casi 2°C por debajo de las casas con techo de lona y techo con hojas de palma.



Gráfica 30: Las temperaturas interiores de las casas modificadas con ventilación nocturna, la línea negra presenta la temperatura exterior, temperatura por 15min promediada.

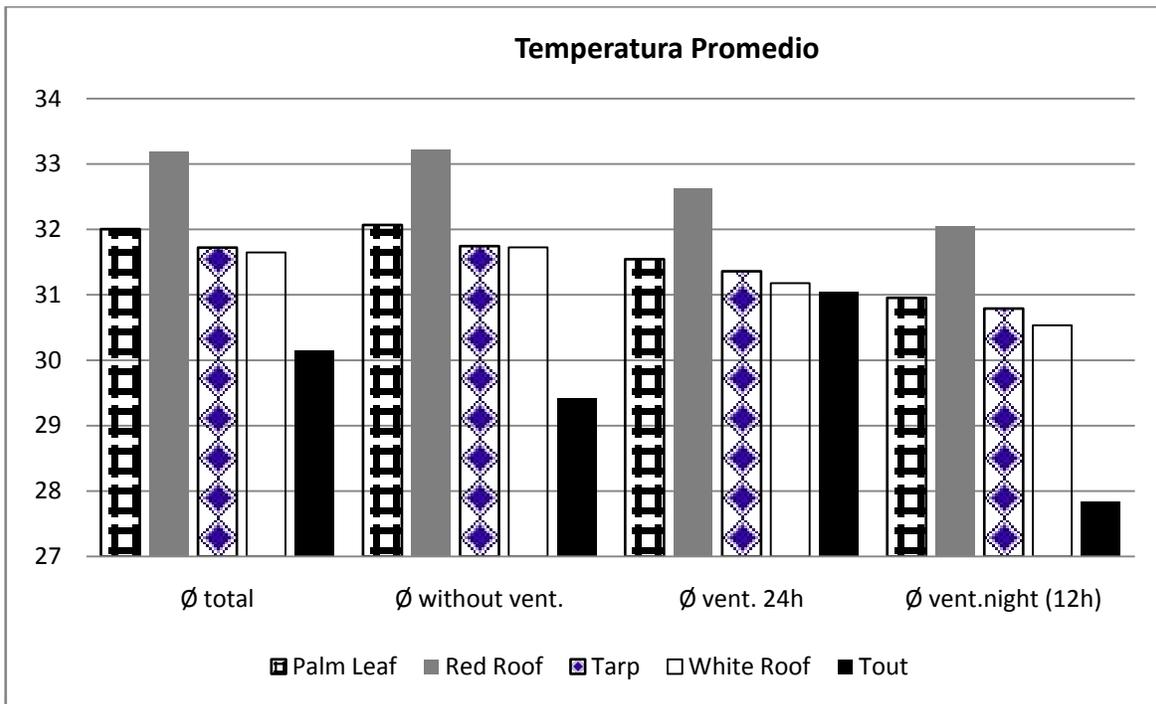
La gráfica #31 muestra las temperaturas máximas promedias diarias y las temperaturas mínimas nocturnas durante los diez días de mediciones. Mientras la fluctuación entre noche y día en las casas con hojas de palma (4.15°C), lona (4.12°C) y techo blanco (4.13°C) es efímera, la fluctuación en la casa con el techo rojo es la más pronunciada con 5.46°C. Durante el mismo tiempo la

fluctuación de la temperatura externa alcanzó 14.26°C. Esos valores son aún más pronunciados en el caso de la ventilación nocturna: mientras ΔT externo es 16.35°C la casa roja presenta una fluctuación de 8.3°C con una temperatura máxima de 37.5°C y una temperatura mínima de 29.2°C.



Gráfica 19: Temperaturas máximas promedio diarias y las temperaturas mínimas nocturnas durante los días de mediciones

Con respecto a las temperaturas medidas en el interior de las casas se da lo siguiente: la temperatura promedio de la casa con el impermeabilizante rojo llegó a 33.2°C, o tres grados por arriba del promedio exterior mientras la casa de referencia, con el impermeabilizante blanco, mantuvo la temperatura más baja con un 31.6°C lo cual es de 1.5°C por arriba del promedio exterior. La gráfica #32 muestra el promedio de la temperatura por todos los diez días medidos representados en la columna \emptyset total por las cinco diferentes casas. La columna \emptyset without ventilation presenta los valores del promedio de los 48 horas (13 de junio, 5:00 hasta 15 de junio, 5:00) sin ventilación alguna, es decir con todas las puertas y ventanas cerradas. En la columna \emptyset vent.24h los valores presentan las temperaturas de 24 horas (18 de junio, 18:00, hasta el día siguiente) con ventilación aplicada (puertas y ventanas abiertas) y la columna \emptyset vent.night (12h) muestra las temperaturas promedio de 18:00 hasta 6:00 del siguiente día.



Gráfica 20: Temperatura promedio de las diferentes casas bajo condiciones del experimento

Lo que se destaca es la diferencia pronunciada entre las temperaturas internas de la casa con el techo rojo y el grupo de las demás casas. Esa diferencia es la más pronunciada durante las horas de la tarde y durante la noche, en las cuales una temperatura agradable es lo más importante debido a que durante esas horas los ocupantes están generalmente presentes en sus casas.

2.4.2 Resultados de los Maqueta

Las mediciones de la temperatura y humedad interior de las maquetas se llevaron a cabo durante

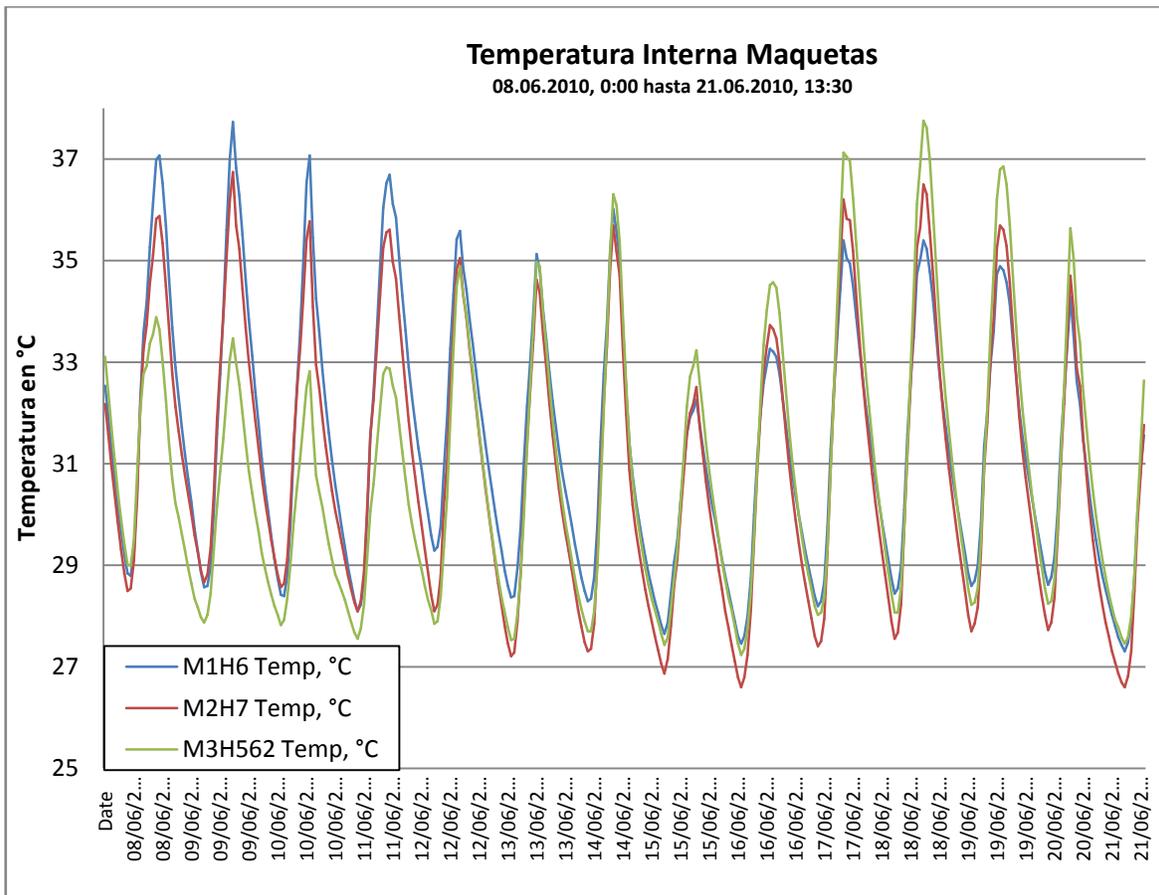


Ilustración 37: Las maquetas durante la segunda fase del experimento (comparación con casas)

los días 02 de junio 2010 hasta el 21 de junio 2010. Durante la primera fase se experimentó con diferentes tipos de techos como tanque de agua, papel de aluminio, aislante térmico, que no fueron empleados en la parte del experimento que presentó la comparación con las casas existentes. En esa segunda parte, a partir del 12 de junio, se cubrió el techo de la maqueta #1 con una lona del mismo material empleado en las casas en Caucel sobre un marco de bambú; el techo de la maqueta #2 se pintó con un impermeabilizante blanco mientras que el techo de la maqueta #3 quedó con el impermeabilizante rojo.

La temperatura promedio medida por la estación meteorológica del Instituto de Investigación en Energía de la Fac. Ing. de la UADY ubicada a 12m de las maquetas fue de 29.6°C lo que es casi 1°C por arriba de la temperatura promedio del mes más caluroso (mayo, 28.7°C) en Mérida. La Humedad Relativa alcanzó un promedio de 80.2%, lo cual está en un 8% por arriba del promedio anual en Mérida (72%). La temperatura exterior más baja durante el tiempo de mediciones llegó a 23.4°C (14 de junio, 5:40) y la más alta alcanzó 42.2°C (20 de junio, 13:50) en mediciones con intervalo de 5 minutos mientras la temperatura promediada por hora llegó a 24.2°C (19.06, 6:00) y la máxima a 39.38°C (17.06, 15:00).

La primera gráfica representa los resultados obtenidos durante las dos semanas centrales del estudio. Durante los primeros cuatro días, hasta el 11 de junio, fue muy marcado el impacto que tenía el tanque de agua sobre el comportamiento térmico de la maqueta #3, mientras los días 12 hasta 14 de junio presentaron un comportamiento poco congruente. El 11 de junio por la noche (21:00) se quitó el tanque de agua de la maqueta #3 pero la modificación comparable con las casas en Caucel no se consumó hasta el 15 de junio a las 7:00 de la mañana. Los datos a partir del 15 de junio muestran un comportamiento muy parecido al de las casas.

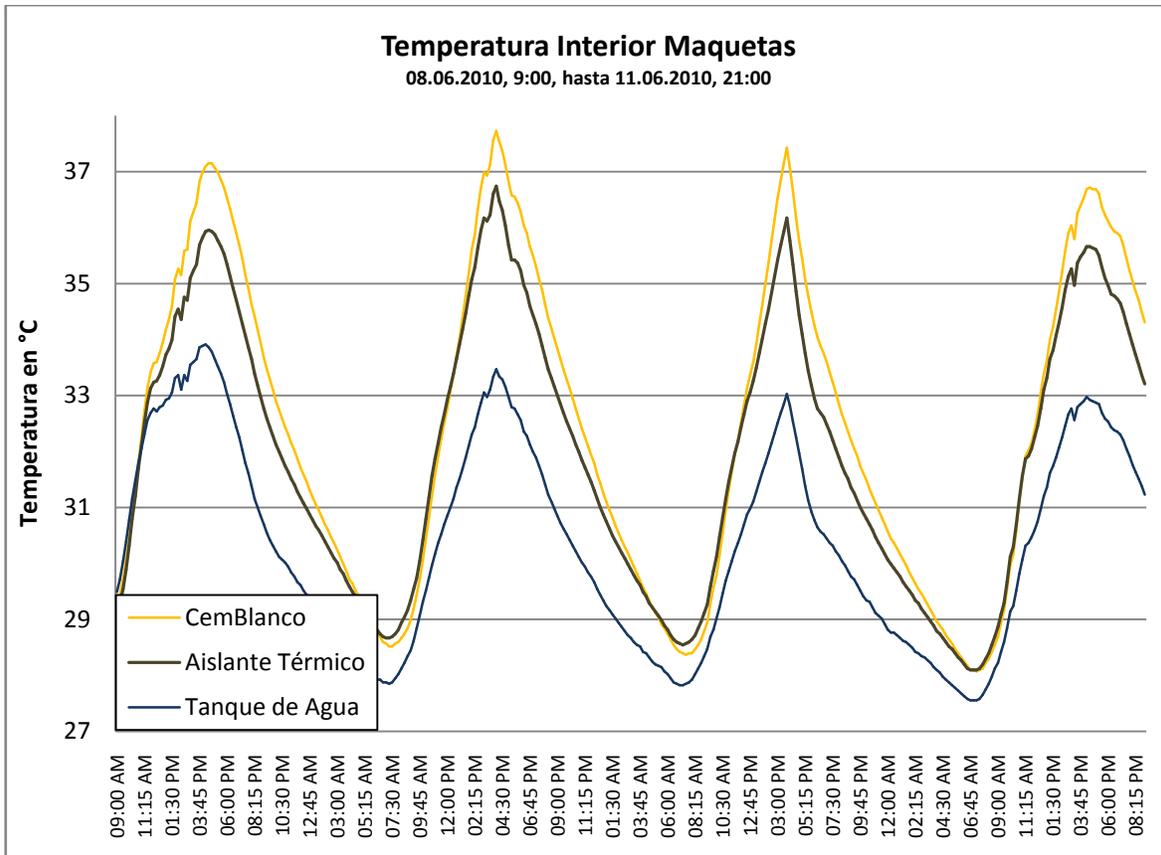


Gráfica 21: Temperatura de las maquetas entre el 08.06.2010 y el 21.06.2010

Para analizar con más detalle los resultados de la primera fase de las mediciones en las maquetas se generó la gráfica #33. En aquella fase el techo de la maqueta #1 estaba pintada con una mezcla de cemento blanco con resina de madera transparente (Resistol[®]), una manera tradicionalmente utilizada en Yucatán. La maqueta #2 fue cubierta con una placa de aislante térmico de polystereno expandida de 2.5cm (Foamular250[®]) y sobre el techo de la maqueta #3 se colocó un tanque de agua. El tanque de agua consistió de un marco de madera de 10cm de altura en la cual se colocaron dos bolsas plásticas llenas con agua y una placa de aislante térmico. Dicho aislante térmico fue removido cada día después del atardecer y colocado en la mañana alrededor de las 7:00. La altura del agua fue de 9cm.

Como muestra la gráfica la instalación del tanque de agua fue lo más eficiente para mitigar la temperatura adentro de la maqueta. En comparación con la maqueta de techo tradicional (cemento blanco) su potencial de disminuir la temperatura llegó a casi 4.5°C mientras la diferencia entre el techo tradicional y el techo con aislamiento térmico se encuentra un poco por arriba de 1°C. El efecto de disminuir la temperatura interna de las maquetas es más pronunciado durante el

día llegando a un $\Delta T=4.398^{\circ}\text{C}$ mientras durante la noche es de sólo $\Delta T= 0.817^{\circ}\text{C}$. Mientras la maqueta #3 siempre mantiene la temperatura más baja, es interesante observar que la temperatura de la maqueta con el techo de cemento blanco alcanza los valores más altos durante el día pero pierde su energía más rápidamente durante la noche llegando a un punto en la madrugada en donde su temperatura es más baja que en la maqueta con el aislante térmico. Es decir mientras el aislante térmico frena al aumento de la temperatura durante el día también inhibe la pérdida de calor durante la noche.

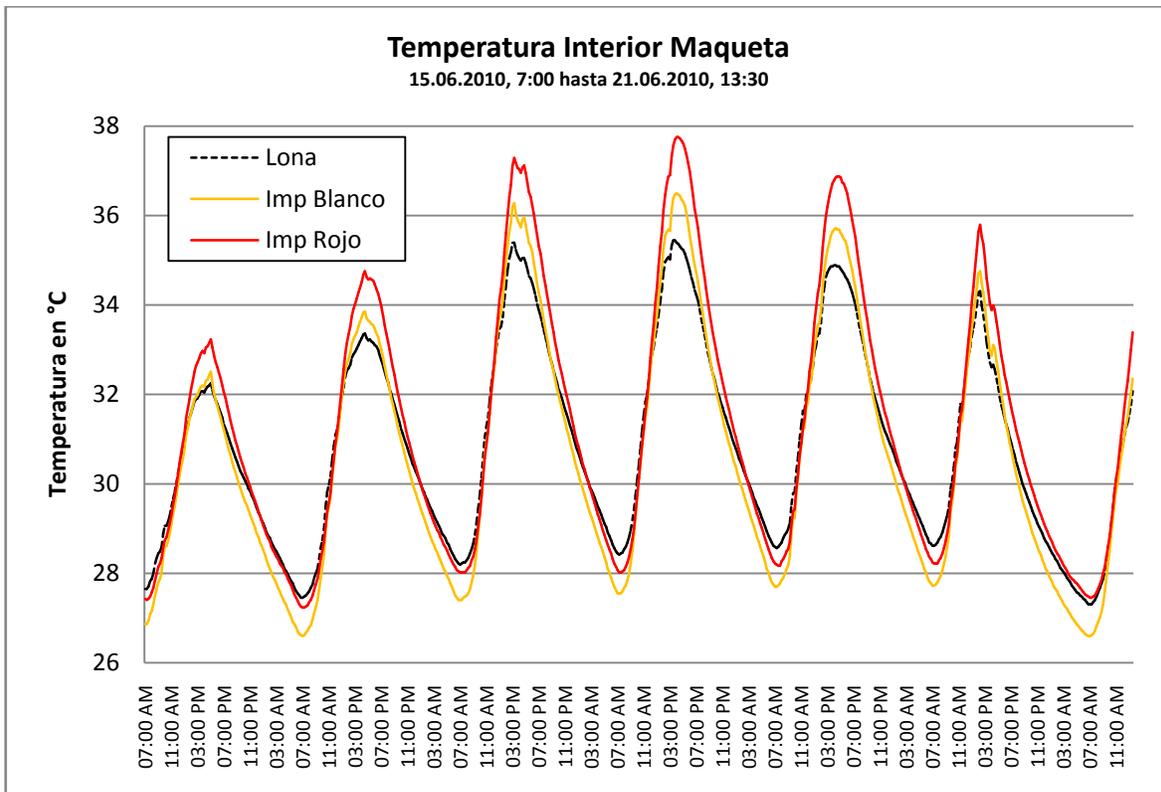


Gráfica 22: Temperatura de maquetas con tanque de agua, aislante térmico e impermeabilizante tradicional

De todos los valores obtenidos durante las mediciones el sistema de tanque de agua fue lo más eficiente con respecto a su potencial de mitigación de la temperatura de las maquetas/ casas. Lamentablemente no fue posible aplicar ese conocimiento a la escala de las casas en Caucel.

La segunda fase de las mediciones en las maquetas coincide con las mediciones en las casas en Caucel. Debido a que había sólo tres maquetas disponibles mientras para las mediciones en Villa Jardín había 4 casas, se tuvo que excluir una forma de modificación en las maquetas. Siendo la modificación con el material orgánico el menos probable para su introducción en el mercado de construcción se excluyó este. Así se modificaron las tres maquetas de la siguiente manera: a la

maqueta #1 el techo se pintó con un impermeabilizante color blanco y subsecuente se le cubrió con una lona ventilada en un marco de bambú, el techo de la maqueta #2 se pintó con el mismo impermeabilizante color blanco expuesto al sol mientras la maqueta #3 tuvo un techo pintado con impermeabilizante de color rojo igual al de las casas en Cauce (ver ilustración 26). Así la modificación de la maqueta #1 corresponde a la casa #4 (lona), la maqueta #2 a la casa #5 (blanco) y la maqueta #3 a la casa #2 (rojo). La gráfica #35 muestra las temperaturas bajo esas condiciones durante los siete días de mediciones.

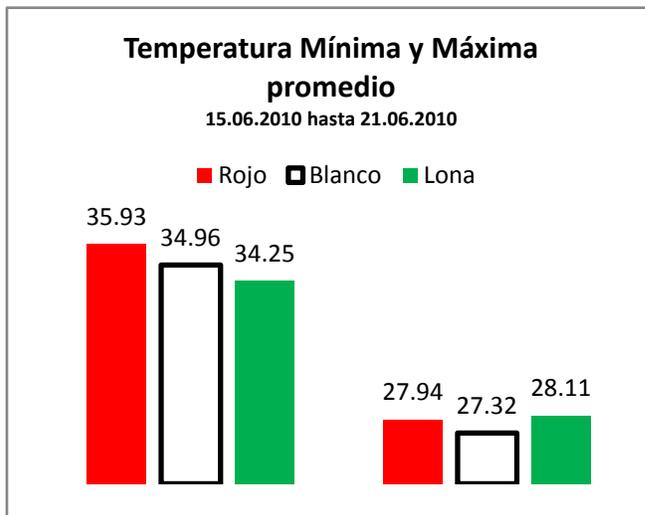


Gráfica 23: Temperatura de las maquetas con lona, impermeabilizante rojo y blanco

Durante todos los días, con excepción del día 20 de junio, se presentó la temperatura máxima interior a las 17:00 lo que implica un desfase de tres horas con respecto a la temperatura exterior. La maqueta roja presenta durante todas las horas diurnas las temperaturas más altas mientras las temperaturas más altas durante la noche se mantienen en la maqueta con lona. La menor oscilación de la temperatura se presenta en la maqueta con lona siendo $s\Delta T_{\text{dia/noche}}=6.14^{\circ}\text{C}$. En comparación con eso la maqueta roja alcanza un $\Delta T_{\text{dia/noche}}=7.99^{\circ}\text{C}$.

Durante los días más representativos, el 18.06 y el 19.08 la diferencia de temperatura llega a $\Delta T=2.28^{\circ}\text{C}$ el primer día y $\Delta T=1.99^{\circ}\text{C}$ el siguiente. La diferencia de temperatura nocturna cambia muy poco durante la noche y se mantiene alrededor de las $\Delta T=0.8^{\circ}\text{C}$. Basados en los datos

promediados se puede concluir que la diferencia de la temperatura durante su máximo alcance, alrededor de las cinco de la tarde, es más pronunciada entre el techo rojo y el techo con lona. La temperatura de la maqueta con lona se encuentra en 1.68°C por debajo del techo rojo, mientras el efecto del techo blanco en comparación con el techo rojo alcanza con 0.97°C casi un grado.

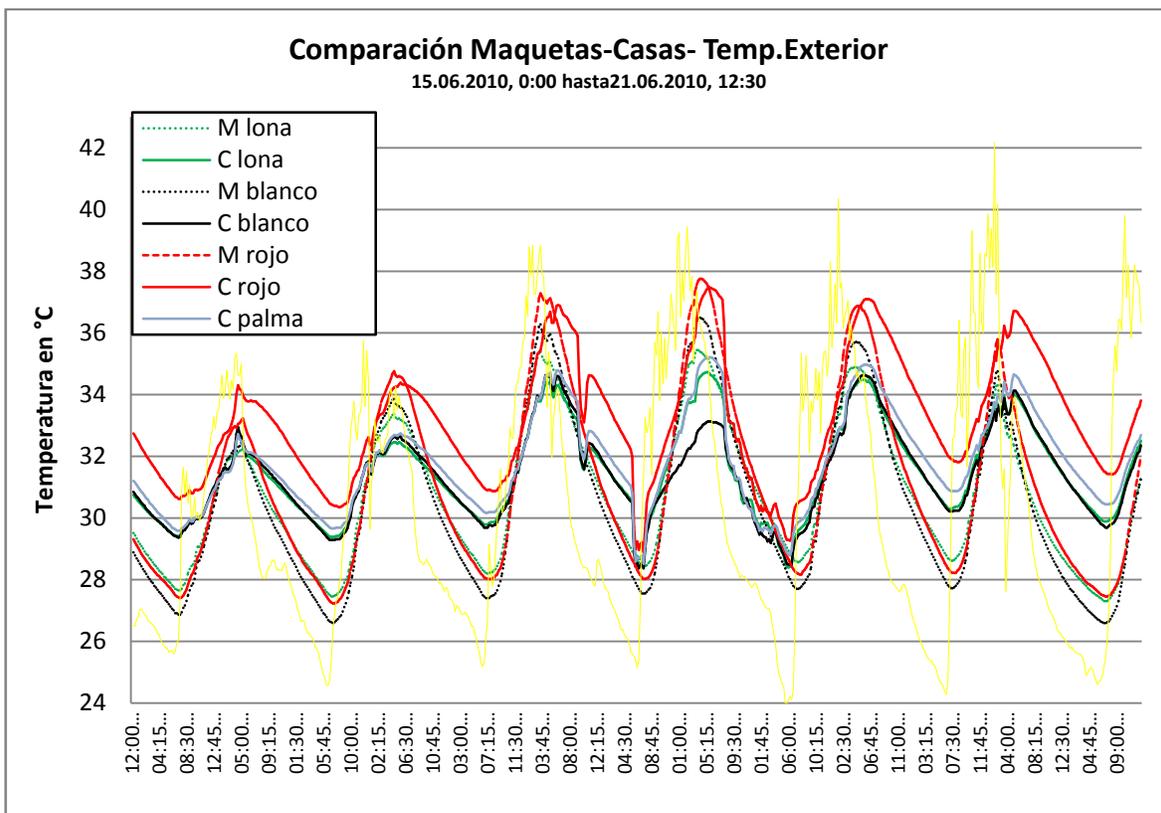


Gráfica 24: Temperaturas Máximas y Mínimas en °C promediados para las maquetas con techo rojo, blanco y lona

La gráfica #36 cuantifica las temperaturas promediadas basadas en las temperaturas máximas diurnas (izquierda) y las temperaturas nocturnas (derecha). Así se puede ver que el orden de las temperaturas diurnas, siendo el rojo la más caliente y la lona la menos caliente, no se repite en la pauta nocturna. Eso se debe a que la lona prohíbe el enfriamiento de la maqueta por radiación nocturna.

2.5 COMPARACIÓN CASA, MAQUETA

La estructura del experimento permite examinar y comparar el comportamiento térmico entre casa y maqueta. Se trata de comprobar si los resultados de mediciones obtenidas en maquetas se pueden transferir a la situación real de las casas, una metodología ampliamente aprovechada en el ámbito científico en donde por lo general no es posible contar con un modelo de escala uno a uno. Así se construyó una réplica de las casas de escala uno cuatro en el campus de la Facultad de Ingeniería de la UADY a 8.7 km del sitio original de las casas. Tal distancia entre la casa y su modelo también puede considerarse normal, debido a que el lugar del objeto real y del modelo de estudio casi nunca se encuentra en el mismo sitio sino que depende de los lugares y recursos disponibles para el investigador. Con respecto a la comparabilidad de los dos lugares con relación al tiempo se considera que no hay una divergencia relevante entre los dos. Los dos lugares se encuentran al margen de la urbanización, colindante con extensos campos de arbustos y árboles bajos, en terrenos planos y sin impactos microclimáticos extraordinarios como cauces de ríos, lagos, lomas etc. Por lo que la insolación, la temperatura y la humedad del aire son similares. Las pautas eólicas, no obstante, pueden divergir debido a la altura y cobertura de los edificios colindantes en el contexto de la Facultad de Ingeniería.

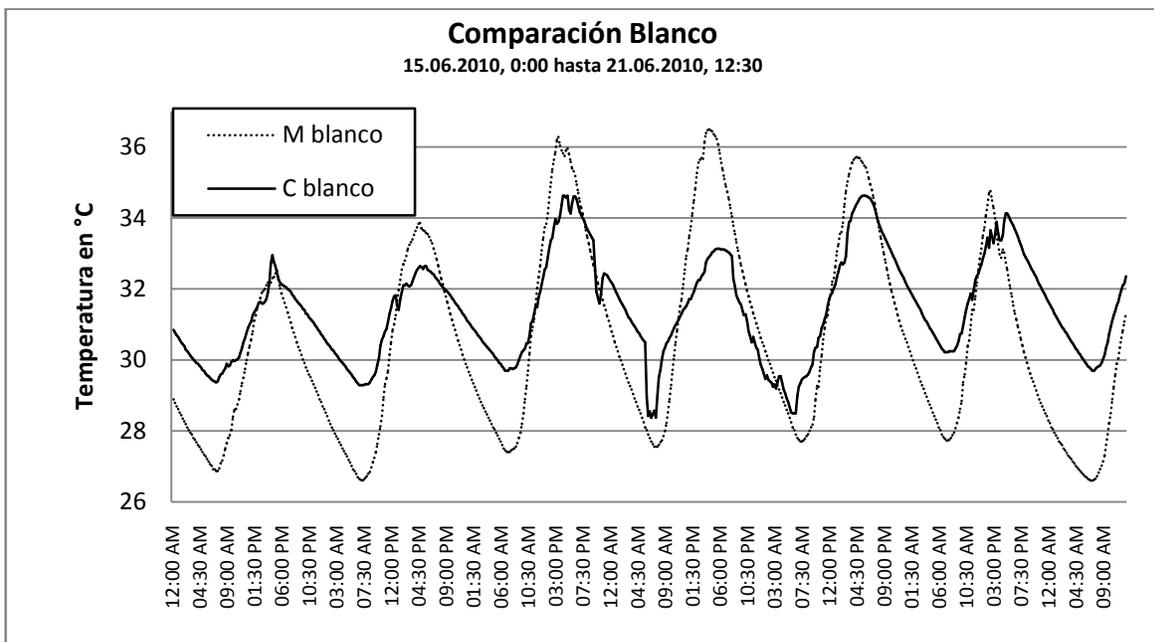


Gráfica 25: Comparación de las temperaturas medidas en las maquetas, "M", líneas puntuadas, y casas "C", líneas sólidas, en comparación con la temperatura bulbo seco exterior.

La gráfica anterior abarca todo el tiempo de las mediciones en comparación y muestra la temperatura de bulbo seco en el exterior, medido cerca de las casas en Ciudad Caucel. Las líneas punteadas representan a las maquetas mientras las líneas sólidas a las casas y sus maquetas correspondientes están graficadas en los mismos colores. Las siguientes gráficas (#38-40) muestran con más detalle el comportamiento térmico de cada casa con su respectiva maqueta.

Debido a que no se ejecutaron experimentos en las maquetas en donde importaba la ventilación y tomando en cuenta la baja velocidad del aire durante todo el mes de junio en la región de Mérida se puede considerar dicha diferencia de poco impacto sobre los resultados obtenidos. Así pues las mediciones en las casas y las maquetas se ejecutaron bajo circunstancias climáticas muy parecidas.

La comparación entre la maqueta y casa de techo blanco muestra un patrón muy diferente entre casa y maqueta. Mientras la maqueta presenta una ondulación térmica equilibrada sin distorsiones pronunciadas, en el caso del grafo de la casa se puede notar un patrón diferente: la temperatura está sujeta a cambios bruscos. Durante la tarde del día 17 y 18 junio esos cambios fueron resultado de la ventilación nocturna aplicada a las casas pero no a las maquetas, no obstante el único día con un patrón balanceado en las casa fue el 19 de junio.



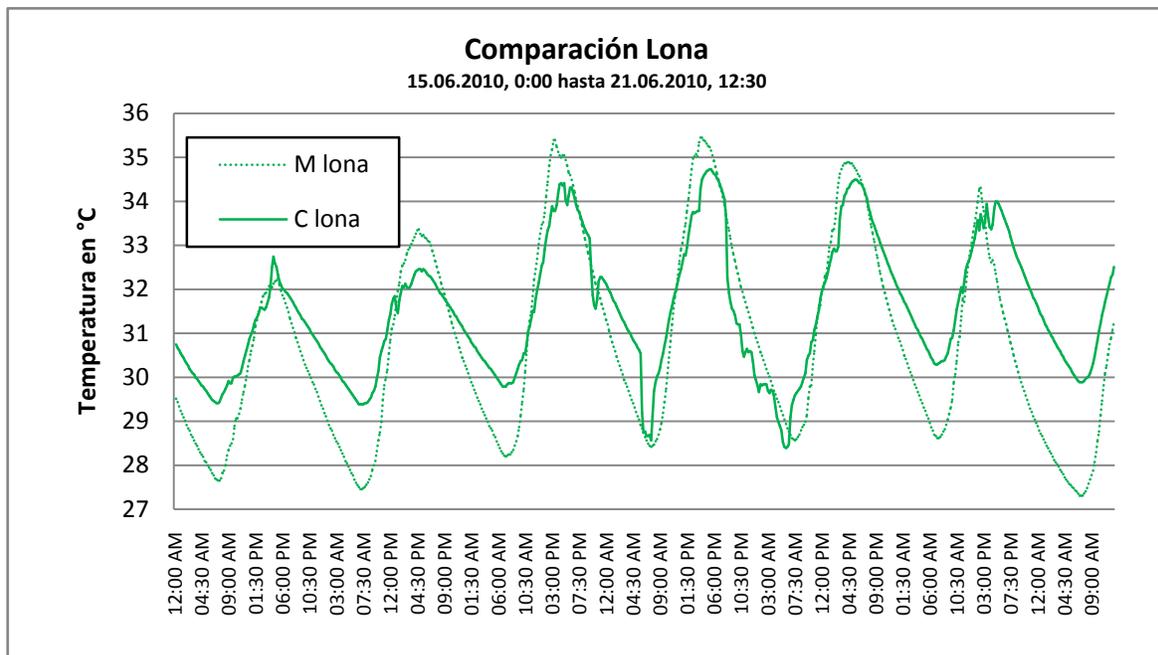
Gráfica 26: Techo Blanco: Comparación de temperaturas en la casa y la maqueta con techo blanco. Los días 17 y 18 de Junio se ventiló la casa durante la noche mientras la maqueta permaneciendo cerrada

La ondulación de la temperatura también es más pronunciada en las maquetas que en las casas. Con excepción del día 15 de junio durante todos los días la temperatura máxima de la maqueta se

encuentra por encima de la temperatura máxima de la casa. La diferencia normal es de 1°C hasta 2°C mientras puede llegar a un $\Delta T=3.2^{\circ}\text{C}$ el 18 de junio. La temperatura mínima durante la madrugada es la más parecida entre la maqueta y la casa durante los dos días con aplicación de ventilación nocturna en las casas. Los demás días presentan una pronunciada diferencia de temperatura mínima entre maqueta y casa. Dicha diferencia está aún más pronunciada que la del día superando los 2°C en todos los días⁷³.

La maqueta experimenta una ondulación más pronunciada de la temperatura que la casa, siendo siempre la más caliente durante el día y la más fría durante la noche. Mientras en un día normal (16 de junio) la ondulación de la casa llega a $\Delta T=3.1^{\circ}\text{C}$ la de la maqueta se encuentra en $\Delta T=5.9^{\circ}\text{C}$, 2.8 grados por arriba de la de la casa. A partir del 16 de junio se puede observar de que la maqueta alcanza su temperatura máxima antes de la temperatura máxima de la casa lo cual, junto con la ondulación elevada de la maqueta indica que la inercia térmica de la casa es más alta que la de la maqueta.

La comparación de las temperaturas, en el caso de las lonas, muestra las mismas pautas como en el experimento con techo blanco. La maqueta no sólo muestra las más altas temperaturas diurnas sino también las más bajas temperaturas nocturnas⁷⁴.



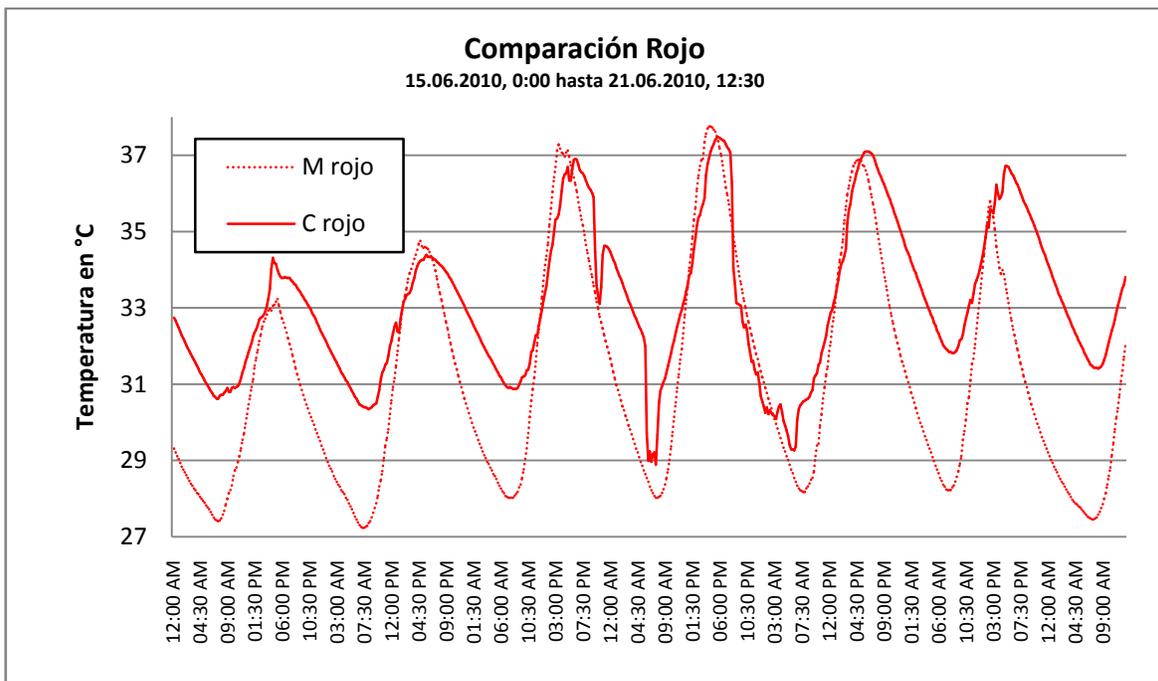
Gráfica 27: Techo Lona: Comparación de temperaturas en la casa y la maqueta con techo blanco cubierto con lona. Los días 17 y 18 de Junio se ventiló la casa durante la noche mientras la maqueta se quedó cerrada

⁷³ Con excepción de los días con ventilación nocturna

⁷⁴ Con excepción de los noches con ventilación en las casas

No obstante, las diferencias en temperaturas máximas diurnas son menos pronunciadas que en el caso de los techos blancos, aún en su máximo no suelen ser más que 0.8°C por encima de la casa. Por otro lado las temperaturas mínimas de las maquetas alcanzan hasta 2.5°C más que la casa respectiva, presentando valores similares como en el caso del techo blanco. Mientras que en un día normal (16 de junio) la ondulación de la casa llega a un $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$ la de la maqueta se encuentra en $\Delta T=5.7^{\circ}\text{C}$, 2.7 grados por encima de la casa, un valor muy parecido al del techo blanco.

Mientras las casas y las maquetas de techo blanco y de techo de lona muestran un comportamiento casi igual entre sí, en la maqueta y la casa de techo rojo el comportamiento térmico nocturno es muy distinto. Los resultados del techo rojo muestran valores muy parecidos durante el día, siendo las temperaturas máximas de la casa a veces un poco por arriba de las temperaturas de la maqueta. La diferencia de temperatura máxima entre casa y maqueta apenas supera 0.25°C. Mientras la pauta diurna es muy parecida entre la maqueta y la casa, el comportamiento nocturno está aún más pronunciada que en los casos del techo blanco y del techo con lona. Con excepción de los días con ventilación nocturna en las casas se encuentra la temperatura mínima de la maqueta 3°C hasta 4°C por debajo de la temperatura de la casa.



Gráfica 40: Techo Rojo: Comparación de temperaturas en la casa y la maqueta con techo rojo. Los días 17 y 18 de Junio se ventiló la casa durante la noche mientras la maqueta se quedó cerrada

2.6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

2.6.1 Eficiencia de diferentes materiales del techo

Las mediciones en las casas muestran claramente el impacto que tienen las diferentes superficies de los techos sobre su comportamiento térmico. Sobre todo la aplicación de un impermeabilizante de color rojo causa el aumento de la temperatura interna por más que 2°C lo que se traduce a una carga adicional en el sistema de aire acondicionado en donde lo hay o en una situación de sobrecalentamiento más pronunciado en edificios sin sistemas activos de climatización. Ese resultado es de gran importancia dado a que casi todas las escuelas en Mérida⁷⁵ y muchos otros edificios ya se encuentran con techos de impermeabilizante rojo. Las diferencias en temperatura entre las casas con techo de lona, techo blanco y techo de material orgánico son poco pronunciadas siendo la casa con el techo blanco la menos caliente durante el tiempo de las mediciones. Debido a que los otros dos techos requieren un extra en costo de instalación y mantenimiento no es recomendable su instalación para la climatización.

La aplicación de un aislante térmico en un techo de las maquetas tampoco resultó tener un impacto positivo sobre el comportamiento térmico de dicha maqueta. Su temperatura se mantuvo poco por encima a la temperatura de la maqueta con techo tradicional⁷⁶ lo que no justifica el costo extra en instalación y mantenimiento para casas con climatización natural. Sin embargo bajo la expectativa de un rearme de las casas con sistemas activos de aire acondicionado su aplicación sería positiva.

La situación actual de la construcción en masa en Mérida está definida por una muy alta densidad de construcción de un nivel de altura. Debido a esta estructura urbanística se limita severamente el aprovechamiento de la ventilación como manera eficiente de climatizar edificios en zonas tropicales. La poca altura de los pisos aumenta el sobrecalentamiento e inhibe la instalación de ventiladores de techo, probablemente la más eficiente manera de enfriar espacios de manera mecánica. Árboles suficientemente altos para que puedan limitar la irradiación sobre los envolventes de las casas también se encuentra sólo en los dibujos arquitectónicos destinados a la promoción del fraccionamiento. Sin embargo dicha forma de bioclimatismo no sólo mejorará el microclima del lugar a muy bajo costo sino que elevaría el valor inmobiliario de la zona.

⁷⁵ También se encuentran techos con impermeabilizante verde en las escuelas de Mérida. Sin embargo se puede esperar un impacto térmico parecido al de los techos rojos debido a su poca reflectancia.

⁷⁶ Cemento blanco con pegamento de madera (Resistol®)

La alta inercia térmica de los materiales empleados en la construcción actual acumula una gran cantidad de energía térmica durante el día radiándola en parte hacia el interior de las casas durante las primeras horas de la noche en donde la tasa de ocupación suele ser más alta. Dicha radiación aumenta la temperatura limitando el aprovechamiento de la relativa frescura del aire exterior durante la noche.

Las dos estrategias básicas en zonas tropicales son la ventilación y la disminución de la carga térmica sobre el edificio, es decir, limitar el efecto de la radiación solar directa e indirecta sobre el edificio y tratar de disminuir las cargas térmicas interiores de las casas. La arquitectura vernácula se adaptó a esas circunstancias por excluir la cocina (fuente de calor) del edificio principal, construir una cobertura con poca superficie (receptor de radiación solar), techos altos y de dos aguas (faciliten la ventilación) en materiales ligeros (poca masa térmica) en un patrón morfológico de poca densidad (facilita la ventilación). Además se encontraron los solares en un área arbolada (sombra) y con un alto conteniendo de vegetación (enfriamiento por evaporación). Aún con las modernas expectativas hacia el modo de vivir, que no siempre permiten el empleo de esas técnicas tradicionales, se debe tratar de seguir esas pautas preestablecidas en la arquitectura vernácula.

Cómo hemos mencionado antes una de las **primeras estrategias** debe de ser la ventilación, la cual se puede facilitar con techos altos, poca densidad de construcciones y la ubicación adecuada de los vanos. Lo más eficaz sería la ubicación de los vanos de tal manera, que se permita una ventilación cruzada tomando en cuenta la dirección de los vientos predominantes, que en Mérida suelen venir desde el Este. También se debe considerar elevar el piso inferior de la casa para permitir la ventilación no sólo por los lados verticales (los muros) y el techo, sino también por su parte inferior. Eso puede ser aprovechado también para minimizar efectos negativos en zonas con posibilidades de inundaciones, y es una manera de prevenir que la temperatura interior de las casas supere significativamente la temperatura del medio ambiente. Dado a que hemos visto que la temperatura exterior se encuentra la mayor parte del año dentro de las varias zonas de confort establecidas bajo el concepto adaptativo eso ya mejoraría significativamente el bienestar de los ocupantes. Además la ventilación causa un efecto evaporativo sobre la piel humana que mejoraría aún más el bienestar térmico. No obstante, no siempre y menos en las altura cerca de la superficie, hay suficiente viento para lograr este efecto.

La **segunda estrategia** es la protección en contra de la radiación solar. Las características selectivas de diferentes materiales de construcción con respecto a su absorción y emisión constituyen otra defensa eficaz contra los impactos de la radiación. Aquellos materiales que reflejan más radiación de la que absorben, y que expelen rápidamente la cantidad absorbida en

forma de radiación térmica, producirán temperaturas más bajas dentro de la edificación. Dado a que el techo recibe la mayor carga térmica se debe tomar particular cuidado en su diseño y construcción. Un techo con alta reflectancia suele aumentar su temperatura en menor medida que un techo oscuro. Los vanos deben de prohibir la entrada de rayos solares directas durante la época más calurosa del año. Eso se puede lograr por medio de protecciones horizontales (aleros) hacia el sur y protecciones verticales hacia el oriente y el poniente. Con preferencia que esas protecciones sean de un material con una alta reflectancia a los rayos visibles e infrarrojos y de un material con poca masa térmica. Una manera poco costosa puede ser la plantación de árboles que crecen lo suficientemente alto para limitar la radiación solar directa sobre el edificio o el uso de plantas enredaderas para cubrir la envolvente, o parte de ella, con sus hojas. Eso también contribuiría a la disminución de la temperatura por evaporación.

La **tercera estrategia** es la construcción en materiales ligeros con poca masa térmica. Una casa de madera cumple con este requisito. Dado a que la madera tiene un valor de capacidad térmica ("c") un poco por debajo del valor "c" del cemento y de los ladrillos pero una masa volumétrica muy por debajo de esos últimos dos materiales, su masa térmica se encuentra también muy por debajo del concreto y del ladrillo, lo que permite que en la tarde y noche el edificio se enfríe más rápido que un edificio moderno evitando la pesada radiación nocturna de calor hacia el interior.

La **cuarta estrategia** se basa en la geometría del envolvente. Esto debe facilitar la ventilación (altura y orientación hacia el viento predominante) y poner una mínima superficie hacia los rayos más fuertes del sol. Eso significa la preferencia a una cobertura rectangular con orientación del eje alargado sur-norte y un techo de dos aguas. Bóvedas y cúpulas con abertura para una ventilación mejorada son otro método recomendable. Formas redondas de tipo "iglú" también suelen ser buenas.

La **quinta estrategia** puede aprovechar la evaporación y disponibilidad de agua subterránea. Aunque la zona cuenta con una alta humedad relativa durante la mayor parte del año, el enfriamiento por la evaporación puede ser una forma secundaria de climatización pasiva. En particular durante la primera mitad del año la humedad relativa baja hasta un 65%HR. Aunque esta humedad todavía se encuentra con valores altos, lo que permite cierta forma de aprovechamiento evaporativo. Esta estrategia es particularmente factible en el mes de mayo, el cual cuenta con altas temperaturas pero todavía con una baja humedad relativa en el aire.

Una particularidad de la zona investigada es la disponibilidad de agua subterránea a poca profundidad. Eso se puede aprovechar para fines de climatización por medio de lozas o techos de radiación.

Los datos obtenidos durante el experimento indican claramente que bajo ninguna definición del rango de confort térmico, o sea basado en el sistema Fanger o en los sistemas adaptativos, se logra mantener la temperatura interior de las casas dentro de este rango durante el mes más cálido del año. No obstante una investigación en el rango de confort térmico de la población en Mérida indica que la tolerancia de la gente investigada es más alta que las temperaturas indicadas por los sistemas adaptativos o cuantitativos. Así cualquier reducción perceptible en la temperatura interior de las casas aumentará el confort térmico de sus habitantes aunque no se lograra alcanzar temperaturas aceptables bajo la definición establecida.

La técnica más prometedora, el techo con tanque de agua, no se pudo comprobar a nivel de casas sino sólo en las maquetas. Durante el experimento fue el método con el mejor impacto térmico sobre las maquetas, disminuyendo la temperatura en 4°C. Junto con la ventilación nocturna, método comprobado para disminuir las temperaturas internas hasta un nivel poco por arriba de las temperaturas externas, el techo de agua puede servir para mantener las temperaturas en niveles cómodos para el ser humano.

Se recomienda investigar dicho método de climatización con más profundidad con un tiempo más amplio en condiciones reales (casas) siendo el resultado obtenido en la investigación presente contradictoria a las recomendaciones bioclimáticas generales para zonas cálido-húmedas; el construir con materiales de poca masa térmica.

2.6.2 El valor informativo de los datos obtenidos en maquetas

Para valorar nuevos métodos de diseño o el impacto que tendrá la aplicación de diferentes materiales en la construcción de edificios el arquitecto-ingeniero se puede aprovechar de modelos numéricos o de maquetas que representen las edificaciones pero a una escala menor. Datos obtenidos por cálculos o mediciones en esas proxys comúnmente sirven para predecir el comportamiento real de las edificaciones. En eso se basa la intención central del experimento que es la de verificar el valor informativo que se puede obtener de mediciones en maquetas para su aplicación en casas reales.

Los datos obtenidos durante el experimento indican claramente que el comportamiento térmico de las maquetas es muy diferente al comportamiento de las casas.

Mientras en la comparación entre los diferentes techos de las casas se puede observar una diferencia en temperatura de 2°C entre la casa con el techo con mejor capacidad de disminuir la temperatura y el techo que más calienta a la casa, los datos de comparación entre casa y maquetas con el mismo techo ya muestran una disparidad de 1°C hasta 4°C. Es decir el margen de

error alcanza de llegar a un 200%. Con una discrepancia de valores tan pronunciados es imposible usar los datos obtenidos en las mediciones de las maquetas para extrapolarlas y aplicarlas a la situación de las casas.

2.6.3 Recomendaciones generales

La situación actual de la construcción en masa en Mérida está definida por una muy alta densidad de construcción de un nivel de altura. Debido a esta estructura urbanística se limita severamente el aprovechamiento de la ventilación como manera eficiente de climatizar edificios en zonas tropicales. La poca altura de los pisos aumenta el sobrecalentamiento e inhibe la instalación de ventiladores de techo, probablemente la más eficiente manera de enfriar espacios de manera mecánica. Árboles suficientemente altos para que puedan limitar la irradiación sobre las envolventes de las casas también se encuentra sólo en los dibujos arquitectónicos destinados a la promoción del fraccionamiento. Sin embargo dicha forma de bioclimatismo no sólo mejorará el microclima del lugar a muy bajo costo sino levantará el valor inmobiliario de la zona.

La alta inercia térmica de los materiales empleados en la construcción actual acumula una gran cantidad de energía térmica durante el día radiándola en parte hacia el interior de las casas durante las primeras horas de la noche en donde la tasa de ocupación suele ser más alta. Dicha radiación aumenta la temperatura limitando el aprovechamiento de la relativa frescura del aire exterior durante la noche. Bajo esas consideraciones se debe reactivar la tradición local de construir con materiales ligeros, de poca masa térmica. Como material disponible y económico se presta la madera.

La disponibilidad de agua subterránea a poca profundidad en muchas regiones donde se construye puede ser aprovechada para fines de climatización por medio de lozas o techos de radiación.

2.6.4 Propuestas para investigaciones futuras

Debido a factores externos no fue posible llevar a cabo los experimentos durante todo un año. Aunque se logró validar los datos para la condición más calurosa del año, puede ser de interés extender la duración del experimento hasta un año completo, incluyendo de este modo datos obtenidos en la época más fría del año. Las maquetas establecidas para el fin del experimento todavía se encuentran en la Facultad de Ingeniería de la UADY y pueden ser aprovechadas con esta finalidad.

Se obtuvieron resultados en las maquetas que indican que el aprovechamiento de tanques de agua en los techos puede ser un método eficaz de disminuir la temperatura interna de las casas. No fue posible aplicar este método en las casas reales por lo cual se queda pendiente la comprobación de su funcionalidad en la situación real.

El experimento se llevó a cabo con casas todavía no habitadas, es decir sin fuentes de calor internas. Es muy probable que esas fuentes internas causen una temperatura interna aun más elevada que la medida en el experimento. Por lo cual es recomendable aplicar el mismo método del experimento a casas ya habitadas.

Debido a la poca profundidad en que se encuentra agua subterránea en la Península de Yucatán puede ser ventajoso sacar provecho de esa agua para climatizar edificios mediante lozas radiantes. Aunque la tesis presente no examina dicha posibilidad, los conceptos teóricos dan sustento a una investigación con enfoque en el aprovechamiento del agua subterránea.

Hay muy pocas investigaciones profundas sobre el impacto que tienen árboles o envolturas verdes sobre la climatización de edificios en esas zonas, lo que se debe, en parte, al tiempo necesario para llevar a cabo esas investigaciones. Dado a que un árbol requiere años hasta décadas para alcanzar una altura y tamaño lo suficiente grande para dar sombra sobre un edificio, los tiempos de investigaciones en la Maestría o el Doctorado al igual que en muchos proyectos de investigación institucionalizado no tienen este alcance. Sin embargo el aprovechamiento de las plantas en la climatización puede ser un método económico, eficaz y que requiere muy poco mantenimiento.

BIBLIOGRAFIA

ARZATE PÉREZ, Miguel (2008), *Modelo de Evaluación sustentable para le arquitectura en México*, Tesis de Doctorado, UNAM, México

ASHRAE, (2001) *American Society of Heating Refrigeration and Air conditioning Engineers, Handbook Fundamentals*, Atlanta EE.UU., ASHRAE

ASHRAE, (1992) *Desiccant Cooling and Dehumidification* Atlanta EE.UU., ASHRAE

AULICIEMS, A., (1981) *Towards a Psycho-Physiological Model of Thermal Perception*, Int. Journal of Biometeorology (25): 109-122

BAIRD, G. y LECHAT, S., (2009) *Users Perception of Personal Control of Environmental Conditions in Sustainable Buildings*, en *Architectural Science Review*, 52.2 :108-116

BAÑOS RAMÍREZ, Othón, (2009), *La invención de la casa maya de Yucatán* en *Revista de la Universidad Autónoma de Yucatán*, volumen 24, números 249-250, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yuc.

BEHLING, Sophia y Stefan, (1996) *Sol Power. Die Evolution der solaren Architektur*, München, Prestel.

BÜRO Ö QUADRAT (2009), *Ahorrar dinero con una iluminación mejor - Proyecto Piloto de Iluminación Eficiente en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)*, México, D.F.

BUSCH,J., (1995) *Thermal comfort in Thai air conditioned and naturally ventilated offices* en Nicol, F. et al. (ed.) *Standards for Temper comfort: indoor Air Temperature Standards for the 21th century*. Londres: E&FN

CÂNDIDO, Christhina, *et al.* (2010), *Cooling exposure in hot humid climates: are occupants "addicted"?*, en *Architectural Science Review*, 53: 59-64

CÂNDIDO, Christhina, deDEAR, R., LAMBERTS,R. (2011), *Combined thermal acceptability and air movement assessments in a hot humid climate*, en *Building and Environment*, 46(2011) 379-385

CANTO CETINA, Raúl, (1997) *Arquitectura Bioclimática para Yucatán. Principios generales y asoleamiento*. UADY, Mérida, tesis de Maestría

CANTO CETINA, Raúl, (2009) *Presentación ANES 33*

CÁRDENAS, María José, (2010) *Costos económicos del cambio climático en México*, en *Greenpeace, México ante el cambio climático*, México, D.F.

CÁRDENAS, María José (2009) *México hacia 2020: cambio climático y transición energética*, en *Energía a Debate* año5, #35, nov-dic.2009, México, D.F.

CALIFORNIA CODE OF REGULATION (CCR), s/a, *Adoption of a Regulation for the Management of High Global Warming Potential Refrigerants for Stationary Sources*,

[<http://www.arb.ca.gov/regact/2009/gwprmp09/hgwpruid.pdf>, 02.02.2010].

COMITÉ EUROPÉEN de NORMALISATION (CEN), (2007), *Standard EN15251 Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance Buildings- Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics*, Bruselas

COMISION EUROPEA, *EU Community Action Program for Public Health* disponible en: ec.europa.eu/health/programme/.../index_en.htm

COMFORT,(2011) [<http://www.comfort.uk.com/refrigerants.htm>, 02.02.2011].

CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS, (2011) <http://www.cibse.org/index>.

CHICO PONCE DE LEON, P.A.,(coord.) (1999) *Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán*, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México

CRUZ ROJA, (2004), *World Disasters Report*, disponible en www.cruzroja.org/.../Informe%20Final%20y%20Resumen%20Ejecutivo.doc

DAVID,M. et.al (2011), *Assessment of the thermal and visual efficiency of solar shades*, en *Building and Environment*, 46 (2011) 1489-1496

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (2011), http://www.eia.doe.gov/ask/electricity_faqs.asp#electricity_cooling, visitado 22.01.2011

ESTRADA, Javier, (2009), *Reforma Energética, Estatus en E&P y siguientes pasos*, en Mexican Energy, Palts Conference, C.d.México, 10. Nov.2009

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARISATION (2007), EN15251 2007CEN, *Criteria for the indoor environment including thermal, indoor air quality, light and noise*, Bruselas, European Committee for Standardization: 2007

EVANS, B.H., (1957) *Research Report 59*, Texas Engineering Station/ College Station, Texas

EZCURRA, Exequiel, (2010) *Impactos del cambio climático en los ecosistemas marinos*, en Greenpeace, México ante el cambio climático, México, D.F.

FAJARDO VELASCO, L.F., (2005) *Desempeño costo-beneficio de dos sistemas pasivos de climatización en cubiertas para climas cálidos- subhúmedos; Caso Coquimatlán, Colima*, tesis UdeCol, Colima 2005, disponible en http://digeset.ucol.mx/tesis_posgrado/resumen.php?ID=1566

FANGER, P.O., (1970), *Thermal Comfort*, Danish Technical Press, Copenhagen disponible en: [books.google.com.mx books?isbn8484067777](http://books.google.com.mx/books?isbn8484067777)

FANGER, P.O. and TOFTUM, J. (2002) *Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates*. *Energy and Buildings*, 34, 533-536.

FATHY, HASSAN, (1990) *Natural Energy and Vernacular Architecture*. Principles., Chicago 1990

FERNANDEZ-EGUIARTE A., J. ZAVALA-HIDALGO, R. ROMERO-CENTENO (2011), *Atlas Climático Digital de México (versión 2.0)*, Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM. Servicio Meteorológico Nacional,

CONAGUA <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/>

FORWOOD, B., (1995), What is thermal comfort in naturally ventilated buildings

FRIGERIO, E.O., sin año, *Dos alternativas de enfriamiento pasivo*,

FUENTES FREIXANET, Victor Armando, (2004) *Clima y Arquitectura*, Universidad Autónoma Metropolitana, México, D.F.

GARCÍA, Enriqueta, (1973) *Modificación a la clasificación climática de KÖPPEN....* Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

GARCÍA CHÁVEZ, J. R., y FUENTES FREIXANET, V., (1995) *Viento y arquitectura*, trillas, México, D.F.

GARCÍA GOMEZ, Carmen y PEREZ SANCHEZ, M.M. (2010) La adaptación térmica de los habitantes de la vivienda autoproducida en clima cálido húmedo, *Memorias 34 ANES*

GIVONI, BARUCH, (1998) *Climate consideration in building and urban design*

GÓMEZ AMADO, Adolfo, *et al.*, (2006), *La ventana en la tradición constructiva del trópico subhúmedo*, Revista Palapa, Vol.I, Nr.1, pp 5-15

GÓMEZ- AZPEITIA, G. *et al.*, (2007), *El confort térmico: dos enfoques teóricos enfrentados*, Revista Palapa, Vol II, Nr I, pp.45-57

GONZALO, Guillermo Enrique, (2003) *Manual de arquitectura bioclimática*, Nobuko

GRAIZBORD, Boris, *et al.* (2010) *Migración y cambio climático*, en Greenpeace, México ante el cambio climático, México, D.F.

GAY, C., CONDE, C., SÁNCHEZ, O., (2006) *Escenarios de Cambio Climático para México. Temperatura y Precipitación*. [Documento en línea]. Disponible desde internet en <http://www.atmosfera.unam.mx/cambio/escenarios/escenarios_3A_mapas_y_datos.htm>

GUT, Paul y Ackerknecht, Dieter (1993) *Climate Responsive Building - Appropriate Building Construction in Tropical and Subtropical Regions*; SKAT, St. Gallen, Switzerland

HAO, Xiaoli, *et al.*, (2007) *A combined system of ceiling, displacement ventilation and desiccant dehumidification*, Elsevier, Building and Environment 42 (2007) 3298-3308

HELLMANN, Ulrich, (1990), *Künstliche Kälte -Die Geschichte der Kühlung im Haushalt*, Gießen

HERRERA, J.,(2009) *Sector energético en México*, en Mexican Energy, Palts Conference, C.d.México, 10. Nov.2009

HERRERA, V., (2009), *Perspectiva Económica de México*, en Mexican Energy, Palts Conference, C.d.México, 10. Nov.2009

HEYWANG *et al.* (1992), *Physik für Fachhochschulen und technische Berufe*, Hamburgo, Handwerk und

Technik

HUMBOLDT, Alexander von, (s/a), *Physische Ansicht des Königreiches Neuspanien in "Durch das Land der Azteken"*, Verlag der Nationen Berlin, 3. Auflage 1984, p 70

HUNN, Bruce D., (1996), *Respuestas térmicas dinámicas*, en *Fundamentals of Building Energy Dynamics*. MIT press, Massachusetts

HWANG, Ruey-Lung et al., (2009) *Thermal perceptions, general adaption methods and occupant's ideas about the trade-off between thermal comfort and energy saving in hot-humid climates*, Elsevier, Building and Environment 44 (2009) 1128-1134,

IBARRARÁN, María Eugenia y Melissa Rodríguez Segura, (2007) *Estudio sobre Economía del Cambio Climático en México*, Instituto Nacional de Ecología y Universidad Iberoamericana, México, D.F. <http://www2.ine.gob.mx/descargas/cclimatico/e2007h.pdf>

IPPC (Editor),(2007) *Vierter Sachstandsbericht des IPCC (AR4)*, Bern/Wien/Berlin

IPCC, (2007) *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION (ISO), (1998), Standard ISO7726, *Ergonomics of the Thermal Environment – Instrumentas for Measuring Physical Quanteties*, Ginebra

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION (ISO), (2006) Standard ISO7730, *Ergonomics of the Thermal Environment – Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria*, Ginebra

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION (ISO),(1995) ISO 10551:1995 (E). *Ergonomics of thermal environment - assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgment scales*. Ginebra

JACOBO, G.J.(s/a) *Regulación climática pasiva para la edificación arquitectónica en el NEA*, <http://www.arq.unne.edu.ar/publicaciones/comunicaciones/PONENCIAS%202004/049-Jacobo.pdf>, 25.05.2009

JAUREGUI OSTOS, E. (2009) *sin título* en *Gaceta* 17.08.2009

KNOLL, Michael y R. Keibich,(1992) *Solar City. Sonnenenergie für die lebenswerte Stadt* ,Basel

KOENIGSBERGER, et al., (1977) *Viviendas y edificaciones en zonas cálidas y tropicales*, Paraninfo, Madrid

KOTTEK, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, F. Rubel, (2006) World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, 15, 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130. 12.11.2009

KURI, A. J., (2009), *Curso en climatización de edificios* impartida el 24.11.2009, UNAM, México, D.F.

LANDA, de, Fray Diego, (1966), *Relación de las cosas de Yucatán*, Editorial Porrúa, México, D.F.

- LAUBER, Wolfgang, (2005) *Tropical Architecture*, Prestel, München
- LLAMAS,A et al., (2003) *Situación del Sector Eléctrico en México*, Tecnológico de Monterrey, México
- LORENZO ROMEO, Ernesto, (s/a) *Climatización Pasiva de edificaciones mediante Conductos Enterrados. Potencialidades de aplicación en Venezuela* <http://www.cics.es/PDF/comunicacion6.pdf>, 05.06.2009
- NORMA OFICIAL MEXICANA, (2008), *NOM-021-ENER/SCFI-2008, Eficiencia energética y requisitos de seguridad al usuario en acondicionadores de aire tipo cuarto. Límites, métodos de prueba y etiquetado* <http://200.77.231.100/work/normas/noms/2008/021enerscfi2008.pdf>
- MAYORGA CERVANTES, Juan Raymundo, (2005) *Modelo holístico para analizar el confort térmico del ser humano dentro de los edificios*, Tesis Doctoral, UNAM, México
- McPHERSON, M.J., (1993) *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*, Springer, New York
- MENDELL,M. et al., (2008) *Risk factor heating, ventilating, and air conditioning systems for occupant symptoms in US office buildings: The US EPA BASE*, proceedings of Indoor Air 18(4), 301-316
- MIN KYEONG, Kim, (2008) *Microclimate design methods for energy-saving houses on various site conditions in Korea*, tesis doctoral, TU Berlin 2008
- MONDE DIPLOMATIQUE, Le, (Editor),(2007) *Atlas der Globalisierung, Spezial Klima*, Paris
- MORA, Frenk Julio, (2002) *Primer Diagnostico de Salud Ambiental y Ocupación de la Comisión Federal para la protección contra riesgos sanitarios*
- MORILLÓN, D. (2004). *Atlas del bioclima de México. II*–UNAM, México.
- MORILLÓN, D. (2006) *Edificios bioclimáticos en México: Acciones, programas y proyectos para la vivienda de interés social, Los edificios bioclimáticos en los países de Ibero América*. CYTED e INETI, Portugal.
- MYERS, N., (2005), *Environmantal refugees: An emergent security issue*, Ponencia en el 13th Economic Forum
- OLIVER, Paul (ed.), (1997), *Encyclopedia of vernacular architecture of the world* Cambridge University Press, Cambridge, New York
- OLGYAY, Victor, (1998) *Arquitectura y Clima, Manual de Diseño Bioclimático para Arquitectos y Urbanistas*, Editorial Gustavo Gill, Barcelona, España,
- ORELLANA, Roger, et al., (2009), *Escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán*, Atlas, Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán, Mérida
- PARICIO, Ignacio, (1999, 1° edición 1997), *La protección solar*, edición bisagra, Barcelona
- PÉREZ SANCHEZ, M.M., et al., (2008) *Estudios de confort térmico en Mérida*, Memorias 33 ANES, Guadalajara, México
- PILATOWSKY FIGUEROA, I.,et al. , (2010), *Evaluación experimental de un sistema de enfriamiento*

radiativo nocturna en una zona con clima cálido sub-húmedo, Memorias ANES, 34.SNES, Gto.

PROGRAMA VERACRUZANO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO (PVCC), (2009) , coord.. Adalberto Tejeda Martínez, Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica México, México,D.F.

REYNOSA, X (2010), (Ing. Reynosa en ponencia en la 34 SNES, Gto., 06.10.2010)

RIVERO, Roberto, (1988) *Arquitectura y Clima*, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico, D.F.

ROAF, Sue, et al. (2010) *Twentieth century standards for termal confort: promoting high energy buildings*, en *Architectural Science Review*, 53 (2010), pp.65-77

ROJAS, Jorge, et.al., (2009) *Confort térmico mediante ventilación nocturna en un auditorio bioclimático en clima cálido subhúmedo*, Memorias de la 33ª Semana Nacional de Energía Solar, ANES,

SANTAMOURIS, M., (1997). *Passive cooling of buildings*. James &James, London

SANTAMOURIS, M., Asimakopoulos, D., (1996) *Passive cooling of buildings*, European Commission directorate general XVII for Energy, James and James Publishers, London, 1996,

SCHNEIDER, Klaus Jürgen, (2010), *Bautabellen für Ingenieure*, Werner Verlag

SENER, www.energia.gob.mx/webSener/portal/index.jsp?id=48

SEPPANEN,O. y FISK, W.J., (2002) *Association of ventilation system type with SBS symptoms in office workers*, *Indoor Air* 12, 98-112

SISTEMA NACIONAL METEOROLÓGICO (SNM), (2011) Datos climáticos Normales de Mérida <http://smn.conagua.gob.mx>

SHUKUYA, MASANORI, (2009) *Exergy concepts and it's application to the build environment*, Elsevir, *Building and Enviroment* 44 (2009) 1545-1550

STERN, Sir Nicolaus, (2007), *The economics of climat change*, London

SEMARNAT, (2007), *Estrategia Nacional de Acción Climática. Respuesta de México ante el cambio climático global*,

SZOKOLAY,S.V., (1978) *Energía solar y edificación*, editorial Blume, Barcelona

TEJEDA-MARTÍNEZ, A., G. García-Grijalva. (2008). *Escenarios de consumos eléctricos por climatización. En Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático*. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Cap. 5. Aspectos económicos.

THEVENOT, Roger, (1979) *A History of Refrigeration*, Paris

TSUTSUMI, Hitomi, (2007) *Effect of humidity on human comfort and productivity after step changes from warm and humid enviroment*, Elsevir, *Building and Enviroment* 42 (2007) 4034-4042

TZONIS. A. et al. (ed), (2001), *Tropical Architecture- Critical Regionalism in the Age of Globalization*,

Wiley Academy, West Sussex (Unikel Na 2542.T7T76 CMP1-14205)

URGATE, Jaime, (s/a) *Guía de Arquitectura Bioclimática*, Instituto de Arquitectura Tropical, www.arquitecturatropical.org

UNITED NATIONS UNIVERSITY – Institute of Advanced Science (UNU-IAS), <http://www.ias.unu.edu>

VITRUVIUS POLIÓN, Marco Lucio, (1995) *De Arquitectura*, Editorial Alianza, Madrid

WIJAYA, Made, (2003) *Architecture of Bali*, Thames & Hudson, London

WONG, N.H., (2003) *Thermal comfort in classrooms in the tropics*, Energy and Building 35 (2003) pag. 337-351

WANG, L. y WONG, n.h., (2007) *Applying Natural Ventilatio for Thermal Comfort in Residential Buildings in Singapore*, Architectural Science Review 50.3, pp 224-233, University of Sydney, Sydney

YEANG, Ken, (1999) *Proyectar con la naturaleza*, Gustavo Gil, Barcelona

ZAFH, Zentrum für angewandte Forschung an Fachhochschulen, <http://zafh.net/index.php?id=89> (solare Kühlung)

FUENTES ELECTRÓNICOS:

ASOCIACIÓN NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR (ANES), <http://www.anes.org/anes/>

BizEE, Degree Days Custom Degree Day Data <http://www.degreedays.net/>

ECOAIRCON, <http://ecoaircon.eu>.

ENERGY DESIGN TOOLS, DOE, EE.UU. <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/>

FEDERATION OF EUROPEAN HVAC ASSOCIATIONS, <http://www.rehva.eu/>

HEALTHY HEATING, www.healthyheating.com

HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES (HESS), www.hydrol-earth-syst-sci.net

NETWORK FOR COMFORT AND ENERGY USE IN BUILDINGS (NCEUB), <http://nceub.commoncense.info>

PASSIVE AND LOW ENERGY ASSOCIATION (PLEA), <http://www.arct.cam.ac.uk/PLEA/home.aspx>

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT)(A) <http://www.semarnat.gob.mx/quessemarnat/consultaspublicas/Documents/pecc/consultacomplementaria> 13.11.2009

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT)(B) http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Documents/sniarn/pdf/cambio_climatico_09.pdf 13.11.2009

US DEPARTMENT OF ENERGY: BUILDING ENERGY SOFTWARE TOOLS DIRECTORY
http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/software.cfm/ID=428/pagename_menu=canada/pagename=countries

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/subjects_sub.cfm

WUPPERTALINSTITUT

www.wupperinst.org/publikationen/entnd/index.html?beitrag_id=945&bid=82

POTSDAM INSTITUT FÜR KLIMAFORSCHUNG <http://www.pik-potsdam.de/research>

INSTITUTO DE ARQUITECTURA TROPICAL

<http://www.arquitecturatropical.org/EDITORIAL/documents/EDIFICIOSOSTENIBLESENELTROPIC O.pdf> 06.11.2009

EQ CONNECT, <http://eqtvconnect.ning.com>

TRENDENCIAS, <http://www.trendencias.com>

ONSET (HOBO Data logger) <http://www.onsetcomp.com/>

PACIFIC CLIMATE IMPACT CONSORTIUM – University of Victoria <http://pacificclimate.org/>

WEATHER UNDERGROUND, <http://www.wunderground.com/weatherstation>

ABREVIACIONES

ASHRAE	= American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ANSI	= American National Standard Institute
CFE	= Comisión Federal de Electricidad
CINESTAV	= Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional
COP	= Coefficient of performance
CRE	= Comisión Regulatoria de Electricidad
EE.UU.	= Estados Unidos Americanos
GDC	= Grados día de calefacción
GDR	= Grados día de refrigeración
GEI	= Gases de Efecto Invernadero
HR	= Humedad relative
INE	= Instituto Nacional de Ecología
ISO	= International Standard Organization
IYUCATNM2	= Nombre de una Estación Meteorológica del CINESTAV
LNG	= Liquidified Natural Gas
LyF	= Luz y Fuerza del Centro
MMMM	= nombre de la estación meteorológica del aeropuerto de Mérida
NOM	= Norma Oficial Mexicano
OMM	= Organización Meteorológica Mundial
ONU	= Organización de las Naciones Unidas
PDD	= Percentage of People Dissatisfied
PECC	= Programa Especial de Cambio Climático
PEMEX	= Petróleos Mexicanos
PIB	= Producto Interno Bruto
PICC	= Panel Intergubernamental del Cambio Climático
PMV	= Predicted Mean Vote
SEMARNAT	= Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SMN	= Servicio Meteorológico Nacional
TR	= Tonelada de Refrigeración
UADY	= Universidad Autónoma de Yucatán
U.E.	= Unión Europea
UNAM	= Universidad Nacional Autónoma de México

GLOSARIO

Absorción (α)

Nivel en que un material absorbe una parte o la totalidad de la radiación electromagnética y la convierte en otra forma de energía (calor, electricidad).

Adiabático

Proceso en el cual no hay intercambio de calor con el entorno.

Adsorción

Es la concentración de fluidos o gases en la superficie de un material sólido poroso (a nivel microscópico).

Albedo

Factor de reflexión o grado en que una superficie refleja la luz.

Altitud

Distancia vertical entre un punto situado sobre la superficie terrestre y el nivel medio del mar

Altura

La distancia vertical ente dos puntos situados en diferentes posiciones

Anemómetro

Mide la velocidad del aire, hay varios tipos

Anemocinógrafo

No sólo mide la velocidad del viento sino también grafica los resultados (dirección y velocidad)

Azimut

Ángulo formado entre la proyección horizontal del rayo solar y el meridiano del lugar

BTU (British Thermal Unit)

Calor requerido para elevar la temperatura de una libra (454g) de agua de 39°F a 40°F ($\Delta T=0.56K$)

Calor

Actividad de movimiento molecular. Empieza con 0 Kelvin (punto cero absoluto, $-273.15^{\circ}C$).

Calor latente

Calor necesario para el cambio de fase (sin cambiar la temperatura del material)

Calor sensible

Calor necesario para cambiar la temperatura de un material.

Caloría

La cantidad necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua de $14.5^{\circ}C$ a $15.5^{\circ}C$ bajo la presión atmosférica de 1atm.

Cambio de estado

Cambio de fase de la materia; comúnmente de sólida a líquida a gaseosa o al revés, no obstante hay situaciones en donde puede suceder el cambio directo entre sólida a gaseosa. Cada cambio de estado requiere o libera energía „extra“.

Cambio climático

Variaciones de los valores meteorológicos (temperatura, humedad, precipitación etc.) sobre un largo periodo de tiempo y una amplia región, las que provocan alternaciones en el clima original de esa zona. Si esos cambios ocurren en una región limitada se habla del cambio del microclima, por ejemplo debido a la construcción de una presa.

Cambio climático antropógeno

Cambio del clima por actividades del ser humano. La causa principal es la quema de combustibles, la agricultura (ganados) y cambios en el uso del suelo.

Carta Psicométrica

Diagrama que relaciona los diferentes factores que influyen sobre el comportamiento hídrico del aire.

Clima

Estado medio de los factores meteorológicos de una localidad sobre un largo tiempo. El clima de un lugar es determinado por la latitud, longitud, altitud, orografía y la distancia al mar

Constante Solar (I_{sc})

Cantidad de radiación solar que recibe un metro cuadrado perpendicular al sol fuera de la atmósfera a la distancia media de la Tierra con respecto al sol. Dicha cantidad es igual a $1,367W/m^2$.

Conducción de calor

Es la transferencia de calor a través de materiales sólidos. Siempre del lado más caliente hacia el lado más frío

Convección de calor

Es la transferencia de calor a través de la energía incorporada en partículas en movimiento. Por lo tanto sólo ocurre en fluidos y gases.

Cuerpo negro

Es un cuerpo que absorbe todas las radiaciones que llegan a él. De igual manera es el mayor emisor de energía radiante.

Declinación Solar

Ángulo entre el plano de la eclíptica y el plano ecuatorial de la Tierra

Desfase

El retraso de tiempo en el cual la temperatura máxima exterior se convierte en temperatura máxima interior.

Días Grado de Calefacción

Sistema simple para deducir la necesidad de calefacción en un clima determinado. Es la diferencia entre la temperatura promedio diaria de un lugar y una temperatura base, por lo general $18^{\circ}C$. Se toman en cuenta sólo temperaturas por debajo de la temperatura de referencia.

Días Grado de Enfriamiento

Sistema simple para deducir la necesidad de enfriamiento en un clima determinado. Es la diferencia entre la temperatura promedio diaria de un lugar y una temperatura base, por lo general 15.5 o $18^{\circ}C$. Se toma en cuenta sólo temperaturas por arriba de la temperatura de referencia.

Emisividad (poder emisor)

La emisividad de un cuerpo se determina por la relación entre su irradiancia y la del cuerpo negro a igual temperatura.

Entalpía (h)

Es la energía del aire húmedo por unidad de aire seco, por encima de una temperatura de referencia.

Entropía

Cantidad de energía "base" que no se puede aprovechar para realizar un trabajo.

Evaporación

Cambio de fase de un material líquido a gaseoso. Ese proceso requiere energía sin elevar la temperatura del material. Esa energía se toma del ambiente alrededor del material por lo cual se genera una disminución de la temperatura del ambiente (sin cambio de presión).

Evaporímetro

Instrumento utilizado para medir la evaporación efectiva. Mide la cantidad volumétrica que se evapora bajo las condiciones dadas en un tiempo definido (6h, 12h, 24h)

Gradiente de temperatura

Cambio de temperatura por distancia, normalmente empleado en comparación de diferentes alturas. El gradiente de aire húmedo (pseudoadiabático) es $6.4^{\circ}C/km$ mientras el gradiente de aire seco (adiabático) es más profundizado con $10^{\circ}C/km$.

Higrómetro (Higrógrafo)

Instrumento para medir la humedad del aire. Se aprovecha la extensión y contracción del cabello humano (preferidamente negro y grueso) en la mayoría de esos aparatos.

Humedad absoluta: Es la masa de vapor (en gramos) que contiene un volumen de aire (en metro cúbico). Su unidad es gr/m^3

Humedad específica: Es la masa de vapor (en gramos) que contiene una masa (en kilogramos) de aire. Su unidad es gr/kg

Humedad relativa: Es la relación entre la cantidad de vapor de agua y la saturación del aire. Eso depende de la presión y la temperatura del aire dado. Su unidad es %.

Inercia

En la capacidad de un material de almacenar energía. Depende de la cantidad de energía necesaria para aumentar una unidad de masa de un material por un Kelvin

Insolación

Es A) el porcentaje de las horas de sol directo con respecto a la duración del día

o B) el porcentaje de las horas de sol directo con respecto al número de horas con radiación solar mayor a $120W/m^2$

Inversión Térmica

A l contrario de lo normal, la temperatura atmosférica aumenta con la altura lo que provoca estabilidad atmosférica en la zona afectada.

Irradiancia (H_r)

Es la cantidad de energía emitida de radiación por área, normalmente metro cuadrado

Isla Urbana de Calor

Diferencia entre las pautas (micro-) climáticas en una urbe y el clima típico de las zonas colindantes. Por lo general la temperatura en la zona urbana es más alta que en las zonas colindantes.

Isobárico, proceso

Cambio de fase en procesos termodinámicos sin cambio de presión

Isocórico, proceso

Cambio de fase en procesos termodinámicos sin cambio de volumen

Isotérmico, proceso

Cambio de fase en procesos termodinámicos sin cambio de temperatura

Kelvin

Unidad para mediciones de Temperatura. Se basa en el punto cero absoluto. Diferencias entre temperatura medidas en grados centígrados ($^{\circ}C$) se presenta científicamente en Kelvin (K). 1K equivale a $1^{\circ}C$.

Latitud

El ángulo que forma la vertical del lugar con el plano del ecuador. La escala es de hasta $+90^{\circ}$ (polo del norte) en el hemisferio norte y de hasta -90° (polo del sur) en el hemisferio sur.

Longitud

Es el ángulo entre el meridiano (una línea ficcional) entre un punto dado y un punto de referencia (Observatorio de Greenwich cerca de Londres). Se cuenta de 0° a 180° hacia el oriente (oriental) y occidente (occidental). Cada división meridiana de 10° equivale a 1,113.20km (en el ecuador).

Nivel del Mar

Definido como el nivel del mar promediado sobre un largo tiempo en un lugar de referencia. **Normales climatológicas**

Valores meteorológicos (temperatura, humedad, precipitación, evaporación, viento etc.) calculados a base de valores medidos en (generalmente) estaciones meteorológicas sobre un periodo extendido, generalmente 30años

Nubosidad

La nubosidad es la fracción de cielo cubierto con nubes en un lugar en particular.

Oscilación

La diferencia entre la temperatura mínima y máxima promedio (diaria, mensual, anual)

Ombrotérmico (Gráfica o Diagrama)

Muestra la eficiencia de la precipitación en un sitio en relación con la temperatura.

Presión atmosférica

La presión que ejerce la masa del aire de la atmósfera en un punto específico. La presión atmosférica disminuye con la altura del lugar. Al nivel del mar la presión atmosférica es establecida con 101,325kPa o igual a una columna de cerca de 10 metros de agua.

Presión de vapor

Es la presión parcial que ejercen las moléculas de vapor de agua en el aire. La presión es cero en el aire seco y alcanza su máximo valor con una humedad relativa de 100%

Radiación, Enfriamiento por

Aprovechamiento de la radiación para bajar un material en temperatura por debajo de la temperatura circundante. Requiere de un vínculo óptico (que no haya nubes) con un objeto (cielo) más frío que el cuerpo (casa)

Radiación solar

Onda electromagnética que proviene del sol. Longitud de onda: cerca de 150nm hasta 4000nm

Rocío (punto de)

Es el punto en el cual la humedad relativa del aire llega a 100% y hay condensación del agua anteriormente contenida en el aire. La humedad relativa y la temperatura (y la presión) delimitan ese punto.

Saturación

Condición del aire que se presenta cuando la humedad relativa llega a 100%. Si las condiciones físicas establecen un equilibrio a ese punto todavía no ocurre la condensación.

Temperatura ambiente

Temperatura del aire registrada en el instante de la lectura

Temperatura Bulbo Seco (T)

Temperatura medida en una situación y con el nivel de humedad relativa dada. Es la forma más común de medir la temperatura.

Temperatura Bulbo Húmedo (T*)

Temperatura que incluye la capacidad de enfriamientos por evaporación. Se mide por un termómetro (el psicrómetro) cuya base está envuelta en una gasa mojada. En un clima seco la diferencia entre TBS y TBH es lo más grande mientras en un ambiente tropical la diferencia es menor. En un ambiente con 100% HR la diferencia entre TBS y TBH es cero.

Temperatura Radiante Medio:

La temperatura promediada de todos los objetos que intercambian calor por medio de radiación con un cuerpo, casi igual a la temperatura del globo.

Temperatura efectiva corregida (TEC)

Es la temperatura percibida ante la presencia de la temperatura del globo, temperatura de bulbo húmedo y la velocidad del viento, temperatura radiante.

Temperatura efectiva, (ET*)

Es una temperatura que incluye la temperatura del ambiente, la temperatura radiante y la humedad relativa. Es la temperatura de un ambiente con 50% HR en el que una persona experimenta la misma cantidad de pérdidas de calor que en el ambiente actual

Temperatura del Globo

Es la temperatura estabilizada que marcaría un termómetro introducido en una esfera de cobre hueca de 150 mm de diámetro pintada exteriormente de negro, midiendo la temperatura radiante media del entorno.

Temperatura media diaria: es la resultante promedio de las mediciones horarias de un día

Temperatura media mensual: es la resultante promedio de las temperaturas medias diarias durante un mes

Temperatura mínima mensual: es el promedio de todas las temperaturas mínimas diarias registradas durante un mes

Temperatura máxima mensual: es el promedio de todas las temperaturas máximas diarias registradas durante un mes

Temperatura mínima extrema: temperatura (puntual) más baja registrada durante todo el periodo de mediciones

Temperatura máxima extrema: temperatura (puntual) más alta registrada durante todo el periodo de mediciones

Temperatura radiante media (de globo)

Temperatura uniforme de un local negro imaginario que produzca en la misma pérdida de calor por radiación en las personas como el local real

Temperatura Sol-Aire

Temperatura que toma en cuenta la temperatura ambiente, la radiación solar total (difusa y directa), y la velocidad de viento.

Tiraje (efecto de)

Mientras más caliente un fluido o gas, más ligero es, así estratificando el fluido o gas por su temperatura.

Transmisión (de calor)

El paso de calor desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura.

Velocidad del viento

Rapidez con la cual se traslada una cantidad de aire de un lugar hacia otro. Escala usada en México de 0 (<0.6m/s) hasta 6 (>29m/s).

Viento

Movimiento del aire relativo a la superficie de la tierra, tiene su origen en la actividad solar sobre el planeta que genera un calentamiento no uniforme de la tierra y subsecuentemente una diferencia en la presión.

Virga

Precipitación que se evapora antes de llegar al nivel de la superficie.

Wind Chill Index

El índice de viento frío indica el flujo de calor por radiación y convección, de un cilindro térmico parcialmente lleno de agua con una temperatura superficial de 33°C, debido a cierta temperatura ambiente y velocidad de viento.

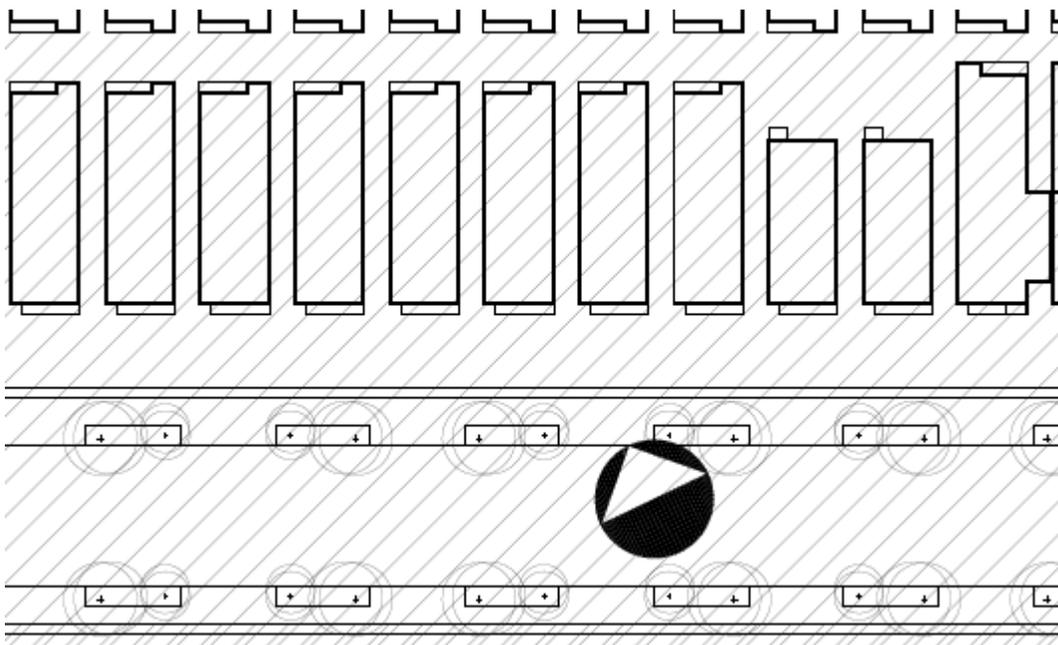
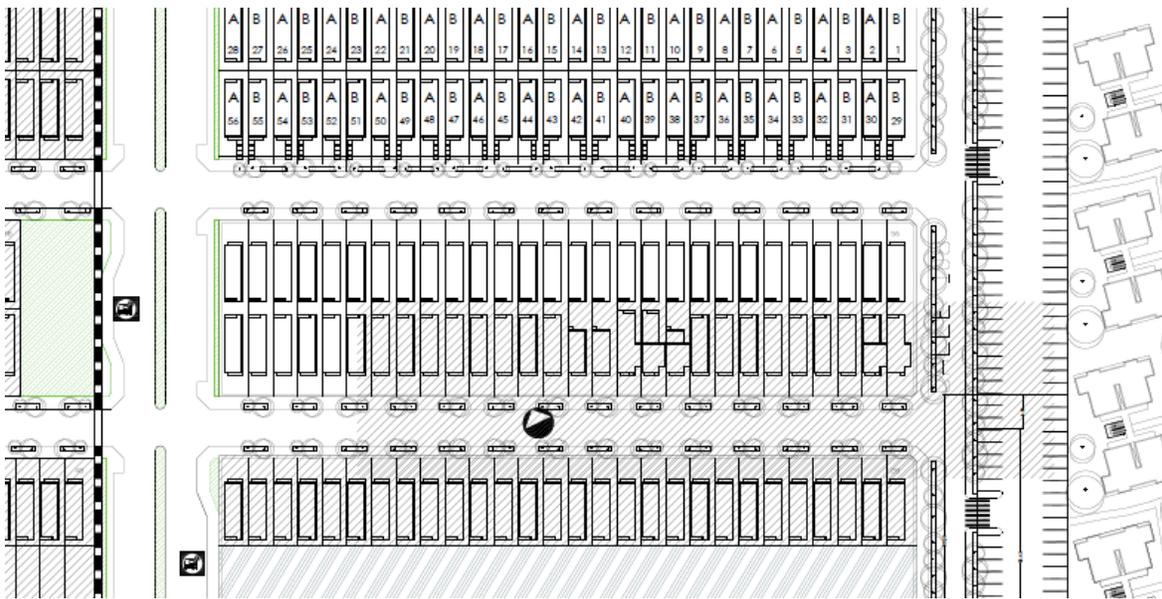
Zona de confort

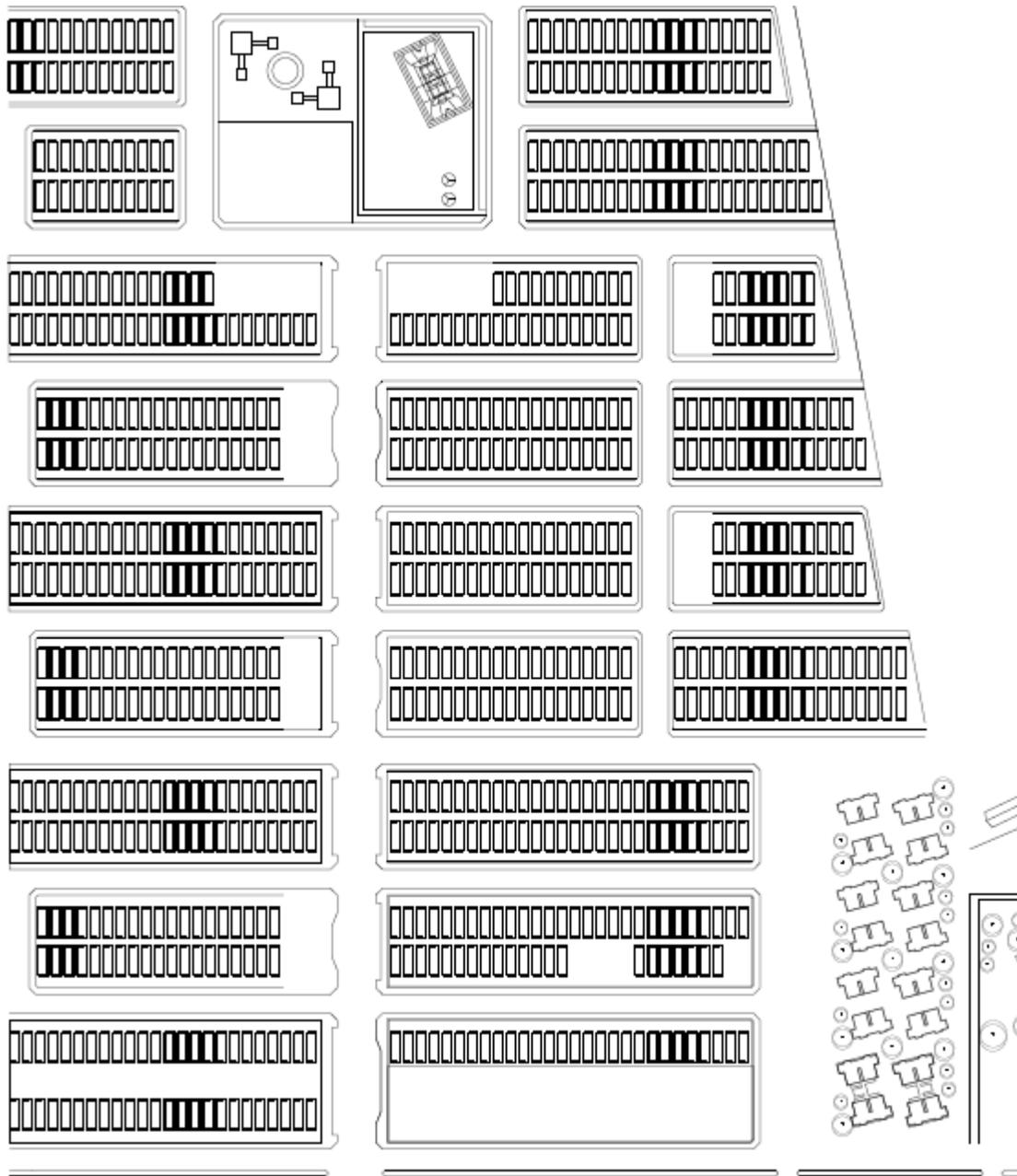
Estado de la mente que señala comodidad del cuerpo en una situación climática determinada.

ANEXO

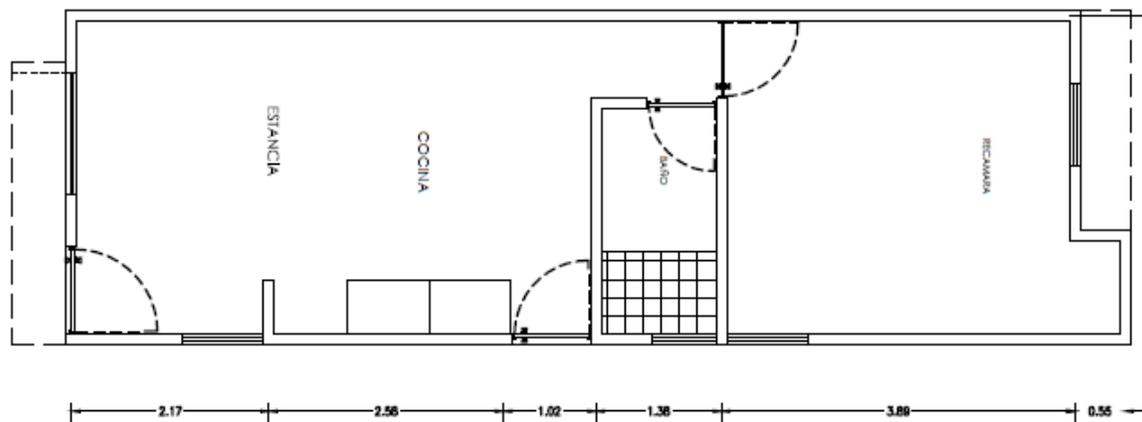
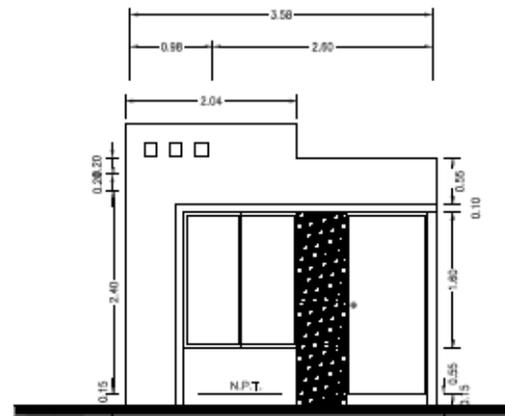
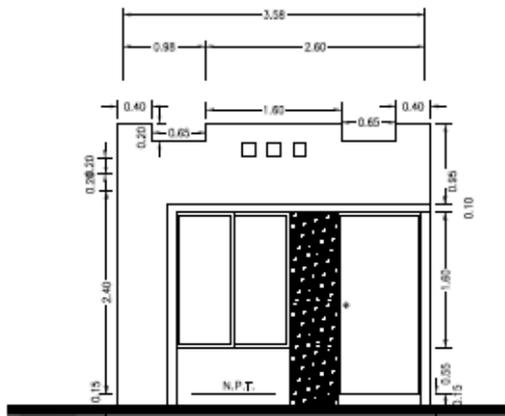
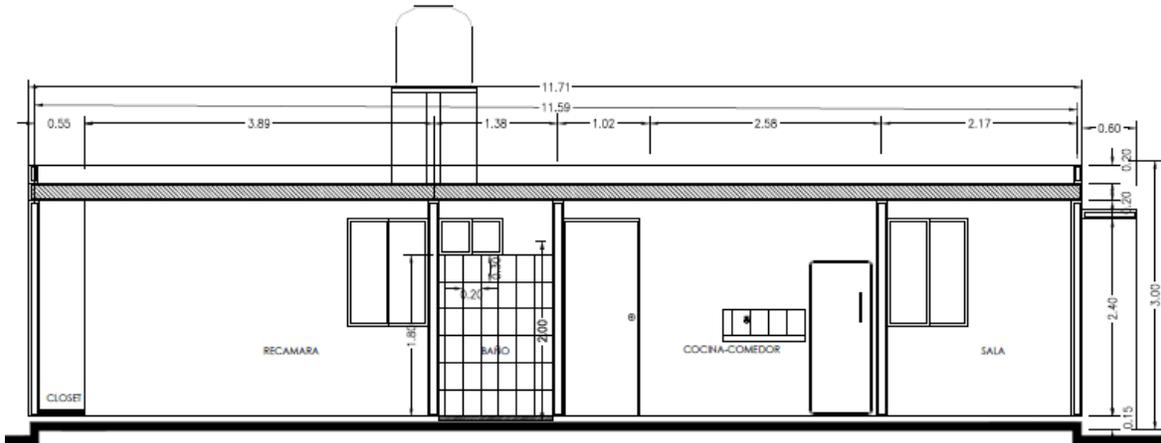
- I. Planes Arquitectónicos del Fraccionamiento
- II. Planes Arquitectónicos de las casas
- III. Plan del Experimento (Casas)
- IV. Plan del Experimento (Maquetas)
- V. Gráfica de los Normales Climatológicas de Yucatán 1969-1990
- VI. Humedad Relativa de la República Mexicana Junio 2010
- VII. Datos de la Estación Meteorológica del CINESTAV Junio 2010
- VIII. Datos de la Estación Meteorológica del Aeropuerto de Mérida, Junio 2010
- IX. Diagrama Estereográfica (Mérida)
- X. Carta Psicométrica
- XI. Escenarios de Cambio Climático del IPCC
- XII. Símbolos Climáticos en la Península de Yucatán
- XIII. Niveles de Metabolismo según Actividad
- XIV. Valores de Vestimento (“Clo”)
- XV. Unidades Físicas
- XVI. International Standards (“ISO”)
- XVII. Comparación de Métodos Tradicionales y Modernos del Diseño Pasivo
- XVIII. Albedo de Diferentes Coberturas de Terreno y Materiales

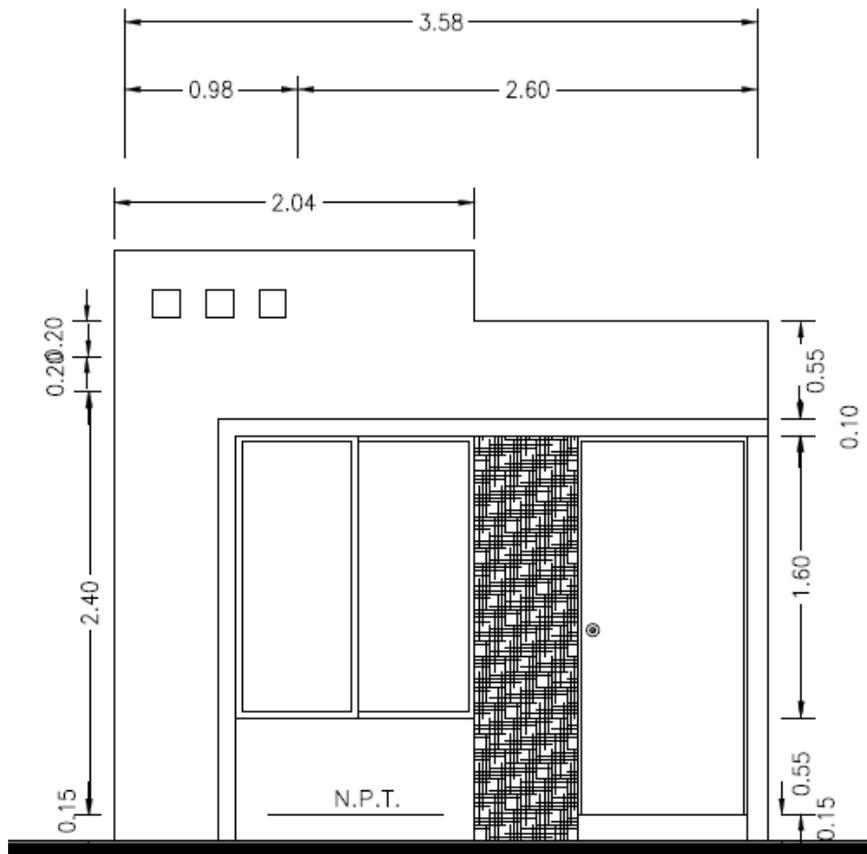
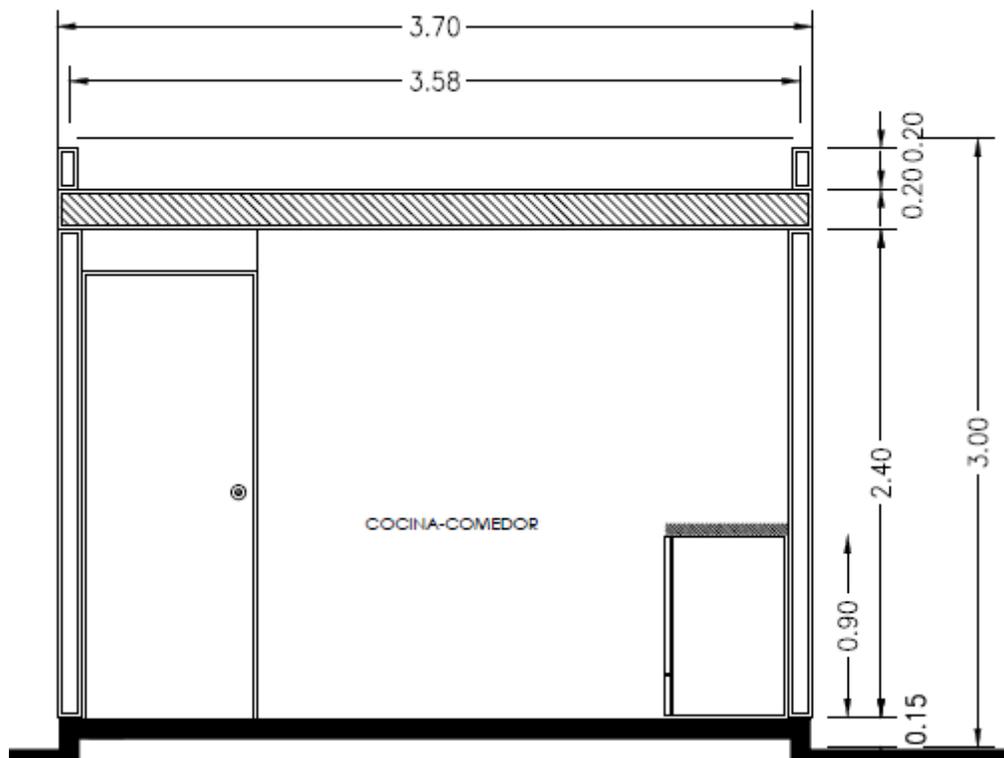
I. Planes Arquitectónicos del Fraccionamiento





II. Planes Arquitectónicos de las Casas



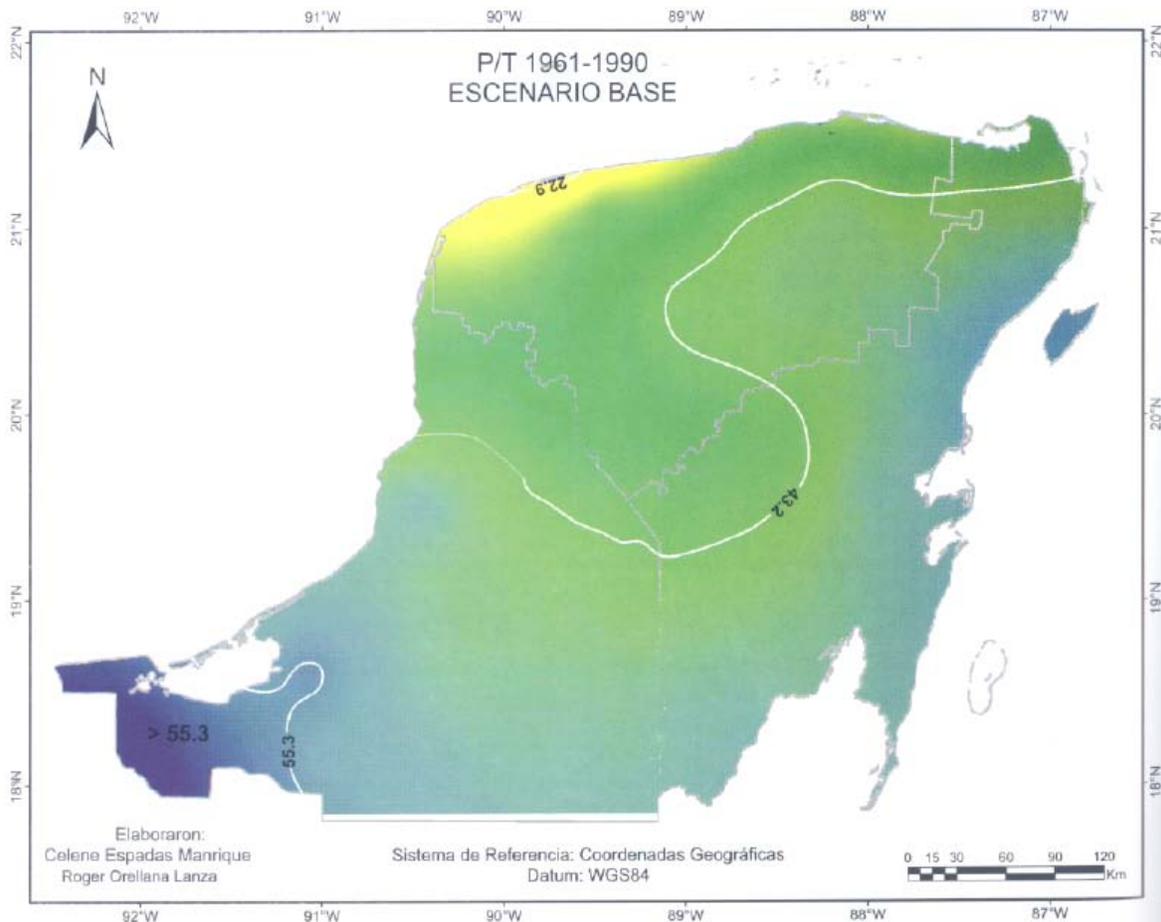


III. Plan del Experimento (casas)

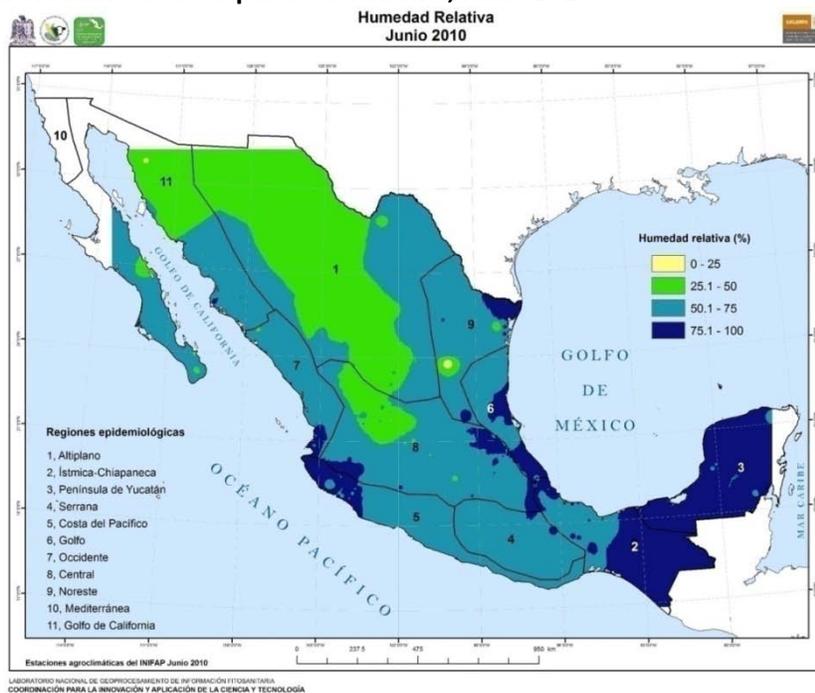
Fecha	HOBO	1	2	3	4	5	731	6	7	562
05.06	10:00 calibración casas	casa1	casa2	casa3	casa4	casa5	techo	casa 6	exterior	casa 7
06.06										
07.06	10:00 fin calibración casas									
07.06	11:45 reubicación de los Hobos	casa1, hojas de palma, desde 18:00 segunda capa	casa2	casa4	casa5	casa6	dentro de casa1			
07.06	9:45 y 12:00 imagen termográfica, techos, asfalto, cemento (banqueta), grava frente casa, muro entre puerta y ventana (fachada)									
08.06										
09.06										
10.06										
11.06	se cambia Hobo #5 al exterior, quite casa 6		19:00 rojo	19:00 lona/1	referencia	20:00 temp. exterior				
12.06										
13.06										
14.06				10:30 lona/2						
15.06										
16.06										
17.06	21:10-22.10 ventilación temporal	vent	vent	vent	vent					
18.06	5:30 – 7:20 ventilación temporal	vent	vent	vent	vent					
18.06	desde19:45 ventilación	vent	vent	vent	vent					
19.06	hasta 7:00	vent	vent	vent	vent					
20.06										
21.06	fin de mediciones	12:30	12:30	12:30	12:30	13:45	12:30			

IV. Plan del experimento (maquetas)

Fecha	HOBO	6	7	562
31.05	calibración de maquetas	M3	M2 ventana	M2 ventana
02.06	20:00 techos pintados con resistol y cemento blanco			
03.06				
04.06				
05.05	M1: sin cambio M2: blanco, imper. M3: rojo imper.			
07.06	14:00 reubicación de los Hobos	M1	M2	M3
08.06	instal. Alero	cemento/resistol	7:50 aislante térmico, 2.5cm	8:50 tanque de agua, ca. 9cm
09.06				
10.06		6:00 aluminio arriba del aislante		
11.06			21: 00 quitar aislante(blanco)	21:00 quitar tanque (rojo)
12.06			blanco	rojo
13.06			blanco	rojo
14.06			blanco	rojo
15.06		7:00, quitar alu, pintar blanco, apl. lona	blanco	rojo
16.06		lona	blanco	rojo
17.06		lona	blanco	rojo
18.06		lona	blanco	rojo
18.06		lona	blanco	rojo
19.06		lona	blanco	rojo
20.06		lona	blanco	rojo
21.06		lona	blanco	rojo



VI. Humedad Relativa de la República Mexicana, Junio 2010

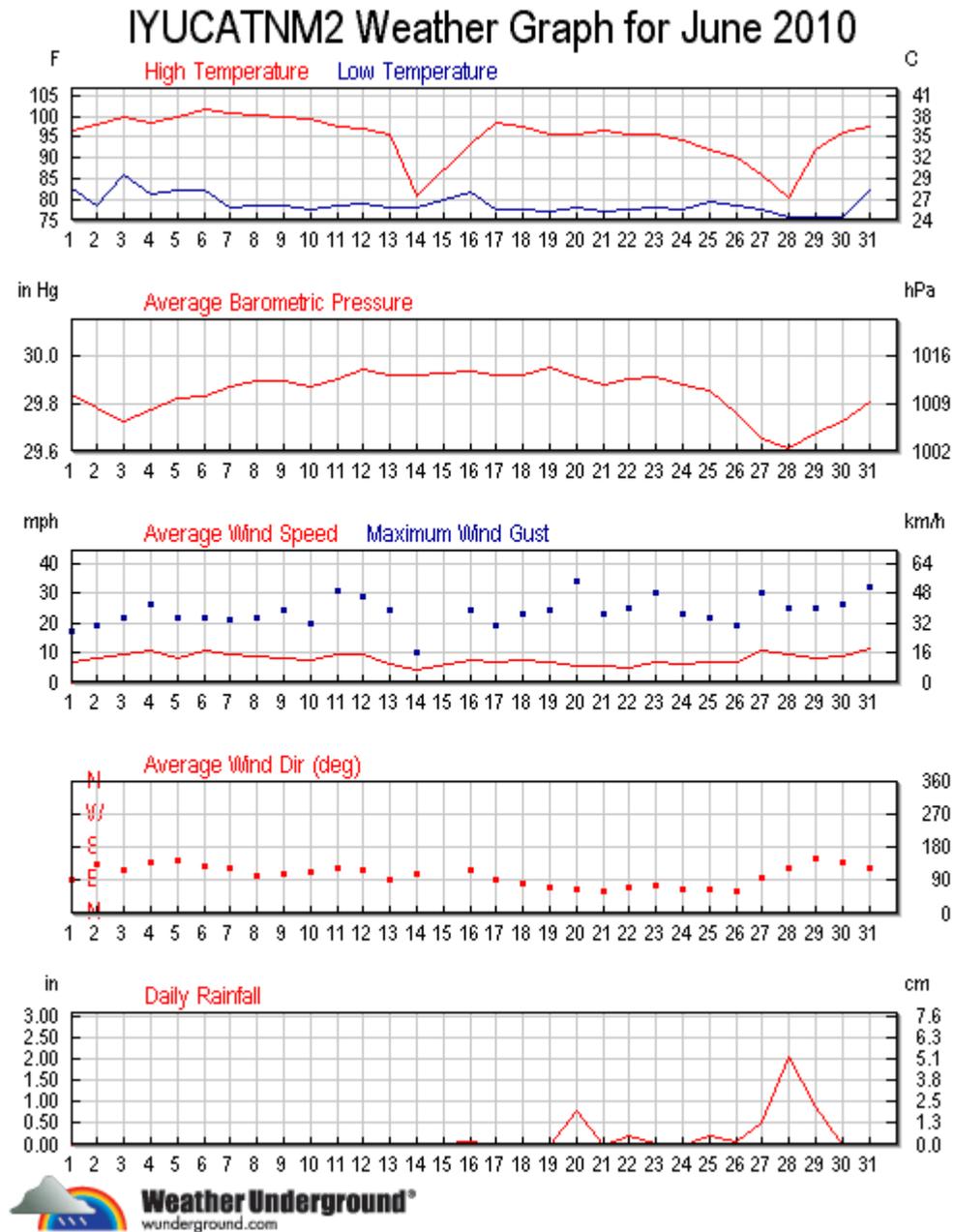


Fuente: portal.sinavef.gob.mx/Imagenes/anomprec_1104_.jpg

VII. Datos de la Estación Meteorológico del CINESTAV, Junio 2010

Datos Junio 2010, Estación Cinestav, fuente:

<http://www.wunderground.com/weatherstation/WXDailyHistory.asp?ID=IYUCATNM2&graphspan=month&month=6&day=1&year=2010>

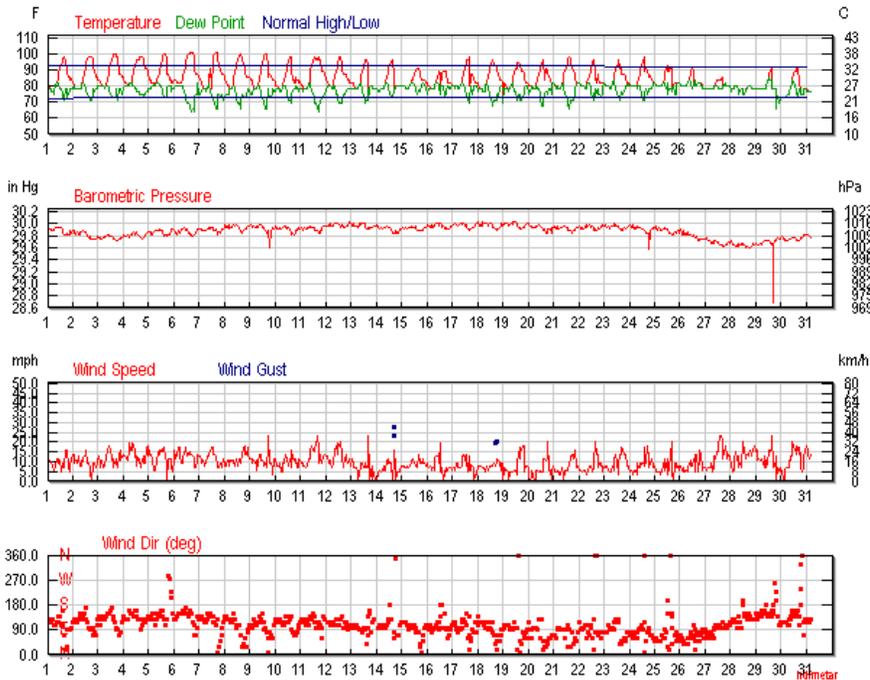


VIII. Datos Meteorológicos de la Estación Aeropuerto Mérida (MMMD), Junio 2010

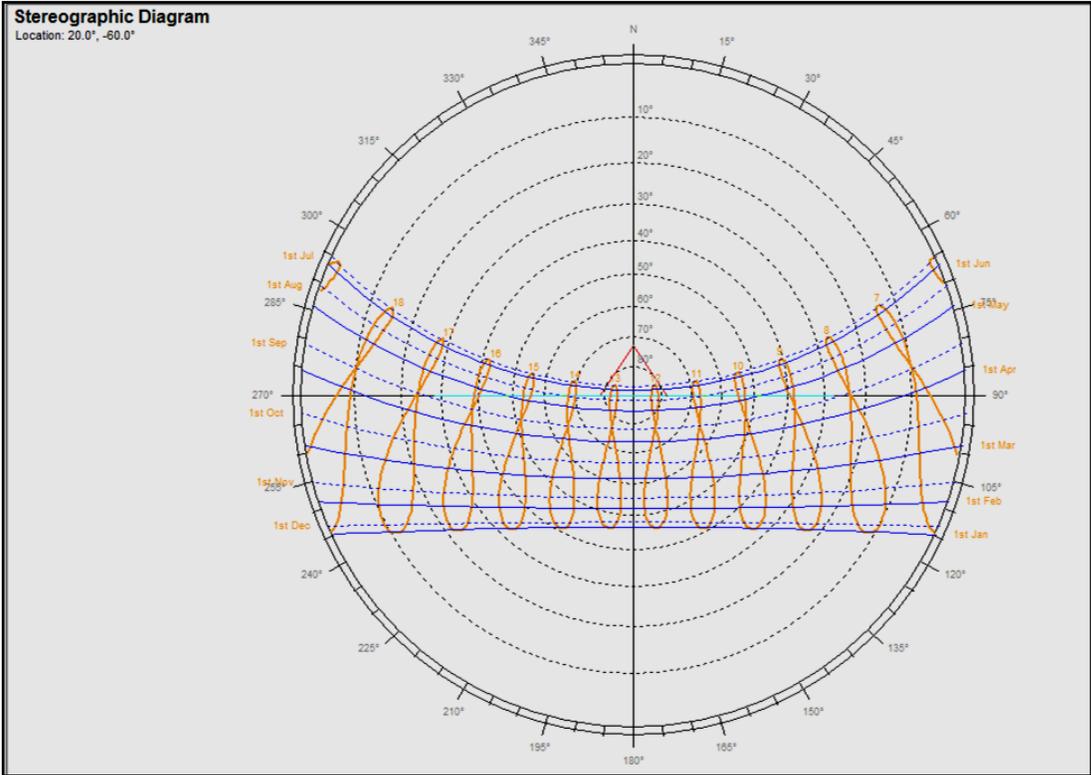
2010	Temp. (°C)			Humedad (%)			Wind (km/h)			Precip. (cm)
Jun	high	avg	low	high	avg	low	high	avg	high	sum
1	37	30	24	100	80	42	26	14	-	0.00
2	37	31	26	100	79	42	26	16	-	0.00
3	38	32	26	100	73	42	29	18	32	0.00
4	37	32	27	100	72	47	32	21	-	0.00
5	38	32	27	100	79	42	27	18	-	0.00
6	39	33	28	94	65	29	27	23	-	0.00
7	39	32	25	100	72	31	27	18	-	0.00
8	38	32	26	100	69	33	29	16	-	0.00
9	38	32	26	100	71	33	37	18	-	0.00
10	37	31	25	100	79	39	26	16	37	0.00
11	37	31	26	100	69	32	37	18	-	0.00
12	37	31	26	100	76	39	34	19	-	0.00
13	36	30	24	100	87	41	37	11	42	0.00
14	36	30	25	100	88	47	26	8	45	3.43
15	33	29	26	100	88	59	23	13	-	0.00
16	32	29	26	100	88	59	32	13	-	12.83
17	37	31	26	100	82	39	23	13	64	0.00
18	36	30	25	100	77	39	19	13	34	0.00
19	35	28	22	100	79	47	29	10	37	0.00
20	36	31	26	100	78	39	34	8	37	0.00
21	37	31	26	100	78	35	26	10	37	0.00
22	36	31	26	100	82	44	34	11	-	0.00
23	36	31	26	100	83	47	27	14	-	0.00
24	37	31	26	100	81	42	29	11	47	0.00
25	34	30	26	100	88	56	34	11	-	0.00
26	33	29	26	100	96	66	26	13	39	0.00
27	30	28	26	100	96	79	37	16	37	71.20
28	27	26	24	100	100	94	34	18	-	227.81
29	33	26	19	100	98	75	37	18	-	48.74
30	33	28	23	100	93	55	34	14	-	3.94

http://www.wunderground.com/history/airport/MMMD/2010/6/1/MonthlyHistory.html?req_city=NA&req_state=NA&req_statename=NA

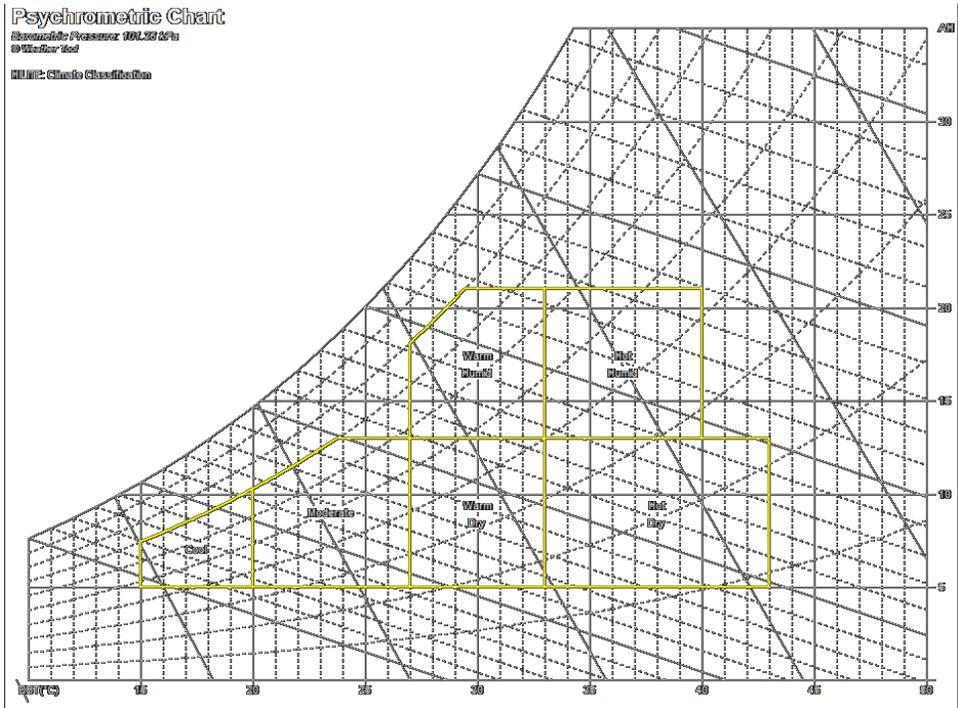
	Max	Avg	Min	Sum
Temperature				
Temperatura máxima	39 ° C	36 ° C	27 ° C	
Temperatura media	33 ° C	30 ° C	26 ° C	
Temperatura mínima	28 ° C	25 ° C	19 ° C	
Degree Days				
Grados día de calefacción (base 65)	0	0	0	0
Cooling Degree Days (base 65)	27	21	12	640
Growing Degree Days (base 50)	42	36	28	1090
Punto de rocío				
Punto de rocío	30 ° C	26 ° C	18 ° C	
Precipitación				
Precipitación	48.7 cm	2.5 cm	0.0 cm	68.94 cm
Snowdepth	-	-	-	-
Viento				
Viento	37 km/h	15 km/h	0 km/h	
Gust Viento	64 km/h	40 km/h	32 km/h	
Presión al nivel del mar				
Presión al nivel del mar	1017 hPa	1012 hPa		



IX. Diagrama Estereográfica (Mérida)



X. Carta Psicrometrica



XI. Escenarios de cambio climático del IPCC

1. La familia de líneas evolutivas y escenarios A1 describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados de siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidades e interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante.

2. La familia de líneas evolutivas y escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las entidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

3. La familia de líneas evolutivas y escenarios B1 describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados de siglo y desciende posteriormente, pero con rápidos cambios en las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y la introducción de tecnologías limpias, con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y ambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

4. La familia de líneas evolutivas y escenarios B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Es un mundo cuya población aumenta a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios y con un cambio tecnológico más lento y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.

Fuente: IPCC, 2007

XII. SÍMBOLOS CLIMÁTICOS EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

(tomado de "Atlas de Procesos..." p.166)

- A Grupo de climas cálido-húmedos; temperatura media del mes más frío mayor de 18°C
- B Grupo de climas secos; los límites entre los secos y los húmedos se establecen por medio de fórmulas que relacionan la precipitación anual con la temperatura y con el régimen de lluvias

SÍMBOLOS DE TIPOS Y SUBTIPOS CLIMÁTICOS DEL GRUPO A

Af Cálido-húmedo con lluvias todo el año, precipitación del mes más seco mayor de 60mm, por ciento de lluvia invernal con respecto a la anual menor de 18

Af(m) Cálido-húmedo con lluvias todo el año, precipitación de mes más seco mayor de 60mm, por ciento de lluvia invernal con respecto a la anual menor de 18

Am(f) Cálido-húmedo con lluvias en verano, precipitación de mes más seco menor de 60mm, por ciento de lluvia invernal mayor de 10.2

Am Cálido-húmedo con lluvias en verano, precipitación de mes más seco menor de 60mm, por ciento de lluvia invernal entre 5 y 10.2 de la anual

Am(w) Cálido-húmedo con lluvias en verano, por ciento de lluvia invernal menor de 5 de la anual

Aw Cálido-subhúmedo con lluvias en verano (por lo menos 10 veces mayor cantidad de lluvia en el mes más húmedo de la mitad caliente del año que en el mes más seco), precipitación del mes más seco menor de 60mm, por ciento de lluvia invernal entre 5 y 10.2 de la anual; de acuerdo con su grado de humedad se divide en tres subtipos:

Aw0 El más seco de los cálidos subhúmedos con un cociente P/T menor de 43.2

Aw1 Intermedio en cuanto al grado de humedad entre Aw0 y Aw2, con lluvias en verano, cociente P/T entre 43.2 y 55.3

Aw2 El más húmedo de los cálidos subhúmedos con lluvias en verano, con un cociente P/T mayor de 55.3

(x') a continuación de la w indica un porcentaje de lluvia invernal con respecto a la anual mayor de 10.2: Aw0(x'), Aw1(x'), Aw2(x')

(x') antes de la w indica que el sitio tiene un régimen de lluvias intermedio, en el que no se cumple el requisito de 10 veces mayor cantidad de lluvia en el mes más húmedo que el mes más seco

(w) a continuación de la primera w indica un porcentaje de lluvia invernal menor de 5 de la anual; Aw0(w), Aw1(w), Aw2(w)

w'' indicada en cualquier posición de los símbolos indica presencia de sequía intraestival, sequía de medio verano o canícula

XIII. Niveles de metabolismo según actividad

Nota: 1 Met = 58.2 W/ m²

Niveles Metabólicos (M) de las siguientes Actividades:	W/m ²	Met
Acostado	46	0.8
Sentado relajado	58	1.0
Trabajo de relojero	65	1.1
De pié, relajado	70	1.2
Actividad sedentaria: oficina, vivienda, escuela.	70	1.2
Conduciendo un automóvil	80	1.4
Profesión gráfica, encuadernador	85	1.5
De pié, actividad ligera: comprando, industria ligera.	93	1.6
Profesor	95	1.6
Trabajo doméstico: afeitarse, lavarse, vestirse.	100	1.7
Caminando horizontal 2 Km/h	110	1.9
De pié, actividad media: vendedor, trabajo domestico.	116	2.0
Construcción, colocando bloques de 15 Kg	125	2.2
De pié, lavando platos	145	2,5
Trabajo doméstico: rastrillando hojas sobre el cespced.	170	2.9
Trabajo doméstico: lavando a mano y planchando. (120-220 W/m2)	170	2.9
Construcción: hormigonando con un vibrador neumático	175	3.0
Construcción: encofrando.	180	3.1
Caminando en horizontal 5 Km/h	200	3.4
Forestal: cortando monte con una sierra mecánica	205	3.5
Agricultura: arando con un tiro de animales	235	4.0
Construcción: cargando una carretilla con piedras	275	4.7
Deporte: patinando sobre hielo 18 Km/h	360	6.2
Agricultura: cavando con una pala (24 golpes/minuto)	380	6.5
Deporte: esquiando en horizontal 9 Km/h	405	7.0
Forestal: trabajando con un hacha de 2 Kg (33 golpes/minuto)	500	8.6
Deporte: corriendo a 15 Km/h	550	9.5

Fuente: http://editorial.cda.ulpgc.es/ambiente/2_clima/7_comodo/index.htm

XIV. Valores de Vestimenta (en “Clo”)

Nota: 1 Clo = 0.155 m²°C/W

Prendas de vestir	Iclu	Clo	m ² °C/W
Ropa interior inferior	Medias	0.02	0.003
	Panty	0.03	0.005
	Bragas y calzoncillos	0.04	0.006
	Calzoncillo 1/2 pierna de lana	0.06	0.009
	Calzoncillo pierna entera	0.10	0.016
Ropa interior superior	Sujetador	0.01	0.002
	Camiseta sin mangas	0.06	0.009
	Camiseta manga corta	0.09	0.014
	Camiseta manga larga	0.12	0.019
	Camiseta térmica nylon	0.14	0.022
Camisas	Top de tubo	0.06	0.009
	Camisa manga corta	0.09	0.029
	Blusa ligera, manga larga	0.15	0.023
	Camisa ligera, manga larga	0.20	0.031
	Camisa normal, manga larga	0.25	0.039
	Camisa franela, manga larga	0.30	0.047
	Blusa larga de cuello de cisne	0.34	0.053
Pantalones	Pantalones cortos	0.06	0.009
	Pantalones cortos de excursión	0.11	0.017
	Pantalones ligeros	0.20	0.031
	Pantalones normales	0.25	0.039
	Pantalones de franela	0.28	0.043
	Pantalones de chándal	0.28	0.043
Mono	De diario, con cinturón	0.49	0.076
	De trabajo	0.50	0.078
De alto aislamiento	Multicomponente, relleno	1.03	0.160
	Con forro de peluche	1.13	0.175
Suéter	Chaleco	0.12	0.019
	Suéter fino	0.2	0.031
	Suéter fino cuello de cisne	0.26	0.040
	Suéter normal	0.28	0.043
	Suéter grueso	0.35	0.054

	Suéter grueso cuello de cisne	0.37	0.057	
Chaqueta	De vestido	0.13	0.020	
	Chaqueta ligera de verano	0.25	0.039	
	Chaqueta	0.35	0.054	
	Anorak	0.30	0.047	
Abrigos	Abrigo	0.60	0.093	
	Gabardina	0.55	0.085	
	Parka	0.70	0.109	
	Sobreabrigo multicomponente	0.52	0.081	
calzado	Calcetines	0.02	0.003	
	Calcetines gruesos tobillos	0.05	0.008	
	Calcetines gruesos largos	0.10	0.016	
	Zapatilla, rellena de peluche	0.03	0.005	
	Zapato suela fina	0.02	0.003	
	Zapato suela gruesa	0.04	0.006	
	Botas	0.10	0.016	
	Guantes	0.05	0.008	
	Falda, vestido	Falda ligera, 15 cm sobre rodilla	0.10	0.016
		Falda ligera, 15 cm bajo rodilla	0.18	0.028
Falda gruesa hasta la rodilla		0.25	0.039	
Vestido ligero sin mangas		0.25	0.039	
Vestido de invierno manga larga		0.40	0.062	
Ropa de cama	Camisón largo de manga larga	0.30	0.047	
	Camisón corto de tirantes	0.15	0.023	
	Camisón de hospital	0.31	0.048	
	Pijama de mangas y pantalones largos	0.50	0.078	
	Body de dormir con pies	0.72	0.112	
	Pantalón corto	0.10	0.016	
Batas	Bata larga acolchada de manga larga	0.53	0.082	
	Bata corta acolchada de manga larga	0.41	0.064	
Asientos	Madera o metal	0.00	0.000	
	tapizado, acolchado, con cojín	0.10	0.016	
	Sillón	0.20	0.032	

Fuente: http://editorial.cda.ulpgc.es/ambiente/2_clima/7_comodo/index.htm

XV. Unidades Físicas

a	Ancho de una superficie rectangular	[m]
A_{Du}	Area DuBois. Superficie de un cuerpo humano desnudo, calculado con la fórmula de DuBois.	[m ²]
A_i	Area de una superficie plana.	[m ²]
A_r	Área efectiva radiante de un cuerpo. Superficie que intercambia energía radiante con el entorno, con un ángulo sólido de 4π stereradianes. Es inferior a la superficie real de un cuerpo debido a que la piel no es una superficie convexa.	[m ²]
b	Largo de una superficie rectangular	[m]
c	Distancia entre dos superficies.	[m]
C_{res}	Intercambio de calor de convección por respiración	[W/m ²]
D	Diámetro del sensor de temperatura de globo	[m]
DR	Porcentaje de personas incómoda por corrientes de aire (Draught Rate).	[%]
E	Intercambio de calor por evaporación en la piel.	[W/m ²]
E_c	Intercambio de calor por evaporación en la piel cómodo, cuando la persona tiene una sensación térmica neutra.	[W/m ²]
E_{res}	Intercambio de calor por evaporación por respiración	[W/m ²]
E_{sw}	Intercambio de calor por evaporación en la piel.	[W/m ²]
ET*	Temperatura Efectiva (* = nueva definición)	[°C]
f_{cl}	Coefficiente de área vestida. Razón entre el área vestida y el área total de un cuerpo desnudo.	
F_{p-i}	Coefficiente angular entre la persona y la superficie i. Se define como la fracción de la energía radiante difusa que abandona el cuerpo e incide directamente sobre la superficie i.	
F_{pl-i}	Coefficiente angular entre un pequeño plano y la superficie i. Se define como la fracción de la energía radiante difusa que abandona el pequeño plano e incide directamente sobre la superficie i.	
h_c	Coefficiente de transferencia de calor por convección.	[W/m ² /°C]
$h_{c,eq}$	Coefficiente de transferencia de calor por convección con el aire en reposo.	[W/m ² /°C]
h_{cg}	Coefficiente de transferencia de calor por convección para un globo (elipsoide).	[W/m ² /°C]
h_r	Coefficiente de transferencia de calor por radiación	[W/m ² /°C]
H	Perdido de Calor Seco. Calor perdido por un cuerpo por convección, radiación y conducción.	[W/m ²]
I_{cl}	Aislamiento de la Ropa. Es el valor promedio que incluye las partes desnudas del cuerpo.	[m ² °C/W]
I_{clu}	Aislamiento de prenda de vestir. Expresado como incremento de aislamiento debido a una prenda de vestir.	[m ² °C/W]
K_{cl}	Flujo de calor por conducción a través de la ropa.	[W/m ²]

M	Nivel Metabólico. Cantidad de energía química transformada en calor y trabajo mecánico por actividades aeróbicas y anaerobias en el cuerpo.	[W/m ²]
p _a	Humedad. Presión parcial de vapor en el aire.	[Pa]
p' _a	Humedad en un local imaginario.	[Pa]
PMV	Voto Medio Previsto (Predicted Mean Vote), de un grupo de personas en una escala de sensación térmica de 7 puntos.	
PPD	Porcentaje Previsto de Disconformes (Predicted Percentage of Dissatisfied), de un grupo de personas que están sintiendo demasiado calor o frío.	[%]
q	Intercambio de calor entre el cuerpo y su entorno.	[W/m ²]
q'	Intercambio de calor entre el cuerpo y su entorno en un local imaginario.	[W/m ²]
R	Intercambio de calor radiante.	[W/m ²]
R'	Intercambio de calor radiante en un local imaginario.	[W/m ²]
RH	Humedad Relativa	[%]
SD	Desviación estándar de la velocidad del aire.	[m/s]
t _a	Temperatura del aire.	[°C]
t' _a	Temperatura del aire de un local imaginario.	[°C]
t _{co}	Temperatura de Comodidad. La Temperatura Equivalente a la cual una persona experimenta una sensación térmica neutra.	[°C]
t _{cl}	Temperatura de la superficie de la ropa.	[°C]
t _{eq}	Temperatura Equivalente.	[°C]
t _g	Temperatura de Globo.	[°C]
t _i	Temperatura de la superficie i.	[°C]
t _o	Temperatura Operativa.	[°C]
t _r	Temperatura Radiante Media.	[°C]
t' _r	Temperatura Radiante Media en un local imaginario	[°C]
t _{pr}	Temperatura Radiante Plana.	[°C]
D t _{pr}	Asimetría de Temperatura Radiante.	[°C]
t _{sk}	Temperatura media de la piel.	[°C]
Tu	Intensidad de la turbulencia.	[%]
v _a	Velocidad media del aire en un punto.	[m/s]
v' _a	Velocidad media del aire en un punto de un local imaginario	[m/s]
v _{ar}	Velocidad Relativa Media del Aire en los ocupantes, incluyendo los movimientos del cuerpo.	[m/s]
W	Potencia mecánica efectiva.	[W/m ²]
e	Coefficiente de Emisión de la superficie del cuerpo, expresada como una fracción de la emisividad de un Cuerpo Negro.	
s	Constante de Stefan-Boltzmann (5.67 * 10 ⁻⁸)	[W/m ² /°K ⁴]

Fuente: http://editorial.cda.ulpgc.es/ambiente/2_clima/7_comodo/index.htm

XVI. Published Standards and Standards in development

- ISO 7243: 1995 Hot environments - Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature).
- ISO 7726: 1998, Thermal environments - Instruments and methods for measuring physical quantities.
- ISO 7730: 1994, Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort.
- ISO 7933: 1989, Hot environments - Analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of required sweat rate.
- ISO 8996: 1990, Ergonomics - Determination of metabolic heat production.
- ISO 9886: 1992, Evaluation of thermal strain by physiological measurements.
- ISO 9920: 1995, Ergonomics of the thermal environment - Estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble.
- ISO 10551: 1995, Ergonomics of the thermal environment - Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgment scales.
- ISO 11399: 1995, Ergonomics of the thermal environment - Principles and application of international standards.

Fuente: **Introduction to thermal comfort standards**, Ken C. Parsons, Loughborough University, UK, p27

XVII. Comparación de métodos tradicionales y modernos de diseño pasivo

Tabla 1: METODOS TRADICIONALES Y MODERNOS DE DISEÑO PASIVO

	Métodos Tradicionales	Métodos Modernos
Tipos y Ejemplos	<ul style="list-style-type: none"> • gráficos climáticos • diagramas solares y de sombra • cálculo de posición solar • diagramas bioclimáticos (Givoni) • diagramas de Mahoney • normas térmicas (R_t, U_L, G_v) 	<ul style="list-style-type: none"> • programas computacionales de simulación térmica y energética con modelos matemáticos detallados de los procesos físicos: p. ej. DEROB-LTH (U. de Lund, Suecia), HAUSer (U. de Kassel), TRNSYS (U. de Wisconsin, EE.UU. – prog. comercial)
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • exige poca información sobre: <ul style="list-style-type: none"> - el proyecto y su ubicación - el clima - las condiciones de uso • aplicación rápida en casos simples • de fácil manejo 	<ul style="list-style-type: none"> • descripción detallada sobre: <ul style="list-style-type: none"> - el proyecto - el clima - las condiciones de uso • resultados detallados y exactos de: <ul style="list-style-type: none"> - el comportamiento térmico - el comportamiento energético
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • generales, poco específicos • limitados a pocos factores de influencia • poco detallados • poca precisión 	<ul style="list-style-type: none"> • exige gran cantidad de información • tiempo de aprendizaje • complejos y de difícil manejo • mayor tiempo de aplicación
Utilidad Principal	<ul style="list-style-type: none"> • recomendaciones generales de diseño • casos estándares • análisis inicial • diseño preliminar (p. ej. elementos de sombreado) 	<ul style="list-style-type: none"> • proyectos novedosos • proyectos grandes • investigación: <ul style="list-style-type: none"> - estudios de caso - pautas de diseño - herramientas simples de diseño y dimensionamiento - diseño pasivo o bioclimático

Fuente: Müller, Ernst, (1998), Mejoramiento Térmico de Viviendas con Climatización Pasiva para la Zona Central de Chile con Programas de Simulación Térmica, CONGRESO INTERNACIONAL DE ENERGIAS SUSTENTABLES SENESE X, Punta Arenas, Chile, 18 al 20 de Noviembre de 1998

XVIII. ALBEDO DE DIFERENTES COBERTURAS DE TERRENO Y MATERIALES

ALBEDO DE DIFERENTES COBERTURAS DE TERRENO Y MATERIALES			
Descripción	Albedo (r)	Descripción	Albedo (r)
Albedo promedio a nivel planetario (Tierra)	0.29 – 0.34		
1. Cultivos		4. Nieve y hielo	
Caña de azúcar	0.18	<u>Bosque nevado</u>	
Algodón	0.20 – 0.22	<i>nueva o recién caída</i>	0.82
<u>Pasto</u>		<i>húmeda de grano fino</i>	0.65
<i>seco</i>	0.15 – 0.25	<i>húmeda de grano medio</i>	0.56
<i>seco, con sol</i>	0.19	<i>húmeda de grano grueso</i>	0.47
<i>seco, sin sol</i>	0.19 – 0.22	<i>dispersa</i>	0.31
<i>seco, alto</i>	0.31 – 0.33	<i>cobertura de nieve estable</i>	0.65
<i>verde</i>	0.26	<i>inestable en primavera</i>	0.25
<i>alto fresco</i>	0.26	<i>inestable en otoño</i>	0.30
<i>húmedo, sin sol</i>	0.14 – 0.26	<u>Campo nevado</u>	
<i>húmedo, con sol</i>	0.33 – 0.37	<i>nueva o recién caída</i>	0.82
Brezo o breñal	0.10	<i>húmeda de grano fino</i>	0.73
Lechugas	0.22	<i>húmeda de grano medio</i>	0.64
Alfalfa	0.23 – 0.32	<i>húmeda de grano grueso</i>	0.55
<u>Maíz</u>		<u>Nieve recién caída</u>	
<i>15-20 cm, cobertura 40-50%</i>	0.16	<i>seca, blanca, limpia y brillante</i>	0.72 – 0.98
<i>40-50 cm cobertura 75-75%</i>	0.18	<i>húmeda, blanca y brillante</i>	0.61 – 0.85
<i>140-200 cm, en mazorca verde, cobertura 80%</i>	0.20	<u>Nieve compactada</u>	
<i>200-250 cm, totalmente maduro</i>	0.23	<i>seca y limpia</i>	0.66 – 0.80
Arroz	0.12	<i>húmeda y gris</i>	0.61 - 0.75
<u>Centeno</u>		<i>derretida o empapada en agua</i>	0.35
<i>Invierno</i>	0.21	5. Agua	
<i>Verde</i>	0.18	Océano con oleaje	0.25 – 0.35
<i>fluorescencia</i>	0.16	<u>Agua en calma</u>	
<i>fin de la fluorescencia</i>	0.15	<i>ángulo de incidencia 10° (de lo normal)</i>	0.020
<i>principio de la marchitación</i>	0.13	<i>ángulo de incidencia 30°</i>	0.021
<i>hojas marchitas, cobertura menor a 50%</i>	0.11	<i>ángulo de incidencia 50°</i>	0.025
<u>Trigo</u>		<i>ángulo de incidencia 60°</i>	0.034
<i>verano</i>	0.10 – 0.25	<i>ángulo de incidencia 70°</i>	0.060
<i>verde pálido claro</i>	0.13	<i>ángulo de incidencia 80°</i>	0.130
<i>madurez amarilla</i>	0.17	<i>ángulo de incidencia 90°</i>	0.350
<i>totalmente maduro</i>	0.21	<i>ángulo de incidencia 95°</i>	0.580
2. Terrenos naturales		6. Atmósfera	
<u>Tierra</u>		Aire seco	0.07 – 0.08
<i>Suelo castaño o rojo grisáceo</i>		Vapor de agua	0.05 – 0.10
<i>nivelado seco</i>	0.20	Atmósfera sin nubes	0.08 – 0.13
<i>nivelado húmedo</i>	0.12	<u>Nubes</u>	

<i>arado seco</i>	0.15	Nubes (promedio)	0.550
<i>arado húmedo</i>	0.07	Nubes (estratos)	0.780
<i>Suelos arcillosos</i>		7. Materiales constructivos	
<i>azul seco</i>	0.23	<u>Ladrillos</u>	
<i>azul húmedo</i>	0.16	<i>cerámica vidriada blanca</i>	0.74
<i>Suelos arenosos</i>		<i>cerámica vidriada color crema</i>	0.64
<i>plano seco</i>	0.25	<i>arcilla encalada</i>	0.54
<i>plano húmedo</i>	0.18	<i>tabique rojo</i>	0.32
<i>arado seco</i>	0.20	<u>Azulejos o baldosas</u>	
<i>arado húmedo</i>	0.11	<i>cerámica morada oscura</i>	0.18
<u>Tierra negra o gris oscuro</u>		<i>rojo</i>	0.33
<i>plano seco</i>	0.13	<i>concreto natural</i>	0.35
<i>plano húmedo</i>	0.08	<i>concreto negro</i>	0.09
<i>arado seco</i>	0.08	<i>concreto café</i>	0.15
<i>arado húmedo</i>	0.04	<u>Asfalto</u>	
<u>Arena desierto</u>		<i>nuevo</i>	0.09
<i>arena fina clara</i>	0.37	<i>pavimento</i>	0.15
<i>arena gris</i>	0.21	<i>pavimento desgastado</i>	0.18
Valle de la muerte	0.25	<u>Teja o cubiertas</u>	
Desierto de Mojave	0.24 – 0.28	<i>fieltro bituminoso</i>	0.12
<i>arena de cuarzo blanca</i>	0.35 – 0.40	<i>placa verde</i>	0.14
<i>arena de río</i>	0.43	<i>placa negro mate</i>	0.13
<i>arena húmeda</i>	0.09	<u>Asbesto cemento</u>	
<i>arena amarilla</i>	0.35	<i>viejo</i>	0.25
<i>arena blanca de Nuevo México</i>	0.60	<i>rojo</i>	0.31
<u>Bosques</u>		<i>blanco</i>	0.39
<i>exfoliación en estación seca</i>	0.24	<u>Piedras</u>	
<i>exfoliación en estación húmeda</i>	0.18	<i>caliza anston</i>	0.40
<i>bosque verde</i>	0.03 – 0.06	<i>caliza portland</i>	0.64
<i>bosque verde</i>	0.04 – 0.10	<i>marmol blanco</i>	0.56
<i>pocos árboles</i>	0.07	<i>granito rojizo</i>	0.45
<i>estepa</i>	0.40 – 0.52	<i>pizarra gris oscuro</i>	0.10
<i>copa de abetos</i>	0.10	<i>pizarra morada</i>	0.14
<i>copa de pinos</i>	0.14	Madera	0.22
<i>copa de roble</i>	0.18	Aluminio	0.85
<i>tundra</i>	0.11 – 0.23	<u>Hierro</u>	
<i>pantano</i>	0.10 – 0.18	<i>galvanizado nuevo</i>	0.35
3. Nieve y hielo		<i>galvanizado muy sucio</i>	0.08
<u>Bosque nevado</u>		Acero	0.80
<i>nueva o recién caída</i>	0.82	Cobre	0.74
<i>húmeda de grano fino</i>	0.65	Pintura de aluminio	0.46
<i>húmeda de grano medio</i>	0.56		
<i>húmeda de grano grueso</i>	0.47	Fuente: FUENTES FREIXANET, Victor Armando, 2004, „Clima y Arquitectura“, Universidad Autónom Metropolitana, Mexico, D.F.	
<i>dispersa</i>	0.31		
<i>cobertura de nieve estable</i>	0.65		
<i>inestable en primavera</i>	0.25		
<i>inestable en otoño</i>	0.30		

