



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA
SISTEMAS ENERGÉTICOS

GUÍA PARA EL DISEÑO BIOCLIMÁTICO DE VIVIENDAS EN SAN JUAN BAUTISTA TUXTEPEC,
OAXACA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA EN ENERGÍA

PRESENTA:
GERARDO RANGEL PAREDES

DIRECTORA DE TESIS:
DRA. GUADALUPE HUELSZ LESBROS
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

TEMIXCO, MORELOS A FEBRERO DE 2019.



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.

Contenido

Resumen	1
1 Introducción	2
1.1 Justificación	5
1.2 Objetivo	6
2 Marco teórico	7
2.1 Diseño bioclimático	7
2.2 Clima	7
2.3 Confort térmico	10
2.4 Sistemas de climatización	14
3 Características de San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca	15
3.1 Ubicación	15
3.2 Clima	16
3.2.1 Datos de clima de estación meteorológica automatizada de Ciudad Alemán, Ver.	18
4 Arquitectura de la vivienda tuxtepecana	22
4.1 Arquitectura vernácula	23
4.1.1 Casonas en el primer cuadro de la ciudad	24
4.1.2 Casas alrededor del primer cuadro de la ciudad y en las zonas rurales	27
4.2 Arquitectura actual	30
4.2.1 Arquitectura en vivienda de interés social	30
4.2.2 Arquitectura actual autoproducida	32
5 Estrategias de diseño bioclimático para Tuxtepec	34
5.1 Geometría y orientación de la vivienda	34
5.2 Protecciones solares	36
5.2.1 Alero	36
5.2.2 Quiebrasol	39
5.2.3 Remetimiento	41
5.2.4 Celosía	44
5.3 Materiales de la envolvente	46
5.4 Sistemas pasivos de climatización	48
5.4.1 Muro doble	48
5.4.2 Fachada ventilada	49
5.4.3 Muros y techos verdes	51
5.4.4 Ventilación natural	52

6	Análisis del comportamiento térmico de una vivienda de interés social	55
6.1	Metodología	55
6.2	Descripción de la vivienda	56
6.3	Caso base	59
6.4	Casos con una estrategia de diseño bioclimático	61
6.4.1	Orientación	61
6.4.2	Protecciones solares	63
6.4.3	Cambio de color exterior del techo	64
6.4.4	Cambio de color exterior de muros	65
6.4.5	Aislamiento térmico de la envolvente	66
6.4.6	Todas las estrategias propuestas	67
6.5	Comparación de resultados	68
7	Conclusiones	72
	Referencias	74
	Anexo I	78
	GUÍA DE DISEÑO BIOCLIMÁTICO PARA SAN JUAN BAUTISTA TUXTEPEC, OAX.	78
	ANEXO II. Ficha técnica de levantamiento de información de casas de interés social	95
	ANEXO III. Cálculo de protecciones solares del caso de estudio en Tuxtepec	98

Dedicatoria

Ser como un árbol que crece de pie hacia la luz.

En esta etapa de mi vida, que estuvo llena de contrastes, quiero agradecer a todas las personas que se cruzaron en el camino, me enseñaron, me apoyaron y sobre todo me mostraron con respeto y cariño lo importante de aprender y crecer.

Especialmente le dedico este trabajo a mis padres Silvia y Gerardo, porque gracias a su amor, enseñanzas y trabajo he podido lograr muchas de las cosas que me he emprendido a hacer. También quiero dedicarle a mis hermanos Frinee e Irving todo el apoyo y amor, aquí o donde quiera que se encuentren, porque lo que jamás muere es el amor. A Amalinalli, Ingrid y Moisés por ser hermanos y mostrar su apoyo en las buenas y en las malas.

Le dedico un especial agradecimiento a la familia Contreras Rodríguez por hacerme sentir parte de su familia y darme siempre mucha fuerza y calor, pero sobre todo a ti Liz por ser mi compañera en el camino y no soltarme en medio de tantos contrastes.

A mis abuelos y tíos que me han transmitido su sabiduría recolectada en su propio andar. "Aclarando amanece" se convirtió en mi lema abue Delfino.

A mis motorcitos, a mis sobrinos, pero en especial a Donají y Mitzari, que tal vez sin saberlo, me curaron el alma en muchas ocasiones.

A mis amigos en la vida, los que de alguna manera han trascendido el tiempo y las distancias: Cecy, Malú, Fidel, Dulce, Leidy, Fany, Angélica, Paco, Jaime, Abi y Karol.

A todos aquellos que se fueron, a los que han llegado, a los que se han quedado, a los que siguen. A todos ustedes: gracias por todo lo compartido.

Agradecimientos

Agradezco infinitamente a mi familia y amigos. A mis profesores y a todos aquellos que me permitieron aprender.

Agradezco a mi asesora Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros por todas las enseñanzas, llamadas de atención, consejos y el seguimiento que tuvo en este proceso.

Agradezco las observaciones, consejos y sobre todo paciencia que tuvieron mis sinodales: Dr. Jorge Rojas Menéndez, Dr. Ramón Tovar Olvera, Dr. Guillermo Barrios Del Valle y Pablo Elías López.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme su beca de nivel Maestría ya que me permitió desarrollar la investigación plasmada en esta tesis.

Agradezco al Servicio Meteorológico Nacional por los datos otorgados para llevar a cabo esta investigación.

Resumen

El acelerado crecimiento poblacional de San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca, ha impulsado la construcción masiva de viviendas, sobre todo de interés social, que no necesariamente se encuentran adaptadas a su clima, por lo que a menudo no son confortables térmicamente, y tiene como consecuencia que sus habitantes coloquen sistemas activos de climatización, con implicaciones económicas y ambientales.

La preocupación por el medio ambiente y las crisis energéticas generaron que, desde la década de los 60 del siglo pasado, se despertara el interés de retomar los diseños y las formas de construcción que tienen en cuenta el clima, como una medida de ahorro y eficiencia energética. Esto ha producido manuales y guías que fomentan el uso de estrategias de diseño bioclimático para la climatización pasiva en las construcciones, que evitan o disminuyen el empleo de sistemas activos de climatización.

En esta tesis se presenta un estudio cuantitativo, por medio del programa EnergyPlus, sobre el desempeño térmico de una vivienda de interés social en San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca, aplicando algunas estrategias de diseño bioclimático como el cambio de orientación de la fachada principal hacia el norte, la colocación de protecciones solares en las ventanas, el cambio de color amarillo a blanco de los muros y de rojo a blanco del techo y la adición de aislamiento térmico en la parte exterior de la envolvente. De este estudio se obtuvieron la temperatura humidex y los grados hora de desconfort cálido del aire al interior de la vivienda, concluyendo que las tres estrategias con mejor desempeño térmico son colocar en el exterior de la envolvente aislamiento térmico (máxima temperatura humidex de 44.8 °C y 61,371 °C h de grados hora de desconfort cálido), cambiar de color el techo de rojo a blanco (máxima temperatura humidex de 46.8 °C y 66,545 °C h de grados hora de desconfort cálido) y proteger de la radiación solar directa las ventanas (máxima temperatura humidex 49.5 °C y 74,626 °C h de grados hora de desconfort cálido). También, se observó que cuando se aplican juntas todas las estrategias se tiene una disminución de 11.8 °C en el promedio de la máxima temperatura humidex y del 50% en el promedio de los grados hora de desconfort cálido.

Se elaboró una guía para la construcción de viviendas térmicamente confortables, que es una compilación de estrategias de diseño bioclimático adaptadas al clima cálido húmedo de esta ciudad, con el objetivo de dar una herramienta a constructores y desarrolladores de viviendas que les permita construir espacios más confortables y más eficientes energéticamente.

1 Introducción

La arquitectura ha estado presente a través de la historia como un reflejo del comportamiento humano en un momento y un lugar determinado (contexto específico), tomando como punto de partida la adaptación natural que coexiste entre los hombres y la consciencia de las posibilidades que brinda el entorno (Otto 1979).

El estilo de los edificios debe ser diferente en Egipto y España, en el Ponto y en Roma, y en los países o regiones de distintas características. Por una parte la tierra es oprimida por el curso del Sol; otra parte de la tierra está muy lejos de él y en otra se ve afectada a una distancia moderada.

Vitruvio (Citado por Olgyay 1963)

La arquitectura vernácula es aquella que fue moldeada por factores culturales, históricos, morales; así como factores fisiológicos, climáticos y geográficos; que han permitido resolver las necesidades físicas y emocionales de sus habitantes, tomando los recursos de su medio ambiente para su construcción, es decir, es una estrategia de adaptación humana que ha logrado el confort térmico, de acuerdo al clima, en el medio donde se ha establecido (Fuentes 2002). Una de sus características es la utilización de materiales de su entorno inmediato para crear microclimas en el interior y lograr el mayor confort térmico, disminuyendo los impactos de las inclemencias del clima del exterior, que en algunos casos es extremo. Los ventanales orientados al sur en climas fríos, el uso de ciertos materiales con determinadas propiedades térmicas; como la madera o el adobe; el abrigo del suelo, el encalado de las viviendas o la traza de los poblados no son una casualidad, cumplen una función específica, ya que con base en la observación del contexto, los diseños se optimizaron a un medio ambiente específico (Morillón 2011).

La revolución industrial trajo consigo innovaciones de diversos tipos que, en el caso particular de la construcción, provocaron el desarrollo de materiales con diversas propiedades físicas y el surgimiento de nuevas técnicas constructivas, que viajaron con mayor facilidad debido a la creciente comunicación a través de la red de transporte (Otto 1979). Por lo que la arquitectura vernácula se fue desplazando debido a la sustitución de los materiales autóctonos y a la implementación de diseños ajenos a los locales. Pero esta nueva forma de diseño en los edificios ha tenido que replantearse debido a los requisitos actuales, que tienen como objetivo disminuir la huella del impacto ecológico sobre el planeta (Hernández 2013). Ya no sólo se deben construir ciudades y edificios que sean bellos y que respondan a una identidad derivada de una cultura específica; sino también, deben disminuir el consumo de energía y contaminar menos.

Actualmente, la energía eléctrica se ha convertido en un elemento indispensable para nuestra vida cotidiana, ya que nos permite realizar actividades de forma rápida y confortable. Pero esto a su vez ha demandado un suministro de energéticos cada vez mayor, pues tan solo en México el 80 % de la electricidad se genera quemando combustibles fósiles (SENER 2015). La tecnología ha permitido eludir el clima debido a la utilización de equipos de climatización artificial, que comenzaron a extenderse desde mediados del siglo XX. En las zonas cálidas del país, el aire acondicionado es el equipo con mayor consumo energético en el sector residencial y comercial, representando el 35 % de la demanda total de la energía de una vivienda (FIDE 2009). Si bien es cierto que la inventiva humana nos permite vivir en condiciones confortables, también es cierto que lo consigue con un alto costo, que implica impactos ambientales, tan fuertes y alarmantes como el calentamiento global. Algunas personas pueden pensar que están en condiciones de permitirse estos costos, probablemente ellos sí, pero el planeta no. El viento, el sol, y la humedad relativa deberían volver a adquirir el protagonismo que tuvieron antes de que la tecnología basada en el consumo energético hiciera parecer que podríamos olvidarnos de ello (Hernández 2013). Es por esto, y por las diversas crisis energéticas, que surge en los años 60 el interés de retomar los diseños de las edificaciones que toman en cuenta el clima del lugar, a través de elementos y sistemas constructivos encaminados al bienestar de los ocupantes, como una medida para el uso eficiente y ahorro de energía que contribuya a la disminución del consumo de energéticos fósiles, y con ello, se reduzcan los impactos ambientales y las emisiones de gases efecto invernadero (Rojas 2010).

En 1963 Victor Olgyay publicó su manual clásico del diseño bioclimático *Design with climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism*, donde se recogen todas sus obras sobre la relación entre la arquitectura y la energía, los edificios y el medio natural que lo rodea, así como, la relación entre el ser humano y el clima.

Se han escrito manuales y guías de construcción que presentan propuestas generales para resolver el problema del confort a través de la relación medio ambiente-edificación. En el caso particular del clima cálido húmedo, el Instituto de Arquitectura Tropical de Costa Rica ha publicado *Ciudades tropicales sostenibles* de Stagno y Ugarte (2007) donde se hacen propuestas de cómo utilizar los recursos del ambiente y aprovecharlos en este clima, entre los que se encuentra la utilización de materiales regionales en las viviendas para lograr el confort térmico. También existen tesis que contienen recopilaciones de estrategias bioclimáticas como *Confort térmico y tipología arquitectónica en clima cálido-húmedo. Análisis térmico de la cubierta ventilada* de Mariana Guimarães Merçon (2008); y *La cubierta metálica en el clima cálido húmedo: análisis del comportamiento térmico del techo de zinc de la vivienda vernácula dominicana* de Osttuhén Díaz (2012).

En México, en los años 70's, la Dirección General de Ecología Urbana de la SAHOP, presentó un proyecto demostrativo sobre ecotécnicas para los asentamientos humanos en el trópico húmedo mexicano, donde se hacía referencia a la arquitectura bioclimática considerando el uso de la tierra en los muros, como sistema de termorregulación. Posteriormente se publicó el *Manual del arquitecto descalzo. Cómo construir casas y otros edificios* de Van Lengen (1982)

en donde se exponen recomendaciones específicas para buscar el confort higrotérmico, considerando las características del trópico húmedo, el trópico seco y la zona templada; y presenta técnicas simples (ecotecnias) para generar energía térmica para calentamiento de agua. Deffis en *Arquitectura ecológica tropical* (1987) proporciona información para aprovechar y protegerse de las condiciones climáticas del medio ambiente para determinadas zonas y ciudades del país. Ya en los años 90, en el Instituto Tecnológico de Los Mochis se realizaron trabajos para la adecuación de la arquitectura a las condiciones específicas de las regiones de México (Morillón 2011). En 2007 se publicó el *Código de edificación de vivienda* de la Comisión Nacional de Vivienda, que es una guía de construcción que establece los estándares mínimos para las edificaciones, entre los cuales, en el capítulo 6 Sustentabilidad establece especificaciones de diseño para los 10 bioclimas de México. También en 2010 se creó el programa de Hipotecas Verdes que consiste en un crédito Infonavit que cuenta con un monto adicional para que el derechohabiente pueda comprar una vivienda con ecotecnologías para el uso eficiente de la energía y de agua (CMIC 2016). Actualmente, dentro de estas ecotecnologías se tienen elementos pasivos de climatización para el confort higrotérmico de la construcción como son: ventanas con doble acristalamiento, aislamiento térmico en el techo, aislamiento térmico en losa (para entrepisos en vivienda vertical), sistema de losa de vigueta y bovedilla, aislamiento térmico en muros, aislamiento térmico en segundo muro (orientación), acabado reflectivo en techo, acabado reflectivo en muro, aleros, partesoles y/o ventanas remetidas. En el *Manual explicativo de la vivienda ecológica* se establecen los ahorros económicos aproximados en un mes al utilizar estos elementos para climas cálidos secos, cálidos húmedos y templados (INFONAVIT 2016).

En la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) el diseño bioclimático es una línea de investigación en los posgrados de Arquitectura e Ingeniería (Energía), donde se promueve como alternativa para el uso eficiente y ahorro de la energía. Se han desarrollado herramientas para conocer las zonas bioclimáticas, como el *Atlas Bioclimático de la República Mexicana* (Morillón 2004). Así mismo, el Grupo de Energía en Edificaciones del Instituto de Energías Renovables, ha realizado investigaciones del comportamiento térmico para distintas configuraciones, materiales y métodos constructivos que permiten establecer propuestas para que las edificaciones tengan el mayor confort higrotérmico al menor costo energético (Rojas 2010). De aquí surgió la tesis *Diseño de viviendas térmicamente confortables con uso de sistemas pasivos de climatización en la zona de Temixco: Guía de constructores* de Bahena (2013), como propuesta específica y concreta para esta zona de clima cálido subhúmedo.

Para el caso de la Cuenca del Papaloapan no se han escrito guías específicas para alguna de las poblaciones de esta región, sin embargo, se han encontrado tres documentos que describen los elementos de su arquitectura vernácula que se pueden tomar como punto de partida. Aguirre (2009) en su artículo *La casa tradicional de San Pedro Ixcatlán* describe las características de las viviendas del pueblo originario. Las características de las viviendas y de la traza urbana de Tlacotalpan son descritas por Priego (2001) en *Tipologías arquitectónicas de Tlacotalpan, Ver. Y de San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca* por García (1996) en *Tuxtepec ante la Historia*. Estos documentos, junto con la tradición oral y la existencia de edificaciones vernáculas en la zona, dan información importante sobre el papel de los elementos arquitectónicos para lograr

el confort térmico en esta región de clima cálido húmedo. Es de importancia tomar a Tuxtepec como objeto de estudio, ya que después de la inundación de 1944 y la llegada de la Comisión del Papaloapan, la ciudad tuvo un proceso de “modernización”, permitiéndole acceder a servicios y bienes, como la electrificación por el abastecimiento de las presas hidroeléctricas Miguel de la Madrid y Miguel Alemán. Este proceso trajo consigo el abandono de la construcción vernácula. El acceso a nuevos materiales y a distintos diseños, permitió la adopción de nuevas formas de construcción que no fueron adaptadas al clima de la ciudad, por lo que para satisfacer el confort térmico se comenzaron a utilizar equipos y sistemas que consumen energía eléctrica. Este proceso se aceleró con la industrialización del municipio, ya que se demandó una mayor cantidad de mano de obra (García 1996).

Actualmente Tuxtepec es el foco económico de la región, la migración hacia esta ciudad ha propiciado un rápido crecimiento poblacional, que implica mayores consumos energéticos. Por ésta razón he decidido elaborar una propuesta de guía de diseño para el clima cálido húmedo de esta ciudad, tomando en cuenta elementos de la arquitectura vernácula y otras estrategias de diseño, los cuales fueron evaluadas en una vivienda de interés social con el programa EnergyPlus, para observar el comportamiento de la temperatura humidex al implementar los elementos constructivos propuestos en la guía, la cual, va encaminada a que se haga uso eficiente de la energía a arquitectura bioclimática en las edificaciones.

1.1 Justificación

A partir de 1980, Tuxtepec ha tenido un acelerado crecimiento poblacional debido a la llegada de industrias al municipio. Por lo que ha habido la necesidad de construir viviendas para los trabajadores y sus familias, sobre todo de casas de interés social. Este tipo de construcciones no necesariamente tomaron en cuenta el clima cálido húmedo de la zona, más bien, pretendieron satisfacer la necesidad de vivienda de la forma más económica posible. Por lo regular, estas casas no son térmicamente confortables, lo que obliga a sus habitantes a incorporar ventiladores o aires acondicionados para poder soportar las altas temperaturas y altos valores de humedad relativa del aire. Esto trae como consecuencia impactos económicos e impactos ambientales debido a los altos consumos energéticos.

Tomando en cuenta el clima de Tuxtepec, se pueden proponer diseños bioclimáticos adecuados en las viviendas, que permitan alcanzar el confort higrotérmico con el menor consumo energético, al disminuir el uso de equipos o sistemas de climatización activos. Por lo que elaborar una guía de diseño bioclimático para los constructores y desarrolladores aumenta la posibilidad de que los diseños de las viviendas sean más adecuados al clima de la zona.

1.2 Objetivo

Realizar el análisis térmico de una vivienda de interés social, ubicada en San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca, para evaluar, por medio de simulaciones en EnergyPlus, su desempeño térmico en su forma actual y comparar esos resultados con el desempeño de la vivienda al aplicarle diferentes estrategias de diseño bioclimático (orientación, cambio de color de muros y techo, protección solar de ventanas y aislamiento térmico de la envolvente). Además, hacer una guía de diseño bioclimático que contenga propuestas para lograr el confort higrotérmico, con el menor consumo de energía externa, sobre todo eléctrica, de viviendas en el clima cálido húmedo de esta ciudad.

2 Marco teórico

En el presente trabajo se propone elaborar una guía de diseño bioclimático, por lo que es necesario presentar algunos conceptos básicos que se deben tener en cuenta para entender la relación entre una edificación, el clima en el que se construye y la sensación térmica de sus ocupantes; y así conjuntar las estrategias y elementos que serán parte de esta guía.

2.1 Diseño bioclimático

El diseño bioclimático se refiere al diseño de edificaciones y espacios que toman en cuenta el clima donde serán construidos, con el objetivo de crear espacios confortables térmicamente con la menor necesidad de sistemas activos de climatización. Esto se logra con la utilización de diversas estrategias como la adaptación de la geometría y la orientación del edificio; y mediante la inclusión de elementos constructivos específicos que aprovechen elementos naturales como la radiación del sol, viento, agua, vegetación y suelo (Rosales 2011).

Para lograr las condiciones de confort al interior se necesita tener temperatura, humedad y ventilación adecuadas, por lo que se debe tomar en cuenta las variables climatológicas del lugar.

2.2 Clima

Como se ha mencionado anteriormente, el clima juega un papel importante en el proceso de diseño bioclimático, puesto que para alcanzar el confort térmico al interior de las edificaciones se deben tomar en cuenta las interacciones de la envolvente con las condiciones del exterior.

Se define al clima como el conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan el estado medio de la atmósfera en una región de la superficie terrestre a lo largo de un periodo de tiempo suficientemente largo. El clima está determinado por la latitud, altitud, cercanía a grandes

cuerpos de agua y del relieve que repercute en la temperatura, presión, radiación solar, viento y precipitaciones de un determinado lugar. En general se considera que este periodo es de unos 30 años (UM 2016).

Las variables climatológicas pueden definirse como toda propiedad o condición de la atmósfera cuyo conjunto caracteriza el clima de un lugar a lo largo de un periodo de tiempo suficientemente representativo (UM 2016). Estas variables son las siguientes:

Temperatura del aire

La temperatura del aire es la variable más utilizada para describir el estado de la atmósfera. Varía a lo largo del día, entre una estación y otra, a lo largo del año y también entre una ubicación geográfica y otra.

Para la medición de la temperatura del aire se utiliza el termómetro de bulbo seco que debe ser colocado en un espacio ventilado, protegido de la precipitación y de la radiación solar directa y a una determinada altura del suelo (para que la energía que durante el día absorbe la tierra no modifique la medición) (Monkhouse 1978). La unidad de medida usada en México es el grado centígrado (°C). La temperatura es la variable más importante, debido a la enorme influencia en la sensación de confort térmico que proporciona al ser humano (Rodríguez et al 2004).

Humedad

La humedad es la cantidad de vapor de agua que contiene el aire. Esa cantidad no es constante, ya que depende de diversos factores como la precipitación, la cercanía a cuerpos de agua y la vegetación (Bahena 2013).

La humedad relativa se define como el cociente del vapor de agua contenido en el aire y el máximo que podría contener. Se mide en tanto por ciento (%). Dada una presión, la humedad relativa depende de la temperatura, ya que todo descenso de ésta, aunque no se añada vapor de agua, se traducirá en un aumento de la humedad relativa, por disminuir la capacidad del aire para contener vapor de agua. A su vez, todo aumento de temperatura se traducirá en una disminución de humedad relativa por aumentar la capacidad de la atmósfera para contenerla (Andrades 2012).

La humedad es medida con un psicrómetro o un higrógrafo por medio de las variaciones de alguna de las propiedades físicas de materiales respecto a la humedad en el aire (UChile 2017).

Velocidad del viento

El viento consiste en el movimiento de aire desde una zona de mayor presión hasta otra de menor presión y se caracteriza por su velocidad, dada por su magnitud y dirección (Andrades 2012).

El instrumento más utilizado para medir la magnitud de la velocidad horizontal del viento es el anemómetro de cazoletas, en el que el giro de las mismas es proporcional a la velocidad del viento. La unidad de medida es el km/h o el m/s. Para medir la dirección se utilizan más frecuentemente las veletas, que indican la procedencia geográfica del viento (UCHile 2017).

Radiación solar

La energía transferida por el Sol a la Tierra es lo que se conoce como energía radiante o radiación solar. Ésta viaja a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas que llevan asociada una determinada cantidad de energía.

El piranómetro es el instrumento que mide la radiación global proveniente de la bóveda celeste. También es usado para determinar las componentes de radiación directa y difusa, así como el albedo de las superficies. La irradiancia es la variable que se utiliza para medir la potencia de la radiación solar incidente por unidad de superficie, su unidad es el W/m^2 (IMNCR 2017).

En función de cómo reciben la radiación solar los objetos situados en la superficie terrestre, se pueden distinguir estos tipos de radiación (EcuRed 2017):

- **Radiación directa.** Es aquella que llega directamente del Sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección.
- **Radiación difusa.** Parte de la radiación que atraviesa la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por éstas. Esta radiación, que se denomina difusa, va en todas direcciones, como consecuencia de las reflexiones, no sólo de las nubes sino de las partículas de polvo atmosférico, montañas, árboles, edificios, el propio suelo, etc.
- **Radiación reflejada.** También conocido como albedo, es el porcentaje de radiación reflejada por cualquier tipo de superficie. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie.
- **Radiación global.** Es la radiación total medida en el plano horizontal.

Precipitación

La cantidad de agua que cae a la superficie terrestre procedente de la atmósfera, se denomina precipitación. Puede hacerlo en forma líquida, como la lluvia o llovizna; o sólida, como la nieve o el granizo. La unidad de medida habitual de la precipitación es el mm. Unidad de

longitud que se obtiene al dividir el volumen de agua recogido entre el área de la superficie de captación. Los pluviómetros son los equipos que miden estos niveles de precipitación.

Para caracterizar a los distintos tipos de clima, no sólo se estudia la cantidad de precipitaciones que recibe un lugar determinado, sino que también se tiene en cuenta las características de las mismas, es decir, si la precipitación se produce en forma de lluvia o nieve y además se utiliza un análisis de la distribución de las precipitaciones a lo largo de un año, determinando así las variedades de climas secos o húmedos. Además se tiene en cuenta, la intensidad con la que se producen las precipitaciones, ya que no es lo mismo que caiga una lluvia fina o normal, o que caiga una torrencial en pocas horas (UM 2016).

2.3 Confort térmico

El confort térmico o también llamado confort higrotérmico es el estado en el que la mayoría de las personas de un lugar específico expresan satisfacción con las condiciones de temperatura, humedad relativa, velocidad del aire y radiación con las que están en contacto (Guimaraes 2008). En el intercambio de calor corporal con el medio ambiente, inciden parámetros físicos, del entorno; y factores biológicos, fisiológicos, sociológicos y psicológicos de una persona.

Los mecanismos por los que el ser humano intercambia energía con el ambiente son (Romeo 2004):

- Por convección: es el intercambio de calor debido al movimiento del aire alrededor de la piel y en el proceso de respiración de un individuo.
- Por conducción: se produce cuando el individuo tiene contacto con distintas superficies del ambiente que se encuentran a diferente temperatura.
- Por radiación: se produce entre el individuo y los objetos alrededor sin que tengan contacto directo entre ellos, y se debe a las ondas electromagnéticas que los cuerpos radian de acuerdo a su temperatura. El sol es la fuente más importante que transfiere energía por radiación.
- Por evaporación: implica la transmisión de calor unidireccional del organismo hacia el aire por la evaporación respiratoria y del sudor. Esta pérdida de calor del organismo depende de la cantidad de agua evaporada; a través del sudor o en la respiración. La evaporación depende de la velocidad del aire del ambiente, de su temperatura y de su presión parcial de vapor.

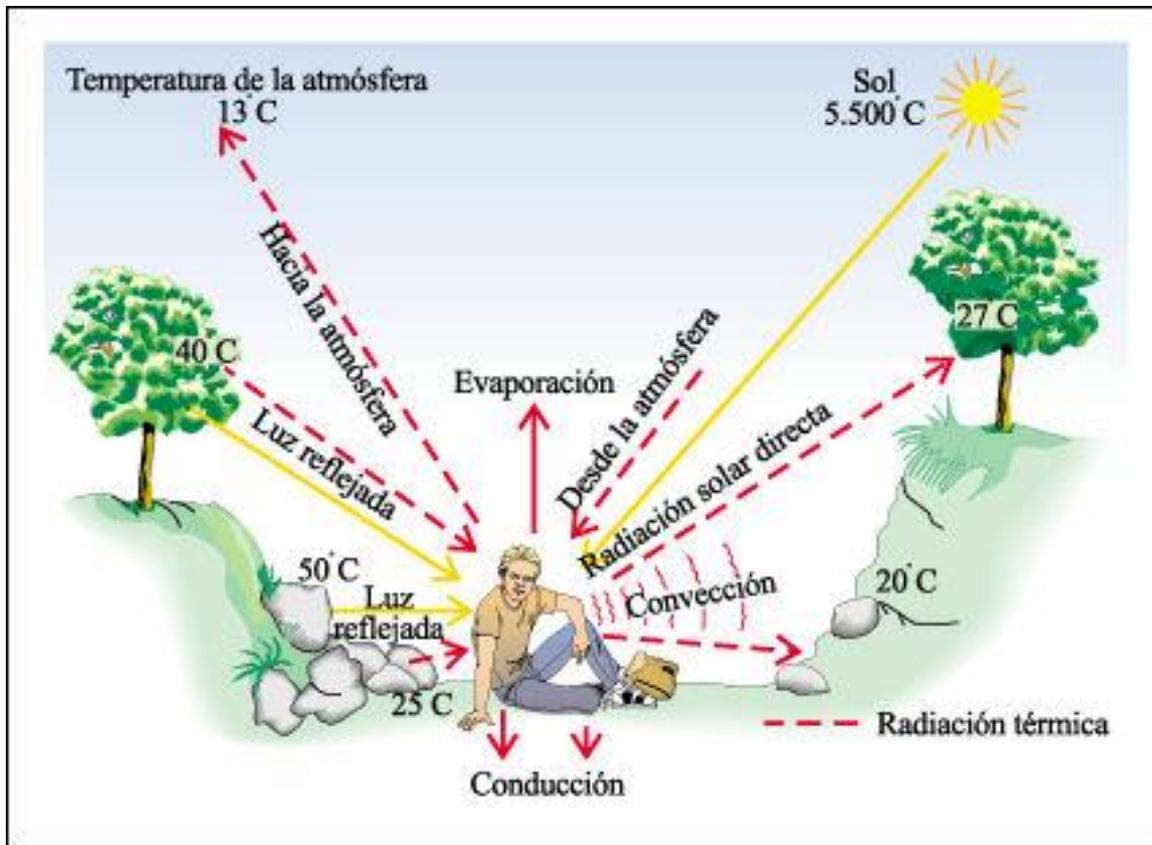


Figura 2. 1. Representación del intercambio de calor entre un ser humano y su entorno. (Wensel, 1980)

La transferencia de calor entre un individuo y su entorno también varía de acuerdo al tipo de actividad que se está realizando, del índice metabólico y el tipo de vestimenta que se utilice, del sexo y edad (FISO 2015).

El intervalo de confort térmico según la Asociación Americana de Ingenieros en Calentamiento, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) se encuentra entre los 23°C a 27°C en verano, y entre los 21°C a los 24.5°C en invierno.

Los modelos de confort térmico adaptativo toman en cuenta la aclimatación de las personas al lugar donde viven. Un ejemplo de esto es el modelo creado para Australia, un país con características climáticas similares a México (Humphrey 2000), donde la temperatura de neutralidad está dada por la siguiente ecuación:

$$T_n = 13.5 + 0.54T_{ma}$$

Con T_n la temperatura de neutralidad y T_{ma} es la temperatura ambiente media mensual del lugar, dado en °C.

La amplitud de la zona de confort térmico depende de la amplitud de la oscilación de la temperatura ambiente, como lo muestra la tabla 2.1.

Tabla 2. 1. Amplitud de la zona de confort para diferentes amplitudes de oscilación promedio de la temperatura. (Fuente: Huelsz 2016).

Amplitud de la oscilación promedio de la temperatura del aire ΔT_a (°C)	Amplitud de la zona de confort ΔT_c (°C)
$\Delta T_a < 13$	2.5
$13 \leq \Delta T_a < 16$	3.0
$16 \leq \Delta T_a < 19$	3.5
$19 \leq \Delta T_a < 24$	4.0
$24 \leq \Delta T_a < 28$	4.5
$28 \leq \Delta T_a < 33$	5.0
$33 \leq \Delta T_a < 38$	5.5
$38 \leq \Delta T_a < 45$	6.0
$45 \leq \Delta T_a < 52$	6.5
$52 \leq \Delta T_a$	7.0

La temperatura humidex es un parámetro que involucra en un mismo dato el efecto combinado de la temperatura del aire y la humedad de la atmósfera a manera de temperatura percibida equivalente; por lo tanto la unidad de medida es el grado Celsius. Se ideó en 1965 por meteorólogos canadienses con el fin de describir cuantitativamente la percepción del clima caliente y húmedo por parte de un individuo promedio, así como para facilitar al usuario información meteorológica la comprensión del efecto combinado de la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa.

La temperatura humidex ha sido utilizada principalmente para prevenir morbilidad y mortalidad de personas, sobre todo mayores de 60 años, durante los veranos extremadamente húmedos y cálidos en Canadá, corresponde a un modelo de confort térmico adaptativo (Gómez - Azpeitia 2006).

La ecuación para obtener la temperatura humidex se basa en el trabajo de J. M. Masterton y F. A. Richardson de Atmospheric Environment Service (AES 1979). La ecuación aquí presentada es una modificación de la original, desarrollada por Karen E. Smoyer-Tomic y Daniel G. C. Rainhman (Smoyer 2001).

$$Humidex = T + h$$

T es la temperatura de bulbo seco [°C] y h es el factor de humedad. Con

$$h = 5/9(pv - 10)$$

Donde pv es la presión de vapor calculada utilizando la ecuación modificada de Clausius-Clyperon que relaciona la temperatura con la presión.

$$pv = 6.11 e^{(Mw \frac{L}{R})(\frac{1}{273.16} - \frac{1}{TD})}$$

Donde 6.11 hPa es la presión de saturación del vapor a la temperatura estándar de 273.16 K, Mw [g/mol] es el peso molecular del agua, L [cal/g] el calor latente de vaporización, R la constante universal de los gases [cal/mol K], 273.16 K el punto de fusión del hielo y TD [K] la temperatura de punto de rocío.

Por tanto

$$Humidex = T * 0.555(6.11 * e^{5417.753 * (\frac{1}{273.16} - \frac{1}{TD})})$$

La temperatura humidex también se puede calcular en términos de la temperatura del aire (T) y la humedad relativa (HR)

$$Humidex = T + \frac{5}{9} (e^{6.112 * \frac{107.5T}{237.3} + T} * \frac{HR}{100} - 10)$$

A pesar de sus limitaciones, la temperatura humidex ha resultado ser un medio útil para determinar la sensación real del clima exterior (Gómez-Azpeitia 2006).

El modelo adaptativo obtenido de investigaciones en la ciudad mexicana de Colima, establece los siguientes intervalos de sensación térmica, este modelo es el que se utiliza en esta tesis.

Frío < 20°C	Cálido 33.5°C - 36.0°C
Fresco 20.0°C – 21.4°C	Caluroso 36.1°C - 40.0°C
Ligeramente fresco 21.5 °C – 23.9 °C	Muy caluroso 40.1°C – 45°C
Confort 24.0°C – 30.5°C	Peligroso > 45.1 °C
Ligeramente cálido 30.6°C – 33.4°C	

2.4 Sistemas de climatización

Los sistemas de climatización son un conjunto de elementos que permiten modificar la temperatura y la humedad del aire en un espacio, para llevarlo al intervalo de confort térmico. Este tipo de sistema se puede clasificar según la cantidad de energía externa que requiera (Huelsz 2016).

- Sistema pasivo de climatización: Sistema arquitectónico que permite modificar la temperatura o humedad, promoviendo o evitando la transferencia de calor o humedad en un espacio, sin usar equipo electromecánico (sin energía externa).
- Sistema activo de climatización: Sistema compuesto por equipo electromecánico que modifica la temperatura y/o humedad de un espacio, utiliza grandes cantidades de energía externa.
- Sistema de climatización de bajo consumo (Sistema híbrido): Sistema arquitectónico que permite modificar la temperatura o humedad, promoviendo o evitando la transferencia de calor o humedad en un espacio, que se complementa de algún equipo electromecánico que requiere poca cantidad de energía externa.

3 Características de San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca

San Juan Bautista Tuxtepec es una ciudad y cabecera del municipio homónimo, en lo sucesivo, por simplicidad se le denominará solamente como Tuxtepec. Es la segunda ciudad más poblada del estado de Oaxaca, con una población de 101,810 habitantes en la ciudad y 155,766 habitantes en su municipio (INEGI 2010). La ciudad de Tuxtepec es el principal centro urbano de la región de la Cuenca del Papaloapan ($18^{\circ} 06' 00''$ N $96^{\circ} 07' 00''$ O), y tiene una gran actividad industrial y comercial; convirtiéndose en un punto de convergencia de las actividades de los estados de Oaxaca, Veracruz y Puebla.

3.1 Ubicación

Tuxtepec se ubica al norte del estado de Oaxaca, entre los paralelos $17^{\circ}48'$ y $18^{\circ}19'$ de latitud norte y los meridianos $95^{\circ}51'$ y $96^{\circ}19'$ de longitud oeste. El municipio va de los 10 a los 400 metros sobre el nivel del mar. La zona urbana se encuentra a una altura promedio de 20 metros sobre el nivel del mar (INEGI 2005).

El municipio de Tuxtepec colinda al norte con el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave; al este con el municipio de Loma Bonita; al sur con los municipios de Santiago Jocotepec, Santa María Jacatepec y San José Chiltepec; al oeste con los municipios de San Lucas Ojitlán y San Miguel Soyaltepec. Ocupa el 0.87% de la superficie del estado (INEGI 2010).

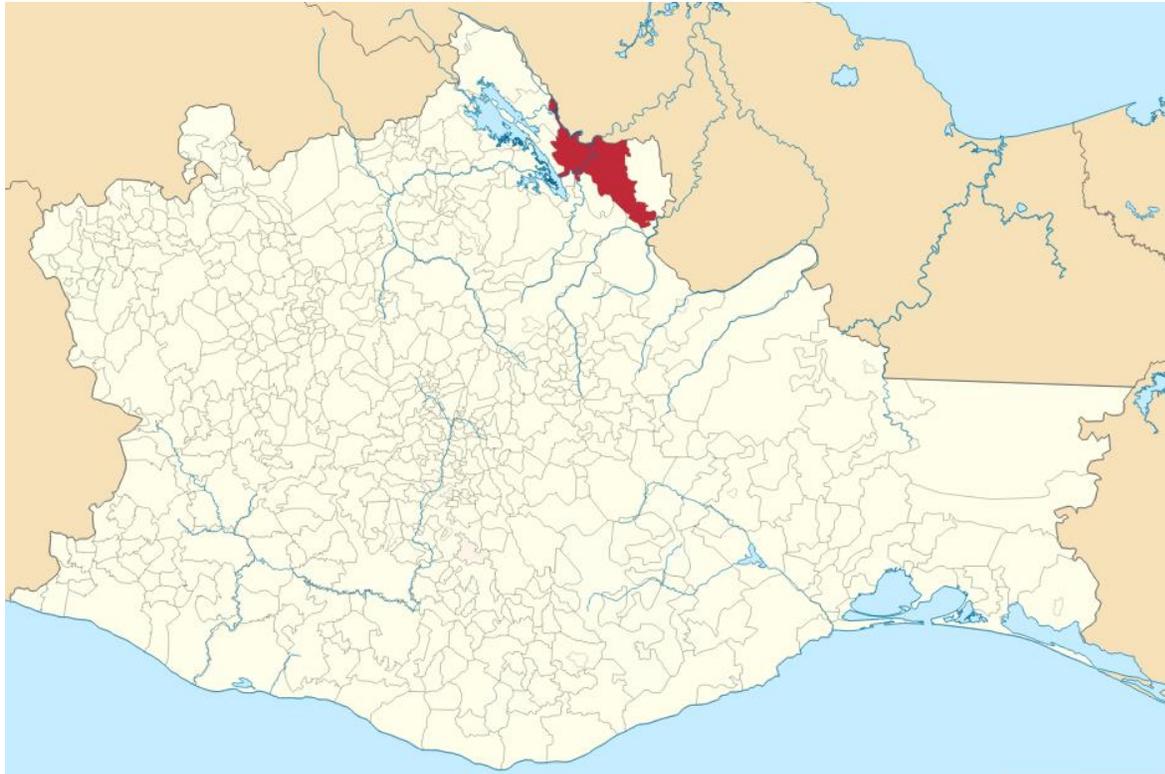


Figura 3. 1 Ubicación del municipio de San Juan Bautista Tuxtepec, marcado en rojo, en el estado de Oaxaca (Fuente: Municipios de Oaxaca 2017).

3.2 Clima

El clima del municipio de Tuxtepec es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano en el 93.41% del territorio, que es donde se ubica la zona urbana; cálido húmedo con lluvias todo el año (3.48%) y cálido subhúmedo con lluvias en verano (3.11%) (INEGI 2005).

En el municipio se registran altas temperaturas y altos valores de humedad relativa durante la mayor parte del año, con poca oscilación entre la temperatura nocturna y diurna. Además, se presenta una cantidad significativa de precipitación durante el año que, aunado a la cercanía de grandes cuerpos de agua como lo son las presas Miguel Alemán y Miguel de la Madrid, y el río Papaloapan; propician altos valores de humedad de Tuxtepec.

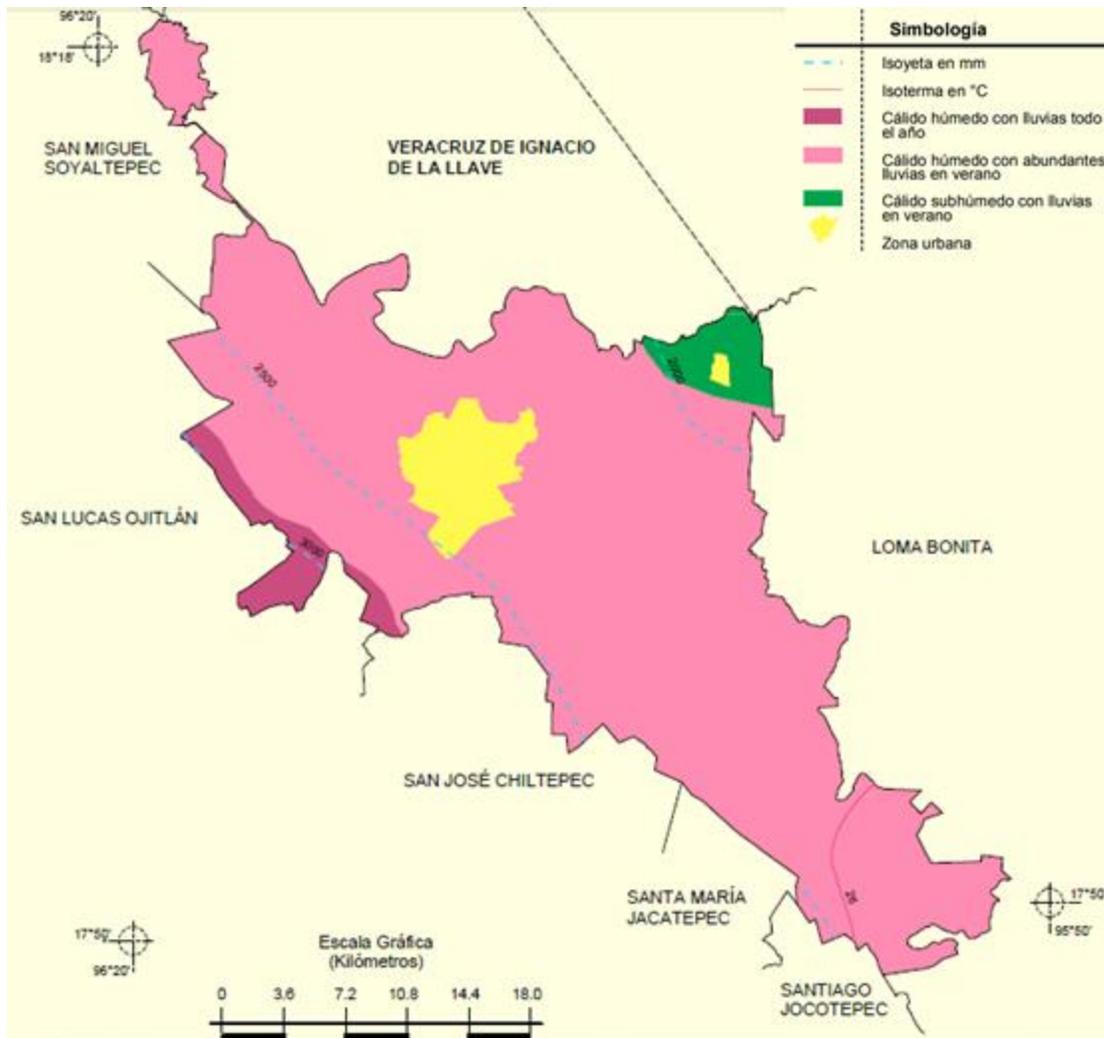


Figura 3. 2. Climas del municipio de San Juan Bautista Tuxtepec (Fuente: INEGI 2005)

Los datos recabados durante 60 años en la zona por el Sistema Meteorológico Nacional (SMN 2016), que corresponden a la temperatura media mensual y la precipitación mensual, se pueden observar en la tabla 2, donde se presentan temperaturas superiores a los 20 °C y lluvias superiores a los 2000 mm anuales, típico del clima cálido húmedo.

Tabla 3. 1. Normales climatológicas de Tuxtepec en el periodo de 1951-2010 (SMN 2016).

SERVICIO METEROROLÓGICO NACIONAL													
NORMALES CLIMATOLÓGICAS													
ESTADO DE OAXACA							PERIODO: 1951-2010						
ESTACIÓN 00020210 SAN JUAN BAUTISTA TUXTEPEC SM							LATITUD: 18°03'00" N		LONGITUD: 096°04'00" W		ALTURA: 33.0 MSNM		
ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
TEMPERATURA MÁXIMA													
normal	27.7	29.0	32.0	35.2	36.0	34.5	32.9	33.1	32.6	30.9	29.5	28.0	31.8
máxima mensual	30.7	32.8	34.6	38.0	38.1	37.0	36.2	35.9	34.1	33.3	32.9	29.5	
año de máxima	1964	1962	1974	1974	1974	1963	1975	1975	1973	1963	1973	1971	
máxima diaria	35	39	43	43.5	44	40	40	38	37	37	36	34	
fecha máximo diaria	18/1963	25/1971	27/1973	28/1971	02/1964	28/1975	28/1975	29/1974	07/1962	15/1966	19/1973	09/1961	
años con datos	14	14	15	14	15	14	15	15	14	13	14	14	
TEMPERATURA MEDIA													
normal	22.7	23.3	25.8	28.6	29.6	29.0	27.9	27.9	27.7	26.2	24.7	23.1	26.4
años con datos	14	14	15	14	15	14	15	15	14	13	14	14	
TEMPERATURA MÍNIMA													
normal	17.6	17.6	19.7	22.0	23.2	23.5	22.8	22.7	22.8	21.6	19.9	18.2	21.0
mínima mensual	16.5	16.1	17.3	19.6	22.0	21.6	21.8	21.5	21.3	19.2	17.1	15.4	
año de mínima	1967	1963	1968	1971	1970	1974	1975	1972	1974	1974	1970	1974	
mínima diaria	10	11	12	15	17	17	19	19	19	16	12	12	
fecha mínima diaria	12/1973	08/1963	13/1970	08/1971	07/1970	05/1973	27/1972	28/1973	29/1967	25/1965	29/1966	30/1969	
años con datos	14	14	15	14	15	14	15		14	13	14	14	
PRECIPITACIÓN													
normal	32.2	34.2	29.8	31.9	57.4	372.2	470.0	395.4	463.2	206.9	69.5	48.4	2,211.10
máxima mensual	93.0	98.5	72.0	154.5	170.5	608.5	812.5	1139.0	986.0	440.0	161.0	125.0	
año de máxima	1974	1966	1966	1962	1968	1968	1961	1969	1969	1966	1972	1964	
máxima diaria	61	40.5	31.5	40	61	111	115	152	160	160	40	47	
fecha máximo diaria	16/1971	03/1967	30/1964	01/1962	15/1972	17/1965	27/1961	15/1969	20/1964	11/1966	01/1967	21/1964	
años con datos	14	14	15	14	15	14	15	15	14	13	14	14	
no. de días con lluvia	4.5	5.4	4.9	3.0	4.6	14.6	19.1	17.6	17.0	11.8	6.4	5.0	113.9
años con datos	14	14	15	14	15	14	15	15	14	13	14	14	
niebla	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2
años con datos	14	14	15	14	15	14	15	15	14	13	14	14	
granizo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
año con datos	14	14	15	14	15	14	15	15	14	13	14	14	
tormenta e.	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.5	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.9
años con datos	14	14	15	14	15	14	15	15	14	13	14	14	

Conocer el recorrido aparente del sol a través del año por medio de la gráfica solar permite diseñar construcciones que regulen el ingreso de la radiación solar según sus necesidades. Para el caso de Tuxtepec, se diseñan elementos de sombreado para evitar el ingreso de radiación solar directa, que incremente la temperatura interior y repercuta en la disminución del confort térmico. En la figura 3.3 se presenta la gráfica solar para la latitud 18°6' norte, en donde se encuentra la zona urbana de Tuxtepec.

3.2.1 Datos de clima de estación meteorológica automatizada de Ciudad Alemán, Ver.

La estación meteorológica automatizada más cercana a Tuxtepec, es la que se encuentra en Ciudad Alemán, Veracruz, una población ubicada aproximadamente a 10 km al noroeste de Tuxtepec. Se tuvo acceso a datos de temperatura, humedad relativa, radiación solar y dirección

y magnitud del viento de seis años (de 2010 a 2015). Para elegir el año representativo se realizaron los promedios de las temperaturas y humedades relativas mensuales de los seis años, los cuales fueron comparados con los promedios mensuales de cada año. Los promedios mensuales de temperaturas de 2014 presentaron menores diferencias con los promedios mensuales de los seis años, por lo que este año fue elegido como el año representativo. Los datos de 2014, que son los que se utilizan en esta tesis, se presentan en la tabla 3.2.

Tabla 3. 2. Valores medios de temperatura (EMA 2014).

SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL													
NORMALES CLIMATOLÓGICAS													
ESTADO DE: VERACRUZ							PERIODO: ENERO A DICIEMBRE 2014						
ESTACIÓN: CIUDAD ALEMÁN SMN EMAS				LATITUD: 18°11'23" N.			LONGITUD: 096°05'53" W			ALTURA: 107 MSNM.			
ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
TEMPERATURA MÁXIMA PROMEDIO	27.1	30.9	32.1	35.4	33.4	33.7	33.8	34.8	32.2	31.6	28	27.9	31.7
TEMPERATURA MÁXIMA	31.6	35.3	39.9	41.9	38.4	36.6	37.6	36.6	36.3	35.7	33.4	32.9	41.9
TEMPERATURA MEDIA	20.7	23.4	25	27.4	26.9	27.8	27.5	27.9	26.4	26	22.8	22.5	25.4
TEMPERATURA MÍNIMA PROMEDIO	16.4	19.2	20.6	22.2	22.9	23.9	23.2	23.3	23.1	22.4	19.6	19.2	21.3
TEMPERATURA MÍNIMA	12.8	16	14.8	16.3	19.3	22.5	20.7	21.7	21.7	19.1	15	14.9	12.8

Con los datos de la estación meteorológica automatizada de Ciudad Alemán se calculó la temperatura promedio de cada hora del día según el mes correspondiente. Esta información se presenta en la tabla 3.3. Con esos datos se calculó la temperatura humidex, que se presenta en la tabla 3.4.

Tabla 3. 3. Valores promedios de temperatura y humedad relativa, por hora y mes.

Día Promedio con Temperatura y Humedad Relativa																										
Mes	Hora																							prom.		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23		24	
ENE	T (°C)	19	18	18	18	18	17	17	17	17	17	19	21	23	24	25	25	26	26	25	24	22	21	20	19	21
	H (%)	86	87	87	88	90	90	90	91	91	85	75	66	59	54	52	51	51	53	57	67	72	77	81	84	74
FEB	T (°C)	21	21	21	20	20	20	20	20	20	21	23	25	26	27	28	29	29	29	28	26	24	23	22	21	23
	H (%)	89	90	91	92	93	93	93	93	93	88	79	70	64	58	55	53	51	51	54	64	76	83	86	88	77
MAR	T (°C)	23	23	22	22	22	21	21	21	22	23	25	26	28	29	29	30	30	30	29	27	25	24	24	23	25
	H (%)	84	85	86	87	88	88	90	90	88	81	74	67	61	57	54	52	51	52	56	66	73	78	81	83	74
ABR	T (°C)	24	24	23	23	22	22	22	22	23	25	27	28	29	31	32	32	33	33	31	29	27	26	25	25	27
	H (%)	75	76	78	80	82	84	85	85	80	72	64	57	52	47	43	40	39	40	46	54	62	67	70	73	65
MAY	T (°C)	25	24	24	24	23	23	23	23	24	26	28	29	30	30	31	32	32	32	30	29	27	26	25	25	27
	H (%)	84	85	87	89	90	90	91	91	86	78	70	64	60	58	55	52	51	52	59	64	72	77	81	83	74
JUN	T (°C)	24	24	24	24	24	24	24	24	24	26	27	29	30	31	31	31	32	31	30	29	27	26	26	25	27
	H (%)	86	90	91	92	92	92	92	92	89	83	76	70	65	61	59	58	57	58	64	70	76	82	84	87	78
JUL	T (°C)	25	25	25	24	24	24	24	24	24	26	28	29	30	31	32	32	33	32	31	30	28	27	26	26	27
	H (%)	90	92	93	94	95	95	96	96	94	86	78	70	65	62	60	58	56	58	63	70	77	83	87	89	79
AGO	T (°C)	26	25	25	24	24	24	24	23	25	27	29	31	32	33	33	33	33	32	31	30	28	27	26	26	28
	H (%)	90	91	92	92	93	94	94	94	89	82	72	64	60	55	52	52	53	59	65	71	78	83	86	89	77
SEP	T (°C)	24	24	23	23	23	23	23	23	23	25	27	28	29	30	30	30	30	29	28	27	26	25	25	24	26
	H (%)	90	91	91	92	93	93	94	94	92	85	78	71	65	61	60	60	60	64	70	77	82	85	87	89	80
OCT	T (°C)	24	24	23	23	23	23	23	23	23	25	27	28	29	30	30	30	30	29	28	27	26	25	25	24	26
	H (%)	90	91	91	92	93	93	94	94	92	85	78	71	65	61	60	60	60	64	70	77	82	85	87	89	80
NOV	T (°C)	20	20	20	20	20	20	19	19	20	21	22	24	25	25	26	26	25	24	24	23	22	21	21	21	22
	H (%)	87	88	89	89	90	90	90	90	91	86	79	71	66	61	60	60	62	63	70	76	80	82	84	85	79
DIC	T (°C)	21	21	20	20	20	20	19	20	21	23	24	25	26	26	27	27	26	25	23	23	22	21	21	21	23
	H (%)	93	94	94	95	95	96	96	97	97	93	84	75	69	65	63	62	63	66	71	78	83	87	89	91	83
H (%)		HUMEDAD RELATIVA																								
T (°C)		TEMPERATURA DEL AIRE																								

Tabla 3. 4. Temperatura humidex de Tuxtepec calculado con datos del año típico 2014.

Día Promedio Horario Mensual Humidex Color												
Hora	Mes											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
06:00	21.9	26.4	28.5	29.0	32.3	33.1	34.1	33.6	32.0	32.0	25.5	26.8
07:00	21.7	26.2	28.2	28.8	32.1	33.0	33.8	33.4	31.9	31.9	25.3	26.4
08:00	21.5	26.1	28.0	28.7	32.2	33.1	33.9	33.2	31.7	31.7	25.1	26.2
09:00	21.1	26.2	28.8	29.9	33.7	34.3	35.1	34.9	32.7	32.7	25.6	26.5
10:00	20.6	27.7	30.6	31.8	35.5	36.1	36.9	37.3	34.9	34.9	27.1	28.3
11:00	21.9	29.6	32.3	33.5	37.0	37.6	38.6	39.5	36.8	36.8	28.6	30.3
12:00	24.2	31.2	33.8	34.9	37.9	38.5	39.9	40.8	38.1	38.1	29.6	31.6
13:00	26.0	32.3	34.9	36.0	38.6	39.5	40.8	41.7	38.8	38.8	30.5	32.4
14:00	27.4	33.4	35.7	36.8	39.1	40.3	41.1	42.4	39.1	39.1	31.1	32.8
15:00	28.4	34.1	36.4	37.4	39.8	40.5	41.6	43.0	39.2	39.2	31.4	33.1
16:00	28.9	34.6	36.8	37.9	40.3	40.8	42.2	43.1	39.2	39.2	31.4	33.1
17:00	29.6	34.9	37.3	38.2	40.3	41.0	42.6	43.2	39.1	39.1	31.3	33.2
18:00	30.0	34.8	37.4	38.1	40.2	40.7	42.5	42.3	38.6	38.6	29.2	32.7
19:00	30.1	34.2	36.7	37.3	39.3	40.0	41.9	41.3	37.7	37.7	29.6	31.7
20:00	30.1	32.5	34.6	35.6	37.2	38.4	40.4	40.6	36.6	36.6	28.6	30.4
21:00	27.4	30.8	32.8	33.7	35.6	37.1	38.8	38.9	35.6	35.6	28.0	29.7
22:00	26.1	29.6	31.8	32.8	34.8	36.0	37.9	38.0	34.8	34.8	27.5	29.1
23:00	25.0	28.9	31.2	32.0	34.2	35.5	37.3	37.4	34.3	34.3	27.1	28.7
00:00	24.4	28.4	30.8	31.7	33.9	34.8	36.6	37.0	33.8	33.8	26.9	28.3
01:00	23.7	28.1	30.4	31.2	33.7	32.2	36.0	36.6	33.4	33.4	26.6	28.1
02:00	23.2	27.8	29.9	30.7	33.3	33.9	35.5	35.9	33.0	33.0	26.4	27.8
03:00	22.7	27.5	29.4	30.2	33.0	33.7	35.1	35.3	32.7	32.7	26.1	27.5
04:00	22.6	27.0	29.1	29.8	32.8		34.8	34.7	32.4	32.4	25.8	27.3
05:00	22.4	26.7	28.7	29.3	32.5	33.3	34.5	34.0	32.2	32.2	25.7	27.1
CLASIFICACIÓN DE TEMPERATURAS	Muy Frío	Frío	Ligera-mente Fresco	Confort	Ligera-mente Cálido	Caluroso	Muy Caluroso					
	≤ 19.90°C	20.0-21.49°C	21.5-23.9°C	24.0-30.5°C	30.6-33.4°C	33.5-36.1°C	>36.1°C					

4 Arquitectura de la vivienda tuxtepecana

La población de Tuxtepec fue fundada en el periodo prehispánico, con un asentamiento olmeca y posteriormente popoloca, sin embargo, los vestigios más antiguos de edificios, que aún se conservan, datan de mediados del siglo XV, cuando este territorio (Tochtepec) fue anexado al imperio azteca, destacando una pirámide de laja y piedras de río, conocida popularmente como “las ruinas del castillo de Moctezuma”, en el actual barrio de “El Castillo” (García 1996).

Durante la primera etapa del periodo colonial, las comunidades de Puctlancingo, Otatitlán y Tuxtepec fueron relocalizadas en el sitio llamado Cacahuaxuchitlán, según la ordenanza de congregaciones de los pueblos de indios, impulsado por el rey Felipe II de España. La congregación de Cacahuaxuchitlán solo duró ochenta años, ya que después de este periodo los pueblos retornaron a sus antiguas localizaciones, aunque Tuxtepec se asentó aproximadamente dos kilómetros hacia el oeste de la población original, en el meandro que forma el río en este punto (Espinosa 1961). En Tuxtepec no existió un asentamiento regular de españoles, manteniendo su condición de pueblo de indios durante todo el periodo colonial (García 1996).

Los datos más antiguos que hacen referencia a construcciones de “cal y canto” en Tuxtepec son de 1852, relacionados con la iglesia principal (ahora catedral de Tuxtepec), y se cree que posterior a este suceso se comenzaron a construir viviendas al estilo de los pueblos de la baja cuenca del río Papaloapan como Tlacotalpan y Cosamaloapan (García 1996).

Es importante señalar que antes de la gran inundación de septiembre de 1944, Tuxtepec contaba en su totalidad con construcciones que tienen los elementos y materiales descritos en este capítulo. Posterior a este acontecimiento, las viejas casonas fueron reemplazadas por nuevos estilos de construcción, este proceso se aceleró gracias a los programas de urbanización de la región a cargo de la Comisión del Papaloapan, así como, la rápida industrialización de la ciudad, como se puede observar en la figura 4.1. (García 1996).



Figura 4. 1. El cambio de Tuxtepec. Fotografía del lado izquierdo tomada en la década de 1930, la fotografía del lado derecho tomada en la década de 1980, en Avenida Independencia Esquina Hidalgo (Fuente: Colección particular de Sergio Alessio).

4.1 Arquitectura vernácula

La traza urbana de Tuxtepec se desarrolló alrededor de largas y anchas avenidas paralelas al margen del río Papaloapan, atravesadas por pequeñas y cortas calles. Las avenidas tenían dirección este-oeste, mientras que las calles tenían dirección norte-sur (García 1996). Actualmente, esta traza urbana se puede observar en la zona centro de la ciudad como lo muestra la figura 4.2, en donde aún se siguen denominando avenidas a las vialidades con orientación este-oeste, y calles a las vialidades con orientación norte-sur.



Figura 4. 2. Traza urbana de Tuxtepec. En el recuadro rojo se encuentra la zona centro de la ciudad (Fuente: Google Earth).

4.1.1 Casonas en el primer cuadro de la ciudad

Las familias con altos recursos económicos vivían en el primer cuadro de la ciudad, lo que ahora es el centro, debido a que en esa zona se concentraban los servicios de la población. Las fachadas principales de las casas miraban hacia las avenidas, y contaban con un gran acceso (puerta principal) y ventanales, estaban anteceditas por el elemento arquitectónico más característico de la región: los corredores o portales como lo muestra la figura 4.3. En la primera sección, paralela a la calle, se localizaban la estancia y la recámara principal; en la segunda sección se encontraban el comedor y las demás recámaras, en algunos casos la vivienda se limitaba únicamente a una sección que iba a todo lo ancho del terreno, con la fachada principal orientada hacia la avenida (Priego 2001). Este tipo de casas tenía un patio que se encontraba en la parte trasera del terreno.



Figura 4. 3. Fachada principal mirando hacia la Avenida Independencia en dirección norte (Fuente: Colección privada de Humberto Patatuchi).

Los corredores son pequeños patios techados con forma rectangular (poco anchos pero muy largos) que se encuentran frente a la fachada principal o del patio, el techo es sostenido por una serie de columnas y arcos en la parte frontal y por el muro de la construcción (Capitel 2005).

Debido a la traza urbana del primer cuadro de la población, las fachadas principales de las casas tenían orientación norte o sur, es decir, las puertas y ventanas de la casa se encontraban al sur y al norte de la vivienda.

Las viviendas también podían tener forma rectangular, de “L” o de “U”. En el caso de las casas en forma de “L” como se muestra en la figura 4.4, las recámaras estaban localizadas al oeste para que las ventanas dieran al este. Para el caso de las viviendas en forma de “U”, en la zona este se encontraba la cocina, bodegas o almacenes de la casa.

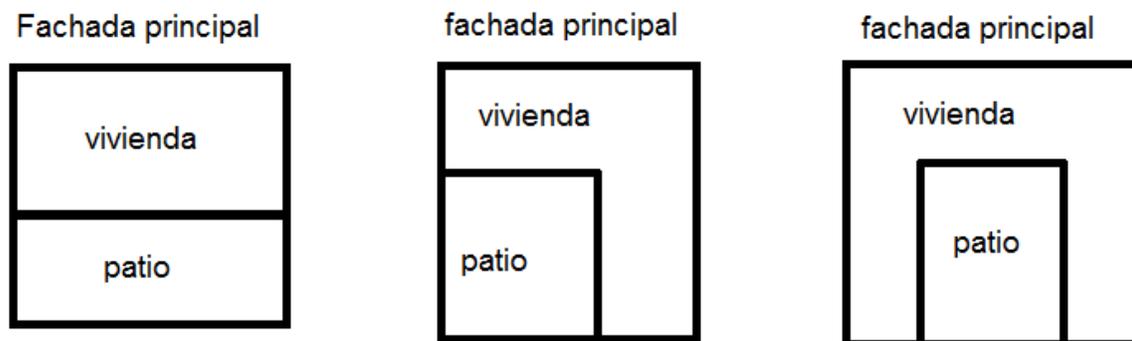


Figura 4.4. Tipos de formas de planta de las viviendas del primer cuadro de la ciudad. a) con forma rectangular, b) con forma de L y c) con forma de U.

Los techos eran de dos aguas hechos de tejas de barro cocido colocadas sobre una base de madera (madera del árbol de pimienta o madera de cedro tropical), y se inclinaban hacia el norte y sur con pronunciadas pendientes, de hasta 45° respecto a la horizontal, que vista desde un corte lateral, forman un triángulo isósceles. Los techos de los corredores tenían una menor pendiente, como se observa en la figura 4.5.

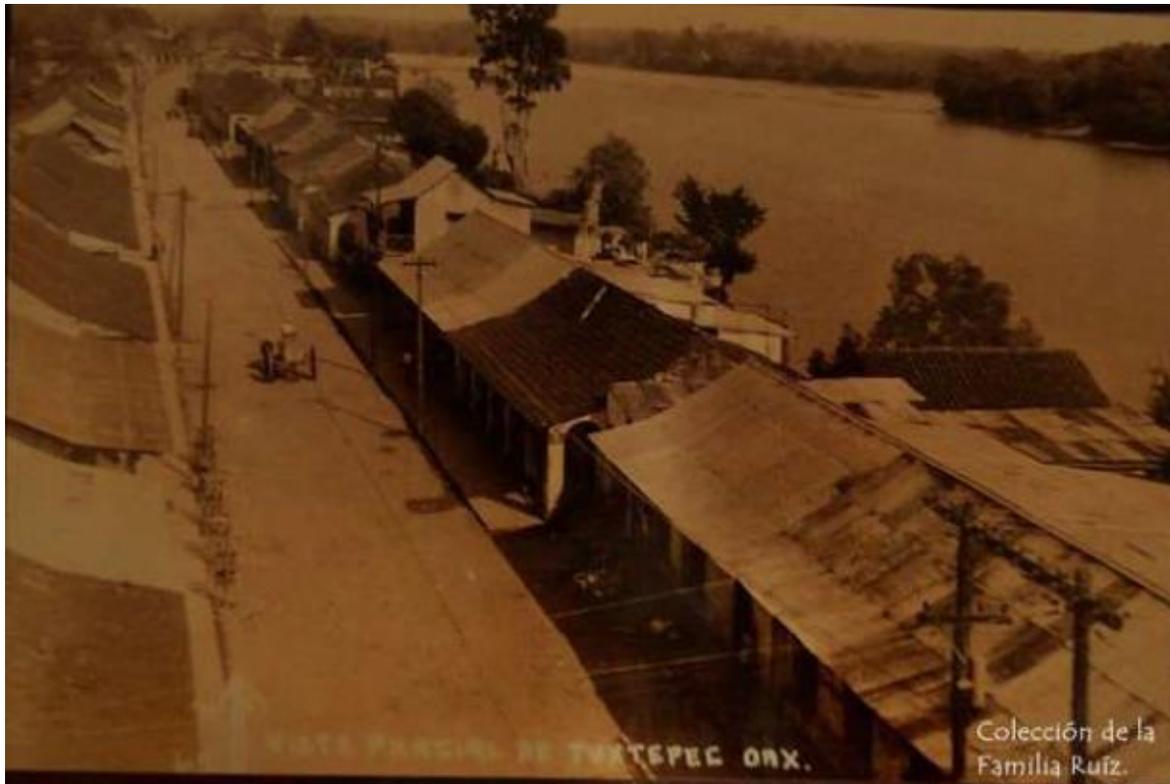


Figura 4. 5. Casas con tejados de dos aguas en la Avenida Independencia con el río Papaloapan al fondo (Fuente: Colección privada de la familia Ruiz).

Los muros de la construcción eran anchos, de rocas de río unidas por una mezcla de cal y arena, de aproximadamente 40 cm, los cuales se encalaban o pintaban de blanco o de colores claros como el beige o melón. Las ventanas eran de dos hojas y verticales (alargadas), aunque eran más anchas en comparación a las tipologías de ventanas verticales de otras regiones del país (Priego 2001). Las ventanas se colocaban en la fachada principal en dirección norte o sur, y en el interior, mirando hacia el patio central, en pocas ocasiones se colocaban en dirección este y no se colocaban ventanas en dirección oeste. Las puertas de las edificaciones guardaban la misma proporción de las ventanas, estas en general son de dos hojas, aunque también había de cuatro hojas en puertas interiores. Otro tipo importante de puerta que se presentaba en la zona era la de dos hojas con tableros de madera y cristal en la parte superior el cual era esmerilado y biselado en la mayoría de los casos para evitar que se observara al interior de las recámaras desde la estancia y el portal, que era donde generalmente se colocaban este tipo de puertas. Una puerta característica de la región era la “persiana”, la cual era una puerta de dos hojas de menor altura que la principal; se ubicaban inmediatamente antes que la puerta principal, generalmente la parte inferior era de madera de tableros y la parte superior era de madera con persianas fijas, la función de esta puerta era la de evitar la visibilidad al interior de la vivienda hasta cierta altura y permitir el paso del aire por arriba y por debajo de esta desde el portal o corredor (Priego 2001). Para el techo de la vivienda se realizaba un armazón con vigas y viguetas de madera que formaban una cuadrícula, y sobre esta estructura se colocaban las tejas de barro cocido.

Las ventanas y puertas principales estaban orientadas al norte o al sur, lo que disminuía el ingreso de radiación solar directa en comparación a ventanas y puertas orientadas al este y oeste. Además, esta orientación favorecía la entrada del viento que tiene dirección predominante del norte, permitiendo la ventilación natural dentro de la vivienda. La orientación de las recámaras en la zona este de la vivienda es óptima, porque cuando el sol incide en las primeras horas de la mañana el aire es más fresco en comparación a las zonas donde inciden los rayos del sol de la tarde donde la temperatura es mayor. Debido a la alta precipitación de la zona, la inclinación de los techos era muy pronunciada para sacar el agua lo más lejos del muro, pero también tenía una función importante para la disminución de ganancia de calor, debido a que el techo recibe una menor radiación solar, gracias a su inclinación en dirección norte y sur, respecto a las superficies horizontales (Díaz 2012). También, esta geometría permitía crear zonas de alta presión a barlovento de la vivienda, y zonas de baja presión a sotavento, lo que propiciaba el intercambio de aire en el interior del edificio.

Las grandes dimensiones de las ventanas y puertas buscaban el mayor acceso de aire y luz al interior de la vivienda, además, al tener las ventanas dispuestas en la dirección norte-sur paralela a la dirección dominante del viento (proveniente del norte) se favorecía la ventilación cruzada en las habitaciones (Guimarães 2008) y la circulación del aire por los callejones que tenían la misma dirección.

Los corredores fungían como aleros, elementos de protección de radiación solar, ya que evitaba la entrada de radiación directa al interior de la casa, y además permitía a los peatones circulación cubierta, sombreada y de agradable temperatura.

4.1.2 Casas alrededor del primer cuadro de la ciudad y en las zonas rurales

Las familias con menores recursos económicos o dedicados al campo vivían alrededor del primer cuadro de la ciudad, o en la zona rural del municipio, por lo que las viviendas en esta zona eran más sencillas respecto a las anteriores.

Las fachadas principales de las casas tenían como frente a los caminos, o el frente del terreno. Constaba de una puerta principal con pequeñas ventanas cuadradas o sin ventanas, en ocasiones estaban antecedidas por corredores, pero comúnmente no los tenían. Las casas ubicadas en la periferia del primer cuadro tenían su fachada principal con orientación norte o sur, como lo muestra la figura 4.6, pero las que se encontraban en la zona rural no tenían una orientación preferencial, ya que no se encontraban dentro de la traza urbana de la ciudad y su orientación dependía del camino y de las condiciones del terreno. Las casas se construían en la zona central del terreno, teniendo alrededor grandes árboles frutales. La forma de la planta

principal de este tipo de viviendas era un rectángulo, con el lado mayor paralelo a la fachada principal (Aguirre 2009).



Figura 4. 6. Viviendas del Barrio de la Piragua en los años 30 (Fuente: Colección privada de la familia Trujano Ahuja).

Los techos eran de hojas de palma de marrachao (*sabal mexicana*) o palma de coyol (*Acrocomia aculeata*) que se colocaban sobre una base de madera de la palma de coco (*cocos nucifera*), madera de coyol, madera del árbol de pimienta (*pimenta dioica*) o madera de cedro tropical (*Cedrela odorata*). Y al igual que en las casonas del primer cuadro de la ciudad, este tipo de viviendas tenían techos de dos aguas con pendientes pronunciadas en la dirección de la fachada principal, como se puede observar en la figura 4.7. El espacio generado bajo las dos aguas se utilizaba como tapanco, en el que se guardaban utensilios y materias primas.



Figura 4. 7 Casa de palma en las afueras de Tuxtepec (Fuente Colección privada de la familia Trujano Ahuja).

Los muros eran muy livianos con un grosor máximo de 5cm, debido a que se construían con troncos de cañas de otate o de bambú; peciolos de las hojas de la palma de coco o coyol; tablas de madera de cedro tropical, sí las paredes estaban hechas de cañas de otate o de peciolos de las hojas de la palma de coco o coyol, se disponían en forma horizontal, aunque también se podían disponer en forma vertical, pero la disposición vertical es más común para los muros hechos con madera de cedro tropical.

Cuando existían ventanas, estas tenían la dirección de la fachada principal, pero es más común que este tipo de viviendas no las tuvieran. Para el techo de la vivienda se realizaba un armazón con vigas que fungían como soporte para las hojas de palma de coco, marrachao o coyol.

En comparación a las viviendas construidas en el primer cuadro de la ciudad, estas viviendas eran más rústicas, pero cumplían con el confort térmico debido a que el hogar recibía

protección de la radiación solar de los árboles frutales, que también ofrecían un suministro de oxígeno, la inclinación de los techos minimiza la captación solar (lo poco que dejan pasar los árboles). Que los muros sean tan livianos y que no estén completamente cerrados, pues existen pequeñas aberturas entre las maderas, permite que el viento proveniente de todas las direcciones ingrese a la vivienda, haciéndola muy ventilada.

4.2 Arquitectura actual

En esta sección se describen las características generales de las viviendas y edificaciones que actualmente se construyen en Tuxtepec, como lo son las viviendas de interés social, que están teniendo un crecimiento exponencial debido al incremento de la población y los costos accesibles de los inmuebles, así como la adopción de nuevos diseños y materiales de las construcciones realizadas por particulares.

4.2.1 Arquitectura en vivienda de interés social

Como se mencionó anteriormente, una de las consecuencias de la industrialización del municipio, ha sido el acelerado crecimiento poblacional, que ha traído consigo la demanda de bienes y servicios, como el de vivienda. Para satisfacer esta necesidad, se han construido conjuntos habitacionales, que se han convertido en el hogar de miles de tuxtepecanos. Actualmente estos conjuntos se encuentran en los alrededores de la zona urbana de Tuxtepec, como se puede observar en el mapa de la figura 4.8, donde se han identificado estos tipos de desarrollos.

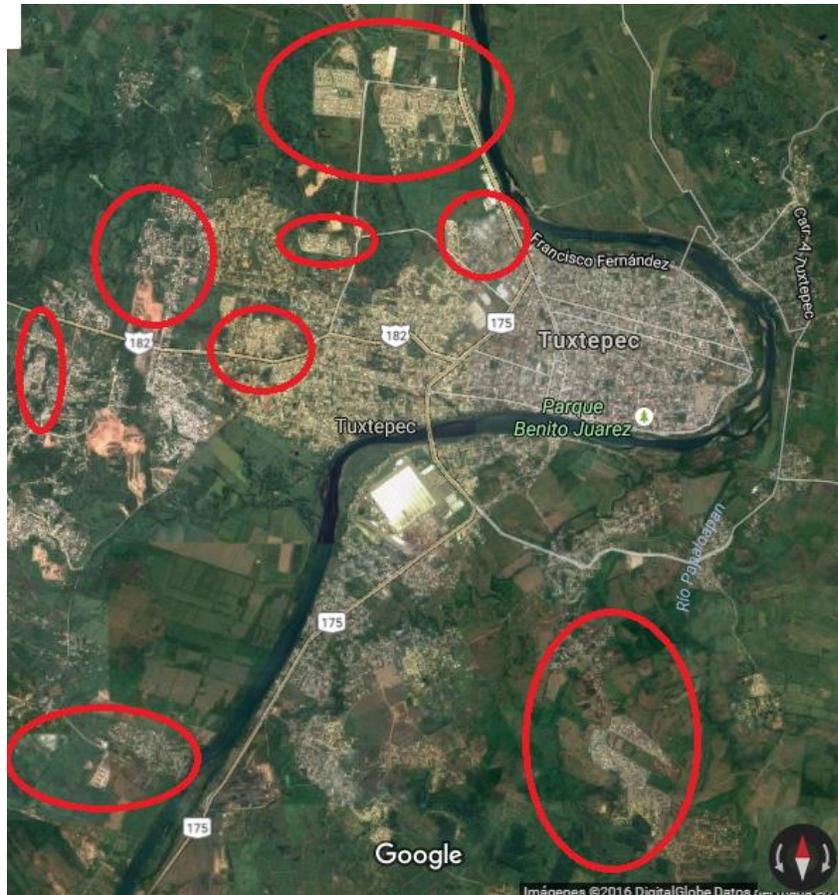


Figura 4. 8. Ubicación de la mayoría de los conjuntos habitacionales (Fuente: Google Earth 2017).

La traza de estos conjuntos habitacionales está definida por la geometría del terreno, en donde los constructores maximizan la cantidad de viviendas que se puedan construir en él. Por lo que, la orientación de las viviendas depende de esta traza, que es particular para cada uno de los conjuntos residenciales.

La fachada principal está orientada hacia la calle, antecedida por un pequeño patio o jardín, y en su mayoría, las fachadas laterales son contiguas a las fachadas laterales de los vecinos. La parte trasera da a al patio de servicios, el cual coincide con el patio de servicios del vecino posterior y se encuentra separado de él por un muro.

Los materiales de las construcciones han dependido de las empresas constructoras y de la época de construcción del conjunto habitacional. Los primeros tenían muros de bloques de concreto con huecos circulares, con las superficies poco rugosas, a los cuales no era necesario colocar una capa de repello; los pisos y techos eran de concreto. El siguiente tipo de construcciones se hicieron de bloques con huecos rectangulares, más ligeros al caso anterior, a los cuales se les aplicaba repello de mortero de arena, cemento y cal; los techos y pisos eran de concreto, aunque ya se ofrecían algunas viviendas con piso de loseta cerámica. Actualmente, la mayoría de las

casas son de muros de tabiques de arcilla (ladrillos rojos), enlucidos con yeso; de techos de concreto y protegidos por una capa de impermeabilizante, y pisos cerámicos.

La forma de la planta de este tipo de vivienda es, en su mayoría, un rectángulo, donde la fachada principal se encuentra en la parte de menor longitud; los techos tienen muy poca pendiente (menores a 5°), o no la tienen; y la altura interior de la vivienda está entre los 2.10 a 2.30 m. Las ventanas son de forma rectangular, y se colocan del mismo lado de las puertas, en la fachada principal y en la fachada trasera. Las constructoras pintan los muros de colores claros como el amarillo, melón o blanco, sin embargo, los dueños pueden pintar sus fachadas de otro tipo de colores. En la figura 4.9 se muestran algunos ejemplos de viviendas de interés social.



Figura 4. 9. Fachada de dos casas de interés social ubicadas en el residencial GESO Playa de Mono.

4.2.2 Arquitectura actual autoproducida

Las familias que han tenido la oportunidad de adquirir una propiedad y construir en ella su vivienda, lo han hecho conforme a sus posibilidades económicas. Aunque existe una similitud en los materiales utilizados para su construcción, ya que la mayoría utiliza ladrillos de concreto huecos para los muros, y en los techos es común la utilización de concreto o lámina de zinc. Las diferencias están en el diseño, los detalles y acabados de la construcción.

La orientación depende de la traza de la colonia o fraccionamiento en el que se encuentre y de la forma geométrica que el propietario desee, así que no existe una orientación preferencial. La forma geométrica de la construcción puede ir desde un prisma rectangular hasta formas más complejas, esto también depende de las posibilidades económicas y gustos del propietario.

A pesar de que la forma de construir y los materiales utilizados en las viviendas de la zona han sufrido una modificación, el corredor es un elemento que ha trascendido a este proceso, ya que la mayoría de las casas construidas de forma particular, tienen uno. Y aunque la arquitectura vernácula desapareció casi por completo de la zona urbana de Tuxtepec, una reciente oleada de “rescate cultural” ha impactado en el diseño arquitectónico de las nuevas viviendas, ya que de nuevo se pueden observar techos con gran inclinación, grandes puertas y ventanas protegidas por corredores o marquesinas, y jardines frontales o interiores. Si bien es cierto que estos elementos se han retomado por cuestiones estéticas, siguen cumpliendo con su objetivo de proteger el interior de las lluvias, reducir la transferencia de calor al interior de la vivienda o fomentar la ventilación de ese espacio. En la figura 4.10 se puede observar un ejemplo de este tipo de viviendas.



Figura 4. 10. Fachada de una vivienda actual autoproducida en Tuxtepec.

5 Estrategias de diseño bioclimático para Tuxtepec

Debido al clima cálido húmedo de Tuxtepec, las estrategias de diseño bioclimático tienen como propósito la reducción de las ganancias térmicas que se transfieren a través de la envolvente y promover la ventilación dentro de la edificación para propiciar la evaporación del sudor de los ocupantes (enfriamiento por evaporación). Es por ello que en este capítulo se presentan la geometría, orientación y localización de ventanas; las protecciones solares y los materiales de la envolvente que propician un ambiente confortable al interior de las viviendas, así como algunos ejemplos de sistemas pasivos de climatización.

5.1 Geometría y orientación de la vivienda

La forma geométrica y orientación de la vivienda juegan un papel importante en el diseño de la construcción, ya que estos factores inciden en la cantidad de radiación solar que capta la edificación a través de su envolvente. En general para climas cálidos, como es el caso del clima de Tuxtepec, lo que interesa es captar la menor energía solar posible por los muros y ventanas, ya que no se desea elevar la temperatura del interior de la edificación. Para ello se recomienda tener una configuración alargada en el eje este-oeste, como se muestra en la figura 5.1, sobre todo cuando la vivienda no está adosada a vecinos. Las ventanas se deben colocar en las fachadas norte y sur, y se recomienda no colocar ventanas en las direcciones este y oeste, o que estas ventanas sean pequeñas y protegidas de la radiación solar. Los vientos dominantes en Tuxtepec, durante todo el año, tienen dirección norte o sur, por lo que esta orientación de las ventanas favorece la ventilación natural, lo que afortunadamente coincide con la orientación adecuada de acuerdo a la radiación solar.

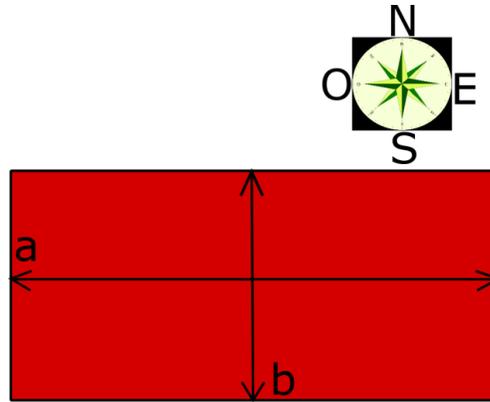


Figura 5. 1. Diagrama de una caseta con base rectangular donde se muestra la configuración geométrica recomendada para el clima de Tuxtepec, sobre todo para viviendas no adosadas a vecinos.

Para mostrar el efecto de la orientación en una vivienda no adosada a vecinos, se realizó la simulación en EnergyPlus, usando como plataforma OpenStudio, de una caseta con base rectangular de 2 m de ancho, 4 m de largo y 3 m de alto. Primero (caso A), se simuló la caseta colocando las fachadas con mayor longitud (4 m) orientadas hacia el este y oeste; posteriormente se hizo un giro de 90° para que las fachadas de 4 m estuvieran orientadas hacia el lado norte y sur (caso B). Se compararon la temperatura promedio anual del aire interior y la radiación solar incidente por unidad de superficie según su orientación, dejando en ambos casos la misma absortancia solar externa, los mismos materiales y el mismo clima. Los resultados se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5. 1. Comparación de los valores de la temperatura promedio anual del aire interior entre la orientación A y la orientación B.

Caso	Tprom anual del aire exterior	Tprom anual del aire interior
	°C	°C
A	25.8	31.3
B	25.8	30.8

De la tabla anterior se puede observar que de las dos configuraciones, la que tuvo una menor temperatura promedio anual, fue el caso B, en donde las fachadas más largas de 4 m, se orientaron hacia el norte y sur, además, también se puede observar que esta configuración disminuye la radiación solar incidente en un 6.3 % respecto a la configuración en donde las fachadas más largas (de 4 m) estuvieron orientadas hacia el este y oeste, por lo que se puede concluir que para el clima de Tuxtepec, la configuración recomendada es tener las fachadas más largas orientadas hacia el norte y sur en viviendas no adosadas a vecinos.

También se hizo una simulación para mostrar el efecto de la orientación de las ventanas, para ello se realizó una caseta cúbica de 3 m de lado, en donde primero se colocaron ventanas cuadradas de 1 m de lado en las fachadas norte y sur, y posteriormente se dio un giro de 90° para que las ventanas estuvieran en orientación este y oeste. Los resultados se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5. 2. Comparación de las temperaturas cuando se tienen ventanas en las fachadas norte-sur con respecto a las ventanas en las fachadas este-oeste.

Caso	Temperatura promedio exterior anual [°C]	Temperatura máxima anual del aire interior [°C]
Ventanas N-S	25.8	34.1
Ventanas E-O		41.4

En la tabla 5.2 se puede observar que de ambas configuraciones, la que tuvo una menor temperatura máxima anual fue la que tiene ventanas orientadas hacia el norte y sur. Por lo que se pueda concluir que la orientación más adecuada para colocar ventanas es la norte y sur.

5.2 Protecciones solares

Las protecciones solares son elementos arquitectónicos de sombreado, que brindan protección de la radiación solar directa en puertas, ventanas y elementos transparentes de la envolvente, para evitar el ingreso de energía por la radiación solar directa al interior de la vivienda. Este tipo de elementos son de mucha utilidad en climas cálidos, como el de Tuxtepec. Los tipos de protección solar son alero, quiebrasol, remetimiento y celosía.

5.2.1 Alero

El alero es un elemento horizontal que brinda protección principalmente en horas cercanas al mediodía solar. Un ejemplo muy conocido en la región es el corredor, que funciona como un gran alero que protege toda la fachada principal de la radiación solar directa.

Para calcular los ángulos de un alero, se deben tener en cuenta las dimensiones de los elementos que se desean proteger (ventanas y puertas principalmente).

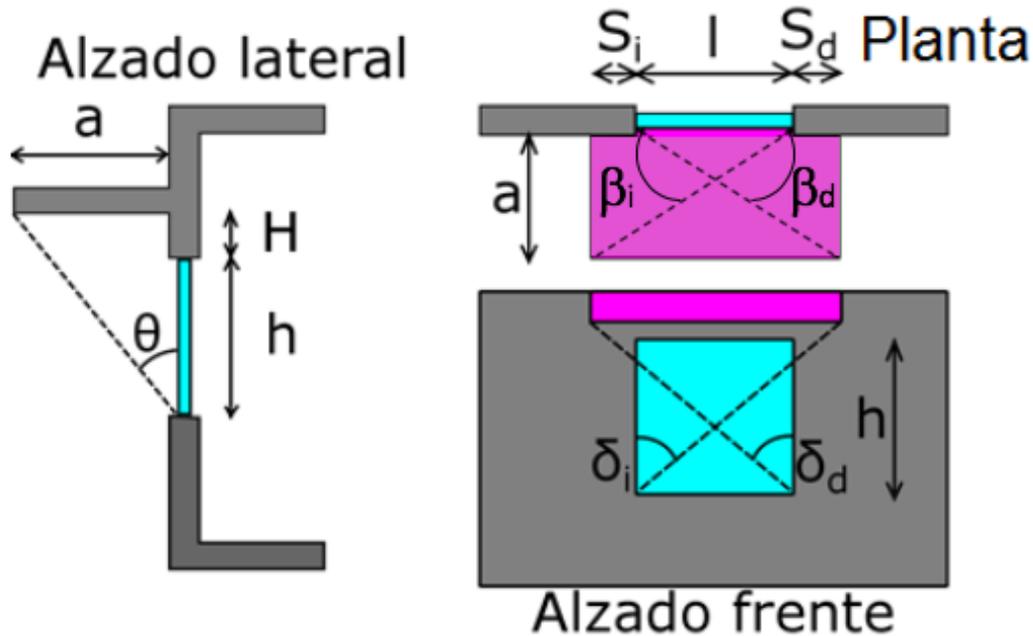


Figura 5. 2. Vistas de alzado lateral, de planta y frente de un alero.

Los ángulos se obtienen definiendo la orientación y el horario que se desea proteger con ayuda de la gráfica solar y la mascarilla de sombras, y geoméricamente se relacionan con las dimensiones de las ventanas y del alero por medio de las siguientes fórmulas:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{a}{h+H} \right) \quad \beta_d = \tan^{-1} \left(\frac{a}{l+s_d} \right) \quad \delta_d = \tan^{-1} \left(\frac{l+s_d}{h+H} \right)$$

Donde a es la longitud horizontal del alero, perpendicular a la pared; h es la altura de la ventana; H es la distancia entre la ventana y el alero; l es el ancho de la ventana; s_i y s_d son las distancias que sobresalen del alero a la ventana con respecto al lado izquierdo y al derecho, respectivamente; θ es el ángulo cenital del alero respecto al plano vertical de la ventana; β_i y β_d son los ángulos azimutales del alero, izquierdo y derecho, respectivamente, medidos desde el plano de la ventana; δ_i y δ_d son los ángulos de altura del alero sobre el plano de la ventana, del lado izquierdo y del derecho, respectivamente.

Para los aleros en ventanas norte y sur, el criterio es la protección solar total en el intervalo de 8:00 am a 4:00 pm. Para aleros en ventanas este, el criterio es la protección solar total de 10:00 am a 12:00 pm (mediodía solar). Para aleros en ventanas oeste, el criterio es la protección solar total de 12:00 pm a 2:00 pm. Los ángulos recomendados para la protección en estos horarios se presentan en la tabla 5.3.

Tabla 5. 3. Ángulos recomendados para un alero en Tuxtepec, para las cuatro orientaciones básicas.

Ventanas	Ángulos [°]				
	θ	β_d	β_i	δ_d	δ_i
Norte	$\geq 15^\circ$	$\geq 10^\circ$	$\geq 10^\circ$	$\geq 10^\circ$	$\geq 60^\circ$
Sur	$\geq 30^\circ$	$\geq 20^\circ$	$\geq 20^\circ$	$\geq 60^\circ$	$\geq 60^\circ$
Este	$\geq 30^\circ$	$\geq 70^\circ$	$\geq 20^\circ$	$\geq 15^\circ$	$\geq 60^\circ$
Oeste	$\geq 30^\circ$	$\geq 20^\circ$	$\geq 70^\circ$	$\geq 60^\circ$	$\geq 15^\circ$

Como ejemplo para ilustrar cómo se obtienen los ángulos de la tabla 5.3 se muestra el uso de la mascarilla de sombras y la gráfica solar para proteger una ventana con orientación sur de 8:00 am a 4:00 pm, donde la zona de color azul representa la sombra del alero.

$$\theta = 30^\circ \quad \beta_d = \beta_i = 20^\circ \quad \delta_d = \delta_i = 60^\circ$$

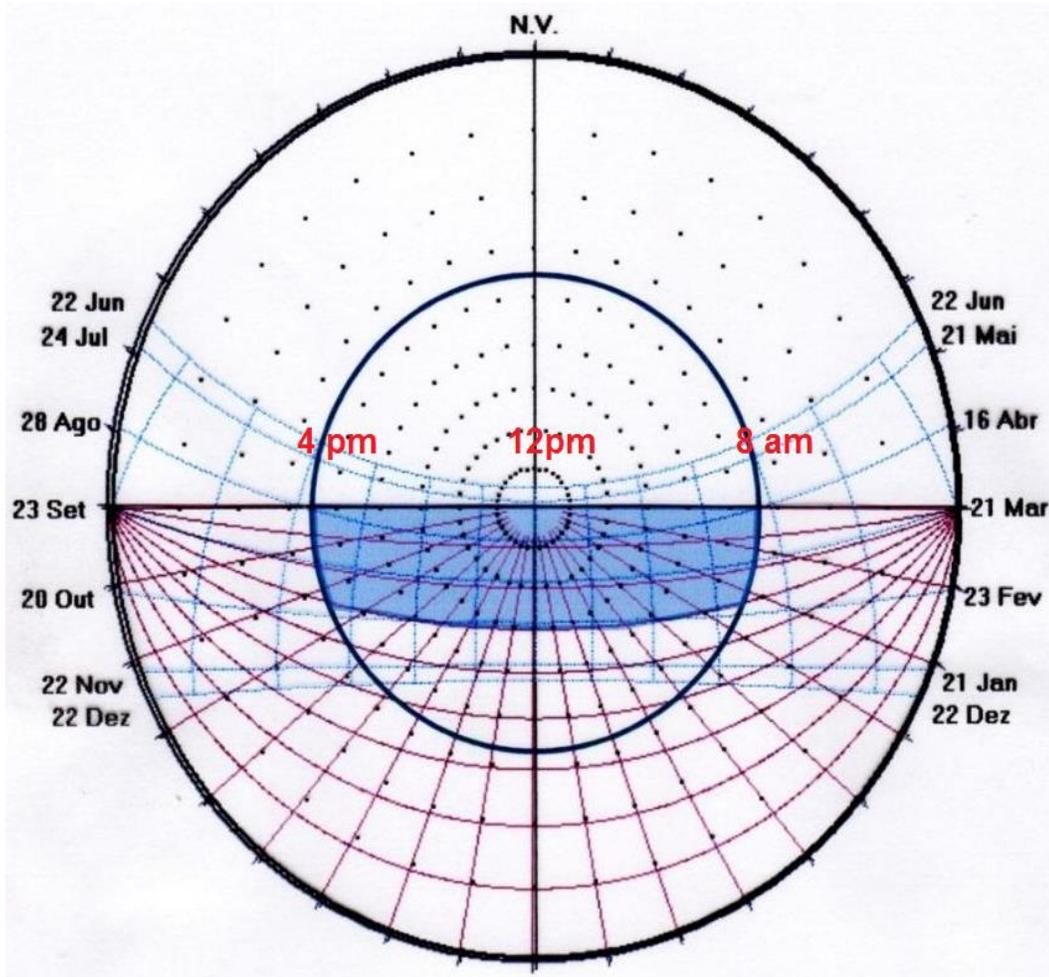


Figura 5. 3 Gráfica solar y mascarilla de sombras para el alero en la ventana con orientación sur.

5.2.2 Quiebrasol

El quiebrasol es un elemento vertical que se usa para brindar protección principalmente durante la mañana y la tarde.

Al igual que para el alero, para calcular los ángulos de un quiebrasol se deben tener en cuenta las dimensiones de los elementos que se desean proteger (ventanas y puertas principalmente).

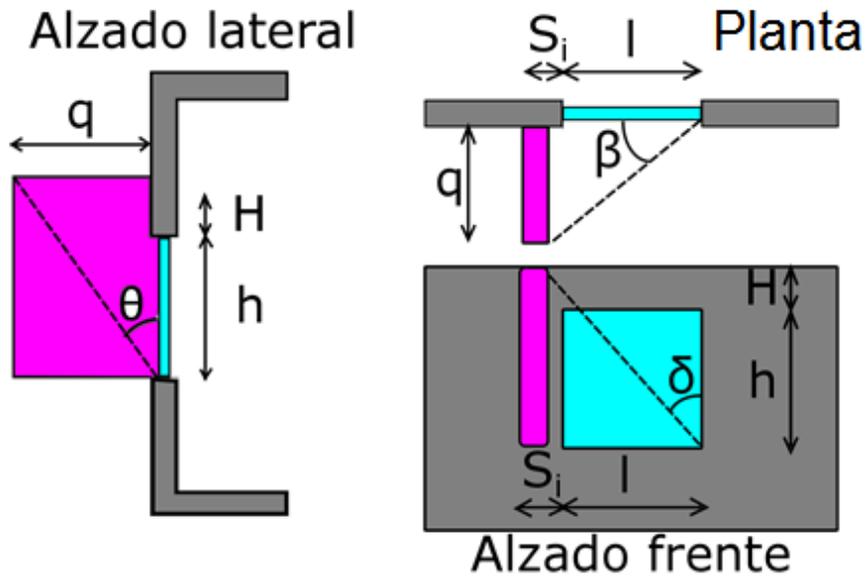


Figura 5. 4. Vistas de alzado lateral, de planta y frente de un quebrasol.

Los ángulos se obtienen de la gráfica solar y a partir de las siguientes fórmulas se obtienen las dimensiones del quebrasol.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{q_d}{h+H_d} \right) \quad \beta_d = \tan^{-1} \left(\frac{q_d}{l+s_d} \right) \quad \delta_d = \tan^{-1} \left(\frac{l+s_d}{h+H_d} \right)$$

Donde q_d es la longitud del quebrasol perpendicular a la ventana; h es la altura de la ventana, l es el ancho de la ventana; s_i y s_d son las distancias que existen entre el quebrasol y la ventana con respecto al lado izquierdo y al derecho, respectivamente; H_d es la distancia vertical que sobresale del quebrasol respecto a la ventana; θ es el ángulo cenital del quebrasol respecto al plano vertical de la ventana; β_i y β_d son los ángulos azimutales del quebrasol izquierdo y derecho, respectivamente, medidos desde el plano de la ventana; δ_i y δ_d son los ángulos de altura del quebrasol sobre el plano de la ventana del lado izquierdo y del derecho, respectivamente.

El uso de quebrasoles solo es útil en ventanas norte y sur, donde se deberán poner quebrasoles a ambos lados de la ventana. El criterio de protección en quebrasoles es de 6:00 a 9:00 am para el quebrasol al este y de 3:00 a 6:00 pm para el quebrasol al oeste. Los ángulos recomendados para la protección en estos horarios se presentan en la tabla 5.4.

Tabla 5. 4. Ángulos recomendados para hacer el cálculo de un quebrasol recomendado en Tuxtepec.

Ventanas	Ángulos [°]				
	θ	β_d	β_i	δ_d	δ_i

Norte	$\geq 20^\circ$	$\geq 20^\circ$	$\geq 20^\circ$	$\geq 45^\circ$	$\geq 45^\circ$
Sur	$\geq 25^\circ$	$\geq 25^\circ$	$\geq 25^\circ$	$\geq 45^\circ$	$\geq 45^\circ$

Como ejemplo para ilustrar cómo se obtienen los ángulos de la tabla 5.4. Se muestra el uso de la mascarilla de gráfica solar para ventana con en el horario anteriormente, donde la zona de color azul es la sombra proyectada por los quebrasoles derecho (al este) e izquierdo (al oeste).

$$\theta = 25^\circ \quad \beta_d = \beta_i = 25^\circ \quad \delta_d = \delta_i = 45^\circ$$

sombras y la proteger una orientación sur, especificado

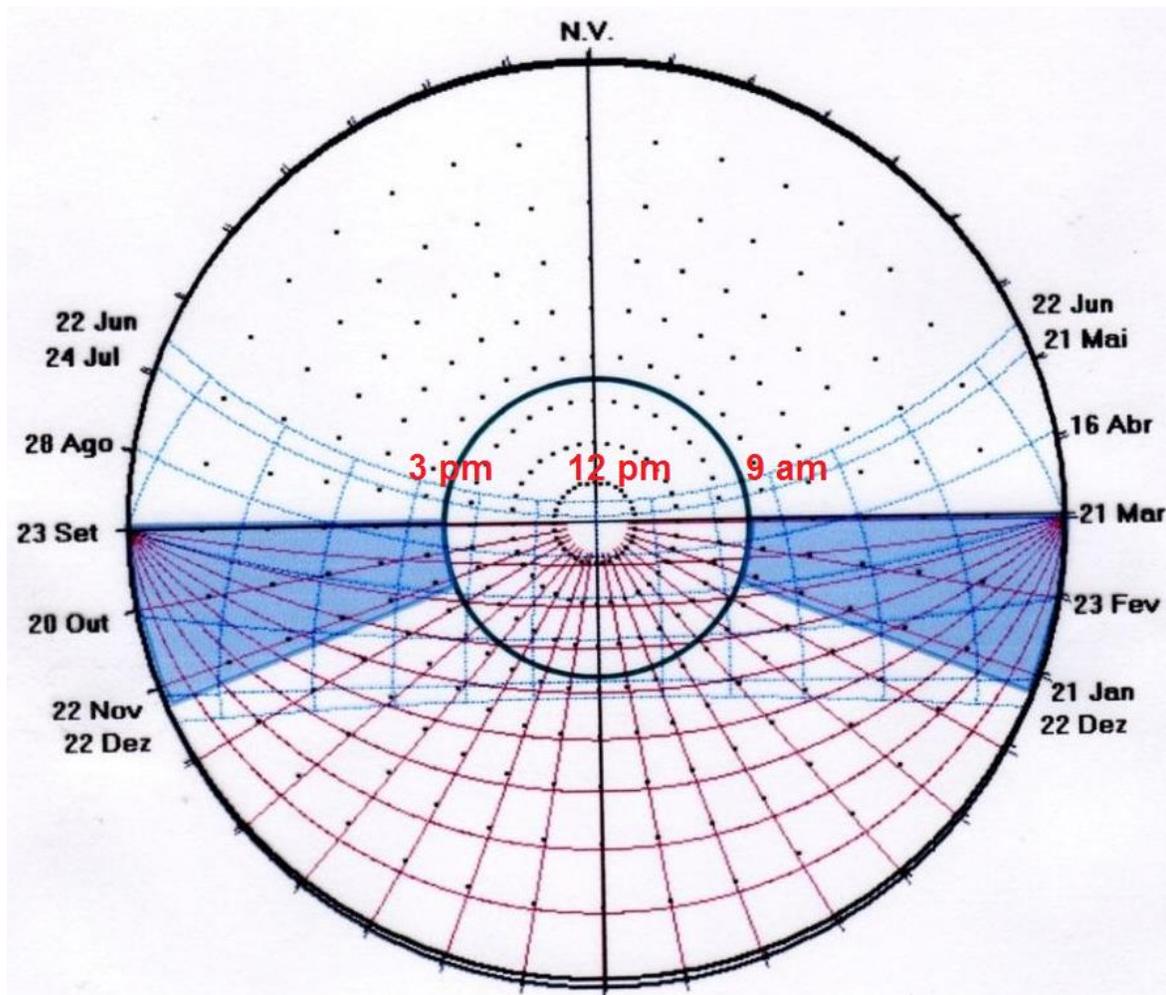


Figura 5. 5. Gráfica solar y mascarilla de sombras para el quebrasol en la ventana con orientación sur.

5.2.3 Remetimiento

El remetimiento de ventana es un elemento tanto vertical como horizontal y la protección que brinda es a cualquier hora del día solar.

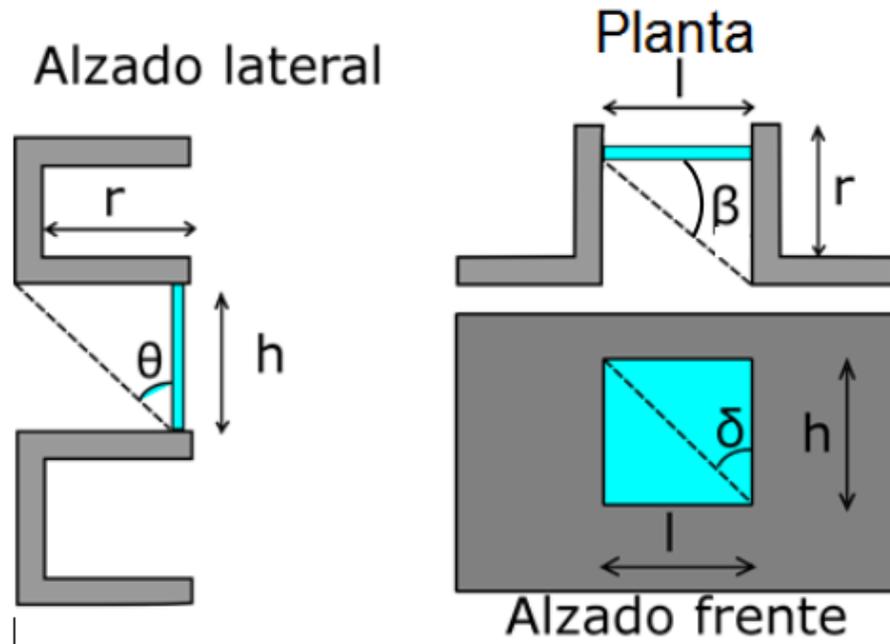


Figura 5. 6. Vistas de alzado lateral, de planta y frente de un remetimiento.

Los ángulos se obtienen definiendo la orientación de la ventana y el horario que se desea proteger con ayuda de la gráfica solar y la mascarilla de sombras, y geoméricamente se relacionan con las dimensiones de las ventanas y del remetimiento por medio de las siguientes fórmulas

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{r}{h} \right) \quad \beta_d = \tan^{-1} \left(\frac{r}{l} \right) \quad \delta_d = \tan^{-1} \left(\frac{l}{h} \right)$$

Donde r es la longitud del remetimiento perpendicular a la ventana, h es la altura de la ventana, l es el ancho de la ventana, θ es el ángulo cenital del remetimiento en el plano perpendicular a la ventana, β_i y β_d son los ángulos azimutales del remetimiento, izquierdo y derecho, respectivamente, medidos desde el plano de la ventana, δ_i y δ_d son los ángulos de altura del remetimiento sobre el plano de la ventana, del lado izquierdo y del derecho, respectivamente. Estas fórmulas son iguales para una ventana con una protección horizontal y vertical en forma de marco justo al borde de la ventana, que sobresalga igual al valor r del remetimiento.

Para uso de remetimiento en las ventanas norte y sur, el criterio es la protección solar total en el intervalo de 6:00 am a 6:00 pm. Para el remetimiento en ventanas este, el criterio es la protección solar total de 9:00 am a 12:00 pm (mediodía solar). Para remetimiento en ventanas

oeste, es de 12:00 pm a 3:00 pm. Los ángulos recomendados para la protección en estos horarios se presentan en la tabla 5.5.

Tabla 5. 5. Ángulos recomendados para hacer el cálculo de un remetimiento recomendado en Tuxtepec.

Orientaciones	Ángulos [°]				
	θ	β_d	β_i	δ_d	δ_i
Norte	$\geq 15^\circ$	$\geq 20^\circ$	$\geq 20^\circ$	$\geq 40^\circ$	$\geq 40^\circ$
Sur	$\geq 25^\circ$	$\geq 40^\circ$	$\geq 40^\circ$	$\geq 40^\circ$	$\geq 40^\circ$
Este	$\geq 25^\circ$	$\geq 40^\circ$	$\geq 40^\circ$	$\geq 40^\circ$	$\geq 40^\circ$
Oeste	$\geq 25^\circ$	$\geq 40^\circ$	$\geq 40^\circ$	$\geq 40^\circ$	$\geq 40^\circ$

Como ejemplos para ilustrar como se obtienen los ángulos de la tabla 5.5 se muestra el uso de la mascarilla de sombras y la gráfica solar para proteger una ventana con orientación sur, en el horario especificado anteriormente, donde la zona de color azul es la sombra proyectada del remetimiento.

$$\theta = 25^\circ \quad \beta_d = \beta_i = 40^\circ \quad \delta_d = \delta_i = 40^\circ$$

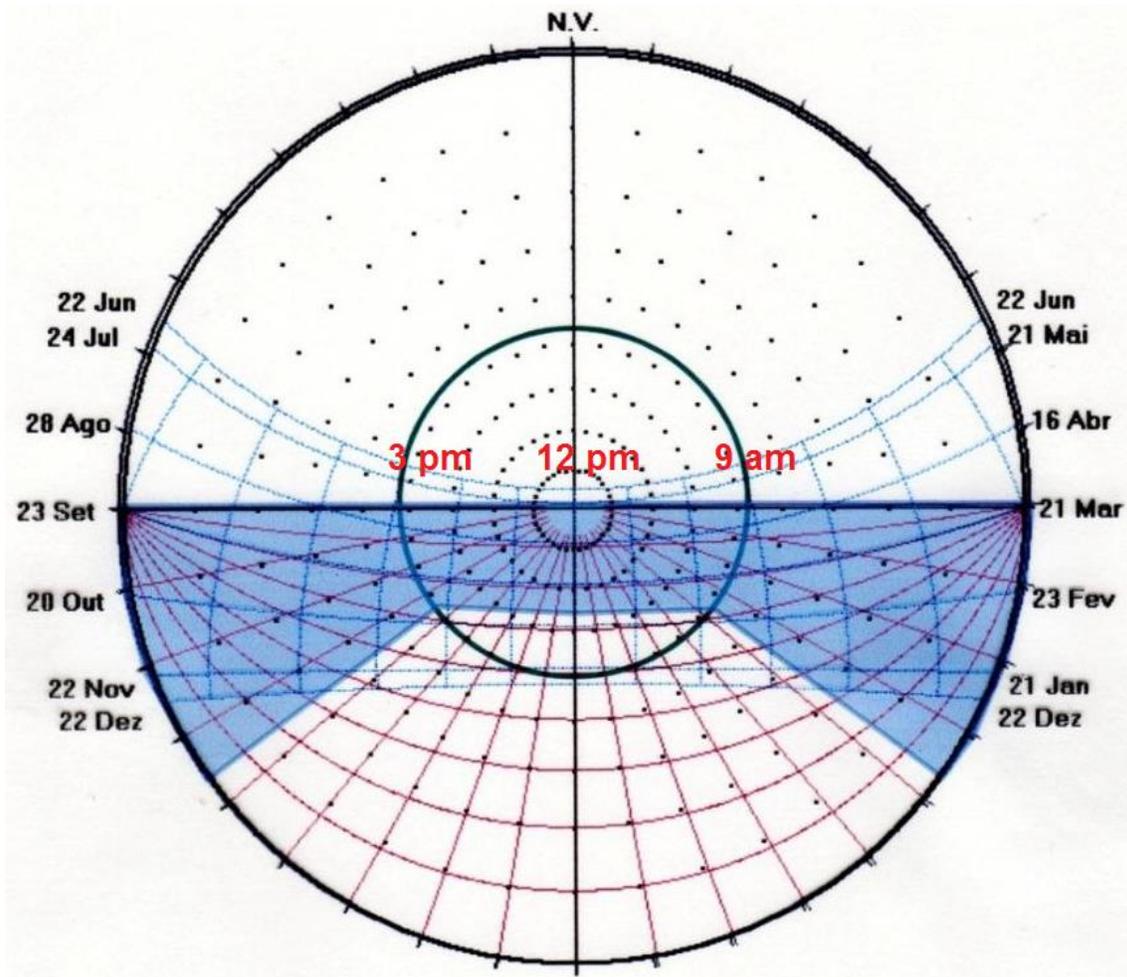


Figura 5. 7. Gráfica solar y mascarilla de sombras para el remetimiento en la ventana con orientación sur.

5.2.4 Celosía

Las celosías son elementos arquitectónicos que se pueden utilizar para sombreamiento. Al igual que el remetimiento, las celosías son la combinación de elementos horizontales y verticales o de cualquier otro tipo de entramado, usada como protección solar y visual.

Para observar la importancia de proteger las ventanas, se hizo una simulación de una caseta cúbica de 3 m de lado usando OpenStudio. El caso base tiene ventanas sin protección solar, centradas en las cuatro fachadas, de 1 m de alto y 1 m de ancho. Para el caso de aleros, se colocaron protecciones horizontales en las cuatro ventanas con superficies de sombreo (*shading surfaces*), que es una función de EnergyPlus que coloca elementos de dos dimensiones sin masa y sirven para simular la sombra de algún objeto. Las dimensiones de los aleros fueron calculadas según los ángulos de la tabla 5.3. El caso de quiebrasoles se trata de protecciones verticales colocadas solo en las ventanas norte y sur con las dimensiones calculadas a partir de los ángulos de la tabla 5.4. Por último, para el caso de remetimiento, se

colocaron shading surfaces alrededor de las ventanas y fueron calculadas según los ángulos de la tabla 5.5.

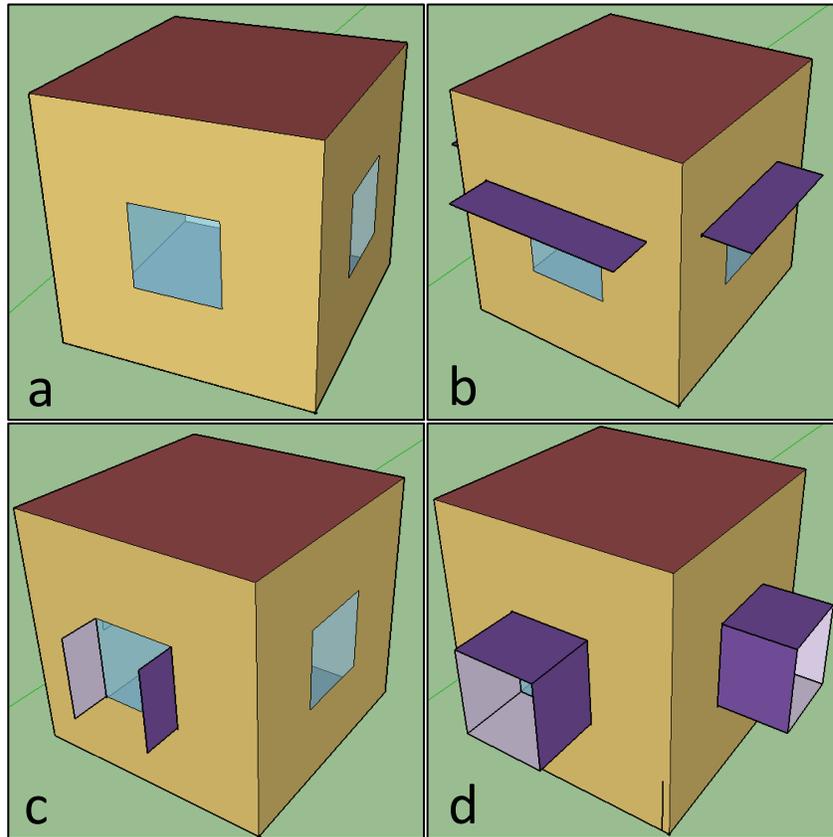


Figura 5. 8. Distintas configuraciones de la caseta para evaluar el desempeño térmico de los elementos de sombreado. a) caso base, b) caseta con aleros, c) caseta con quebrasoles y d) caseta con remetimientos.

Para hacer la comparación entre los sistemas de protección solar, se tomó la temperatura máxima diaria al interior de la caseta, cuyo promedio anual se presenta en la tabla 5.6.

Tabla 5. 6. Temperaturas máximas interiores calculadas a través de una simulación con OpenStudio para la caseta sin y con protecciones solares.

Configuración	Temperatura máxima promedio interior anual [°C]	Temperatura exterior promedio anual [°C]
BASE	34.7	25.8
ALEROS	33.5	
QUIEBRASOL	34.4	
REMETIMIENTO	32.7	

En la tabla 5.6 se puede observar que al aplicar un elemento de sombreado se reduce el valor de la temperatura máxima promedio anual del aire interior de la caseta de prueba respecto al caso base. También se puede observar que el elemento de sombreado con mayor impacto es el remetiemento, y el de menor impacto es el quiebrasol.

5.3 Materiales de la envolvente

Es muy importante evitar la transferencia de calor, a través de la envolvente, hacia el interior de la construcción, para lograr el confort térmico de las viviendas en Tuxtepec, ya que se cuenta con un clima cálido. Como se ha mencionado anteriormente la geometría, la orientación y el uso de elementos de sombreado son de relevancia ya que disminuyen el ingreso de calor hacia el interior de la vivienda. Adicionalmente, se debe tomar en cuenta la importancia de los materiales con los que se construye la envolvente de las edificaciones, ya que la transferencia de calor ocurre a través de esta y las características pueden permitir el almacenamiento, el aislamiento o el ingreso de calor hacia su interior.

Para el caso del clima de Tuxtepec, no se tienen variaciones significativas entre las temperaturas diurnas y nocturnas debido a los altos valores de humedad relativa, por lo que se recomienda construir la envolvente con poca masa térmica. Esto es necesario para evitar la acumulación de calor en los materiales, que resultaría en la transferencia de este calor hacia el interior de la edificación durante la noche, provocando desconfort térmico. Alguno de los materiales que tienen estas características son de origen vegetal, como la madera y la palma utilizados en la arquitectura vernácula del tipo rural, descrita en el capítulo 4. Pese a esto, dichos materiales se han dejado de utilizar debido a que se ha popularizado la utilización de los bloques, tabiques y concreto por su disponibilidad en el mercado, por protección y seguridad familiar, así como por estatus social, ya que la palma y madera se asocia a pobreza.

La utilización de bloques, tabiques y concreto en la construcción de muros y techos de las viviendas se ha extendido en México, por lo que para climas cálidos, es una buena estrategia colocar material aislante al exterior de su envolvente (sin aire acondicionado), ya que disminuye la conducción del calor a través de los muros y techos, que evita el aumento de la temperatura al interior de la vivienda. Además, si se desea implementar sistemas mixtos o activos de climatización, el aislamiento térmico de la envolvente será necesario para disminuir el consumo de energía, resultando en un sistema de mayor eficiencia energética.

Para que la capa de aislante térmico de la envolvente de una vivienda tenga un funcionamiento óptimo, se recomienda que la capa aislante se coloque en la parte exterior de la envolvente, ya que tiene un mejor desempeño, evitando la transferencia de calor respecto a la colocación de dicha capa al interior de la envolvente, como lo muestra el análisis de transferencia de calor

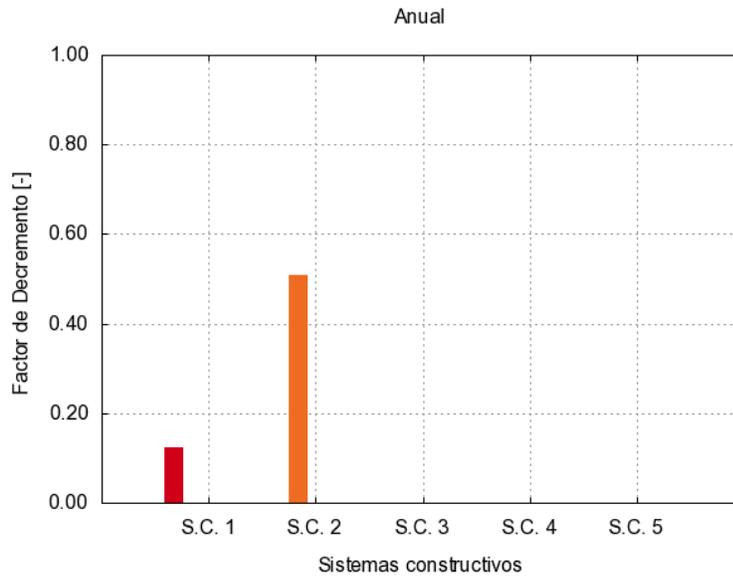
dependiente del tiempo realizado con la herramienta EnerHabitat (EnerHabitat 2017). Los sistemas constructivos evaluados tienen los mismos materiales pero con orden distinto de las capas, como lo muestra la tabla 5.7. El número uno es la posición de la capa que se encuentra al exterior de la envolvente y el número dos es la posición de la capa que se encuentra al interior. El clima utilizado en la evaluación fue el de Tuxtla Gutiérrez, que es similar al de Tuxtepec.

Tabla 5. 7. Descripción de los sistemas constructivos analizados con EnerHabitat.

Sistema constructivo 1			Sistema constructivo 2		
Materiales	Espesor	Absortancia	Materiales	Espesor	Absortancia
1. Poliestireno estándar	2 cm	0.3	1. Tabique	10 cm	0.3
2. Tabique	10 cm		2. Poliestireno estándar	2 cm	

En el resultado del programa se puede observar que el sistema constructivo 1, donde la capa de aislante térmico (EPS) se encuentra al exterior, presenta un factor de decremento mucho menor respecto al sistema constructivo 2, donde la capa de aislante térmico se encuentra en el interior. Esto indica que para este clima, la opción que garantiza un mejor desempeño térmico es el sistema constructivo 1.

Es importante mencionar que en la mayoría de los manuales de construcción sólo toman en cuenta la resistencia térmica de los sistemas constructivos, es decir, consideran que la transferencia de calor es independiente del tiempo, en donde el orden de las capas que componen el sistema constructivo no altera el resultado. Sin embargo, con los resultados obtenidos en EnerHabitat, donde se toma en cuenta la transferencia de calor dependiente del tiempo, se observa que para el clima cálido húmedo, si existe una configuración mejor que la otra. Esto se debe a que la capa de aislante térmico en el exterior disminuye la conducción de calor hacia la siguiente capa de tabique, en donde se almacena una menor cantidad de calor, respecto a la configuración del sistema constructivo 2.



Gráfica 5. 1. Factor de decremento de dos sistemas constructivos (EnerHabitat 2017)

5.4 Sistemas pasivos de climatización

En general, la orientación adecuada, las protecciones solares, así como pintar la envolvente de colores claros y colocar aislamiento térmico al exterior de la envolvente cuando se tienen materiales con masa térmica significativa son responsables de la disminución de la temperatura interior de la edificación, pero además de estas estrategias se pueden implementar los llamados sistemas pasivos de climatización, que aprovechan el sol y el viento principalmente, para propiciar el confort térmico sin utilizar energía externa.

Para el clima de Tuxtepec, las estrategias de climatización deben ser básicamente de enfriamiento y de ventilación, debido a que se desea mantener las temperaturas interiores menores a las del ambiente, ya que en su mayoría se encuentran por encima de la temperatura de confort. Además, se debe propiciar la circulación del aire para el enfriamiento por evaporación del sudor de sus ocupantes.

5.4.1 Muro doble

El muro doble es un tipo de cerramientos exteriores constituido por dos muros con una cámara de aire intermedia. Estos muros pueden o no cumplir una función estructural. La separación entre los muros debe ser como mínimo de 12 cm. El muro exterior debe tener un grosor mínimo

de 10 cm, su función es evitar que la radiación solar incida en el muro interior, el cual se encuentra en contacto con el interior de la edificación (Kwok 2015).

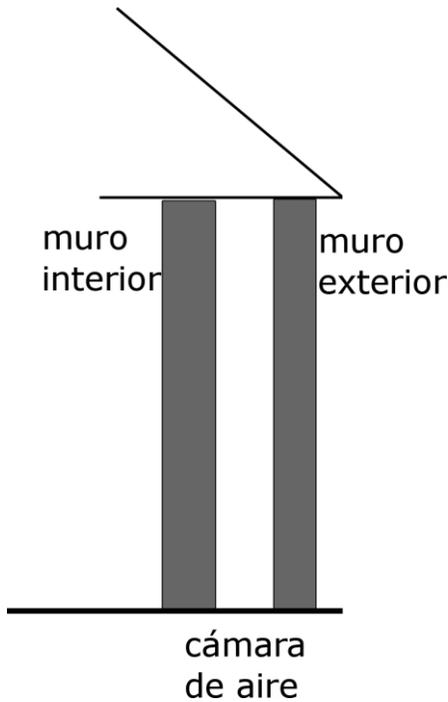


Figura 5. 9. Esquema de un muro doble en la envolvente de una edificación.

5.4.2 Fachada ventilada

La fachada ventilada es un tipo de sistema constructivo de la envolvente de una construcción, en donde se genera un espacio que permite la circulación del aire entre la estructura y el revestimiento exterior.

La configuración más habitual para las fachadas ventiladas consiste en un muro convencional de ladrillo, tabique o cualquier otro material que pueda ejercer funciones de soporte, sobre el que se puede disponer una capa de material aislante, y otra estructura que fija un sistema exterior de revestimiento que pueda ser de materiales variados y que constituye la parte exterior de la fachada del edificio. La principal función de esta capa es proteger el muro interno de la radiación solar. Además, la radiación solar que calienta la capa exterior provoca en el interior de la cámara un flujo de aire ascendente debido a la convección natural, que transporta el calor desde el interior de la cámara hacia el exterior. Por lo que la principal ventaja atribuida a las fachadas ventilada en climas cálidos es la disminución de la ganancia de calor hacia el interior de la construcción (Domínguez 2014).

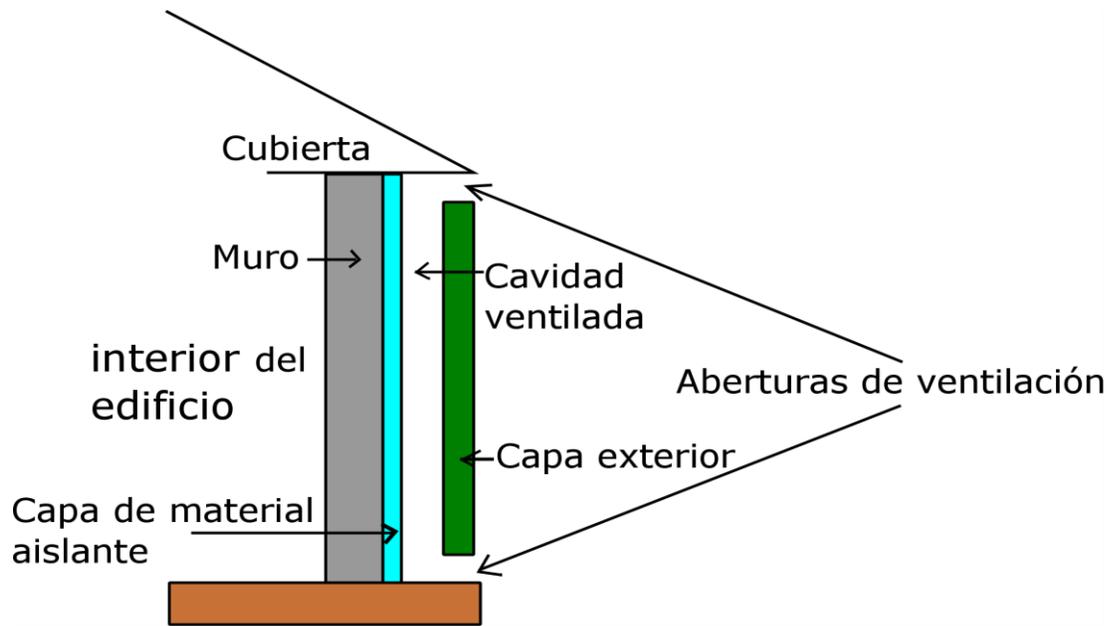


Figura 5. 10. Esquema de los componentes de una fachada ventilada.

El techo ventilado es un caso particular de una fachada ventilada en la parte superior de la construcción. Un ejemplo de techo ventilado es el sistema de vigueta y bovedilla, que es un sistema constructivo compuesto por una estructura de pequeñas vigas paralelas entre sí, con la inclinación que se desea en el techo, cuyo objetivo es soportar una serie de bloques huecos que formaran la cámara ventilada por convección natural. Estos bloques tendrán sobre ellos una capa de compresión que reforzará la estructura. Este tipo de techos resulta en un sistema de construcción sencilla y de bajo costo.

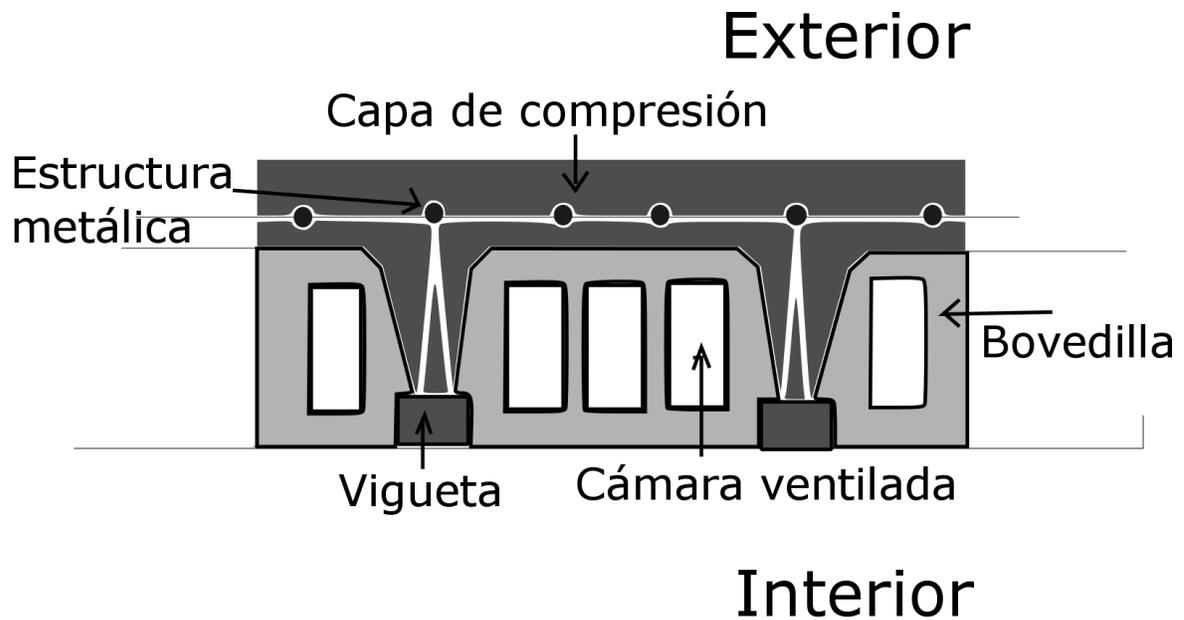


Figura 5. 11. Componentes de un techo de vigueta y bovedilla.

En Tuxtepec la orientación oeste es la recomendada para colocar las fachadas ventiladas, debido a que esta zona recibe la radiación solar después del mediodía (que es más intensa que la de las mañanas), lo que propicia que esta orientación deba ser protegida para evitar las ganancias de calor al interior. Además, la radiación solar de esta orientación propiciaría la convección natural en la cámara de aire para evitar la ganancia de calor hacia el interior de la construcción. También se recomienda colocar techos ventilados con las aberturas orientadas hacia el norte y sur, sobre todo cuando se planean techos con poca inclinación, como el caso de las viviendas de interés social, ya que los vientos dominantes provienen del norte en invierno y del sur en verano. Se recomienda el sistema vigueta y bovedilla ya que además es un sistema de bajo costo de instalación comparado con otros.

5.4.3 Muros y techos verdes

Los muros y techos verdes son sistemas constructivos de la envolvente de una edificación que constan de una instalación cubierta de plantas de diversas especies que se cultivan sobre una estructura especial (Kwok 2015).

Una cubierta verde consiste de la capa vegetal, que es la zona en donde se ubican las plantas, las cuales se cultivan y crecen sobre el sustrato. La función del filtro es retener los sedimentos y partículas provenientes del sustrato que podrían tapan las zonas de drenaje, además, regula la cantidad de agua que tiene el sustrato permitiendo a las plantas un crecimiento adecuado. Es necesario proteger la estructura de la edificación con una capa de impermeabilizante; que mantiene a la envolvente de la edificación libre de humedad; y con una barrera antiraíces. Todo el sistema se sostiene en una estructura de soporte.

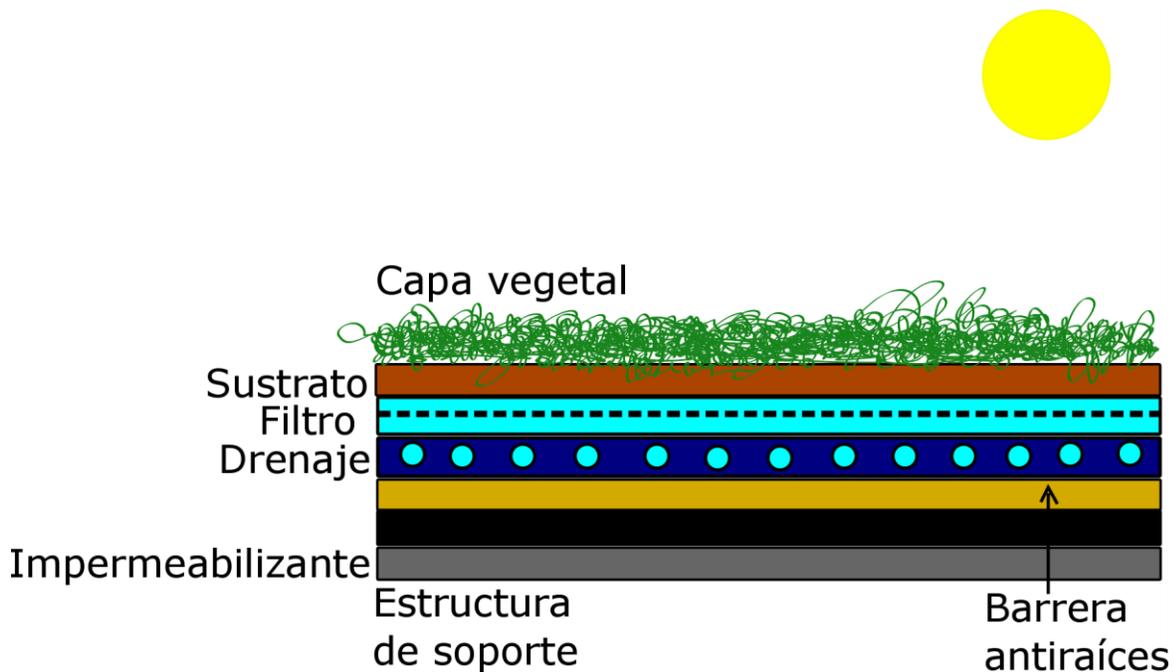


Figura 5. 12. Estructura de un techo verde.

Una cubierta verde, para el caso particular de Tuxtepec, puede propiciar el confort térmico al interior de una edificación, ya que es un sistema que genera una serie de procesos que propician el enfriamiento evaporativo. La capa vegetal de la cubierta verde absorbe la energía proveniente de la radiación solar, lo que permite a las plantas realizar el proceso de fotosíntesis. La energía que no es absorbida por la capa anterior llega al sustrato, lo que propicia la evaporación del agua contenida en esta capa (enfriamiento evaporativo). Por lo tanto, cuando la edificación cuenta con cubierta verde, habrá una disminución significativa de la energía que ingresa al interior. Además de la mejora en el desempeño térmico de los edificios, la utilización de este tipo de sistemas aumenta las áreas verdes de las zonas urbanas, mejora la calidad del aire, reduce el efecto de isla de calor, manejo y retención del agua de lluvia y el aislamiento acústico.

5.4.4 Ventilación natural

La ventilación natural es el intercambio de aire del interior de una edificación por aire del exterior, debido al viento o efectos de flotación térmica (convección natural) (Etheridge 1996). Esto provee de aire de calidad, y en el caso del clima de Tuxtepec, es una importante estrategia para propiciar el confort térmico debido a que el movimiento del aire favorece el enfriamiento por evaporación del sudor de la piel.

La ventilación natural se puede clasificar de acuerdo con el fenómeno físico que la provoca en dos tipos. El primero, denominado ventilación por viento, se origina por acción del viento que

crea corrientes de aire al interior al abrir las ventanas, puertas y cualquier abertura en general; y el segundo, denominado ventilación por efectos térmicos, tiene lugar cuando hay un intercambio de aire entre el interior y el exterior de la vivienda debido a la diferencia de temperatura entre ellos.

VENTILACIÓN POR VIENTO

La ventilación por viento se genera por los cambios de presión debidos a la interacción entre el viento y la edificación. En la fachada a barlovento se genera una región de alta presión, mientras que en las fachadas a sotavento y laterales se produce una región de baja presión, como se muestra en la figura 5.13. Estas diferencias de presiones son aprovechadas para remover el aire interior de la edificación a través de aberturas (Etheridge 1996). Para aumentar la velocidad del viento al interior de la vivienda se requiere que el edificio tenga la fachada de mayor área en la dirección del viento, un área adecuada para las aberturas; como las ventanas; y que se minimicen las obstrucciones internas del edificio (Kwok 2015).

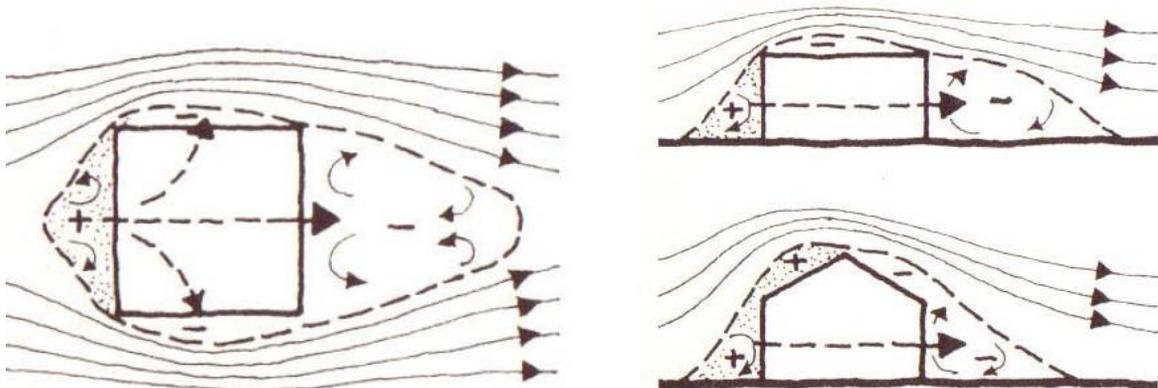


Figura 5. 13. Zonas de variación de la presión debido al viento (Fuente Guimarães 2008).

VENTILACIÓN POR EFECTOS TÉRMICOS

El mecanismo de funcionamiento de este tipo de ventilación es producido por un gradiente de temperaturas, donde el aire caliente se vuelve menos denso y asciende, mientras que el aire más fresco, reemplaza el aire que ascendió (Santamouris 2006), es decir, por medio de la convección natural se propicia el flujo de aire, donde el aire más caliente (menos denso) es evacuado en zonas superiores de la edificación, para ser sustituido por aire más fresco que proviene del exterior e ingresa a la edificación desde una abertura ubicada en una zona inferior. En el caso que el aire exterior esté a mayor temperatura que el del interior, la dirección del flujo de aire es inverso al caso anteriormente descrito.

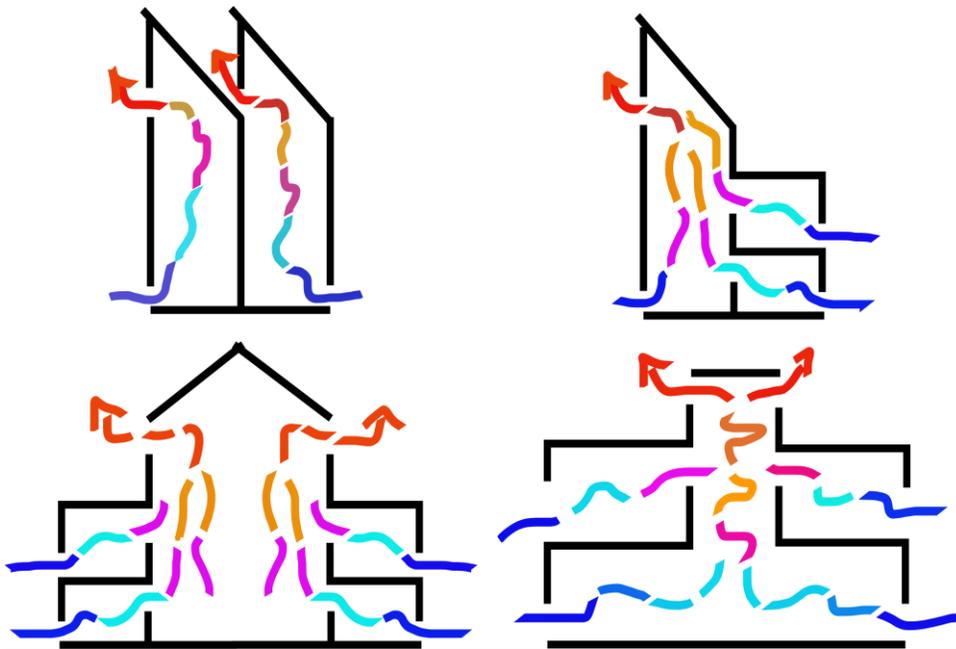


Figura 5. 14. Tipos de configuraciones de ventilación por efectos térmicos.

Cabe mencionar que los techos de teja, utilizados en la arquitectura vernácula del primer cuadro de la ciudad, propiciaban este fenómeno, ya que al estar en la zona más alta de la vivienda recibían la radiación solar y evacuaban el aire caliente a través de los ductos entre las tejas, este efecto se maximizaba debido a la orientación del techo que estaba a favor del viento del exterior.

6 Análisis del comportamiento térmico de una vivienda de interés social

En este capítulo se reporta la metodología para realizar el análisis térmico de una vivienda de interés social que se escogió entre varias viviendas ubicadas en parques residenciales de Tuxtepec. Se evalúa el desempeño de la vivienda en su forma actual, el cual constituye el caso base y se evalúa el impacto de la aplicación de diferentes estrategias de diseño bioclimático: orientación, cambio de color de muros y techo, protección solar de ventanas y aislamiento térmico de la envolvente.

6.1 Metodología

Primero, para hacer la elección de una vivienda como caso de estudio, se realizó el levantamiento de información de ocho viviendas que se encuentran en alguno de los parques residenciales de Tuxtepec, utilizando un formato basado en un estudio previo (Huelsz 2011). En el Anexo I se presenta el formato correspondiente a la vivienda seleccionada. La selección del caso de estudio se hizo tomando como criterios el mayor discomfort manifestado por sus habitantes y la utilización de sistemas activos para la climatización del lugar.

Posteriormente, se realizó el modelo de las características arquitectónicas del caso de estudio con el programa GoogleSketchup. Las dimensiones, la orientación, la distribución de los espacios habitables y otros componentes en el modelo son los mismos que los de la vivienda real. Se utilizó la plataforma OpenStudio para incorporar el archivo de clima correspondiente a Tuxtepec, el cual se obtuvo con la información proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional convertido a formato epw por medio del programa Weather Converter de EnergyPlus. Se definieron los sistemas constructivos que componen la envolvente y los muros interiores de la vivienda, especificando los materiales con sus respectivas propiedades térmicas. En esta plataforma se definieron como variables de salida la temperatura interior y la humedad relativa interior de cada espacio habitable. Con los datos obtenidos de la simulación se calculó la temperatura humidex.

Se hicieron modificaciones al modelo para simular la vivienda con cada una de las cinco propuestas de diseño bioclimático y con todas ellas a la vez, en total se obtuvieron siete casos de estudio. Con los datos que resultaron de cada simulación se obtuvo la temperatura humidex promedio para cada hora del día y cada mes del año, en cada espacio habitable y se generó un gráfico con escala de colores que permite identificar los meses y horarios con los mayores valores.

Para la comparación entre los siete casos simulados se utilizaron dos variables: el número de horas al año en el que el interior de la vivienda se encuentra en cada nivel de confort y los grados hora de desconfort cálido.

6.2 Descripción de la vivienda

La vivienda que se seleccionó como caso de estudio se ubica en la calle Playa Valle Nacional número 5, es parte del Residencial GESO Playa de Mono, al sur de la zona centro de San Juan Bautista Tuxtepec, este fraccionamiento cuenta con aproximadamente 120 viviendas similares. La vivienda que se muestra en la figura 6.1 está construida en una sola planta con una superficie de 54 m², en un terreno de 90 m². Cuenta con dos recámaras, un baño, sala-comedor, cocina y patio de servicios como se muestra en la figura 6.2. Los muros exteriores son de tabique rojo recocido de 10 cm de espesor, con dos capas de repello, el interior con yeso y el exterior con mortero de arena, cal y cemento; y pintados al exterior de color amarillo-naranja y una franja roja en la parte inferior. Los muros interiores también son de tabique rojo con dos capas de repello con yeso; pintados de color blanco. El techo es horizontal de loza de concreto de 10 cm de espesor, con impermeabilizante color rojo (terracota).

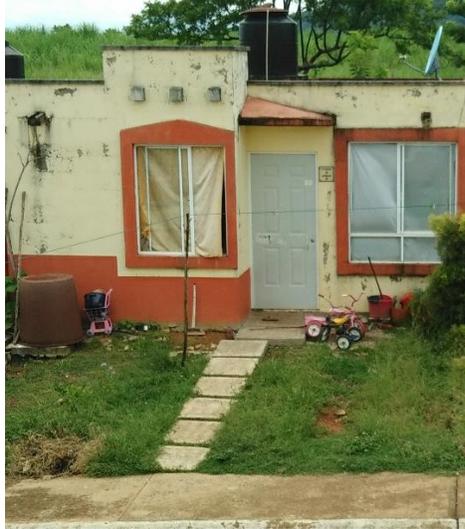


Figura 6. 1. Fachada principal de la vivienda seleccionada como caso de estudio.

La vivienda cuenta en total con cuatro ventanas, dos en la fachada principal que permiten el ingreso de luz natural y ventilación en la sala y en la recámara principal; las otras dos se encuentran en la fachada trasera en la segunda recámara y en el baño. La vivienda no cuenta con aberturas en las fachadas laterales, ya que colindan con sus vecinos.

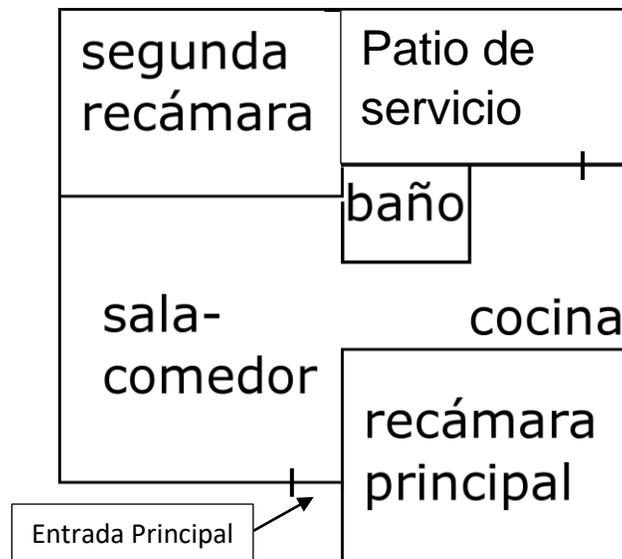


Figura 6. 2. Croquis de la planta de la vivienda seleccionada como caso de estudio.

Debido a la traza del parque residencial, la fachada principal de la vivienda tiene orientación 30° hacia el oeste respecto del sur, como se puede apreciar en las figuras 6.3 y 6.4 que muestran imágenes satelitales.

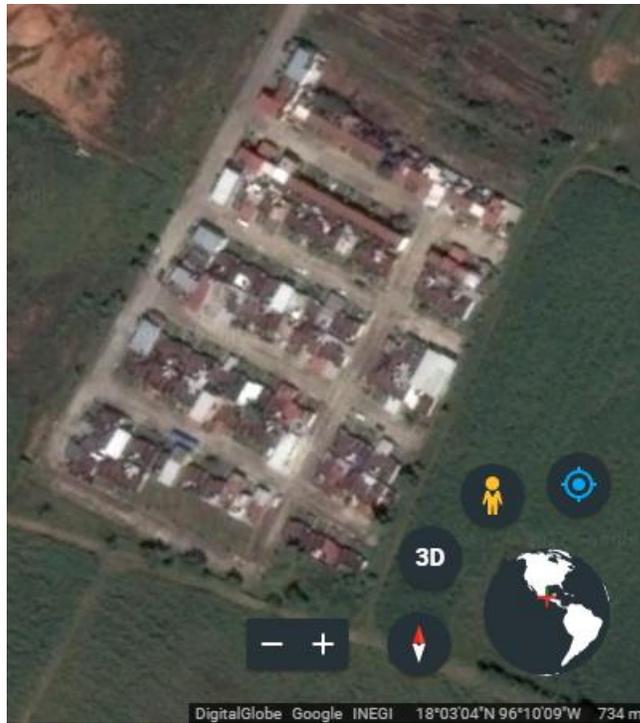


Figura 6. 3. Vista aérea del Residencial GESO Playa de Mono, donde se ubica la vivienda de estudio. (Google Earth 2017).

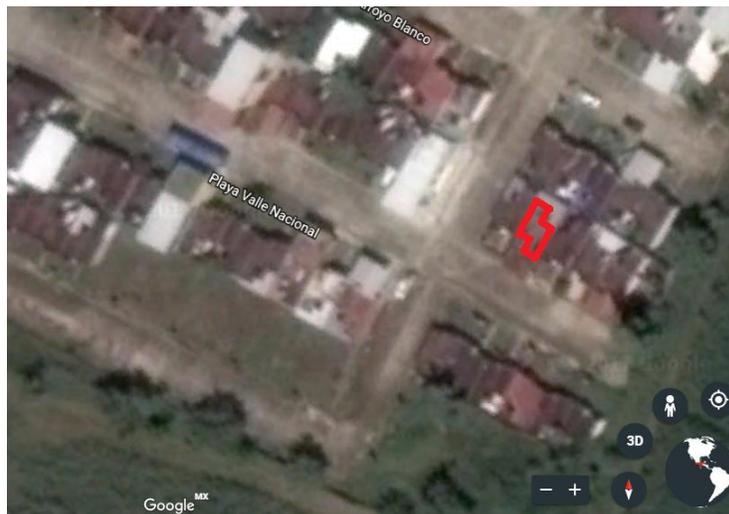


Figura 6. 4. Ubicación de la vivienda de estudio en el Residencial GESO Playa de Mono (Google Earth 2017).

6.3 Caso base

El caso base es la simulación de la vivienda en su estado actual, es decir, con las características que se mencionan en la sección 6.1.1, que servirá como el estado de referencia para comparar y cuantificar el desempeño de cada una de las estrategias propuestas para mejorar el confort al interior de la vivienda.

Los materiales que conforman la construcción con sus respectivas propiedades térmicas se muestran en la tabla 6.1. Estos datos se utilizaron para definir los *materials* en OpenStudio.

Tabla 6. 1. Propiedades térmicas de los materiales que conforman los muros y techo de la vivienda de estudio. (Fuente EnerHabitat 2017)

Material	Conductividad térmica [W/mK]	Densidad [kg/m ³]	Calor específico [J/K]
Concreto	1.350	1800	1000
Impermeabilizante	0.160	1000	600
Mortero	1.000	1800	1000
Tabique	0.700	1970	800
Yeso	0.160	1000	600

Los sistemas constructivos de la vivienda se muestran en la tabla 6.2, estos se definieron como *constructions* en OpenStudio.

Tabla 6. 2. Composición de los sistemas constructivos que conforman a la vivienda de estudio.

Sistema constructivo	Materiales (de interior a exterior) / espesor [m]		
Muro exterior	Yeso / 0.02	Tabique / 0.10	Mortero / 0.02
Muro interior	Yeso / 0.02	Tabique / 0.10	Yeso / 0.02
Techo	Yeso / 0.02	Concreto / 0.10	Impermeabilizante / 0.005
Colindancia	Yeso/ 0.02	Tabique/ 0.20	Yeso / 0.02

Debido a los colores con los que se encuentran pintados los muros exteriores (color amarillo-naranja), se les asignó una absorptancia solar de 0.5. Mientras que a las superficies interiores de los muros (de color blanco) se les asignó una absorptancia solar 0.3. Al impermeabilizante de color rojo, se le asignó una absorptancia solar de 0.7.

Cada espacio habitable, se asignó en OpenStudio como una zona térmica. Además, como la vivienda analizada tiene colindancias con sus vecinos, en el modelo se agregaron las habitaciones contiguas de las otras viviendas como se observa en la figura 6.5.

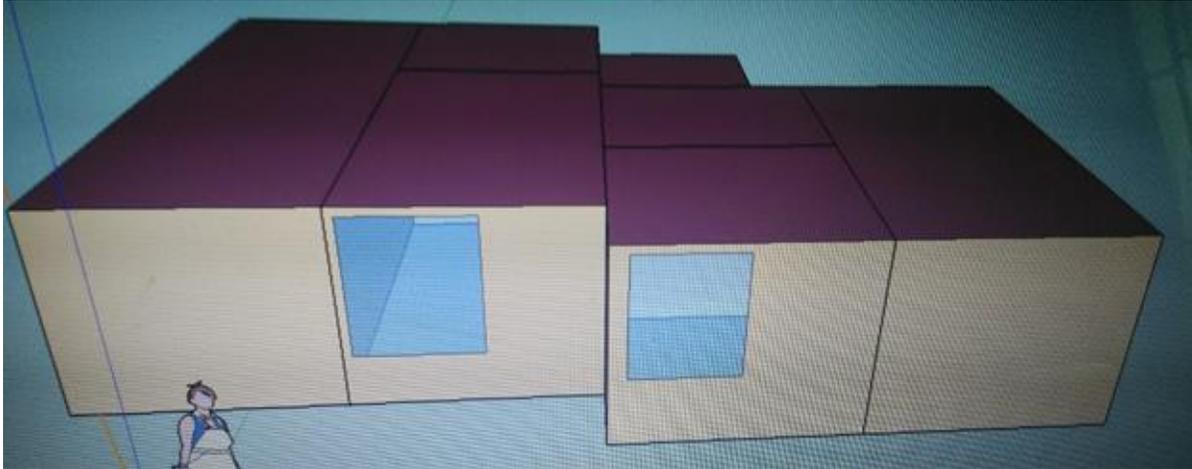


Figura 6. 5. Vista de la vivienda para la simulación con EnergyPlus con las habitaciones contiguas de las viviendas de los vecinos.

Se debe mencionar que se hizo una modificación al modelo adaptativo obtenido en la ciudad de Colima debido a que la mayoría de los valores de temperatura humidex en Tuxtepec son superiores al límite establecido como muy caluroso, por lo que no se podía observar con detalle el impacto de la aplicación de alguna de las estrategias de diseño bioclimático. Por ello se subdividió el intervalo de muy caluroso en seis niveles. Los niveles quedaron de la siguiente manera.

Muy Frío	Frío	Ligeramente Frío	Confort	Ligeramente caluroso	Caluroso	Muy caluroso 1	Muy caluroso 2	Muy caluroso 3	Muy caluroso 4	Muy caluroso 5	Muy caluroso 6
≤ 19.9 °C	20.0°C-21.5°C	21.6°C-23.9°C	24.0°C-30.5°C	30.6°C-33.5°C	33.6°C-36.1°C	36.2°C-39.1°C	39.2°C-42.1°C	42.2°C-45.1°C	45.2°C-48.1°C	48.2°C-49.9°C	≥50.0°C

Se realizaron las gráficas de colores de la temperatura humidex para cada uno de los espacios habitables de la vivienda, sin embargo, debido a la cantidad de datos obtenidos, se ha decidido presentar la gráfica de colores correspondiente al promedio de las temperaturas humidex de la sala-comedor, las recámaras y la cocina, ya que es en estos espacios donde los habitantes de la vivienda pasan la mayoría del tiempo. Esta gráfica se presenta en la tabla 6.3, en ella se observa que la temperatura humidex promedio presenta valores dentro del intervalo de confort durante las madrugadas y las mañanas en los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre. Mientras que los meses más calurosos son mayo, julio y agosto, ya que durante todo el día la temperatura humidex se encuentra en alguno de los intervalos de la clasificación *muy caluroso*, sobre todo

entre las 16:00 y 18:00 horas, en las que se tienen valores de la temperatura humidex superiores a 50 °C.

Tabla 6. 3. Temperatura humidex promedio en la sala-comedor, cocina y recámaras del caso base.

Hora	Mes											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
06:00	28.4	29.4	32.5	32.4	37.0	33.3	38.0	37.6	34.6	34.9	29.7	28.6
07:00	28.4	29.4	32.4	32.3	37.1	35.6	38.0	37.6	34.6	34.8	29.6	28.5
08:00	28.6	29.6	32.8	32.7	37.7	36.1	38.5	38.2	35.0	35.2	30.0	28.8
09:00	30.2	31.3	34.7	34.5	39.8	38.1	40.4	40.2	36.9	37.1	31.7	30.4
10:00	31.6	32.8	36.3	36.2	41.9	40.1	42.3	42.3	38.8	38.9	33.3	31.8
11:00	33.0	34.2	38.1	37.7	43.7	41.8	44.0	44.0	40.5	40.5	34.8	33.2
12:00	34.4	35.7	39.8	39.2	45.3	43.4	45.4	45.7	42.1	42.1	36.4	34.6
13:00	35.5	36.9	41.0	40.4	46.4	44.5	46.5	46.9	43.3	43.3	37.5	35.6
14:00	36.8	38.3	42.4	41.7	47.8	45.8	47.8	48.3	44.6	44.6	38.8	36.8
15:00	37.9	39.5	43.8	42.9	49.0	47.0	49.0	49.5	45.7	45.9	39.9	37.7
16:00	38.8	40.4	45.0	44.0	50.0	48.0	50.0	50.6	46.6	46.8	40.8	38.5
17:00	39.5	41.1	45.9	44.7	50.7	48.6	50.7	51.3	47.0	47.4	41.2	38.9
18:00	39.3	40.9	45.9	44.6	50.5	48.3	50.5	51.1	46.5	47.0	40.7	38.6
19:00	38.2	39.8	44.8	43.5	49.3	47.0	49.2	49.8	45.1	45.6	39.5	37.5
20:00	37.5	39.0	43.7	42.5	48.3	46.0	48.1	48.7	44.1	44.6	38.7	36.8
21:00	36.2	37.7	42.3	41.2	46.8	44.5	46.6	47.1	42.7	43.1	37.4	35.7
22:00	35.3	36.8	41.1	40.1	45.6	43.3	45.5	45.8	41.6	42.1	36.5	34.8
23:00	33.4	34.8	38.8	38.1	43.3	41.1	43.4	43.5	39.7	40.0	32.6	33.2
00:00	31.7	33.1	36.7	36.3	41.3	39.2	41.6	41.5	38.0	38.2	33.0	31.7
01:00	30.7	32.0	35.2	35.4	39.7	38.2	40.4	40.2	37.2	37.3	32.1	30.9
02:00	30.1	31.2	34.4	34.6	38.9	37.4	39.6	39.4	36.5	36.6	31.3	30.3
03:00	29.6	30.6	33.8	33.9	38.2	36.8	39.1	38.7	35.9	36.0	30.8	29.7
04:00	29.1	30.1	33.3	33.3	37.7	36.2	38.7	38.3	35.4	35.5	30.3	29.2
05:00	28.7	29.7	32.8	32.8	37.3	35.8	38.3	37.9	34.9	35.1	29.9	28.8

Muy Frío	Frío	Ligeramente Frío	Confort	Ligeramente Cálido	Caluroso	Muy caluroso 1	Muy Caluroso 2	Muy Caluroso 3	Muy Caluroso 4	Muy Caluroso 5	Muy Caluroso 6
----------	------	------------------	---------	--------------------	----------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

6.4 Casos con una estrategia de diseño bioclimático

Las cinco estrategias de diseño bioclimático que se analizaron, primero por separado y al final en conjunto fueron: el cambio de la orientación, agregar protecciones solares para las ventanas, el cambio de color de muros, el cambio de color para el techo y añadir aislamiento térmico al exterior de la envolvente.

6.4.1 Orientación

La primera estrategia propuesta está relacionada con la orientación de las fachadas de la vivienda, lo que determina la radiación solar recibida y la transferencia del calor hacia el interior de esta. Además, se tiene que la correcta orientación favorece la ventilación natural del interior, que es muy importante para el clima cálido húmedo, aunque este aspecto no es considerado en las simulaciones.

La orientación más adecuada es tener la fachada principal orientada hacia el norte o en su defecto el sur. Por lo que la primera simulación de este apartado fue poner la fachada principal hacia el norte, manteniendo las mismas características de los sistemas constructivos del caso base.

En la tabla 6.4 se muestra la temperatura humidex promedio de la sala-comedor y las recámaras uno y dos. En esta tabla se puede observar que los meses más calurosos al interior de la vivienda son mayo, julio y agosto, sobre todo a las 17:00 y 18:00 horas, en las que se registraron temperaturas superiores a 50°C. Si se comparan estos valores con los valores del caso base se pueden distinguir ligeras disminuciones de la temperatura humidex.

Tabla 6. 4. Temperatura humidex promedio en la sala-comedor, cocina y recámaras de la vivienda con la fachada principal orientada al norte.

Hora	Mes											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
06:00	28.4	29.4	32.4	32.3	37.0	33.2	38.0	37.5	34.6	34.8	29.6	28.5
07:00	28.3	29.3	32.4	32.3	37.0	35.6	38.0	37.5	34.5	34.8	29.6	28.5
08:00	28.6	29.6	32.7	32.6	37.6	36.1	38.4	38.0	34.9	35.2	30.0	28.8
09:00	30.3	31.3	34.6	34.3	39.6	38.0	40.3	40.0	36.8	37.1	31.7	30.4
10:00	31.7	32.8	36.2	36.0	41.6	39.9	42.2	42.0	38.6	38.9	33.3	31.8
11:00	33.0	34.2	38.0	37.5	43.4	41.6	43.7	43.7	40.3	40.5	34.8	33.2
12:00	34.4	35.7	39.6	39.0	45.0	43.2	45.2	45.4	41.9	42.0	36.3	34.6
13:00	35.4	36.8	40.8	40.1	46.2	44.4	46.3	46.5	43.0	43.1	37.3	35.5
14:00	36.5	38.0	42.2	41.4	47.5	45.7	47.6	47.9	44.3	44.4	38.6	36.6
15:00	37.6	39.2	43.5	42.6	48.8	46.9	48.7	49.1	45.4	45.5	39.6	37.5
16:00	38.4	40.1	44.6	43.5	49.8	47.8	49.8	50.1	46.1	46.4	40.4	38.2
17:00	39.0	40.7	45.4	44.2	50.5	48.5	50.5	50.8	46.6	46.9	40.8	38.6
18:00	38.8	40.5	45.4	44.1	50.3	48.2	50.3	50.6	46.1	46.5	40.4	38.3
19:00	37.8	39.5	44.3	43.1	49.1	46.9	49.0	49.4	44.8	45.1	39.2	37.3
20:00	37.1	38.7	43.4	42.2	48.2	46.0	48.0	48.3	43.8	44.2	38.5	36.6
21:00	36.0	37.5	41.9	40.9	46.6	44.4	46.5	46.7	42.4	42.8	37.2	35.5
22:00	35.0	36.6	40.8	39.8	45.5	43.3	45.4	45.5	41.4	41.8	36.3	34.7
23:00	33.2	34.7	38.5	37.9	43.2	41.1	43.3	43.2	39.5	39.8	32.4	33.0
00:00	31.6	33.0	36.5	36.1	41.2	39.2	41.5	41.3	37.9	38.1	32.9	31.6
01:00	30.6	31.9	35.1	35.3	39.6	38.2	40.3	40.1	37.1	37.2	32.0	30.8
02:00	30.0	31.2	34.3	34.5	38.8	37.4	39.6	39.2	36.3	36.5	31.3	30.2
03:00	29.5	30.5	33.7	33.8	38.2	36.8	39.1	38.6	35.8	35.9	30.7	29.6
04:00	29.0	30.0	33.2	33.2	37.7	36.2	38.6	38.2	35.3	35.5	30.3	29.2
05:00	28.6	29.6	32.7	32.7	37.3	35.8	38.3	37.8	34.9	35.1	29.9	28.8

Muy Frío	Frío	Ligeramente Frío	Confort	Ligeramente Cálido	Caluroso	Muy caluroso 1	Muy Caluroso 2	Muy Caluroso 3	Muy Caluroso 4	Muy Caluroso 5	Muy Caluroso 6
----------	------	------------------	---------	--------------------	----------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

Para destacar la importancia de la orientación, se hizo una segunda simulación de la vivienda con la fachada principal mirando hacia el oeste, que es la orientación más desfavorable. Las características de los sistemas constructivos se mantuvieron iguales a los del caso base. En la tabla 6.5 se muestra la temperatura humidex promedio de la sala-comedor y las dos recámaras con orientación oeste. En donde se puede observar, que al igual que el caso anterior, los meses más calurosos son mayo, julio y agosto. Aunque se debe destacar que la orientación oeste presenta 3 horas más en el intervalo *muy caluroso 6* respecto a la orientación norte y una hora más respecto al estado base.

Tabla 6. 5. Temperatura humidex promedio en la sala-comedor, cocina y recámaras con la fachada principal de la vivienda orientada al oeste.

Hora	Mes											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
06:00	28.4	29.4	32.5	32.5	37.1	33.3	38.1	37.7	34.7	34.9	29.6	28.5
07:00	28.4	29.4	32.5	32.4	37.2	35.7	38.1	37.7	34.6	34.8	29.6	28.5
08:00	28.6	29.7	32.9	32.8	37.8	36.2	38.6	38.3	35.1	35.3	30.0	28.8
09:00	30.3	31.4	34.8	34.6	39.9	38.2	40.6	40.4	37.1	37.2	31.8	30.5
10:00	31.7	32.9	36.5	36.4	42.0	40.1	42.5	42.5	39.0	39.1	33.4	31.9
11:00	33.1	34.4	38.4	37.9	43.7	41.8	44.1	44.2	40.7	40.7	34.9	33.2
12:00	34.4	35.8	39.9	39.3	45.3	43.4	45.5	45.8	42.2	42.2	36.3	34.6
13:00	35.3	36.8	41.1	40.4	46.4	44.5	46.6	46.9	43.4	43.2	37.3	35.5
14:00	36.5	38.1	42.4	41.7	47.9	45.9	47.9	48.3	44.7	44.5	38.6	36.6
15:00	37.6	39.3	43.9	43.0	49.2	47.2	49.2	49.7	45.8	45.8	39.7	37.6
16:00	38.6	40.3	45.1	44.2	50.4	48.3	50.4	50.9	46.7	46.8	40.6	38.3
17:00	39.3	41.0	46.1	45.0	51.2	49.0	51.3	51.7	47.2	47.5	41.1	38.8
18:00	39.1	40.8	46.0	44.9	51.0	48.8	51.1	51.6	46.7	47.0	40.5	38.4
19:00	38.0	39.7	44.9	43.8	49.7	47.5	49.7	50.2	45.3	45.5	39.3	37.3
20:00	37.3	38.9	43.8	42.7	48.7	46.4	48.6	49.1	44.3	44.6	38.6	36.7
21:00	36.1	37.7	42.4	41.4	47.1	44.9	47.0	47.4	42.8	43.1	37.3	35.5
22:00	35.2	36.7	41.1	40.3	45.9	43.7	45.8	46.1	41.7	42.1	36.4	34.7
23:00	33.3	34.8	38.8	38.2	43.6	41.4	43.7	43.7	39.8	40.0	32.5	33.1
00:00	31.7	33.1	36.7	36.4	41.4	39.4	41.8	41.7	38.1	38.2	33.0	31.7
01:00	30.7	32.0	35.3	35.5	39.8	38.4	40.5	40.4	37.2	37.3	32.0	30.9
02:00	30.0	31.2	34.4	34.7	39.0	37.6	39.8	39.5	36.5	36.6	31.3	30.2
03:00	29.5	30.6	33.8	34.0	38.3	36.9	39.2	38.8	35.9	36.0	30.7	29.7
04:00	29.0	30.1	33.3	33.4	37.8	36.5	38.8	38.3	35.4	35.5	30.3	29.2
05:00	28.7	29.7	32.8	32.8	37.4	35.9	38.4	38.0	35.0	35.1	29.9	28.8

Muy Frío	Frío	Ligeramente Frío	Confort	Ligeramente Cálido	Caluroso	Muy caluroso 1	Muy Caluroso 2	Muy Caluroso 3	Muy Caluroso 4	Muy Caluroso 5	Muy Caluroso 6
----------	------	------------------	---------	--------------------	----------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

6.4.2 Protecciones solares

La estrategia de este apartado es colocar protección con elementos de sombreado (aleros y quiebrasoles), para evitar el ingreso de radiación solar directa al interior, en las cuatro ventanas con las que cuenta la vivienda. El cálculo de las protecciones solares se hizo con base a las medidas de las ventanas, su orientación y la latitud de Tuxtepec (ver Anexo III). Estos elementos se calcularon para brindar sombreado total desde el equinoccio de primavera (21 de marzo) al equinoccio de otoño (21 de septiembre), que es el periodo del año en el que se recibe mayor cantidad de radiación solar.

En la tabla 6.6 se muestran la temperatura humidex promedio de la sala-comedor y las dos recámaras con protecciones solares en las ventanas. Se puede observar, que al igual que los casos anteriores, los meses más calurosos son mayo, julio y agosto, sin embargo, esta estrategia favoreció que no aparecieran horas en el intervalo *muy caluroso 6*.

Tabla 6. 6. Temperatura humidex promedio en la sala-comedor, cocina y recámaras con protecciones solares en las ventanas de la vivienda.

Hora	Mes											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
06:00	28.2	29.2	32.1	32.0	36.6	32.9	37.6	37.2	34.3	34.5	29.4	28.4
07:00	28.2	29.2	32.2	32.0	36.7	35.2	37.6	37.2	34.2	34.5	29.4	28.4
08:00	28.5	29.5	32.5	32.3	37.1	35.6	38.0	37.6	34.6	34.9	29.8	28.7
09:00	30.1	31.2	34.4	34.0	39.2	37.4	39.8	39.6	36.4	36.8	31.6	30.4
10:00	31.4	32.5	35.8	35.6	41.1	39.3	41.6	41.6	38.2	38.5	33.0	31.6
11:00	32.6	33.9	37.5	37.0	42.7	40.9	43.0	43.2	39.7	39.9	34.4	32.8
12:00	33.9	35.2	39.0	38.4	44.3	42.3	44.4	44.7	41.2	41.3	35.7	34.1
13:00	34.7	36.1	40.1	39.5	45.3	43.4	45.3	45.7	42.2	42.3	36.6	34.9
14:00	35.8	37.3	41.3	40.6	46.5	44.6	46.5	47.0	43.3	43.4	37.7	35.9
15:00	36.8	38.3	42.5	41.7	47.6	45.6	47.5	48.0	44.3	44.4	38.7	36.8
16:00	37.7	39.2	43.5	42.5	48.5	46.4	48.4	48.9	45.0	45.3	39.5	37.5
17:00	38.3	39.8	44.3	43.2	49.2	46.9	49.1	49.5	45.4	45.8	39.9	37.9
18:00	38.1	39.6	44.2	43.0	48.9	46.6	48.8	49.3	44.9	45.4	39.5	37.6
19:00	37.1	38.6	43.2	42.0	47.8	45.4	47.6	48.0	43.6	44.1	38.4	36.7
20:00	36.5	38.0	42.3	41.2	46.9	44.5	46.6	47.1	42.8	43.2	37.7	36.0
21:00	35.3	36.8	40.9	40.0	45.5	43.1	45.2	45.6	41.4	41.9	36.5	34.9
22:00	34.5	35.9	39.9	39.0	44.4	42.1	44.2	44.4	40.5	40.9	35.7	34.2
23:00	32.7	34.1	37.8	37.2	42.3	40.1	42.3	42.4	38.7	39.1	31.9	32.6
00:00	31.2	32.5	35.9	35.5	40.5	38.4	40.7	40.6	37.3	37.5	32.5	31.3
01:00	30.3	31.5	34.6	34.8	39.1	37.6	39.7	39.5	36.5	36.7	31.6	30.6
02:00	29.7	30.9	33.9	34.0	38.3	36.9	39.1	38.7	35.9	36.1	31.0	29.9
03:00	29.2	30.3	33.3	33.4	37.7	36.3	38.6	38.2	35.4	35.5	30.4	29.4
04:00	28.8	29.8	32.8	32.9	37.3	35.8	38.2	37.7	34.9	35.1	30.0	29.0
05:00	28.4	29.4	32.4	32.4	36.9	35.4	37.8	37.4	34.5	34.8	29.6	28.6

Muy Frío	Frío	Ligeramente Frío	Confort	Ligeramente Cálido	Caluroso	Muy caluroso 1	Muy Caluroso 2	Muy Caluroso 3	Muy Caluroso 4	Muy Caluroso 5	Muy Caluroso 6
----------	------	------------------	---------	--------------------	----------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

6.4.3 Cambio de color exterior del techo

La siguiente estrategia propuesta se trata de cambiar el color exterior del techo de la vivienda, debido a que originalmente tiene color rojo asociada al tipo de impermeabilizante que lo cubre. Este color es desfavorable ya que tiene una alta absorción solar (0.7). Por ello se propone la utilización de impermeabilizante blanco con una absorción solar de 0.2. Para realizar la simulación se hace la modificación pertinente a la absorción solar, en el sistema constructivo (*construction*) denominado *Techo*, el resto de las características térmicas de los materiales y sistemas constructivos, así como la orientación, se mantienen como en el estado base.

En la tabla 6.7 se muestran la temperatura humidex promedio de la sala-comedor y las dos recámaras con el cambio de color de techo de rojo a blanco. En este caso también se observa que los meses más calurosos dentro de la vivienda son mayo, julio y agosto, pero se debe destacar que al aplicar esta estrategia ya no aparecieron horas en los intervalos *muy caluroso 5* y *muy caluroso 6*, por lo que la disminución de las temperaturas es notoria respecto al estado base.

Tabla 6. 7. Temperatura humidex promedio en la sala-comedor, cocina y recámaras con el cambio de color exterior del techo de rojo a blanco.

Hora	Mes											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
06:00	28.0	29.0	31.8	31.7	36.2	32.5	37.1	36.7	33.9	34.3	29.2	28.3
07:00	28.0	29.0	31.8	31.7	36.3	34.8	37.1	36.7	33.9	34.3	29.2	28.3
08:00	28.3	29.3	32.3	32.1	36.9	35.3	37.6	37.3	34.3	34.7	29.6	28.6
09:00	29.9	31.0	34.1	33.8	38.9	37.2	39.5	39.3	36.1	36.6	31.4	30.2
10:00	31.1	32.3	35.4	35.2	40.7	38.8	41.1	41.0	37.7	38.1	32.8	31.4
11:00	32.3	33.5	36.9	36.4	42.1	40.1	42.2	42.3	38.9	39.4	34.0	32.6
12:00	33.4	34.7	38.1	37.6	43.2	41.2	43.2	43.4	40.0	40.6	35.2	33.7
13:00	34.2	35.5	39.0	38.3	43.8	41.8	43.8	44.1	40.7	41.4	36.0	34.4
14:00	35.2	36.5	40.0	39.3	44.8	42.7	44.6	45.0	41.6	42.4	37.0	35.3
15:00	36.0	37.3	41.0	40.0	45.5	43.3	45.2	45.8	42.2	43.2	37.7	36.0
16:00	36.7	38.0	41.8	40.7	46.2	43.8	45.8	46.4	42.7	43.8	38.3	36.6
17:00	37.2	38.5	42.4	41.2	46.6	44.2	46.2	46.8	43.0	44.2	38.6	36.9
18:00	36.9	38.2	42.2	40.9	46.3	43.7	45.8	46.3	42.4	43.6	38.0	36.5
19:00	36.0	37.2	41.2	39.9	45.2	42.6	44.6	45.1	41.3	42.3	37.0	35.6
20:00	35.4	36.7	40.5	39.3	44.7	42.0	44.0	44.5	40.7	41.7	36.5	35.1
21:00	34.4	35.7	39.3	38.3	43.5	40.9	43.0	43.3	39.6	40.6	35.5	34.1
22:00	33.7	35.0	38.5	37.6	42.8	40.2	42.3	42.5	38.9	39.8	34.8	33.5
23:00	32.1	33.4	36.8	36.1	41.1	38.7	40.9	40.9	37.6	38.3	31.3	32.1
00:00	30.8	32.0	35.2	34.8	39.5	37.4	39.6	39.5	36.4	36.9	32.0	30.9
01:00	29.9	31.1	34.0	34.1	38.3	36.7	38.8	38.6	35.8	36.3	31.2	30.2
02:00	29.4	30.5	33.3	33.5	37.7	36.1	38.3	38.0	35.3	35.7	30.6	29.7
03:00	28.9	30.0	32.9	32.9	37.2	35.6	37.9	37.5	34.8	35.2	30.2	29.2
04:00	28.6	29.5	32.4	32.4	36.8	35.1	37.6	37.1	34.4	34.8	29.8	28.8
05:00	28.2	29.2	32.1	32.0	36.4	34.9	37.3	36.9	34.1	34.5	29.4	28.4

Muy Frio	Frio	Ligeramente Frio	Confort	Ligeramente Cálido	Caluroso	Muy caluroso 1	Muy Caluroso 2	Muy Caluroso 3	Muy Caluroso 4	Muy Caluroso 5	Muy Caluroso 6
----------	------	------------------	---------	--------------------	----------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

6.4.4 Cambio de color exterior de muros

Esta estrategia es análoga a la del apartado anterior, ya que se propone cambiar el color exterior de muros de la envolvente de la vivienda, es decir, cambiar la absorción solar de 0.5 del color amarillo-naranja a 0.2 del color blanco. La modificación al valor de absorción solar se hace en el sistema constructivo (*construction*) denominado *Muro Exterior*. El resto de las características térmicas de los materiales y sistemas constructivos, así como la orientación, se mantienen como en el estado base.

En esta estrategia no se observó un cambio significativo respecto a los resultados del caso base, debido a que los muros de la envolvente no reciben una cantidad de radiación solar significativa por la orientación en la que se encuentran las fachadas. En la tabla 6.8 se muestran la temperatura humidex promedio de la sala-comedor y las dos recámaras con el cambio de color de muros de amarillo-naranja a blanco.

Tabla 6. 8. Temperatura humidex promedio en la sala-comedor, cocina y recámaras con el cambio de color de muro de amarillo-naranja a blanco.

Hora	Mes											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
06:00	28.4	29.4	32.5	32.4	37.0	33.3	38.0	37.6	34.6	34.9	29.7	28.6
07:00	28.4	29.4	32.4	32.3	37.1	35.6	38.0	37.6	34.6	34.8	29.6	28.6
08:00	28.6	29.7	32.8	32.7	37.7	36.2	38.5	38.2	35.0	35.3	30.0	28.8
09:00	30.3	31.3	34.7	34.5	39.8	38.1	40.4	40.2	36.9	37.1	31.7	30.5
10:00	31.6	32.8	36.2	36.1	41.8	40.0	42.3	42.2	38.7	38.8	33.3	31.8
11:00	33.0	34.2	38.0	37.6	43.5	41.6	43.8	43.8	40.3	40.4	34.8	33.2
12:00	34.3	35.6	39.6	39.0	45.1	43.2	45.2	45.4	41.9	42.0	36.3	34.5
13:00	35.3	36.7	40.8	40.1	46.2	44.3	46.3	46.6	43.1	43.1	37.3	35.5
14:00	36.6	38.0	42.2	41.4	47.5	45.6	47.5	48.0	44.3	44.4	38.6	36.6
15:00	37.6	39.2	43.6	42.7	48.8	46.8	48.7	49.3	45.5	45.6	39.7	37.5
16:00	38.6	40.1	44.7	43.7	49.8	47.7	49.8	50.3	46.3	46.5	40.4	38.3
17:00	39.1	40.8	45.6	44.4	50.5	48.3	50.5	51.0	46.7	47.1	40.8	38.6
18:00	38.9	40.5	45.5	44.3	50.3	48.0	50.3	50.8	46.2	46.6	40.3	38.2
19:00	37.8	39.4	44.4	43.2	49.1	46.7	49.0	49.5	44.8	45.2	39.1	37.2
20:00	37.1	38.7	43.4	42.2	48.1	45.8	47.9	48.4	43.8	44.2	38.4	36.5
21:00	35.9	37.5	42.0	41.0	46.7	44.3	46.5	46.8	42.4	42.8	37.1	35.4
22:00	35.1	36.6	40.8	39.9	45.5	43.2	45.4	45.6	41.4	41.8	36.3	34.7
23:00	33.2	34.7	38.6	37.9	43.3	41.0	43.3	43.4	39.5	39.8	32.4	33.1
00:00	31.6	33.0	36.5	36.2	41.2	39.1	41.5	41.4	37.9	38.1	32.9	31.6
01:00	30.6	31.9	35.1	35.3	39.7	38.2	40.3	40.2	37.1	37.2	32.0	30.9
02:00	30.0	31.2	34.3	34.5	38.9	37.4	39.6	39.3	36.4	36.5	31.3	30.2
03:00	29.5	30.6	33.7	33.8	38.2	36.8	39.1	38.7	35.8	35.9	30.7	29.7
04:00	29.1	30.1	33.2	33.3	37.7	36.2	38.7	38.2	35.3	35.5	30.3	29.2
05:00	28.7	29.7	32.8	32.8	37.3	35.8	38.3	37.9	34.9	35.1	29.9	28.8

Muy Frío	Frío	Ligeramen- te Frío	Confort	Ligeramen- te Cálido	Caluroso	Muy caluroso 1	Muy Caluroso 2	Muy Caluroso 3	Muy Caluroso 4	Muy Caluroso 5	Muy Caluroso 6
----------	------	-----------------------	---------	-------------------------	----------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

6.4.5 Aislamiento térmico de la envolvente

En esta estrategia se propone agregar una capa de 2 cm de aislante térmico de poliestireno expandido (EPS) en la parte exterior de la envolvente de la vivienda, es decir, en los sistemas constructivos (*constructions*) denominados *Techo*, *Muro Exterior* y *Colindancia*. Los sistemas constructivos (*constructions*) se modificaron como se muestra la tabla 6.9.

Tabla 6. 9. Configuración del sistema constructivo que contiene una capa aislante de poliestireno expandido (EPS).

Sistema constructivo	Materiales (de interior a exterior) / espesor [m]				
Muro exterior	Yeso / 0.02	Tabique / 0.10	EPS / 0.02	Mortero / 0.02	
Techo	Yeso / 0.02	Concreto / 0.10	EPS / 0.02	Impermeabilizante / 0.005	
Colindancia	Yeso/ 0.02	Tabique/ 0.10	EPS / 0.02	Tabique / 0.10	Yeso / 0.02

En este caso se pudo observar que el impacto de agregar la capa aislante en la envolvente de la vivienda fue positivo ya que no hubo horas en los intervalos de muy *caluroso* 4, muy *caluroso* 5 y muy *caluroso* 6, como se puede observar en la tabla 6.10 donde se muestran la temperatura humidex promedio de la sala-comedor y las dos recámaras con la capa de aislante térmico.

Tabla 6. 10. Temperatura humidex promedio en la sala-comedor, cocina y recámaras con aislamiento térmico al exterior de la envolvente de la vivienda.

Hora	Mes											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
06:00	28.6	29.5	32.2	31.9	36.0	32.5	36.9	36.6	33.9	34.3	29.5	28.8
07:00	28.8	29.6	32.4	32.0	36.2	34.8	37.0	36.7	33.9	34.3	29.6	28.9
08:00	29.2	30.0	32.9	32.5	36.9	35.4	37.6	37.4	34.5	34.8	30.1	29.3
09:00	30.9	31.8	34.9	34.3	38.9	37.2	39.4	39.4	36.3	36.7	31.9	31.0
10:00	32.1	33.0	36.1	35.6	40.4	38.7	40.8	40.9	37.7	38.1	33.2	32.2
11:00	33.1	34.1	37.4	36.6	41.5	39.7	41.7	41.9	38.7	39.2	34.3	33.2
12:00	34.0	35.1	38.3	37.4	42.2	40.4	42.3	42.7	39.4	40.1	35.3	34.2
13:00	34.6	35.7	38.9	37.9	42.6	40.7	42.6	43.1	39.9	40.7	35.9	34.7
14:00	35.3	36.5	39.7	38.6	43.3	41.4	43.2	43.8	40.5	41.4	36.6	35.4
15:00	35.9	37.0	40.3	39.2	43.7	41.7	43.6	44.2	40.9	41.8	37.1	35.8
16:00	36.4	37.4	40.9	39.6	44.1	42.0	43.9	44.6	41.1	42.2	37.5	36.2
17:00	36.7	37.7	41.2	39.8	44.4	42.2	44.2	44.8	41.2	42.4	37.6	36.4
18:00	36.3	37.3	40.8	39.4	43.8	41.6	43.6	44.1	40.6	41.6	36.9	35.9
19:00	35.3	36.3	39.7	38.3	42.8	40.5	42.5	42.9	39.5	40.4	35.9	35.0
20:00	34.9	35.9	39.2	37.9	42.4	40.2	42.1	42.5	39.1	40.0	35.6	34.6
21:00	34.1	35.1	38.2	37.0	41.5	39.2	41.2	41.5	38.2	39.1	34.8	33.8
22:00	33.5	34.5	37.6	36.5	40.9	38.7	40.8	41.0	37.8	38.6	34.2	33.3
23:00	32.1	33.1	36.1	35.3	39.6	37.6	39.7	39.7	36.8	37.4	31.0	32.1
00:00	30.8	31.9	34.8	34.3	38.5	36.6	38.8	38.7	35.9	36.3	31.8	31.0
01:00	30.1	31.2	33.8	33.8	37.5	36.1	38.2	38.0	35.4	35.8	31.1	30.4
02:00	29.7	30.6	33.3	33.3	37.1	35.7	37.8	37.5	35.0	35.3	30.6	29.9
03:00	29.3	30.2	32.9	32.8	36.7	35.3	37.5	37.2	34.6	35.0	30.2	29.5
04:00	29.0	29.8	32.6	32.4	36.4	35.0	37.3	36.9	34.3	34.7	29.9	29.1
05:00	28.8	29.6	32.4	32.1	36.1	34.8	37.0	36.7	34.1	34.4	29.7	28.9

Muy Frío	Frío	Ligeramente Frío	Confort	Ligeramente Cálido	Caluroso	Muy caluroso 1	Muy Caluroso 2	Muy Caluroso 3	Muy Caluroso 4	Muy Caluroso 5	Muy Caluroso 6
----------	------	------------------	---------	--------------------	----------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

6.4.6 Todas las estrategias propuestas

Al final, la última simulación integra todas las estrategias que se propusieron en las secciones anteriores, por lo que se hacen las modificaciones pertinentes para que la fachada principal se oriente al norte, se protegen las ventanas del ingreso de radiación solar directa, se cambian las absorptancias solares del techo y el muro para que estos sean de color blanco y se agrega la capa de dos centímetros de poliestireno estándar en la envolvente.

En la tabla 6.11 se puede observar el impacto positivo de aplicar todas las estrategias, ya que no hay horas en los niveles de confort *muy caluroso* 3, 4, 5 y 6, y sobre todo es de importancia

destacar que se observó el aumento de las horas de confort al interior de la vivienda, ya que esto no sucedió con las estrategias por separado. La máxima temperatura obtenida fue de 39.6°C, que es significativamente menor a la obtenida en el caso base de 51.3°C.

Tabla 6. 11. Temperatura humidex promedio en la sala-comedor, cocina y recámaras con la aplicación de todas la estrategias de diseño bioclimático propuestas en las secciones anteriores.

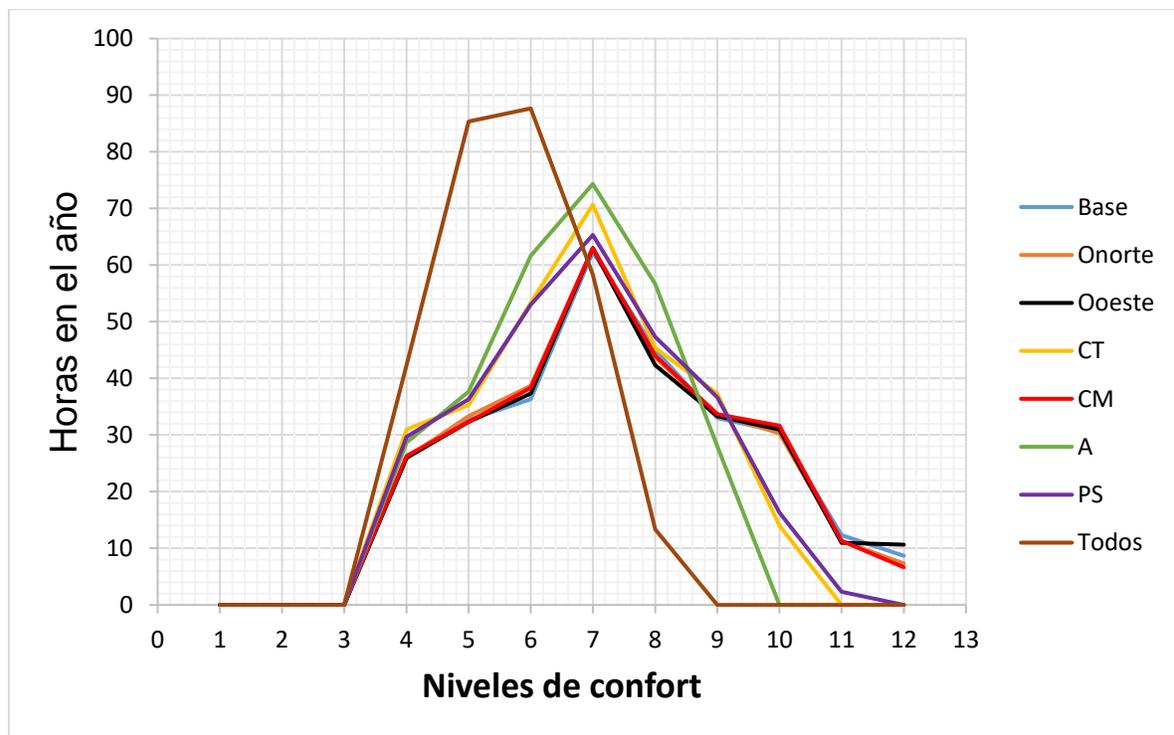
Hora	Mes											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
06:00	27.6	28.4	30.8	30.5	34.1	30.6	34.8	34.6	32.1	32.7	28.5	27.9
07:00	27.7	28.5	30.9	30.5	34.1	32.6	34.8	34.6	32.1	32.7	28.6	28.0
08:00	28.1	28.9	31.3	30.9	34.6	33.0	35.1	35.0	32.5	33.1	28.9	28.4
09:00	29.7	30.6	33.2	32.6	36.6	34.8	37.0	37.0	34.3	35.0	30.7	30.0
10:00	30.8	31.8	34.3	33.7	37.8	35.9	38.0	38.2	35.3	36.1	31.9	31.1
11:00	31.6	32.6	35.2	34.4	38.4	36.3	38.4	38.7	35.8	36.8	32.7	31.9
12:00	32.3	33.2	35.7	34.8	38.8	36.7	38.6	39.0	36.2	37.3	33.2	32.6
13:00	32.5	33.4	35.9	35.0	38.8	36.7	38.6	39.0	36.2	37.3	33.3	32.8
14:00	33.0	33.9	36.3	35.4	39.3	37.1	39.0	39.4	36.5	37.7	33.8	33.3
15:00	33.3	34.1	36.5	35.4	39.4	37.1	39.0	39.4	36.5	37.7	33.9	33.4
16:00	33.5	34.3	36.7	35.5	39.5	37.2	39.1	39.5	36.5	37.8	34.0	33.6
17:00	33.6	34.5	36.8	35.6	39.6	37.3	39.2	39.5	36.6	37.9	34.0	33.7
18:00	33.2	34.0	36.4	35.1	39.1	36.8	38.7	38.9	36.0	37.3	33.5	33.3
19:00	32.4	33.2	35.5	34.4	38.2	36.0	37.9	38.1	35.3	36.5	32.8	32.5
20:00	32.2	33.0	35.3	34.2	38.1	35.8	37.7	37.9	35.1	36.3	32.6	32.3
21:00	31.5	32.4	34.6	33.5	37.3	35.1	37.1	37.1	34.4	35.5	31.9	31.6
22:00	31.1	32.1	34.2	33.3	37.0	34.9	36.8	36.9	34.2	35.3	31.6	31.3
23:00	30.2	31.1	33.4	32.6	36.3	34.3	36.3	36.2	33.6	34.6	29.0	30.4
00:00	29.4	30.3	32.6	32.0	35.7	33.8	35.8	35.7	33.1	34.0	30.1	29.6
01:00	28.8	29.8	31.9	31.8	35.0	33.5	35.5	35.3	32.9	33.8	29.7	29.2
02:00	28.5	29.4	31.6	31.5	34.7	33.3	35.3	35.0	32.7	33.5	29.3	28.8
03:00	28.2	29.0	31.3	31.2	34.5	33.1	35.1	34.8	32.5	33.2	29.0	28.5
04:00	27.9	28.7	31.1	30.9	34.3	32.9	35.0	34.7	32.3	33.0	28.8	28.2
05:00	27.7	28.5	30.9	30.6	34.1	32.7	34.8	34.6	32.1	32.8	28.6	28.0

Muy Frío	Frío	Ligeramente Frío	Confort	Ligeramente Cálido	Caluroso	Muy caluroso 1	Muy Caluroso 2	Muy Caluroso 3	Muy Caluroso 4	Muy Caluroso 5	Muy Caluroso 6
----------	------	------------------	---------	--------------------	----------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

6.5 Comparación de resultados

Para establecer cuál de las seis estrategias propuestas en la sección anterior resulta ser la mejor para alcanzar el confort térmico al interior de la vivienda, se necesita comparar los resultados con el caso base. La primera comparación se hace por medio del parámetro horas en nivel de confort, que se define como el número de horas en el año en las que se encuentra el interior de la vivienda en uno de los doce niveles de confort definidos para Tuxtepec. Se obtuvo el promedio de las horas en nivel de confort de la sala-comedor y las dos recámaras para los siete casos (caso base, cinco estrategias de diseño bioclimático y la aplicación de todas ellas), los resultados se presentan en la gráfica 6.1. En la gráfica se puede observar que la estrategia que individualmente tiene el mayor impacto positivo en el desempeño térmico del interior de la vivienda es la aplicación del aislamiento térmico de la envolvente de la vivienda ya que no se presentan horas al año en los niveles de confort *muy caluroso 4*, *muy caluroso 5* y *muy caluroso*

6, es decir, la temperatura humidex es menor a 45.1°C. Seguida a esta estrategia se encuentra el cambio de color de techo de rojo a blanco, en donde no se registraron horas en los dos últimos intervalos de la clasificación de niveles de confort, y en tercer lugar se encuentra la colocación de protecciones solares en las ventanas. Si bien es cierto que estas tres estrategias reducen la temperatura humidex, es decir reducen las horas en los niveles de confort con temperaturas mayores, se esperaba observar que el punto más alto de estas curvas se desplazara hacia el lado izquierdo, es decir, que el número de horas confortables aumentara, pero el número de horas aumentó para la clasificación *muy caluroso 1*. De hecho, en el caso base, la orientación norte y oeste, el cambio de color del techo y muro, el aislamiento térmico de la envolvente al exterior y las protecciones solares en las ventanas, el máximo de horas se encuentra en este intervalo (nivel 7).



Muy Frío	Frío	Ligeramente Frío	Confort	Ligeramente Cálido	Caluroso	Muy caluroso 1	Muy Caluroso 2	Muy Caluroso 3	Muy Caluroso 4	Muy Caluroso 5	Muy Caluroso 6
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

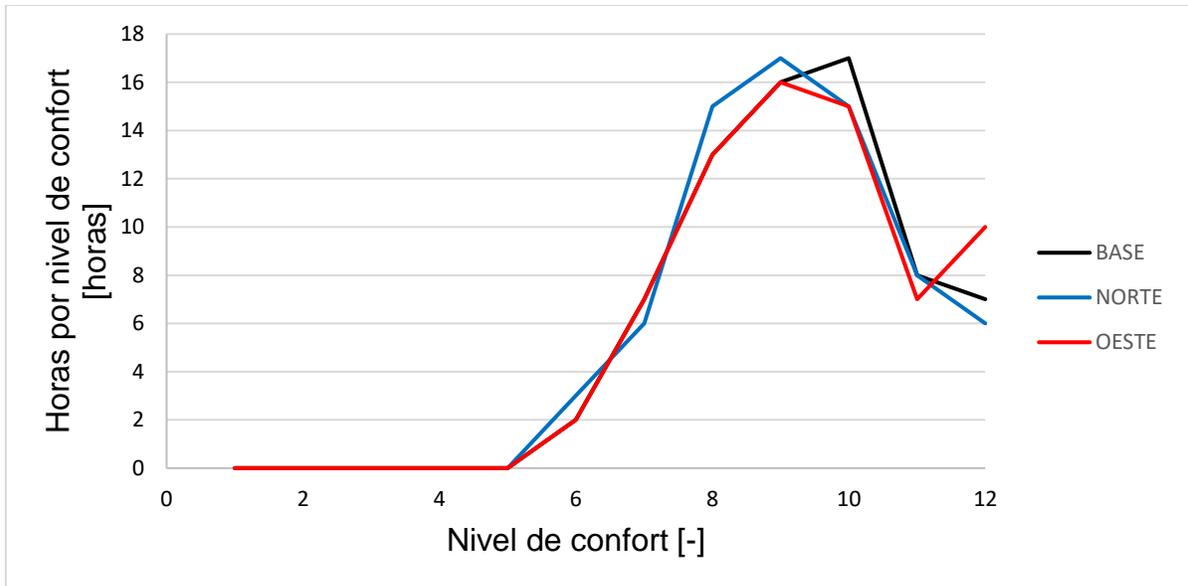
Gráfica 6. 1. Horas en nivel de confort promedio de la sala-comedor y las dos recámaras de la vivienda de estudio.

En la gráfica se puede observar que al aplicar todas las estrategias no solo se disminuyen las horas en los intervalos *muy caluroso 3, 4, 5 y 6* y la temperatura humidex, sino que el punto máximo de esa curva se desplaza hacia el intervalo *caluroso y ligeramente cálido*, de hecho, es en el único caso en donde se observa el aumento en el número de horas confortables, pasa de 26 a 42 horas en el nivel, ya que en las demás estrategias esto no sucedió. Es decir, incluir todas las estrategias al mismo tiempo permitió obtener una mayor cantidad de horas de confort térmico al interior de la vivienda respecto a aplicarlos individualmente.

En el caso del cambio de color de muros no hubo un impacto importante ya que la orientación de ellos no recibe una gran cantidad de radiación, además de que la vivienda tiene colindancia con sus vecinos. La importancia de esta estrategia se podría observar en casas sin vecinos contiguos en donde los muros se encuentran a una mayor exposición a la radiación solar directa.

Para el caso de la orientación norte se esperaba observar una diferencia en los resultados más significativa, sobre todo entre la orientación de la fachada principal al norte y al oeste. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que la forma geométrica de la planta de la vivienda juega un papel importante y, como se mencionó en la sección 6.3, en la simulación se está considerando una parte de cada una de las viviendas colindantes y que cada una de esas partes está recibiendo radiación solar por el lado no colindante, por lo que la planta es más cercana a un cuadrado que a un rectángulo.

Para observar con mayor detalle la importancia de la orientación solo se tomaron en cuenta las dos recámaras y la sala-comedor, ya que son los espacios habitables en la que los habitantes pasan la mayoría del tiempo. Los horarios considerados son de las 15:00 a las 23:00 horas para la sala-comedor y entre las 22:00 a las 7:00 horas para las recámaras puesto que es el horario habitual en el que se hacen actividades en estos espacios. También se restringió la temporada del año de marzo a septiembre que es la temporada más calurosa del año. En la gráfica 6.2 se puede observar que, a pesar de la precisión en la elección de los espacios habitables, del horario de ocupación y del periodo en el año, la diferencia entre las distintas orientaciones no es significativa, aunque si se puede distinguir, sobre todo en el último nivel de confort, que el mejor desempeño térmico es el de la fachada orientada al norte, seguida del caso base, y al final la fachada orientada hacia el oeste.



Gráfica 6. 2. Horas en nivel de confort para las distintas orientaciones de la fachada principal de la vivienda de estudio.

Para tener un mayor detalle de la importancia de la aplicación de cada una de las estrategias se decidió también hacer la comparación con el parámetro grados-hora de desconfort cálido (Huelsz 2016). Este parámetro fue calculado para cada uno de los espacios con los datos de temperatura humidex para todo el año en intervalos de 10 minutos (1/6 hora). Los resultados se muestran en la tabla 6.12, en donde el primer valor reportado en cada columna indica los grados hora de desconfort cálido anual para cada caso y cada espacio habitable analizado, el segundo valor indica el porcentaje de disminución de los grados de desconfort cálido anual respecto a los valores obtenidos en el caso base. Los mayores porcentajes de disminución de los grados de desconfort cálido los tiene la aplicación de todas las estrategias propuestas en este apartado, llegando a una disminución mayor o igual al 50% en los espacios habitables de mayor ocupación. Le sigue la aplicación de aislante térmico en la parte externa de la envolvente, en donde se observa el mayor impacto en la cocina, con un 31% de disminución respecto al caso base, esto se debe a que esta no cuenta con incidencia de radiación solar directa a través de ventanas, como es el caso del resto de los espacios habitables. La siguiente mejor estrategia es el cambio de color de techo, que tiene porcentajes de disminución un poco menores al de la aplicación del aislante térmico. Aquí también el mayor impacto sucede en la cocina con una reducción del 25% de los grados de desconfort cálido anual respecto al caso base.

Se pueden observar porcentajes negativos que indican que no hubo disminución, sino lo contrario, hubo un aumento de los grados horas de desconfort cálido anual respecto al estado base. Esto sucedió para la orientación oeste, en donde se esperaba este comportamiento, ya que se le considera la orientación más desfavorable para climas cálidos. También se observó para la recámara 2, cuando la fachada principal se encuentra orientada hacia el norte, este aumento se debe a que la distribución de la vivienda coloca a esta habitación al suroeste, en donde recibe una mayor radiación solar, respecto a la radiación que recibe con la orientación base (Noreste).

Tabla 6. 12. Grados hora de discomfort para cada espacio habitable de la vivienda y para cada propuesta de estrategia de diseño bioclimático. El porcentaje se refiere a la disminución con respecto al caso base.

GRADOS HORA DE DISCONFORT CÁLIDO ANUAL [°C h]										
	Sala comedor		Recámara 1		Cocina		Baño		Recámara 2	
Caso base	85886	%	83474	%	82218	%	76289	%	82704	%
Onorte	83713	3	80707	3	81284	1	75856	1	83137	-1
Ooeste	86361	-1	83371	0	82861	-1	77345	-1	84351	-2
CT	66773	22	68701	18	61477	25	65860	14	69229	16
CM	86467	-1	81700	2	82870	-1	71924	6	80069	3
PS	78409	9	75761	9	68113	17	67458	12	76224	8
A	62508	27	62945	25	56872	31	58420	23	63162	24
Todas (Onorte)	40975	52	41888	50	45185	45	44106	42	36172	56

7 Conclusiones

El crecimiento de la población en Tuxtepec ha acelerado el aumento de las construcciones en la ciudad, sobre todo de las viviendas de interés social, con una tasa de crecimiento de viviendas anual del 2.6 % (INEGI 2006). En general, los constructores de estas viviendas no han tomado en cuenta el clima cálido húmedo de la zona para su diseño, provocando discomfort térmico al interior de las viviendas. Las viviendas vernáculas pueden ser térmicamente más confortables que las casas de interés social construidas actualmente, ya que tenían la orientación, la forma geométrica, la ubicación de puertas y ventanas, entre otros elementos, adaptados al clima de Tuxtepec.

En esta tesis se presentan propuestas de diseño bioclimático para Tuxtepec y se hace un estudio cuantitativo del desempeño térmico de una vivienda de interés social utilizando el programa EnergyPlus, en el que se evalúan las siguientes estrategias de diseño bioclimático: el cambio de orientación de la fachada principal de sur con 30° oeste a orientación norte, la colocación de protecciones solares en las ventanas, el cambio de color de los muros de amarillo a blanco y del techo de rojo a blanco y adicionar aislamiento térmico en el exterior de la envolvente. Derivado de esta investigación se elaboró una guía con recomendaciones para la construcción de viviendas térmicamente confortables en San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca para ser utilizada por constructores y desarrolladores de viviendas.

En el estudio cuantitativo del desempeño térmico de una vivienda de interés social se evaluó el promedio de la temperatura humidex y los grados hora de discomfort cálido anual del aire al interior de cada una de las zonas de mayor ocupación (sala comedor, las dos recámaras y la cocina). En este estudio se obtuvo que las tres estrategias que logran menores valores del promedio de estos parámetros en estas zonas, en orden son: el aislamiento térmico colocado en la parte exterior de la envolvente (44.8 °C y 60,781 °C h), el cambio del color del techo de rojo a blanco (46.8 °C y 66,545 °C h), la incorporación de protecciones solares en las ventanas (49.5 °C y 74,626 °C h), y el cambio de orientación de la fachada principal de sur con 30° al oeste a orientación norte (50.8 °C y 82,210 °C h). El valor de estos parámetros para el caso base es de 51.3 °C y 83,571 °C h. Además, se observa que al integrar todas las estrategias propuestas analizadas se tiene que el máximo del promedio en todas las zonas de la temperatura humidex es de 39.5 °C y 41,055 °C h grados hora de discomfort cálido, representando una disminución de 11.8 °C en la temperatura humidex máxima y del 50 % de los grados hora de discomfort cálido respecto al caso base.

En lugares con clima cálido húmedo, como es el caso de Tuxtepec, no solo se debe tomar en cuenta la temperatura humidex al interior de las viviendas, también es importante conocer cómo se mueve el aire en su interior, ya que una vivienda correctamente ventilada propiciará el confort térmico de sus habitantes. Por ello, se propone como trabajo a futuro realizar un análisis sobre la ventilación en el interior de las viviendas, utilizando simulaciones de dinámica de fluidos computacional para obtener los coeficientes de presión requeridos en las simulaciones con EnergyPlus. Lo anterior es para complementar el análisis térmico realizado en esta tesis y que permita conocer las estrategias de diseño bioclimático, incluida la ventilación, con las que se llegue a las condiciones de confort térmico para sus ocupantes.

El producto de esta investigación es la guía de diseño bioclimático para San Juan Bautista Tuxtepec, la cual será distribuida entre arquitectos, ingenieros y constructores en general que trabajan en la ciudad y sus alrededores, con la idea de tener comunicación con ellos y de ser necesario recibir retroalimentación para su mejoramiento de ser necesario.

Referencias

- Aguirre M., 2009. La casa tradicional de San Pedro Ixcatlán, Horizontes, Revista de Nuevos Horizontes para la Arquitectura de las Comunidades (NHAC), Otoño, 16-18.
- Andrades M., Muñoz C., 2012. Fundamentos de climatología (Material Didáctico. Agricultura y Alimentación). Universidad de La Rioja, Servicio de Publicaciones. España.
- Bahena P., 2013. Diseño de viviendas térmicamente confortables con uso de sistemas pasivos de climatización en la zona de Temixco: Guía de Constructores (tesina de nivel licenciatura), Universidad Politécnica del Estado de Morelos, México.
- Bainbridge, D., 2011. Passive solar architecture: heating, cooling, ventilation, and more using natural flows. Chelsea Green Publishing.
- Breña A., 2004. Precipitación y Recursos Hidráulicos en México. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Canales M., 2014. Efectos de techos y fachadas vegetales en el comportamiento térmico de edificios (memoria de nivel licenciatura), Universidad de Chile, Chile.
- Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC), 2016. Hipoteca verde para casas ecológicas contribuyendo a un futuro mejor (Consultado el 2 de mayo de 2016). Disponible en: <http://www.cmic.org/mnsectores/vivienda/2008/INFONAVIT/hipotecaverde.htm>

- Capitel A., 2005. La arquitectura del patio. Editorial Gustavo Gili, España.
- Ceballos V., 1994. Laboratorio de climatología y calidad del aire UACJ. Ciudad Juárez.
- Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI), 2010. Código de edificación de vivienda, 2^o Edición, D.F. México.
- Deffis A., 1987. Arquitectura Ecológica Tropical, Editorial Pax, México.
- Díaz O., 2012. La cubierta metálica en el clima cálido húmedo: análisis del comportamiento térmico del techo de zinc de la vivienda vernácula dominicana. (Tesis de Maestría), Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Domínguez A. et al., 2014. Estudio del enfriamiento pasivo por fachadas ventiladas en el sur de España, Actas del I Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Eco-Eficientes. España.
- EcuRed (Consultado el 5 de febrero de 2017) Disponible en https://www.ecured.cu/Radiaci%C3%B3n_solar
- Espinosa, M., 1961. Apuntes Históricos de las Tribus Chinantecas, Mazatecas y Popolocas. Reedición y notas de Howard, C, Papeles de la Chinantla, vo. VIII, México.
- EcuRed (Consultado el 5 de febrero de 2017) Disponible en https://www.ecured.cu/Radiaci%C3%B3n_solar
- Etheridge, D. W. y Sandberg, M., 1996. Building ventilation: theory and measurement, volumen 50. John Wiley & Sons Chichester, UK.
- Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE), 2009. Taller sobre la envolvente térmica y el ahorro de energía.
- FISO, 2015. Confort higrotérmico (Consultado el 8 de agosto de 2016) Disponible en: <http://www.fiso-web.org/Content/files/articulos-profesionales/CONFORT-HIGROT%C3%89RMICO-Y-CUIDADO-AMBIENTAL.pdf>
- Fuentes A., 2002. Arquitectura Bioclimática, 2^o edición, D.F. México.
- García T., 1996. Tuxtepec ante la Historia. Dirección de Información, Estudios Culturales y Publicaciones, México.
- Gómez Azpeitia G. et al., 2006. Adaptación del índice humidex para el clima de la ciudad de Colima, México, de acuerdo con el enfoque adaptativo. Universidad de Colima, México. Estudios de Arquitectura bioclimática Anuario 2006 volumen viii. UAM Azcapotzalco, Limusa, Noriega Editores.
- Guimarães M., 2008. Confort Térmico y Tipología Arquitectónica en Clima Cálido-Húmedo. Análisis térmico de la cubierta ventilada. (Tesis de maestría), Universidad Politécnica de Catalunya, España.

- Hernández A., Et al., 2013. Manual de diseño bioclimático urbano. Recomendaciones para la elaboración de normativas urbanísticas. Coordinación editorial y traducción al portugués: Artur Gonçalves, Antonio Castro y Manuel Feliciano. Bragança, Portugal: Instituto Politécnico de Bragança, ISBN: 978-972-745-157-9.
- Humphreys M. y Nicol F., 2000. Outdoor temperature and indoor thermal comfort-raising the precision of the relationship for the 1998 ASHRAE database files studies, ASHRAE Transactions, 106 (2). Atlanta USA.
- Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT), 2016. Hipoteca Verde. (Consultado el 2 de mayo de 2016). Disponible en: http://portal.infonavit.org.mx/wps/wcm/connect/infonavit/trabajadores/saber+para+de+cidir/cuido_mi_casa/hipoteca+verde
- Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMNCR), 2016. (Consultado el 5 de febrero de 2017) Disponible en <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/28035/Cat%C3%A1logo+B%C3%A1sico+de+Instrumentos+Meteorol%C3%B3gicos/3701f150-452d-44d3-9c58-19d94a01f28d>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2016. Zonas Ecológicas. (Consultado el 20 de abril de 2016). Disponible en: <http://www.inecc.gob.mx/con-eco-ch/387-hc-zonas-ecologicas>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2005. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2006. Vivienda e infraestructura básica para los asentamientos humanos (San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca).
- Kwok, A., 2015. Manual de diseño ecológico en arquitectura, Trillas, México.
- Monkhouse F. J., 1978. Diccionario de términos geográficos. Barcelona: oikos-tau s.a. ediciones, p.94.
- Morillón D., 2004. Atlas del Bioclima de México, Instituto de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México, D.F. México.
- Morillón D., 2006. Impacto del cambio ambiental global en el sector residencial: Más allá del cambio climático; Las dimensiones psicosociales del cambio ambiental global, ed. SEMARNAT-INE-UNAM, México.
- Morillón D., 2011. Edificación Sustentable en México: Retos y oportunidades. AI-México.
- Olgay V., 1963. Design with climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism, Princeton University Press, New Jersey, USA.
- Otto F., 1979. Arquitectura Adaptable. Seminario organizado por el Instituto de Estructuras Ligeras, Ed. Gustavo Gili, Barcelona España.

- Priego C., 2001. Tipologías arquitectónicas de Tlacotalpan, Ver., Centro INAH, Veracruz, México.
- Rojas J. et al., 2010. Energía y confort en edificaciones. Revista Digital Universitaria. 11 (10). ISSN: 1067-6079.
- Romeo L., Sánchez F., Gil A., Castellano M., 2004. Simulación de la transferencia de calor en seres humanos. Revista de Medicina de Rehabilitación, Vol.XV, n° 3, 22-32.
- Secretaría de Energía (SENER), 2015. Balance Nacional de Energía 2014. México, D.F.
- Smoyer-Tomic K, Rainham D, 2001. Beating the heat: development and evaluation of a Canadian hot weather health-response plan. Environ Health Perspect. 109:1241–1248
- Stagno B. y Ugarte J., 2007. Ciudades Tropicales Sostenibles, Instituto de Arquitectura Tropical, Costa Rica.
- Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), 2015. (Consultado el 4 de octubre de 2016) Disponible en <http://www.azc.uam.mx/cyad/posgrado/>
- Universidad de Chile (UChile), 2017. (Consultado el 5 de febrero de 2017) Disponible en mct.dgf.uchile.cl/AREAS/modHR.pdf
- Universidad de Murcia (UM) (Consultado el 23 de septiembre de 2016) Disponible en (<http://www.um.es/geograf/clima/tema01.html>)
- Van Lengen J., 1982. Manual del arquitecto descalzo, Editorial Pax, México.
- Velasco A., 1970. Historia de la Arquitectura. Diana. México D.F.
- Wikipedia, La enciclopedia libre, 2017. Anexo:Municipios de Oaxaca. (Consultado el 6 de septiembre del 2017). Disponible en https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Anexo:Municipios_de_Oaxaca&oldid=101673787

Anexo I



GUÍA DE DISEÑO BIOCLIMÁTICO PARA SAN JUAN BAUTISTA TUXTEPEC, OAX.



OBJETIVO

Esta guía tiene como objetivo proponer estrategias de diseño bioclimático que permitan a los constructores y diseñadores construir viviendas térmicamente confortables, con el menor consumo de energía externa, para el clima cálido húmedo de San Juan Bautista Tuxtepec.

INTRODUCCIÓN

El sector energético es, sin duda, uno de los pilares de la sociedad actual, ya que permite satisfacer muchas de las necesidades humanas, aumentar la producción de bienes y servicios; base del actual desarrollo económico, pero sobre todo, ha permitido al ser humano desarrollarse de forma independiente del clima. Sin embargo, el consumo de energía está impactando negativamente en el ambiente, ya que la mayor parte de esta se produce por la quema de combustibles fósiles, lo que

genera una gran cantidad de gases de efecto invernadero, causa principal del cambio climático. Por lo que es necesario disminuir su consumo. Y aunque sea un reto global, este cambio comienza en casa.

Una forma de reducir el consumo energético en la vivienda es cambiando los dispositivos, equipos y aparatos por los más eficientes disponibles en el mercado, por ejemplo, cambiar los focos incandescentes a fluorescentes o a lámparas LED. Otra forma puede ser aprovechando las fuentes de energía, como el sol, a través de dispositivos que reducen el consumo de combustibles, como es el caso de los calentadores solares de agua. Pero no son las únicas alternativas.

Antes de la utilización de energía eléctrica, las altas temperaturas y los altos valores de humedad relativa no fueron problema para las viviendas tuxtepecanas, ya que las construcciones estaban adaptadas al clima de la región. Es por ello, que una importante alternativa para disminuir, o incluso evitar, el uso de equipos como el aire acondicionado que consumen una gran cantidad de energía eléctrica es construir tomando en cuenta el clima de Tuxtepec, como la trayectoria aparente del sol a lo largo del año, los vientos dominantes de la región, temperatura y humedad relativa del aire.

Los beneficios de disminuir el consumo de energía no solo son ambientales, sino también económicos, ya que se reducen los gastos impactando de manera positiva en la economía familiar. Si bien es cierto que en algunos casos el precio inicial que se debe pagar por construir de acuerdo al clima, en general, es más alto que sin tomarlo en cuenta, también es cierto que los costos de consumo por energía se reducen al diseñar las viviendas de acuerdo al clima, respecto a las que no son diseñadas con este enfoque.

Esta guía propone estrategias de diseño urbano y arquitectónico que toman en cuenta el clima de Tuxtepec, con la finalidad de disminuir el consumo de energía sin comprometer el confort térmico de los ocupantes.

La primera parte de la guía, titulada *Diseño urbano*, consta de propuestas para el desarrollo urbano de las nuevas colonias o parques habitacionales, que permitan aplicar con mayor facilidad las estrategias particulares para cada vivienda. En la segunda sección, titulada *Diseño de la vivienda*, se establecen las estrategias de diseño bioclimático y sistemas pasivos de climatización que se proponen para la construcción o modificación de las viviendas.

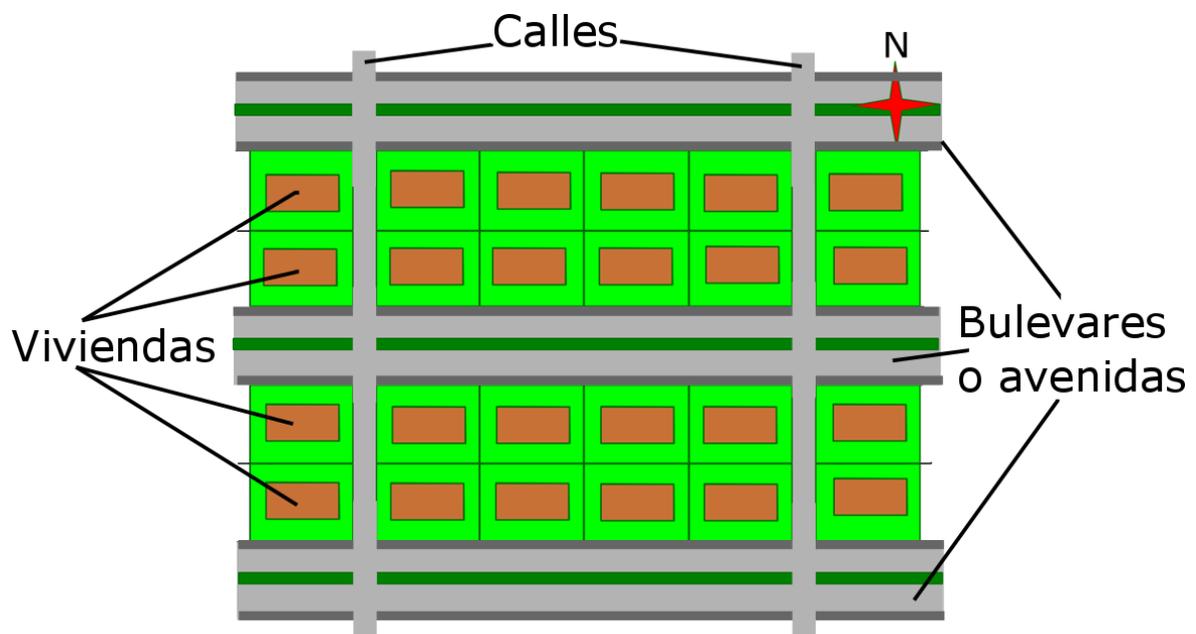
Diseño urbano

Traza urbana

Objetivo: garantizar, a través de la distribución de los lotes o terrenos, la orientación de las viviendas que es adecuada para el clima de Tuxtepec.

Se recomienda colocar las vías principales (bulevares y avenidas) en el eje este-oeste para que las fachadas de las viviendas tengan orientación norte o sur. Sobre el eje norte-sur son necesarias vías peatonales o callejones (vías poco anchas) que permitan al viento dominante aumentar su velocidad.

La separación entre las fachadas principales debe ser como mínimo dos veces la altura de estas.



Traza urbana recomendada

Vegetación en la vía pública

Objetivo: brindar protección solar, mejorar la calidad del aire y propiciar la infiltración del agua pluvial hacia el subsuelo.

Se deben colocar árboles de hojas perennes (árboles que no pierdan sus hojas durante todo el año) o árboles que cuenten con follaje en primavera y verano (particularmente en abril y mayo) en las vías públicas (bulevares y avenidas), en plazas, parques y estacionamientos.



Fotografía de una avenida con árboles en las banquetas en Villahermosa, Tabasco.

Para zonas peatonales se recomienda usar adopastos. Para zonas sin tránsito peatonal ni vehicular se recomienda el uso de plantas cubresuelos que requieran poca cantidad de agua en los meses de abril y mayo.

Materiales de la vía pública

Objetivo: disminuir la temperatura superficial de los materiales de la vía pública y propiciar la infiltración del agua pluvial hacia el subsuelo.

Las calles, avenidas y bulevares deben ser de concreto o adoquines de colores claros, además se debe utilizar pavimento permeable al agua o adoquines porosos.



Plantas cubresuelos en las banquetas y adoquines de color claro en calle de Tlacotalpan, Veracruz.

Diseño de las viviendas

Geometría y orientación de la vivienda

Objetivo: disminuir el ingreso de radiación solar hacia el interior de la vivienda a través de las ventanas y propiciar la ventilación natural.

La fachada principal de la vivienda debe estar orientada hacia el norte o el sur.

Las ventanas deben colocarse en las fachadas norte y sur, se deben evitar las ventanas en la dirección este y oeste.

Objetivo: disminuir el área de la envolvente con exposición a radiación solar.

Se recomienda que la vivienda separada (no adosada a vecinos) tenga el eje este-oeste más largo que el eje norte-sur, con el objetivo de que el área de los muros con orientación este y oeste sea menor que el área de los muros con orientación norte y sur.

En el caso de las viviendas que son contiguas a sus vecinos, las recomendaciones son análogas a las viviendas no adosadas a vecinos, pero tomando en cuenta que la forma geométrica de planta corresponde a la forma geométrica de toda la hilera de casas.

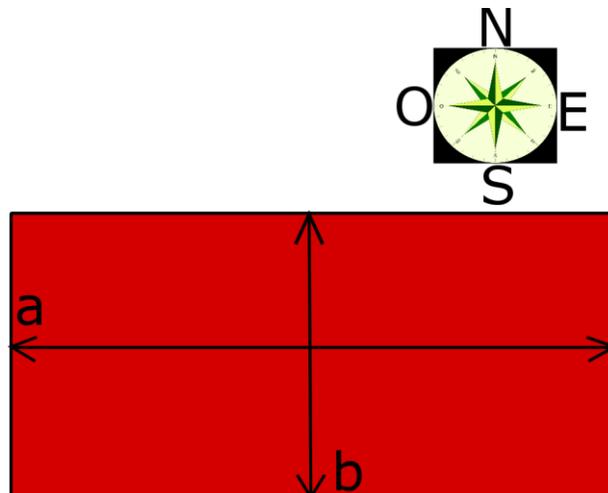


Diagrama de una vivienda con base rectangular donde se muestra la configuración geométrica recomendada para el clima de Tuxtepec para una vivienda aislada.

Objetivo: favorecer la ventilación natural al interior de la vivienda y evitar encharcamientos.

Los techos deben ser de dos aguas y deben tener una inclinación mayor a los 10° respecto al eje horizontal, las caídas deben estar orientadas hacia el norte y hacia el sur.

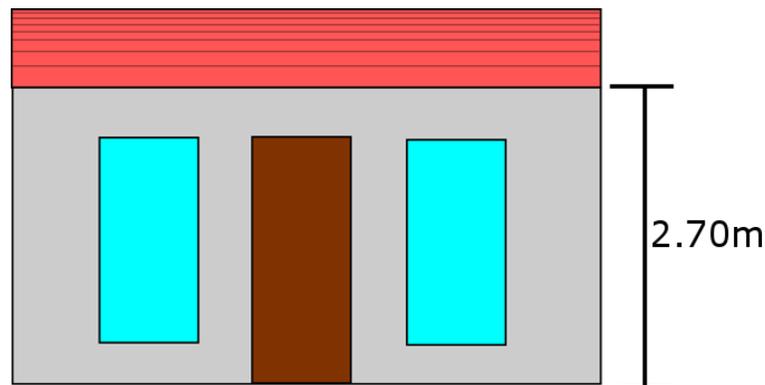
Objetivo: propiciar la ventilación.

Se recomienda que las ventanas sean alargadas en la dirección vertical y que la parte superior llegue como mínimo a una altura de 1.70 para que se propicie la ventilación a la altura de los ocupantes.

Objetivo: propiciar la disminución de la temperatura al interior de la vivienda.

La altura mínima recomendada entre el piso y el techo al interior es de 2.70 m.

Sí es posible, se recomienda que las viviendas tengan como mínimo dos plantas.



Propuesta esquemática de la fachada principal de una vivienda de una planta.

Distribución de la vivienda

Objetivo: mantener la temperatura de confort en las recámaras y espacios de la vivienda donde sus ocupantes se encuentran la mayor parte del tiempo.

Se recomienda diseñar y planear los espacios de mayor utilización, como las recámaras, sala y comedores, en zonas con orientaciones favorables. Las estancias secundarias, de menor utilización, se colocan en zonas menos favorables. En la siguiente tabla se propone con una **X** la ubicación de los espacios de la vivienda.

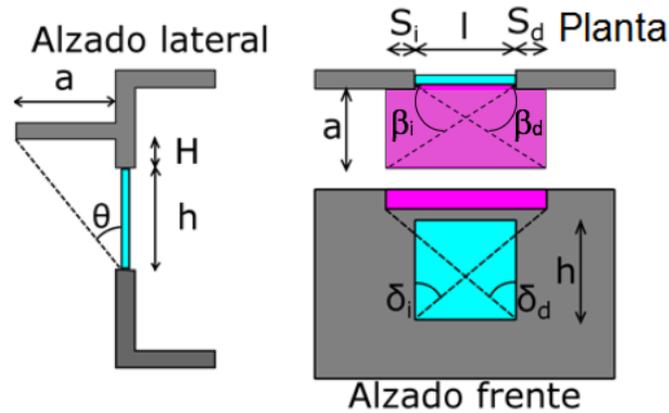
Ubicaciones propuestas para los espacios de una vivienda.

Espacios	Ubicación			
	E	N	O	S
dormitorios	X	X		X
sala	X	X		X
comedor	X	X		X
cocina	X		X	X
lavadero	X	X	X	
baños	X	X	X	X

Protecciones solares

Objetivo: evitar el ingreso de radiación solar directa a través de las ventanas o elementos transparentes de la envolvente hacia el interior de la vivienda.

Para ventanas en las fachadas norte y sur, se recomienda utilizar el alero, que es un elemento horizontal que brinda protección principalmente en horas cercanas al medio día solar.



Vistas de alzado lateral, de planta y frente de un alero

Para proteger las ventanas con orientación norte y sur de la radiación solar directa utilizando aleros en un horario de las 9:00 a las 15:00, con orientación este de 10:00 a 12:00 y con orientación oeste de 12:00 a 14:00 se necesitan tener los ángulos que se muestran en la siguiente tabla.

Ángulos mínimos de un alero necesarios para proteger las ventanas de la radiación solar directa.

Ventanas	Ángulos [°]				
	θ	β_d	β_i	δ_d	δ_i
Norte	$\geq 15^\circ$	$\geq 10^\circ$	$\geq 10^\circ$	$\geq 10^\circ$	$\geq 60^\circ$
Sur	$\geq 30^\circ$	$\geq 20^\circ$	$\geq 20^\circ$	$\geq 60^\circ$	$\geq 60^\circ$
Este	$\geq 30^\circ$	$\geq 70^\circ$	$\geq 20^\circ$	$\geq 15^\circ$	$\geq 60^\circ$
Oeste	$\geq 30^\circ$	$\geq 20^\circ$	$\geq 70^\circ$	$\geq 60^\circ$	$\geq 15^\circ$

Con los ángulos anteriores se realizaron los cálculos necesarios para obtener el ancho de los aleros y la longitud saliente respecto al ancho de la ventana. Para el caso de las orientaciones norte y sur la longitud saliente es simétrica, es decir, el lado izquierdo es igual al derecho ($s_i = s_d$). En el caso que sea necesario colocar ventanas con orientaciones este y oeste, los valores del ancho del alero y de las longitudes salientes se muestran en la siguiente tabla. Para la orientación este, s_d toma los valores mostrados en la tabla y s_i es cero. Para la orientación oeste s_d es cero y s_i toma los valores mostrados en la tabla.

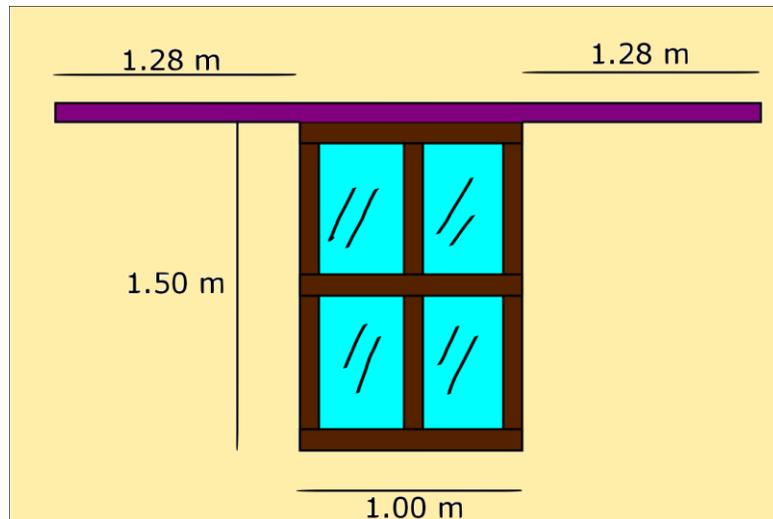
Dimensiones del alero para ventana norte, de acuerdo a la altura de la ventana (h), el ancho de la ventana (l). Ancho del alero (a), saliente (s).

h [m]	a [m]	l [m]															
		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
1.00	0.27	1.02	0.92	0.82	0.72	0.62	0.52	0.42	0.32	0.22	0.12	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.10	0.29	1.17	1.07	0.97	0.87	0.77	0.67	0.57	0.47	0.37	0.27	0.17	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
1.20	0.32	1.32	1.22	1.12	1.02	0.92	0.82	0.72	0.62	0.52	0.42	0.32	0.22	0.12	0.02	0.00	0.00
1.30	0.35	1.48	1.38	1.28	1.18	1.08	0.98	0.88	0.78	0.68	0.58	0.48	0.38	0.28	0.18	0.08	0.00
1.40	0.38	1.63	1.53	1.43	1.33	1.23	1.13	1.03	0.93	0.83	0.73	0.63	0.53	0.43	0.33	0.23	0.13
1.50	0.40	1.78	1.68	1.58	1.48	1.38	1.28	1.18	1.08	0.98	0.88	0.78	0.68	0.58	0.48	0.38	0.28
1.60	0.43	1.93	1.83	1.73	1.63	1.53	1.43	1.33	1.23	1.13	1.03	0.93	0.83	0.73	0.63	0.53	0.43
1.70	0.46	2.08	1.98	1.88	1.78	1.68	1.58	1.48	1.38	1.28	1.18	1.08	0.98	0.88	0.78	0.68	0.58
1.80	0.48	2.24	2.14	2.04	1.94	1.84	1.74	1.64	1.54	1.44	1.34	1.24	1.14	1.04	0.94	0.84	0.74
1.90	0.51	2.39	2.29	2.19	2.09	1.99	1.89	1.79	1.69	1.59	1.49	1.39	1.29	1.19	1.09	0.99	0.89
2.00	0.54	2.54	2.44	2.34	2.24	2.14	2.04	1.94	1.84	1.74	1.64	1.54	1.44	1.34	1.24	1.14	1.04
2.10	0.56	2.69	2.59	2.49	2.39	2.29	2.19	2.09	1.99	1.89	1.79	1.69	1.59	1.49	1.39	1.29	1.19
2.20	0.59	2.84	2.74	2.64	2.54	2.44	2.34	2.24	2.14	2.04	1.94	1.84	1.74	1.64	1.54	1.44	1.34
2.30	0.62	3.00	2.90	2.80	2.70	2.60	2.50	2.40	2.30	2.20	2.10	2.00	1.90	1.80	1.70	1.60	1.50

Dimensiones del alero para ventana sur, de acuerdo a la altura de la ventana (h), el ancho de la ventana (l). Ancho del alero (a), saliente (s).

h [m]	a [m]	l [m]															
		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
		s [m]															
1.00	0.58	1.09	0.99	0.89	0.79	0.69	0.59	0.49	0.39	0.29	0.19	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.10	0.64	1.24	1.14	1.04	0.94	0.84	0.74	0.64	0.54	0.44	0.34	0.24	0.14	0.04	0.00	0.00	0.00
1.20	0.69	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.00	0.00
1.30	0.75	1.56	1.46	1.36	1.26	1.16	1.06	0.96	0.86	0.76	0.66	0.56	0.46	0.36	0.26	0.16	0.06
1.40	0.81	1.72	1.62	1.52	1.42	1.32	1.22	1.12	1.02	0.92	0.82	0.72	0.62	0.52	0.42	0.32	0.22
1.50	0.87	1.88	1.78	1.68	1.58	1.48	1.38	1.28	1.18	1.08	0.98	0.88	0.78	0.68	0.58	0.48	0.38
1.60	0.92	2.04	1.94	1.84	1.74	1.64	1.54	1.44	1.34	1.24	1.14	1.04	0.94	0.84	0.74	0.64	0.54
1.70	0.98	2.20	2.10	2.00	1.90	1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.90	0.80	0.70
1.80	1.04	2.36	2.26	2.16	2.06	1.96	1.86	1.76	1.66	1.56	1.46	1.36	1.26	1.16	1.06	0.96	0.86
1.90	1.10	2.51	2.41	2.31	2.21	2.11	2.01	1.91	1.81	1.71	1.61	1.51	1.41	1.31	1.21	1.11	1.01
2.00	1.15	2.67	2.57	2.47	2.37	2.27	2.17	2.07	1.97	1.87	1.77	1.67	1.57	1.47	1.37	1.27	1.17
2.10	1.21	2.83	2.73	2.63	2.53	2.43	2.33	2.23	2.13	2.03	1.93	1.83	1.73	1.63	1.53	1.43	1.33
2.20	1.27	2.99	2.89	2.79	2.69	2.59	2.49	2.39	2.29	2.19	2.09	1.99	1.89	1.79	1.69	1.59	1.49
2.30	1.33	3.15	3.05	2.95	2.85	2.75	2.65	2.55	2.45	2.35	2.25	2.15	2.05	1.95	1.85	1.75	1.65

Como ejemplo para el uso de los datos de las tablas, supongamos una ventana con orientación norte, altura 1.50 m y ancho 1.00 m. De la información de las celdas amarillas de la primer tabla de este objetivo se tiene que el ancho mínimo del alero debe ser de 0.40 m y las longitudes salientes izquierda y derecha mínimo serán de 1.28 m. Si ahora se supone una ventana con orientación este, altura 1.6 m y ancho 1.2 m, el ancho del alero debe tener como mínimo 0.92 m, el lado saliente derecho (sd) debe ser de 1.34 m, y sin lado saliente izquierdo (si).



Dimensiones del alero para proteger una ventana de 1.00 de ancho 1.50 m de alto con orientación norte.

Un elemento típico de la región es el *corredor*, que es un tipo de alero que protege las fachadas principales, incluidas las ventanas, de la radiación solar directa, por ello, se recomienda su utilización en las orientaciones norte y sur, utilizando los ángulos mínimos presentados en las tablas anteriores.

Vegetación en espacios exteriores

Objetivo: proteger las fachadas de la radiación solar directa.

Se deben colocar árboles de raíces pivotantes (raíces que tienen poco crecimiento en la dirección horizontal) con la altura suficiente para proteger la fachada oeste de la vivienda. Si existe la oportunidad de proteger la fachada este, se puede lograr una mayor disminución de la temperatura del interior de la vivienda.

Objetivo: disminuir el albedo y propiciar la infiltración del agua pluvial hacia el subsuelo.

Se recomienda colocar plantas cubresuelos en patios y zonas de jardines. En las zonas de acceso peatonal a la vivienda se recomienda el uso de adopastos.



Adopastos.

Materiales de los muros y techos exteriores

Objetivo: disminuir la transferencia de calor hacia el interior de la vivienda utilizando materiales con ciertas características térmicas que eviten la conducción a través de muros y techos.

Es recomendable colocar una capa de material aislante en la parte exterior de los muros y techos exteriores de la vivienda, en particular en los muros con orientaciones este y oeste, así como en el techo.

Color exterior de muros y techos

Objetivo: aumentar la reflectancia solar de las superficies exteriores de la vivienda para reducir el ingreso de energía térmica al interior de la vivienda.

Se recomienda pintar la superficie exterior de los muros y techos de la vivienda con colores claros. El blanco es la mejor opción.

Ventilación

Objetivo: favorecer la renovación del aire y aumentar la velocidad del aire en el interior de la vivienda.

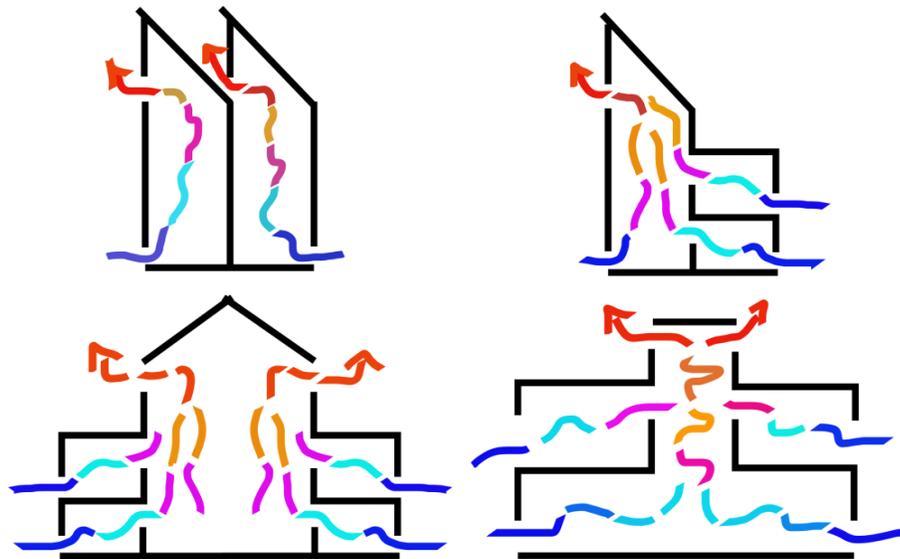
Se deben colocar ventanas y puertas en las fachadas norte y sur de la vivienda.

Se recomienda colocar ventilas en la parte inferior de las fachadas norte y sur con protección de ladrones e insectos, las cuales deben ser operables para su apertura o cierre. También se recomiendan colocar ventilas en las puertas interiores.

Objetivo: propiciar la salida del aire caliente del interior de la vivienda.

Se recomienda colocar en el techo y la parte superior de muros alguna abertura que permita la salida del aire caliente del interior de la vivienda, se debe colocar también alguna abertura en la parte inferior o media de muros para que el aire del exterior entre a la vivienda.

Se recomiendan colocar celosías, con protección contra insectos en la parte superior de la casa, sobre todo para las orientaciones norte y sur.

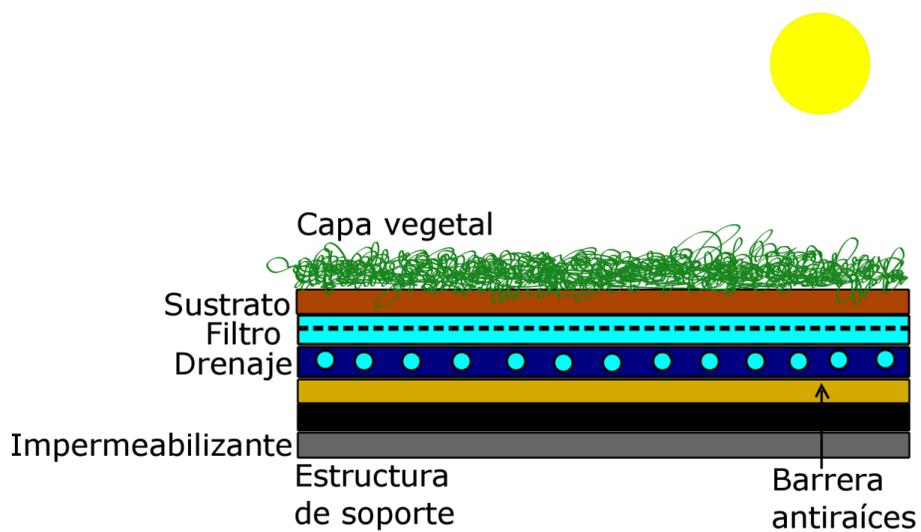


Ejemplos de configuraciones de aberturas para la salida de aire caliente de la vivienda.

Otras recomendaciones

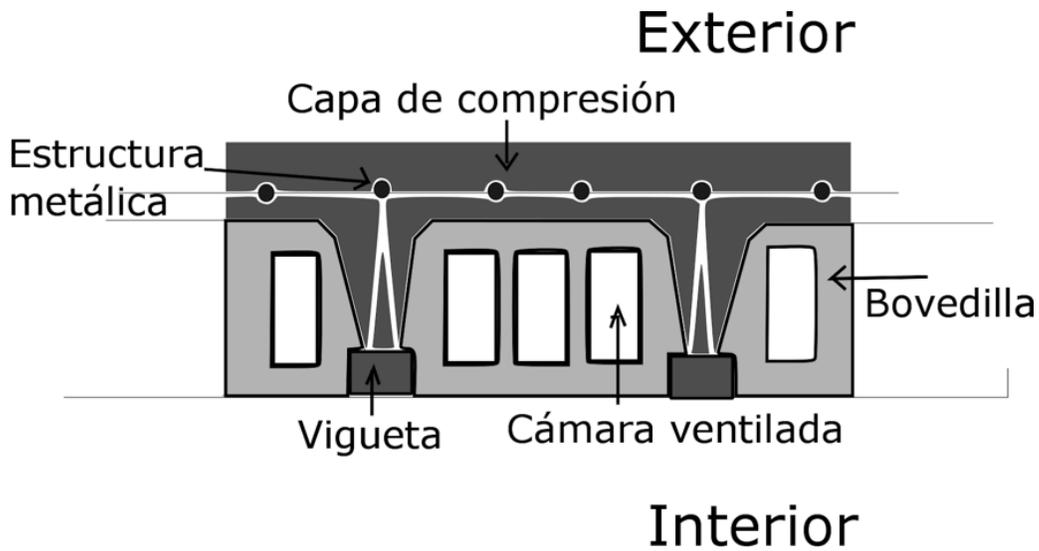
Objetivo: evitar la transferencia de calor hacia el interior de la vivienda.

Se recomienda colocar techos verdes y muros verdes en las fachadas con orientación este y oeste.

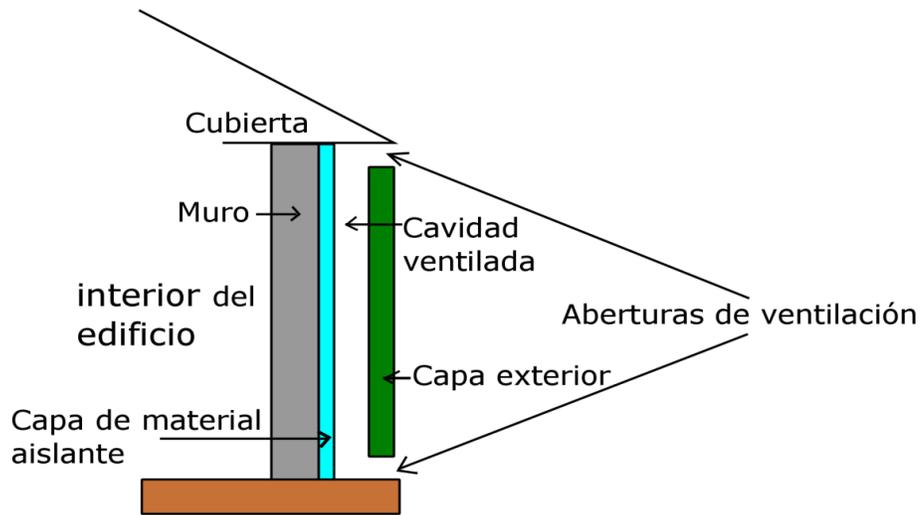


Estructura de un techo verde.

Es recomendable tener techos ventilados, como el sistema de vigueta y bovedilla, con las aberturas orientadas hacia el norte y sur. También se recomienda colocar muros dobles o muros ventilados en las fachadas este y oeste de la vivienda, con una separación mínima entre muros de 15 cm.



Techo con el sistema vigueta y bobedilla.



Estructura del muro ventilado.

ANEXO II. Ficha técnica de levantamiento de información de casas de interés social

FICHA TÉCNICA DE VIVIENDA EN SAN JUAN BAUTISTA TUXTEPEC, OAX.				
Responsable de la ficha: Gerardo Rangel Paredes				
Fecha de elaboración:	1 de noviembre de 2016			
DATOS GENERALES				
Familia	Carrera Rodríguez			
Domicilio	Calle Playa Valle Nacional 5, Residencial GESO Playa de Mono			
Número de viviendas del mismo tipo	120			
Área del terreno	90 m²			
Área construida	54 m²			
Edad de la construcción				
Número de niveles	Altura [m]			
1	2.7			
Número de ocupantes	3			
Orientación				
Fachada del predio	Sur 30° Oeste			
Fachada de la casa	Sur 30° Oeste			
CONSUMO DE ENERGÍA				
	Gas	Leña	Electricidad	Otro
Cocina	X		X	
Baño			X	
Otro			X	

¿Cuenta con instalación eléctrica?		Sí	
CONSUMO DE ENERGÍA POR VENTILACIÓN			
Ventiladores	Ubicación	Potencia [W]	Hábitos de consumo
1	Sala-comedor	105	Se prende de las 6 de la tarde a las 11 de la noche la mayoría del año excepto diciembre y enero
2	Recámara 1	105	Se prende de las 10 u 11 de la noche hasta las 5 de la mañana en los meses de septiembre, octubre y noviembre
3	Recámara 2	105	Se prende de las 10 u 11 de la noche hasta las 5 de la mañana en los meses de septiembre, octubre y noviembre
Aire acondicionado	Ubicación	Potencia	Hábitos de consumo
1	Recámara 1	1000	Se utiliza de 10 de la noche a las 2 de la mañana desde marzo hasta agosto. En los meses de abril y mayo se prende desde las 7 de la noche hasta las 2 de la mañana
2	Recámara 2	1000	Se utiliza de 10 de la noche a las 2 de la mañana desde marzo hasta agosto.
CARACTERÍSTICAS DE LA ENVOLVENTE			
		CAPAS (de exterior a interior)	
Tipo de muro/losa	Materiales		Espesor [m]
MURO A	Color Exterior	Amarillo	

	tabique rojo recocido de 10 cm de espesor, con dos capas de repello, el interior con yeso y el exterior con mortero	
MURO B	Color Exterior	
	tabique rojo recocido de 10 cm de espesor, con dos capas de repello, el interior con yeso y el exterior con mortero	
MURO C	Color Exterior	
	tabique rojo recocido de 10 cm de espesor, con dos capas de repello, el interior con yeso y el exterior con mortero	
MURO D	Color Exterior	Amarillo
	tabique rojo recocido de 10 cm de espesor, con dos capas de repello, el interior con yeso y el exterior con mortero	
LOSA A	Color Exterior	Rojo quemado
	techo horizontal de loza de concreto de 10 cm de espesor con una capa de impermeabilizante rojo	

ANEXO III. Cálculo de protecciones solares del caso de estudio en Tuxtepec

Una de las estrategias más importantes para mejorar el desempeño térmico de una construcción en un clima cálido, es proteger las ventanas y elementos transparentes de la envolvente por medio de elementos de sombreado, como aleros, quiebrasoles o remetimientos.

El cálculo de las protecciones solares se realiza para las ventanas que se encuentran en la fachada principal y trasera del caso de estudio, en donde se debe tomar en cuenta que la orientación (de la fachada principal) es hacia el sur con 30° al oeste. La protección solar propuesta, para implementarse en las ventanas de la fachada principal y trasera del caso de estudio, es la combinación de un alero y un quiebrasol los cuales protegerán en todo horario desde el equinoccio de primavera hasta el equinoccio de otoño (del 21 de marzo al 21 de septiembre). Para el cálculo de los ángulos de la combinación alero y quiebrasol se utilizó la gráfica solar estereográfica de San Juan Bautista Tuxtepec (latitud $18^\circ 6'$), a la cual se superpuso la mascarilla de sombra que permite identificar de forma gráfica los ángulos correspondientes.

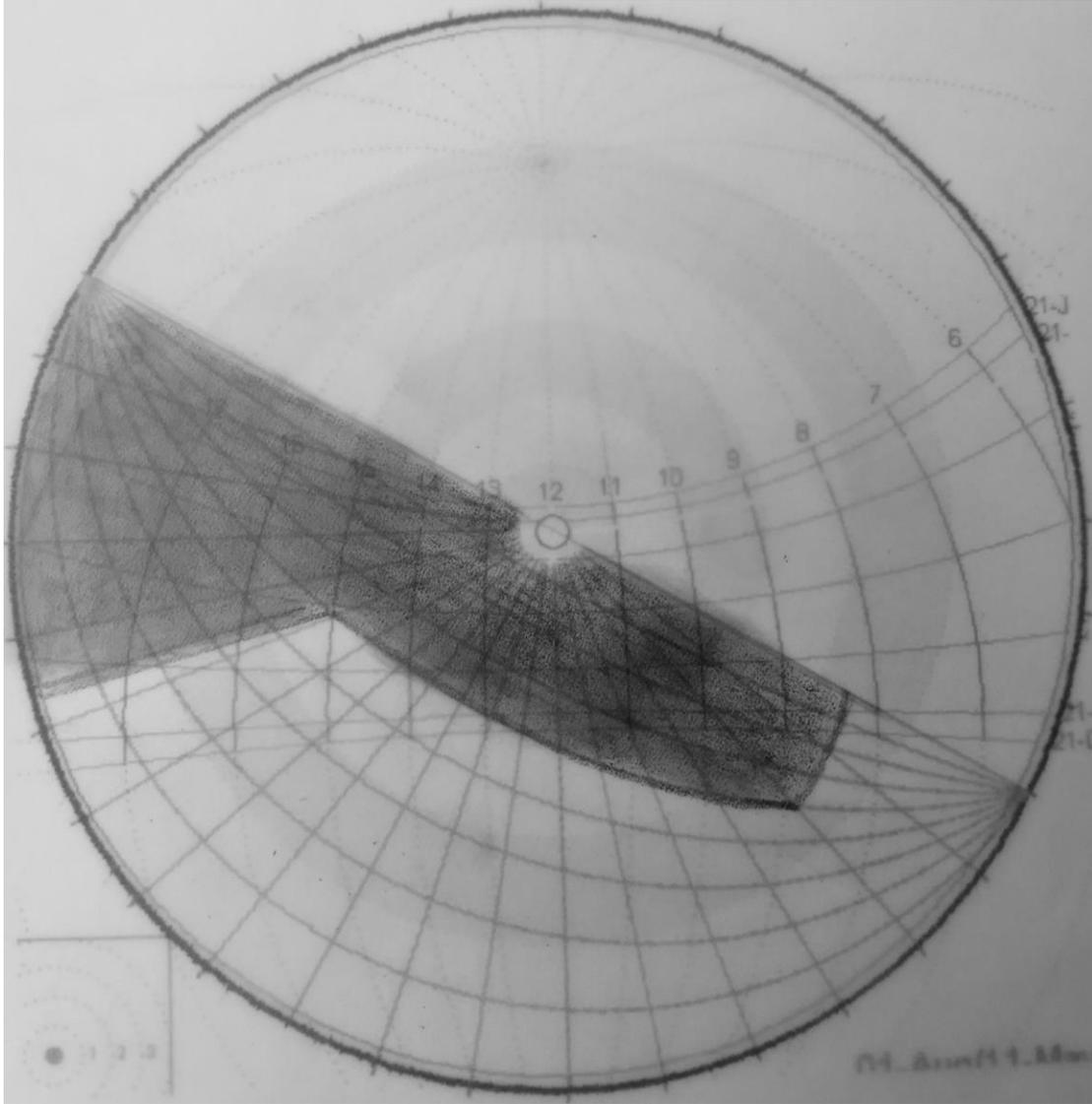


Figura A. 1. Gráfica solar de Tuxtepec y mascarilla de sombras para la configuración de alero y remetimiento izquierdo para ventana con orientación sur 30° al oeste.

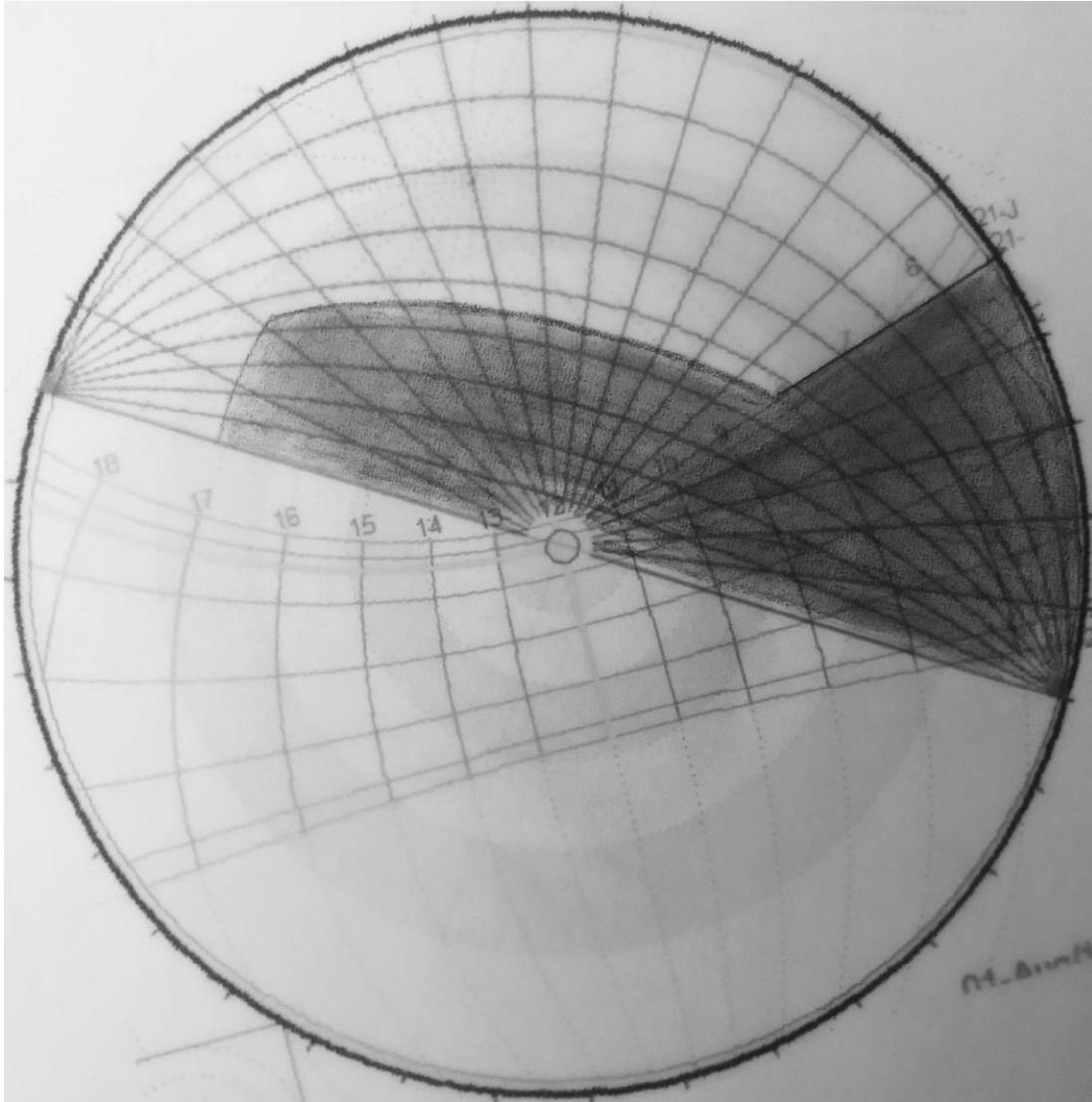


Figura A. 2. Gráfica solar de Tuxtepec y mascarilla de sombras para la configuración de alero y remetimiento izquierdo para ventana con orientación norte 30° al este.

Los ángulos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla A. 1. Ángulos de protección según la orientación de la fachada del caso base estudiado en el capítulo 6

Orientación	Tipo de protección	θ [°]	β [°]
S (30°O)	Alero + quiebrasol	40	45
N (30°E)	Alero + quiebrasol	45	50

Con estos ángulos y las medidas de las ventanas se hizo el cálculo de las dimensiones de la configuración de alero y quiebrasol, utilizando las expresiones para el remetimiento.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{r}{h} \right) \quad \beta_d = \tan^{-1} \left(\frac{r}{l} \right) \quad \delta_d = \tan^{-1} \left(\frac{l}{h} \right)$$

Los resultados se pueden observar en la tabla A.2.

Tabla A. 2 Medidas de las ventanas y dimensiones de las protecciones solares.

MEDIDA DE VENTANAS					Protege del 21 marzo al 21 sep	Tipo protección	Ángulos		Medida de ancho de alero y quiebrasol	
	Ubicación	Orientación	ALTO (h) [m]	LARGO (l) [m]			θ [°]	β [°]	r [m]	r' [m]
VENTANA 1	Sala	S (30°O)	1.6	1.4	en todo horario	Alero + quiebrasol	40	45	1.4	1.0
VENTANA 2	Recámara 1	S (30°O)	1.4	1.2		Alero + quiebrasol	40	45	1.2	0.8
VENTANA 3	Recámara 2	N (30°E)	1.4	1.2		Alero + quiebrasol	45	50	1.4	0.9
VENTANA 4	Baño	N (30°E)	0.6	1		Alero + quiebrasol	45	50	1.2	0.8

ECONOMIZANDO LAS PROTECCIONES SOLARES

Para reducir costos en material se propone que la protección vertical (quiebrasol) tenga un ángulo distinto a 90° (perpendicular) respecto al muro donde se colocará, para que se obtenga la misma sombra con un quiebrasol de menores dimensiones.

Cuando tenemos una ventana en una fachada orientada hacia el norte o sur con un ángulo θ hacia el este u oeste, como se muestra la figura A.3, se forma un triángulo entre el ancho l de la ventana y el ancho r del quiebrasol con un ángulo β_i .

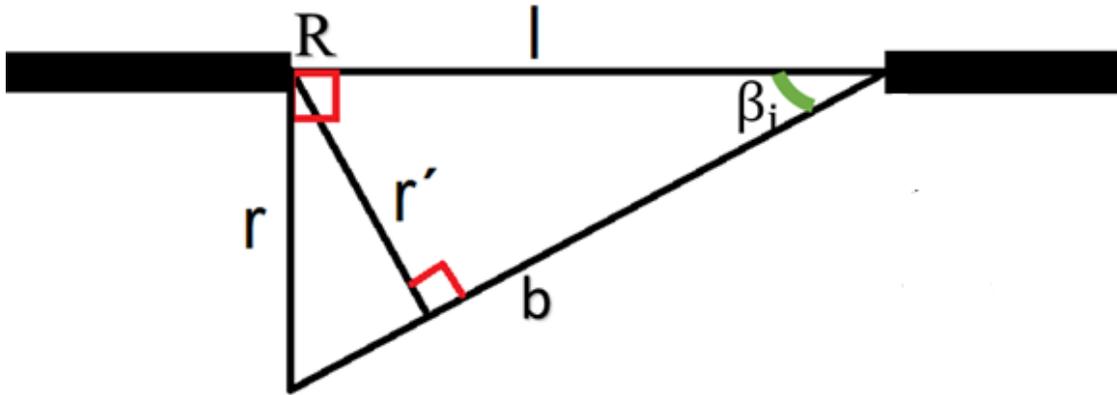


Figura A.3. Esquema del triángulo formado por una ventana de ancho l y un quiebrasol de ancho r que forman un ángulo β_i

Para reducir la medida de r a r' trazamos una línea del vértice R al lado b con 90° como el que se observa en la figura A.3.

Entonces como

$$\text{sen}(\beta_i) = \frac{r'}{l}$$

Despejando obtenemos que

$$r' = l \text{sen}(\beta_i)$$

Con $\beta_i = 45^\circ$ para la orientación sur con 30° hacia el este. Para la fachada orientada hacia el sur 30° hacia el oeste $\beta_i = 40^\circ$.