

Diseño de elementos de protección solar para fachadas acristaladas como mejora al confort térmico: caso estudio en la ciudad de Mexicali, Baja California.  
Design of solar protection elements for glazed facades as an improvement to thermal comfort: case study in the city of Mexicali, Baja California.

G. Santamaria-Villa <sup>a</sup>, A. Luna-León <sup>c</sup>, C. A. Bigurra-Alzati <sup>b\*</sup>.

<sup>a</sup> PMDA Campo de Conocimiento Tecnologías, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510, Ciudad de México, México.

<sup>b</sup> Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

<sup>c</sup> Universidad Autónoma de Baja California, 21100, Mexicali, Baja California, México.

## Resumen

Las ciudades de clima cálido muy seco como Mexicali, Baja California, requieren de sistemas climatización artificial para mantener confortables los espacios, lo que genera altos consumos energéticos. El propósito de este estudio es evaluar la propuesta de diseño de un elemento de protección solar con base en la trayectoria solar para dar solución de sombreado y reducción de consumos energéticos de dicha ciudad, con el objetivo de mejorar las condiciones de confort térmico en el interior de los espacios. Se utilizó un edificio base con orientación sur, que fue analizado con un enfoque metodológico de tipo cuantitativo con análisis causa-efecto, a partir de una simulación mediante el software Energy Plus. El periodo de análisis se realizó durante un año y se analizaron los resultados con y sin los elementos de protección solar. Los resultados demuestran que la aplicación de los elementos de protección solar permite una disminución de la temperatura operativa promedio de 5°C respecto al caso base, con un incremento de 1257 horas de confort y una reducción de consumo energético de 3650 kWh.

**Palabras Clave:** Elementos de protección solar, confort térmico, geometría solar, climatización pasiva.

## Abstract

Cities with very dry hot weather such as Mexicali, Baja California, require artificial air conditioning systems to keep spaces comfortable, which generates high energy consumption. The purpose of this study is to evaluate the proposed design of a sun shading element based on the solar trajectory to provide shading solution and reduction of energy consumption in this city, with the aim of improving thermal comfort conditions inside the spaces. A base building with south orientation was used, which was analyzed with a quantitative methodological approach with cause-effect analysis, based on a simulation using Energy Plus software. The analysis period was carried out for one year and the results were analyzed with and without the sun protection elements. The results show that the application of sun protection elements allows a decrease in the average operating temperature of 5°C compared to the base case, with an increase of 1257 hours of comfort and a reduction in energy consumption of 3650 kWh.

**Keywords:** Solar protection elements, thermal comfort, solar geometry, passive climate control.

## 1. Introducción

Los elementos de protección solar o sombreado exterior son estrategias de diseño bioclimático, que buscan el enfriamiento pasivo de los edificios para generar mayor confort térmico y espacios saludables de acuerdo con la función específica requerida en el espacio habitable (Fuentes-Freixanet, 2008). Con el presente estudio, se demuestra que se contribuye a la obtención de edificaciones sustentables que mejoran las

condiciones térmicas de los espacios a partir de recursos bioclimáticos pasivos. (Ruiz, 2012). Los dispositivos de sombreado son una solución pasiva en zonas donde los climas son cálidos y la radiación solar incidente es elevada, dando como resultado sobrecalentamiento (Pabón-Vázquez, 2022). El caso del modelo base estudiado en este documento, fue resuelto para la ciudad de Mexicali, ubicada al norte del país en el estado de Baja California, cuenta con un clima cálido muy seco según el libro Modificaciones al Sistema de Clasificación

\*Autor para la correspondencia: carlos\_bigurra@uaeh.edu.mx

**Correos electrónicos:** arqsantamariavilla@comunidad.unam.mx (Gerardo Santamaria-Villa), carlos\_bigurra@uaeh.edu.mx (Carlos Alfredo Bigurra-Alzati), anibal@uabc.edu.mx (Aníbal Luna-León).

Climática de Köppen por Enriqueta Gracia (2004). El informe de CONAGUA (2021), reveló que la temperatura máxima registrada fue de 51.4 °C, el día 18 junio del año 2021 en la estación Mexicali, Baja California, valor que supero al registro máximo histórico de la misma estación.

Debido a las condiciones climáticas de Mexicali B.C., la población hace un mayor uso de sistemas de climatización para estar en confort durante la mayor parte del año, incrementando el consumo energético para lograr regular la temperatura de las edificaciones. Es por eso por lo que es necesario proponer estrategias que reduzca el consumo energético y a su vez mejore las condiciones de confort térmico de las edificaciones. Entre las variables que determinan la sensación de confort térmico de un espacio se encuentra las actividades metabólicas que se realizan (Tudela, 1982), lo que contribuye en el desempeño intelectual, manual y perceptivo del ser humano, el cual es mayor cuando el usuario se encuentra en confort térmico con sus alrededores (Fanger, 1970). Para que un ser humano se encuentre totalmente confortable intervienen muchos factores como los físicos, fisiológicos, emocionales, sociales y varios más. La hipótesis de Fanger consiste en que el valor de la temperatura de confort térmico puede definirse en términos del estado físico de las personas, y no en términos de las condiciones del ambiente térmico, en consecuencia, ese valor puede derivarse de una ecuación de balance térmico humano para una persona dada a un nivel de actividad dado. (Gómez, G., Bojórquez, G., Ruiz, R., 2007). En un espacio habitable, los parámetros que constituyen el ambiente térmico son de tipo meteorológico, fisiológico, espacial y circunstancial ( Szokolay, 2004). La temperatura del aire, la temperatura radiante, la humedad relativa y la velocidad de viento forman parte de los parámetros considerados en la primera de las clasificaciones, y son los factores primarios que influyen, principalmente, en la sensación térmica de las personas (ANSI/ ASHRAE 55, 2017).

Se han implementado soluciones pasivas y activas para reducir la temperatura de las edificaciones y el consumo eléctrico. En 2006, el programa Ahorro Sistemático Integral (ASI), surgió atendiendo la necesidad del gobierno federal (CFE-CONAFOVI) de impulsar programas que ayuden a disminuir la alta demanda de energía eléctrica en el país. Dicho programa, financió el remplazó de sistemas de A/C, luminarias y refrigeradores de baja eficiencia energética por equipos de alta eficiencia con el fin de reducir el consumo energético. Además de financiar el aislamiento térmico de techos. Por otro lado, se han integrado programas con colocación de celdas fotovoltaicas en viviendas de interés social, ya que Mexicali está en una de las zonas de mayor consumo eléctrico debido a las altas incidencias de radiación solar, con valores promedio diario desde los 5.3 hasta 5.8 kWh/m<sup>2</sup>/día (Vega, 2015). En conjunto con la Comisión Nacional de Vivienda – CONAVI (2013), se diseñaron estrategias bioclimáticas para ser aplicadas a la vivienda, teniendo un enfoque en la mejora del confort térmico y obtención de un recurso energético limpio. La eficiencia de los edificios depende, en gran medida, de decisiones tomadas durante las etapas iniciales del proceso de diseño. No obstante, éstas no suelen considerar aspectos como el uso de energía o el confort interior, sino hasta las etapas más

avanzadas del diseño, incluso después de que el proyecto se construya y comience a habitarse. (Chi, 2021).

Los dispositivos de protección solar contribuyen en mejorar el confort térmico de los espacios, así como en la reducción del consumo energético por climatización artificial, ya que en climas cálidos muy secos es indispensable utilizar sistemas mecánicos de enfriamiento (NOM - Edificación sustentable criterios y requerimientos ambientales mínimos, 2013). La propuesta de diseño de los elementos de protección solar fue diseñada utilizando la geometría solar, es decir la trayectoria del sol a lo largo de los 365 días del año, con la intención de bloquear la incidencia de radiación solar directa en los meses de verano y permitir que aporten ganancias térmicas que contribuyan al confort térmico de invierno. Otra de las ventajas según Guadarrama (2017), es que dichos dispositivos dan ventaja lumínica, ya que proporcionan protección solar, controlan la incidencia de luz directa y permiten la incidencia de luz difusa, lo que permite obtener valores lumínicos adecuados en los espacios, dependiendo de la orientación y dimensiones de la abertura (Wright, 2006; Martín – Monroy, 2007).

## 2. Método

Se partió de esta premisa para el diseño de estos elementos, las dimensiones de las aberturas dependen de las actividades del espacio y del recurso de incidencia solar que recibe cada orientación de fachada. Los resultados de esta estrategia de diseño se llevaron a simular mediante el software Grasshopper, utilizando las herramientas de Ladybug y Honeybee, que utilizan como motor de arranque EnergyPlus. Los datos de salida del simulador analizados fueron las cargas externas de flujo calor por la envolvente (muros, techos puertas, ventanas), así como las cargas térmicas por el uso de iluminación, equipo eléctrico y mecánico, además de la carga térmica por actividades de los usuarios. Para evaluar el edificio se utilizó un archivo climático EPW (Energy Plus Weather) para la Ciudad de Mexicali, este tipo de archivo es utilizado por programas de simulación como EnergyPlus y ESP-r, tipo de archivo adoptado como formato estándar por muchas otras herramientas de simulación de edificios (Design Builder, 2023). El archivo climático pertenece a la zona 15 de Estados Unidos de América proporcionado por la página oficial de Energy Plus (2023). Puesto que la cercanía que existe entre esta zona y la de estudio es muy próxima y los datos climáticos de este archivo representan de manera idéntica el comportamiento climático de Mexicali B.C. Se analizaron las características geofísicas y la clasificación del clima de la zona de estudio y con dichos datos se procedió al análisis de trayectoria solar incidente. Se obtuvieron los resultados de incidencia solar del sitio y se procedió al diseño de los elementos de protección solar. Una vez obtenido el dispositivo de sombreado, se pasó a simular la estrategia de protección solar.

### 2.1 Ubicación

La zona de estudio es una variable muy importante dentro de la investigación, ya que se diseñó en base a la latitud y altitud, (ver Tabla 1). Mexicali, B.C., se encuentra entre los

paralelos 30° 51' y 32° 43' de latitud norte; los meridianos 114° 43' y 115° 51' de longitud oeste; con altitud sobre el nivel del mar de 3 m. Colinda al Norte con los Estados Unidos de América; al Este con el estado de Sonora y el Golfo de California; al Sur y Oeste con los municipios de Ensenada y Tecate. (INEGI, 2010).

Tabla 1: Ubicación del caso estudio.

Orientación	Sur
Latitud	32.60°
Longitud	115.50°
Altitud	3

## 2.2 Clasificación del clima

Particularmente el municipio de Mexicali, B.C. está expuesto a sistemas de circulación atmosférica, tanto tropicales como de latitudes medias; se puede decir que la variabilidad climática experimentada en la región se explica por la posición relativa que tienen esos sistemas en el transcurso del año; los controles climáticos como la sierra de San Pedro Mártir y la forma de la península de Baja California, aunados a su relativa cercanía con el Océano Pacífico y el Golfo de California, con contrastes térmicos acentuados, contribuyen a la alta variabilidad climática regional. (Instituto de Investigaciones Sociales, UABC, 2011). El clima según el libro Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen, por Enriqueta García (2004). Mexicali está dentro del grupo B, de los climas secos, teniendo así una clasificación  $BW(h')hs(x')(e')$ , donde se refiere a un clima cálido muy seco con temperatura media anual de 22.3°C y temperatura del mes más caliente de 33.0°C corresponde al mes de julio, con 29 % de lluvias de invierno y oscilación térmica muy extremosa de 20.8°C. Los veranos son cálidos o muy cálidos. En algunas zonas con este clima las temperaturas en verano son extremadamente altas, y se han registrado las máximas del planeta. Las precipitaciones son muy escasas. (Gobierno de Navarra, s.f), (ver Tabla 2).

BW = Clima cálido muy seco

$(h')$   $h$  = Temperatura media anual mayor a 22°C y temperatura mes más caliente mayor a 18°C

$S(x')$  = Menos del 36% de lluvias de invierno

$e'$  = Muy extremosa oscilación térmica mayor a 14°C

Tabla 2: Normales climatológicas. CONAGUA.

Datos	Enero	Febrero	Marzo
Precipitación mm	10.5	3.7	3.2
Temperatura Media °C	12.2	14.7	17.1
Datos	Abril	Mayo	Junio
Precipitación mm	1.8	0.1	0.3
Temperatura Media °C	21	24.8	29.3
Datos	Julio	Agosto	Septiembre
Precipitación mm	3.3	9.7	6.2
Temperatura Media °C	33	32.7	29.9
Datos	Octubre	Noviembre	Diciembre
Precipitación mm	8.2	4.6	8.5
Temperatura Media °C	23.7	17	12.7

## 2.3 Caso estudio

El edificio seleccionado para la aplicación de la estrategia de elementos de protección solar es un caso base ubicado en la ciudad de Mexicali, Baja California, México. Con una latitud de 32.60° y una longitud de 115.50°, la fachada principal está orientada al Sur, el edificio analizado corresponde al Banco de Bienestar del Gobierno Federal, (IMCO, 2022). El edificio fue elegido para estudio debido a la gran cantidad de fachada acristalada. El prototipo estudiado, es una representación de un modelo típico de arquitectura que no se adapta a las condiciones climáticas del sitio. La aplicación práctica de la arquitectura actual debe adecuarse al sitio, pero con frecuencia se omite dicha consideración. Por otro lado, la selección de materiales de construcción con baja resistencia térmica contribuye en la mayor ganancia de calor y uso de sistemas de climatización artificial para generar condiciones de confort térmico en los espacios. (García, et al. 2011). Uno de los mayores problemas de este tipo de proyectos es que se generan en serie y se construyen en diferentes ciudades del país sin considerar modificaciones que les permita adaptarse al clima. Además de que son construidos sin importar la orientación del edificio.



Figura 1: Fachada Sur del caso estudio, tomada el 08 de enero de 2023 a las 5:00 p.m. Fotografía propia.

Como se aprecia en la figura 1 la fachada principal cuenta con una superficie acristalada de 43.2 m<sup>2</sup>, además de que las fachadas laterales izquierda y derecha se puede encontrar áreas acristaladas, (ver Tabla 3). En el diseño del edificio no se consideró ninguna estrategia de diseño pasivo como solución ante dicha problemática. El confort térmico dentro del espacio depende de manera directa del sistema de climatización artificial. El proyecto consta de diferentes espacios que conforman el edificio, entre ellos: sala de espera, caja, bóveda, comedor y baños. Dando un total de 94 m<sup>2</sup> de construcción. La sala de espera es el espacio con mayores problemas de incidencia de radiación solar.

Tabla 3: Áreas de muro y ventana del caso estudio. Elaboración propia.

Orientación	Muro (m <sup>2</sup> )	Ventana (m <sup>2</sup> )
Norte	48	0
Este	12.8	7.20
Sur	4.80	43.2
Oeste	12.8	7.20
Total	78.40	57.60

El edificio tiene una altura de 3.80 m de nivel de piso terminado a nivel de losa, en la fachada principal cuenta con un volumen que funciona como pretil de 1.55 m lo que da una

altura total de 5.35 m. (ver figura 2). En cuanto al sistema de construcción empleado en el caso estudio, es el más utilizado a nivel nacional, consiste en bloques huecos de concreto de 0.12 x 0.20 x 0.40 metros, unidos con mortero con proporción cemento arena 1:3, dejando una junta de 0.01m de espesor entre cada pieza, con celda colada y varilla de acero de 3/8" colocada verticalmente a cada 0.60m de separación.

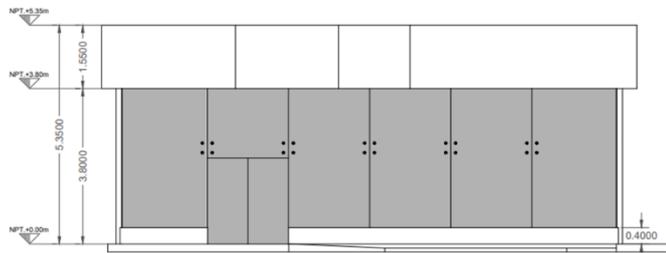


Figura 2: Fachada Sur del caso estudio. Elaboración propia.

Además, en muros interiores se implementó Tablaroca con fibra de vidrio R-11 que está conformado por dos hojas de cartón de yeso de 1/2", las cuales se soportan por una estructura a base de canaleta de acero de 4" (0.1016m) de ancho. El sistema constructivo esta recubierto con capas de emplaste de 0.01m de yeso por ambos lados. En la tabla 4 se conforman los materiales de los sistemas constructivos del caso estudio.

Tabla 4: Sistemas constructivos y propiedades térmicas de los materiales utilizados. Fuente: Confort Térmico y Consumo Energético por uso de Sistemas Constructivos para Muros, en Mexicali Baja California.

Material	Conductividad térmica	Calor específico	Densidad
<b>Losa</b>			
Cartón arenado	---	---	---
Brea	0.17	1000	1050
Cartón negro	0.50	1000	1700
Poliestireno expandido	0.004	1400	15
Losa de vigueta y casetón	0.269	1006	958
Yeso interior	0.42	837	1200
<b>Muros</b>			
Bloque de concreto	1.01	837	1824
Mortero cemento arena	1	1000	1800
Yeso interior	0.42	837	1200
Pintura color beige	---	---	---
<b>Puertas</b>			
Madera densa de puerta	0.15	1420	700
Capa de aire	---	---	---
<b>Ventanas</b>			
Vidrio sin recubrimiento claro de 9.5 mm de espesor. U = 5.70, SHGC = 0.76.			

#### 2.4 Análisis de trayectoria solar

La evaluación y análisis de los elementos naturales como la trayectoria solar en la arquitectura, permite crear proyectos viables con estructuras que utilicen la menor cantidad de energía no renovable posible (Echeverri, 2020). Para el diseño de los elementos de protección solar fue indispensable realizar un amplio análisis de la trayectoria solar del caso estudio,

utilizando la proyección estereográfica. El estudio se basa en la geometría solar – representada de manera precisa en las cartas solares. Estas nos permiten conocer la posición exacta del sol en unas coordenadas geográficas específicas y a una hora del día determinada a través de su azimut y ángulo solar (Hidden Architecture, 2021).

Se seleccionaron las fechas del solsticio de verano y de invierno, así como los equinoccios, (ver figura 3). Con estas fechas se obtuvo una variación de la incidencia de radiación solar dentro del espacio en diferentes periodos del año, dando así un panorama más amplio del comportamiento del sol y de qué manera repercute las ganancias de radiación solar en las superficies de fachada. Una vez trazados los ángulos de incidencia solar, se procedió a analizar de qué manera se aprovechan para el diseño de los elementos de protección solar.

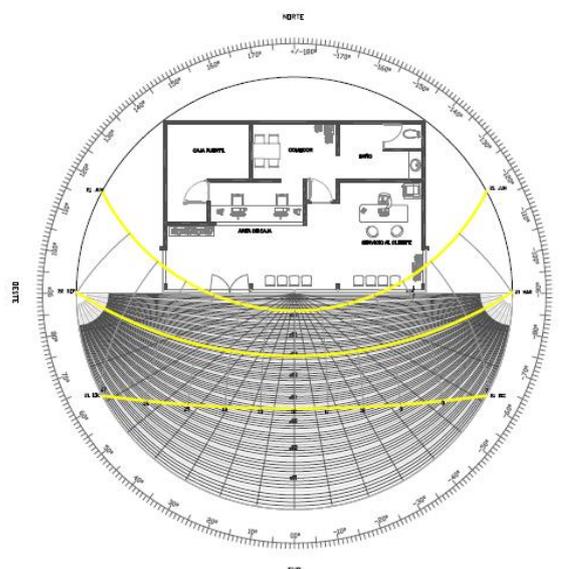


Figura 3: Proyección estereográfica, solsticios y equinoccios. Elaboración propia.

Se tomaron los datos proyectados desde la planta como se muestra en la figura 4. El análisis de incidencia solar del espacio dio como resultado que la superficie acristalada filtra un alto porcentaje de radiación solar, que se transforma en ganancias térmicas y, por lo tanto, mayor demanda de climatización artificial.

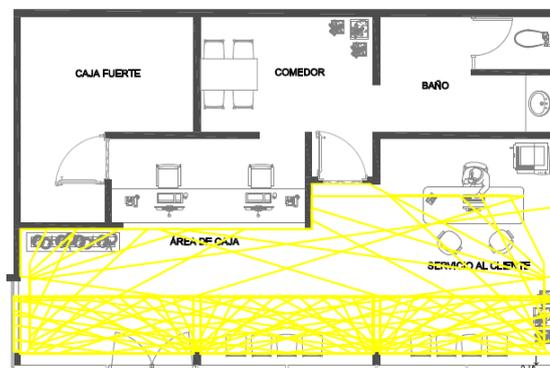


Figura 4: Proyección de incidencia solar en los equinoccios. Elaboración propia.

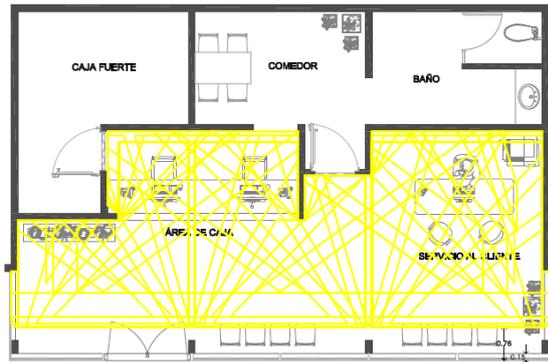


Figura 5: Proyección de incidencia solar en el solsticio de invierno. Elaboración propia.

Para el diseño de protección solar se utilizó como ángulo vertical  $58.5^\circ$ , que corresponden al día 21 del mes de marzo (equinoccio de primavera) para bloquear los rayos del sol, además se tomó el ángulo de inclinación de la altura solar del mes de diciembre (solsticio de invierno) para definir la inclinación de los elementos horizontales de protección solar, (ver figura 5).

## 2.5 Diseño de elementos de protección solar

Para conformar el diseño de los elementos de protección solar se tomaron ángulos verticales obtenidos desde el análisis de la trayectoria solar, mediante las plantas de distribución que aparecen en las figuras inferiores, se generaron secciones del caso estudio proyectando de este modo como se filtra la incidencia de radiación solar. En cuanto a los ángulos obtenidos del anterior análisis, se tomó un *ángulo vertical de  $58.5^\circ$  de los equinoccios a las 7:00 horas*, con el que se bloquea incidencia de radiación solar del 21 de marzo al 22 de septiembre, que abarca prácticamente todo el periodo cálido, (ver figura 6).

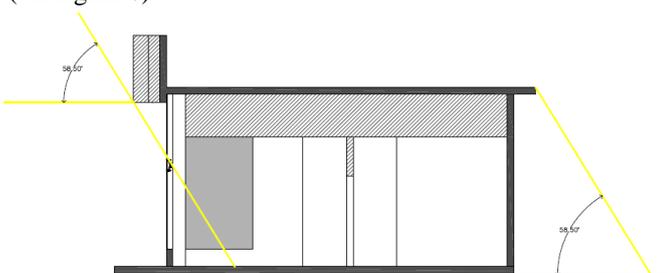


Figura 6: Ángulo vertical de incidencia solar filtrada al interior, 7:00 horas en equinoccio. Elaboración propia.

Por otro lado, se tomó un *ángulo vertical de  $30.70^\circ$  del solsticio de invierno a las 10:00 horas*, con el cual se dio la inclinación del elemento de protección solar, (ver figura 7). Así mismo, una vez analizado los ángulos de incidencia de radiación solar en las fechas mencionadas, se logró concebir esta estrategia a base de elementos de protección solar en sentido horizontal, ya que, para bloquear ángulos altos como es el caso, funciona de forma correcta (ver figura 8). Además, de no comprometer las vistas al exterior, la iluminación natural o modificar aspectos térmicos de manera negativa en el interior del espacio.

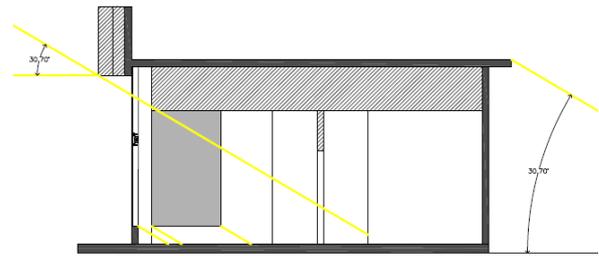


Figura 7: Ángulo vertical de incidencia solar filtrada al interior, 10:00 horas en solsticio de invierno. Elaboración propia.

En la figura 9, se puede apreciar el resultado final de la propuesta de elementos de protección solar, aplicando las bases teóricas de la geometría solar.

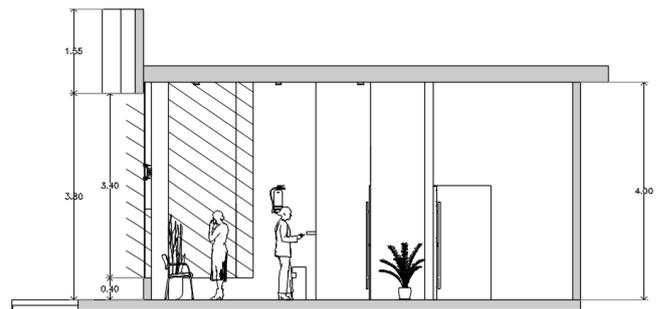


Figura 8: Sección de caso estudio con elementos de protección solar. Elaboración propia.

Finalmente, es importante mencionar que los elementos de protección solar en este nivel de la investigación funcionan como elementos de sombreado, que al ser aplicados sobre la superficie acristala logran mejorar la temperatura interior. Las características físicas que se logran precisar son el grosor de 2cm, el ancho de 40cm y el largo de estos varía dependiendo la sección de ventana, se pueden seccionar según sea el caso. El proceso de colocación propone una estructura ligera con ángulos para sobremontar los elementos de protección solar, esta debe estar fija y respetando los ángulos verticales seleccionado, por otro lado, el material de estos sería a base de Thermorock que está formado por dos placas de cemento fabricado con la más avanzada tecnología, a base de cemento Portland, fibras naturales y aditivos (Thermorock, 2023).



Figura 9: Modelado 3D con elementos de protección solar. Elaboración propia.

### 2.6 Parámetros de simulación

Como se mencionó anteriormente, el software de simulación se basa en EnergyPlus que es un programa de simulación de energía de edificios completos que los ingenieros, arquitectos e investigadores utilizan para modelar tanto el consumo de energía (para calefacción, refrigeración, ventilación, iluminación y cargas de electrónicos y procesos) como el uso de agua en los edificios (EnergyPlus, 2023). Además de utilizar Grasshopper mediante Rhinoceros como herramienta de visualización, se requirió de Ladybug Tools que es un complemento paramétrico de código abierto que ayuda al análisis ambiental. También admite la evaluación de opciones de diseño iniciales a través de estudios de radiación solar, análisis de vista, modelado de horas de luz solar y más. La integración con entornos de programación visual permite una retroalimentación instantánea sobre las modificaciones de diseño y un alto grado de personalización (LadyBug Tools, 2023). Funciona mediante la importación de archivos estándar Energy Plus Weather (Uppunda, 2022).

Por otra parte, también se utiliza HoneyBee que es otro complemento paramétrico, que se encarga del consumo de energía del edificio y la simulación de iluminación natural. (Uppunda, 2022). EnergyPlus en su última actualización proporciona opciones para datos del desempeño ambiental, tales como: consumo de energía, emisiones de carbono, condiciones de confort, temperaturas máximas y mínimas de los espacios y estimación de tamaño de equipo de los componentes de HVAC, etc. Además, la página oficial menciona que su desarrollo está financiado por la Oficina de Tecnologías de la Construcción (Building Technologies Office BTO) del Departamento de Energía de los Estados Unidos (Department of Energy DOE). Junto con OpenStudio, EnergyPlus es parte de la cartera de programas de modelado de energía de edificios de BTO (EnergyPlus, 2023).

Tabla 5: Variables de los softwares utilizados. Elaboración propia.

Software	Variables	Ocupadas
Ladybug	Gráficos de datos climáticos	Gráficos de datos climáticos
	Trayectoria solar	Trayectoria solar
	Estudio de sombras	Estudio de sombras
	Estudios de acceso solar	Estudios de acceso solar
	Estudios de radiación	Estudios de radiación
	Gráficos psicométricos	Gráficos psicométricos
Honeybee	Gráficos de confort	Gráficos de confort
	Estudios de iluminación	Estudios anuales de luz
	Estudios anuales de luz	Radiación solar
	Radiación solar	Controles de luz eléctrica
	Controles de luz eléctrica	Propiedades de construcción
	Propiedades de construcción	Propiedades de construcción
	Use de energía calefacción	Dimensionamiento HVAC
	Dimensionamiento HVAC	HVAC
	Zonas de color con resultados de energía	Zonas de color con resultados de energía
	Visualización del balance energético	Visualización del balance energético
Confort térmico interior	Confort térmico interior	

Es importante mencionar que del Software Grasshopper únicamente se utiliza de interfaz para la descarga y manejo de las herramientas de Ladybug y Honeybee, las cuales trabajan con el motor de simulación de EnergyPlus. Mientras que Rhinoceros solo funciona como visualizador para conectar la geometría entre la programación de Grasshopper (ver figura 10).

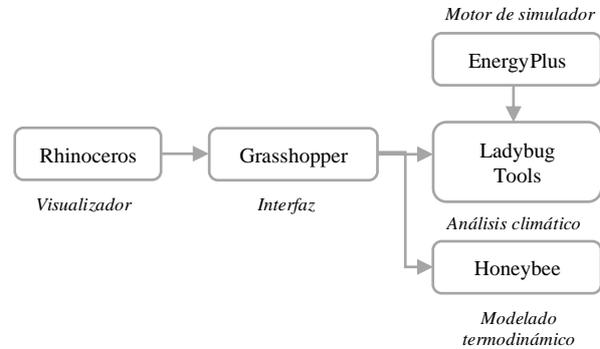


Figura 10: Metodología de softwares de simulación. Elaboración propia.

Se construyó un uso horario en base a las actividades metabólicas del usuario, condiciones de carga térmica del espacio y cargas internas, las cuales están determinadas a partir de las variables presentadas en la Tabla 6.

Tabla 6: Parámetros de simulación.

Parámetro	Características	
Número de usuarios	13 capacidad máxima	
Temp. Control de termostato	Verano	24°C
	Invierno	21°C
Actividad	Nivel de actividad	Pasivo a moderado
	Tasa metabólica	0.90 Met
Nivel de arropamiento	Verano	0.50 Clo
	Invierno	1.00 Clo
Cargas Internas	Equipos	100 W/m2
	Iluminación	10 W/m2 – 300 lux

- **Infiltración:** se utilizó la estándar por ASHRAE 55, en oficinas pequeñas.
- **Sombreado:** se tomaron en cuenta las sombras que generan los volados del edificio. Además de los efectos de reflexión por albedo de pisos y otras superficies próximas al perímetro proporcionados por EnergyPlus.
- **Iluminación:** se utilizaron parámetros de la NOM-025-STPS-2008: condiciones de iluminación en los centros de trabajo y, la NOM-007-ENER-2014 – eficiencia energética en sistemas de alumbrado en edificios no residenciales.

Por otro lado, dentro de la simulación se agregaron variables como la temperatura del suelo, el espesor del vidrio, así como las propiedades termo físicas de los materiales del caso estudio, ya que el simulador proporciona estos parámetros por default. Sin embargo, los colores del edificio, los elementos de protección solar y los soportes para estos mismos, son genéricos. Es decir, los elementos de protección solar no tienen propiedades termo físicas en sus materiales de construcción, ya que meramente están funcionando como

elementos de sombreado diseñados estratégicamente con base a la trayectoria solar, considerando dentro del simulador materiales de alta reflectancia y emisividad térmica (ASTM E-1980-11, 2019). Además, dentro de la simulación se consideró la zona climática 2B, como lo menciona el Climatic Data for Building Design Standards (ASHRAE, 2021). Ya que, por proximidad a la zona de estudio el archivo climático EPW utilizado (zona climática 15) de El Centro, California, sería el mejor representado para la simulación. De modo que, los datos integrados al simulador serían de EnergyPlus, (ver figura 11).

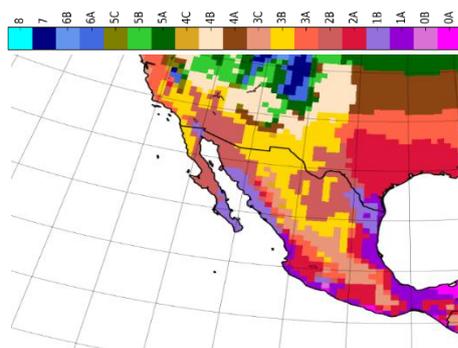


Figura 11: Mapa de zonas climáticas, ASHRAE 2019. CoveTool por Aguirre (2022).

### 3. Resultados

#### 3.1 Confort térmico

La norma ISO 7730 Método Fanger establece que no solo el balance térmico es necesario en un espacio para tener confort térmico. Además de tener una temperatura adecuada, se debe tener en cuenta: Las características del vestuario, las características del tipo de trabajo y las características del ambiente (Calderón, 2019). Los límites de confort térmico según el modelo matemático del ASHRAE 55 varían según las condiciones de temperatura ambiente, y por ser un modelo adaptativo estos se generan a partir de la temperatura neutra de cada zona estudio, en el caso base que se tomó para esta investigación se analizó a partir del 80% de las personas dentro del espacio se sienten cómodas con la temperatura operativa del espacio en el que se encuentren, mientras que el 20% no se sienten cómodas por factores distintos como, sobrepeso, enfermedades o arropamiento. Dando un límite superior con temperaturas de confort térmico desde los 24°C en los meses de invierno (noviembre – marzo), hasta 29°C en los meses de verano. Por otro lado, los límites inferiores van desde los 19°C en los meses de invierno hasta los 25°C en los meses de verano (abril – octubre). Con base en estos rangos de confort es que se calculó si el caso estudio está dentro o fuera de estos límites de confort.

Una vez corridas y analizadas ambas simulaciones; una sin colocar los elementos de protección solar y otra colocando estos mismos, se obtuvieron resultados muy favorables en relación con los objetivos planteados. Primeramente, se analizaron los resultados obtenidos durante las 8760 horas equivalentes a 365 días, sin ningún elemento de protección solar, dividiendo este lapso en dos periodos, el cálido que va de marzo a septiembre y, el frío que va de octubre a febrero.



Figura 12: Planta de distribución con el espacio seleccionado: sala de espera. Elaboración propia.

Por consiguiente, se analizaron las temperaturas operativas de los espacios y dice Auliciems, A., Szokolay, S. (2007), definen a la temperatura operativa como la temperatura de un recinto en el que el hombre intercambiaría calor por radiación y convección al mismo ritmo que en el entorno no uniforme dado. En la tabla 7 se puede mostrar los resultados de temperatura operativa por espacios del caso estudio sin elementos de protección solar, el área con mayor temperatura operativa es la sala de espera. En el previo análisis de la trayectoria solar, este espacio es el que recibe mayor incidencia solar durante todo el año por la orientación que tiene, (ver figura 12).

Tabla 7: Temperatura operativa anual sin protección solar.

Espacio	Temp. Media °C	Temp. Min °C	Temp. Max °C
Baños	24.10	20.12	26.03
Bóveda	23.23	19.98	25.55
Comedor	23.58	20.02	25.67
Caja	23.55	20.02	25.63
Sala espera	26.53	19.10	33.40

Por otra parte, en el caso estudio se busca disminuir las ganancias de calor al interior del espacio más susceptible a través de los elementos de protección solar, que como se mencionó anteriormente es la sala de espera. Por ende, en la siguiente tabla se puede apreciar como el sombreado disminuye un promedio de 2°C de temperatura, en un periodo anual.

Tabla 8: Temperatura operativa anual con protección solar.

Espacio	Temp. Media °C	Temp. Min °C	Temp. Max °C
Baños	23.72	20.02	25.85
Bóveda	23.05	19.91	25.51
Comedor	23.20	19.84	25.62
Caja	23.26	19.98	25.57
Sala espera	25.25	18.98	31.45

Ahora bien, es importante interpretar estos datos obtenidos durante las 8760 horas, de primera instancia no se puede apreciar una gran disminución de temperatura interior, esto se debe a que el análisis se está realizando durante un periodo anual, pero el diseño de los elementos de protección solar solo busca mejorar las condiciones de confort térmico interior durante el periodo cálido. Por lo cual, las temperaturas del periodo frío permanecerán iguales o muy parecidas en este

análisis anual, además los espacios que están detrás de *sala de espera* no modifican en gran medida sus temperaturas, puesto que este primer espacio es quien obtiene la mayor ganancia solar por orientación y área de superficie acristalada. En relación con el periodo cálido, en la figura 13 se puede apreciar que la temperatura más baja pertenece a los espacios que están detrás de sala de espera (baños, caja, bóveda y comedor). Mientras que, la fachada sur que alberga la sala de espera llega a temperaturas de  $30.30^{\circ}\text{C} - 31.20^{\circ}\text{C}$ . Por otro lado, aplicando el diseño de elementos de protección solar al caso estudio, la temperatura disminuye a los  $27.60^{\circ}\text{C} - 28.50^{\circ}\text{C}$ , (ver figura 14). De este modo, se puede apreciar que la temperatura interior de las caras del caso estudio, disminuye al implementar estos elementos de sombreado sobre la superficie acristalada. Dando paso a disminuir las horas no confortables y el uso de climatización artificial.

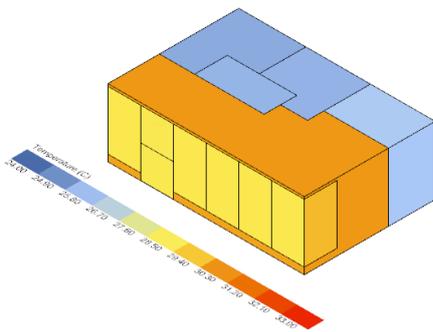


Figura 13: Temperatura interior por caras, periodo cálido. Sin elementos de protección solar. Elaboración propia.

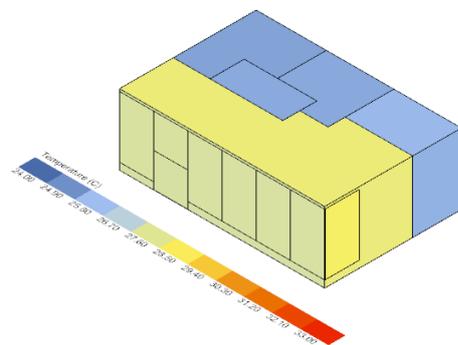


Figura 14: Temperatura interior por caras, periodo cálido. Con elementos de protección solar. Elaboración propia.

Acorde con el espacio *sala de espera*, es imprescindible enfatizar en este, ya que es el espacio con mayor ganancia térmica por radiación solar. Por ende, se presentan los gráficos de la temperatura del espacio y como esta se modifica una vez aplicados los elementos de protección solar.

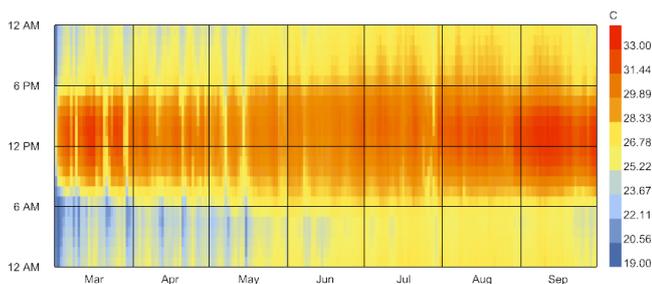


Figura 15: Temperatura operativa sala de espera en periodo cálido. Sin elementos de protección solar. Elaboración propia.

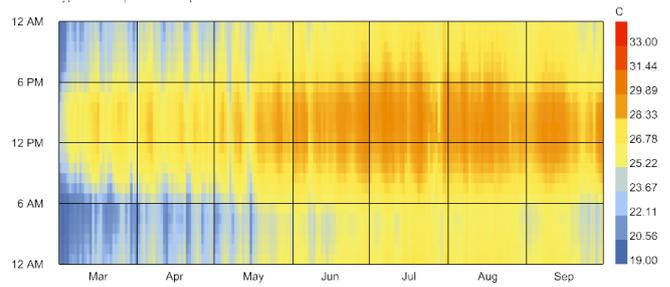


Figura 16: Temperatura operativa sala de espera en periodo cálido. Con elementos de protección solar. Elaboración propia.

Se aprecia que durante los meses que componen al periodo cálido hay una disminución en la temperatura operativa del espacio con mayor captación de incidencia de radiación solar. En la figura 15 se logra apreciar como cada sección que es equivalente a seis horas, cambia de temperatura; por la madrugada se torna con temperaturas entre los  $19^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}$ , mientras que, al salir el sol, esta se torna alcanzando temperaturas de  $33^{\circ}\text{C}$  dentro del espacio. Por otro lado, en la figura 16 con la aplicación de los elementos de protección solar, la temperatura es mayormente uniforme, de igual modo por la madrugada se mantiene alrededor de los  $19^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}$ , pero en las horas con incidencia de radiación solar hay una disminución a los  $25.22^{\circ}\text{C} - 28.33^{\circ}\text{C}$  en comparación a la figura 15. Lo que se refiere a que hay una disminución promedio de  $5^{\circ}\text{C}$ .

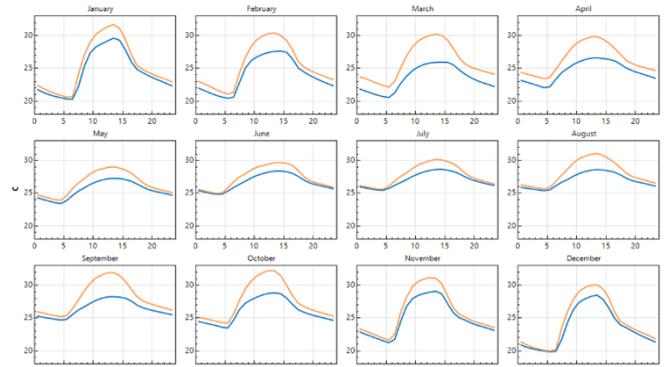


Figura 17: Comparativa de temperatura operativa sala espera periodo anual. Elaboración propia.

Continuando con el análisis de la temperatura operativa de sala de espera, en el periodo anual se puede observar la disminución de temperatura en todos los meses, aun cuando la estrategia solo está diseñada para bloquear la incidencia solar en verano. Esto se debe al grosor de los elementos de protección solar y la sombra que estos proyectan sobre el área acristalada, (ver figura 17). Como se mencionó, una de las cualidades de la composición del elemento de protección solar es que funcione para ambos periodos, es decir, como se aprecia en la figura 18 la línea azul muestra la temperatura del espacio con elementos de protección solar, mientras que la línea naranja muestra la temperatura sin dichos elementos. Por ende, se aprecia que hay una disminución de  $3^{\circ}\text{C} - 5^{\circ}\text{C}$  promedio de temperatura durante el transcurso del año. En el caso del mes de enero, febrero, noviembre y diciembre, la temperatura se mantiene un tanto igual, puesto que los elementos de protección solar dejan pasar la incidencia dentro del espacio, con el fin de no comprometer el confort térmico en invierno. Por otro lado, desde marzo hasta septiembre se mantiene por

debajo de la temperatura operativa sin elementos de protección solar. Ya que estos bloquean la incidencia solar durante estos meses para mejorar la temperatura interior.

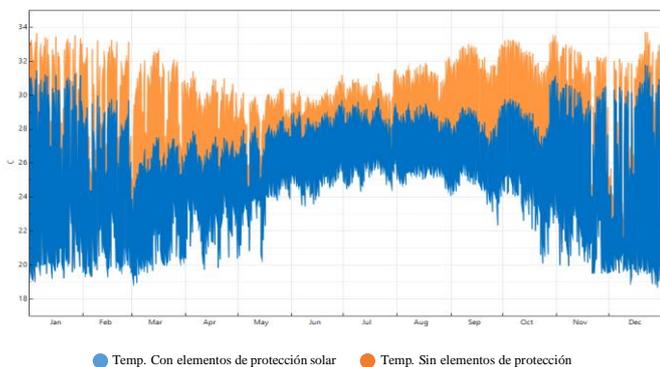


Figura 18: Comparativa de temperatura operativa sala espera periodo anual. Elaboración propia.

Al comparar las temperaturas del espacio interior con los límites de confort térmico según el modelo matemático del ASHRAE 55 al 80%, se logra observar lo siguiente (ver figura 19). Utilizando el concepto de termopreferendum donde se obtiene el límite de confort inferior agregando +2.5 a la temperatura neutra y -2.5 para obtener el límite de confort superior, se puede apreciar que la temperatura operativa sin elementos de protección solar en los meses de invierno sale de los límites de confort térmico por el sobrecalentamiento que genera la superficie acristalada. Al aplicar la estrategia de diseño la temperatura operativa disminuye y se acerca más a la temperatura neutra, colocándola dentro de la zona de confort térmico. De este modo, la temperatura del espacio al aplicar los elementos de protección solar se encuentra dentro de los límites de confort térmico durante todos los meses del año. Es importante mencionar que el 80% de las personas se sienten cómodas en este espacio al tener estas temperaturas, mientras que el 20% no se siente cómodas por diferentes factores, como arropamiento, sobrepeso o enfermedades. El termopreferendum se calculó con la siguiente expresión (Auliciems, 1992):

$$T_p = 17.8 + (0.31 * (T_m)) + - 2.5$$

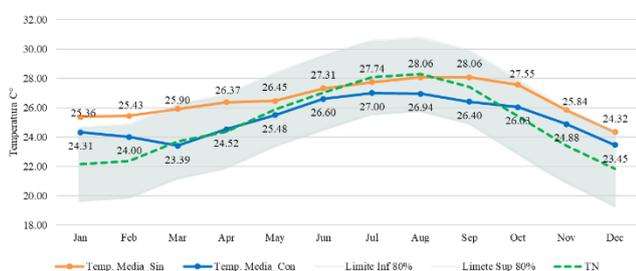


Figura 19: Temperatura operativa mensual: límites de confort térmico. Elaboración propia.

Donde  $T_p$  es el termopreferendum y  $T_m$  es la temperatura media mensual, ambos en °C. En este punto, es importante señalar que la temperatura media mensual se obtiene de las Normales Climatológicas, valor representativo del sitio en un periodo de tiempo relativamente largo.

### 3.2 Consumo energético

En cuanto a el consumo energético menciona el Colegio de la Frontera Norte, en su radiografía de la energía de Baja California que, Mexicali incrementó su consumo desde el 40% hasta el 49% por el efecto de su clima en los últimos años. Las familias en zonas de clima cálido consumen hasta 3 veces más que el promedio nacional (De Buen R, 2016). La simulación demuestra que la implementación de los elementos de protección solar presenta una disminución en la capacidad de enfriamiento del equipo de aire acondicionado. Cabe destacar, que la simulación se realizó con un Coefficient Of Performance – COP de 3.29 (SEER 12.44), ya que es el que predomina a la venta en el sector comercial. La capacidad de enfriamiento de cada uno de los espacios se determinó a partir de la potencia máxima requerida, los cuales se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Cargas de diseño para A/C sin elementos de protección solar.

Espacio	Potencia máxima de diseño W	Capacidad de unidad de Ton
Baños	624.44	0.17
Bóveda	572.35	0.16
Comedor	537.56	0.15
Caja	784.38	0.22
Sala espera	8232.28	2.34
Total		3.04 Ton

Enfatizando en el espacio *sala de espera*, es el que mayor capacidad de enfriamiento requiere para mantener condiciones aptas para el usuario en relación con los metros cuadrados de superficie. Observando la Tabla 10, la capacidad de enfriamiento para los demás espacios en comparación con la Tabla 6 es muy similar, puesto que estos requieren el mínimo para satisfacer las necesidades del usuario, pero se puede apreciar una disminución en la capacidad del sistema de climatización de aire acondicionado de 2.29 Ton a 1.65 Ton, al implementar los elementos de protección solar, lo que disminuye el consumo energético.

Tabla 10: Cargas de diseño para A/C con elementos de protección solar.

Espacio	Potencia máxima de diseño W	Capacidad de unidad de Ton
Baños	545.68	0.15
Bóveda	550.13	0.15
Comedor	517.69	0.14
Caja	747.82	0.21
Sala espera	5580.34	1.58
Total		2.23 Ton

El consumo para aire acondicionado representa, en promedio, la mitad de la carga térmica. En el Noroeste de México llega a representar más del 60% de la factura (CONUEE, 2016). Si bien las simulaciones equiparadas dicen que el consumo energético sin utilización de elementos es de alrededor de los 14997.22 kWh, mientras que, al implementar los elementos de protección en la fachada acristalada, disminuye a los 11347.22 kWh, ver figura 20. Por ende, se ve una reducción en el consumo eléctrico ocasionado por

climatización artificial. Es importante mencionar, que por las actividades que realiza el caso estudio hay variables que no pueden ser modificadas, como por ejemplo la iluminación, aunque estos elementos mejoren la luz difusa, el interior del espacio por su uso debe contemplar iluminación artificial mientras se realicen actividades.

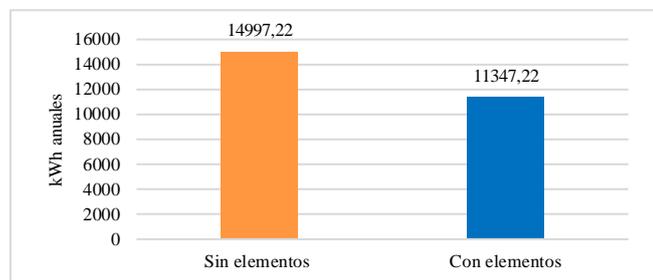


Figura 20: Comparativa de consumo energético kWh periodo anual.

Como resultado, dentro de las 8760 horas analizadas se encontró que alrededor de 2585.33 horas están fuera de la zona de confort utilizando el ASHRAE 55, y una vez aplicada esta estrategia de diseño bioclimática se redujo a 1328.50 horas, casi un 50% de ganancia de horas confortables en el interior del espacio (ver figura 21).

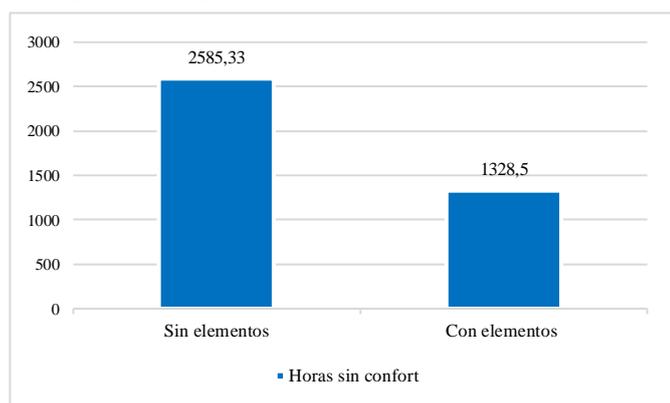


Figura 21: Comparativa de horas de confort térmico. Elaboración propia.

#### 4. Conclusiones

Por tanto, dentro de la variable de confort térmico, se pudo lograr una disminución promedio de temperatura operativa en el periodo cálido de 5°C, esto debido a que los elementos de protección solar bloquean la incidencia de radiación durante estos meses (marzo – septiembre). Mientras que, en el periodo frío, durante los meses de octubre, noviembre y febrero se logra mantener temperaturas en el rango de confort térmico, sin embargo, se genera un calentamiento en los meses de diciembre y enero, porque la incidencia de radiación solar se filtra por la fachada acristalada y genera una transferencia de calor que se ve afectada en dichos meses. Por otro lado, la variable de consumo energético muestra una disminución en consumo eléctrico y capacidad de unidad de tonelaje para aire acondicionado. En consecuencia, el diseño de elementos de protección solar con base a la geometría solar, funcionan de manera correcta para ángulos solares altos, ya que logran disminuir la temperatura interior de los espacios susceptibles a la incidencia de radiación solar.

Finalmente, se concluyó que al aplicar sistemas de sombreado en áreas acristaladas genera una disminución de temperatura operativa en los espacios interiores, además de reducir el consumo eléctrico ocasionado por climatización artificial. Más aun, al ser diseñados con ángulos solares estos elementos de protección solar funcionan de mejor forma, puesto que se pueden manipular según las necesidades, como lo es el caso en particular; los ángulos solares (*incidencia de radiación solar*) se manipularon para que entren al espacio en los meses de invierno y para que no entren en los meses de verano. Sin embargo, es importante mencionar que en orientaciones al sur y oeste en esta zona de estudio es complicado integrar fachadas acristaladas, ya que estas al recibir incidencia de radiación solar transfieren el calor al interior del espacio, por convección y conducción, haciendo empeorar las condiciones de confort térmico y por ende el aumentado el consumo energético. Se hacen algunas sugerencias para mejorar o evitar el calentamiento interior de los edificios:

- Dimensionar las aberturas de los elementos de protección solar según las necesidades del espacio. Estas variaran dependiendo la orientación del edificio y las actividades a realizar.
- Implementar vidrios con propiedades térmicas aptas para este tipo de climas, como ventanas Duovent (un vidrio doble, generalmente mayores a los 6mm, separado por una cámara de aire deshidratado que tiene propiedades térmicas y de aislamiento acústicos).
- No proponer muros cortina, ventanales o áreas acristaladas para orientaciones críticas como Sur – Oeste en esta latitud.

Por otra parte, la propuesta de elementos de protección solar resulta favorable para ser aplicada a diferentes edificios con orientaciones al sur, este y oeste, ya que se obtiene un beneficio energético limpio y de confort térmico. Además, dichos elementos pudieran ser aplicados a proyectos arquitectónicos de casa habitación considerando de igual forma las orientaciones y áreas acristaladas. Por su forma, función y eficacia es muy variable la práctica de estos elementos de protección solar en cualquier edificación en la ciudad de Mexicali, B.C.

#### 5. Referencias

- Aguirre, M. (2022). What is a weather file and which ones do we reference. ASHRAE and the American National Standards Institute. (2021). ANSI/ASHRAE Addendum a to ANSI/ASHRAE Standard 169-2020.
- ASHRAE. (2019). Standard 90.1-2019 Energy Standard for Buildings Except
- ASTM E-1980-11. (2019). Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index (SRI) of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces.
- AULICIEMS, A., Greenhouse warmed Europe: thermoregulatory criteria for future indoor climate management.
- Auliciems, A., Szokolay, S. (2007) Thermal Comfort. 2nd Revised Edition, Brisbane, PLEA: Passive and Low Energy Architecture International in association with Department of Architecture, The University of Queensland.
- Calderón, F. (2019). Evaluación del mejoramiento del confort térmico con la incorporación de materiales sostenibles en viviendas en autoconstrucción en bosa, Bogotá. Rev. hábitat sustentable vol.9 no.2.
- Chi, D. (2021). Iluminación natural a través de ventanas. Universidad de las Américas Puebla - UDLAP. <https://altexto.mx/iluminacion-natural-a-traves-de-ventanas-dg5ue.html>

- Comisión Nacional De Vivienda. (2013). Proyecto Piloto de Aislamiento Térmico para viviendas en Mexicali. Gobierno de México.
- CONAFOVI. (2006). Guía para el uso eficiente de la energía en la vivienda.
- CONAGUA. (2021). Reporte del clima en México: reporte anual 2021.
- De Buen R, O. (2016). Conuee y la normalización para la eficiencia energética. CONUEE.
- Design Builder, 2023. EnergyPlus Weather File (EPW) Format. Climatic Analytics.  
<https://designbuilder.co.uk/cahelp/Content/EnergyPlusWeatherFileFormat.htm>
- Echeverri, P. (2020). Importancia de la trayectoria solar en la arquitectura. Echeverrimontes.
- EnergyPlus (2023). Sitio oficial de EnergyPlus. <https://energyplus.net/>
- FANGER, P. O., Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering. Denmark: Danish. Technical Press, 244, 1970.
- Fuentes Freixanet V.A. (2008). Arquitectura bioclimática. Ciudad de México DF, editorial: Universidad Autónoma Metropolitana - UAM. p. 4
- García, A. (2011). Confort Térmico y Consumo Energético por uso de Sistemas Constructivos para Muros, en Mexicali Baja California. Conference: Semana Nacional de Energía Solar At: Chihuahua, Chihuahua, México Volume: XXXV
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. UNAM.
- Gobierno de Navarra (s.f.). Meteorología y climatología de Navarra. Navarra.es.
- Gómez, G., Bojórquez, G., Ruiz, P. El confort térmico: dos enfoques teóricos enfrentados. Revista de Investigación Científica en Arquitectura.
- Guadarrama, C. (2017). Luz natural en la arquitectura. Aportaciones científicas, tecnológicas y de diseño. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hidden Architecture. (2021). Ungreen: Brise Soleil.  
<http://help.covetool.com/en/articles/2495609-weather-file>
- IMVO, 2022. Banco del bienestar a la deriva. Centro de investigación en política pública.
- INEGI (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010, Mexicali, Baja California. Instituto nacional de estadística y geografía.
- Instituto de Investigaciones Sociales, UABC. (2011). Atlas de riesgos del municipio de Mexicali. Gobierno de Mexicali.
- Int. Journal of Biometeorol, 36, 201-209, 1992.
- Ladybug Tools. (2023). Interfaz de la página oficial para descarga del plugin. Ladybug.
- Martín-Monroy Manuel (2007). Manual de iluminación. Manuales de Diseño ICARO, Ayuntamiento y Universidad de las Palmas de Gran Canaria. pags. 26 - 61.
- Norma Oficial Mexicana - NOM (2001). Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales. (NOM-008-ENER-2001).
- Norma Oficial Mexicana - NOM (2008). Condiciones de iluminación en los centros de trabajo. (NOM-025-STPS-2008)
- Norma Oficial Mexicana - NOM (2011). Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios para uso habitacional. (NOM\_020\_ENER\_2011).
- Norma Oficial Mexicana - NOM (2013). Edificación sustentable criterios y requerimientos ambientales mínimos. NMX-AA-164-SCFI-2013, p. 16.
- Norma Oficial Mexicana - NOM (2014). Eficiencia energética en sistemas de alumbrado en edificios no residenciales. (NOM-007-ENER-2014).
- Pabón-Vázquez K. (2022). Soluciones para el Sobrecalentamiento de Edificios en Zonas Urbanas en Puerto Rico. Tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad de Puerto Rico - UPR, p. 6  
<https://repositorio.upr.edu/bitstream/handle/11721/3081/Trabajo%20de%20Fin%20de%20Carrera%20%28K.Pab%c3%b3n%20V%c3%a1lquez%29%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Radiografía de la energía en baja california. (s.f). El colegio de la frontera norte. Centros CONACYT.
- Rhinoceros. (2023). Rhinoceros. <https://www.rhino3d.com/es/>
- Ruiz, I. (2012). Bioclimatismo en la arquitectura de Le Corbusier: El Palacio de los Hilanderos.
- Thermorock. (2023). Propiedades termofísicas del material. <https://www.thermorock.mx/beneficios>
- TUDELA, F., Ecodiseño. México: Ediciones UAM, 223 pp., 1982.
- Uppunda, S. (2022). 10 Grasshopper Plugins Trending In The AEC Industry. Parametric architecture. <https://parametric-architecture.com/10-grasshopper-plugins-trending-in-the-aec-industry/>
- Vega, M. (2015). Análisis del desempeño y funcionamiento de sistemas fotovoltaicos instalados en Mexicali, Baja California. UABC.
- Wright Jaime (2006). Cálculo espectral de la irradiación directa, difusa y global en Heredia, Costa Rica. Universidad Nacional Heredia - UNH: Redalyc p. 3 <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=475948929009>