



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA
MAESTRÍA EN ARQUITECTURA: TECNOLOGÍAS

**ELEMENTOS DE PROTECCIÓN SOLAR DISEÑADOS CON BASE A LA GEOMETRÍA SOLAR: COMO
MEJORA AL CONFORT TÉRMICO EN LA CIUDAD DE MEXICALI, B.C.**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN ARQUITECTURA**

PRESENTA:

GERARDO SANTAMARIA VILLA

TUTOR:

Dr. Carlos Alfredo Bigurra Alzati
Universidad Nacional Autónoma de México

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

Dr. Aníbal Luna León
Universidad Autónoma de Baja California

Dra. Cecilia Guadarrama Gándara
Universidad Nacional Autónoma de México

Dra. Ilse García Villalobos
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. José Diego Morales Ramírez
Universidad Nacional Autónoma de México

CD. MX. ENERO, 2024



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.

Elementos de Protección solar

Diseñados con base a la **geometría solar**:
*como mejora al **confort térmico** en la
Ciudad de Mexicali, B.C.*





Prefacio

La presente investigación tiene como premisa diseñar un elemento de protección solar que minimice las ganancias de incidencia de radiación solar para edificaciones con orientación al sur en la ciudad de Mexicali, B.C., México. Además, contemplando las variables meteorológicas que conforman la zona del caso estudio hacen que se vuelva complicado conseguir adecuadas condiciones de confort térmico y eficiencia en el consumo energético, ya que se alcanzan temperaturas medias normales de 33°C en el mes más cálido. Con el fin de reducir la demanda energética y el mantener el confort térmico se consideró a la geometría solar como una herramienta básica para el desarrollo de esta estrategia, que además pueda ser aplicada en diferentes edificios que tengan la misma orientación y latitud que el caso en estudio. Asimismo, está por su transferibilidad puede ser aplicada a edificios comerciales, plazas y casa habitación, según las necesidades del proyecto.

Agradecimientos

Le agradezco a mis padres por su apoyo incondicional, a mis hermanas y a todas las personas especiales que formaron parte de este proceso de investigación.

Asimismo, a los miembros del comité tutor que estuvieron muy pendiente del proceso y avance de tesis.

De igual modo a la Universidad Nacional Autónoma de México, por la oportunidad de cursar la maestría en arquitectura.

Agradecimiento al consejo Nacional de Humanidades Ciencias y
Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo otorgado.

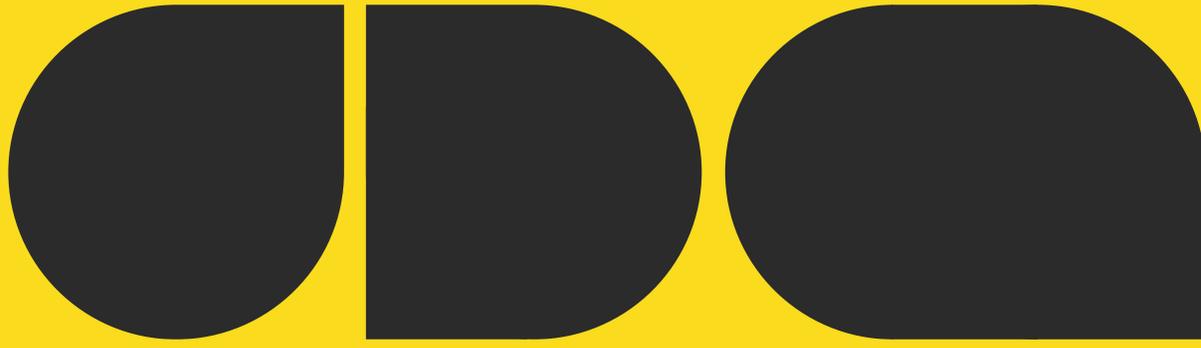


Índice

Introducción	11
1 Planteamiento de la investigación.....	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.1.1 Objetivos Específicos	13
1.2 Hipótesis	14
1.3 Diseño de la investigación	14
2 Marco teórico	17
2.1 Características del clima	17
2.2.1 Ubicación geográfica	18
2.1.2 Fisiografía.....	19
2.1.3 Clima	20
2.1.4 Geología.....	24
2.1.5 Edafología	26
2.1.6 Hidrografía	28
2.1.7 Uso del suelo y vegetación	30
2.1.8 Datos climatológicos por el SMN.....	31
2.1.9 Radiación solar	36
2.2 Antecedentes.....	39
2.2.1 Confort térmico y consumo energético.....	39
2.2.1.1 El Programa Ahorro Sistemático Integral (ASI)	39
2.2.1.2 Programa Vivienda Sustentable de CONAVI	41
2.2.1.3 Vecindario Fotovoltaico Valle de las Misiones Mexicali B.C.	42
2.2.2 Trayectoria solar	44
2.2.2.1 Le Corbusier, 1954	44
2.2.2.2 Marcelo y Milton Roberto, 1936	48
2.2.2.3 Juvenal Moya, 1946	51
3 Análisis del caso estudio	55
3.1 Ubicación geográfica: caso estudio	55
3.2 Características físico ambiental	55
3.3 Planos del proyecto	58
3.4 Propiedades termofísicas: caso estudio	61

4 Elementos de protección solar	64
4.1 Análisis de la trayectoria solar	64
4.1.1 Proyección esférica: carta solar	65
4.1.2 Proyección estereográfica	71
4.2 Desarrollo de ideas iniciales	87
4.3 Representación del prototipo seleccionado	94
4.4 Simulación térmica	98
4.4.1 Archivo meteorológico	100
4.4.2 Periodo de análisis	101
4.4.3 Cargas internas	101
4.5 Metodología de simulación	103
5 Resultados y conclusiones	112
5.1 Análisis de los espacios	112
5.1.1 Baño	114
5.1.2 Bóveda	118
5.1.3 Comedor	121
5.1.4 Caja	125
5.1.5 Sala de espera	128
5.2 Conclusiones del análisis	136
Glosario	146
Radiación solar	146
Geometría solar	147
Tablas	150
Figuras	152
Ilustraciones	156
Bibliografía	157

Índice



00 **Introducción**

Introducción

El alto consumo energético en la ciudad de Mexicali, Baja California, es una señal del problema que presenta el municipio. Este radica de las condiciones climáticas de la ciudad ya que la radiación solar llega de forma directa y potente durante la mayor parte del año. Por ende, los habitantes hacen mayor uso de climatización artificial con el fin de generar confort térmico en el interior de sus espacios. A su vez, esta situación ha generado posibles soluciones, sin embargo, en el mayor de los casos no han sido responsables con el medio ambiente.

Las viviendas y edificios procuran mantener cerradas cortinas o persianas por el deslumbramiento que ocasionan los rayos solares, y a su vez hacen mayor uso de consumo energético. De tal modo que las tarifas de energía eléctrica se incrementan constantemente. Actualmente la ciudad de Mexicali es la única del país que se encuentra dentro de la modalidad tarifa 1F, en la cual la Comisión Federal de Electricidad otorga un subsidio al gasto en consumo energético, aplica a localidades que tengan temperaturas mínimas de 33°C en verano. Se debe agregar que, a pesar de esta ayuda adicional sigue existiendo un problema en la sociedad mexicalense, ya que continúan las quejas de la comunidad en la época de verano debido a los costos tan altos de las tarifas eléctricas. Es preocupante la situación que confronta la ciudad, cada verano se vuelve más intenso y difícil de habitar.

Según estiman algunos estudios realizados en la Universidad Autónoma de Baja California, el uso de electricidad para generar confort térmico seguirá creciendo, dado que es una necesidad insatisfecha que crece a medida que zonas de clima cálido extremo como Mexicali, se urbanizan. No se puede frenar el crecimiento de la mancha urbana de la ciudad, pero si se puede proyectar arquitectura que contemple al sol como ponencia, así, se aprovecharía al máximo este recurso natural. Instituto de Investigaciones Sociales, UABC. (2011).

U D O

Planteamiento de investigación

Dicho lo anterior, la presente investigación integra la aplicación de la geometría solar como herramienta básica de la arquitectura. Esta ha acompañado al hombre y con él a grandes civilizaciones a lo largo de la historia, que han utilizado al sol como fuente de energía para distintas formas, como ubicar ciudades y edificaciones con objetivos específicos. En un clima cálido seco, es necesario implementar sistemas de aire acondicionado mecánico, sin embargo, se ha ido dejando de lado las estrategias de diseño pasivo que ofrece la arquitectura. Por ende, se diseñó un elemento de protección solar que permite sombrear áreas susceptibles a la incidencia de radiación solar en los meses de verano, mientras que, permite filtrarla en los meses de invierno. Se tomó como principio de análisis la geometría solar para el desarrollo del elemento de protección solar, en función de la incidencia de radiación solar, permitiendo la climatización pasiva de edificios y también obtener un beneficio energético. Analizando las fachadas con relación a la trayectoria solar, se llegó a la conclusión que las fachadas orientadas al Sur – Oeste son las más susceptibles a la radiación solar. De modo que, la aplicación será exclusivamente en áreas acristaladas orientadas al Sur de la ciudad. Así mismo, se aplicaron las bases teóricas de la geometría solar, tomando como referencia la proyección estereográfica, obteniendo de esta la altura solar y el ángulo azimut para los solsticios de invierno, verano y equinoccios.

1.1 Objetivo General

Diseñar un dispositivo de protección solar para superficies acristaladas en Mexicali B.C., que optimice la radiación solar y permita edificios de bajo consumo energético y mayor confort térmico.

1.1.1 *Objetivos Específicos*

Desarrollar un elemento de protección solar para fachada en función de la geometría solar.

Demostrar que el elemento de protección solar evita la ganancia de radiación solar en verano y la permite durante el invierno.

Analizar el consumo energético por climatización artificial y las condiciones de confort térmico de los espacios.

1.2 Hipótesis

Los elementos de protección solar para superficies acristaladas, diseñados con base a la geometría solar, mejoran el confort térmico de los espacios interiores y a su vez disminuyen el consumo energético.

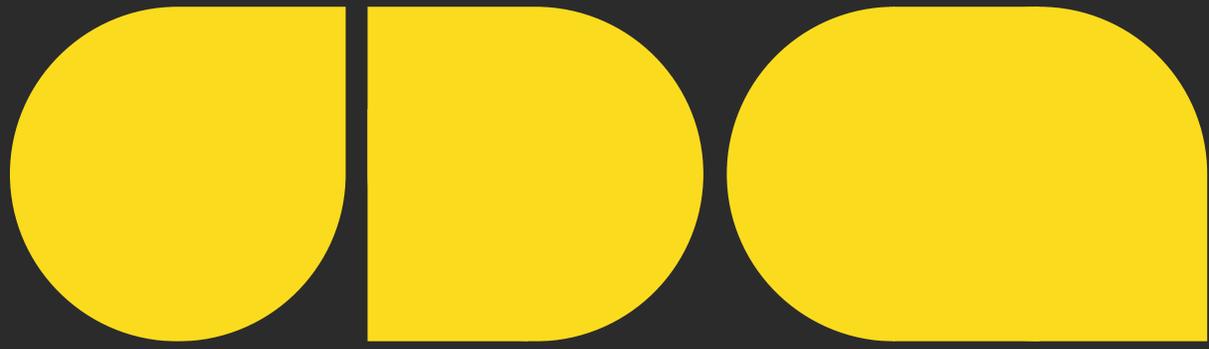
1.3 Diseño de la investigación

La investigación desarrollada se aplicó a un modelo base con orientación Sur, bajo un esquema metodológico de tipo cuantitativo con análisis causa-efecto, por medio de simulación, que hace énfasis en el uso de modelos y analogías (Groat y Wang, 2002).

El objeto de estudio es el elemento de protección solar en función de la geometría solar para colocarse en fachadas acristaladas con orientación Sur – Oeste. Los parámetros de la evaluación son el confort térmico del espacio (medido en temperatura °C) y el consumo energético (medido en kWh). Mediante un método de evaluación, utilizando la simulación térmica aplicada a un caso base, el cual fue elegido por su orientación al Sur de la ciudad de Mexicali, con aperturas acristaladas de piso a techo en sus Fachadas Sur, Este y Oeste. Con el fin de poder darle significancia y transferibilidad a esta estrategia y poder ser utilizada en otros proyectos con estas orientaciones.

La simulación térmica se realizó en el software de Rhinoceros 7 utilizando Grasshopper 5.0 y dentro de este las herramientas de simulación de Ladybug: Honeybee y Honeybee Energy. En un periodo anual, dividiendo este en periodo frío y periodo cálido para lograr entender mejor el comportamiento de los elementos de protección solar. Cabe mencionar que el motor de arranque del simulador es Energy Plus y está avalado por la comunidad científica. Además, se utilizó un archivo EPW obtenido de EnergyPlus de la zona 15 de El Centro, CA. Por su cercanía a la zona del caso estudio al comparar con el EPW de Mexicali, resulto una mejor opción ya que este primero contiene más información por periodos más largos.

Finalmente se equipararon los resultados mediante un estudio comparativo de la simulación del caso estudio, sin los elementos de protección solar y con los elementos de protección solar, dando así conclusiones definitivas para la investigación.



02

Marco Teórico

2.1 Características del clima

Según el capítulo II Peligros Hidrometeorológicos del Atlas de riesgos del municipio de Mexicali, Baja California es un estado que presenta un clima desértico, debido al sistema semipermanente de alta presión del pacífico noroeste, pues los movimientos de subsidencia de este sistema inhiben la formación de nubes y precipitación. Particularmente el municipio de Mexicali 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. (Atlas de riesgos del municipio de Mexicali, B.C., 2011).

En el reporte anual 2021 de Comisión Nacional del Agua se reveló que el valor máximo extremo en el mismo año se observó en la estación Mexicali, Baja California, el día 18 de junio con 51.4 °C, este valor superó el registro máximo histórico de la misma estación. En la Tabla 1 se puede apreciar también, que los meses de verano con mayor temperatura los tiene la misma estación meteorológica de Mexicali.

(CONAGUA, 2021).

MES	TX °C	ESTACIÓN	FECHA
ENE	41.4	Nueva Palestina, Chis,	24/01/2021
FEB	43.3	Nueva Palestina, Chis,	28/02/2021
MAR	46.5	Jesús María, Nay.	30/03/2021
ABR	46.5	Apatzingán, Sin.	01/04/2021
MAY	47	Huites hidrométrica, Sin.	13/05/2021
JUN	51.4	Mexicali, B.C.	18/06/2021
JUL	48.2	Mexicali, B.C.	21/07/2021
AGO	50.6	Mexicali, B.C.	27/08/2021
SEP	48.8	Mexicali, B.C.	13/09/2021
OCT	44.7	San Francisco, Chih.	08/10/2021
NOV	43	Cazanate, Son.	14/11/2021
DIC	41.1	El pujal, S.L.P.	29/12/2021

Tabla 1. El reporte del clima en México: Reporte anual 2021. (2021). Coordinación General del Servicio Meteorológico. CONAGUA.

Por otra parte, estados como Sinaloa, Sonora y Chihuahua aparecen dentro de la Tabla 1, ya que presentan climas cálidos secos o húmedos en los cuales se registran altas temperaturas. Los meses de junio, julio, agosto y septiembre son los que normalmente se hace mayor uso de aire acondicionado para poder contrarrestar la temperatura ambiente que se filtra al interior de los espacios.

2.2.1 Ubicación geográfica

Con el fin de conocer mejor las condiciones geográficas del sitio de estudio, se realizó un breve análisis de la información que proporciona el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Utilizando el Compendio de información geográfica municipal de Mexicali 2010. A continuación, se muestra en la Tabla 2 los datos geográficos de la ciudad.

Ubicación	Coordenadas y altitud	Colindancias	Otros datos
geográfica	Entre los paralelos 30° 51' y 32° 43' de latitud norte; los meridianos 114° 43' y 115° 51' de longitud oeste; altitud entre -3 y 1 900 m.	Colinda al norte al este con los Estados Unidos De América, el estado de Sonora y el Golfo de California; al sur con el Golfo de California y el municipio de Ensenada; al oeste con los municipios de Ensenada y Tecate.	Ocupa el 20.61% de la superficie del estado. Cuenta con 1 474 localidades y una población total de 936 826 habitantes.

Tabla 2. Ubicación geográfica. Compendio de información geográfica municipal de los estados unidos mexicanos. Mexicali, B.C.

Mexicali es una ciudad ubicada al norte del país, es la capital del estado de Baja California y como se aprecia en la tabla 2, está en frontera con Estados Unidos de América, muy cercana al estado de Sonora y con bastante comunicación con la ciudad de San Luis Rio Colorado, Son. También existe cierta proximidad con playas del Golfo de California y Ensenada. Es importante mencionar que, es una ciudad que se extendió

en sentido horizontal ya que hay muy pocos edificios verticales y por ser un municipio joven la mancha urbana se expandió sin control en edificios y casas habitación de uno o dos niveles.



Ilustración 1. Mapa de Mexicali. Obtenido de IMIP 2023 Instituto Municipal de Investigación y Planeación Urbana de Mexicali. Todos los derechos Reservados.

En la Ilustración 1 se puede apreciar el mapa obtenido del IMIP (2023) como se conforma la ciudad, la línea fronteriza y los distintos ejidos aledaños a la zona urbana. Al norte se puede apreciar la ciudad de Calexico que es con quien hace frontera en Estados Unidos de América.

2.1.2 Fisiografía

En segunda instancia hay que ubicar a Mexicali, se encuentra en la llanura sonorenses, dentro del desierto de Altar, por eso es por lo que Ciudad Hermosillo y Mexicali, tienen climas muy calurosos y en ciertos aspectos muy parecidos, ver Tabla 3.

Fisiografía	Provincia	Subprovincia	Sistemas de topoformas
	Llanura sonorense	Desierto de altar (63.81%), sierras de	Llanura deltáica salina (22.01%), bajadas con lomeríos (20.14%), sierra baja (11.01%), llanura

	(63.81%), península de baja california (35.27%)	baja california norte (35.27%)	deltáica inundable y salina (9.25%), valle intermontano cerrado con lomerío (5.26%), vaso lacustre inundable y salino (5.23%), sierra alta con mesetas (5.19%), sierra alta de declive escarpado (4.38%) campo de dunas típico (3.47%), lomerío escarpado con bajadas (1.97%), valle ramificado (1.75%), meseta compleja con lomerío (1.73%), lomerío complejo con llanuras (1.46%), lomerío complejo con bajadas (1.14%), llanura aluvial salina (1.09%), sierra baja compleja (1.05%), lomerío escarpado (0.82%), meseta basáltica (0.80%), lomerío tendido ramificado (0.54%), bajada típica (0.33%).
--	--	-----------------------------------	--

Tabla 3. Fisiografía. Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Mexicali, B.C

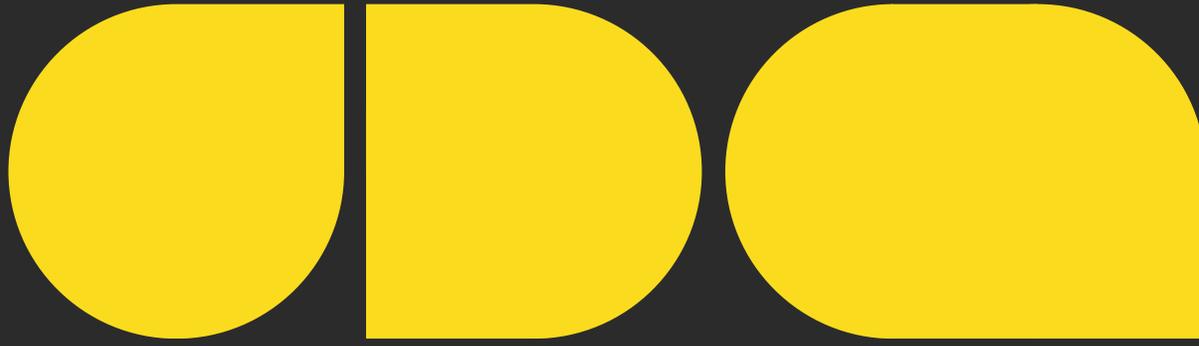
2.1.3 Clima

El clima según el libro Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen, por Enriqueta García, Mexicali pertenece al 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 correspondiente al mes de julio, con 29 % de lluvias de invierno y oscilación térmica muy extrema 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.

Además, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía dice que el clima en Mexicali tiene un rango de temperatura de 6°C – 24°C, un rango de precipitación de 0 – 500 mm. Que es un clima muy seco y cálido (52.16%), muy seco semicálido (42.09%), seco mediterráneo templado (2.89%), muy seco templado (1.55%), semifrío subhúmedo con lluvias en invierno (0.78%), seco mediterráneo templado (0.47%) y templado subhúmedo con lluvias en invierno (0.06%).

Por otro lado, el Atlas de Riesgos del Municipio de Mexicali (2011) dice que, la ciudad presenta cuatro climas diferentes dentro del grupo de secos-áridos, con escasa precipitación. El clima cálido seco que comprende a la ciudad de Mexicali y su valle, este clima predomina en el 47% del territorio municipal, aproximadamente. El clima semicálido seco abarca el 37% del territorio y se manifiesta en la parte central del municipio. Por su parte, el clima templado seco sólo cubre una pequeña parte del oeste del municipio representa el 6% del área municipal. El 10% del territorio es de clima templado semiseco y se localiza en la zona central oeste, comprendiendo parte de las sierras de Juárez y San Pedro Mártir.

En la Ilustración 2, se puede comprender de mejor forma la ubicación geográfica y el clima de la ciudad, localizando al estado de Sonora, al municipio de Ensenada, el Golfo de California, Tecate y Estados Unidos de América. Además, se puede apreciar como el clima muy seco cálido y cálido alcanza la mayor parte del territorio municipal, estoy para comprender de mejor forma como es el clima no solo en la ciudad, sino en todo el municipio.



Climas dentro del municipio de Mexicali, B.C ¹

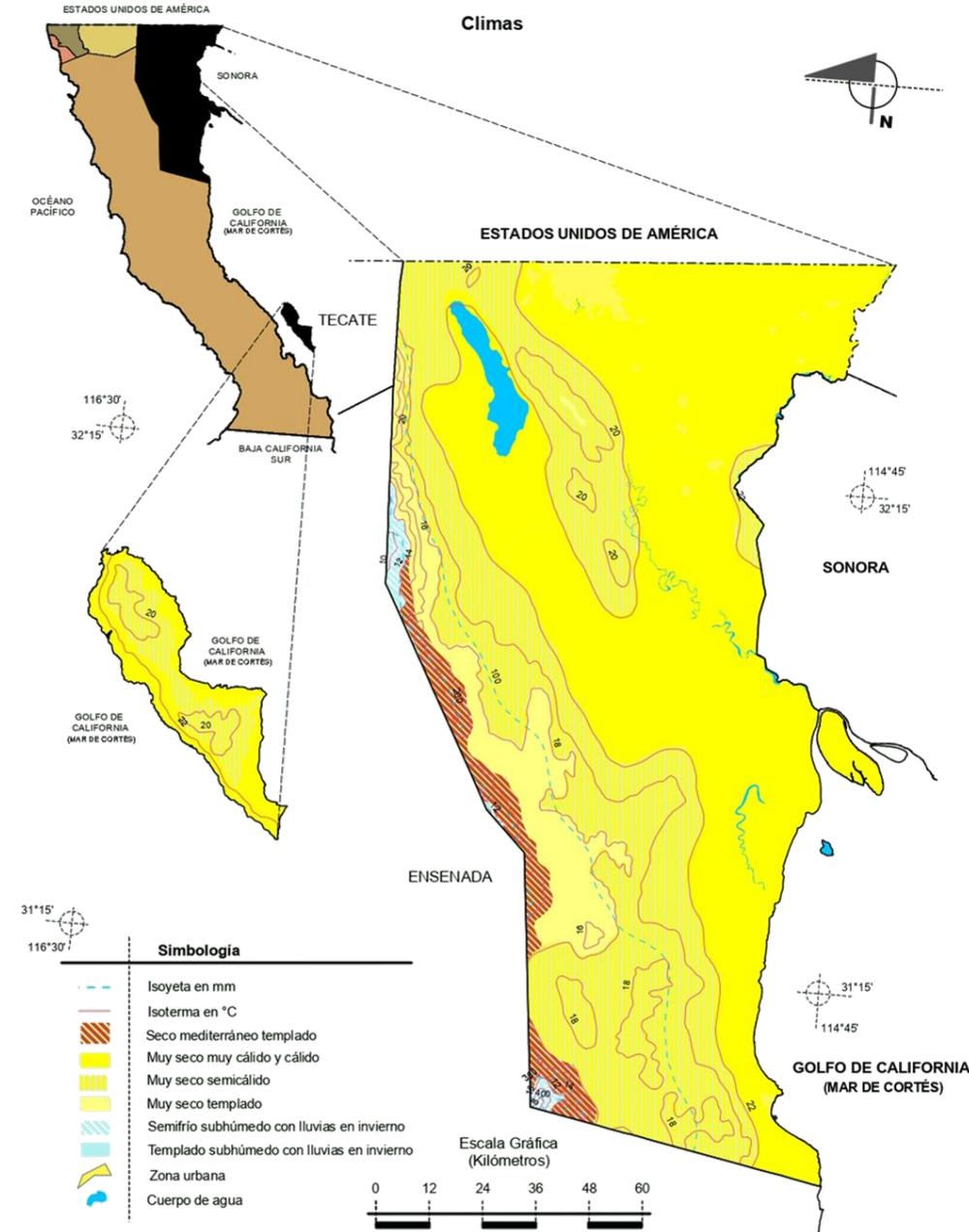


Ilustración 2. Clima. INEGI. Compendio de información geográfica municipal 2010. Mexicali, Baja California. 2010.

Para proporcionar una perspectiva visual del clima, se anexa el mapa del clima por INEGI, donde se aprecia claramente que en la mancha territorial la cubre el clima cálido muy seco.

¹ Fuente: Marco Geoestadístico 2010, versión 4.3.

INEGI. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Fisiográfica 1:1 000 000, serie I. INEGI. Información Topográfica Digital Escala 1:250 000 serie II y serie III. ENSENADA 116°30' 31°15' N INEGI-CONAGUA. 2007. Mapa de la Red Hidrográfica Digital de México escala 1:250 000. México.

2.1.4 Geología

La mayor parte del territorio de la ciudad de Mexicali se encuentra en un tipo de suelo aluvial, a lo largo de los periodos se han creados pequeños montículos de suelos eólicos y lacustres (Tabla 4). En la tabla de abajo se enlistan todas las rocas y sus periodos de creación, es importante mencionar que la mayoría de estas rocas se encuentran en la sierra Cucapá, ver Ilustración 3.

Geología	Periodo	Roca
	Cuaternario (68.66%), neógeno (13.52%), cretácico (12.04%), no definido (0.87%), paleógeno (0.38%) y terciario (0.10%)	<p><u>Suelo</u>: aluvial (42.13%), lacustre (14.26%), eólico (4.49%), litoral (0.01%)</p> <p><u>Ígnea extrusiva</u>: toba ácida (7.81%), basalto (1.48%), dacita (0.63%), riolita-toba ácida (0.29%), andesitabrecha volcánica intermedia (0.24%), andesita (0.14%), basalto-brecha volcánica básica (0.01%).</p> <p><u>Sedimentaria</u>: conglomerado (7.00%), arenisca (2.57%), lutita-arenisca (0.09%), caliza (0.03%).</p> <p><u>Ígnea intrusiva</u>: granodiorita-tonalita (5.13%), granodiorita (4.72%), tonalita (1.49%), granito (0.71%).</p> <p><u>Metamórfica</u>: gneis (1.30%), metasedimentaria (0.43%), esquisto (0.24%), mármol (0.19%), complejo metamórfico (0.19%).</p>

Tabla 4. Geología de Mexicali. Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Mexicali, B.C.

Tipos de rocas dentro del municipio de Mexicali, B.C.²

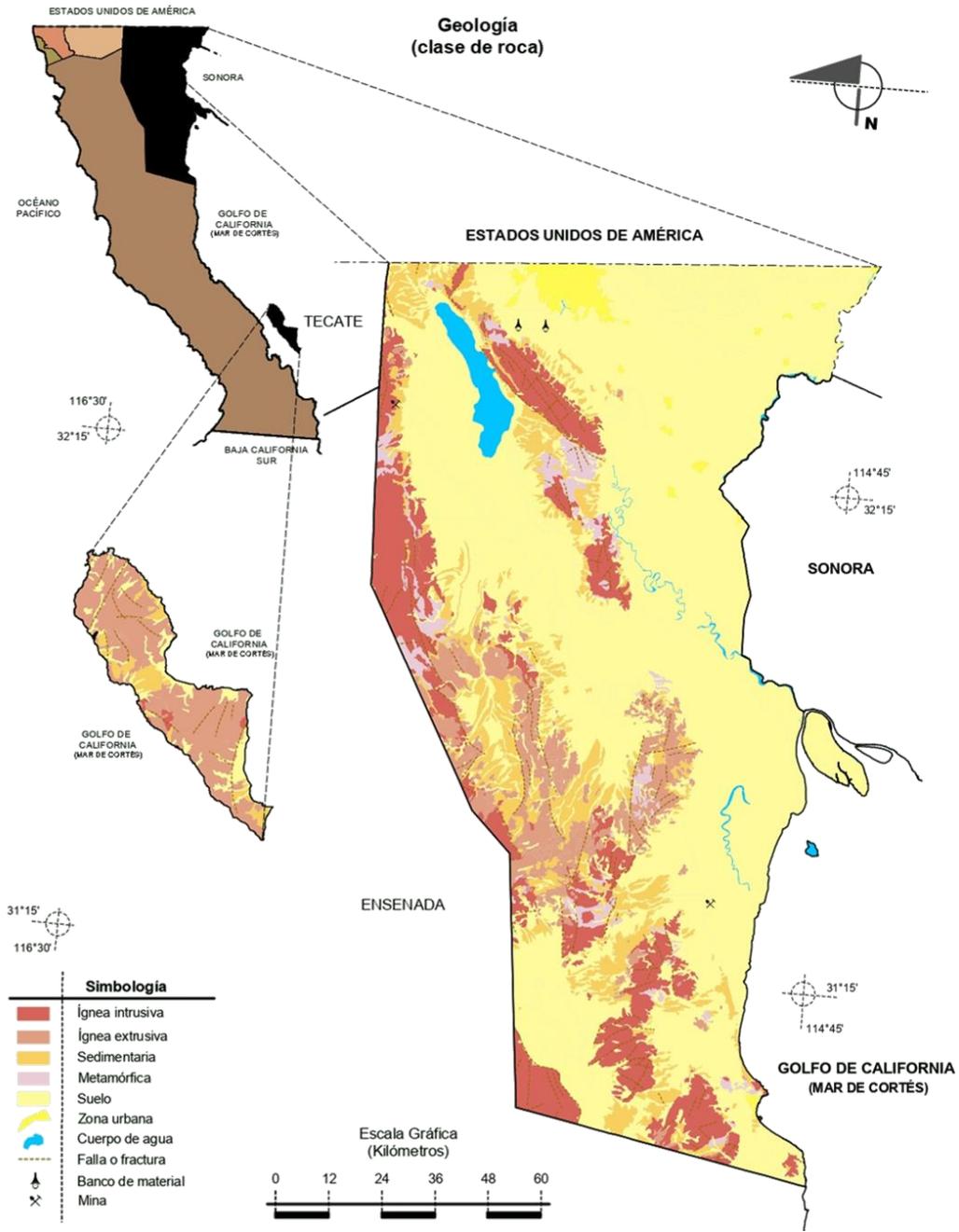


Ilustración 2. Geología. INEGI. Compendio de información geográfica municipal 2010. Mexicali, Baja California. 2010.

² Fuente: INEGI. Marco Geoestadístico 2010, versión 4.3

INEGI. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Geológica 1:250 000, serie I.

INEGI. Información Topográfica Digital Escala 1:250 000 serie III.

2.1.5 Edafología

Los suelos dominantes en el municipio varían un tanto, ya que el volumen territorial es bastante amplio. La zona estudio domina un tipo de suelo Vertisol. Se puede corroborar en la Ilustración 3 de los mapas de INEGI. Menciona el Sistema de Información Geográfica (2017):

De los diferentes tipos y asociaciones de suelos con que cuenta la entidad, destacan los regosoles, los litosoles y los yermosoles; de los tres, los más abundantes son los regosoles, que representan aproximadamente el 46 por ciento de la superficie del Estado. Las características edafológicas, la disponibilidad del recurso agua, han contribuido al desarrollo de las actividades agrícolas principalmente en la región Noroeste del municipio de Mexicali, y en los Valles de los municipios de Tecate y Ensenada, como son el Valle de Las Palmas, Ojos Negros, San Quintín, Maneadero y el Valle de Guadalupe.

Edafología	Suelo dominante
	Leptosol (26.78%), regosol (22.20%), solonchak (14.99%), arenosol (12.35%), vertisol (7.11%), fluvisol (6.72%), calcisol (4.36%), cambisol (2.09%), luvisol (0.01%).

Tabla 5. Edafología de Mexicali. Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Mexicali, B.C

Suelos dominantes del municipio de Mexicali, B.C.³

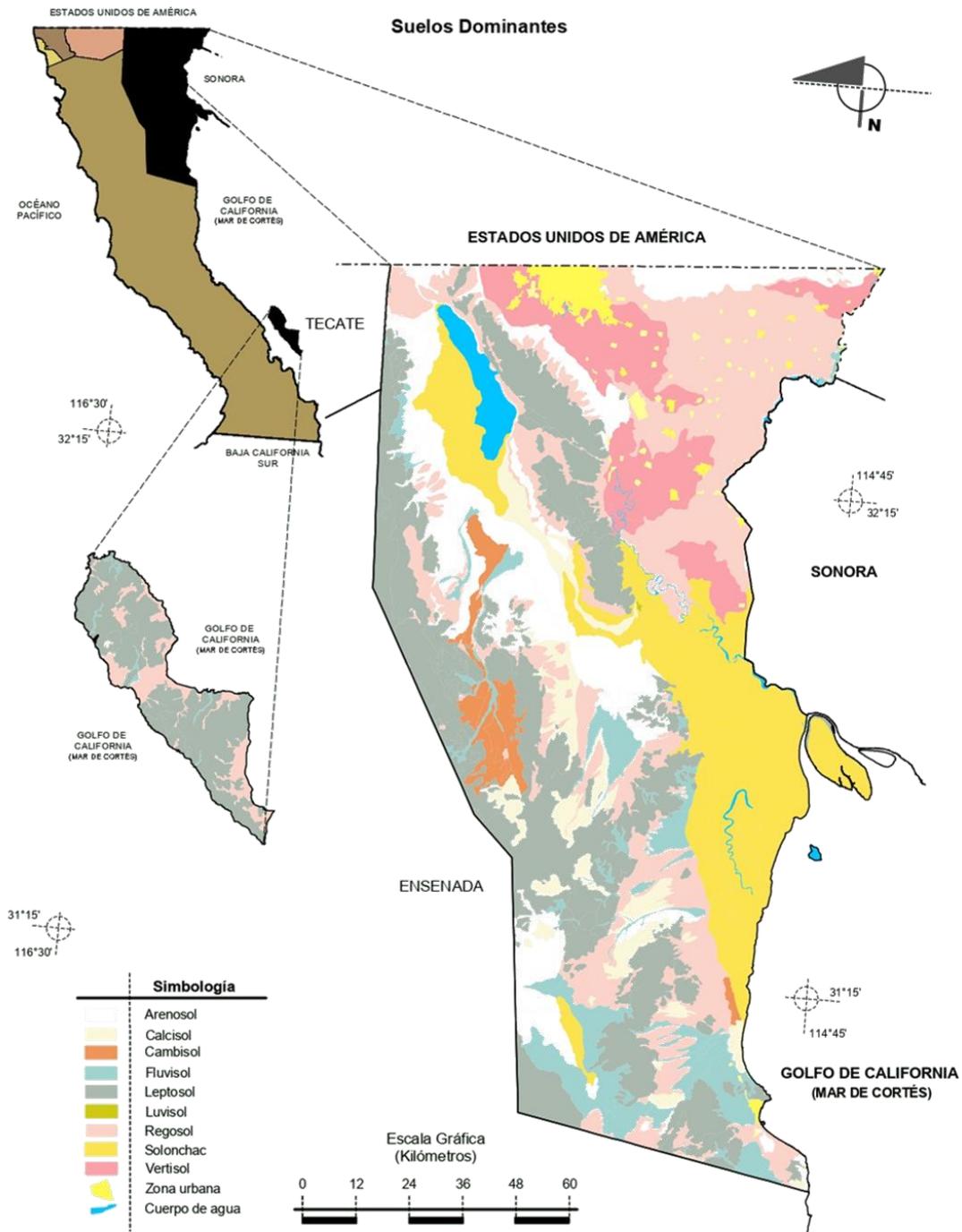


Ilustración 3. Edafología. INEGI. Compendio de información geográfica municipal 2010. Mexicali, Baja California. 2010.

³ Fuente: INEGI. Marco Geoestadístico 20105, versión 4.3
 INEGI. Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Escala 1:250 000, Serie II (Continuo Nacional).
 INEGI. Información Topográfica Digital Escala 1:250 000, serie III.

2.1.6 Hidrografía

Mexicali tiene un tipo de desembocadura de cuenca, endorreica. Además, cuenta con dos regiones hidrológicas; la RH7 Río Colorado y la RH4 B.C. Noroeste. Dentro de la ciudad atraviesan varias subcuencas de ambas regiones hidrológicas (Ilustración 4). La del Río Colorado se encuentra hacia el Este, mientras que la de B.C. Noroeste. Por otro lado, existen volúmenes de agua dentro de la ciudad, como lo es la laguna Xochimilco y la Laguna Salada. Los escurrimientos vienen de la sierra Cucapá, y en años atrás desembocaban en el Río Nuevo, el cual nace en los Estados Unidos Americanos. Los coeficientes de escurrimientos van de 0 a 5% y en otras áreas de 5 a 10%. En la Tabla 6 se pueden apreciar dichos datos, así como cada una de las subcuencas que constituyen la región hidrológica. Además, en la Ilustración 4 se encuentra el plano de hidrología superficial, escurrimientos y coeficientes de la ciudad de Mexicali.

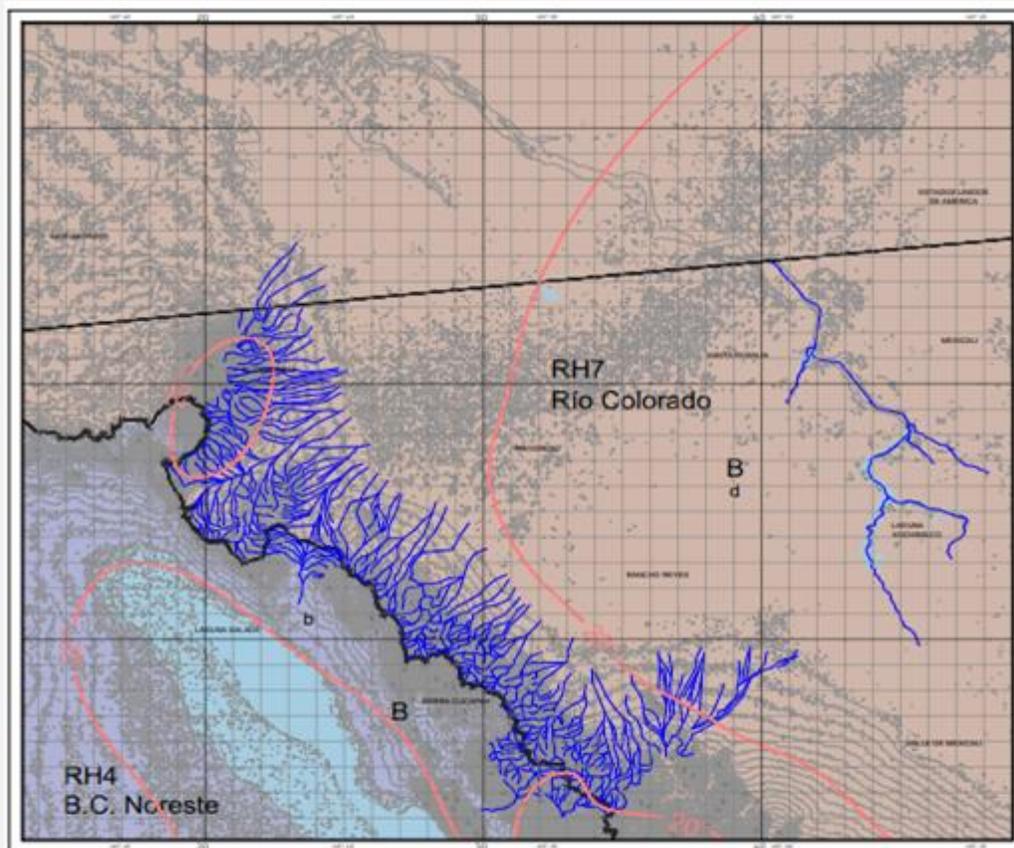


Ilustración 4. Plano hidrológico de la zona de estudio. Fuente: Cartas de INEGI. Elaboración propia

Hidrografía	Región hidrológica	Cuenca	Subcuenca	Corrientes de agua	Cuerpos de agua
	Baja California noreste (laguna salada) (66.04%), río Colorado (33.96%)	L. Salado-a. Del diablo (46.10%), río Colorado (30.10%), a. Agua dulce Santa Clara (19.94%), Bacanoramejorada (3.86%)	L. Salado (36.99%), Santa Clara (14.11%), a. Del diablo (9.10%), canal Cerro Prieto (7.17%), r. Bajo río Colorado (6.72%), San Felipe (4.86%), r. Hardy (4.40%), canal del Álamo (3.39%), c. Bacanora monumentos (3.38%), r. Colorado (2.84%), r. Las Abejas (2.20%),	Perennes: r. Colorado, coronita, desagüe wisteria, r. Nuevo, sonora y a. Viejo. Intermitentes: agua grande, cañón de Enmedio, a. De Enmedio, el arrajal, el borrego, el calabozo, el carrizo, el copal, el diablito, el escondido, el jamón, el jaque, el mano, el moreno, el palmar, el palomar, el tajo, a. Grande, Guadalupe, huatamote, la esperanza, la Genoveva, la parra, la providencia, las almejas, las amarillas, las canoas, las cuevas, manzanito, rancho nuevo, San Matías, Santa Isabel, taraiso y witiñan.	Laguna salada (1.25%).

Tabla 6. Hidrología de Mexicali. Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Mexicali, B.C

2.1.7 Uso del suelo y vegetación

Menciona el Programa Municipal de Desarrollo Urbano de Mexicali, BC. (2020). Los usos de suelo que se presentan en el municipio son diversos predominando el área agrícola del Valle de Mexicali con el 16.51%, con una superficie de 242,767.19 ha. El área sin vegetación representa el 16.14% con una superficie de 237,308.75 ha. Que ocupa parte de la zona de la laguna salada en su extremo norte, extendiéndose al sureste hacia la zona de la reserva de la biósfera del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, continuando por la costa del golfo de California hasta boca la bolsa. Las áreas urbanas de la ciudad de Mexicali y las localidades del Valle del mismo nombre se localizan al Norte y Este del territorio municipal y hacia el Sur hasta la ciudad de San Felipe ocupan una superficie del 1.42%, siendo una superficie de 20,847.06 ha. El área boscosa se localiza en la sierra de Juárez ocupa el 0.13%, con 1,971.09 ha. Los cuerpos de agua perennes interior y marítimo representan el 1.40% con 20,577.29 ha. Y 0.09% con 1,323.39 ha, respectivamente. (p. 19).

Uso del suelo y vegetación	Uso del suelo	Vegetación
	Agricultura (14.74%), zona urbana (1.36%) y acuícola (0.01%)	Matorral (61.76%), vegetación halófila (3.14%), bosque (0.69%), vegetación de galería (0.08%), vegetación de dunas costeras (0.06%) y pastizal (0.04%).

Tabla 7. Uso de suelo y vegetación de Mexicali. Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Mexicali, B.C

En la Tabla 7 se muestran los principales usos del suelo en la ciudad y por otro lado la vegetación endémica que existe. La Ciudad de Mexicali en su gran mayoría es zona urbana, es decir el 14.74% de agricultura que se indica en la tabla de arriba pertenece a las zonas de la periferia de la ciudad, mejor conocido como el Valle de Mexicali. Mientras que la vegetación es poca, ya que, por ser un clima desértico y las escasas lluvias, se dan plantas como matorrales, chamizos, palo verde, mezquite y nopales.

2.1.8 Datos climatológicos por el SMN

Para comprender mejor la forma en que se comporta el clima de la ciudad de Mexicali, se obtuvieron diferentes datos climatológicos del Servicio Meteorológico Nacional por parte de la Comisión Nacional del Agua; las temperaturas máximas y mínimas, así como la precipitación y evaporación en un rango del año 1944 al 2012, tomando la estación Mexicali (DGE) 02033.

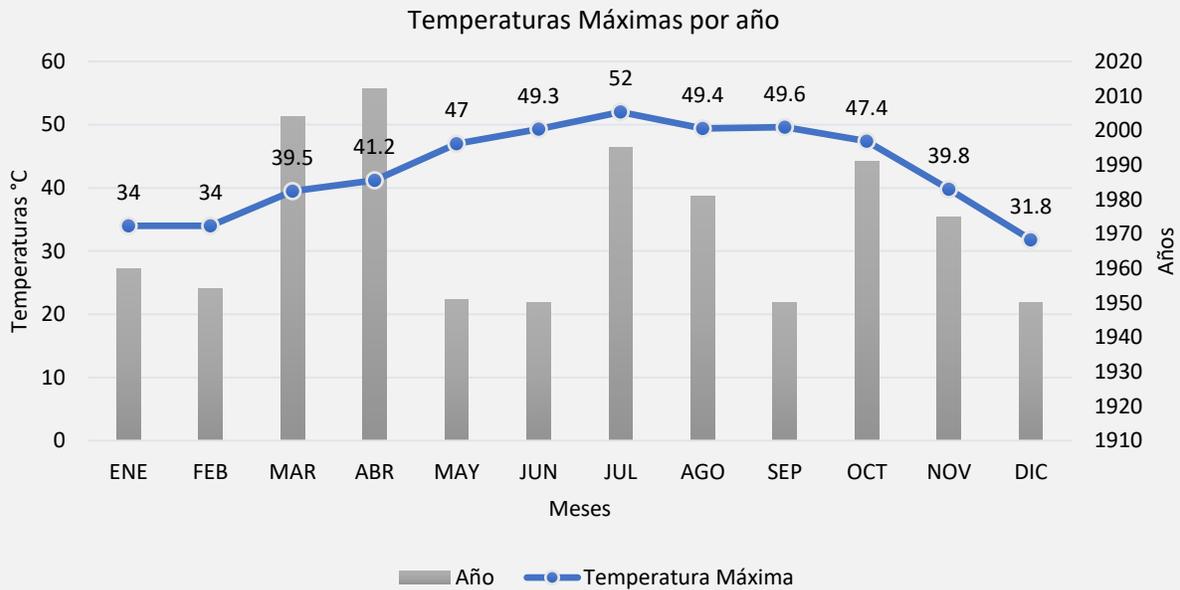


Tabla 8. Registro de Temperaturas Máximas diarias por año, datos recuperados del Servicio Meteorológico Nacional. Fuente elaboración propia.

Como se muestra en la Tabla 8, el comportamiento de las temperaturas máximas diarias medidas en un periodo de 68 años demuestra que los veranos alcanzan temperaturas de hasta 52°C en Julio, mientras que los inviernos descienden hasta los 31.8°C. De modo que se comprende mejor por qué los ciudadanos hacen mayor uso de aire acondicionado durante los meses de verano, puesto que siempre habrá la necesidad de generar un ambiente confortable. Las temperaturas en los primeros meses del año (invierno) rondan alrededor de los 34°C no son tan altas en comparación con las de mediados del año (verano) que alcanzan hasta los 52°C, es aquí donde se pretende mitigar la ganancia de calor emitida por la incidencia de radiación solar, con la propuesta de protección solar para fachada. Así mismo, la Tabla 9 registra el comportamiento de las temperaturas mínimas en relación con los mismos años transcurridos. Pudiendo apreciar que se han

alcanzado temperaturas mínimas por debajo de los 0°C, como lo fue en el mes de enero, febrero e incluso diciembre, recordando que el clima es cálido seco muy extremo tanto en verano como en invierno, finalmente es una ciudad desértica.

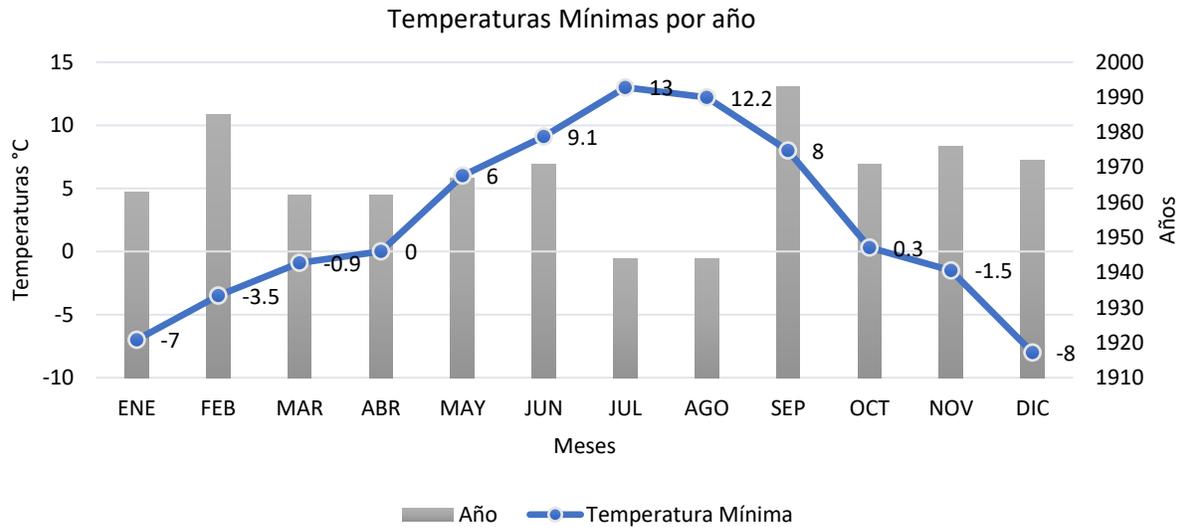


Tabla 9. Registro de Temperaturas Mínimas diarias por año, datos recuperados del Servicio Meteorológico Nacional. Fuente elaboración propia.

Además, los datos proporcionados por la CONAGUA explican una serie de factores importantes para el entendimiento del comportamiento del clima. Donde se puede verificar si estos valores máximos o mínimos se han repetido en los registros, lo cual es el caso ya que muchos de los valores se han repetido constantemente a lo largo de las mediciones que muestran las estaciones meteorológicas, como las máximas, mínimas y normales de temperaturas, la precipitación por mes, así como la radiación solar que recibe la zona de estudio, además que el analizar el comportamiento de estos valores ayudan a la clasificación del clima.

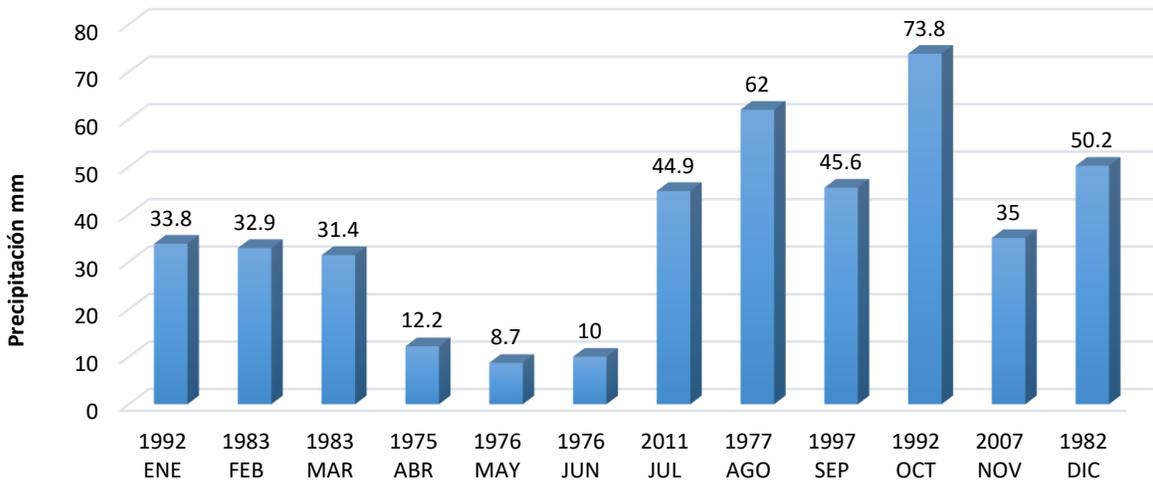


Figura 1. Precipitación Máxima por año, datos recuperados del Servicio Meteorológico Nacional. Fuente elaboración propia.

Se puede observar en la Figura 1, que la lluvia es escasa en los largos periodos que se tienen datos del clima. Mexicali al ser una ciudad de clima cálido muy seco presenta pocas precipitaciones al año. Los meses con mayores temperaturas como agosto, septiembre y octubre presentan una mayor frecuencia de lluvias, así mismo como los meses más fríos que son diciembre y enero.

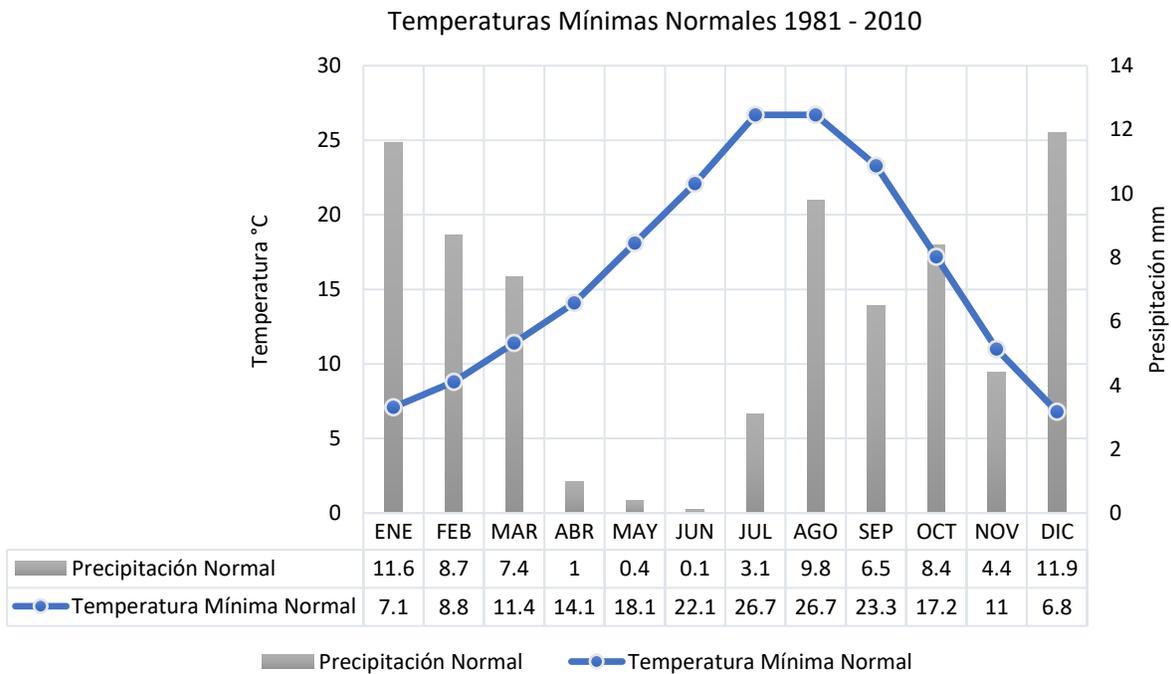


Tabla 10. Climograma Temperaturas mínimas normales, datos recuperados del Servicio Meteorológico Nacional. Fuente elaboración propia.

Además, es de suma importancia analizar el comportamiento de las temperaturas normales de la región. En el climograma de arriba se puede apreciar que durante los meses de invierno las mínimas normales rondan alrededor de los 6°C – 11°C mientras que en los meses del verano se alcanzan mínimas normales de 14°C – 26°C, siendo esto realmente preocupante ya que está registrando temperaturas bastante altas para ser mínimas normales. Lo cual hace referencia a la zona de estudio y su composición meteorológica. Así mismo, es preciso verificar que las precipitaciones de la zona son muy bajas, tienen un nivel máximo de 11 mm a 12 mm en el mes de diciembre y enero, con una cantidad anual de precipitación de 73.3 mm.

Por otro lado, se tienen las temperaturas máximas normales, del periodo de 1981 al 2010, en este lapso se logró comprender de mejor forma las condiciones climáticas de la ciudad. En los reportes anuales de la CONAGUA, se encontró que las temperaturas máximas siempre son en el mes de julio. Es así como los meses con temperaturas más altas del año son junio, julio y agosto (Tabla 11).

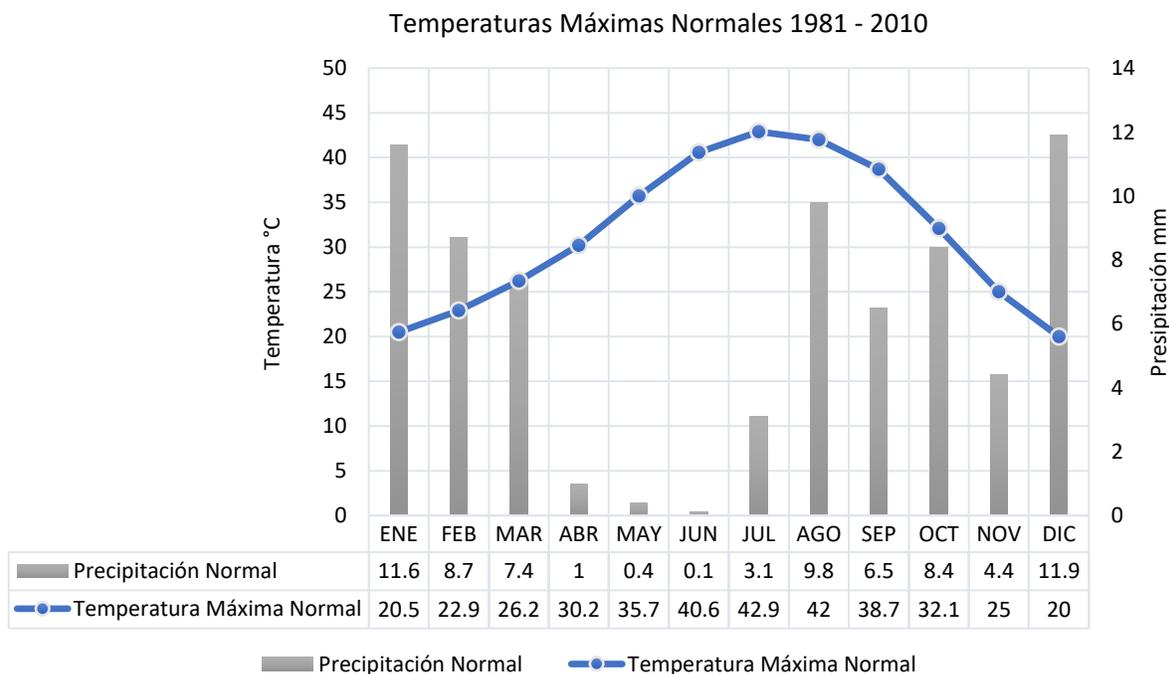


Tabla 11. Temperaturas máximas normales, datos recuperados del Servicio Meteorológico Nacional. Fuente elaboración propia.

Tomando en cuenta este análisis del clima, se llegó a la temprana conclusión de proponer la estrategia de diseño de protección solar con relación a las temperaturas mínimas y máximas de cada mes. A partir del

equinoccio de primavera, restringir la entrada de incidencia solar; los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre. Por el contrario, dar entrada a la incidencia de radiación solar después del equinoccio de otoño, incluyendo los meses de octubre, noviembre, diciembre, enero y febrero.

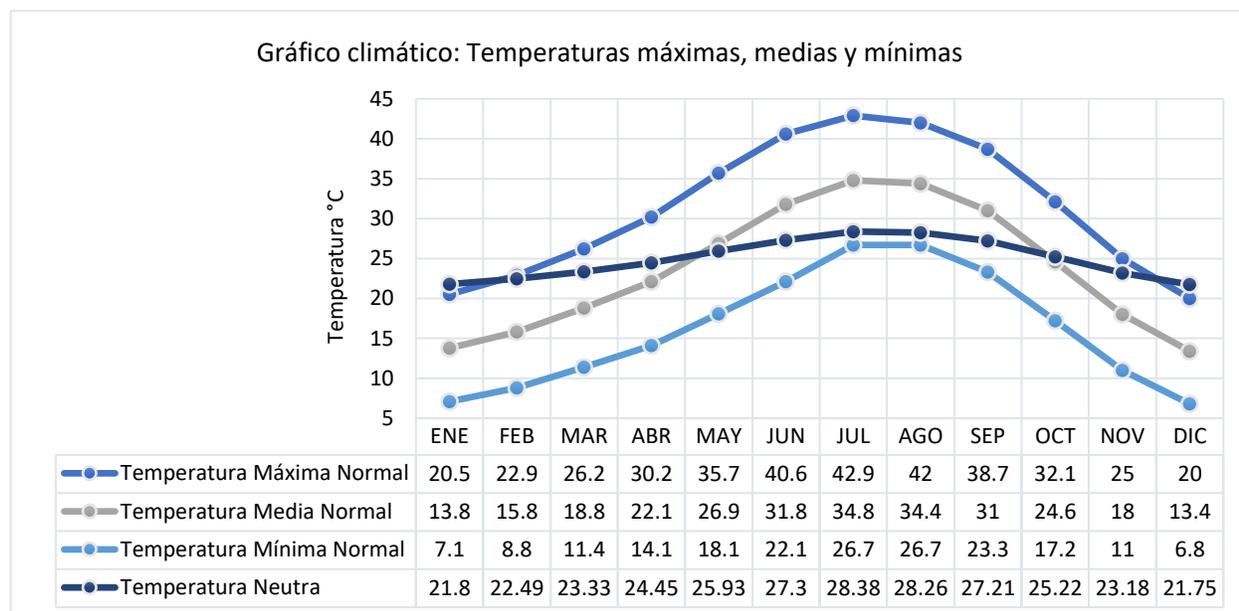


Tabla 12. Temperaturas con los valores meteorológicos máximos, medios y mínimos mensuales de la ciudad de Mexicali. Datos obtenidos del Sistema Meteorológico Nacional. Elaboración propia.

En este compendio de temperaturas normales, se logra apreciar la temperatura máxima, media y mínima, así como la neutra, de esta manera se puede comprender de mejor forma como se comportan alrededor del año. Por otro lado, la temperatura neutra muestra cual sería la temperatura ideal para cada uno de los meses, posteriormente se estará utilizando para la simulación termoenergética.

En consecuencia, nació el interés por realizar esta investigación sobre cómo se puede lograr adaptar la arquitectura existente en relación con el clima. En este caso específico, contemplar al sol como potencia y recurso natural, aprovecharlo al máximo y obtener un beneficio de él. Puesto que, en su mayoría las viviendas y edificios de la ciudad no tomaron en cuenta estas variables climatológicas para diseñar sus espacios. Dentro de la parte energética; menciona el Colegio de la Frontera Norte (S.f), 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. El consumo bruto de energía en Baja California aumentará a una tasa media

de crecimiento anual de 3.7%. Cada año se necesitará más energía para satisfacer las necesidades de la ciudadanía. (Colegio de la frontera norte, (S.f).

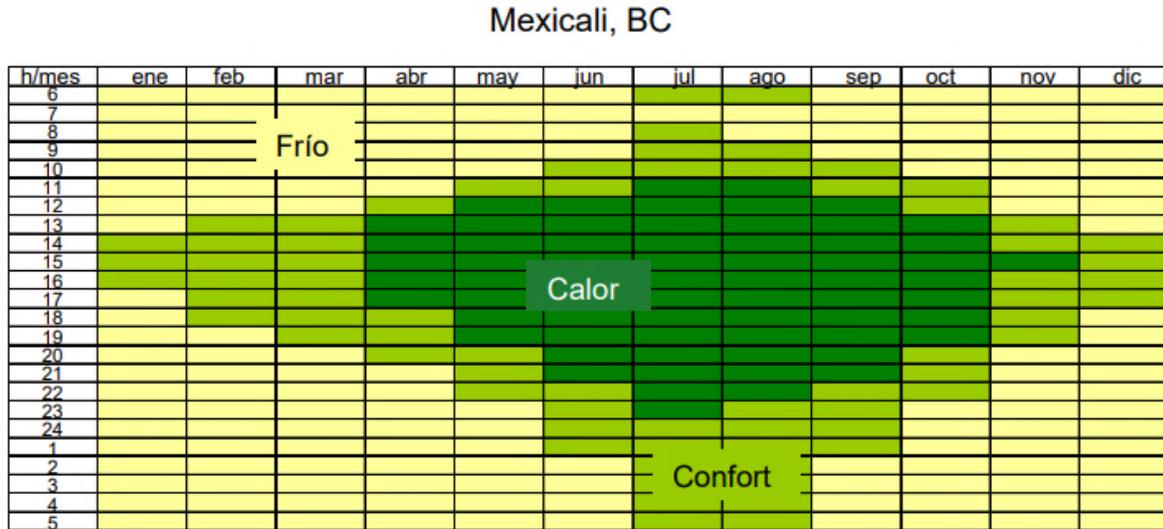


Figura 2. Isorrequerimientos de climatización para Mexicali. Morillón, D. (2004). Atlas del Bioclima en México. Universidad Nacional Autónoma de México.

En el libro Atlas de la Ventilación Natural para la República Mexicana, menciona el Dr. Morillón (2004), que los vientos dominantes, son descendentes en verano, del oeste en invierno y perturbaciones extra tropicales en invierno. Además, hace alusión a las horas de confort al día (Figura 2). Obteniendo un panorama general de las horas de frío, calor y confort, mayormente o hace frío o hace calor, el balance que muestra el diagrama de Isorrequerimientos de climatización necesita de alguna estrategia para ganar más horas de confort en cualquiera de los meses.

2.1.9 Radiación solar

La radiación solar es la energía recibida del sol en forma de ondas electromagnéticas que permite la transferencia de energía solar al planeta. La irradiación del sol es variable de acuerdo con la época del año, la hora del día, la altitud, y el clima. En México la irradiación con los niveles más altos ocurre en la zona Norte y sobre las vertientes del Golfo de México por efecto de los sistemas frontales. En el periodo comprendido entre enero y abril ocurre un aumento de la irradiación global en toda la República Mexicana,

que es mayor en la parte noreste. En el verano nuevamente la irradiación máxima ocurre en el noreste y en la península de Baja California. (Natura EST, 2019). Mexicali está en una de las zonas de mayor radiación solar en México, con valores promedio diario desde los 5.3 hasta 5.8 kWh/m²/día (Vega, 2015). (Ver Ilustración 6).

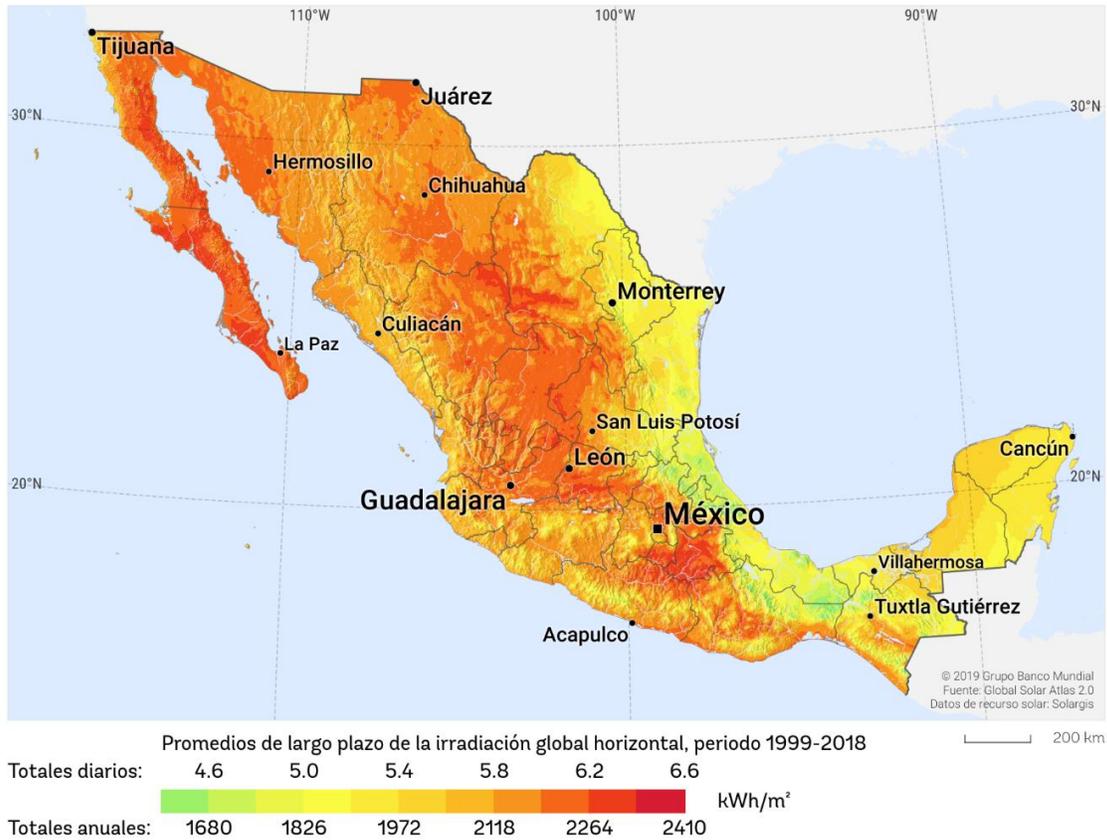


Ilustración 5. Mapa de irradiación global horizontal de México. Global Solar Atlas 2.0.

Por otro lado, tomando los datos del archivo meteorológico que se utilizó para la simulación se logran obtener los datos de radiación solar de la zona de estudio, dando un mayor enfoque en la ciudad de Mexicali, Baja California. En el diagrama de la Ilustración 6, se puede apreciar que al amanecer comienza el aumento de radiación solar por la salida del sol.

RADIACIÓN SOLAR																								
DÍA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
15-ene	0	0	0	0	0	0	0	66	186	230	357	384	425	357	337	194	5	0	0	0	0	0	0	0
24-feb	0	0	0	0	0	0	10	195	397	582	715	784	776	697	559	375	169	5	0	0	0	0	0	0
30-mar	0	0	0	0	0	1	121	318	468	627	671	645	684	684	559	396	229	36	0	0	0	0	0	0
27-abr	0	0	0	0	0	20	186	356	505	629	685	727	703	645	530	399	231	82	1	0	0	0	0	0
5-may	0	0	0	0	0	76	262	476	671	825	924	967	946	871	735	546	333	130	2	0	0	0	0	0
10-jun	0	0	0	0	2	110	276	464	621	721	766	835	859	802	689	521	360	168	10	0	0	0	0	0
10-jul	0	0	0	0	0	59	181	244	382	547	577	516	574	468	479	439	303	171	47	0	0	0	0	0
2-ago	0	0	0	0	0	16	175	344	571	654	800	890	851	735	580	419	280	118	6	0	0	0	0	0
4-sep	0	0	0	0	0	7	175	384	557	689	784	831	796	726	604	431	247	71	0	0	0	0	0	0
16-oct	0	0	0	0	0	0	88	256	388	585	613	684	628	544	390	245	79	0	0	0	0	0	0	0
18-nov	0	0	0	0	0	0	10	179	360	513	613	637	603	510	358	175	8	0	0	0	0	0	0	0
10-dic	0	0	0	0	0	0	2	98	200	339	445	542	503	446	290	134	6	0	0	0	0	0	0	0

Ilustración 6. Diagrama de días típicos de radiación solar en la ciudad de Mexicali, B.C. Elaboración propia.

Además, el diagrama marca en colores las horas del día típico con mayor alcance de radiación solar, tornándose rojizas las horas con mayor potencia recibida a la superficie. El 5 de mayo a las 12:00 horas fue el día que se alcanzó la mayor radiación solar en la ciudad, percatándose los meses del verano aportan una

RADIACIÓN SOLAR																								
DÍA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
24-ene	0	0	0	0	0	0	1	93	329	316	451	540	210	323	309	149	35	0	0	0	0	0	0	0
18-feb	0	0	0	0	0	0	5	168	364	539	651	713	703	642	502	333	146	3	0	0	0	0	0	0
25-mar	0	0	0	0	0	0	98	283	465	637	734	747	736	682	578	412	219	25	0	0	0	0	0	0
6-abr	0	0	0	0	0	1	68	166	256	350	403	402	400	378	316	215	122	32	0	0	0	0	0	0
26-may	0	0	0	0	1	114	311	520	713	856	946	992	980	901	766	589	382	175	8	0	0	0	0	0
30-jun	0	0	0	0	1	99	290	432	612	768	757	863	765	720	599	387	249	139	3	0	0	0	0	0
20-jul	0	0	0	0	0	79	258	457	635	796	883	938	926	849	714	555	362	170	9	0	0	0	0	0
7-ago	0	0	0	0	0	24	218	420	614	772	889	934	917	852	737	559	355	154	5	0	0	0	0	0
8-sep	0	0	0	0	0	7	179	394	601	760	870	907	883	793	642	450	238	23	0	0	0	0	0	0
5-oct	0	0	0	0	0	1	111	297	482	616	700	736	707	619	461	290	111	1	0	0	0	0	0	0
1-nov	0	0	0	0	0	0	19	161	292	380	444	470	448	373	261	124	4	0	0	0	0	0	0	0
20-dic	0	0	0	0	0	0	0	94	238	380	485	531	517	443	318	161	9	0	0	0	0	0	0	0

Ilustración 7. Diagrama de días de máximas de radiación solar en la ciudad de Mexicali, B.C. Elaboración propia.

mayor potencia. Recordando que estos días son típicos, es decir es el día de cada mes que más veces repitió los alcances de radiación solar. Por otro lado, se muestran los días de máximas, donde se puede apreciar que desde enero se llegan a máximas de 540 W/m² siendo este un mes frío donde la incidencia de radiación solar llega con ángulos de inclinación muy bajos. Los meses de mayo hasta septiembre mantienen potencias de 900 W/m² en sus máximas.

El análisis de una base de datos meteorológicos como este, ayuda a comprender de mejor forma la situación que puede llegar a vivir una localidad, puesto que a leer esta investigación el lector pueda tener contexto de las variables que conforman el clima, la geografía, hidrología, geología, fisiografía y hasta el tipo del suelo. Dos variables muy importantes dentro de este análisis es la temperatura y la radiación solar ya

que con base en estas se sustenta y justifica esta investigación, mostrando como el clima de la ciudad es muy árido, con escasas precipitaciones y temperatura por arriba de los 33°C en el mes más crítico. Ofrecer a la comunidad mexicalense una propuesta que ayude a mejorar las condiciones de confort térmico y eficiente el consumo energético es la forma en que esta investigación retribuye a la ciencia y la sociedad.

2.2 Antecedentes

Cabe mencionar que el sector de vivienda y edificios en general, están involucrados de forma importante en el consumo de energía eléctrica y por ende en la emisión de gases efecto invernadero. El consumo energético es bastante alto, debido al uso de sistemas de climatización artificial para lograr estar en confort. Conforme a esta situación, se han generado programas que proponen estrategias para frenar el alto consumo energético, algunos de ellos mencionados posteriormente.

2.2.1 Confort térmico y consumo energético

Dentro de la ciudad se han incorporado algunos desarrollos que buscan mitigar el alto consumo energético mediante estrategias de diseño pasivo y activo, como paneles solares, sustitución de equipos de aire acondicionado y refrigeradores obsoletos por de alta eficiencia, construcciones con materiales altamente térmicos y aislantes, etc.

2.2.1.1 El Programa Ahorro Sistemático Integral (ASI)

Menciona la Guía CONAFOVI: uso eficiente de la energía en la vivienda (2006), que el programa ASI es un fideicomiso para ahorro de energía eléctrica creado para apoyar a los usuarios que utilizan la tarifa doméstica de la CFE, cuyo objetivo principal es promover y facilitar la disminución del consumo de energía eléctrica. Siendo este su objetivo principal. El Programa ASI surgió en 1990 en Mexicali, Baja California. Inició con el programa de aislamiento térmico y, años más tarde, se le dio continuidad con los programas de sustitución de aires acondicionados y refrigeradores de baja eficiencia por equipos de alta eficiencia. En la zona noroeste, el programa inició en junio del 2002

con los programas de aislamiento térmico y sustitución de aire acondicionado, y actualmente se desarrolla el programa de sustitución de refrigeradores. (p. 78).



Figura 3. Fotografía de Mexicali, B.C. Autor desconocido, tomada de Google Imágenes.

El Programa ASI nace de la necesidad que tiene la ciudad ante el consumo energético, por ende, el gobierno federal impulsa programas que ayuden a mitigar la alta demanda de energía eléctrica en el país, priorizando proyectos que representen una inversión productiva y generar una cultura de ahorro en los usuarios de CFE. (CONAFOVI, 2006).

De igual forma menciona la Guía CONAFOVI (2006) que, este programa brinda un diagnóstico energético, que no es más que, un estudio gratuito de asesoramiento de un especialista del Programa ASI, el cual le informará y aconsejará sobre las soluciones de aislamiento térmico, tonelaje y tipo de aire acondicionado que mejor se adecuen a las características de la vivienda, determinando la solución más conveniente de ahorro de energía en el hogar. (p. 78).

De 2007 a 2010 se incrementaron de manera muy significativa las acciones realizadas de cada uno de los subprogramas del programa ASI, lo cual mostró la buena respuesta de los usuarios del servicio eléctrico mexicalense hacia los programas de ahorro y uso eficiente de energía (Tabla 13).

Año	Viviendas aisladas	Refrigeradores sustituidos	Unidades tipo central	Unidades tipo ventana o mini split
2007	2747	25	12	20
2008	2442	264	159	1002
2009	2649	1247	143	5562
2010	3714	2622	279	13255

Tabla 13. Historial de acciones de aislamiento térmico, refrigeradores, aire acondicionado central y aire acondicionado de tipo ventana o mini Split realizadas por parte del programa ASI en Mexicali, B.C. Programa ASI, 2010.

Cabe mencionar que, el implemento de este programa en la ciudad de Mexicali sigue vigente, y en relación con la investigación que se desarrolla en el presente documento, este busca disminuir la demanda de energética por uso de climatización artificial, aunque su enfoque va dirigido a la vivienda.

2.2.1.2 Programa Vivienda Sustentable de CONAVI

En 2006, se desarrolla el proyecto piloto La vivienda Sustentable, en el cual se considera la construcción de 5000 viviendas por parte de la CONAVI a través del Instituto de Ingeniería, UNAM, incorporando la iniciativa privada con constructoras, en ciudades como Monterrey, Mexicali, Querétaro, Hermosillo, Nuevo Laredo y Acapulco. Las partes del proyecto son las prioridades ambientales, las líneas estratégicas y las acciones. Entre las prioridades ambientales se pretende el uso y aprovechamiento sustentable del agua y la energía; el incremento de áreas verdes en los conjuntos; el manejo integral de los residuos sólidos urbanos y el mejoramiento de los espacios habitables de la vivienda mediante el diseño bioclimático y la aplicación de ecotécnicas (Morillón, 2015). Además, este proyecto busca no solo diseñar y construir una vivienda sustentable sino la capacitación y educación, la información y difusión de este tipo de estrategias, está enfocado a la investigación y transferencia de tecnología. Buscando así, crear nuevas oportunidades en climas cálido-seco, cálido-seco extremoso, templado y cálido húmedo.

Constructora/ciudad	No. De viviendas	Ahorro energía (kwh)	Ahorro en facturación (\$)	Reducción de emisiones de co2
Bracsa: Acapulco	62	151,900.00	288,610.00	104.78
Urbi: Mexicali, Hermosillo, Cd. Juárez	4476	3,811,761.60	7,337,641.08	2,685.60
Pulte: Querétaro	45	82,708.20	159,213.15	58.05
Estado de Nuevo León	56	102,925.76	198,131.92	72.24
Estado de Tamaulipas	358	657,989.68	1,266,629.06	461.82
Total	4997	4,807,285.24	9,250,225.21	3,342.49

Tabla 14. Beneficios energéticos, económicos y ambientales anuales por las viviendas del proyecto piloto del programa Vivienda Sustentable de CONAVI.

Se puede observar en la Tabla 14, los beneficios estimados que se podrían obtener poniendo en práctica el diseño bioclimático en vivienda habitacional. Las acciones más relevantes en el uso de energía son los proyectos con diseño bioclimático (ventilación, iluminación y soleamiento); el empleo de materiales con aislamiento térmico; uso de ecotécnicas para la climatización; integración de sistemas ahorradores de energía en iluminación y luminarias, calentadores de agua con energía solar y celdas fotoeléctricas. (Morillón, 2011).

A pesar de que, únicamente se proyectó un pronóstico de lo que serían los resultados, se logró obtener que con tan solo 5,000 viviendas en un año se estaría ahorrando 4,807,2.85 kWh, así mismo reduciendo las emisiones de dióxido de carbono 3,342.49 Ton. Baste, como muestra el proyecto que incorporó estas estrategias y buscó la sustentabilidad energética, desarrollado en el mismo año, se realizó el fraccionamiento Misiones, un conjunto habitacional con más de 200 viviendas con generación de electricidad mediante sistemas fotovoltaicos.

2.2.1.3 Vecindario Fotovoltaico Valle de las Misiones Mexicali B.C.

En el 2006 también se lleva a cabo el primer proyecto experimental de vivienda con la integración de celdas fotovoltaicas de 1 kWp c/u para la cogeneración de energía, en un total de 220 viviendas económicas, además de aparatos eficientes y lámparas ahorradoras; dicho proyecto se localiza en la ciudad de Mexicali

B. C., en el fraccionamiento Valle de las Misiones. Entre los logros alcanzados en este programa se encuentra el ahorro del 50% de la facturación del usuario contado en el periodo que comprende de marzo del 2008 a enero del 2009, ver Figura 4. (Morillón, D., Ceballo, F. 2015).



Figura 4. Fotografía aérea del fraccionamiento valle de las misiones, obtenida de Vecindario Fotovoltaico en Valle de las Misiones Mexicali BC.

Por otra parte, el 12 de octubre de 2006 fueron entregadas las primeras viviendas con sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica, además de contar con aislamiento térmico, que les permite a sus habitantes, un mayor confort y ahorro de energía. A su vez, este ambicioso proyecto se realizó con fondos de la Secretaría de Economía, con ayuda de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. Por consiguiente, se busca continuar con el apoyo al proyecto fotovoltaico de Baja California, para propiciar el crecimiento de esta tecnología en todo el país, a través de un esquema de subsidios con el fin de que sea más accesible la instalación de los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red, y dar una solución de fondo a los altos pagos por consumo de energía eléctrica en el ámbito residencial de Mexicali y propiciar la mejora del medio ambiente. (Gobierno del Estado de Baja California, S.F).

Definitivamente, estos proyectos o desarrollos tienen un mismo enfoque. Aunque son diferentes proyectos sus objetivos van hacia donde mismo: disminuir el uso de energía, proponer estrategias sustentables para mejores espacios habitables y reducir el uso de aire acondicionado e implementar metodologías de diseño sostenible. Además, estos planteamientos buscan generar conciencia en la sociedad mexicalense, así como educación en el ámbito sustentable.

2.2.2 Trayectoria solar

A lo largo de los años la geometría solar se ha hecho participe en algunos edificios con el fin de explotar al máximo el recurso que proporciona el sol. Sin embargo, dentro de la ciudad de Mexicali hay escasas en propuestas de fachas con elementos de protección solar, los arquitectos y usuarios optan por encontrar una solución para no orientar edificios al sur, suroeste. ¿Qué pasa con los edificios que ya fueron construidos y no cuentan con los parámetros de confort para realizar actividades diarias? Ocurre que estos utilizan sistemas de climatización artificial para satisfacer las necesidades de confort térmico en el interior. Por ende, se integran una serie de proyectos con situaciones parecidas a las de la ciudad de Mexicali, donde el reto de estos fue generar condiciones habitables donde las fachadas o espacios de trabajo están expuestos a la radiación solar directa.

2.2.2.1 Le Corbusier, 1954

Como primer caso se tiene un ejemplo del aclamado arquitecto Le Corbusier, en 1954 construyó la sede de la organización de Ahmedabad ya que el presidente de la Asociación de los Propietarios de Mill pensó en el como primera opción para diseñar este recinto, en una ciudad históricamente activa en el comercio textil de la India. El diseño del edificio es una muestra de la arquitectura moderna en la india. El edificio es un manifiesto físico que representa una propuesta de arquitectura moderna de la India. (Jones, 2013).



Figura 5. Fotografía desde último tramo de escalera exterior hacia el interior. Mujeres realizando el lavado y secado de las telas junto al río. Fuente: Cemal Edmen. Divisare Books.

Le Corbusier comenzó a trabajar principalmente en ambientes más cálidos, desarrolló un conjunto de dispositivos arquitectónicos en respuesta a los diferentes contextos climáticos y culturales. Dio señales de la lengua vernácula de la India, emulando las profundas revelaciones, las repisas, las persianas, y los grandes pilares de los vestíbulos. Introdujo brises-Soleil, diseñadas para evitar que el sol penetrara en la fachada, y las complementó combinándolas con fachadas engrosadas y hormigón inconcluso en muchos de sus proyectos posteriores. Rodeado de un amplio espacio abierto, el edificio no se vio obligado a enfrentarse a un tejido urbano existente, lo que permitió que el arquitecto propusiera una estética claramente moderna. (Jones, 2013).

Para entender el funcionamiento del *Brise-Soleil*, así como sus distintas posibilidades, es preciso describir brevemente el Asoleamiento. Este concepto define el estudio de la incidencia solar en un ambiente interior con el fin de encontrar el confort higrotérmico de dicho espacio. 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 (trayectoria horizontal) y ángulo solar (trayectoria vertical). (Hidden Architecture, 2021).

Comenta Jones Rennie en "Clásicos de Arquitectura: Edificio de la Asociación de Propietarios de Mill Le Corbusier" (2013), el edificio en cuestión se encuentra entre la calle Ashram hacia el oeste y el río Sabarmati al este. Las paredes laterales, al norte y al sur, son casi totalmente blancas y se enfrentan a la piedra en bruto con un exterior de ladrillo. Las brises-Soleil en la fachada oeste están orientadas en diagonal para obstruir las vistas desde la calle, mientras que permiten que el aire y la luz solar indirecta ingresen al interior del espacio. Las plantas se derraman desde la fachada porosa, activando el hormigón a la vista y que se completan con el jardín de la azotea. En la parte trasera del edificio, las brises-soleil son perpendiculares a la fachada, lo que permite que la brisa del río corra sin inhibiciones a través del perímetro de la sombra. Aquí, Le Corbusier diseñó las aberturas para enmarcar vistas al río.

“La situación del edificio en un jardín que domina el río proporciona un pintoresco espectáculo de lavado y secado de la tela de algodón en la cama de arena en compañía de garzas, vacas, búfalos y asnos medio sumergidos en el agua para mantenerse frescos. Tal panorama era una invitación ... para enmarcar las vistas de cada piso del edificio” - Le Corbusier



Figura 6. Fachada con los Brise-soleil del edificio. Fuente: Cemal Edmen. Divisare Books.

Así mismo también menciona Ronnie Jones (2013) en su artículo, que el edificio fue un cambio un tanto radical en el estilo de arquitectura de Le Corbusier, ya que combinó la rigidez de la villa Savoye con formas orgánicas de Ronchamp, dejando una fachada libre de estructuras como el mismo lo dice en sus cinco puntos, de este modo alejándose de sus anteriores trabajos y tomando para este proyecto las condiciones del sitio. La planta rectilínea y la grilla expresadas en el soporte exterior del edificio están en contraste con los espacios interiores, que se caracterizan por volúmenes convexos y cóncavos. Cuando uno se mueve a través del espacio intersticial, la intersección de los planos ortogonales y curvilíneos crean una experiencia de compresión y liberación. Una sala de conferencias rodeada por un muro curvo de ladrillo con paneles de chapa de madera se extiende desde el segundo piso hasta el techo.

Se trata de entender mediante las técnicas e inquietudes actuales por la sostenibilidad, la manera de relacionar la arquitectura con el clima, para conseguir el confort interior con recursos bioclimáticos pasivos.

(Ruiz, 2012). Como menciona Requena Ruiz, el fin de darle tanta importancia al análisis del clima del sitio es para generar proyectos arquitectónicos con espacios funcionales y condiciones óptimas de confort. El arquitecto Le Corbusier analizó la proyección estereográfica para la ubicación de este edificio, proyectó los espacios con relación a la incidencia solar y zonificó contemplando como llegaban los rayos al interior del edificio. Este es un proyecto antiguo, pero bien ejecutado que desde sus bosquejos se diseñó contemplando el contexto ambiental del sitio, así como las condiciones climatológicas.

2.2.2.2 Marcelo y Milton Roberto, 1936

Otro mítico edificio que hace uso de la geometría solar es el de los arquitectos Marcelo y Milton Roberto, que diseñado bajo los parámetros de Brise-Soleil bajo las influencias de Le Corbusier construyeron este emblemático edificio en Brasil, llamado la Sede de la Asociación Brasileña de Prensa (ABI).

La nueva Sede de la Associação Brasileira de Imprensa (ABI), menciona Hidden Architecture (2021), se encuentra en un solar en esquina con orientación Norte y Oeste. El proyecto de los Hermanos Roberto seguía a la perfección los cinco puntos de la arquitectura moderna, publicados por Le Corbusier y Pierre Jeanneret en 1927: el edificio se apoya sobre pilotis, abriendo parcialmente la planta baja a la calle; la planta libre se repite en todos sus niveles, modificando la organización interna en cada piso; la cubierta se ajardina con plantas tropicales brasileñas; la fachada se separa de la estructura permitiendo que su composición no sea dependiente de su sistema; y se crean ventanas horizontales que atraviesan toda la fachada a lo largo de toda su longitud. Sin embargo, estas ventanas, desde la planta segunda hasta la octava se protegen con un sistema de Brise-Soleil vertical.

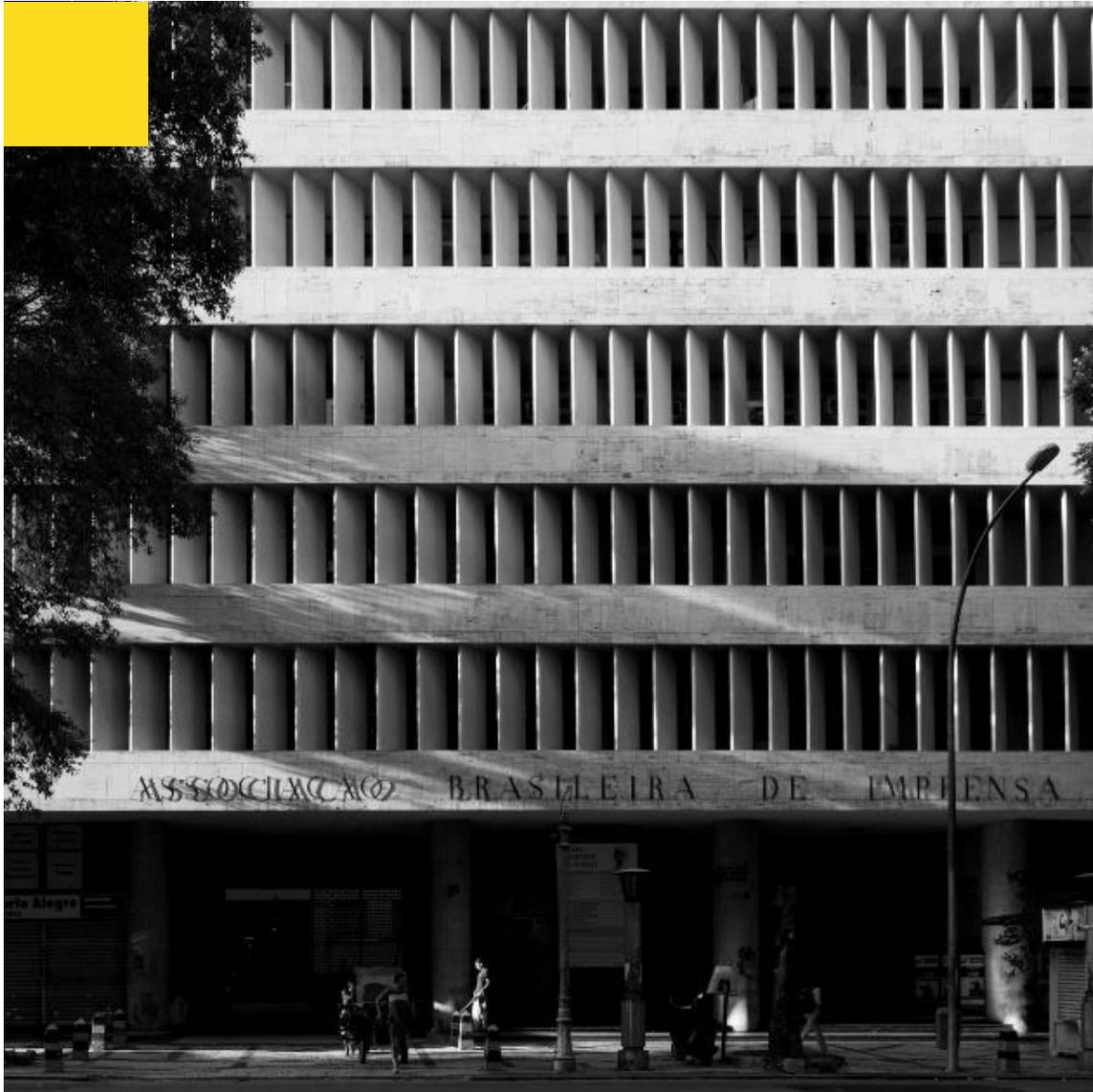
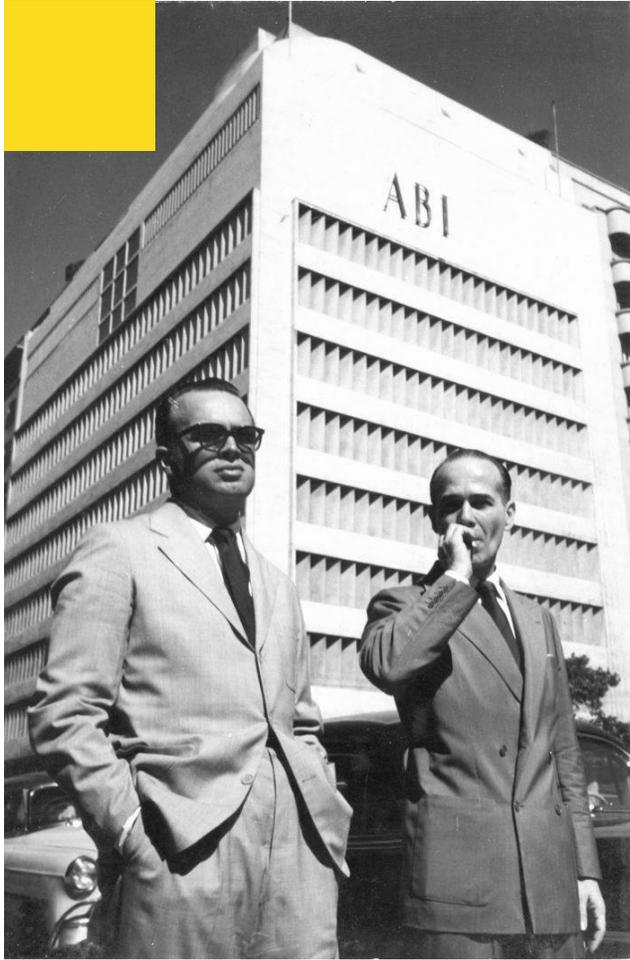


Figura 7. Fachada principal de la sede ABI. Fotografía: Hidden Architecture, 2021.

Uno de los problemas que se enfrentó el edificio fue el desconocimiento de los hermanos Roberto, ya que por no conocer la metodología que utiliza para el desarrollo de elementos de protección solar diseñado en base a la geometría solar, repitieron el mismo patrón de elementos para norte y oeste, dando como resultado un fallo en una de las fachadas.



Una vez terminado el proyecto se encontró que, en la fachada oeste, el sistema funciona de forma correcta, ya que los rayos del sol alcanzaban la fachada principal del edificio horizontalmente al atardecer y los paneles verticales protegían el interior de los rayos directos del sol. Por otro lado, en la fachada norte los paneles en sentido vertical no funcionaron de la mejor forma, o al menos, no con la misma densidad de ocupación que en la fachada oeste. En este caso, un sistema de lamas horizontales hubiera protegido de la incidencia solar con mayor efectividad. Hidden Architecture (2021).

*Figura 8. Fachada principal de la sede ABI. Hermanos Roberto.
Fotografía: Hidden Architecture, 2021.*

Es importante analizar cada una de las fachadas de las cuales se vaya a diseñar un elemento de protección solar, siendo siempre la/las que tengan mayor incidencia solar. En el caso de la ciudad de Mexicali, la fachada sur y suroeste son las más afectadas durante todo el año por la radiación solar, para fines de la investigación únicamente se estará analizando la fachada sur. Este es un claro ejemplo de desconocer el funcionamiento de la geometría solar, su metodología y su aplicación dentro de la arquitectura.

2.2.2.3 Juvenal Moya, 1946

para este proyecto el arquitecto Moya diseña un sistema de doble fachada para dar solución a la problemática de incidencia de radiación solar y de iluminación en los espacios que conformarían el edificio., tomando como primer factor el cuidadoso análisis del lugar y del trazado de la carta solar, anticipándose a soluciones pioneras en el campo de la técnica y la espacialidad arquitectónica. (Galindo, Osuna y Marulanda, 2019).

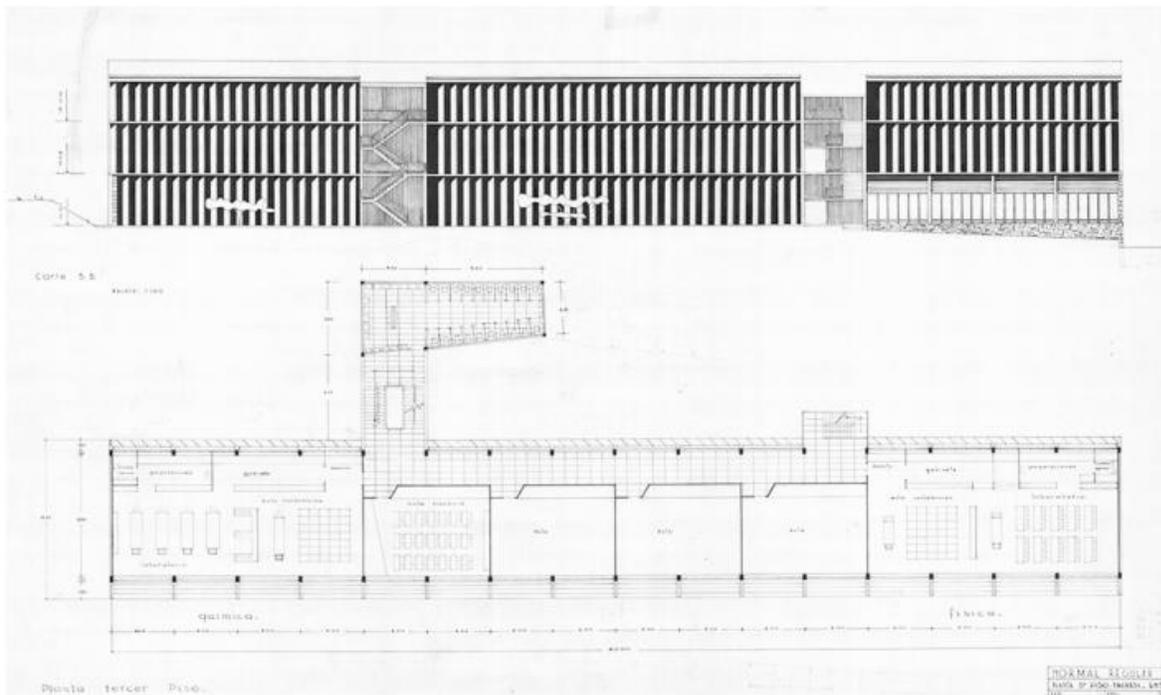


Figura 9. Planta del piso 3 y fachada suroeste. Fuente: Archivo General de la Nación-Fondo Inviás (1945), Sig. -1, 17, 22, 45-222.

De igual forma comentan Galindo, Osuna y Marulanda (2019) en el documento, “De componer la fachada a diseñar la envolvente”, que en los dos pisos altos de la fachada norte aparecen los Brise-Soleil (Figura 9), (que Moya llama celosía vertical) de 1,3 m de profundidad y situados sobre los ejes estructurales, de tal manera que se apoyan directamente sobre las vigas del entrepiso, que, a su vez, se prolongan en voladizo hacia el exterior; ellos están separados 25 cm de la cara de las columnas, y permiten así la circulación del aire por entre los módulos. Entre esas mismas vigas en

voladizo, Juvenal Moya dispone de 3 lamas verticales fijas que acentúan la sensación de profundidad de toda la envolvente, buscando así interrumpir el paso de la radiación solar directa a los espacios interiores, muy a pesar de que deja antepecho en las ventanas de solo 90 cm de altura. El Brise-Soleil no es aquí de hormigón. Se trata de láminas de fibrocemento de la marca Eternit, de 10 cm de espesor, que el propio Moya representa a través de una perspectiva en el margen de uno de sus planos, a mano alzada, aunque sin hacer un detalle del sistema de fijación. Sin embargo, esta fue la primera versión la cual no fue construida, se emplearon Brise-Soleil en las plantas de los pisos 2 y 3 en la primera versión ellos aparecen girados 45° respecto al plano del edificio, opuestos al sol de la tarde, y generan una envolvente de 80 cm de profundidad, con una separación horizontal de 1 m entre las hojas que apoyan sus extremos verticales sobre una visera que se prolonga desde las placas de entrepiso. (Figura 10).

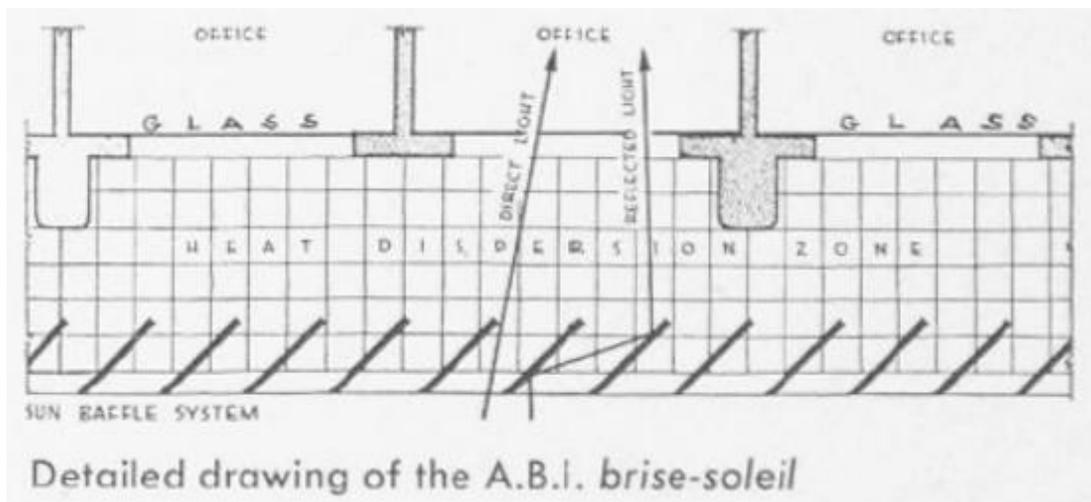


Figura 10. Explicación de los A brise-Soleil en el edificio de la Asociación Brasileña de Prensa. Fuente: Goodwin (1943, p. 87).

Esta solución resultaba bastante buena para el edificio, se desconoce porque no se construyó, finalmente se ejecutó una celosía a base de una retícula, pero no es todo el edificio.

Resulta interesante como el arquitecto analizó la trayectoria solar del predio y ubicó el edificio con relación a esta y a las condiciones climáticas del sitio. Es por esto por lo que, aunque el proyecto no se construyó como se diseñó, se logró conceptualizar una propuesta que da respuesta a una problemática que se predijo desde el inicio. Es una variable del anteproyecto que constantemente no se toma en cuenta al diseñar espacios. Baste como muestra, en la mayoría de los casos que se utiliza algún elemento de protección solar en México se hace por mera estética. Las empresas dedicadas a la producción, venta e instalación de lamas, parasoles, persianas venecianas, etc. no tienen idea del proceso para diseñar un elemento de este tipo, y por lo general integran soluciones estándares para cada uno de sus proyectos, sin importar la ubicación, la orientación y el clima. En internet existen variedad de ejemplos de protecciones solares mal ejecutadas, se logran ver como celosías para cubrir escaleras, para darle vista al pretil de una fachada o para cerrar superficies acristaladas. Con el único fin de verse estético.

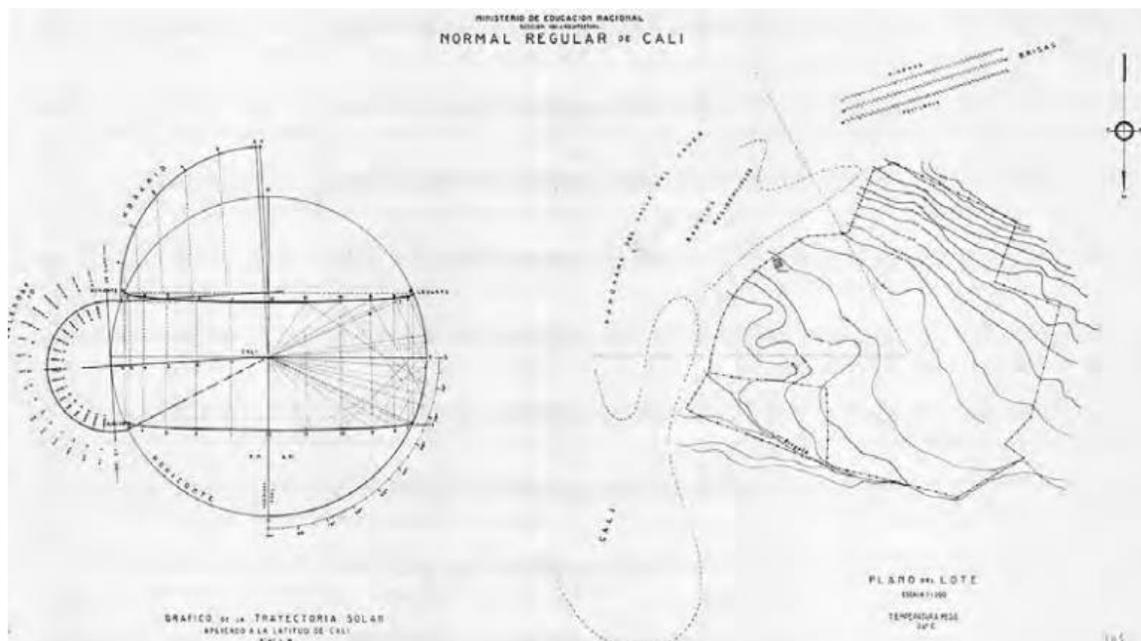
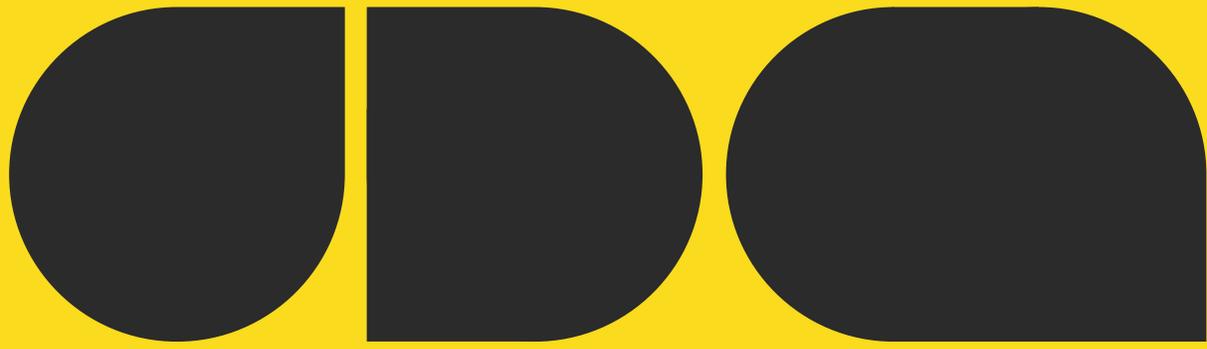


Figura 11. Carta solar y localización del predio. Fuente: Archivo General de la Nación-Fondo Invías (1945), Sig. -1, 04, 24, 06-145.



Análisis del Caso Estudio

Es importante mencionar que el caso base en estudio en la investigación se eligió por factibilidad y la situación crítica con la que cuenta, pero la transferibilidad de los elementos de protección solar puede ser aplicada a diferentes casos que cuenten con la misma situación, es decir; orientación al sur en una latitud de 32.59° N y la que la fachada sea susceptible a la incidencia de radiación solar.

3.1 Ubicación geográfica: caso estudio

El predio se ubica en la ciudad de Mexicali, Baja California, México. Con una latitud de 32.59° y una longitud de 115.49°, la fachada principal está orientada al sur. Con base a el Compendio de Información Geográfica Municipal de Mexicali por el INEGI, se conoce que la altitud va entre -3 y 1 900m, teniendo 4m para el caso estudio.

3.2 Características físico ambiental

El prototipo estudiado, es una representación de un modelo típico de arquitectura mal emplazada. La aplicación práctica de la arquitectura actual, con frecuencia omite la consideración de las condiciones climáticas del lugar y las características termofísicas de los materiales de construcción, por lo que se hace necesario el uso de sistemas de climatización artificial para generar condiciones de confort térmico en los espacios. (Luna, A. 2011). Este tipo de proyectos, en particular son por parte del gobierno, ya que se generan en serie y se envían a diferentes ciudades del país. Mismos que son construidos sin importar la orientación del edificio, las condiciones climáticas del sitio, así como los materiales y áreas de superficies acristaladas.

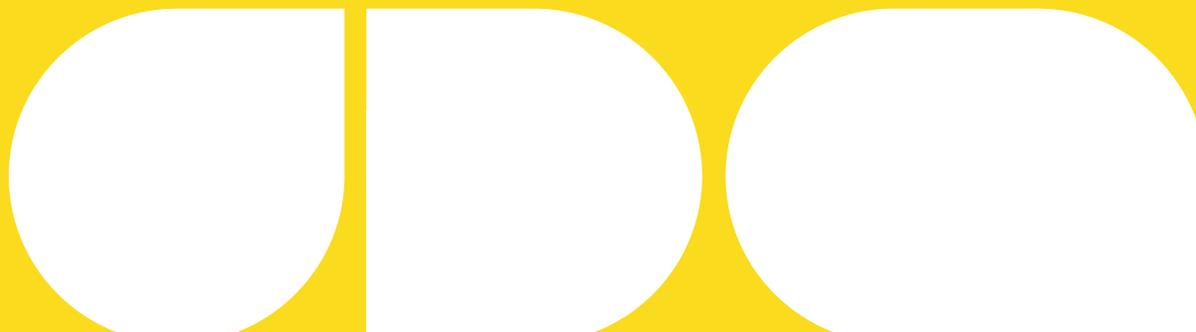




Figura 12. Fachada principal del caso estudio. Fotografía propia.

Este tipo de proyectos se generan en serie y se mandan a diferentes localidades. Así mismo, en las siguientes imágenes se puede apreciar la similitud entre los edificios, son prácticamente idénticos, surgen algunas variaciones dependiendo del terreno, estacionamiento y cerca perimetral. Pero las proporciones y los materiales de la fachada principal siguen manteniéndose igual. Estas imágenes fueron rescatadas de un post en Twitter de diferentes usuarios, haciendo énfasis en cómo estos proyectos no tienen fundamento de ser y muchos de ellos ni siquiera están en funcionamiento.



Figura 13. Banco del Bienestar. Fuente: autor desconocido.



Figura 14. Banco del Bienestar. Fuente: autor desconocido.



Figura 15. Banco del Bienestar. Fuente: autor desconocido.



Figura 16. Banco del Bienestar. Fuente: autor desconocido.

El edificio es un proyecto prioritario del Gobierno Federal, que busca promover el acceso de la población vulnerable a servicios financieros, facilitar la dispersión de apoyos económicos del gobierno, y asegurar el acceso de la población mexicana a las remesas. (INCO, 2022). Así mismo, el proyecto se desarrolló en una colonia de Mexicali, donde la fachada principal fue orientada al sur de la ciudad, dejando esta con una superficie acristalada de paño a paño y de piso a techo. (Imagen 12). Desafortunadamente, no se consideró ninguna estrategia de diseño pasivo como solución ante dicha problemática. El confort térmico dentro del espacio es regulado mediante climatización artificial. Ya que se instaló un equipo de aire acondicionado que está en función desde la mañana hasta la tarde, con el fin de minimizar la ganancia de calor que se filtra por las áreas acristaladas, según lo que comentan los trabajadores.

3.3 Planos del proyecto

El proyecto consta de diferentes áreas que conforman el edificio, entre ellas: sala de espera, área de caja, caja fuerte, comedor y baño. Dando un total de 94 metros cuadrados de construcción en un solo nivel (Figura 17).

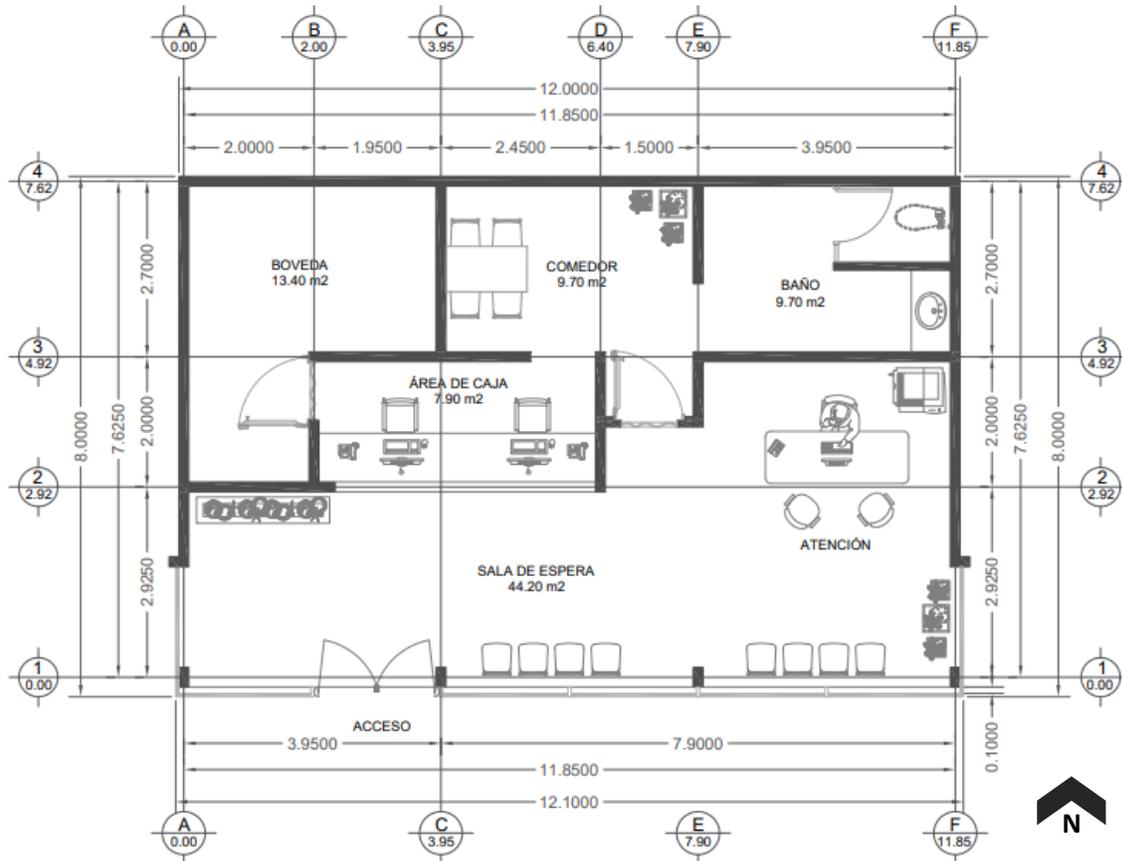


Figura 17. Distribución espacial de planta arquitectónica de caso estudio. Elaboración propia.

“Construir un caso significa justificar su elección para servir como plataforma de investigación”

– (Coller, 2005).

El caso de estudio es un prototipo de una edificación orientada al sur con superficies de paño a paño en vidrio. El área de superficie total acristalada es de 43.20 m².

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

Tabla 15. Áreas de muro y ventana de caso estudio. Elaboración propia.

Estos espacios tienen áreas considerables y por la altura del edificio se perciben áreas bastante amplias. Como se aprecia en la Figura 17, el área de acceso, atención y servicio al cliente son las áreas más perceptibles a la radiación solar que llega de manera directa a la fachada principal del edificio. Este tipo de proyectos regularmente se realizan a base de bloque de concreto los muros exteriores o perimetrales, dejando los muros interiores de material ligero, como Tablaroca. 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.

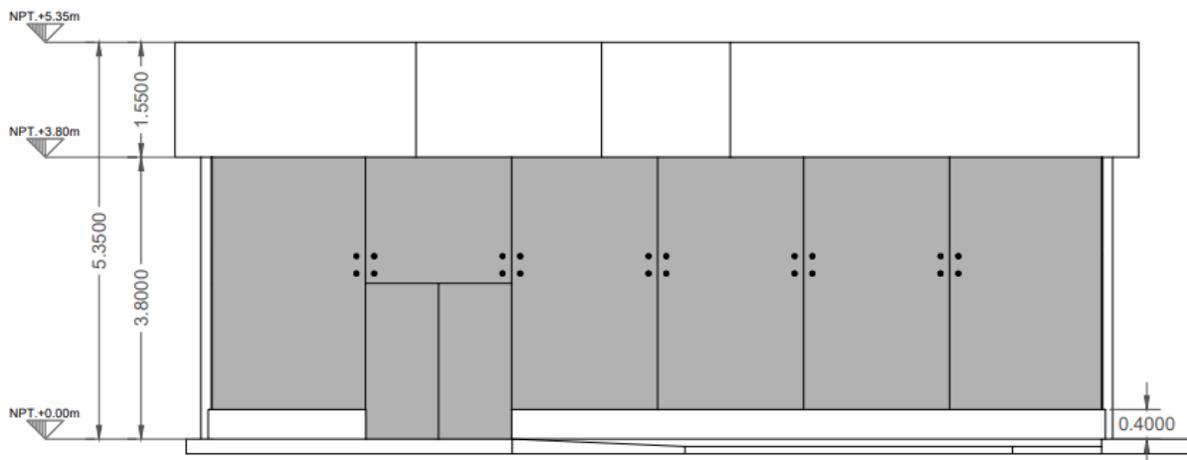


Figura 18. Fachada principal de caso estudio (Sur). Elaboración propia.

consiste en bloques 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. Además, se implementó Tablaroca con fibra de

vidrio para los muros interiores. Está conformado por dos hojas de cartón de yeso de $\frac{1}{2}$ " , las cuales se soportan por una estructura a base de canaleta de acero de 4" (0.1016m) de ancho, en el espacio libre generado entre estas se coloca fibra de vidrio R-11 en paneles, recubierto con una capa de emplaste de 0.01m de yeso.

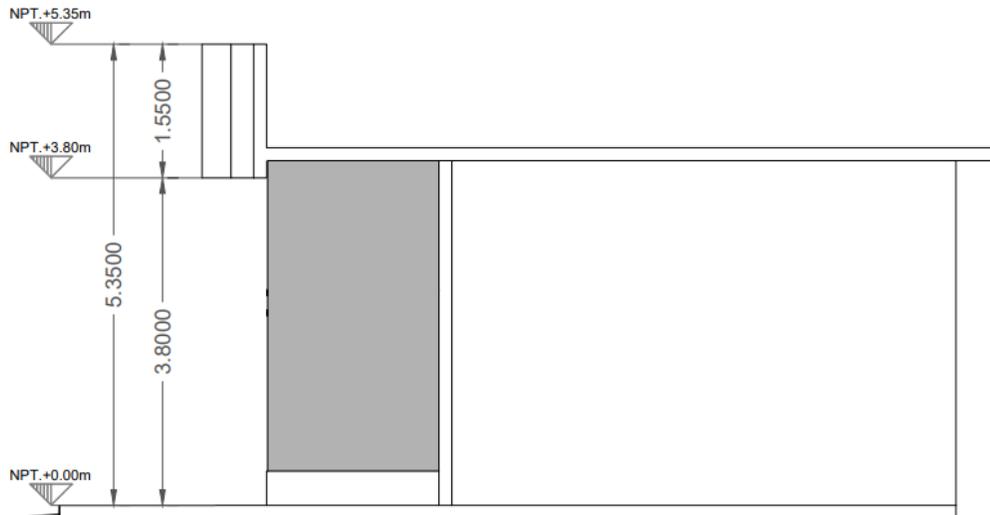


Figura 19. Fachada Norte caso estudio. Elaboración propia.

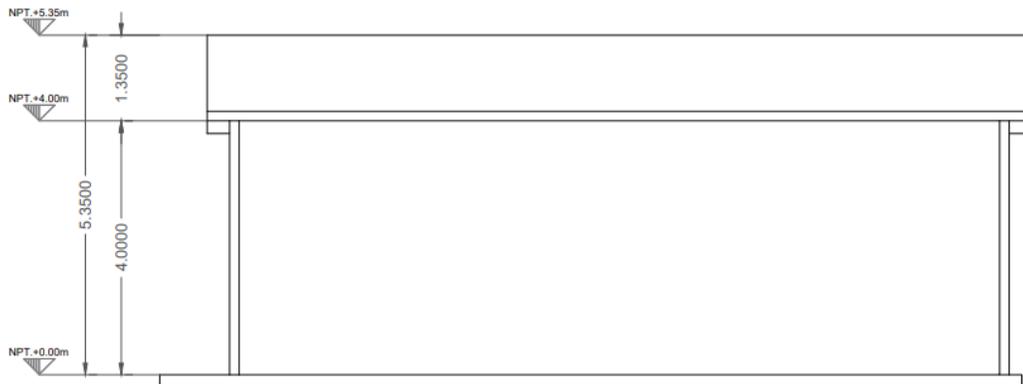


Figura 20. Fachada Oeste caso estudio. Elaboración propia.



Figura 21. Fachada Oeste caso estudio. Elaboración propia.

3.4 Propiedades termofísicas: caso estudio

En la Tabla 16 se muestran las características de los materiales de construcción, así como sus propiedades termofísicas. Como se mencionó anteriormente el proyecto fue construido de manera sistemática, integrando sistemas de construcción de fácil mano de obra, económicos y de alta rapidez. Es de suma importancia integrar esta información, ya que se empleó para la para la simulación que se realice del proyecto, además que son datos que comúnmente se desconocen del edificio, puesto que los programas de desarrollos de este tipo de proyectos no procuran mantener una relación entre la arquitectura y el contexto del clima del sitio.

Material	Conductividad térmica (w/m ² c)	Calor específico (j/kg ² c)	Densidad (kg/m ³)	Resistencia térmica (m ² c/w)	Espesor (m)
Losa					
Cartón arenado	---	---	---	0.058	0.0015
Brea	0.17	1000	1050	---	0.0015
Cartón negro	0.5	1000	1700	---	0.0015
Poliestireno expandido estándar	0.04	1400	15	---	0.0508
Losa de vigueta y casetón	0.269	1006	958	---	0.17
Yeso (interior)	0.42	837	1200	---	0.01
Coeficiente convectivo de transferencia de calor (unidades): interior: 6.130 exterior: 22.700					
Muros					

Bloque de concreto pesado, relleno parcialmente con concreto	1.01	837	1824	---	0.1
Mortero cemento arena (exterior)	1	1000	1800	---	0.01
Yeso (interior)	0.42	837	1200	---	0.01
Puertas					
Madera densa de puerta	0.15	1420	700	0.027	0.006
Capa de aire	---	---	---	0.015	0.03
Coeficiente convectivo de transferencia de calor (unidades): interior: 8.290 exterior: 22.700					
Ventanas					
Ventana con marco de aluminio con puente térmico, vidrio sencillo claro 9.5 mm de espesor ($u = 5.70$, $shgc=0.76$).					

Tabla 16. 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.

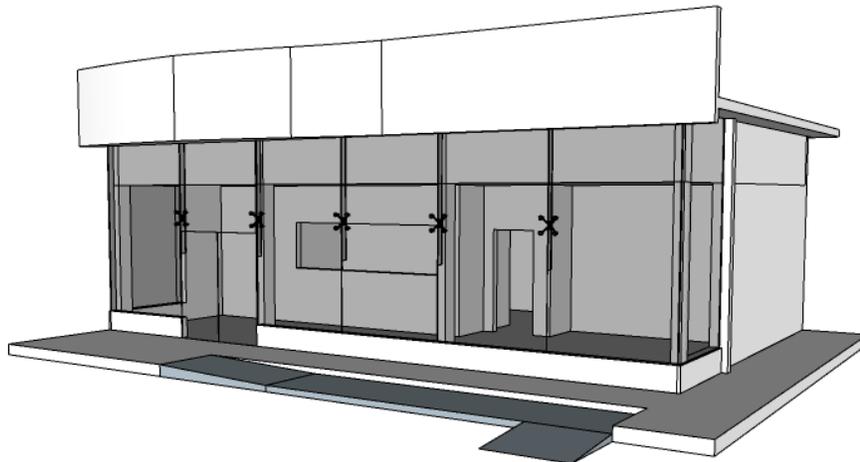


Figura 22. Perspectiva de caso estudio: fachada principal (Sur). Elaboración propia.



Figura 23. Compendio de fotografías del caso estudio. Elaboración propia.

04 Elemento de Protección solar

Dentro de este apartado se encuentran los diferentes métodos que se utilizaron para la composición del elemento de protección solar, desde el análisis de la trayectoria solar hasta las ideas iniciales. Se contrastan dos formas de obtener los ángulos solares para la apertura e inclinación del sistema de sombreado, primero es la proyección esférica de la carta solar, se utilizó como primer acercamiento a una propuesta de modelado, para constatar con la proyección estereográfica ya que por su método y validez resulta una mejor herramienta, ambas opciones dieron resultados muy parecidos y favorables para el diseño del sistema de sombreado.

Por otra parte, es importante mencionar que el concepto de los elementos de protección solar nace de los brise-soleil mejor conocidos como parasoles, elementos fijos en sentido horizontal o vertical que dan función al control solar. Como se mencionó anteriormente Le Corbusier fue uno de los primeros arquitectos de renombre en utilizar estos elementos para solucionar problemas del clima, en donde mediante la gráfica solar y el recorrido aparente del sol, encuentra la mejor forma y posición para orientarlos. Dedicó alrededor de 15 años en estudios de radiación solar para encontrar la mejor solución para estos dispositivos que rompieran con la radiación de incidencia solar, pero aprovecharla como luz difusa (Requena, 2009).

4.1 Análisis de la trayectoria solar

En cuanto a este tema, es necesario conocer el recorrido aparente del sol sobre la zona de estudio, ya que es un factor importante que debe considerarse en el diseño de cada construcción. Por ende, se hará una exhaustiva revisión y análisis de la proyección esférica y estereográfica. Indiscutiblemente la trayectoria solar es una vertiente del diseño bioclimático, la cual permite aprovechar mejor los recursos y reducir el consumo energético de las edificaciones. Además, incluir esta herramienta de proyección solar, permite analizar cómo se comporta el recorrido del sol en cualquier hora y día del año, para poder dar una mejor solución a cualquier proyecto.

Con el fin de aprovechar los recursos naturales, en beneficio de generar las condiciones óptimas de confort ambiental, nace el diseño bioclimático. Su aplicación en el orden contemporáneo promueve la sostenibilidad en procesos constructivos, así como en el control del consumo energético en edificaciones. Se evalúan y analizan los elementos naturales como la trayectoria solar en la arquitectura, lo cual permite crear proyectos viables con estructuras que utilicen la menor cantidad de energía no renovable posible (Echeverri, P. 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).

4.1.1 Proyección esférica: carta solar

Para comenzar con la propuesta se utilizó este método, haciendo pruebas de diseño en modelado 3D, aun que no tenga la misma validez que el de la proyección estereográfica sirvió como previo análisis. Se logró a través de un estudio de la trayectoria solar aparente, en donde se diseñó una esfera solar en el programa de AutoCAD 3D, tomando como principio el desarrollo de la geometría solar aplicada. De este modo, se partió de utilizar tres planos; solsticio verano, equinoccios y solsticio invierno (Figura 24).

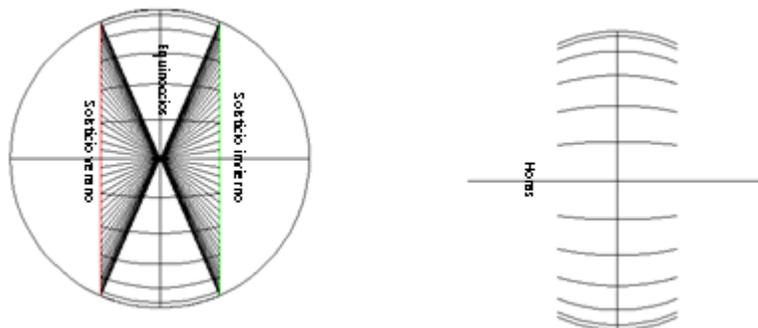


Figura 24. Proyección esférica de grafica solar. Elaboración propia.

Luego trazados estos parámetros, se rota en sentido norte – sur, agregando la conexión de horas entre las tres circunferencias (solsticio invierno, solsticio verano y equinoccios), recordando que esta gráfica solar esférica esta trabajada en tres dimensiones, pero por fines de representación se muestran en su forma ortogonal. Si se pudiera apreciar en tres dimensiones la línea color rojo simula el solsticio de verano, de igual forma pasa con los equinoccios (línea negra horizontal) y el solsticio de invierno (línea color verde horizontal) ver figura 25.

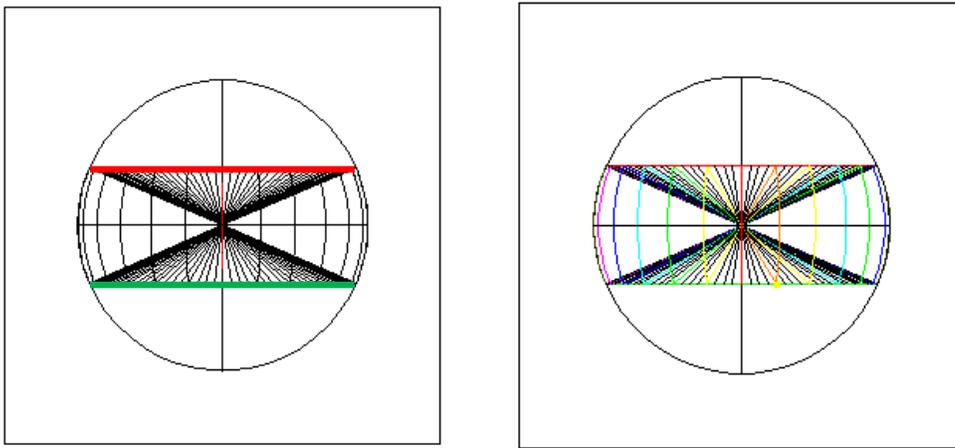


Figura 25. Proyección de trayectoria solar, en rotación a cero grados en el ecuador. Fuente propia.

Dicho lo anterior, se toma la esfera solar proyectada y se rota de norte a sur, con la inclinación de la latitud norte de la ciudad de Mexicali, en este caso sería 32.59°N . Con el fin de obtener los rayos aparentes del sol de forma directa en nuestra zona de estudio. Cabe mencionar que este proceso de dibujo fue aprendido por el Dr. Eduardo Vázquez Tepox de la Universidad Autónoma de Baja California. Es una forma de resolver la gráfica solar y llevarla a su forma tridimensional, como una bóveda celeste. Estas proyecciones están dadas a cada 15 minutos. Y aun que pueda existir margen de error, los resultados son bastantes sólidos al momento de diseñar mediante este tipo de geometría. A continuación, se ven los resultados del trazo final (Figura 26, 27).

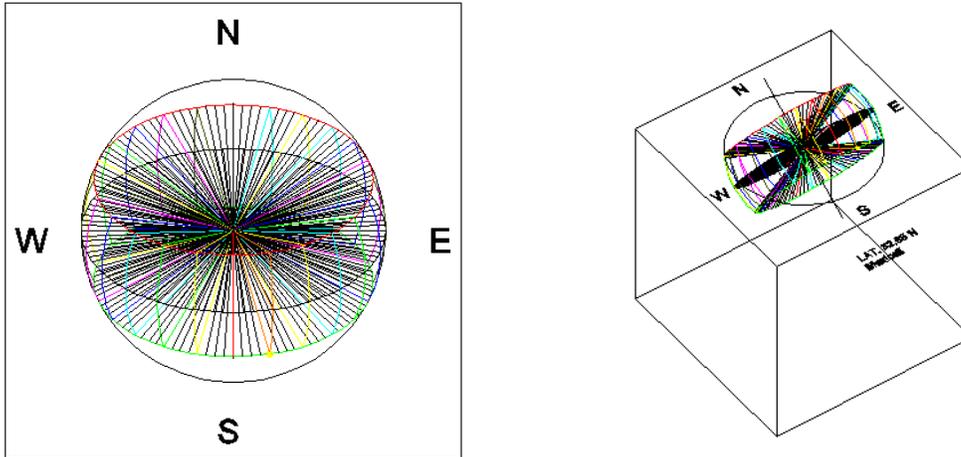


Figura 26. Proyección de trayectoria solar, esfera solar latitud 32.65 N. para Mexicali. Fuente propia.

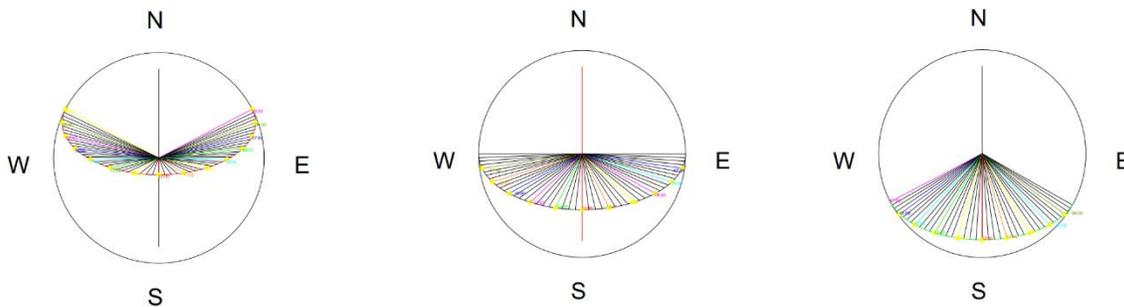


Figura 27. Trayectoria solar aparente: solsticio verano, equinoccios, solsticios invierno. Vista Ortogonal. Elaboración propia.

De esta manera se da el proceso de diseño de la envolvente arquitectónica para la fachada principal del proyecto, recordando que está orientada al sur y la radiación solar llega de manera directa todo el año. Por ende, se propone crear una protección a base de parasoles, diseñada en función de la trayectoria solar aparente (Figura 28).

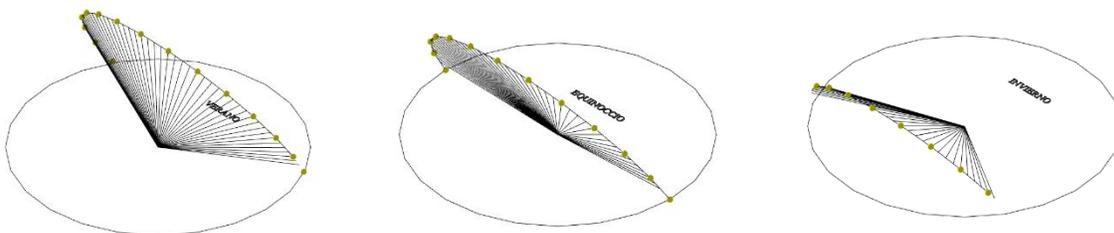


Figura 28. Trayectoria solar aparente: SV. EQ. SI. Vista isométrica. Elaboración propia.

Partiendo con el diseño de la propuesta, se ha colocado en el límite inferior de la superficie acristalada los ángulos tomados de los equinoccios (ver figura 29), estos obtenidos del anterior análisis que se realizó de la gráfica solar esférica.

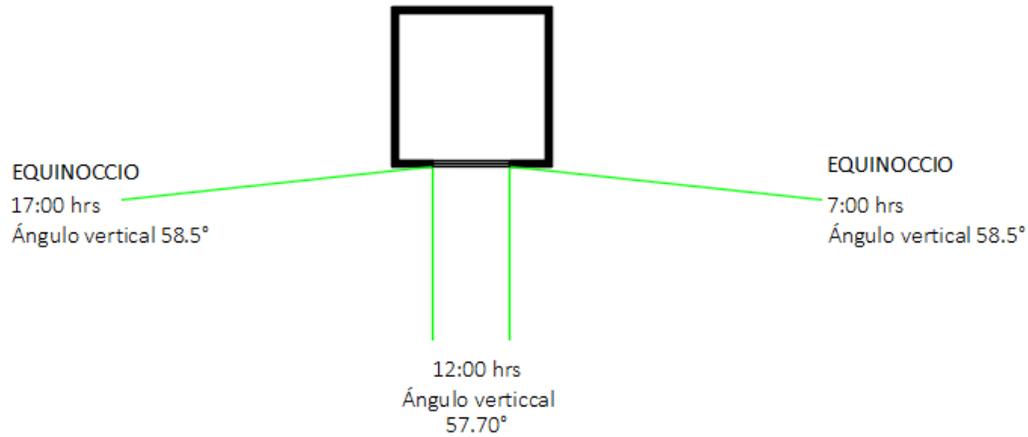


Figura 29. Diagrama de colocación de ángulos solares: Equinoccios. Elaboración propia.

Pasa en sentido similar con la aplicación de ángulos solares utilizados del solsticio de invierno, puesto que se busca que la incidencia entre al interior del espacio en los meses fríos, se toman como proyección los siguientes ángulos horarios (ver figura 30).

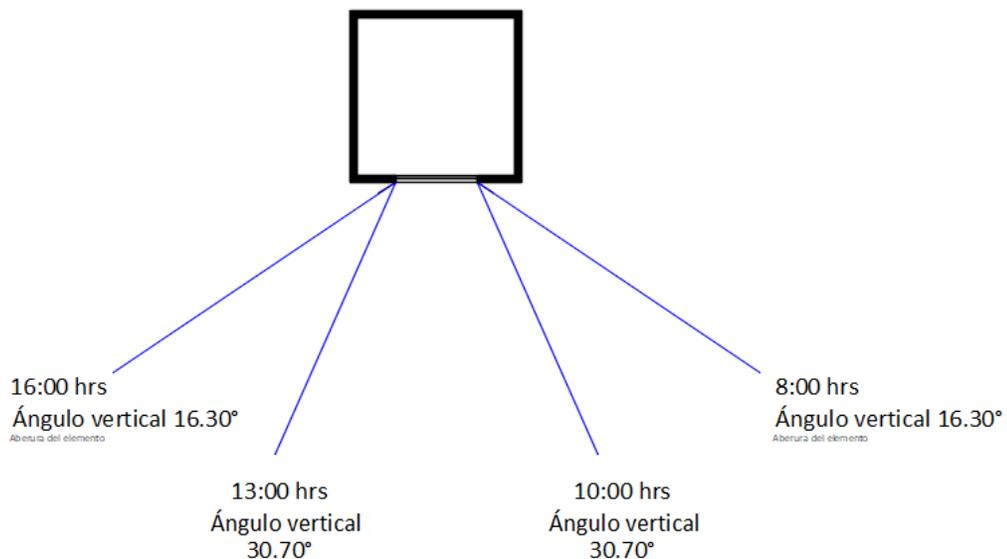


Figura 30. Diagrama de colocación de ángulos solares: Solsticio de invierno. Elaboración propia.

Por lo tanto, después del equinoccio de otoño la incidencia solar estaría entrando al interior del espacio generando una mejor zona de confort en los meses fríos que son, octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero. Para el 21 de marzo, en el equinoccio de primavera la protección solar comenzaría a bloquear los rayos solares de los meses cálidos, comenzando este mes y así sucesivamente los meses restantes del año hasta llegar nuevamente al equinoccio de otoño.

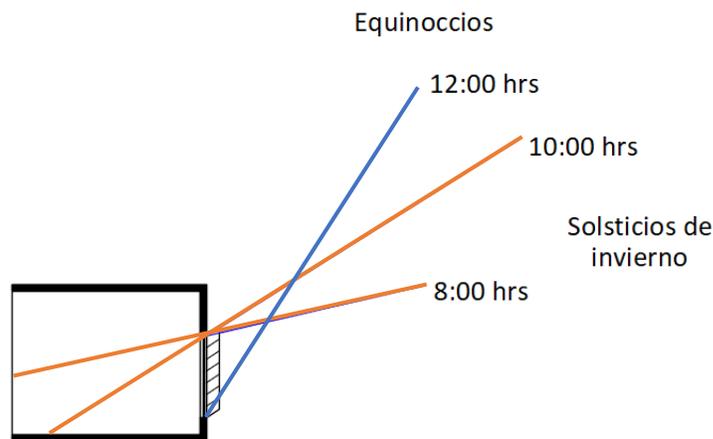


Figura 31. Diagrama de colocación de ángulos solares en superficie acristalada. Fuente propia.

Como se puede observar en la Figura 31, aparece la proyección de los ángulos de incidencia solar que fueron seleccionados de la trayectoria solar analizada anteriormente, con el fin de obtener una solución funcional para los meses más cálidos en verano, desde marzo hasta septiembre la estrategia de diseño sombrea el área acristalada, que está orientada al sur de la ciudad. Mientras que, con esa misma solución, permite la entrada de rayos solares durante los meses fríos, que abarcan desde noviembre hasta febrero. Para comenzar el proceso de diseño se utilizó el software Sketch Up por practicidad para el modelado de los elementos. Importando la esfera solar trabajada en AutoCAD 3D a Sketch Up. Teniendo así, mayor facilidad de manipulación sobre la geometría dibujada (Figura 32).

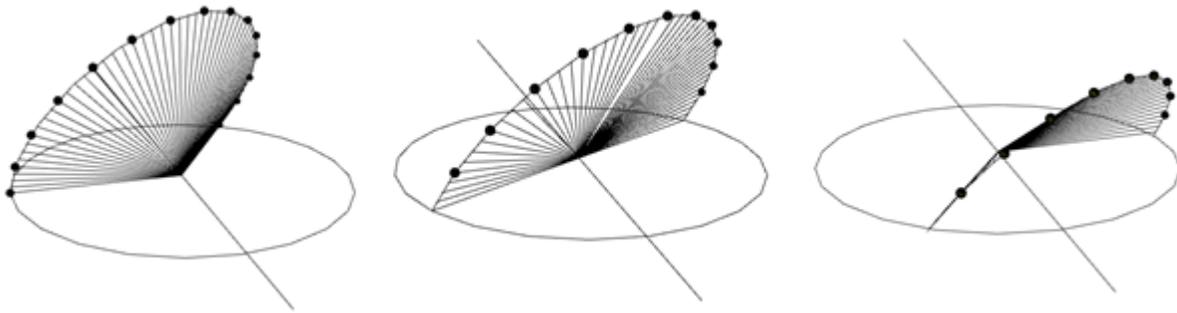


Figura 32. Trayectoria solar aparente en los solsticios de invierno y verano, así como en los equinoccios. Importado al programa Sketch UP desde AutoCAD 3D. Elaboración propia.

En las Figuras de la 33 a la 36 se muestran los ángulos seleccionados para el diseño de la protección solar desde el modelado 3D, para visualizar de mejor forma las ilustraciones en planta de dichos ángulos. Ya con este análisis se puede comenzar a construir el elemento de protección solar para fachada sur.

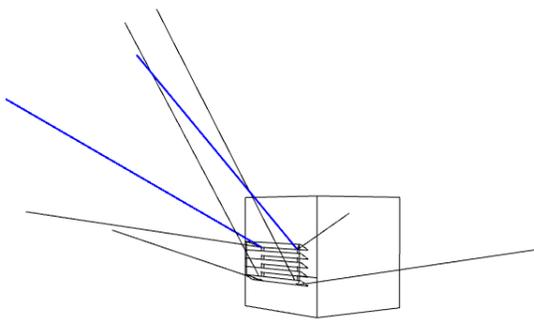


Figura 33. Ángulos solares del solsticio de invierno: 10:00 horas y 13:00 horas. Elaboración propia.

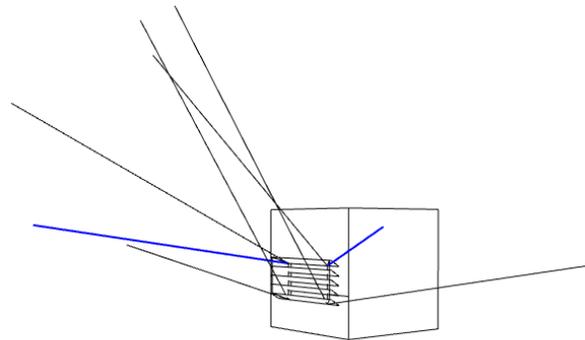


Figura 34. Ángulos solares del solsticio de invierno: 8:00 horas y 16:00 horas. Elaboración propia.

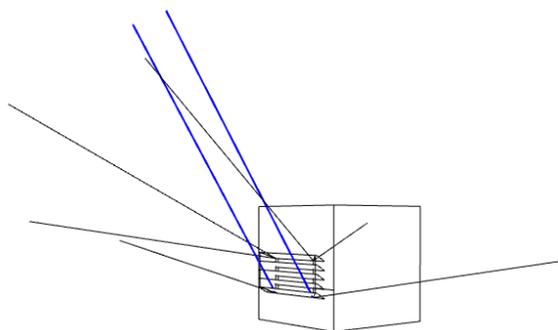


Figura 36. Ángulos solares del Equinoccio: 12:00 horas del mediodía. Elaboración propia.

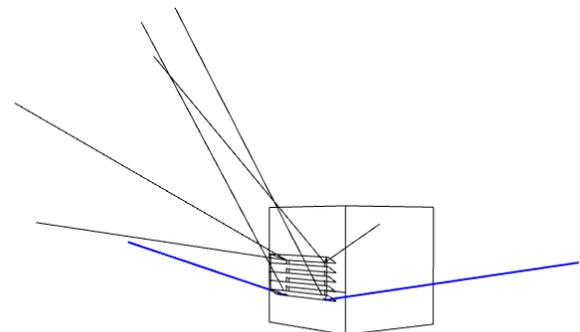


Figura 35. Ángulos solares del Equinoccio: 7:00 horas y 17:00 horas. Elaboración propia.

4.1.2 Proyección estereográfica

Por otro lado, se analizó la proyección estereográfica desde el trazo y metodología proporcionados por la Dra. Cecilia Guadarrama, en la clase seminario de temas selecto “Aplicaciones Lumínicas” del programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura. En este, se logró visualizar la trayectoria solar aparente de sol en la ciudad de Mexicali, con latitud 32.59° N, longitud -115.44° , y una zona GMT -08:00. Cabe mencionar que, para el trazo del dibujo, se requirió de una tabla de Excel, misma que fue proporcionada por la doctora. Dicha tabla incluye diferentes fórmulas para calcular parámetros necesarios para el trazo de la proyección estereográfica. Como, por ejemplo, el factor de corrección de la distancia tierra – sol, la declinación solar, la ecuación del tiempo, la salida y puesta del sol. Así como la duración del día astronómico, culminación del sol, tiempo solar verdadero y hora local.

Con el fin de conocer de donde se obtuvieron los datos, se explica cada una de estas ecuaciones tomadas desde el documento de tesis “Luz natural en la arquitectura. Aportaciones científicas, tecnológicas y de diseño.”⁴

Distancia tierra – sol

Es bien sabido que el planeta gira en una órbita elíptica alrededor del sol, al igual que todo el sistema solar. Además, cuando la Tierra se encuentra en el punto más cerca al Sol se le conoce como perihelio, mientras que cuando la Tierra está más lejana al Sol, se le conoce como afelio. Por ende, la tierra se encuentra separada del sol en los distintos periodos:

- Perihelio – 147 millones de kilómetros de distancia.
- Afelio – 152 millones de kilómetros de distancia.
- Distancia entre afelio y perihelio – 149.5 millones de kilómetros, y es conocida como la unidad astronómica.

⁴ Guadarrama, C. (2017). Luz natural en la arquitectura. Aportaciones científicas, tecnológicas y de diseño. Universidad Nacional Autónoma de México.

Esto afecta de manera directa a la atmósfera, puesto que la irradiancia llega de con diferente intensidad a lo largo del año. Dicho lo anterior, para realizar cálculos de radiación solar, es importante conocer el número del día juliano, es comienza desde el 1 de enero, equivale al día 1 en juliano, el 2 de enero al día 2 juliano, y así sucesivamente, un año bisiesto tiene 366 días, mientras que normalmente se tienen 365 días julianos. Por otro lado, dentro de las ecuaciones para corregir la distancia tierra – sol, se tiene la que proponen Dogniaux y Page, la cual se expresa del siguiente modo:

$$Fcd(j) = 1 + \sum_{i=1}^{i=3} [(a_i \cos(qji) + b_i \sin(qji))] / 1153$$

En donde:

$$q = 2\pi/366$$

$$a_1 = 45.326$$

$$a_2 = 0.88018$$

$$a_3 = -0.00461$$

$$b_1 = 1.8037$$

$$b_2 = 0.09746$$

$$b_3 = 0.18412$$

Por otro lado, dentro de las ecuaciones que se utilizan en el cálculo de la hoja de Excel, se encuentra la declinación solar. Dice la Dra. Cecilia Guadarrama (2017) en su documento de doctorado que la tierra además de girar sobre su plano elíptico alrededor del sol también rota sobre su propio eje, a este se le conoce como eje de rotación. Inclinado aproximadamente a 23.44° de la normal del plano elíptico y mantiene su orientación relativamente constante a lo largo de trayectoria alrededor del sol. Así mismo, el ángulo entre la línea que une el centro del sol y el centro de la tierra con relación al plano ecuatorial de esta cambia todos los días, a este ángulo se le conoce como declinación solar. Este ángulo presenta un valor máximo de +23.44° alrededor del 21 de junio y un valor mínimo de -23.44° alrededor del 21 de diciembre. La declinación solar es igual a 0 alrededor de 21 de marzo y del 22 de septiembre.

La fórmula que se encuentra indexada en el documento de Excel se basa en la que propone Dogniaux y Page. La cual consiste en lo siguiente:

$$\delta(j) = \sum_{j=1}^{j=3} (c_j \text{Cos}(qji) + d_j \text{Sen}(qji)) + 0.33281$$

En donde:

$q = 2\pi/366$	$d_1 = 3.78720$
$c_1 = -22.9840$	$d_2 = 0.03205$
$c_2 = -0.3499$	$d_3 = 0.07187$
$c_3 = -0.1398$	

Ecuación del tiempo

Del documento Guadarrama, C. (2017). Luz natural en la arquitectura. Aportaciones científicas, tecnológicas y de diseño. Universidad Nacional Autónoma de México., se extrajo la fórmula que de igual forma fue propuesta por Dogniaux y Page, la cual se conforma por lo siguiente.

$$\varepsilon(j) = \sum_{j=1}^{j=3} (e_j \text{Cos}(qji) + f_j \text{Sen}(qji)) + 0.00037$$

En donde:

$q = 2\pi/366$	$f_1 = -7.3764$
$e_1 = 0.43177$	$f_2 = -9.3893$
$e_2 = -3.1650$	$f_3 = -0.24498$
$e_3 = 0.07272$	

Avanzando en el razonamiento y entendimiento de las ecuaciones. El tiempo solar verdadero y la hora loca, van de la mano de la longitud. Riveros en sus notas de solarimetría, menciona que esta es el ángulo que forma la línea del meridiano del punto interés –meridiano del lugar o local– con el meridiano de referencia llamado meridiano de Greenwich. Su rango varía de 0 a 180° Este (en el sentido rotatorio de la tierra) y de 0 a -180° Oeste (en sentido contrario a la rotación de la tierra. Por otro lado, se le conoce como uso horario a la división de la tierra en 24 secciones de 15° grados cada una.⁵ En este sentido, la fórmula que propone la Dra. Guadarrama dice que:

⁵ Instituto de astronomía. (2010). “Anuario Del Observatorio Astronómico Nacional, AOAN”. Universidad Nacional Autónoma de México.

$$T_{SV} = \left(H_{loc} + \frac{M_{loc}}{60} + \frac{S_{loc}}{3600} \right) + \left(\frac{M_0 - \lambda}{15} \right) + \left(\frac{\epsilon}{60} \right)$$

En donde:

H_{loc} , Min_{loc} y Sec_{loc} = hora local

M_0 = meridiano oficial, en grados

λ = longitud del lugar, en grados

ϵ = ecuación del tiempo, en minutos

Ángulos solares desde el punto de vista del observador⁶

Para conocer la trayectoria solar de cierta zona el observador debe situarse sobre esta, para poder percibir la bóveda celeste y apreciar de qué forma llega la radiación solar y con qué ángulos. Por ende, se analizarán tres ángulos indispensables para el desarrollo de la trayectoria solar.

Angulo horario – Angulo cenital – Altura solar – Ángulo acimutal

El ángulo horario: se refiere al ángulo desde la posición del sol medido sobre la trayectoria solar respecto al meridiano local; su rango varía de -180° a 0° para la posición del sol antes del mediodía y de 0 a 180° para la posición del sol después del mediodía y se obtiene con la siguiente formula:

$$\omega_{-/+} = 15 (T_{SV} - 12)$$

En donde: Tsv= tiempo solar verdadero, en horas

Por otro lado, el ángulo cenital se mide desde el cenit del observador hasta el centro del sol, su rango varía de 0° en el cenit hasta 90° en el horizonte y se obtiene con la siguiente formula, en radianes.}

$$\theta = \cos^{-1} (\text{Sen}(\phi)\text{Sen}(\delta) + \text{Cos}(\phi)\text{Cos}(\delta)\text{Cos}(\omega))$$

En donde: ϕ = latitud, en radianes

δ = declinación solar, en radianes

ω = ángulo horario, en radianes

⁶ Guadarrama, C. (2017). Luz natural en la arquitectura. Aportaciones científicas, tecnológicas y de diseño. Universidad Nacional Autónoma de México.

Por consiguiente, la altura solar es un ángulo que se mide desde el horizonte hasta el centro del sol, se obtiene al restarle a 90° el ángulo cenital o por la siguiente fórmula, en radianes.⁷

$$\alpha = \text{Sen}^{-1} [\text{Cos}(\phi)\text{Cos}(\delta)\text{Cos}(\omega) + \text{Sen}(\phi)\text{Sen}(\delta)]$$

En donde:

- ϕ = latitud, en radianes
- δ = declinación solar, en radianes
- ω = ángulo horario, en radianes

Finalmente, la fórmula para obtener el ángulo acimutal, este va a partir de una línea de baja perpendicular desde el centro del sol hasta el horizonte, por lo que la intersección de esta línea y el horizonte hasta el punto cardinal sur geográfico darán como resultado el ángulo buscado. Este es en negativo hacia el Este y positivo hacia el Oeste, su rango varía de -180° hasta 180° y se obtiene con la siguiente fórmula en grados.

$$\gamma = C_1 C_2 \gamma' + \frac{180 C_3 (1 - C_1 C_2)}{2}$$

Con el ángulo acimutal modificado, en radianes:

$$\gamma' = \text{Sen}^{-1} \left(\frac{\text{Cos}(\delta)\text{Sen}(\omega)}{\text{Sen}(\theta_c)} \right)$$

Con C1, C2, y C3, en grados:

$$C_1 = \frac{\omega_w - |\omega|}{|\omega_w - |\omega||}, \quad \begin{array}{l} |\delta| < |\phi| \\ 1, \quad |\delta| \geq |\phi| \end{array}; \quad C_2 = \frac{\phi - \delta}{|\phi - \delta|}; \quad C_3 = \frac{\omega}{|\omega|}$$

Con el ángulo horario modificado, en radianes:

$$\omega_w = \text{Cos}^{-1} \left(\frac{\tan(\delta)}{\tan(\phi)} \right)$$

- ϕ = latitud, en radianes o grados según la ecuación
- δ = declinación solar, en radianes o grados según la ecuación
- ω = ángulo horario, en radianes o grados según la ecuación
- ω_w = ángulo horario modificado, en radianes o grados según la ecuación
- θ = ángulo cenital, en radianes

⁷ Muhammad, I. (1983). An Introduction to Solar Radiation. Ontario: Academic Press.

En segunda instancia, se tomaron los datos en las celdas de la derecha, son las distancias que se tomaron para el trazo de los días y las horas en el dibujo de AutoCAD, para crear la proyección estereográfica de la latitud deseada. Cabe mencionar que esta será la del caso estudio que se está analizando.

Trazo de DÍAS				
ds	rs	rs-ds	fecha2	fecha1
9.00	9.80	0.80		21-jun-20
9.53	10.61	1.09	23-jul-20	21-may-20
11.31	13.14	1.83	24-ago-20	21-abr-20
15.49	18.39	2.90	22-sep-20	21-mar-20
24.07	28.05	3.99	21-oct-20	21-feb-20
43.13	48.08	4.95	22-nov-20	21-ene-20
59.90	65.23	5.32		21-dic-20
40.80	45.68	4.88	19-nov-20	24-ene-20
Trazo de HORAS				
dt	dh	rh	horas en TSV	horas en TSV
6.39	44.30	45.86	13	11
	20.56	23.74	14	10
	11.87	16.79	15	9
	6.85	13.71	16	8
	3.18	12.29	17	7
	0.00	11.87	18	6

Figura 39. Tabla de trazo de la proyección estereográfica. Fuente: Aplicaciones lumínicas por la Dra. Guadarrama. (2022).

Para el trazo de la proyección estereográfica, se tomaron de la tabla de Excel los valores de “trazo de días”: ds, rs, rs-ds, de cada una de las fechas a dibujar, tomando como referencia un $r = 10$ m. (Figura 39).

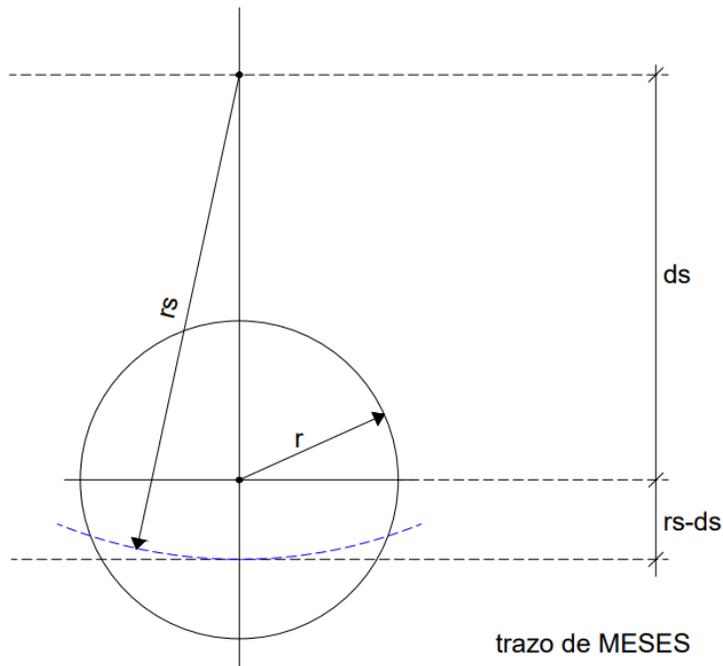


Figura 40. Trazo para mes de la fecha exacta a dibujar sobre la proyección estereográfica.

En la Figura 40, se tiene el trazo para crear la trayectoria solar del mes y día de selección. Recordando que se analizaran cuatro fechas, solsticios de invierno y verano, así como ambos equinoccios. Por otro lado, se toman los datos de la tabla de Excel del apartado “trazo de horas”: dt , dh , rh , para sustituirse en el trazo de la Figura 41.

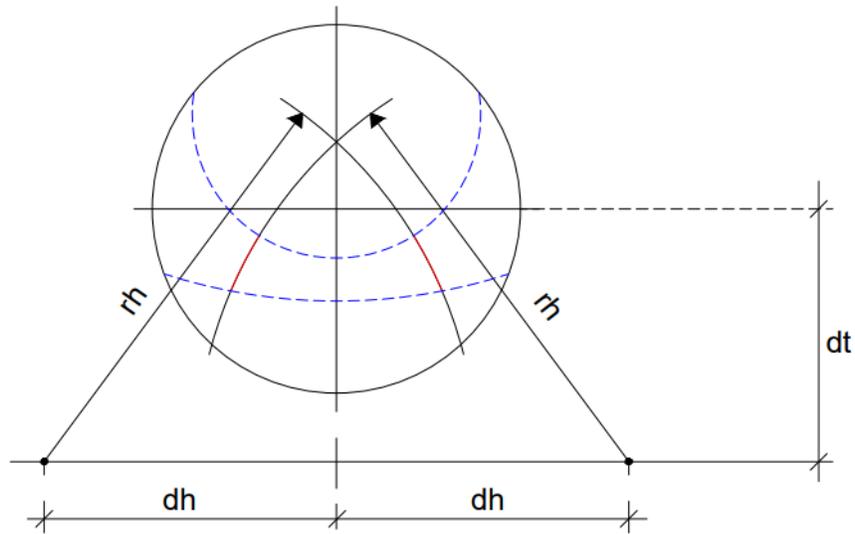


Figura 41. Trazo para horas a dibujar sobre la proyección estereográfica. Fuente: proporcionada por la Dra. Guadarrama. (2022).

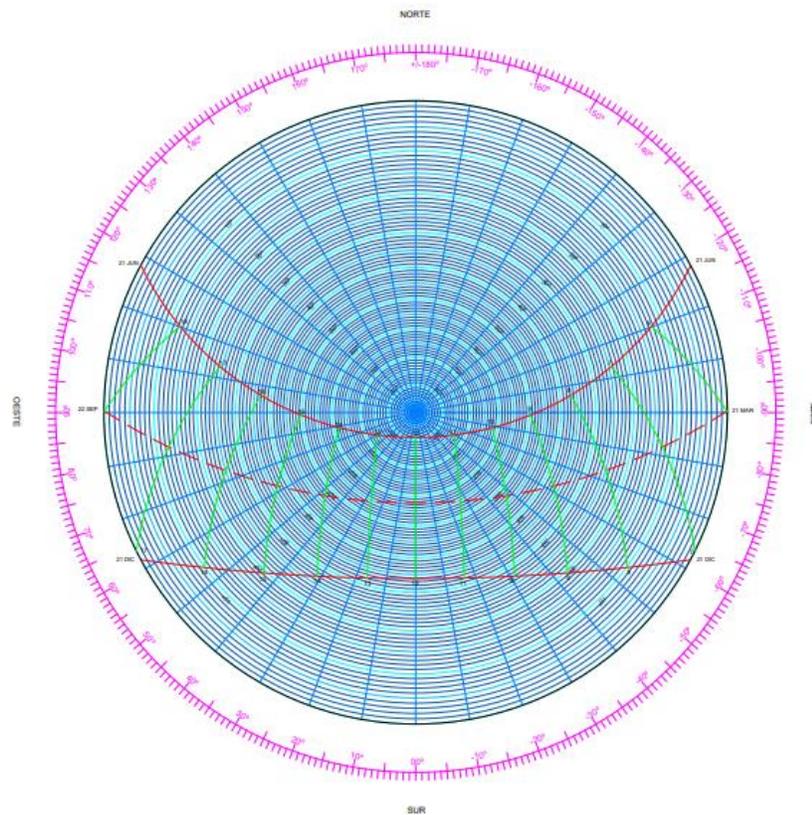


Figura 42. Proyección estereográfica: 21 junio, 21 marzo, 22 septiembre y 21 diciembre. Elaboración propia.

Una vez trazados las horas, meses y días de las fechas seleccionadas, se consigue el recorrido de la trayectoria solar para la zona estudio de Mexicali, Baja California. De este modo se puede apreciar en dos dimensiones como incide la radiación solar en la fachada principal y como entra al interior del espacio que se está evaluando (ver Figura 42). En la Figura 43 del recorrido solar, se puede apreciar que durante la mayor parte del año llega radiación solar directa y difusa a la fachada Sur. Además, por las primeras horas del día se filtra por la fachada Este, mientras que, por las horas de la tarde, antes de la culminación solar en la fachada Oeste.

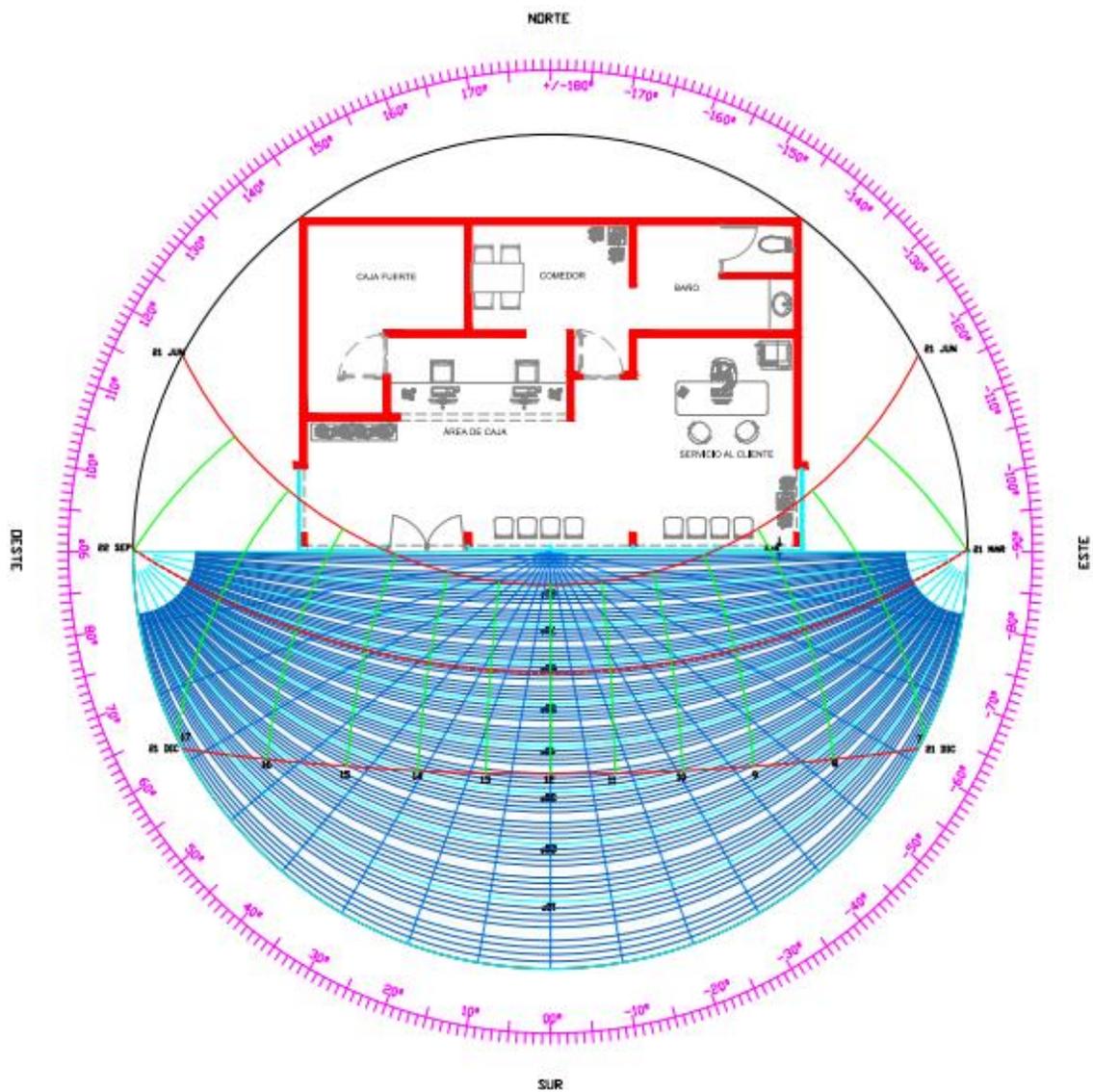
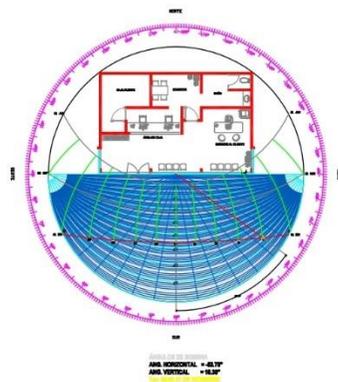


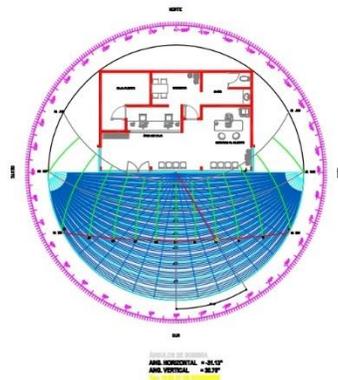
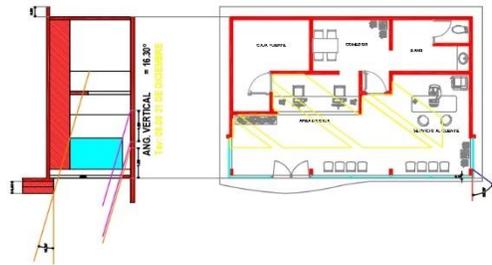
Figura 43. Proyección estereográfica: 21 junio, 21 marzo, 22 septiembre y 21 diciembre. Caso estudio: Mexicali, B.C. Elaboración propia.

De igual manera, con este análisis de la trayectoria solar, se grafica la incidencia solar dentro del caso estudio según las fechas seleccionadas (21 de marzo, 21 de junio y 21 de diciembre). En las figuras 44, 45 y 46, se puede apreciar algunas de las horas calculadas tomando la proyección estereográfica, proyectando al interior del espacio por las áreas acristaladas de la fachada Sur en los equinoccios. De igual manera, con este análisis de la trayectoria solar, se grafica la incidencia solar dentro del caso estudio según las fechas seleccionadas.

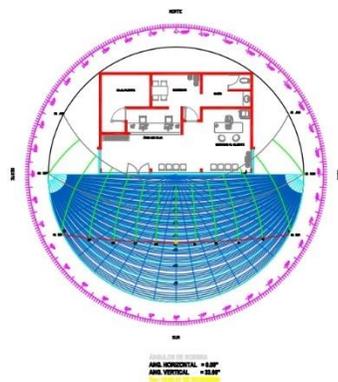
El 21 de marzo (ver Figura 44), se puede apreciar que la incidencia de radiación solar entra por la fachada sur (acristalada) todo el día, esto debido a que los ángulos del sol comenzarán a subir hasta llegar al 21 de junio, solsticio de verano (ver Figura 46) cuando el sol se proyecta desde su ángulo más alto, al contar con un pequeño elemento de pretil en la fachada sur, logra sombrear algunas horas en fechas cercanas al solsticio de verano. Mientras que los meses descienden los ángulos de incidencia solar igual, hasta llegar al 21 de diciembre el punto con ángulos más bajos, como se aprecia en la Figura 45 el solsticio de invierno deja entrar la mayor cantidad de radiación solar al interior del espacio.



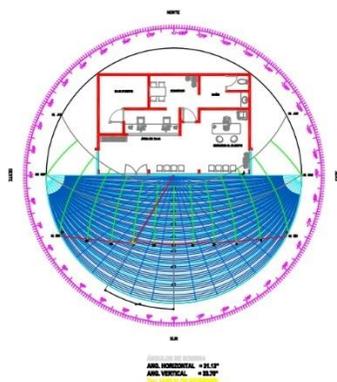
21 diciembre 8:00 TSV
Ang. Horizontal = -53.75°
Ang. Vertical = 16.30°



21 diciembre 10:00 TSV
Ang. Horizontal = -31.13°
Ang. Vertical = 30.70°



21 diciembre 12:00 TSV
Ang. Horizontal = 0°
Ang. Vertical = 33.90°



21 diciembre 14:00 TSV
Ang. Horizontal = -31.13°
Ang. Vertical = 33.70°

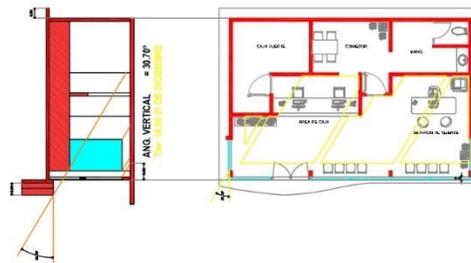
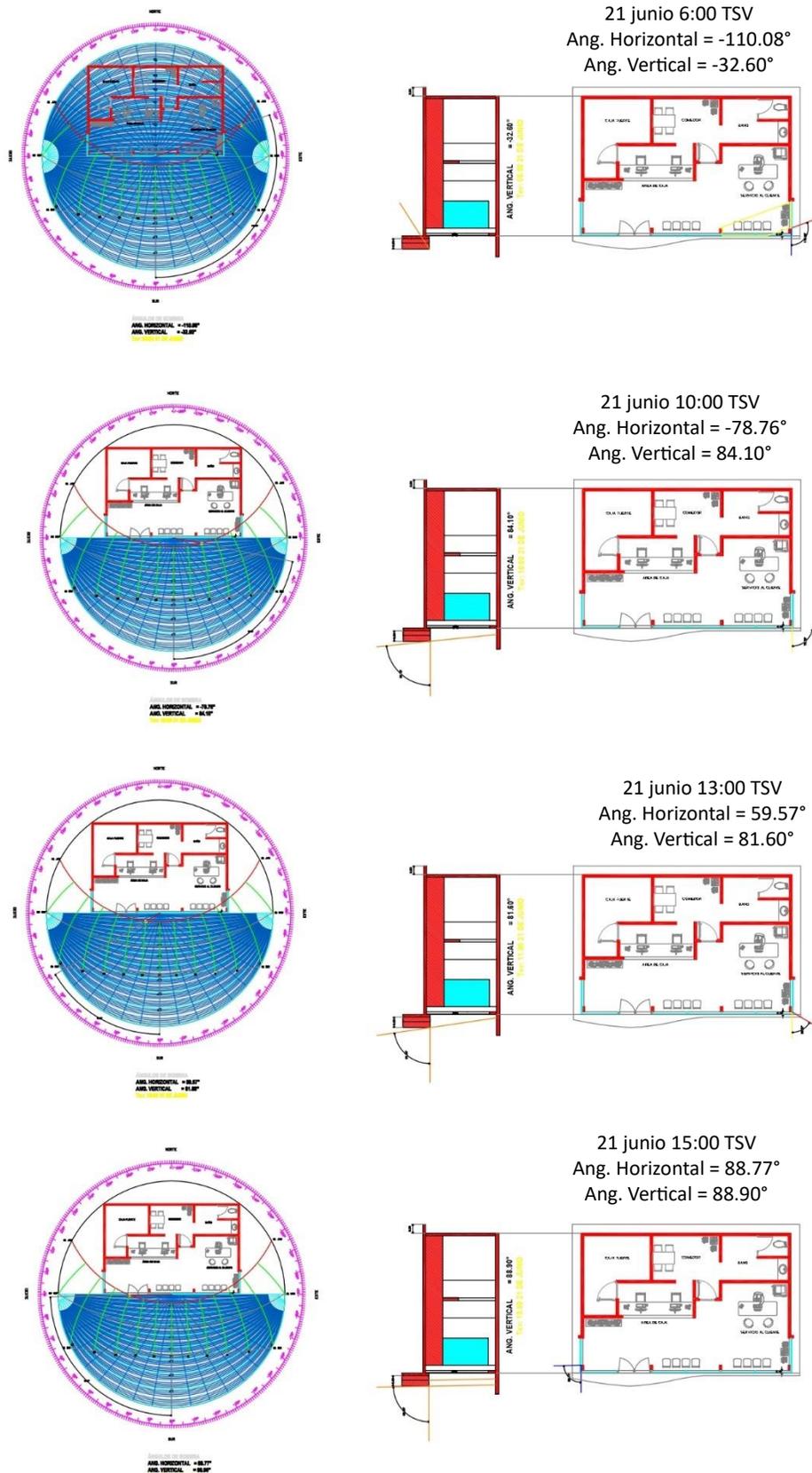


Figura 45. Incidencia solar dentro del espacio analizado. Solsticio de invierno. Elaboración propia.



Analizando estas fechas se obtiene una variación en cómo incide el sol dentro del espacio en diferentes periodos del año, dando así un panorama más amplio de cómo se comporta el sol y de qué manera repercute en la fachada que se está analizando. Una vez trazados los ángulos de incidencia solar, se procedió a analizar de qué forma estos formarían parte del diseño de los elementos de protección solar. Primeramente, se tomaron los datos proyectados desde la planta como se muestran en las ilustraciones siguientes. (Figura 47, 48).

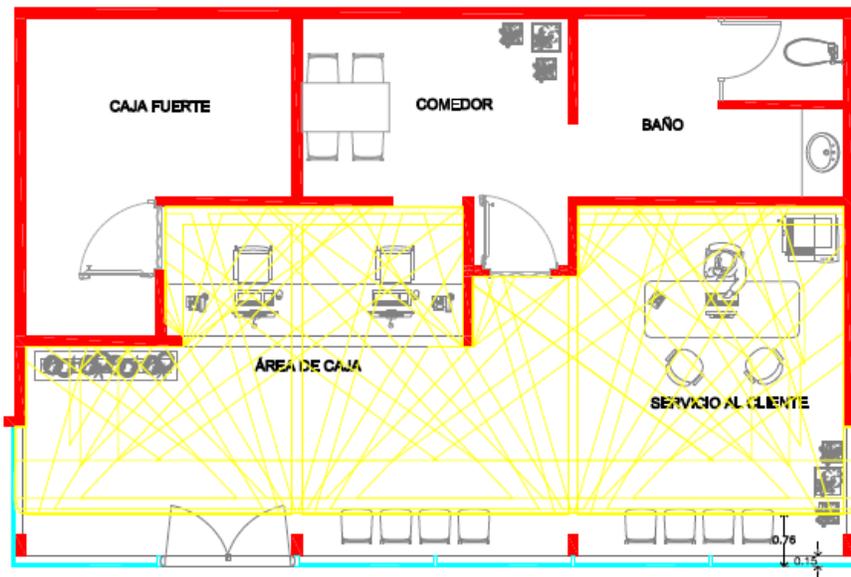


Figura 47. Incidencia solar dentro del espacio durante el solsticio invierno. Elaboración propia.

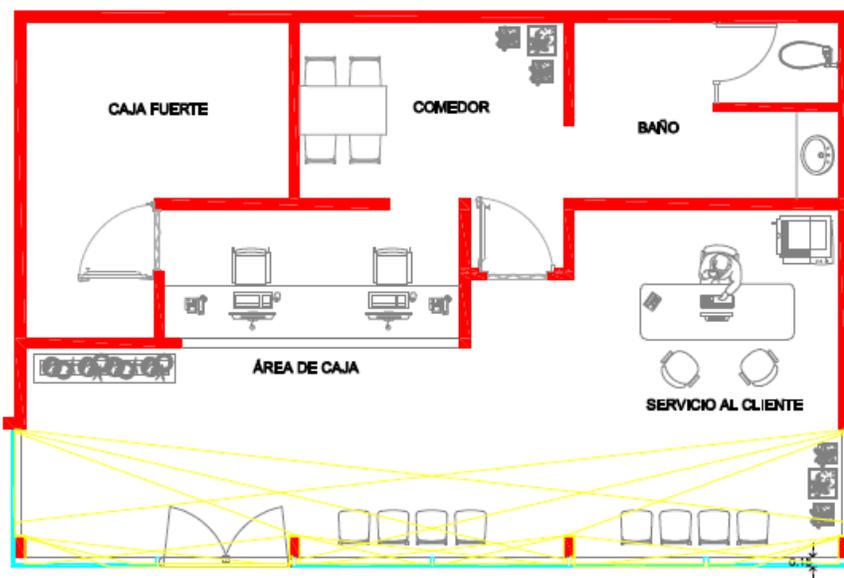


Figura 48. Incidencia solar dentro del espacio durante el solsticio verano. Elaboración propia.

Por otro lado, se tomó en consideración que dentro del análisis de los equinoccios la incidencia solar es captada de manera significativa dentro del espacio y en la superficie de fachada. (Figura 49).

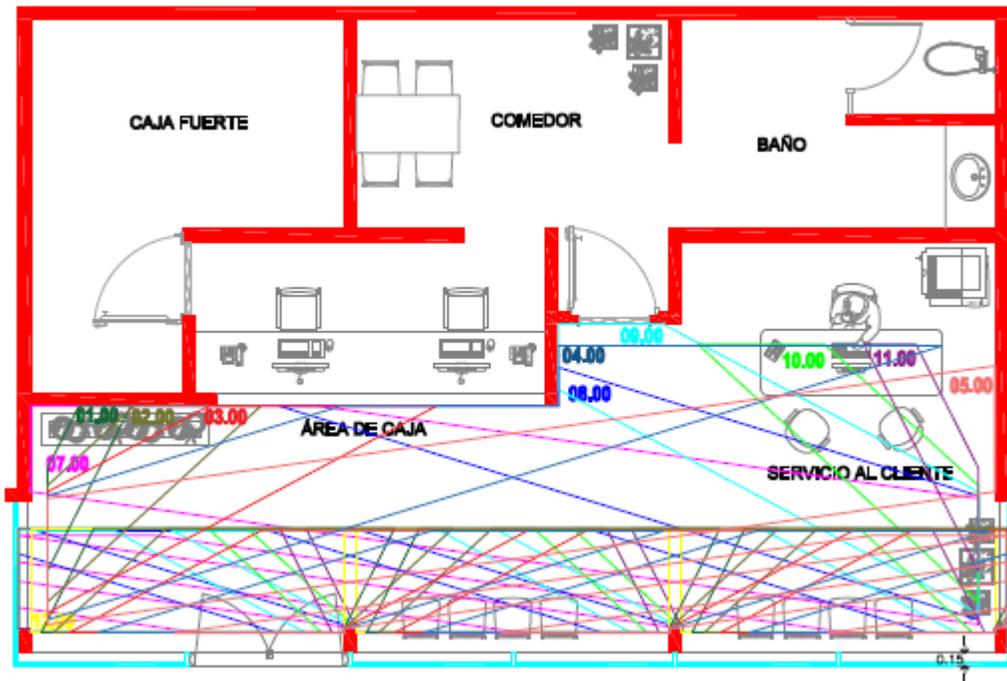


Figura 49. Incidencia solar dentro del espacio durante los equinoccios. Elaboración propia.

El análisis de incidencia solar dentro del espacio dio como resultado que la superficie acristalada filtra un alto porcentaje de iluminación que de otra forma esta se interpretaría como calor durante todo el año. Por ende, se busca diseñar un elemento de protección solar con el fin de contrarrestar la incidencia solar dentro del espacio los meses de verano, no comprometer el confort térmico en los meses de invierno, mejorar la iluminación de forma natural y además no obstruir las vistas al exterior. Es importante mencionar que, para el diseño de protección solar, los ángulos verticales analizados en esta fecha sirvieron para bloquear los rayos del sol, además de tomar del solsticio de invierno los ángulos de inclinación de los elementos horizontales de protección solar.

Por otra parte, se puede apreciar en la Figura 50, la incidencia de radiación solar filtrada al interior del caso estudio, dichas imágenes se tomaron a partir de las 10:00 horas hasta las 15:00 horas en el equinoccio de primavera - verano, mediante una maqueta esquemática a escala 1:50 del caso estudio, la cual se llevó

al Heliodón del Laboratorio De Edificación Sostenible de la UNAM. El espacio mayormente afectado que se muestra en la imagen es la sala de espera.

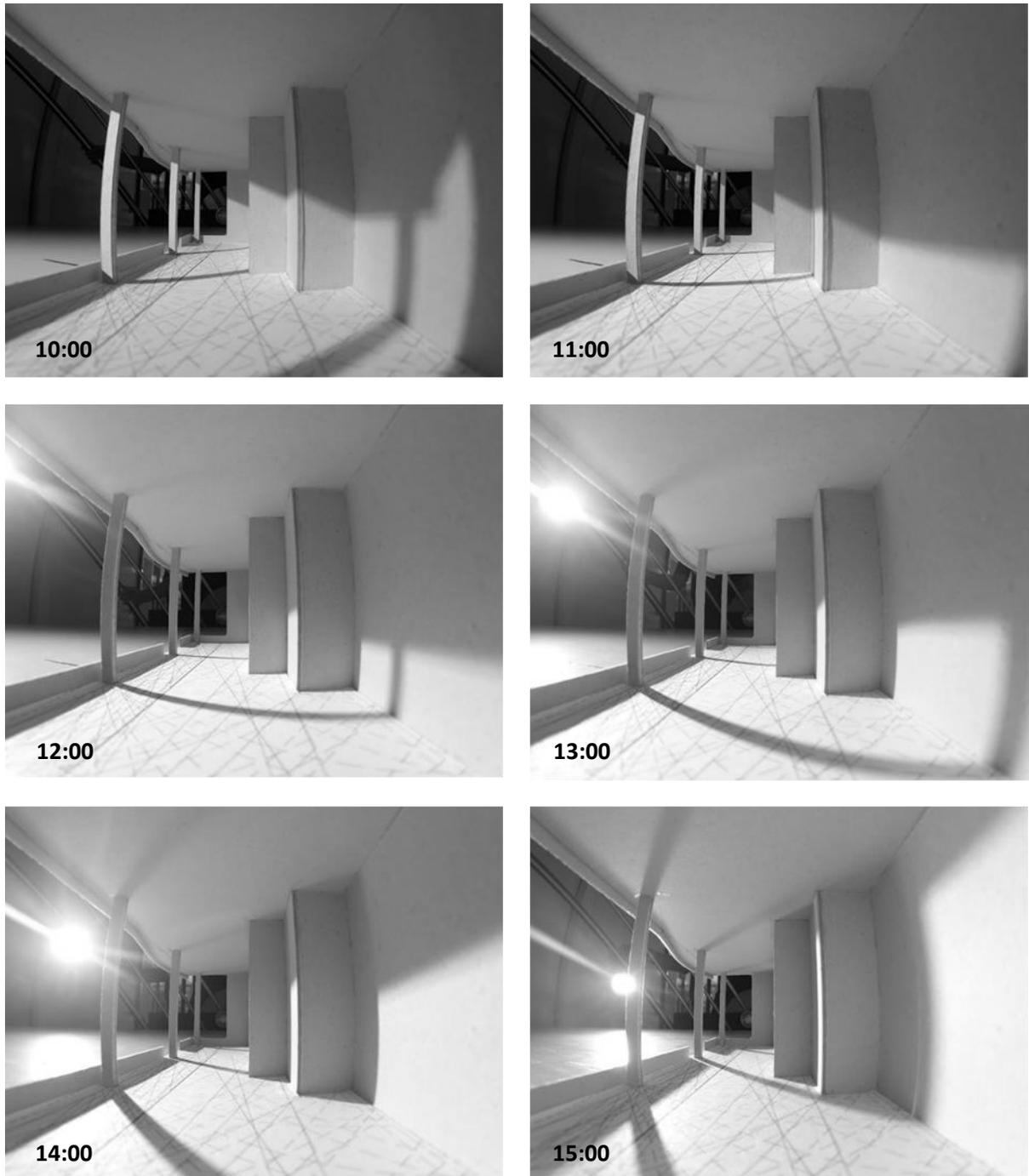


Figura 50. Trayectoria solar en equinoccio sobre maqueta 1:50 con Heliodón. Imágenes elaboración propia.

Como se muestra en las imágenes capturadas de la maqueta esquemática del caso estudio, los equinoccios son las fechas más afectadas para el caso estudio, de aquí es que se obtiene la respuesta al periodo de sombreado que se aplicarían los elementos de protección solar. Como se mencionó anteriormente, este sería del 21 de marzo al 21 de septiembre, dejando entrar la incidencia de radiación solar a partir del mes de octubre hasta abril, periodo que comprende a los meses menos críticos del año.

4.2 Desarrollo de ideas iniciales

Para conformar el diseño de los elementos de protección solar se tomaron ángulos verticales y horizontales 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 cómo se filtra la incidencia de radiación solar. En cuanto a los ángulos obtenidos del anterior análisis, se tomó un ángulo vertical de 58.5° de los equinoccios a las 7:00 horas TSV, con el que se bloquea incidencia de radiación solar del 21 de marzo al 21 de septiembre, que abarca prácticamente todo el periodo cálido, ver Figura 51, 52. Se tomó como punto de partida esta hora en tiempo solar verdadero ya que en esta época del año los rayos solares son muy altos y el objetivo es bloquearlos desde las primeras horas del día.

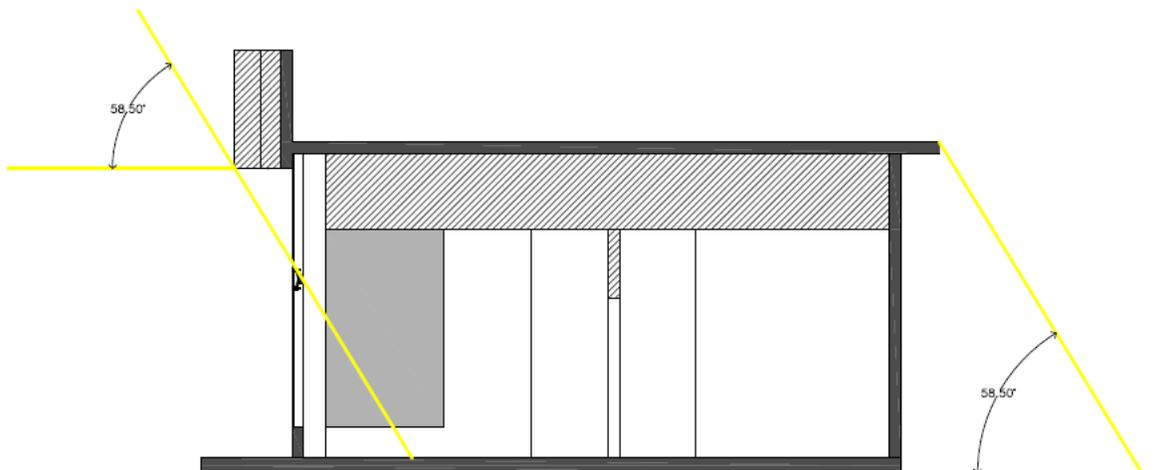


Figura 51. Ángulo vertical de incidencia solar filtrada al interior, 7:00 horas en equinoccio. Elaboración propia.

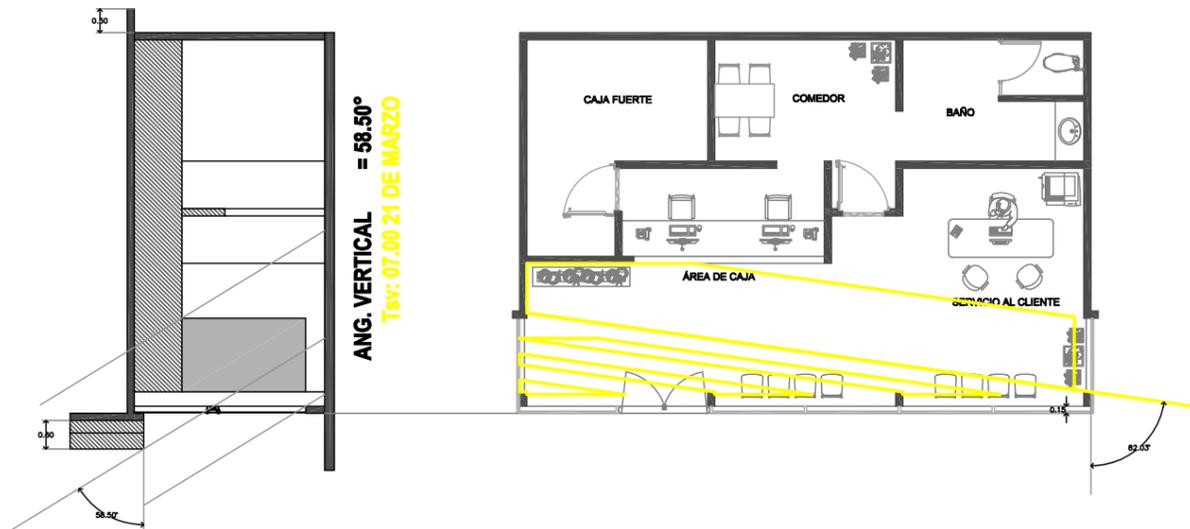


Figura 52. Proyección de ángulo vertical y horizontal sobre planta arquitectónica de caso estudio. Elaboración propia.

En la figura 53, se puede apreciar la gráfica estereográfica con la hora y día seleccionado para el previo análisis, de igual forma los datos se corroboran en la hora de cálculo que aparece en la figura 54. De este modo se tienen tres formas de validar los resultados de los ángulos obtenidos, tanto verticales como horizontales ya que estas tres metodologías arrojan los mismos resultados. Es importante mencionar que, la hoja de cálculo mantiene un margen de error de 2°, es decir en el ángulo vertical la hoja de cálculo nos arroja 56.99° mientras que en la proyección estereográfica el ángulo vertical obtenido es de 58.5° a las 7:00 horas el 21 de marzo.

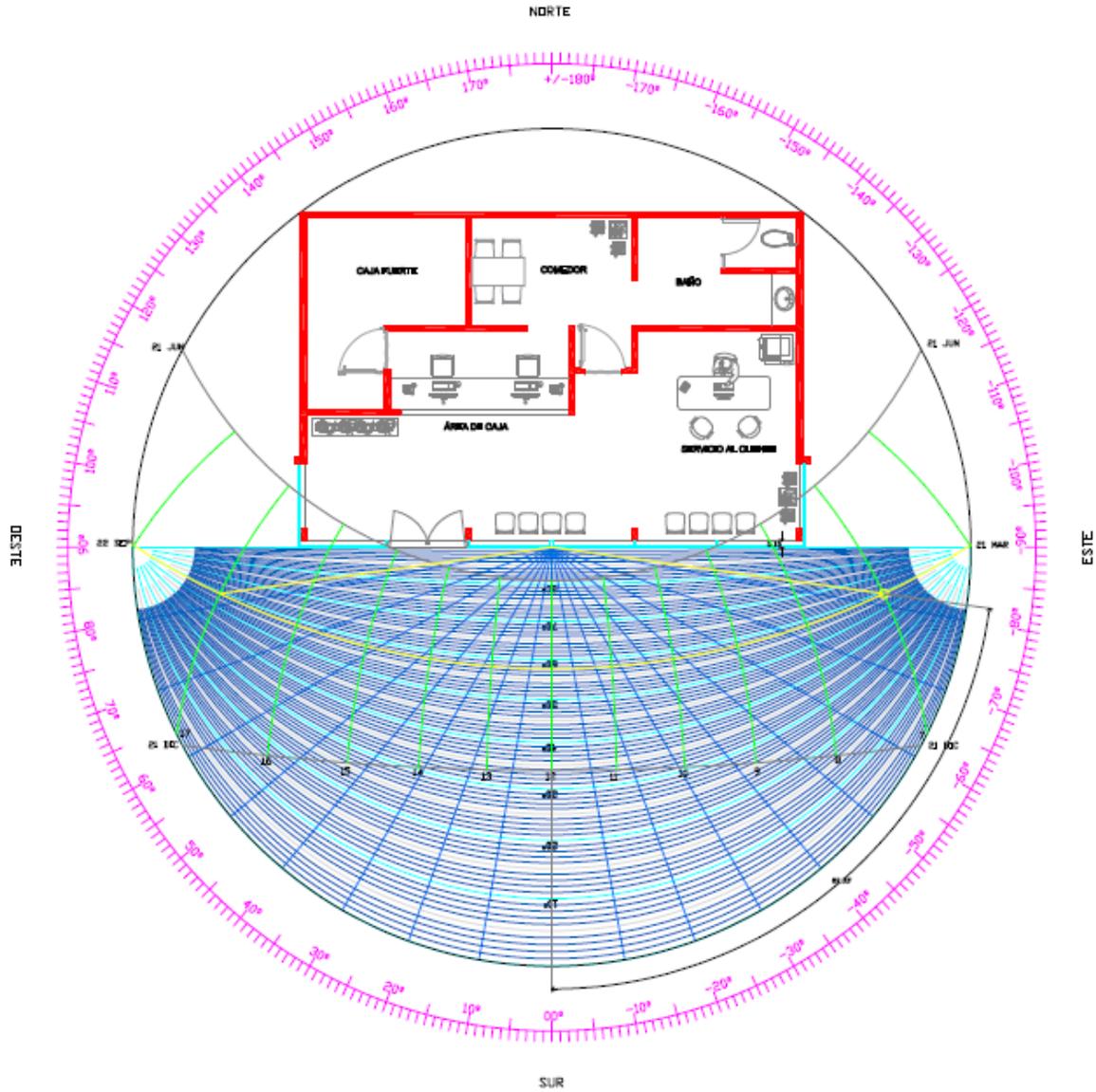


Figura 53. Gráfica estereográfica de ángulo vertical y horizontal de incidencia solar filtrada al interior, 7:00 horas en equinoccio. Elaboración propia.

Ejercicio 5 al Sur			Hoja de cálculo			Proyección estereográfica		
Equinoccio día/mes/año	Hora TSV	Hora local	Ángulo de sombra horizontal	Ángulo de sombra vertical	Longitud de sombra	Ángulo de sombra horizontal	Ángulo de sombra vertical	Longitud de sombra
21/03/2021	6	5:49:40 AM	-89.91	-32.60	-6.80			
21/03/2021	7	6:49:40 AM	-81.69	56.99	2.83	-82.03	58.5	2.67
21/03/2021	8	7:49:40 AM	-72.63	57.19	2.80	-73.00	57.9	2.74
21/03/2021	9	8:49:40 AM	-61.59	57.25	2.80	-61.96	57.8	2.74
21/03/2021	10	9:49:40 AM	-46.89	57.28	2.79	-47.44	57.7	2.76
21/03/2021	11	10:49:40 AM	-26.38	57.29	2.79	-26.77	57.6	2.76
21/03/2021	12	11:49:40 AM	0.00	57.30	2.79	0.00	57.7	2.75
21/03/2021	13	12:49:40 PM	26.38	57.29	2.79	26.77	57.6	2.76
21/03/2021	14	1:49:40 PM	46.89	57.28	2.79	47.42	57.6	2.76
21/03/2021	15	2:49:40 PM	61.59	57.25	2.80	61.96	57.8	2.74
21/03/2021	16	3:49:40 PM	72.63	57.19	2.80	73	57.9	2.73
21/03/2021	17	4:49:40 PM	81.69	56.99	2.83	82.03	58.5	2.67

Figura 54. Hoja de cálculo para obtener ángulos de sombra vertical y horizontal. Fuente: Aplicaciones lumínicas por la Dra. Guadarrama. (2022).

Por otro lado, se tomó un ángulo vertical de 30.70° del solsticio de invierno a las 10:00 horas, con el cual se dio la inclinación del elemento de protección solar, ver Figura 55, 56. Así mismo, una vez analizado los ángulos de incidencia de radiación solar en las fechas mencionadas, se logró concebir la 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. Además, de no comprometer las vistas al exterior, la iluminación natural o modificar aspectos térmicos de manera negativa en el interior del espacio se consideró un grosor de 19mm para los elementos de protección solar.

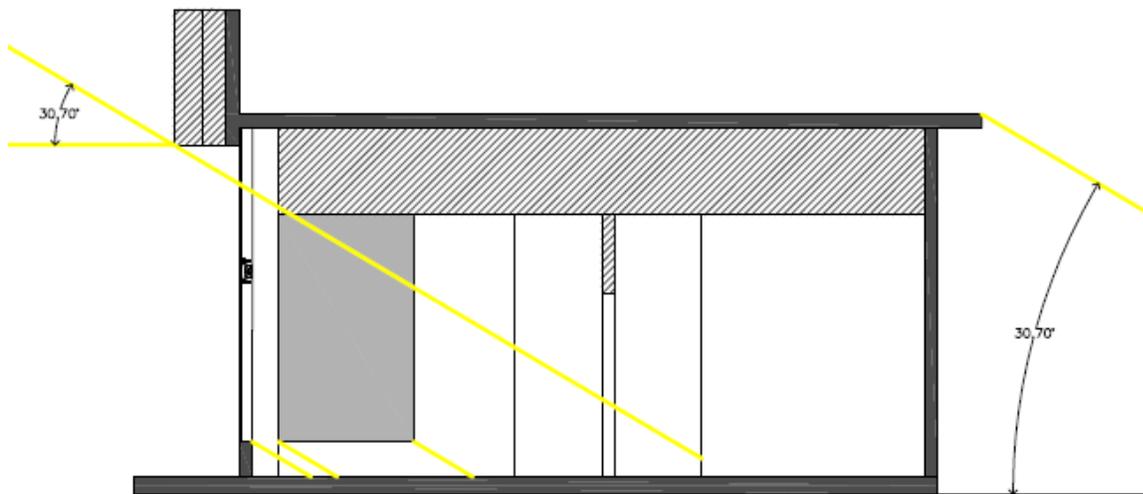


Figura 55. Ángulo vertical de incidencia solar filtrada al interior, 10:00 horas en solsticio invierno. Elaboración propia.

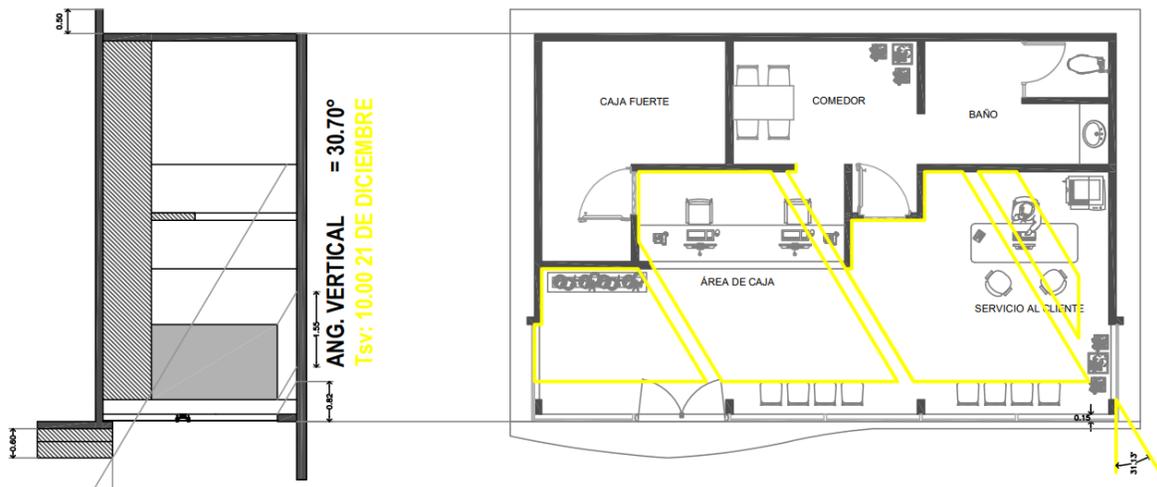


Figura 56. Proyección de ángulo vertical y horizontal sobre planta arquitectónica de caso estudio. Elaboración propia.

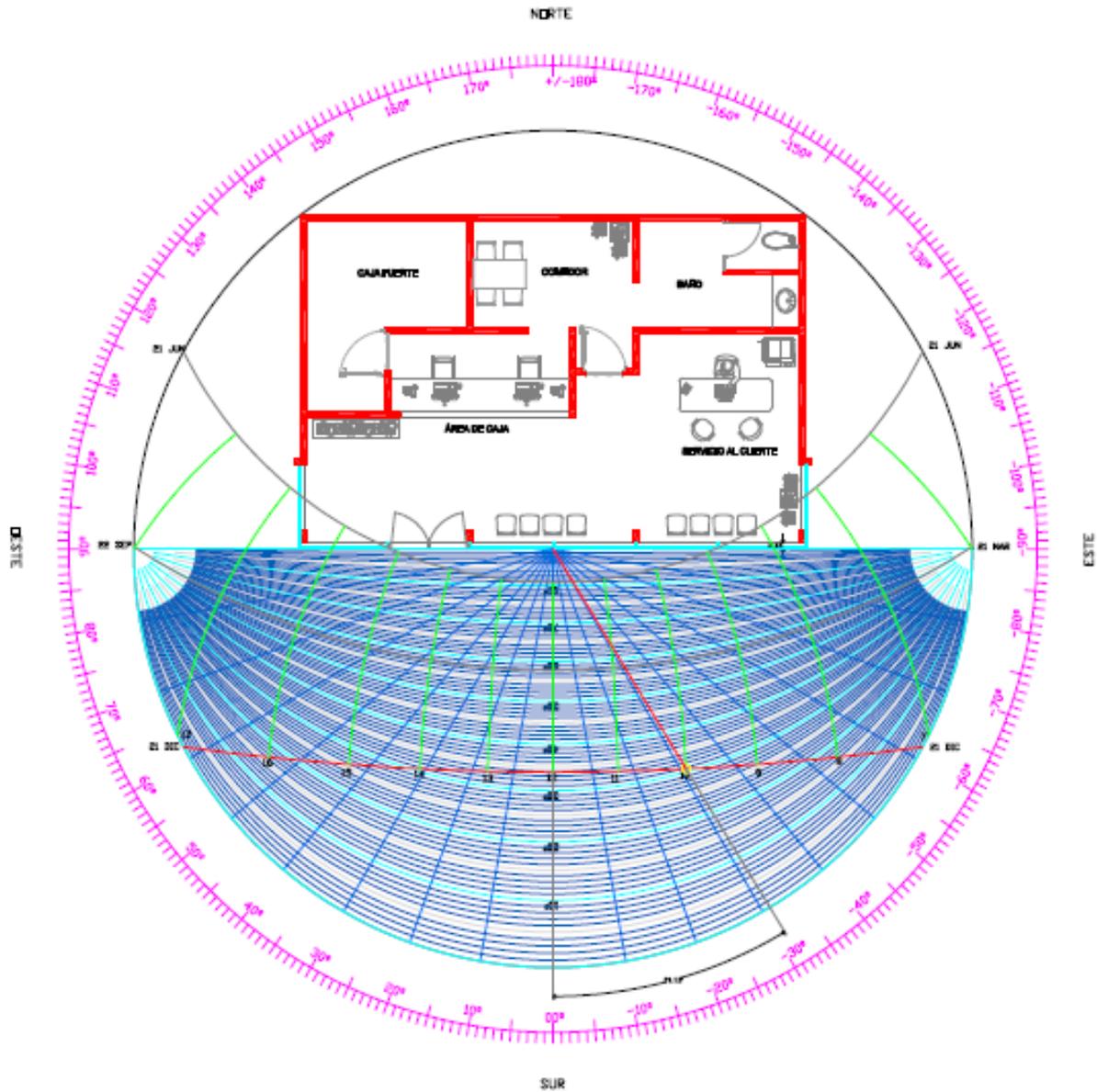


Figura 58. Gráfica estereográfica de ángulo vertical y horizontal de incidencia solar filtrada al interior, 10:00 horas en solsticio de invierno. Elaboración propia.

Solsticio invierno día/mes/año	Hora TSV	Hora local	Ángulo de sombra horizontal	Ángulo de sombra vertical	Longitud de sombra	Ángulo de sombra horizontal	Ángulo de sombra vertical	Longitud de sombra
21/12/2021	8	7:39:28 AM	-53.76	16.46	14.72	-53.75	16.3	14.88
21/12/2021	9	8:39:28 AM	-43.45	25.88	8.97	-43.44	25.8	9
21/12/2021	10	9:39:28 AM	-31.01	30.80	7.30	-31.13	30.7	7.33
21/12/2021	11	10:39:28 AM	-16.29	33.22	6.64	-16.28	33.2	6.65
21/12/2021	12	11:39:28 AM	0.00	33.96	6.46	0.00	33.9	6.47
21/12/2021	13	12:39:28 PM	16.29	33.22	6.72	16.28	33.2	6.65
21/12/2021	14	1:39:28 PM	31.01	30.80	7.38	31.13	33.7	7.33
21/12/2021	15	2:39:28 PM	43.45	25.88	9.07	43.44	25.8	9
21/12/2021	16	3:39:28 PM	53.76	16.46	14.89	57.75	16.3	14.88

Figura 57. Hoja de cálculo para obtener ángulos de sombra vertical y horizontal. Fuente: Aplicaciones lumínicas por la Dra. Guadarrama. (2022).

De igual forma, se generó una comparativa entre la hoja de cálculo y la proyección estereográfica para validar los datos obtenidos, ver Figuras 57, 58.

La intersección de estos ángulos solares permitió dar la orientación e inclinación de los elementos de protección solar. Así mismo, la propuesta de diseño para protección solar en superficies acristaladas resultó favorable en este primer análisis práctico teórico, ver Figura 59. Considerando que su principal objetivo es, permitir durante los meses de invierno la entrada de calor al interior del espacio, con el fin de mantener una temperatura cálida. Puesto que, los inviernos en zonas cálido seco son bastante fríos.

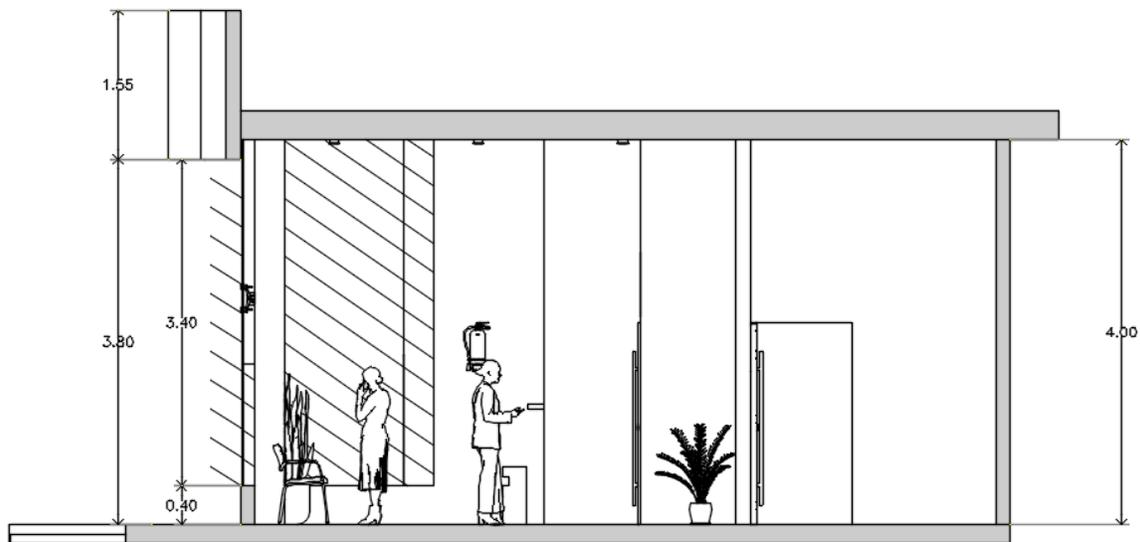


Figura 59. Sección de caso estudio con elementos de protección solar. Elaboración propia.

Se llevó a cabo el análisis para los meses de verano logrando sombrear toda la temporada de calor. Para efectos de ilustración únicamente se presenta en el documento el solsticio de invierno y equinoccios (ver Figura 60, 61). Es importante mencionar que la solución funciona en todos los meses de verano. Por ende, la aplicación de elementos de protección solar para un espacio de usos múltiples o incluso habitacional, con características climatológicas cálido seco, funciona de manera efectiva todo el año. En definitiva, como se mencionó al principio del documento una estrategia de diseño pasivo de este tipo, deberá su eficacia a que sea funcional durante todo el año. Existen diferentes opciones para proyectar partesoles y/o parasoles, estos van en función de la geometría solar y por ser elementos exteriores se prestan a ser parte de la visual

arquitectónica. En esta solución, fue aplicado a un cubo con características aparentes de casa habitación, pero es posible que esta propuesta sea replicada en cualquier espacio habitable. El resultado sería el mismo benefactor para las condiciones de confort térmico e iluminación interior.

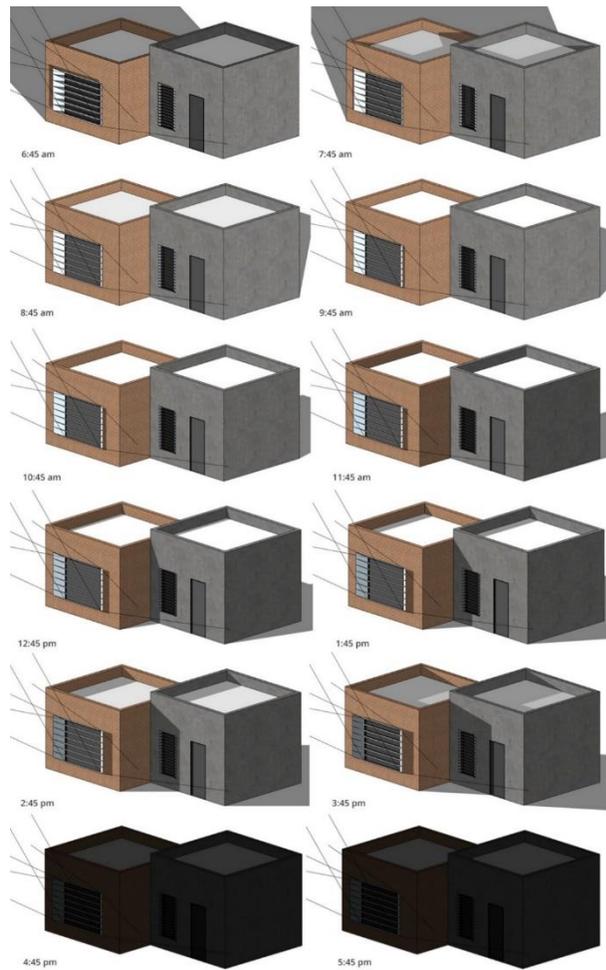


Figura 60. Aplicación de elementos de protección solar para fachada sur en la ciudad de Mexicali. Equinoccios de primavera y otoño. Elaboración propia.

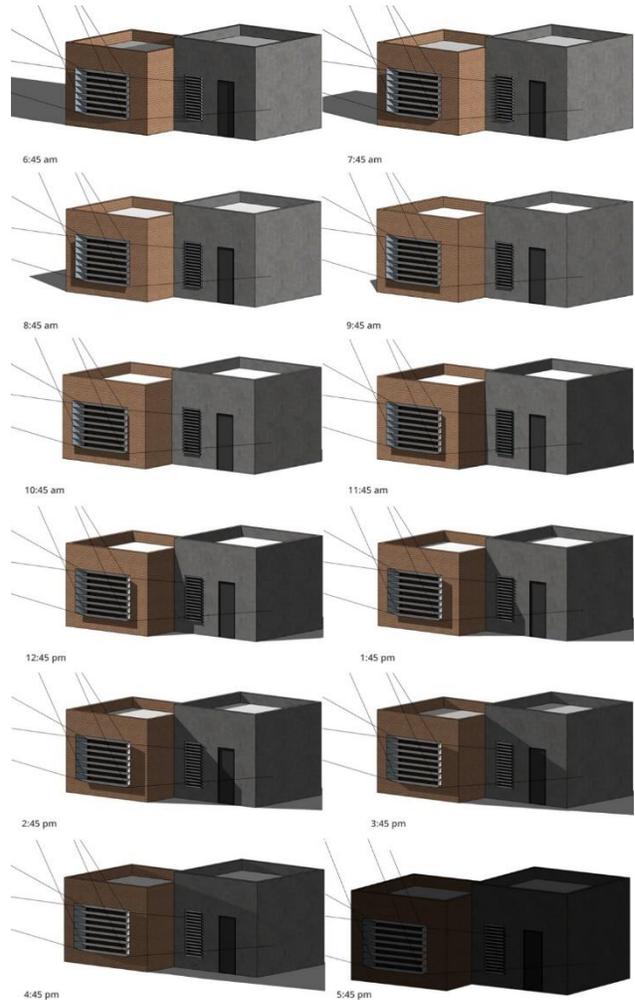


Figura 61. Aplicación de elementos de protección solar para fachada sur en la ciudad de Mexicali. Solsticio de invierno (21 de diciembre). Elaboración propia.

El fin de generar estas ideas iniciales, es percatarse que el elemento de protección solar funcione de manera correcta. Para llevarlo después a su segunda fase, que es el diseño arquitectónico y visual sobre la fachada con la superficie acristalada.

4.3 Representación del prototipo seleccionado

Una vez analizado los ángulos de incidencia solar en determinadas fechas, se logró concebir estos elementos de protección solar en sentido horizontal, ya que para bloquear ángulos altos funcionan muy bien, además no se quiso comprometer las vistas al exterior, la iluminación natural, la reflectancia al interior y se pensó en mejorar la luz difusa al interior del espacio, así como contemplar no modificar aspectos térmicos de manera negativa en el interior del espacio.



Figura 62. Elementos de protección solar para fachada Sur en caso estudio. Elaboración propia.

Por otro lado, se pensó en que estos elementos formaran parte de la arquitectura del edificio. También cabe mencionar que se realizaron pruebas en el heliodón del Laboratorio de Edificación Sostenible de la

UNAM, ver Figura 63. Donde se analizaron las mismas fechas que en la carta solar, (solsticio verano, solsticio invierno y equinoccios) para verificar su funcionamiento, la estrategia se realizó en una maqueta escala 1:50 esquemática del prototipo seleccionado para la solución.



Figura 63. Interior de maqueta caso estudio con elementos de protección solar sobre Heliódón. Elaboración propia.

Como resultado se obtuvo esta fachada que se integra al edificio, contemplando los ángulos solares previamente analizados con base a la geometría solar, recordando que el fin de esta estrategia es mejorar las condiciones de confort térmico interior. En la siguiente figura se muestra la estrategia aplicada a la maqueta del caso estudio, de igual forma se colocó sobre el Heliódón y se realizaron diferentes pruebas de trayectoria solar, en los equinoccios y solsticios. Como había de esperarse la filtración de incidencia solar se bloqueó de equinoccio de primavera a equinoccio de otoño.

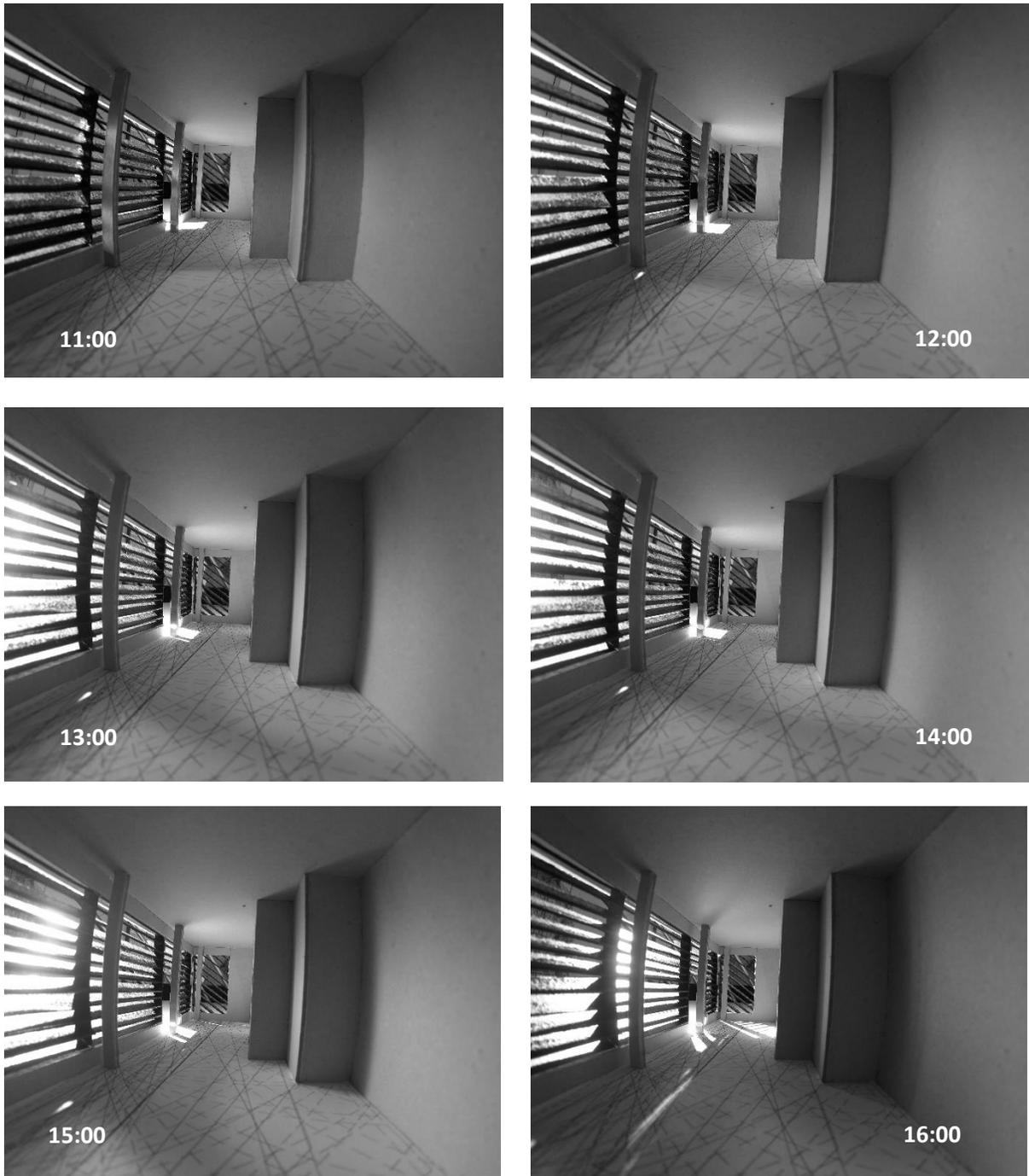


Figura 64. Trayectoria solar en equinoccio sobre maqueta 1:50 con Heliodón. Elaboración propia.

Anteriormente se realizó el modelado 3D del caso estudio con el fin de aplicar las ideas iniciales, por lo que, una vez obtenida la solución para elementos de protección solar, se generó el recorrido anual de la trayectoria solar para también cerciorarse por este medio que estos funcionaran adecuadamente.

Recorrido solar por meses de la propuesta de diseño para elementos de protección solar en caso estudio.

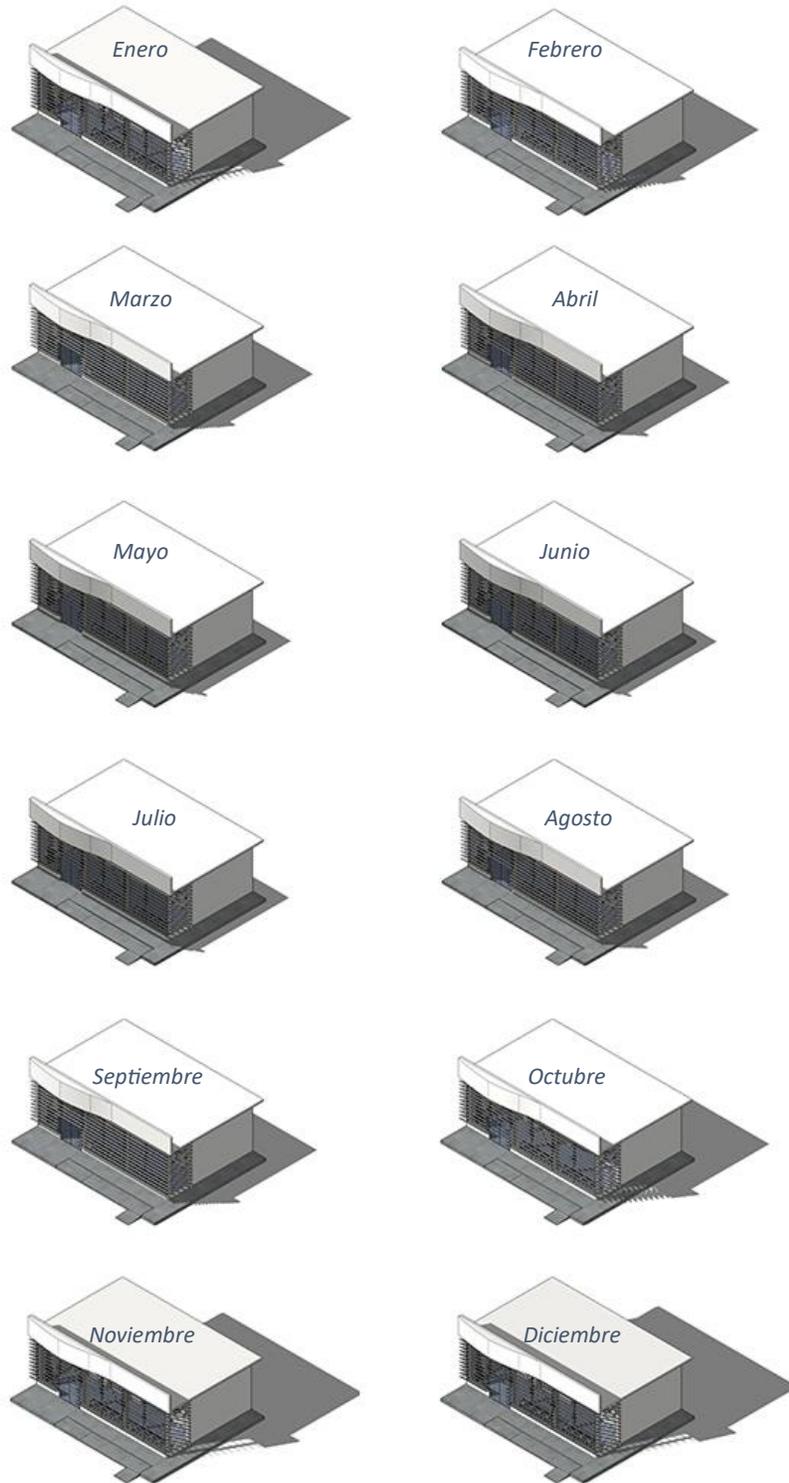


Figura 65. Incidencia de radiación solar anual en caso estudio. Elaboración propia.

En la figura 65 se aprecia el modelo 3D del caso estudio el cual se realizó mediante el software de Sketch Up, en las capturas se puede ver en el recorrido anual de la trayectoria solar donde se puede comprender de mejor forma como llega la incidencia de radiación solar a la fachada sur en todos los meses del año.

4.4 Simulación térmica

Partiendo de la metodología y parámetros sobre el simulador térmico, las consideraciones de simulación y las propiedades termofísicas del caso estudio. Se utilizó el software Grasshopper mediante Rhinoceros como herramienta de visualización, la simulación térmica se llevó a cabo con las herramientas de Ladybug: Honeybee y Honeybee Energy, estos plugin proporcionan 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, da la opción de revisar otras variables como: 1) Consumo de energía por climatización del edificio, 2) Evaluación de opciones de fachada de sobrecalentamiento, 3) Ventilación natural, 4) Control de iluminación natural y ahorro en el consumo energía eléctrica para iluminación, y 5) Protección de radiación solar directa, entre otras. 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).

Acerca de Honeybee, 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).

Cabe mencionar que, 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). Es posible programar de manera horaria las cargas internas (iluminación, equipo eléctrico y mecánico, actividad de los usuarios, etc.). Los resultados incluyen flujos de calor por: conducción, radiación solar directa, infiltración y ventilación; cargas térmicas internas y costos por climatización, entre otras variables.

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

Tabla 17. Variables de los softwares utilizados. Elaboración propia.

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 66).

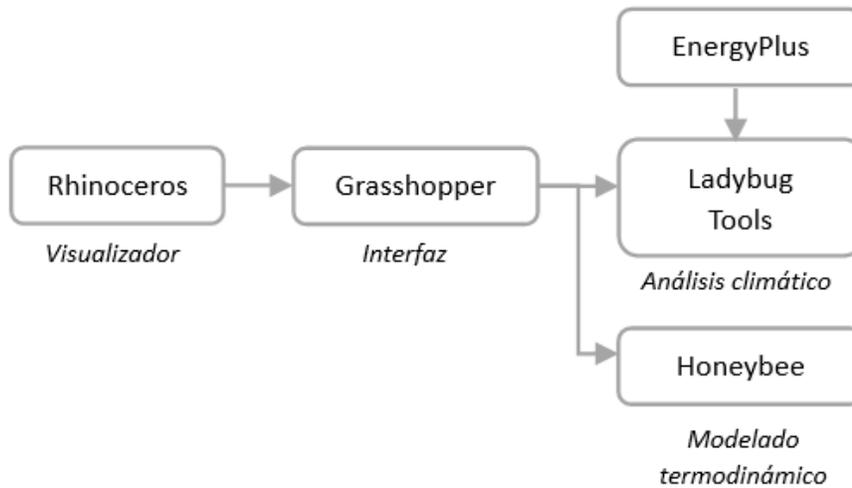


Figura 66. Metodología para simulación termoenergética. Elaboración propia.

4.4.1 Archivo meteorológico

Se generó un archivo meteorológico de la ciudad de Mexicali, Baja California, utilizando el software Meteonorm, que cuenta con bases de datos de estaciones meteorológicas certificadas ante la World Meteorological Organization (WMO), además permite extrapolar datos a lugares donde no se cuenta con este tipo de estaciones. El método de estimación de Meteonorm tiene como referencia de cálculo una combinación de una base de datos y algoritmo según un esquema predeterminado. El usuario especifica una localización particular para la cual se requieran datos meteorológicos, y presenta los datos en una estructura deseada y formato requerido tales como: TMY2, TRNSYS o DOE, entre otros.

Aunque el programa se basa en datos medidos, los archivos meteorológicos generados tienen inconsistencias según sean elegidos para el cálculo el modelo mensual u horario. El modelo mensual sobrestima la radiación total en superficies inclinadas en $\pm 3\%$ por mes y -2% para el promedio anual. El modelo horario (el cual se recomienda para análisis bioclimático) subestima la radiación total en superficies inclinadas en 3% por mes en verano y $+10\%$ en invierno. Sin embargo, la radiación total en invierno es menor

lo que repercute en un efecto en el promedio anual del orden del 2%. (Luna, A. 2011). Por lo cual, una vez realizadas las primeras simulaciones se optó en utilizar el archivo meteorológico de la zona 15 de El Centro, CA. De la base de datos meteorológicos de Energy Plus, este EPW contiene información por largos periodos incluyendo más variables dentro de sus datos medidos, por la cercanía a la zona de estudio se decidió utilizar este archivo.

4.4.2 Periodo de análisis

Para el periodo de análisis se realizó anual, dividiendo en periodo frío y periodo cálido. Además, se incorporaron los solsticios de invierno y verano, así como los equinoccios.

4.4.3 Cargas internas

Se consideraron las actividades del usuario, uso de iluminación artificial y equipos eléctricos (con aportación de calor en Watts); actividades destacadas durante los días de trabajo de la semana. Las condiciones de carga térmica del espacio están determinadas a partir de los parámetros presentados en la tabla.

Parámetro	Característica	
Número de usuarios	13	
Temperatura de control de termostato	Verano	24°C
	Invierno	21°C
Actividad	Nivel de actividad	Pasivo a moderado
	Tasa metabólica promedio	0.90 met
Nivel de arropamiento	Verano	0.50 clo
	Invierno	1.00 clo
Cargas internas	Equipos	100 w/m ²
	Iluminación	10 w/m ² -300 lux

Tabla 18. Parámetros de simulación. Elaboración propia.

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 termofísicas 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 termofísicas 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.

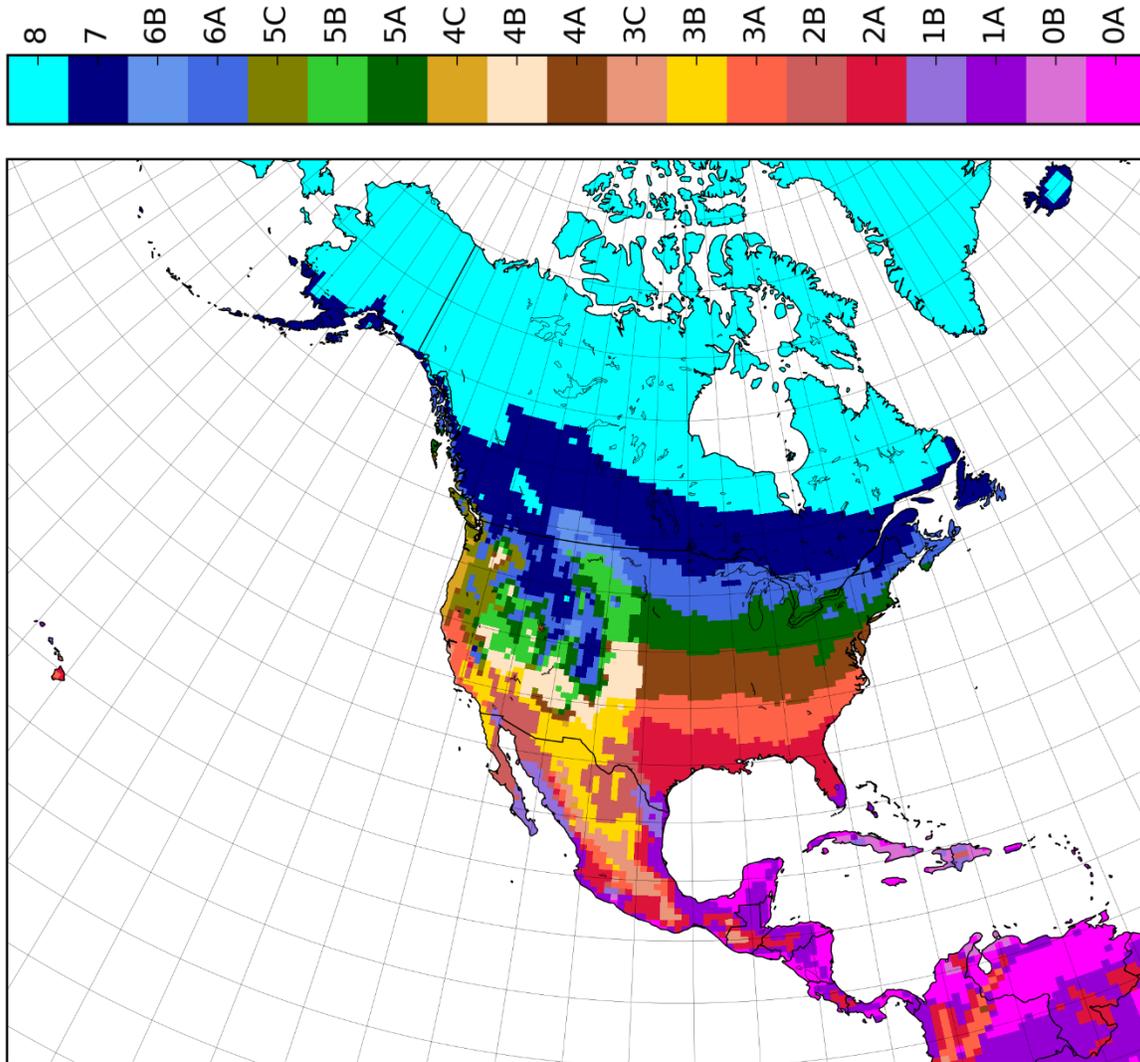


Figura 67. Mapa de zonas climáticas, ASHRAE 2019. Recuperado de CoveTool por Aguirre (2022).

4.5 Metodología de simulación

Una vez diseñados los elementos de protección solar para el caso estudio, verificar su funcionamiento en ambos periodos se procedió a modelar dicha estrategia en el software de Rhinoceros 3D, utilizando la geometría que ofrece la interfaz del programa. Primeramente, se modelaron los espacios que componen al edificio, sala de espera, caja, bóveda, comedor y baños, así como puertas, ventanas y elementos de sombreado como el volado de fachada.

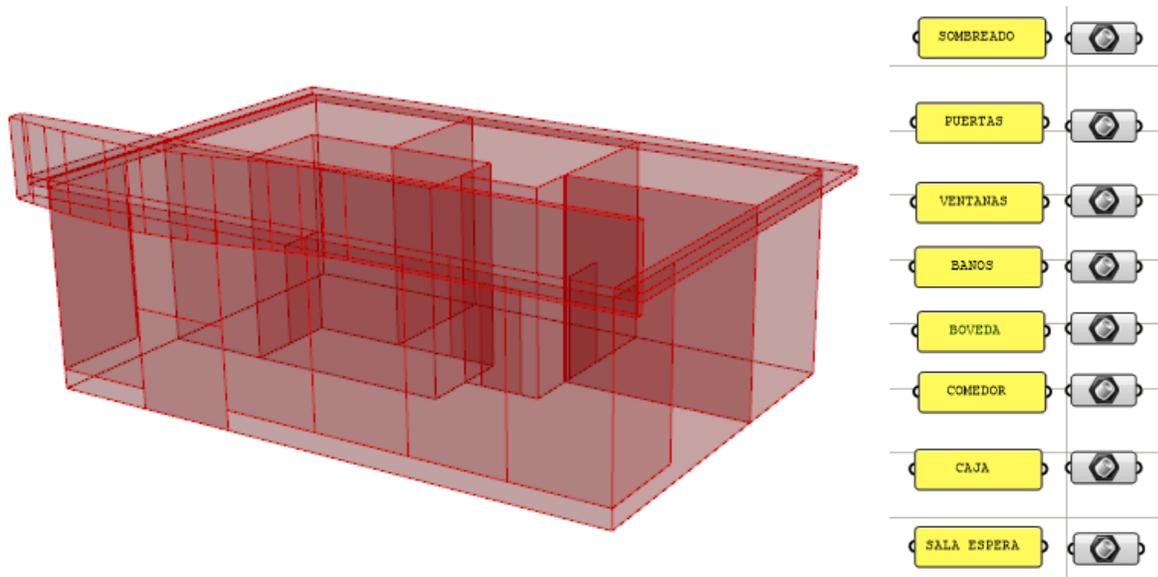


Figura 68. Modelado 3D caso estudio por espacios, visión rayos x. Elaboración propia mediante Rhinoceros 3D.

Se puede apreciar en la figura 68 con la visión rayos x que el modelado tiene diferentes geometrías que conforman el edificio completo. Además, en la figura se aprecia como cada uno de los espacios y elementos arquitectónicos están por separado generando en si la composición mostrada anteriormente. Cada uno de los espacios tiene una configuración donde se agregaron parámetros como uso horario de iluminación, usuarios y equipamiento, a continuación, se verán algunos de estos. Para el siguiente ejemplo se tomará uno de los espacios dentro del edificio para mostrar la metodología aplicada al modelo base, se tomará el espacio de sala de espera, en el cual primeramente se aprecia la forma en que pasa de una simple geometría a un modelo energético, ver Figura 69.

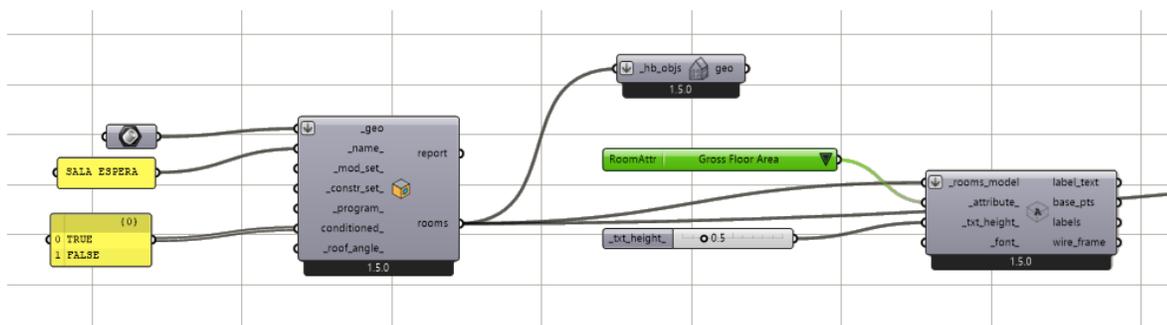


Figura 69. Algoritmo para generar el espacio: sala de espera. Elaboración propia mediante Rhinoceros y Grasshopper.



Figura 70. Algoritmo para generar la actividad metabólica al espacio sala de espera. Elaboración propia mediante Grasshopper.

Una vez teniendo el espacio en formato de modelo energético se procesó la actividad metabólica de los usuarios en función de las actividades que se estarían realizando en este espacio (ver Figura 70). Tomando en cuenta el área total del espacio y el número máximo de usuarios, así como la altura (1.70m) y el peso promedio (70k) de los usuarios, la potencia máxima aportada por actividad en Met, generando de este modo el aporte calórico por parte del usuario. Por otra parte, se agregó el uso horario de los niveles de ocupación del espacio. En fines de semana el calendario permanece en ceros puesto que el edificio permanece cerrado, pero entre semana si hay flujo de usuarios. Para obtener el nivel de ocupación se tomó la potencia máxima multiplicada por actividad desarrollado en el espacio, dividiendo entre 60 minutos que aporta una hora, este resultado multiplicado por el número de minutos que realizo la actividad, después este resultado se dividió entre la potencia máxima del inicio. Generando así un horario hipotético con base al tiempo que el usuario realizó la actividad, por ejemplo $(120w / 60m) \times (15m) = 30/120w = 0.25w$ para las 9:00 am. Donde la sucursal recién abrió puertas al usuario, este al estar parado en movimiento ligero utiliza una potencia individual de 120 watts, estos se dividen entre 60 minutos para después ser multiplicados por 15 minutos que permaneció en el espacio, finalmente se dividen los watts resultantes entre la potencia máxima (30w/120w) dando como resultado 0.25w de potencia durante las 9:00 horas. En la Figura 71 aparece dicho ejemplo, solo que el calendario permite decimales en número enteros, se redondeó el aporte de la potencia aportada.

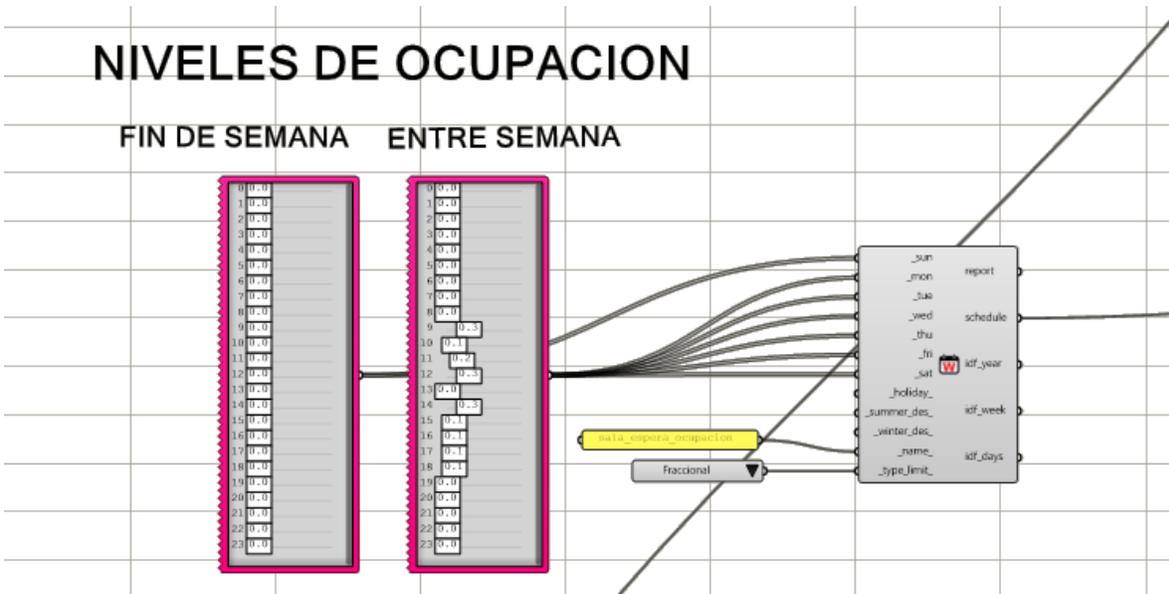


Figura 71. Algoritmo para niveles de ocupación de las personas. Elaboración propia mediante Grasshopper.

Por otro lado, se tomaron como referencia los 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, para los niveles de iluminación, estos fueron creados para cada uno de los espacios que conforman el edificio.

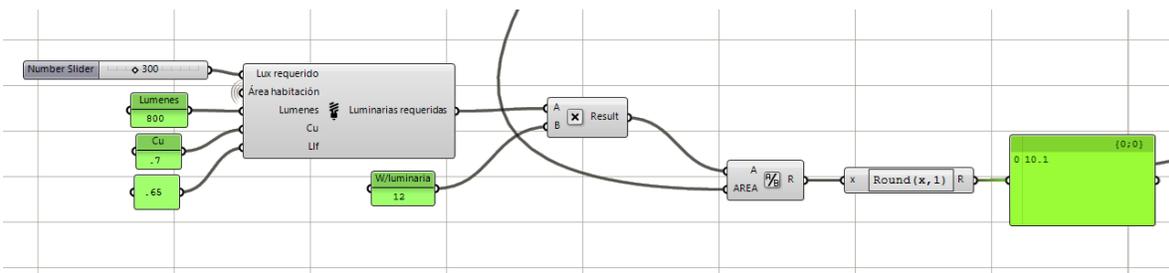


Figura 72. Algoritmo para iluminación. Elaboración propia mediante Grasshopper.

En la Figura 72 se aprecia el número de lux requeridos para salas de espera, así como los lúmenes y los valores de Cu y Lift, dando así los watts que se consumen por luminaria de 12w, se generó contemplando el área de dicho espacio. Además, se diseñó un horario según el nivel de ocupación, ya que a diferencia de la actividad realizada por el usuario la iluminación aporta calor y energía siempre, es decir; los fines de semana este espacio permanece con las luces encendidas desde que anochece hasta que amaneca, ya que por el tipo de inmueble es necesaria la iluminación nocturna. Mientras que por el día permanecen las luces

apagadas, por otra parte, entre semana las luces del edificio permanecen encendidas durante la jornada laboral y por las noches estas permanecen apagada.

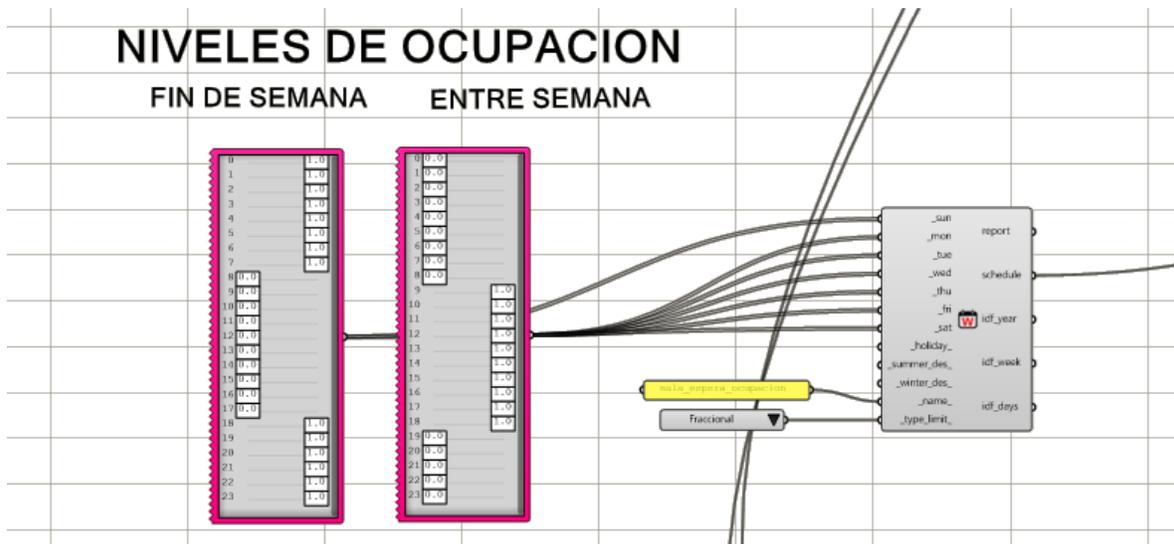


Figura 73. Algoritmo para niveles de ocupación de iluminación. Elaboración propia mediante Grasshopper.

Siguiendo este mismo patrón de parámetros, se genera otro nivel de ocupación para el equipamiento de dicho espacio, donde en la sala de espera se cuenta con escritorio ejecutivo con un teléfono y una laptop, los cuales funcionan de lunes a viernes en un horario de 9:00 a las 18:00 horas, siguiendo la metodología se calculó el aporte que estos equipos generan.

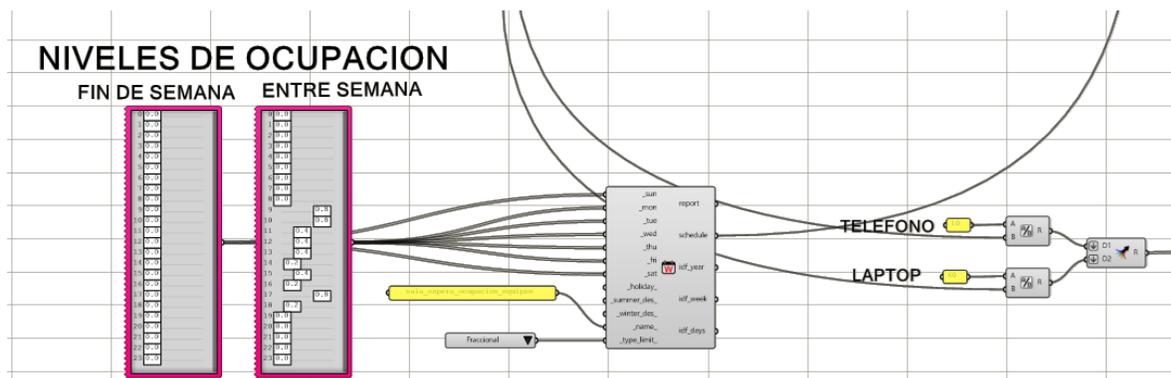


Figura 74. Algoritmo para niveles de ocupación de los equipos. Elaboración propia mediante Grasshopper.

El resultado de este proceso se agregó al programa del que se partió, utilizando un programa base de Energy Plus para oficinas pequeñas, por las dimensiones del caso estudio, integrando las variables que se modificaron anteriormente.

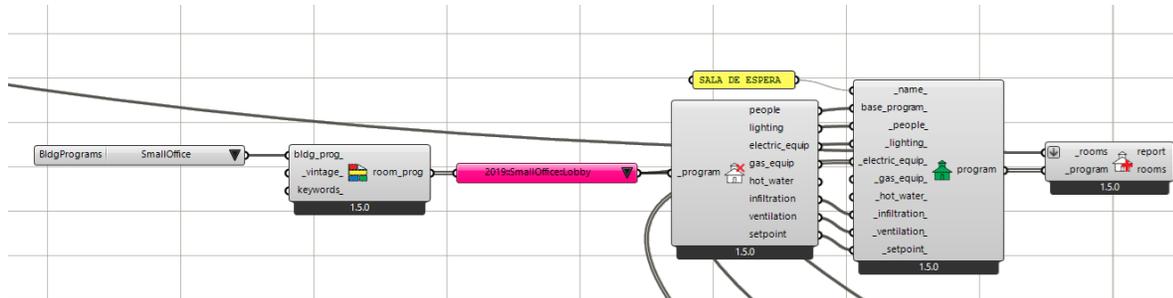


Figura 75. Algoritmo para programa base. Elaboración propia mediante Grasshopper.

Una vez realizado este proceso en cada uno de los espacios que conforman al edificio (sala de espera, caja, bóveda, comedor y baños) habiendo algunas variantes en algunos de los espacios, como por ejemplo en la bóveda no se contempló ningún equipamiento. Es importante mencionar que cada espacio modelado energéticamente se realizó de forma individual, es decir este proceso se repitió cinco veces para poder obtener el modelo energético. Posteriormente a los espacios finales con el programa energético se le agregaron parámetros como: tipo de construcción, zona climática 2 – Hot y aire acondicionado modificando el COP. Se agregaron los elementos de sombreado, tanto los volados que se proyectan en el edificio como los elementos de protección solar, generando de igual forma la geometría mediante Rhinoceros y aplicándola directamente al modelo energético.

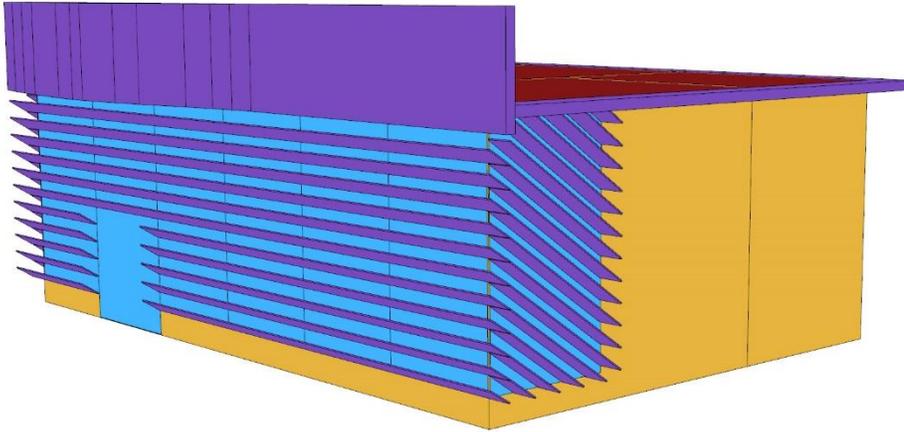


Figura 76. Modelado energético, elaboración con Grasshopper: Ladybug tools.

Cabe mencionar que los elementos de sombreado aparecen en color morado, las superficies de cubierta en color rojizo, mientras que los muros en naranja y las ventanas en azul, esta leyenda de colores la de por default Open Studio. Para comenzar con la simulación es importante integrar estos parámetros de salida; uso energético de la zona, uso energético de HVAC, ganancia y pérdidas, métricos de confort térmico, temperaturas de caras y flujo de energía superficial.

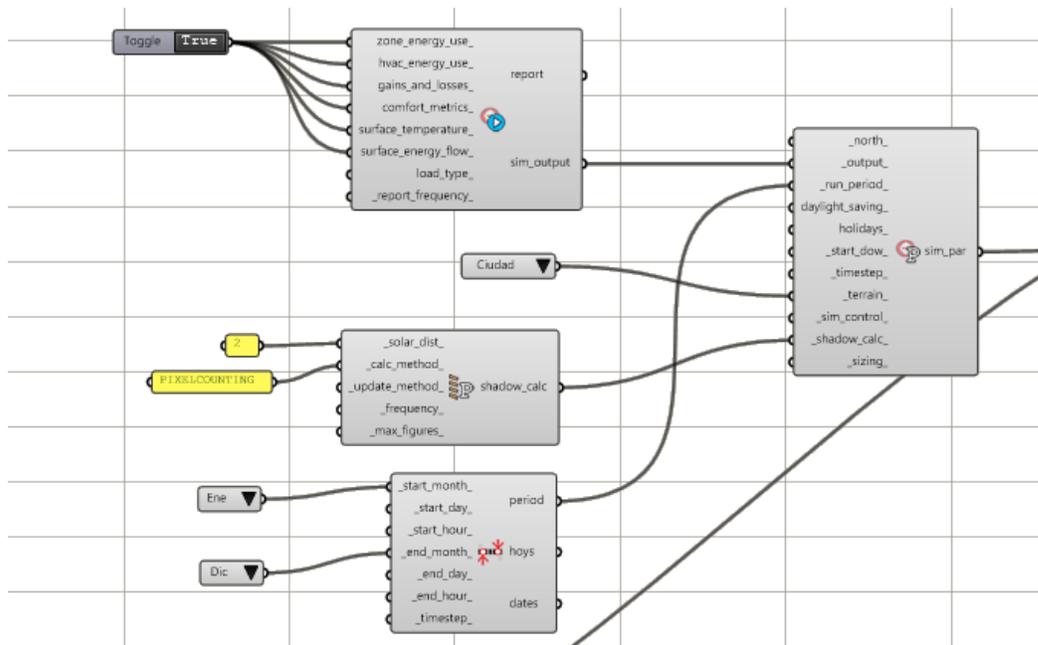


Figura 77. Programación final para correr simulación. Elaboración mediante Grasshopper.

Finalmente se corrió la simulación integrando toda esta información, además de agregar el archivo EPW, modificar las propiedades de la temperatura del suelo y el valor U de los vidrios de las ventanas (mencionados anteriormente).

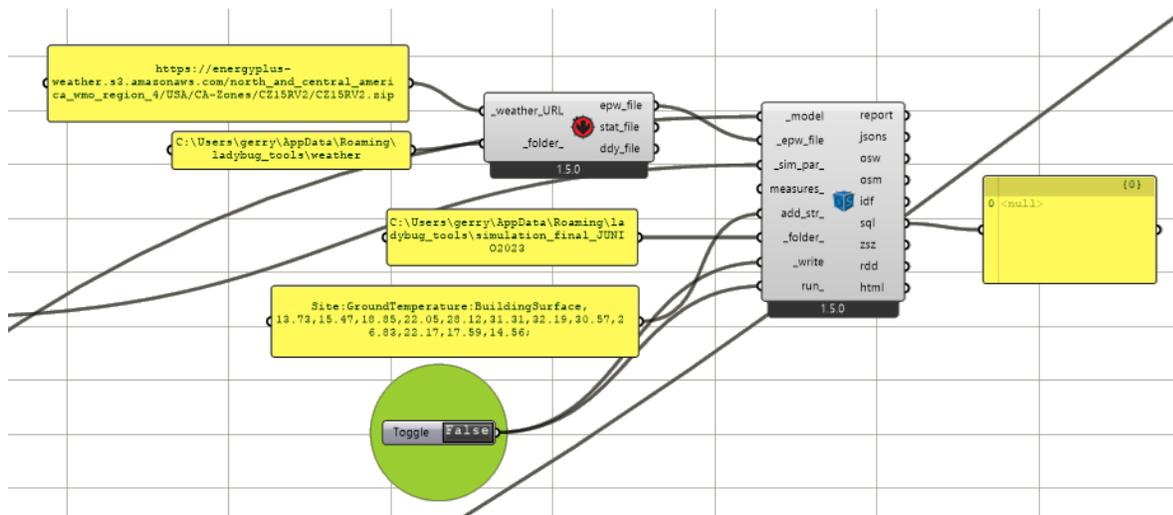


Figura 78. Algoritmos con entradas de EPW. Elaboración mediante Grasshopper.

En la figura se aprecia el algoritmo completo generado en Grasshopper, recordando que la metodología antes descrita es únicamente del espacio sala de espera, marcado en rojo.

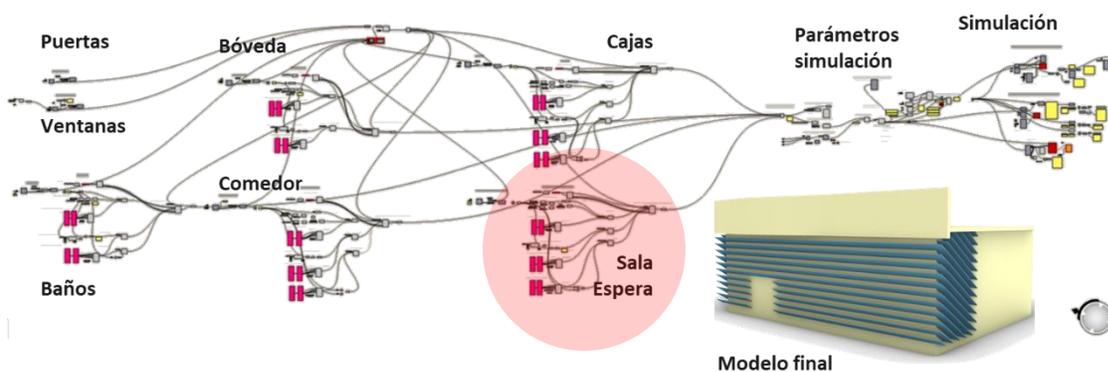
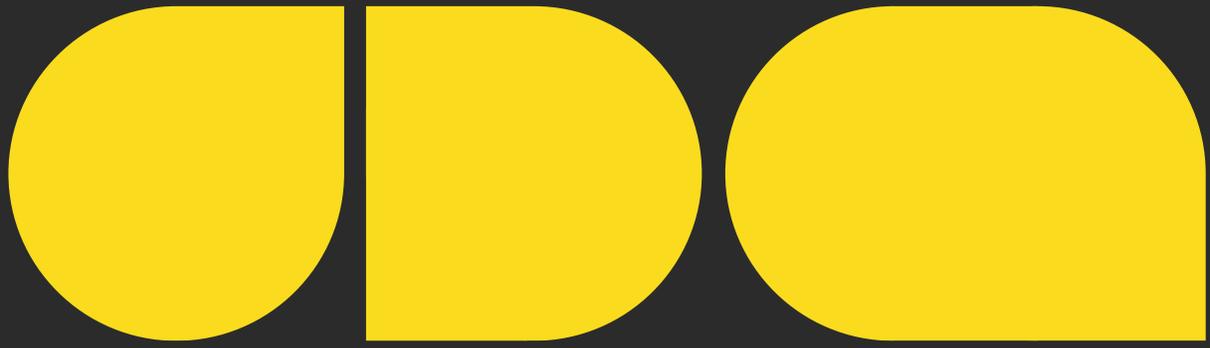


Figura 79. Programación final para simulación. Elaboración propia mediante Grasshopper.



05

Resultados y Conclusiones

5.1 Análisis de los espacios

Con base en las simulaciones realizadas se obtuvieron los siguientes datos que forman parte de los resultados finales. Se analizó el consumo energético del edificio, así como las condiciones de confort térmico y la temperatura operativa de los espacios. El análisis de los resultados se realizó por periodo anual de 8760 horas, enfocándose en el espacio *sala de espera*. Ya que por ser el que porta los elementos de protección solar de manera directa, refleja de mejor forma el comportamiento y funcionamiento de los elementos de protección solar. Sin dejar pasar de lado se incluyen los datos obtenidos de todos los espacios que conforman el caso estudio, comenzando por baños, bóveda, comedor, caja y sala de espera.

Primeramente, se analizaron los resultados del consumo energético anual del edificio, datos obtenidos del informe de salida tabular en formato: HTML de EnergyPlus, donde se logró reducir el consumo energético de 11,147.78 kWh que se requerían para mantener el edificio acondicionado, a 7,164.11 kWh ya una vez aplicados los elementos de protección solar, una reducción del 36% electricidad. La simulación demuestra que el implemento 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.

Posteriormente se analizó el confort térmico, logrando disminuir la temperatura operativa de todo el caso estudio y consiguiendo estar dentro de la zona de confort todo el periodo cálido. Para el análisis de temperatura se utilizó la temperatura media, además que para calcular la zona y los límites de confort térmico se utilizó el modelo matemático del ASHRAE 55 al 80%, integrando el concepto de termoprefendum 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 a la temperatura neutra, colocándola dentro de la zona de confort térmico. De este modo, la temperatura del caso estudio 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 sienten cómodas por diferentes factores, como arropamiento, sobrepeso o enfermedades. El termoprefendum se calculó con la siguiente expresión (Auliciems, 1992): $T_p = 17.6 (0.31 * (T_m)) \pm 2.5$. Donde T_p es el termoprefendum y T_m es la temperatura media mensual, ambos en °C. En este punto, es importante señalar que la temperatura media mensual es el valor representativo del sitio en un periodo de tiempo relativamente largo.

Como se mencionó anteriormente, en un clima cálido seco como el de la zona del caso estudio es imposible permanecer en espacios cerrados sin climatización artificial, por ende, para esta simulación se contempla el aire acondicionado a partir de los 24°C de temperatura ambiente. Se intentó con simulaciones previas eliminar el sistema de climatización artificial y dejar únicamente la estrategia de sombreado, recordando el análisis del clima las temperaturas son muy altas que es casi imposible llegar a zonas de confort únicamente con elementos de protección solar, en los resultados se puede apreciar que esta estrategia es un complemento que ayuda a mejorar la temperatura y la eficiencia energética. La estrategia no busca eliminar el uso de climatización artificial, sino eficientar y mejorar las condiciones de confort térmico interior de los espacios en donde sea aplicada.

5.1.1 Baño

Se comenzó por el baño, este espacio está ubicado al noreste del edificio, es decir percibe radiación solar durante las primeras horas del día por el lateral derecho (ver Figura 80). Es un espacio al que solo los empleados pueden acceder y por su función no hay actividades por periodos largos.

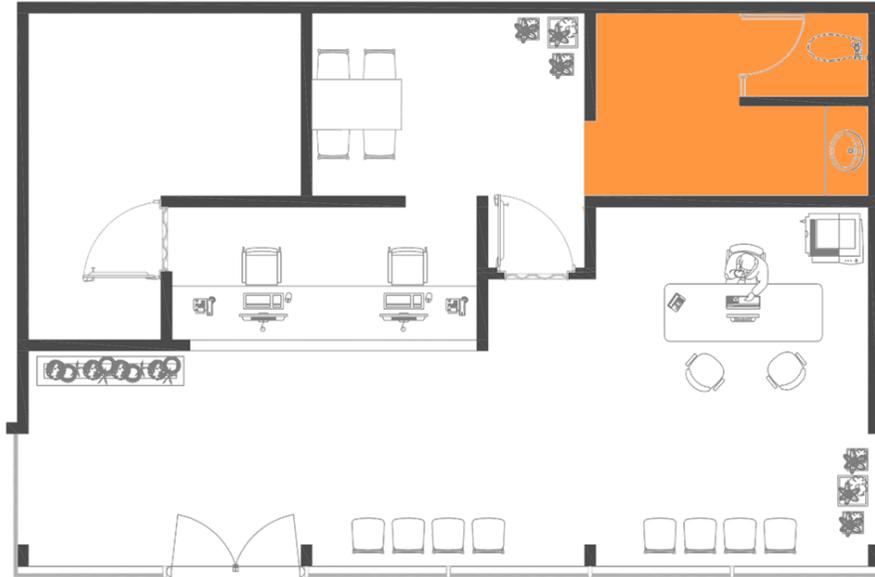


Figura 80. Planta arquitectónica caso estudio: análisis de baño. Elaboración propia.

El espacio tiene un nivel de ocupación bajo, no hay usuarios durante largos periodos al día y por lo tanto se hace menor uso de iluminación y equipamiento. En la siguiente tabla se puede observar los parámetros introducidos al espacio para simular, además de los parámetros generales que se mencionaron anteriormente. Partiendo desde la premisa de disminuir el consumo energético, se logró reducir la demanda que ocasiona el aire acondicionado. Como se muestra en la Figura 80, sin el implemento de los elementos de protección solar, el baño consumía alrededor de 513 kWh al año, mientras que al aplicar la protección solar el consumo energético de dicho espacio disminuyó a 402 kWh al año.

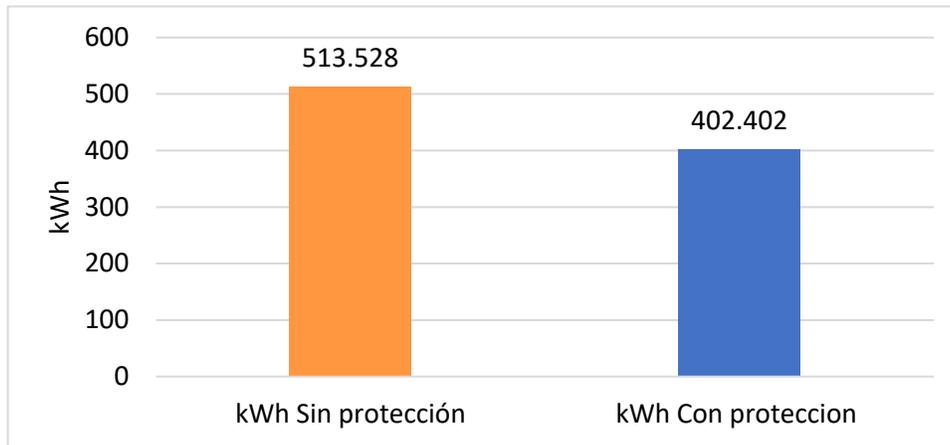


Figura 81. Consumo energético por aire acondicionado del baño. Elaboración propia mediante Energy Plus.

Parámetros de simulación			
Área	9.70 m2	Luminarias	7w
Actividad metabólica	Sentado	Área simulada	11.25 m2
Nivele de ocupación	Lunes a viernes	Equipamiento	Extractor
Luxes	200	Aire acondicionado	Cop 3.29 (seer 12.44)
Lúmenes	560	Potencia individual	104 w

Tabla 19. Parámetros de simulación para baño. Elaboración propia.

Lo cual se traduce en una disminución de la capacidad máxima de diseño de aire acondicionado que se requiere para mantener en confort el baño del caso estudio. En la tabla 20 se observa que la potencia máxima de diseño según la simulación es de 624.44W sin el diseño de elementos de protección solar, equivalente a 0.17 Ton. Mientras que con los elementos de protección solar disminuye a 0.15 Ton de inyección de aire acondicionado para el área del baño, habiendo una disminución en la climatización artificial por enfriamiento.

Baños	Potencia máxima de diseño w	Capacidad de unidad ton
Sin protección solar	624.44	0.17
Con protección solar	545.68	0.15

Tabla 20. Disminución de la potencia máxima de diseño para A/C. elaboración propia.

Por otra parte, en la Figura 82 se muestra en el gráfico de como disminuye el consumo energético (kWh) anual del espacio antes mencionado, al aplicar lo elementos de protección solar la transferencia de calor que pasaba de un espacio a otro disminuyó, así como capacidad de aire acondicionado para enfriar el espacio.

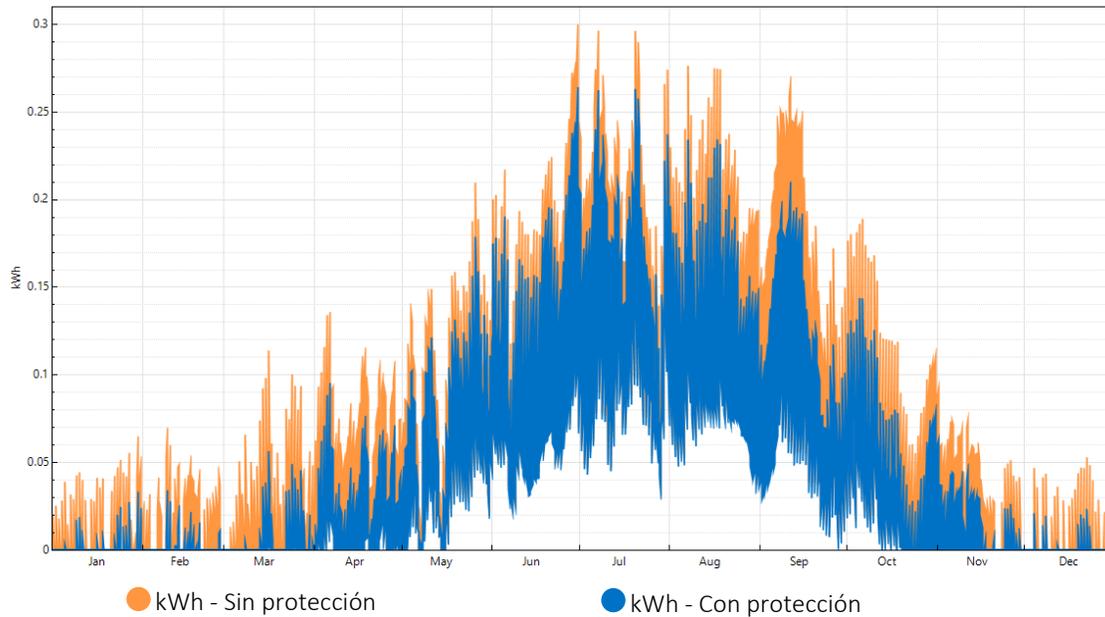


Figura 82. Gráfico de consumo energético del baño. Elaboración propia.

Como se mencionó al principio este espacio no es realmente preocupante por el uso y zonificación conforme a la orientación del caso estudio. Si bien, resulto benefactor el uso de los elementos de protección solar aun cuando este espacio no los porta directamente. Además, se logró disminuir la temperatura a lo largo de todos los meses del año, entre 0.5°C – 1°C . Ver Figura 83.

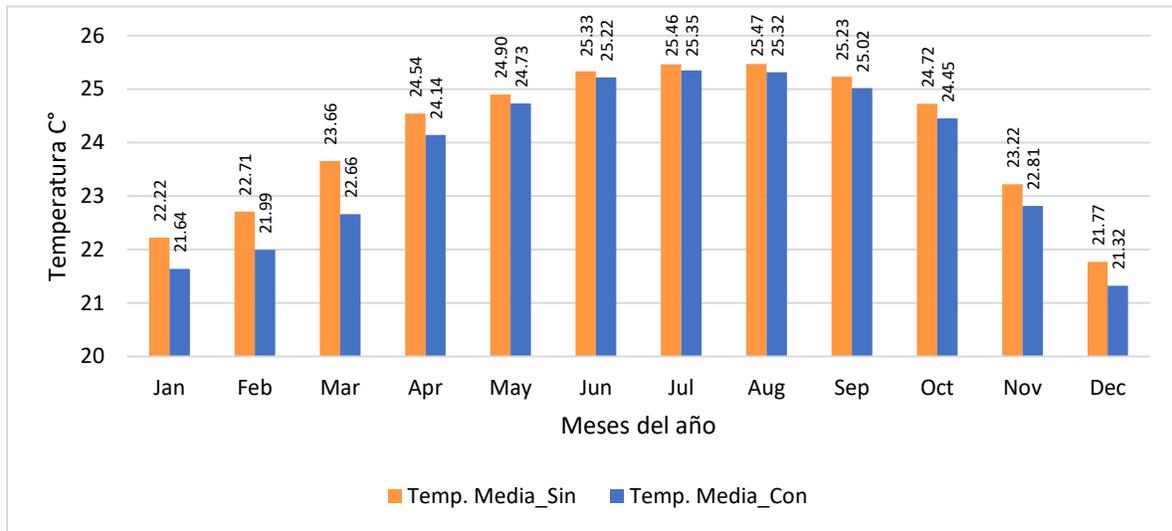


Figura 83. Gráfico de barras de temperatura operativa promedio anual del baño. Elaboración propia.

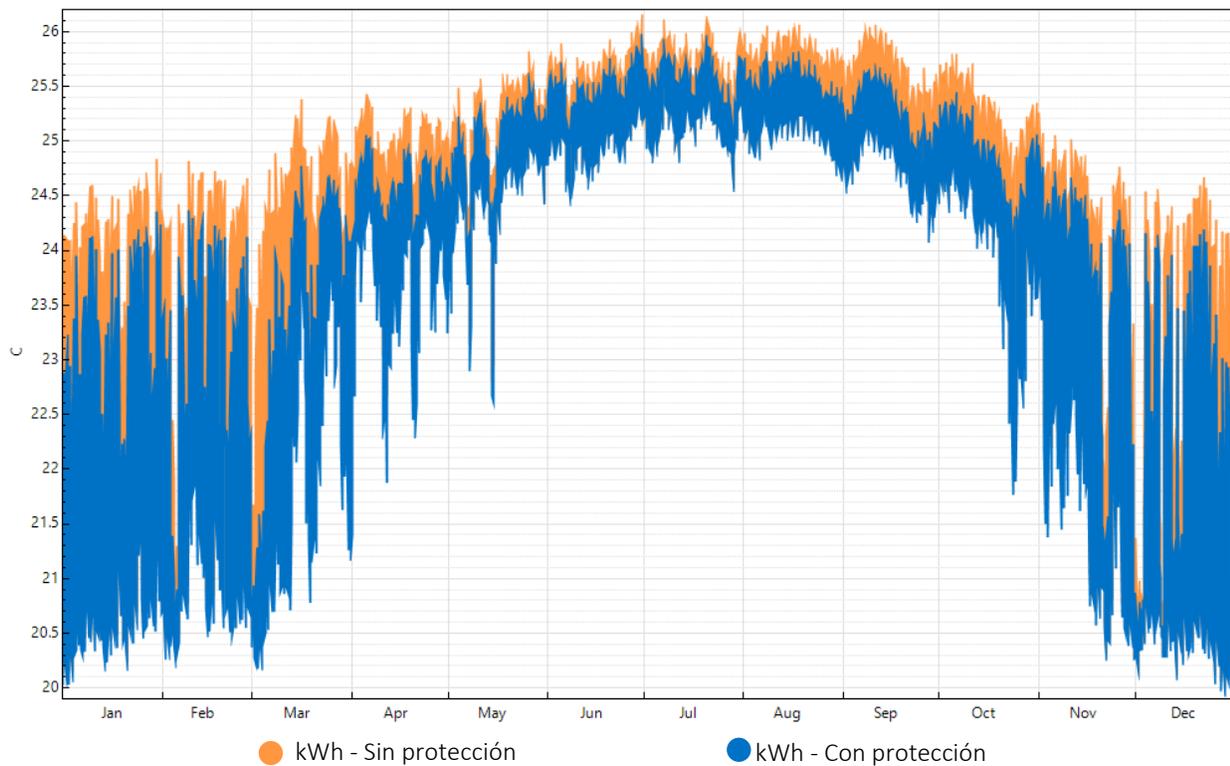


Figura 84. Temperatura operativa anual del baño. Elaboración propia.

Finalmente, en la Figura 84 se aprecia el comportamiento de la temperatura operativa del baño, donde se tienen temperaturas máximas de 21.32°C – 25.5°C en verano, logrando que este espacio sea más confortable durante todo el año y por ende se reduzca el uso de sistemas de aire acondicionado.

5.1.2 Bóveda

Continuando con el análisis de los espacios, el caso estudio cuenta con una bóveda, es un espacio pequeño al que solo acceden pocas personas y una o dos veces al día, tiene un área de 13.40 m² y el único acceso es por el área de caja.



Figura 85. Planta arquitectónica caso estudio: análisis de bóveda. Elaboración propia.

Al ser un espacio poco habitable, no es de suma importancia las condiciones de confort térmico que este alcance durante el periodo cálido, que es el que mayormente preocupa, pero dentro del análisis de la simulación resultó que este espacio al igual que el anterior muestra una mejora en el consumo energético y la temperatura operativa. En la tabla se muestran los parámetros de simulación para el espacio, de igual forma se integraron usos horarios y niveles de actividad específicamente para las funciones de este espacio.

Parámetros de simulación			
Área	13.40 m ²	Luminarias	7w
Actividad metabólica	De pie	Área simulada	15.98 m ²
Nivele de ocupación	Lunes a viernes	Equipamiento	N/a
Luxes	100	Aire acondicionado	Cop 3.29 (seer 12.44)
Lúmenes	560	Potencia individual w	125 w

Tabla 21. Parámetros de simulación para bóveda. Elaboración propia.

Al implementar los elementos de protección solar, este espacio mostró una disminución en el uso de consumo energético, reduciendo de los 390.55 kWh que se consumen al año a 366.17 kWh una vez aplicado el sistema de protección solar. Esta mejora realmente no es muy notable por el tipo de espacio y la orientación, sin embargo, como todos los espacios trabajan en conjunto este pequeño aporte ayudará a eficientar el consumo energético del caso estudio.



Figura 86. Consumo energético por aire acondicionado de bóveda. Elaboración propia mediante Energy Plus.

En la tabla 22 se observa que de igual forma hubo una disminución en la potencia máxima de diseño de aire acondicionado, reduciendo un poco el tonelaje del equipo de enfriamiento. Sin embargo, esta

disminución puede resultar que no es de gran impacto por la mínima diferencia, pero si esto se plantea en un periodo anual se apreciaría de esta forma.

Bóveda	Potencia máxima de diseño w	Capacidad de unidad ton
Sin protección solar	572.35	0.16
Con protección solar	550.13	0.15

Tabla 22. Disminución de la potencia máxima de diseño para A/C. elaboración propia.

En la siguiente figura, la temperatura operativa del espacio reduce principalmente en los meses fríos, de octubre a febrero se muestra un descenso mayor en comparación a los meses cálidos, esto debido a la temperatura ambiente de la zona de estudio.

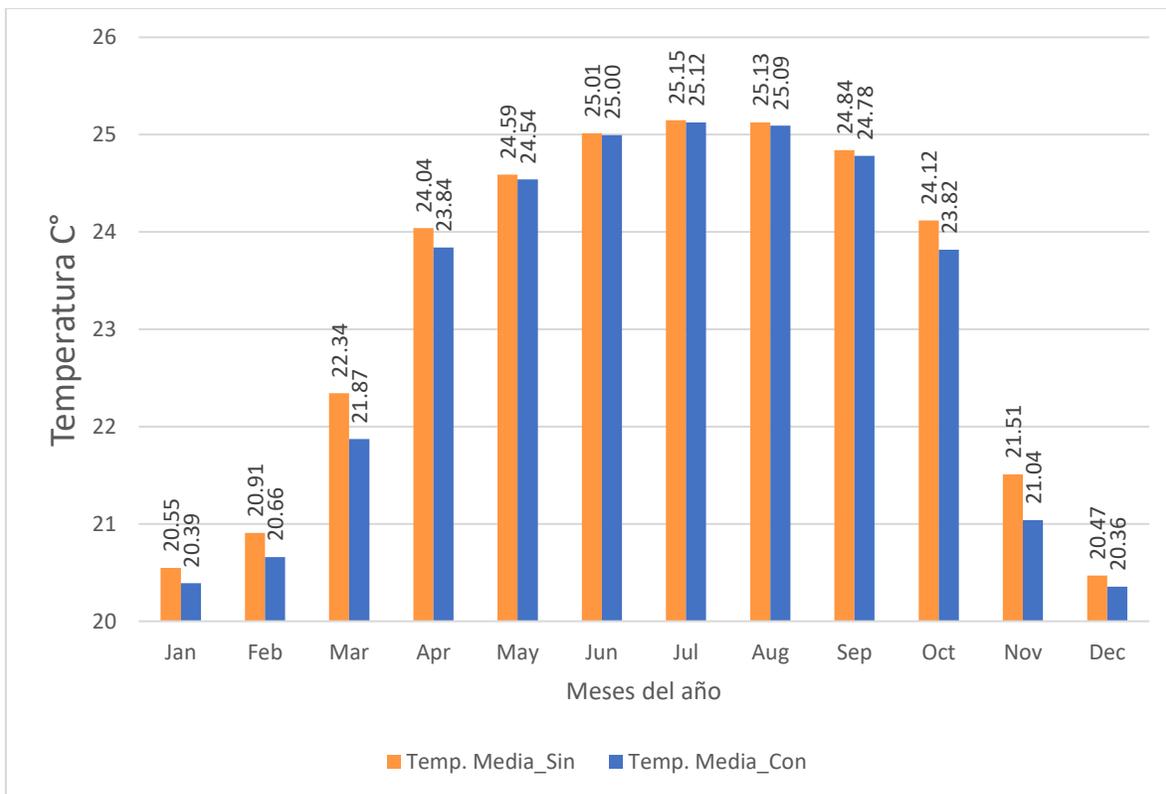


Figura 87. Gráfico de barras de temperatura operativa promedio anual de bóveda. Elaboración propia.

Los elementos de protección solar actúan de forma indirecta en el espacio analizado, es decir la transferencia de calor que se trasmite por el área acristalada que está en la fachada principal llega de forma menos directa a la bóveda, con esto logrando disminuir la temperatura operativa. (Ver Figura 88).

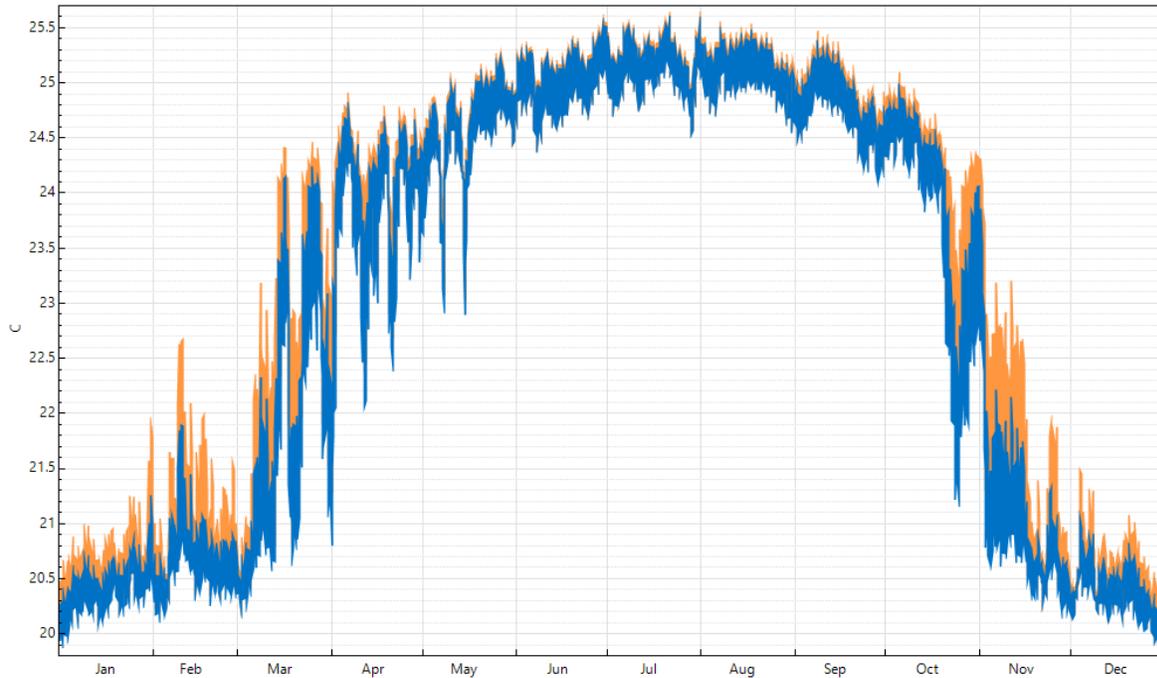


Figura 88. Temperatura operativa anual de bóveda. Elaboración propia.

5.1.3 Comedor

Este es el último espacio que tiene orientación norte, donde la radiación solar no llega de forma directa en todo el año. El espacio forma parte de la circulación para acceder a caja y al baño, por ende, hay un mayor flujo de actividad, además comparte muros con tres espacios interiores y uno al exterior.

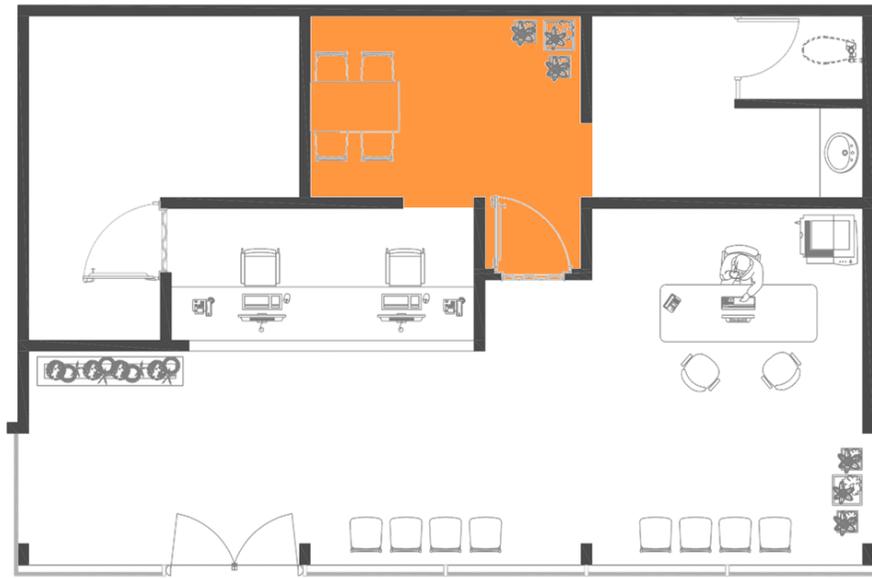


Figura 89. Planta arquitectónica caso estudio: análisis de comedor. Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestra los parámetros de simulación que fueron incluidos al espacio, donde se anexan dos actividades metabólicas, sentar y limpiar, además de la iluminación que este requiere para realizar dichas actividades. También se cuenta con un microondas para calentar comida y una cafetera para el personal. La potencia individual se considera por actividad metabólica.

Parámetros de simulación			
Área	9.70 m2	Luminarias	7w
Actividad metabólica	Sentar / limpiar	Área simulada	12.90 m2
Nivele de ocupación	Lunes a viernes	Equipamiento	Microondas / cafetera
Luxes	200	Aire acondicionado	Cop 3.29 (seer 12.44)
Lúmenes	500	Potencia individual w	104 w / 282 w

Tabla 23. Parámetros de simulación para comedor. Elaboración propia.

De igual forma, el consumo energético disminuyó en el área de comedor pasando de los 400.80 kWh de consumo al año a 361.04 kWh (Ver Figura 90). En este espacio también resultó favorable el implemento de los elementos de protección solar ya que se logró además disminuir la capacidad de la potencia máxima de diseño para aire acondicionado, de los 537.56 W (0.15 Ton) a 517.69 W (0.14 Ton), viéndose reflejado en reducción de la capacidad de aire acondicionado para mantener el espacio en confort térmico (Ver tabla 24).

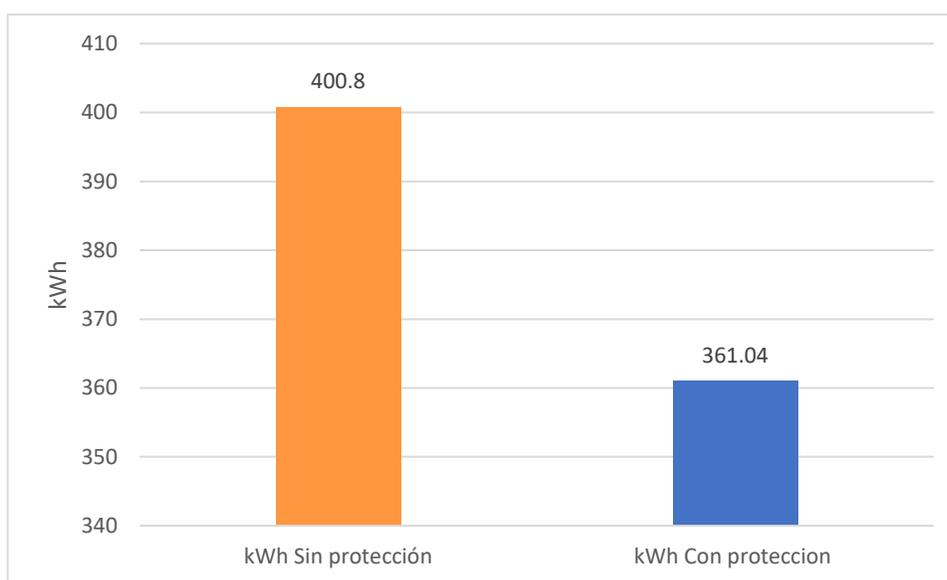


Figura 90. Consumo energético por aire acondicionado de comedor. Elaboración propia.

Comedor	Potencia máxima de diseño w	Capacidad de unidad ton
Sin protección solar	537.56	0.15
Con protección solar	517.69	0.14

Tabla 24. Disminución de la potencia máxima de diseño para A/C de comedor. Elaboración propia.

Por otro lado, la temperatura operativa del comedor descendió en todos los meses del año, notando una mejor respuesta en los meses frío, siguiendo la misma metodología de la bóveda, esto va en función de la temperatura ambiente, es decir la temperatura en el exterior no es tan elevada, manteniendo los espacios más cerca de la zona de confort (Ver figura 92).

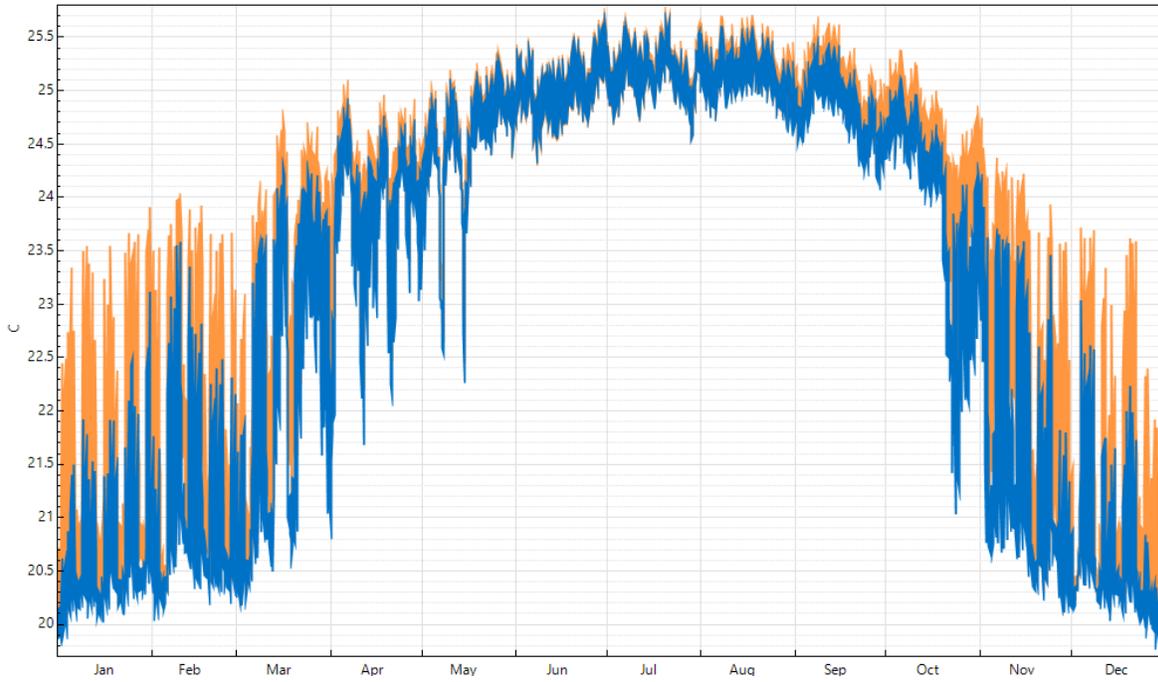


Figura 91. Gráfico de temperatura operativa anual de comedor. Elaboración propia.

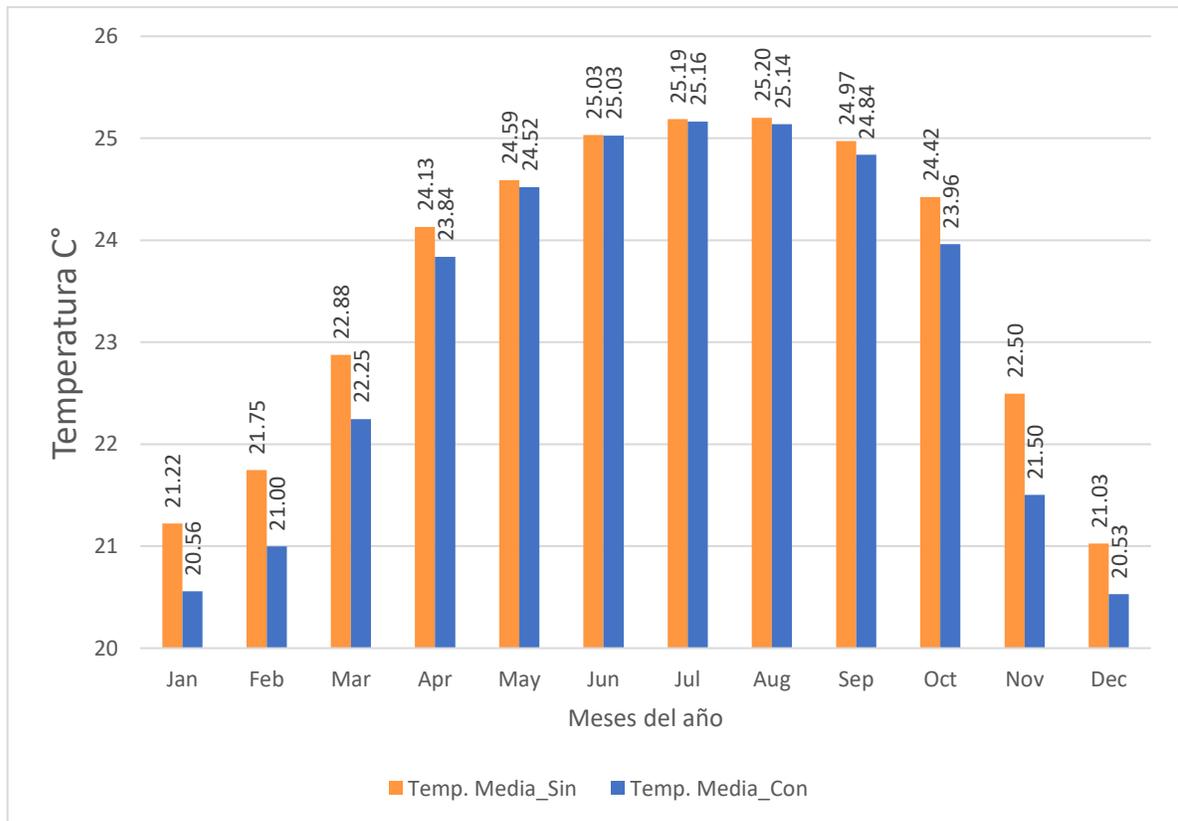


Figura 92. Gráfico de barras de temperatura operativa promedio anual de comedor. Elaboración propia.

5.1.4 Caja

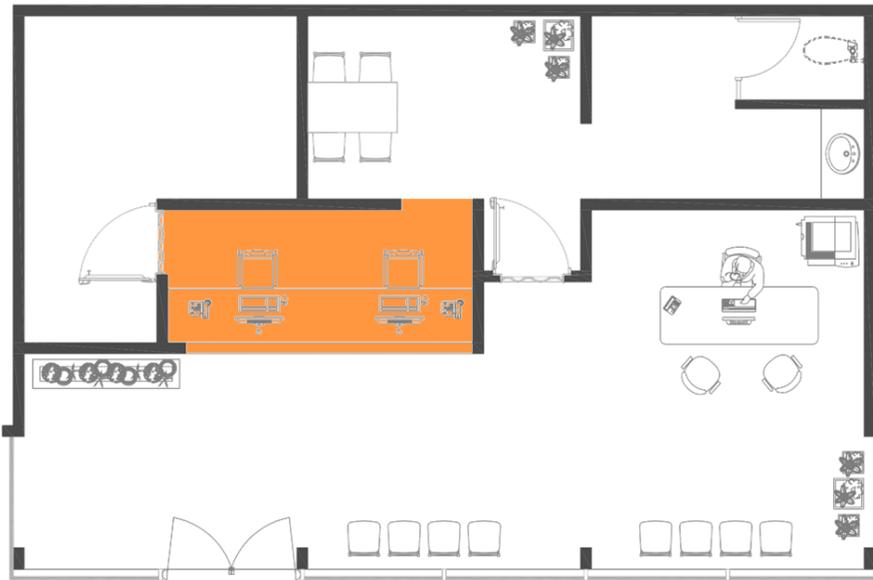


Figura 93. Planta arquitectónica caso estudio: análisis de caja. Elaboración propia.

El primer espacio de este análisis que recibe incidencia de radiación solar es la caja, es un área pequeña con un mostrador en el cual se da servicio a los usuarios. el usuario que habita el espacio realiza dos actividades, sentarse y escribir (Ver tabla 25), además de incluir cuatro equipos eléctricos: dos impresoras y dos computadoras. El equipo de aire acondicionado es el mismo para todo el caso estudio, es decir con un Coeficiente de Rendimiento (COP) de 3.29.

Parámetros de simulación			
Área	7.90 m ²	Luminarias	12 w
Actividad metabólica	Sentar / escribir	Área simulada	8.49 m ²
Nivele de ocupación	Lunes a viernes	Equipamiento	Impresora / laptop
Luxes	200	Aire acondicionado	Cop 3.29 (seer 12.44)
Lúmenes	800	Potencia individual w	104 w / 115 w

Tabla 25. Parámetros de simulación para caja. Elaboración propia.

Por otro lado, el consumo energético del espacio mostro una disminución de los 510.16 kWh anuales a 463.24 kWh anuales, viéndose reflejados principalmente en el aire acondicionado que se requiere para enfriar el espacio (ver Figura 94).

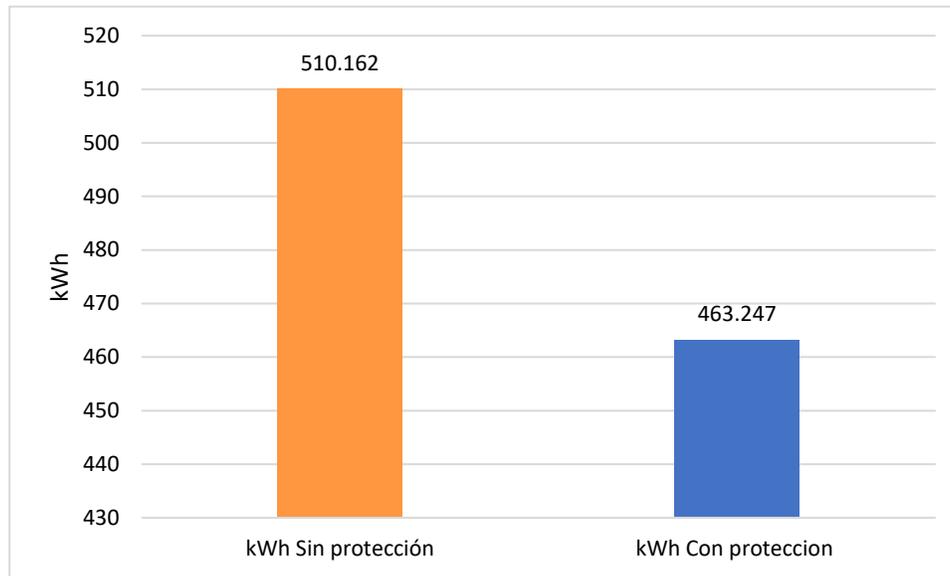


Figura 94. Consumo energético por aire acondicionado de caja. Elaboración propia.

Como se ha venido mostrando en las tablas de la potencia máxima de diseño, los espacios consumen pocos watts al año para enfriar el espacio, es decir no llegan ni a $\frac{1}{4}$ de tonelada para satisfacer los espacios antes analizados. Principalmente se debe a que son espacios pequeños, que no van más allá de los 4 m³.

Caja	Potencia máxima de diseño w	Capacidad de unidad ton
Sin protección solar	784.38	0.22
Con protección solar	747.82	0.21

Tabla 26. Disminución de la potencia máxima de diseño para A/C. elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, la caja es el primer espacio que está en contacto directo con la incidencia de radiación solar que entra por la fachada principal (sur). Por ende, las temperaturas resultantes son más altas ya que la transferencia de calor aporta mayores ganancias a este espacio.

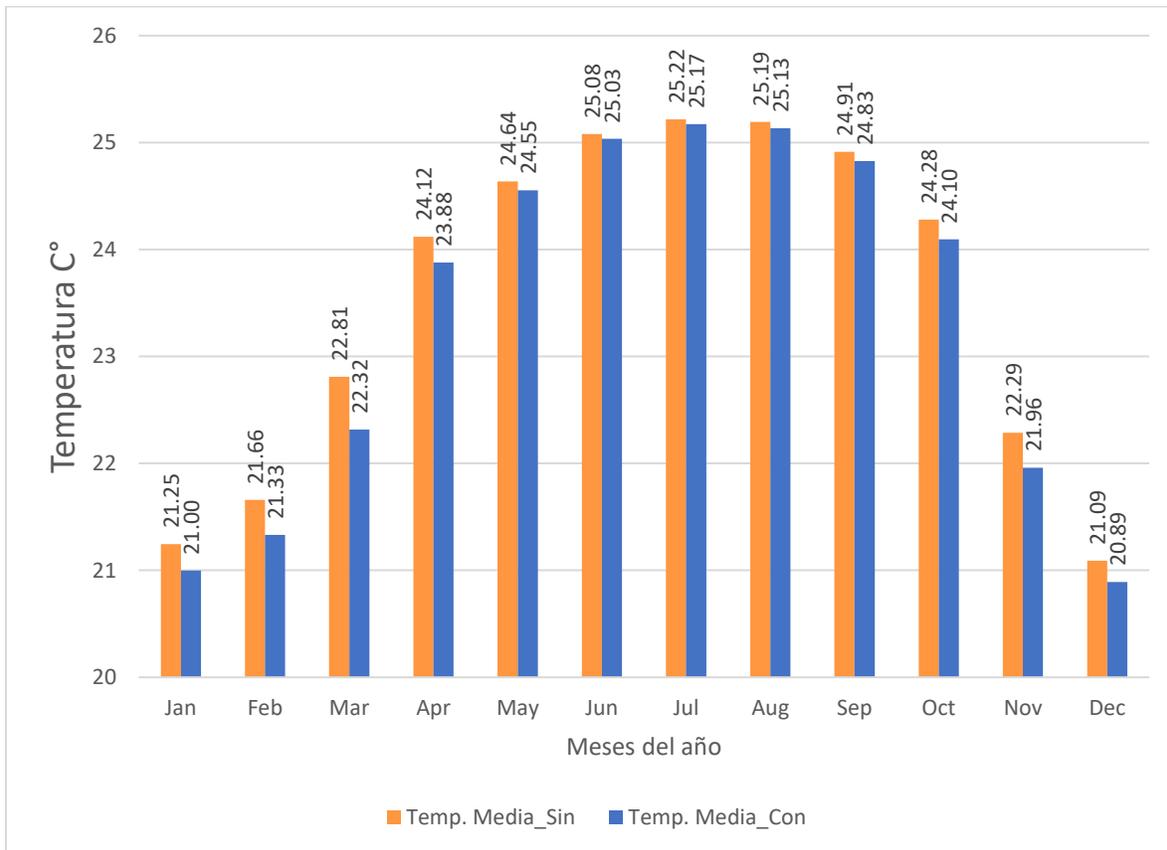


Figura 95. Gráfico de barras de temperatura operativa promedio anual de caja. Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura 95, los meses cálidos alcanzan temperaturas medias de 25°C – 26°C en promedio, al aplicar los elementos de protección solar este espacio resulta poco beneficiado puesto que es mínima la diferencia que hay entre las temperaturas operativas obtenidas, la disminución del consumo energético y la capacidad de aire acondicionado. En general esto se debe a que el espacio de caja capta muy directamente la radiación solar que se entra al espacio de sala de espera, siguiendo la ley de Fourier dice que el segundo principio de la termodinámica determina que el calor solo puede fluir de un cuerpo más caliente a uno más frío, la ley de Fourier fija cuantitativamente la relación entre el flujo y las variaciones espacial y temporal de la temperatura. Por ende, la temperatura de sala de espera que es mayor se transfiere a caja, además que es un espacio que siempre hay personal, equipamiento en uso e iluminación.

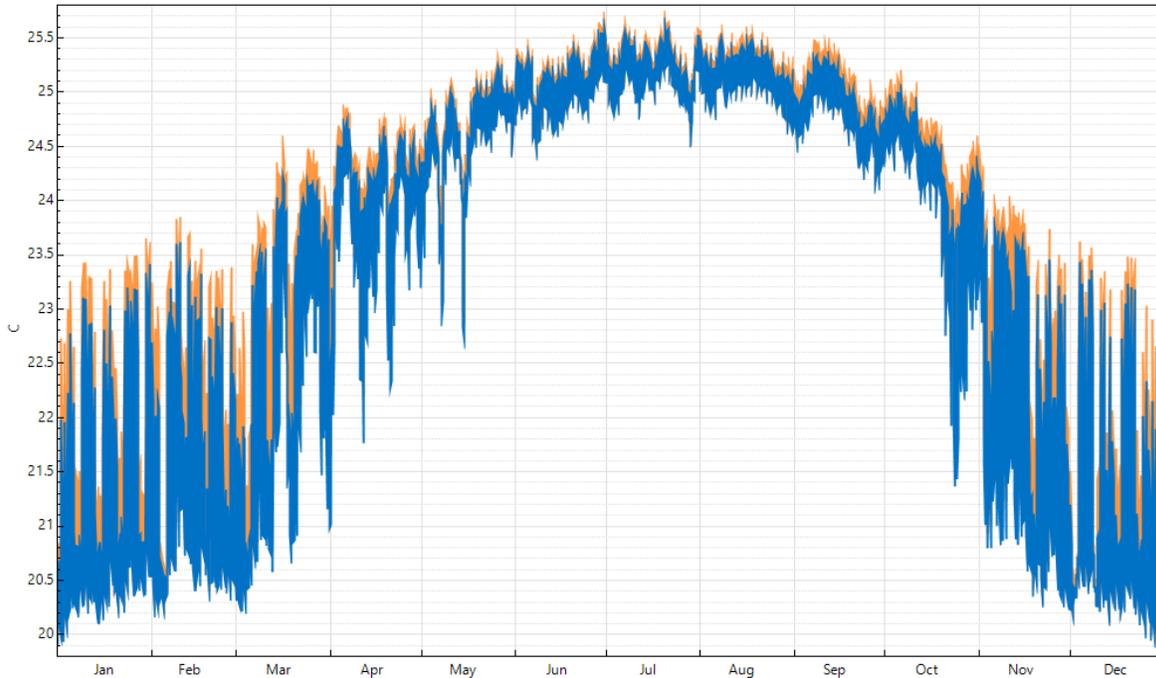


Figura 96. Gráfico de temperatura operativa anual de caja. Elaboración propia.

5.1.5 Sala de espera

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. Sala de espera es un espacio abierto donde el usuario espera su turno para ser llamado a caja o con ejecutivo, cuenta con 44.20 m² de área, dos actividades metabólicas descritas en la tabla 27. Además de equipamiento e iluminación específicamente para las actividades que se realizan en dicho espacio. Como se mencionó al principio del capítulo, el análisis se centrará y enfocará mayormente en el área sala de espera, por ser el espacio que recibe la incidencia de radiación solar por su fachada acristalada, además que este espacio es el que porta los elementos de protección solar, como se vio en los espacios anteriores estos elementos de sombreado tuvieron un efecto positivo en todo el caso estudio.



Figura 97. Planta arquitectónica caso estudio: análisis de sala de espera. Elaboración propia.

Parámetros de simulación			
Área	44.20 m ²	Luminarias	12 w
Actividad metabólica	Sentar / de pie	Área simulada	47.35 m ²
Nivele de ocupación	Lunes a viernes	Equipamiento	Teléfono / laptop
Luxes	300	Aire acondicionado	Cop 3.29 (seer 12.44)
Lúmenes	800	Potencia individual w	230 w

Tabla 27. Parámetros de simulación para sala de espera. Elaboración propia.

Cumpliendo con los objetivos planteados al inicio de la investigación, se logró disminuir el consumo energético ocasionado por aire acondicionado. Disminuyendo de los 9332.74 kWh anuales a 5571.29 kWh anuales únicamente en el espacio sala de espera, como se vio reflejado en los demás espacios que conforman el caso estudio, esta área fue la que presentó una mejora considerable aun cuando es la que mayormente está expuesta a la incidencia de radiación solar.

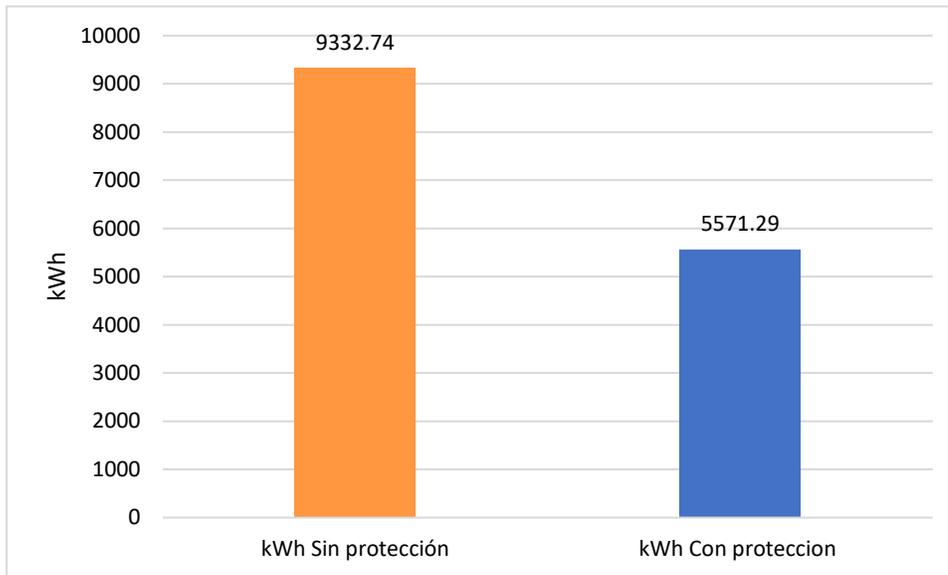


Figura 98. Consumo energético por aire acondicionado de sala de espera. Elaboración propia.

Esto se vio también reflejado en el equipo de aire acondicionado, ya que se redujo la potencia máxima de diseño para enfriar dicho espacio y con esta el tonelaje de inyección de aire. (Ver tabla 28).

Sala de espera	Potencia máxima de diseño w	Capacidad de unidad ton
Sin protección solar	8232.28	2.34
Con protección solar	5580.34	1.58

Tabla 28. Disminución de la potencia máxima de diseño para A/C. elaboración propia

Así mismo, eficientar el consumo energético con la propuesta de diseño de elementos de protección solar resultó favorable en todos los meses del año. Como se aprecia en la Figura 99, los meses que van de mayo a septiembre son los que mayormente se hace uso de aire acondicionado por las condiciones climáticas de la ciudad, estos mismos meses son los que mostraron una disminución de consumo energético bastante importante. Además, que los meses fríos también mostraron una disminución en el consumo energético ocasionado por climatización artificial.

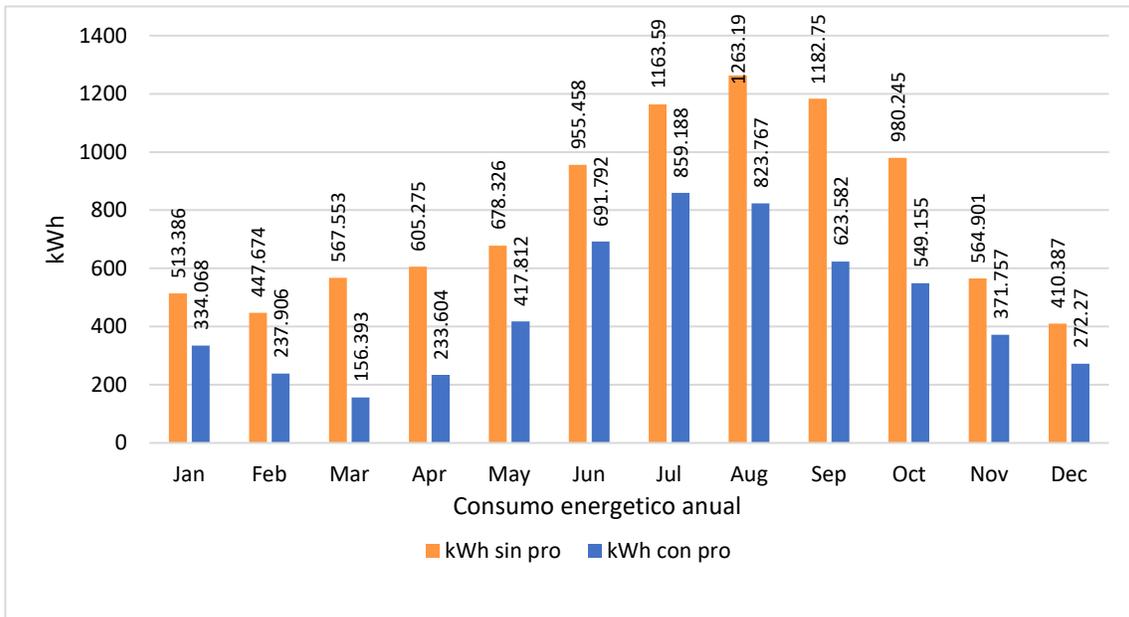


Figura 99. Consumo energético anual de sala de espera. Elaboración propia.

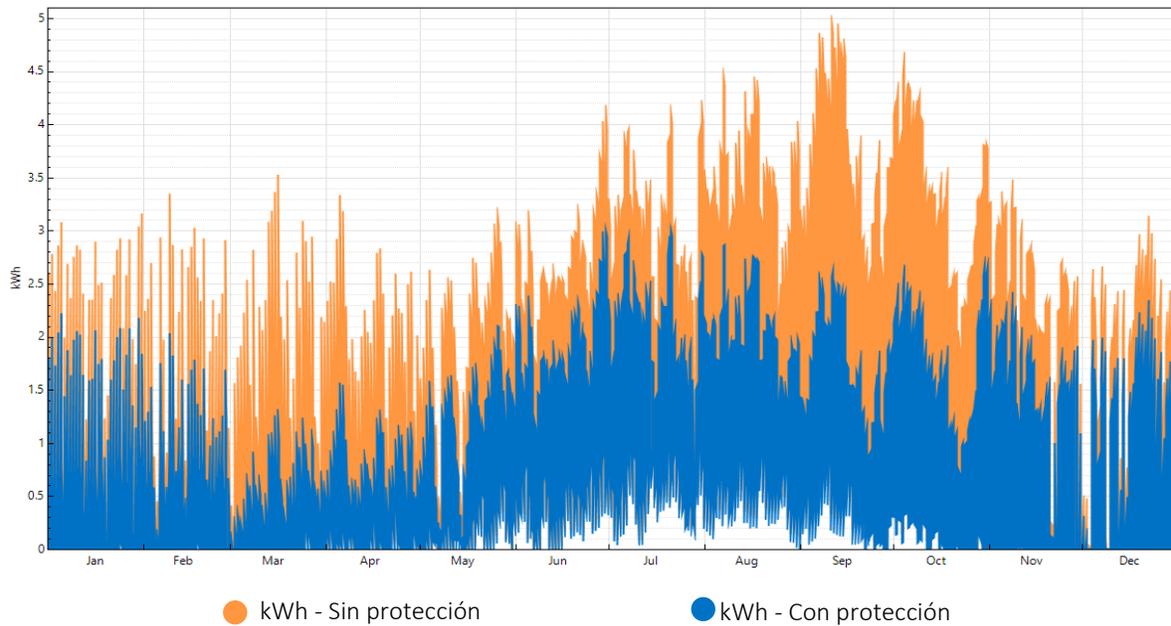


Figura 100. Consumo energético anual de aire acondicionado: Sala de espera. Elaboración propia mediante D View.

Finalmente, en el gráfico de la Figura 100 se muestra como disminuye el consumo energético del espacio a lo largo de las 8760 horas simuladas, se puede apreciar el contraste entre los kWh con elementos y sin elementos de protección solar.

Ahora bien, se analizó la temperatura operativa del espacio en cuestión, antes de aplicar el sistema de protección solar y después de su aplicación. Dando como resultado una disminución de temperatura en todo el periodo anual. En la Figura 101 se puede apreciar el comportamiento de la temperatura operativa del espacio sala de espera, donde la temperatura operativa sin elementos de protección solar alcanza los 33°C, una vez aplicando los elementos se logra disminuir hasta los 30°C. El comportamiento de la temperatura operativa del espacio se ve modificada al implementar el sistema de protección solar, disminuyendo la ganancia de calor al interior no solo en el verano, sino también en el invierno. Por otro lado, en verano se alcanzan temperaturas de 31°C sin elementos de protección solar, logrando disminuir hasta los 28°C al aplicar la estrategia de protección solar.

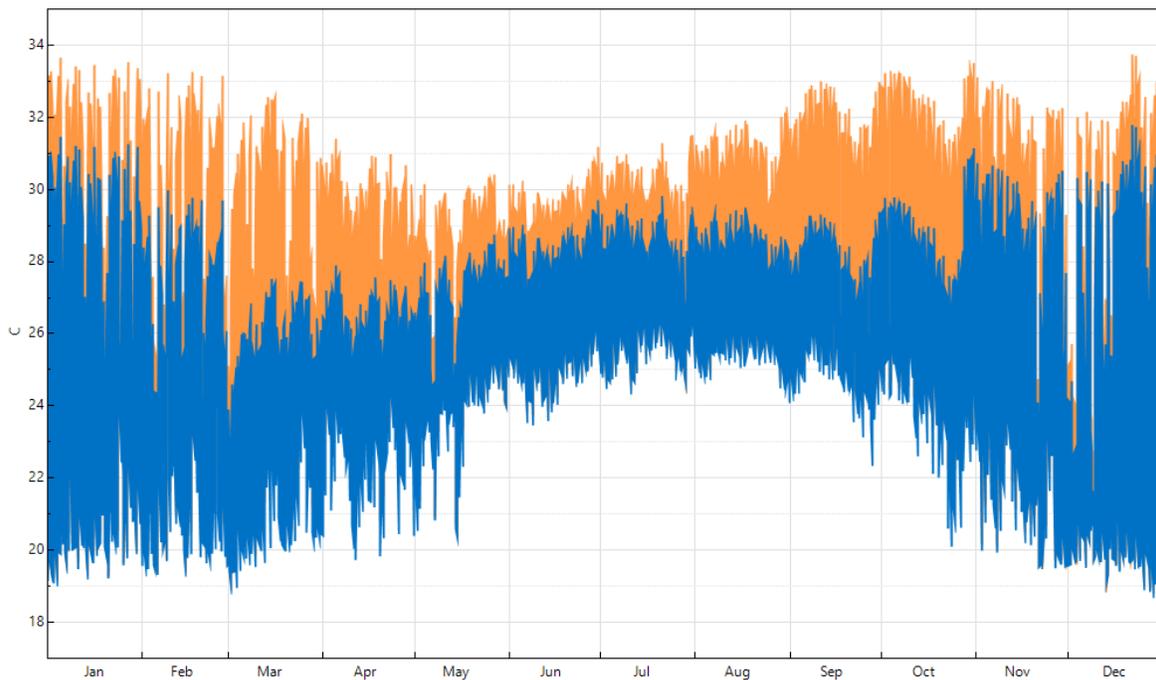


Figura 101. Gráfico de temperatura operativa anual de sala de espera. Elaboración propia.

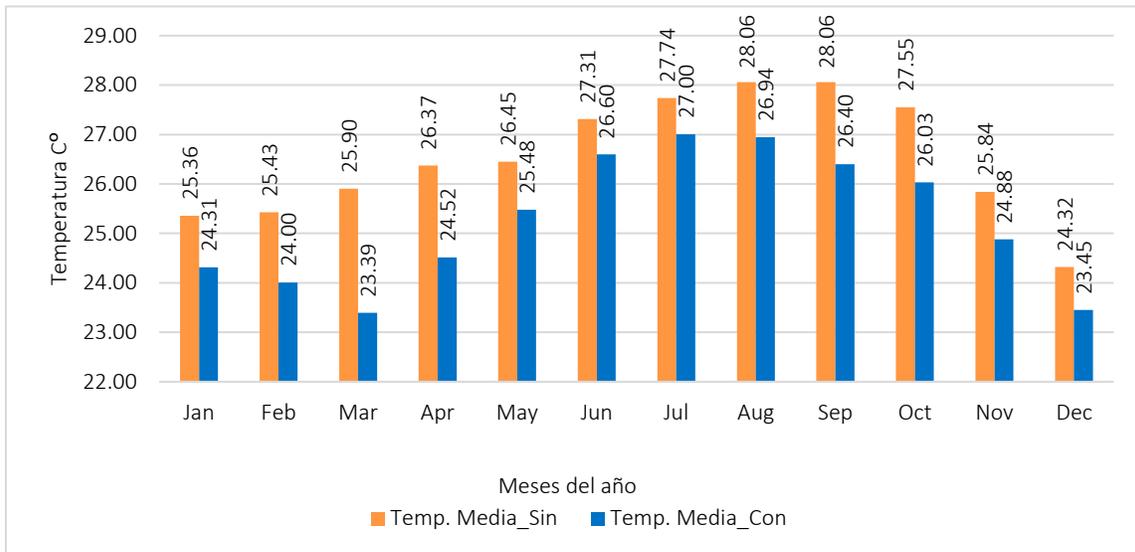


Figura 102. Gráfico de barras de temperatura operativa promedio anual de sala de espera. Elaboración propia.

Tomando la temperatura promedio desde el gráfico de la Figura 101, se puede mostrar en el gráfico de barras de la Figura 102 que, en enero disminuye 1.05°C , en febrero 1.43°C , en marzo 2.51°C , abril 1.85°C , mayo 0.97°C , junio 0.71°C , julio 0.74°C , agosto 1.12°C , septiembre 1.66°C , octubre 1.56°C , noviembre 0.96°C , diciembre 0.87°C . Generando así, una ligera disminución en todo el periodo anual que al comparar estas temperaturas con el consumo energético que este sistema de protección solar disminuyó, se logra encontrar un beneficio tanto energético como de confort térmico.

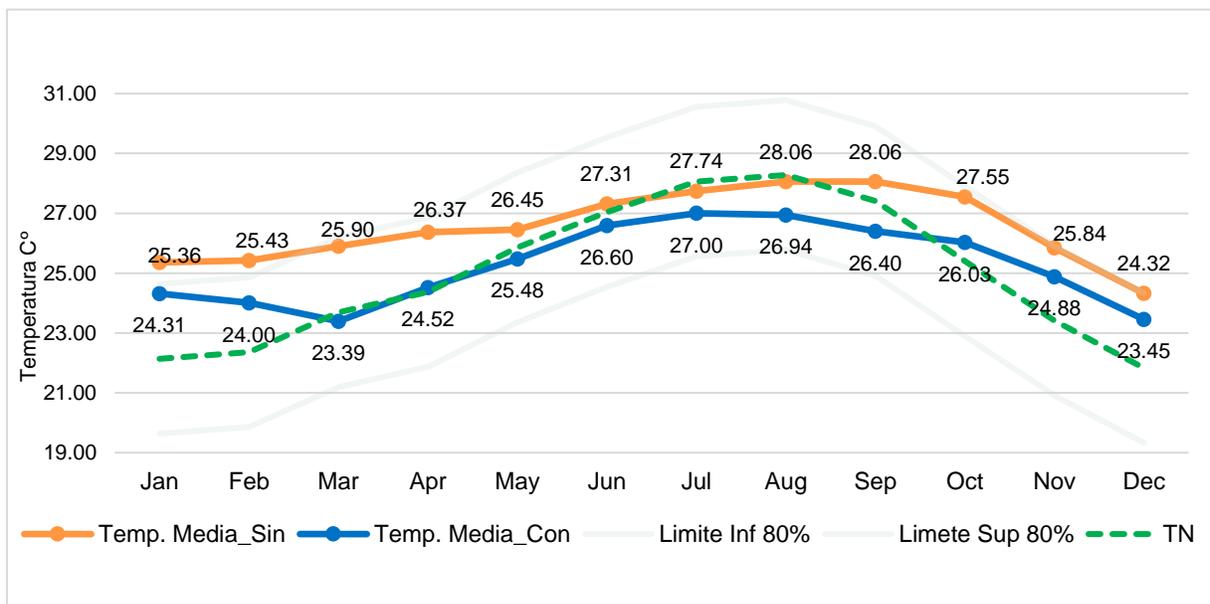


Figura 103. Límites de confort térmico: ASHRAE 55 al 80%. Elaboración propia.

Por otro lado, utilizando el modelo matemático del ASHRAE 55, aplicando el confort térmico adaptativo al 80% se puede apreciar en el grafico inferior, que la temperatura del espacio sin elementos de protección solar en los meses de invierno se sale de la zona de confort, mientras que en el verano se encuentra cerca de la temperatura neutra. Pero al aplicar los elementos de protección solar, la temperatura en los meses del periodo frío logra entra dentro de la zona de confort. Manteniendo una constante en los limites inferiores de confort térmico según el modelo del ASHRAE 55. Además, la disminución de la temperatura operativa de dicho espacio se puede apreciar en cada uno de los meses en el siguiente gráfico, donde se analizaron cada uno de los promedios mensuales con elementos y sin elementos de protección solar.

Para cerrar el tema del confort térmico obtenido del espacio sala de espera, se generó esta tabla con los datos de las 8760 horas de la simulación, donde en ambas partes se encuentran los días típicos de la temperatura horaria, cada día típico es el día más representativo de cada mes, por ende, los días no se repiten en la comparativa de la Figura 104.

DÍAS TÍPICOS																								
TEMPERATURA HORARIA																								
DÍA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
12-ene	22.573	22.264	21.785	21.487	21.181	20.791	20.809	24.558	26.726	28.281	30.617	31.865	32.082	31.075	28.628	27.159	25.582	24.71	24.5	24.208	23.876	23.685	23.414	23.045
12-feb	23.003	22.713	22.317	21.848	21.423	21.248	21.878	25.429	27.792	29.715	30.825	31.299	31.254	30.185	27.951	26.699	25.884	25.246	24.938	24.675	24.397	24.189	24.029	23.928
31-mar	23.427	23.045	22.695	22.33	22.112	21.966	23.848	25.963	27.458	28.663	29.454	29.91	30.315	30.538	30.434	29.685	28.255	26.743	25.741	25.191	24.886	24.754	24.615	24.411
30-abr	24.118	23.84	23.614	23.5	23.438	23.922	25.056	26.28	27.416	28.413	29.037	29.385	29.758	29.802	29.469	28.939	28.193	27.367	26.382	25.791	25.331	24.906	24.549	24.298
12-may	24.496	24.298	24.228	24.042	23.917	24.645	25.711	26.535	27.146	27.83	28.139	28.519	28.924	29.125	28.943	28.26	27.519	26.963	26.504	26.067	25.721	25.456	25.328	25.209
10-jun	25.363	25.174	24.995	24.835	24.9	25.776	26.793	27.502	27.907	28.406	28.79	28.933	29.185	29.533	29.585	29.466	29.154	28.421	27.557	27.042	26.783	26.548	26.278	25.966
10-jul	26.43	26.313	26.094	25.752	25.571	26.174	27.073	27.85	28.639	29.375	29.777	29.96	30.217	30.371	30.292	30.069	29.731	28.945	28.03	27.373	26.945	26.498	26.054	25.762
1-ago	26.385	26.168	25.912	25.669	25.522	25.917	26.863	27.677	28.438	29.385	30.023	30.426	30.758	30.9	30.648	30.254	29.825	29.169	28.233	27.571	27.297	27.072	26.797	26.481
20-sep	25.941	25.688	25.443	25.27	25.195	25.307	26.238	27.534	29.001	30.28	31.067	31.517	31.867	31.903	31.409	30.444	29.171	28.118	27.644	27.311	27.02	26.843	26.713	26.492
16-oct	25.024	24.757	24.52	24.321	24.192	24.107	25.42	27.583	29.338	30.309	30.907	31.651	32.193	32.221	31.548	29.991	28.422	27.329	26.81	26.382	26.149	25.978	25.762	25.498
18-nov	23.332	23.243	22.988	22.495	21.99	21.572	22.339	25.953	28.655	30.066	30.779	31.131	31.318	31.116	30.251	28.36	26.319	25.205	24.816	24.492	24.273	24.142	23.961	23.702
10-dic	19.78	19.833	19.847	19.85	20.001	20.131	20.171	21.058	24.167	27.698	30.001	30.473	30.634	30.784	30.101	28.613	26.053	24.564	24.118	23.733	23.479	23.267	22.95	22.76

DÍAS TÍPICOS																								
TEMPERATURA HORARIA																								
DÍA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
15-ene	21.8	21.298	20.76	20.346	20.119	19.984	19.955	22.311	25.754	28.272	29.31	29.527	29.718	29.837	29.174	27.671	25.97	24.84	24.5	24.205	23.864	23.589	23.389	23.072
24-feb	21.81	21.228	20.737	20.473	20.298	20.213	20.416	22.076	25.348	26.507	27.156	27.582	27.543	27.471	27.389	27.3	26.289	25.086	24.418	23.896	23.315	22.786	22.35	21.903
30-mar	22.025	21.608	21.251	20.922	20.7	20.652	21.961	24.1	24.86	25.221	25.58	25.887	26.094	25.969	25.749	25.798	25.534	24.598	23.793	22.787	21.987	21.554	21.094	20.769
27-abr	22.545	22.471	22.313	22.089	21.984	22.136	22.987	24.223	24.98	25.705	26.211	26.496	26.701	26.86	26.81	26.71	26.495	26.004	25.241	24.618	24.323	24.079	23.867	23.054
5-may	24.641	24.299	24.117	23.827	23.344	23.605	24.412	25.25	26.022	26.632	26.824	26.966	27.045	27.106	27.096	26.907	26.601	26.211	25.79	25.372	25.053	24.757	24.504	24.352
10-jun	25.196	25.025	24.86	24.723	24.744	25.253	25.85	26.339	26.754	27.192	27.567	27.79	28.015	28.258	28.319	28.187	27.944	27.555	27.053	26.689	26.47	26.27	26.038	25.765
10-jul	26.229	26.156	25.973	25.66	25.474	25.835	26.362	26.83	27.522	28.095	28.398	28.579	28.748	28.868	28.874	28.76	28.537	28.099	27.526	27.006	26.63	26.22	25.81	25.551
2-ago	25.816	25.628	25.56	25.466	25.223	25.373	26.068	26.64	27.113	27.61	27.957	28.189	28.365	28.475	28.401	28.28	28.249	27.95	27.288	26.695	26.376	26.267	26.178	26.003
4-sep	25.367	25.133	24.886	24.751	24.649	24.791	25.462	26.109	26.604	27.112	27.596	27.928	28.069	28.142	28.064	27.984	27.743	27.287	26.84	26.503	26.237	26.01	25.824	25.623
16-oct	24.439	24.204	24.003	23.768	23.51	23.272	24.575	26.105	26.966	27.379	27.728	28.218	28.54	28.636	28.54	27.899	27.009	26.259	25.883	25.539	25.358	25.24	25.075	24.859
18-nov	22.861	22.561	22.327	21.887	21.434	21.077	21.428	24.726	27.243	28.061	28.397	28.628	28.787	28.881	28.565	27.077	25.495	24.648	24.33	24.045	23.853	23.751	23.6	23.38
10-dic	19.729	19.799	19.827	19.841	19.978	20.101	20.121	20.589	22.591	26.518	28.374	28.735	28.937	29.178	28.429	26.969	25.087	24.125	23.779	23.449	23.204	22.819	22.426	22.266

Figura 104. Días típicos del caso estudio. Temperatura media promedio de sala de espera. Elaboración propia.

En la parte superior de la figura se encuentran los días típicos del caso estudio sin elementos de protección solar, en donde se puede apreciar con la simbología de color, que mayormente de las 10:00 a las 16:00 horas se mantiene una temperatura por encima del límite de confort térmico, esto durante todos los meses del año. Por otro lado, en la parte inferior aparecen los días típicos del caso estudio con elementos de protección solar, donde se puede observar que disminuyeron los días calientes, en su mayoría el espacio se siente confortablemente por el 90% de las personas que lo habitan. Dejando solo algunos días confortablemente cálido al 80% y frío al 80%, esto último ocurre en el periodo de invierno en un horario cuando el caso estudio no está en servicio. De igual forma se logra captar que sigue existiendo un sobrecalentamiento por el vidrio de la fachada durante los meses de diciembre y enero, ya que los ángulos de los rayos solares caen muy bajos y al filtrarse generan un aumento de temperatura.

5.2 Conclusiones del análisis

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). Por consiguiente, se analizó la temperatura operativa del caso estudio general para dar un cierre y conclusión. Esta investigación 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.

En la Figura 105 se muestra el comportamiento de la temperatura operativa sin elementos de protección solar, como se ha venido mostrando los espacios en el siguiente orden: baño, bóveda, comedor, caja y sala de espera. Los primeros 4 espacios muestran una temperatura dentro de los límites de confort térmico calculados con el modelo matemático de ASHRAE 55 (ver Figura 104), alcanzado máximas de 25°C – 26°C durante los meses del periodo cálido, mientras que, por otro lado, en el periodo frío desciende a temperaturas de 19°C – 20°C, tornándose un espacio confortablemente frío, la ventaja es que estas temperaturas son en horarios donde no hay actividades en el sitio. Por otra parte, el espacio sala de espera alcanza temperaturas entre 31°C – 33°C en durante todo el año, prácticamente desde que sale el sol hasta que este se pone, aportando ganancia térmica todo el horario que hay actividades en dicho espacio.

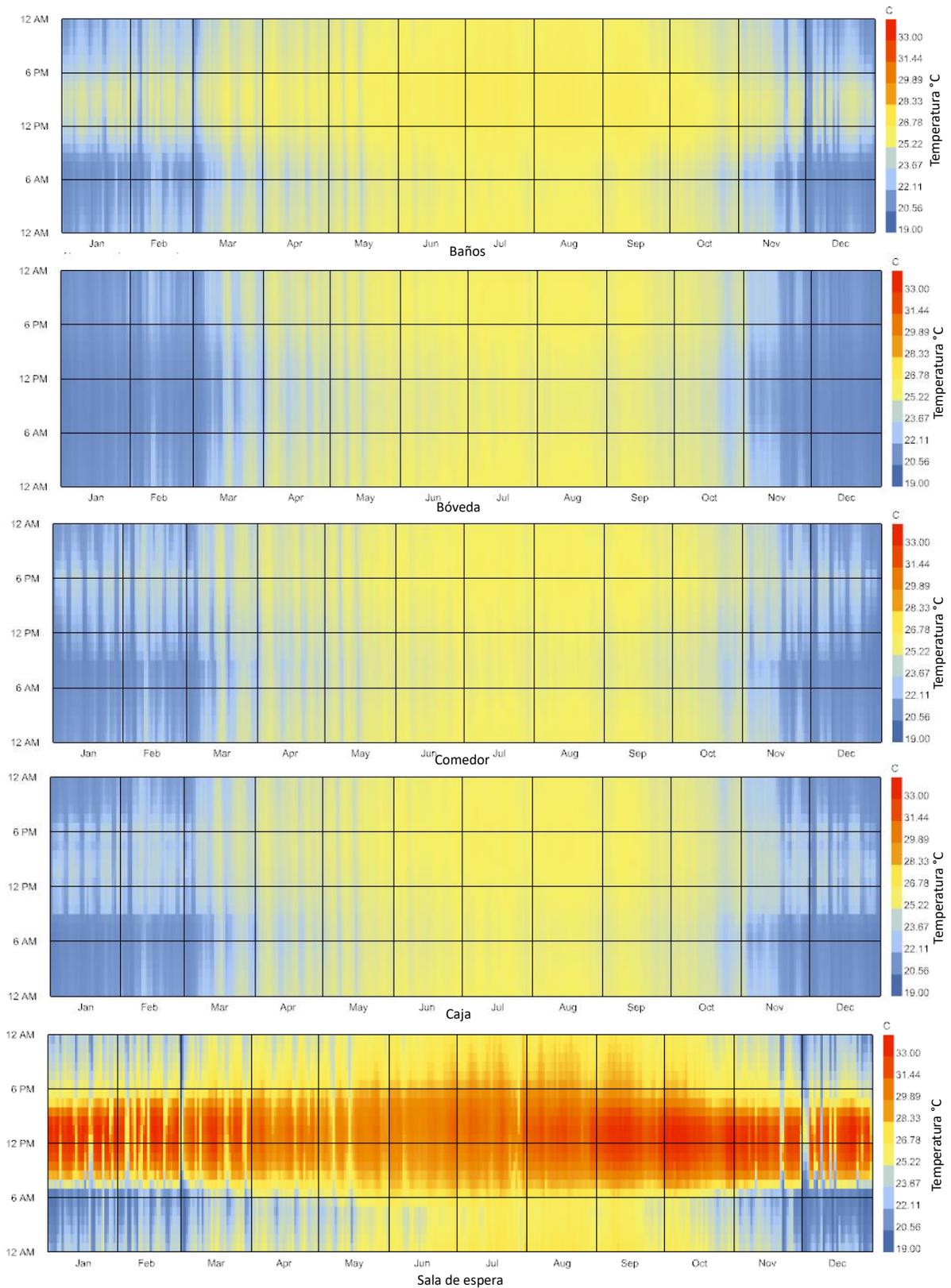


Figura 105. Temperatura operativa periodo anual sin elementos de protección solar. Elaboración propia mediante Ladybug tools.

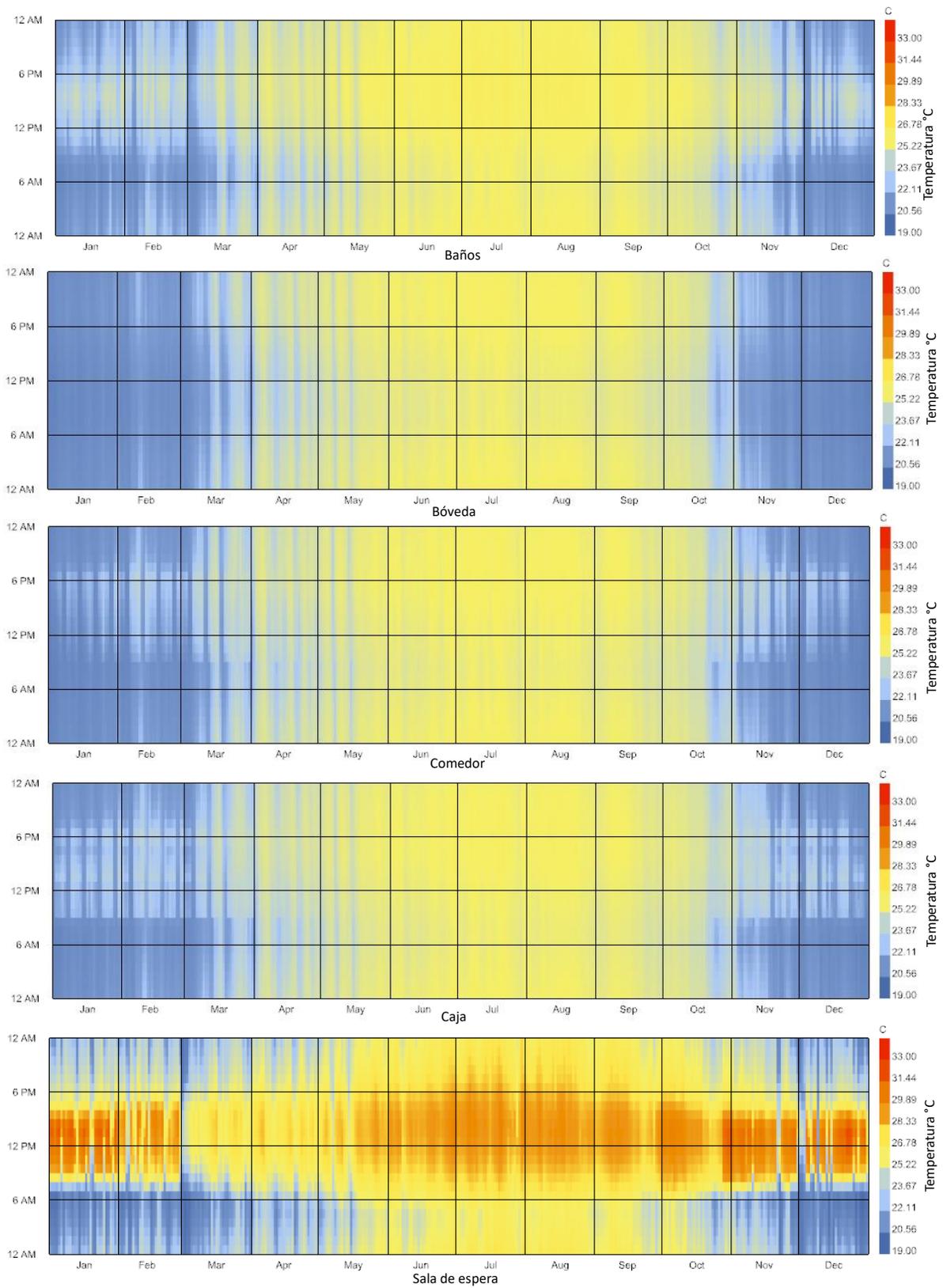


Figura 106. Temperatura operativa periodo anual con elementos de protección solar. Elaboración propia mediante Ladybug tools.

Con respecto a la Figura 106, muestra el comportamiento de la temperatura operativa de todos los espacios que conforman el caso estudio con elementos de protección solar, como se aprecia en las primeras 4 graficas que hacen alusión a los primeros 4 espacios, mantienen condiciones de temperatura muy parecidas a sin la aplicación de elementos de protección solar, como se analizó anteriormente estos espacios lograron una mejora en el confort térmico y el consumo energético. Se logra disminuir las horas de temperatura que anteriormente se tenían, si se comparan ambas figuras se logra observar que el mes de abril disminuye algunas horas la temperatura operativa de 25°C – 26°C a 23°C. Por el contrario, el espacio sala de espera, muestra una mejora bastante significativa en la temperatura operativa ya que se logra disminuir de los 33°C sin elementos de protección solar a temperaturas entre los 26°C – 29°C dependiendo el mes del año.

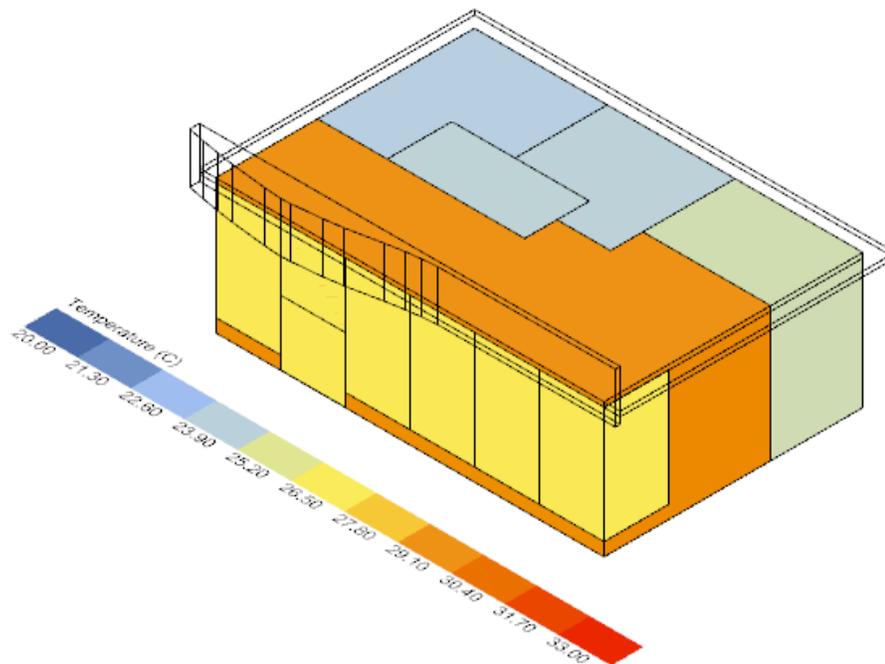


Figura 107. Temperatura por caras interiores del caso estudio. Sin elementos de protección solar. Elaboración propia mediante Ladybug tools.

Por otra parte, las temperaturas de las caras interiores de la sala de espera rondan alrededor de los 30°C en promedio, sin aplicar elementos de protección solar, mientras que los demás espacios rondan alrededor de los 24°C, lo cual no representa mayor problema con base a los límites de confort.

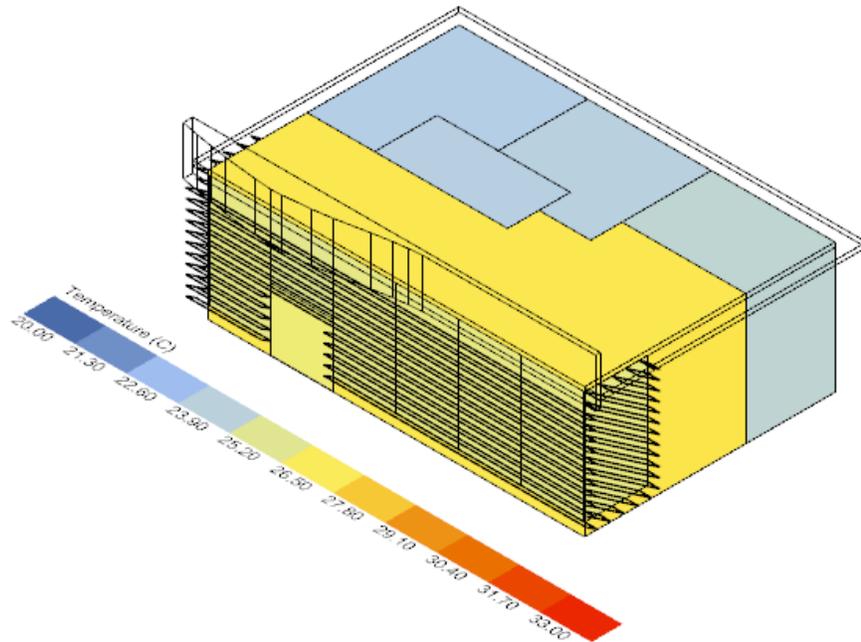


Figura 108. Temperatura por caras interiores del caso estudio. Con elementos de protección solar. Elaboración propia mediante Ladybug tools.

Así mismo, la temperatura de las caras interiores del caso estudio disminuyó al aplicar la estrategia de protección solar, como se aprecia en la Figura 108 los espacios menos propensos a la recibir radiación solar, alcanzan una temperatura promedio de 22°C, mientras que el espacio sala de espera reduce su temperatura promedio a 26°C. Además, la superficie acristalada al permanecer sombreada por todo el periodo cálido logra descender a los 25°C. de este modo se puede confirmar que los elementos de protección solar al ser aplicados en la fachada sur disminuyen la temperatura de las caras interiores de cada espacio. Por otra parte, también es importante mencionar la temperatura de las caras exteriores del caso estudio, estas se ven afectadas por la incidencia de radiación solar que llega de forma directa, de igual forma el espacio mayormente afectado es la sala de espera. En la Figura 109 del caso estudio, se observa que la temperatura exterior ronda alrededor de los 29°C – 33°C. al aplicar la protección solar esta temperatura desciende entre los 26°C – 29°C. (ver Figura 110).

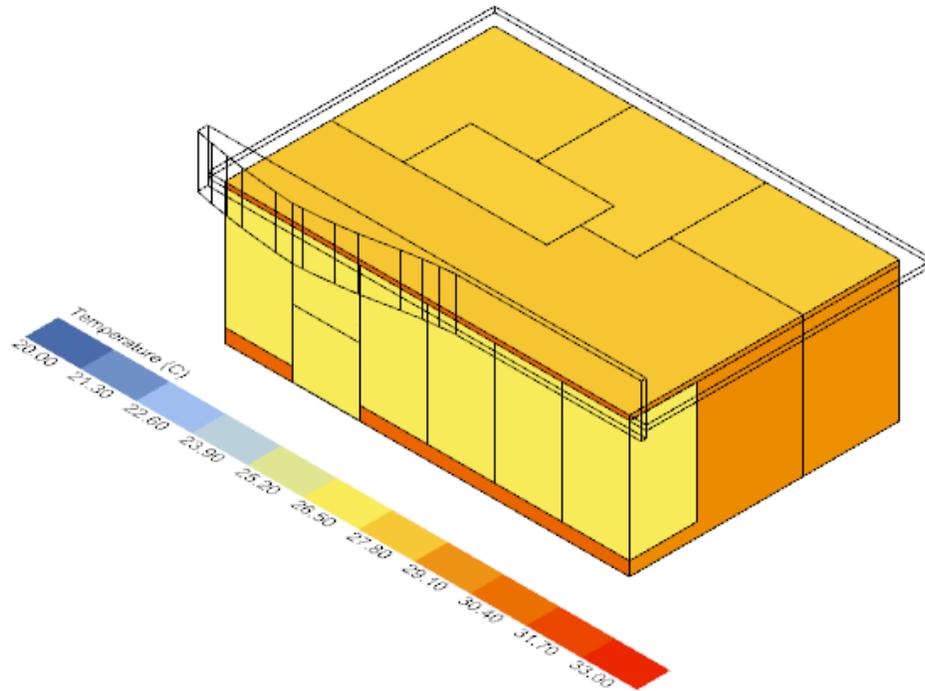


Figura 109. Temperatura por caras exteriores del caso estudio. Sin elementos de protección solar. Elaboración propia mediante Ladybug tools.

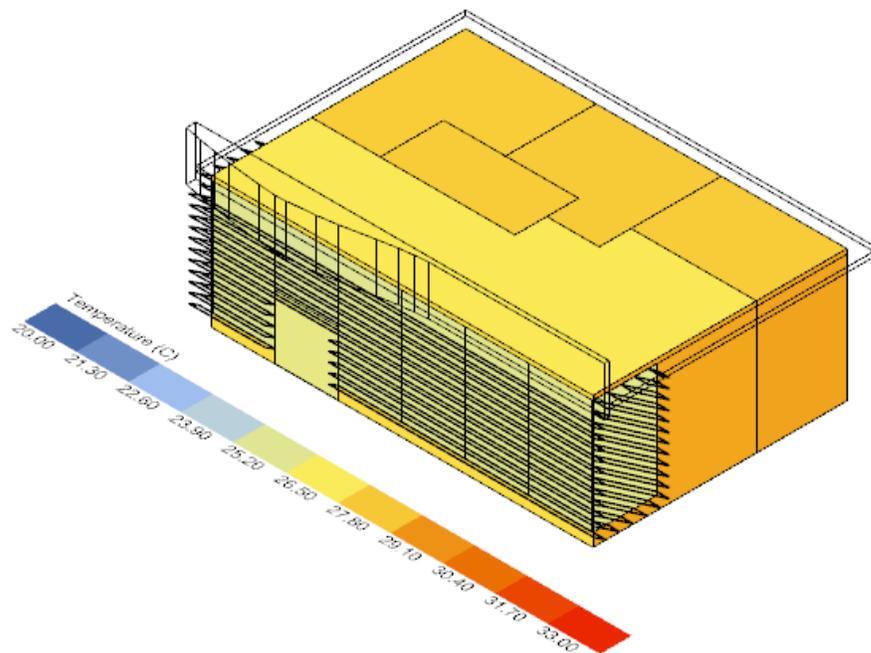


Figura 110. Temperatura por caras exteriores del caso estudio. Con elementos de protección solar. Elaboración propia mediante Ladybug tools.

Continuando con el análisis de la temperatura, 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. Como se mencionó, una de las cualidades de la composición del elemento de protección solar es que funcione para ambos periodos. Por ende, se aprecia que hay una disminución de 3°C – 5°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.

En cuanto a el consumo energético 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. 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 Figura 111 se puede comparar la disminución de aire acondicionado que se requiere para enfriar los espacios que comprende el caso estudio, como se menciona el espacio sala de espera es el que realmente tiene un beneficio notorio al implementar los elementos de protección solar. 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).

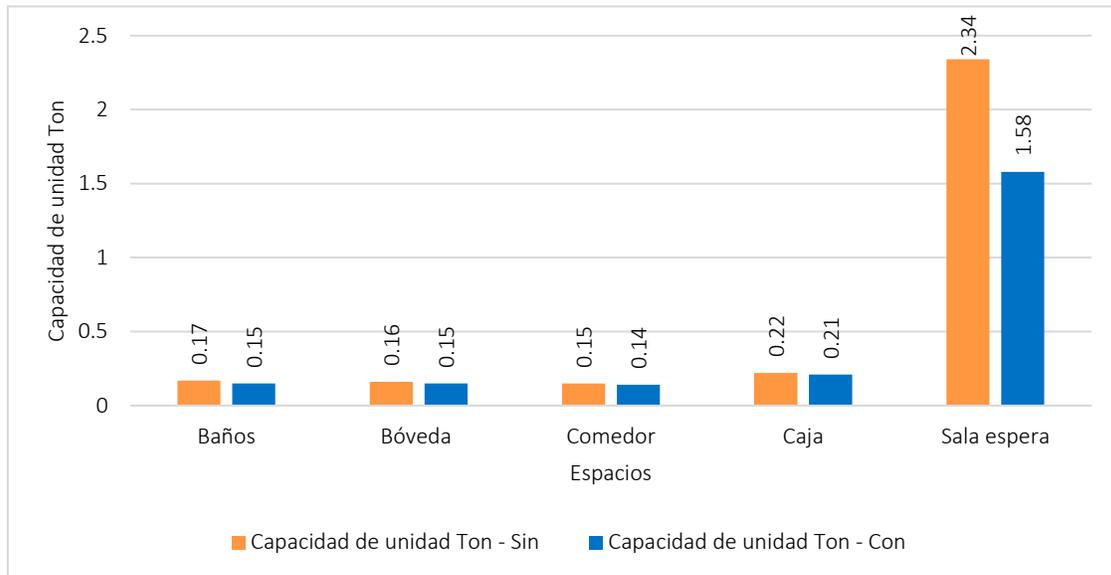


Figura 111. Cargas de diseño para A/C caso de estudio. Elaboración propia.

Si bien las simulaciones equiparadas dicen que el consumo energético por aire acondicionado sin aplicación de elementos es de alrededor de los 11147.78 kWh, mientras que, al implementar los elementos de protección en la fachada acristalada, disminuye a los 7164.11 kWh, ver Figura 112. Por ende, se ve una reducción en el consumo eléctrico ocasionado por climatización artificial.

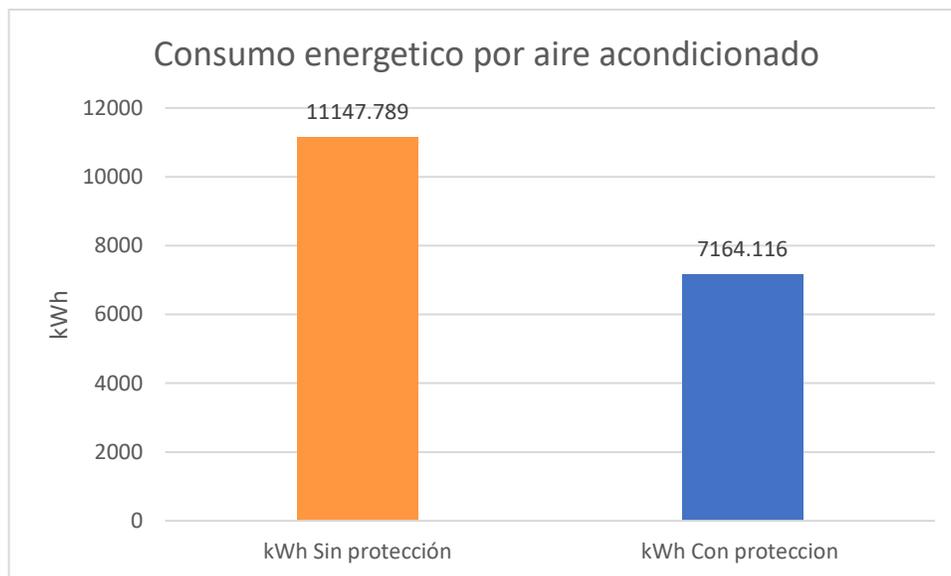


Figura 112. Consumo energético ocasionado por uso de aire acondicionado de caso estudio. Elaboración propia.

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. 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 pequeño incremento en la temperatura 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. 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 en 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 como mejora e implemento a la estrategia de diseño para lograr mejores condiciones de confort termico 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 que estan conformadas por dos vidrios separados por una cámara de aire deshidratado que tiene propiedades térmicas y de aislamiento acústicos.
- No proponer muros cortina, ventanales o áreas acristaladas para orientaciones criticas como Sur – Oeste en esta latitud.

Finalmente, el diseño de esta estrategia a base de elementos fijos y horizontales de protección solar para superficies acristaladas mejora la temperatura operativa y con esta el confort térmico del espacio, además disminuye el consumo energético que en su mayoría es ocasionado por el uso de climatización artificial. Al ser una estrategia de sombreado fija, se deja abierta la línea de investigación para propuestas que sean móviles o automáticas y funcionen con base a la trayectoria solar aparente, también para proyectar el diseño de elementos de protección solar en otras fachadas como la Oeste que de igual forma recibe gran cantidad de incidencia de radiación solar durante todo el año, o el implemento de elementos de protección solar en sentido vertical que también es otra opción dentro de los brise soleil.

Futuras lineas de investigacion:

- Elementos de proteccion solar moviles
- Elementos de proteccion solar automatizados
- Elementos de proteccion solar para fachada Oeste - Suroeste.



Glosario

A continuación, se definirán algunos parámetros que son necesarios para entender de mejor forma el desarrollo de esta investigación. Es importante mencionar que estos conceptos, en su mayoría, fueron obtenidos del libro Portuario solar de México. Proporcionado por la Universidad de Colima y la Universidad Veracruzana. (2015).

Radiación solar

Absortividad: Es la razón de la cantidad de energía radiante absorbida por una superficie entre la cantidad total de energía incidente sobre esa superficie.

Albedo: Es la fracción de la luz incidente reflejada en una longitud de onda o espectro dado.

Emisividad ($\epsilon\lambda$): Se define como la razón de la energía emitida por una superficie a una longitud de onda y una temperatura dadas, entre la energía emitida por un cuerpo negro a la misma longitud de onda y a la misma temperatura.

Irradiación: Es la energía que en forma de radiación se integra o totaliza durante cierto tiempo en una superficie o zona. Sus unidades son Joules/m² o cal/cm² (llamado también Langley y se abrevia ly) o kWatt-hora/m² día, que es una forma muy común de expresar este parámetro.

Irradiancia: Es la energía instantánea que se emite o incide en cierta superficie o zona, sus unidades son W/m².

Radiación difusa: Es la que se recibe del Sol después de ser desviada por dispersión atmosférica. Es radiación difusa la que se recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo. De no haber radiación difusa, el cielo se vería negro aun de día, como sucede por ejemplo en la Luna.

Radiación directa: Es la parte que se recibe directamente del Sol sin sufrir ninguna dispersión atmosférica, por lo tanto, la radiación extraterrestre es radiación directa.

Radiación global: Es la suma de la radiación directa más la difusa.

Radiación terrestre: Es la que proviene de objetos terrestres, por ejemplo, la que emite una pared, un charco, un lago, etcétera.

Radiación total: Es la suma de la radiación global más la terrestre.

Radiancia: Es la irradiancia solar en una dirección particular e involucra cierto ángulo sólido, que afecta determinada superficie y con la que forma un ángulo.

Reflectividad ($\rho\lambda$): Razón de la cantidad de radiación reflejada entre la cantidad total incidente sobre una superficie.

Transitividad ($\tau\lambda$): Razón de la radiación transmitida por un material (agua, vidrio, aire, etcétera) entre la cantidad total de la radiación incidente sobre una superficie.

Geometría solar

Altura solar (h): Conocida también como elevación solar, es el ángulo formado por el rayo solar y el plano horizontal del sitio. Varía desde 0° cuando el Sol está en el horizonte, hasta 90° cuando éste está en el cenit.

Latitud del sitio (ϕ): Es el ángulo que forma la vertical del lugar con el plano del ecuador. Es expresada en grados, se mide de 0° (en el ecuador) a $\pm 90^\circ$ (en los polos) y se considera como positiva en el hemisferio norte y negativa en el sur.

Declinación solar (δ): Ángulo formado por el plano que contiene al eje de rotación terrestre y el plano perpendicular a la eclíptica. Si bien la diferencia absoluta entre el eje de rotación y la perpendicular a la eclíptica siempre es de 23.45° , el ángulo que se forma entre los planos que los contienen varía día a día porque dichos planos están siempre frontales al sol. Los valores extremos de la declinación solar ocurren cuando ambos planos se encuentran uno frente a otro con un ángulo igual a la oblicuidad absoluta. Eso corresponde a las fechas de los solsticios, el de invierno (21 de diciembre) con valor de declinación solar

igual a -23.45° , y el de verano (21 de junio) con valor de declinación solar igual a 23.45° . El valor intermedio ocurre cuando ambos planos ocupan el mismo lugar, por lo que el ángulo entre ellos es igual a 0° . Eso corresponde a las fechas de los equinoccios, el de primavera (21 de marzo) y el de otoño (23 de septiembre).

Ángulo horario (ω): Es el ángulo formado por el rayo solar y el plano meridional del sitio, medido en el plano que contiene a la trayectoria solar. La medición se hace a partir del plano meridional, por lo que la posición del Sol a las 12:00 horas tiene un $\omega = 0^\circ$. Hacia el oriente la cuenta es positiva y hacia el poniente la cuenta es negativa. Así la posición del Sol a las 6:00 horas, tiene un $\omega = 90^\circ$, y a las 18:00 horas un $\omega = -90^\circ$.

Acimut solar (α) Es el ángulo formado por la proyección del rayo solar en el plano horizontal del sitio y la intersección de éste con el plano meridional o línea norte-sur, medido a partir de esta última, indistintamente desde el sur o desde el norte, de acuerdo con el cuadrante en que se encuentre el Sol. En los cuadrantes al oeste el valor es negativo y al este positivo.

Solsticio de invierno: El recorrido solar diurno es un arco de círculo paralelo al recorrido equinoccial, pero más próximo al horizonte, provocando que el día dure menos de 12 horas.

Solsticio de verano: El recorrido solar diurno es un arco de círculo paralelo al recorrido equinoccial, que al estar más levantado sobre el horizonte provoca que el día dure más de 12 horas.

Equinoccio: Es el recorrido solar, el 21 de marzo y septiembre, se caracteriza porque el Orto (Amanecer) coincide con el Este y el Ocaso (puesta de sol) con el Oeste.

Balance térmico: El balance térmico esté en función de la humedad relativa, la velocidad y la temperatura del aire y la temperatura radiante.

Confort térmico: Son unas condiciones dadas de temperatura y humedad relativa bajo las que se encuentran confortables la mayor parte de los seres humanos. También conocido como comodidad

higrotérmica. En fisiología se dice que hay confort higrotérmico cuando los mecanismos termorreguladores del cuerpo no tienen que intervenir.

Radiación solar: Es la energía emitida por el sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio. Esa energía es el motor que determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima.

GEI: Los gases de efecto invernadero directo que se estiman en el Inventario son: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆).

Eficiencia energética: La eficiencia energética es el intento de utilizar menos energía sin sacrificar las actividades diarias de los seres humanos. Es decir, es el cumplimiento de un ahorro eficiente de la energía que consumimos a diario. Todos formamos parte de este propósito, pues muchas de las cosas que hacemos consumen energía.

Consumo energético: El consumo de energía es la cantidad de energía o potencia utilizada.

Geometría solar: Forma parte de la arquitectura bioclimática, que es aquella que trabaja con las condiciones climáticas y solares del lugar en procura de obtener confort térmico al interior de las edificaciones y eficiencia energética.

Trayectoria solar: Se le conoce como trayectoria solar al ángulo del eje de rotación que tiene la Tierra con respecto al sol en las distintas temporadas del año. Este movimiento es el causante de todas las épocas del año y por supuesto de los distintos ángulos de la radiación solar.

Tablas

Tabla 1. El reporte del clima en México: reporte anual 2021. (2021). Coordinación general del servicio meteorológico. Conagua.

Tabla 2. Ubicación geográfica. Compendio de información geográfica municipal de los estados unidos mexicanos. Mexicali, B.C.

Tabla 3. Fisiografía. Compendio de información geográfica municipal de los estados unidos mexicanos. Mexicali, B.C.

Tabla 4. Geología de Mexicali. Compendio de información geográfica municipal de los estados unidos mexicanos. Mexicali, B.C.

Tabla 5. Edafología de Mexicali. Compendio de información geográfica municipal de los estados unidos mexicanos. Mexicali, B.C.

Tabla 6. Hidrología de Mexicali. Compendio de información geográfica municipal de los estados unidos mexicanos. Mexicali, B.C.

Tabla 7. Uso de suelo y vegetación de Mexicali. Compendio de información geográfica municipal de los estados unidos mexicanos. Mexicali, B.C.

Tabla 8. Registro de Temperaturas Máximas diarias por año, datos recuperados del Servicio Meteorológico Nacional. Fuente elaboración propia.

Tabla 9. Registro de Temperaturas Mínimas diarias por año, datos recuperados del Servicio Meteorológico Nacional. Fuente elaboración propia.

Tabla 10. Climograma Temperaturas mínimas normales, datos recuperados del Servicio Meteorológico Nacional. Fuente elaboración propia.

Tabla 11. Temperaturas máximas normales, datos recuperados del servicio meteorológico nacional. Fuente elaboración propia.

Tabla 12. Temperaturas con los valores meteorológicos máximos, medios y mínimos mensuales de la ciudad de Mexicali. Datos obtenidos del sistema meteorológico nacional. Elaboración propia.

Tabla 13. Historial de acciones de aislamiento térmico, refrigeradores, aire acondicionado central y aire acondicionado de tipo ventana o mini split realizadas por parte del programa ASI en Mexicali, B.C. programa ASI, 2010.

Tabla 14. Beneficios energéticos, económicos y ambientales anuales por las viviendas del proyecto piloto del programa vivienda sustentable de CONAVI.

Tabla 15. Áreas de muro y ventana de caso estudio. Elaboración propia.

Tabla 16. 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.

Tabla 17. Variables de los softwares utilizados. Elaboración propia.

Tabla 18. Parámetros de simulación. Elaboración propia.

Tabla 19. Parámetros de simulación para baño. Elaboración propia.

Tabla 20. Disminución de la potencia máxima de diseño para a/c. Elaboración propia.

Tabla 21. Parámetros de simulación para bóveda. Elaboración propia.

Tabla 22. Disminución de la potencia máxima de diseño para a/c. Elaboración propia.

Tabla 23. Parámetros de simulación para comedor. Elaboración propia.

Tabla 24. Disminución de la potencia máxima de diseño para a/c de comedor. Elaboración propia.

Tabla 25. Parámetros de simulación para caja. Elaboración propia.

Tabla 26. Disminución de la potencia máxima de diseño para a/c. Elaboración propia.

Tabla 27. Parámetros de simulación para sala de espera. Elaboración propia.

Tabla 28. Disminución de la potencia máxima de diseño para a/c. Elaboración propia

Figuras

Figura 1. Precipitación máxima por año, datos recuperados del servicio meteorológico nacional. Fuente elaboración propia.

Figura 2. Isorrequerimientos de climatización para Mexicali. Morillón, d. (2004). Atlas del bioclima en México. Universidad nacional autónoma de México.

Figura 3. Fotografía de Mexicali, B.C. Autor desconocido, tomada de Google imágenes.

Figura 4. Fotografía aérea del fraccionamiento valle de las misiones, obtenida de vecindario fotovoltaico en valle de las misiones Mexicali B.C.

Figura 5. Fotografía desde último tramo de escalera exterior hacia el interior. Mujeres realizando el lavado y secado de las telas junto al río. Fuente: Cemal Edmen. Divisare books.

Figura 6. Fachada con los brise-soleil del edificio. Fuente: Cemal Edmen. Divisare books.

Figura 7. Fachada principal de la sede ABI. Fotografía: Hidden architecture, 2021.

Figura 8. Fachada principal de la sede ABI. Hermanos Roberto. Fotografía: Hidden architecture, 2021.

Figura 9. Planta del piso 3 y fachada suroeste. Fuente: archivo general de la nación-fondo invías (1945), sig. -1, 17, 22, 45-222.

Figura 10. Explicación de los a brise-soleil en el edificio de la asociación brasileña de prensa. Fuente: goodwin (1943, p. 87).

Figura 11. Carta solar y localización del predio. Fuente: archivo general de la nación-fondo invías (1945), sig. -1, 04, 24, 06-145.

Figura 12. Fachada principal del caso estudio. Fotografía propia.

Figura 13. Banco del bienestar. Fuente: autor desconocido.

Figura 14. Banco del bienestar. Fuente: autor desconocido.

Figura 15. Banco del bienestar. Fuente: autor desconocido.

Figura 16. Banco del bienestar. Fuente: autor desconocido.

Figura 17. Distribución espacial de planta arquitectónica de caso estudio. Elaboración propia.

Figura 18. Fachada principal de caso estudio (sur). Elaboración propia.

Figura 19. Fachada este caso estudio. Elaboración propia.

Figura 20. Fachada norte caso estudio. Elaboración propia.

Figura 21. Fachada oeste caso estudio. Elaboración propia.

Figura 22. Perspectiva de caso estudio: fachada principal (sur). Elaboración propia.

Figura 23. Compendio de fotografías del caso estudio. Elaboración propia.

Figura 24. Proyección esférica de grafica solar. Elaboración propia.

Figura 25. Proyección de trayectoria solar, en rotación a cero grados en el ecuador. Fuente propia.

Figura 26. Proyección de trayectoria solar, esfera solar latitud 32.65 n. Para Mexicali. Fuente propia.

Figura 27. Trayectoria solar aparente: solsticio verano, equinoccios, solsticios invierno. Vista ortogonal. Elaboración propia.

Figura 28. Trayectoria solar aparente: SV. EQ. SI. Vista isométrica. Elaboración propia.

Figura 29. Diagrama de colocación de ángulos solares: equinoccios. Elaboración propia.

Figura 30. Diagrama de colocación de ángulos solares: solsticio de invierno. Elaboración propia.

Figura 31. Diagrama de colocación de ángulos solares en superficie acristalada. Fuente propia.

Figura 32. Trayectoria solar aparente en los solsticios de invierno y verano, así como en los equinoccios. Importado al programa sketch up desde AutoCAD 3d. Elaboración propia.

Figura 33. Ángulos solares del solsticio de invierno: 10:00 horas y 13:00 horas. Elaboración propia.

- Figura 34. ángulos solares del solsticio de invierno: 8:00 horas y 16:00 horas. Elaboración propia.
- Figura 35. Ángulos solares del equinoccio: 12:00 horas del mediodía. Elaboración propia.
- Figura 36. Ángulos solares del equinoccio: 7:00 horas y 17:00 horas. Elaboración propia.
- Figura 37. Ángulos solares desde el punto de vista del observador, tomada de luz natural en la arquitectura. Aportaciones científicas, tecnológicas y de diseño.
- Figura 38. Tabla de trazo de la proyección estereográfica. Fuente: aplicaciones lumínicas por la dra. Guadarrama. (2022).
- Figura 39. Tabla de trazo de la proyección estereográfica. Fuente: aplicaciones lumínicas por la dra. Guadarrama. (2022).
- Figura 40. Trazo para mes de la fecha exacta a dibujar sobre la proyección estereográfica.
- Figura 41. Trazo para horas a dibujar sobre la proyección estereográfica. Fuente: proporcionada por la dra. Guadarrama. (2022).
- Figura 42. Proyección estereográfica: 21 junio, 21 marzo, 22 septiembre y 21 diciembre. Elaboración propia.
- Figura 43. Proyección estereográfica: 21 junio, 21 marzo, 22 septiembre y 21 diciembre. Caso estudio: Mexicali, B.C. Elaboración propia.
- Figura 44. Incidencia solar dentro del espacio analizado. Equinoccios. Elaboración propia.
- Figura 45. Incidencia solar dentro del espacio analizado. Solsticio de invierno. Elaboración propia.
- Figura 46. Incidencia solar dentro del espacio analizado. Solsticio de verano. Elaboración propia.
- Figura 47. Incidencia solar dentro del espacio durante el solsticio invierno. Elaboración propia.
- Figura 48. Incidencia solar dentro del espacio durante el solsticio verano. Elaboración propia.
- Figura 49. Incidencia solar dentro del espacio durante los equinoccios. Elaboración propia.
- Figura 50. Trayectoria solar en equinoccio sobre maqueta 1:50 con heliodón. Elaboración propia.
- Figura 51. Ángulo vertical de incidencia solar filtrada al interior, 7:00 horas en equinoccio. Elaboración propia.
- Figura 52. Proyección de ángulo vertical y horizontal sobre planta arquitectónica de caso estudio. Elaboración propia.
- Figura 53. Grafica estereográfica de ángulo vertical y horizontal de incidencia solar filtrada al interior, 7:00 horas en equinoccio. Elaboración propia.
- Figura 54. Hoja de cálculo para obtener ángulos de sombra vertical y horizontal. Fuente: aplicaciones lumínicas por la dra. Guadarrama. (2022).
- Figura 55. Ángulo vertical de incidencia solar filtrada al interior, 10:00 horas en solsticio invierno. Elaboración propia.
- Figura 56. Proyección de ángulo vertical y horizontal sobre planta arquitectónica de caso estudio. Elaboración propia.
- Figura 57. Grafica estereográfica de ángulo vertical y horizontal de incidencia solar filtrada al interior, 10:00 horas en solsticio de invierno. Elaboración propia.
- Figura 58. Hoja de cálculo para obtener ángulos de sombra vertical y horizontal. Fuente: aplicaciones lumínicas por la dra. Guadarrama. (2022).
- Figura 59. Sección de caso estudio con elementos de protección solar. Elaboración propia.
- Figura 60. Aplicación de elementos de protección solar para fachada sur en la ciudad de Mexicali. Solsticio de invierno (21 de diciembre). Elaboración propia.
- Figura 61. Aplicación de elementos de protección solar para fachada sur en la ciudad de Mexicali. Equinoccios de primavera y otoño. Elaboración propia.
- Figura 62. Elementos de protección solar para fachada sur en caso estudio. Elaboración propia.
- Figura 63. Interior de maqueta caso estudio con elementos de protección solar sobre heliodón. Elaboración propia.
- Figura 64. Trayectoria solar en equinoccio sobre maqueta 1:50 con heliodón. Elaboración propia.
- Figura 65. Incidencia de radiación solar anual en caso estudio. Elaboración propia.
- Figura 66. Metodología para simulación termoenergética. Elaboración propia.
- Figura 67. Mapa de zonas climáticas, ASHRAE 2019. Recuperado de Covetool por Aguirre (2022).
- Figura 68. Modelado 3d caso estudio por espacios, visión rayos x. Elaboración propia mediante Rhinoceros 3D.

Figura 69. Algoritmo para generar el espacio: sala de espera. Elaboración propia mediante Rhinoceros y Grasshopper.

Figura 70. Algoritmo para generar la actividad metabólica al espacio sala de espera. Elaboración propia mediante Grasshopper.

Figura 71. Algoritmo para niveles de ocupación de las personas. Elaboración propia mediante Grasshopper.

Figura 72. Algoritmo para iluminación. Elaboración propia mediante Grasshopper.

Figura 73. Algoritmo para niveles de ocupación de iluminación. Elaboración propia mediante Grasshopper.

Figura 74. Algoritmo para niveles de ocupación de los equipos. Elaboración propia mediante Grasshopper.

Figura 75. Algoritmo para programa base. Elaboración propia mediante Grasshopper.

Figura 76. Modelado energético, elaboración con Grasshopper: Ladybug tools.

Figura 77. Programación final para correr simulación. Elaboración mediante Grasshopper.

Figura 78. Algoritmos con entradas de EPW. Elaboración mediante Grasshopper.

Figura 79. Programación final para simulación. Elaboración propia mediante Grasshopper.

Figura 80. Planta arquitectónica caso estudio: análisis de baño. Elaboración propia.

Figura 81. Consumo energético por aire acondicionado del baño. Elaboración propia mediante Energy Plus.

Figura 82. Gráfico de consumo energético del baño. Elaboración propia.

Figura 83. Gráfico de barras de temperatura operativa promedio anual del baño. Elaboración propia.

Figura 84. Temperatura operativa anual del baño. Elaboración propia.

Figura 85. Planta arquitectónica caso estudio: análisis de bóveda. Elaboración propia.

Figura 86. Consumo energético por aire acondicionado de bóveda. Elaboración propia mediante Energy Plus.

Figura 87. Gráfico de barras de temperatura operativa promedio anual de bóveda. Elaboración propia.

Figura 88. Temperatura operativa anual de bóveda. Elaboración propia.

Figura 89. Planta arquitectónica caso estudio: análisis de comedor. Elaboración propia.

Figura 90. Consumo energético por aire acondicionado de comedor. Elaboración propia.

Figura 91. Gráfico de temperatura operativa anual de comedor. Elaboración propia.

Figura 92. Gráfico de barras de temperatura operativa promedio anual de comedor. Elaboración propia.

Figura 93. Planta arquitectónica caso estudio: análisis de caja. Elaboración propia.

Figura 94. Consumo energético por aire acondicionado de caja. Elaboración propia.

Figura 95. Gráfico de barras de temperatura operativa promedio anual de caja. Elaboración propia.

Figura 96. Gráfico de temperatura operativa anual de caja. Elaboración propia.

Figura 97. Planta arquitectónica caso estudio: análisis de sala de espera. Elaboración propia.

Figura 98. Consumo energético por aire acondicionado de sala de espera. Elaboración propia.

Figura 99. Consumo energético anual de sala de espera. Elaboración propia.

Figura 100. Consumo energético anual de aire acondicionado: sala de espera. Elaboración propia mediante Dview.

Figura 101. Gráfico de temperatura operativa anual de sala de espera. Elaboración propia.

Figura 102. Gráfico de barras de temperatura operativa promedio anual de sala de espera. Elaboración propia.

Figura 103. Límites de confort térmico: ASHRAE 55 al 80%. Elaboración propia.

Figura 104. Días típicos del caso estudio. Temperatura media promedio de sala de espera. Elaboración propia.

Figura 105. Temperatura operativa periodo anual sin elementos de protección solar. Elaboración propia mediante Ladybug tools.

Figura 106. Temperatura operativa periodo anual con elementos de protección solar. Elaboración propia mediante Ladybug tools.

Figura 107. Temperatura por caras interiores del caso estudio. Sin elementos de protección solar. Elaboración propia mediante Ladybug tools.

Figura 108. Temperatura por caras interiores del caso estudio. Con elementos de protección solar. Elaboración propia mediante Ladybug tools.

Figura 109. Temperatura por caras exteriores del caso estudio. Sin elementos de protección solar. Elaboración propia mediante Ladybug tools.

Figura 110. Temperatura por caras exteriores del caso estudio. Con elementos de protección solar. Elaboración propia mediante Ladybug tools.

Figura 111. Cargas de diseño para a/c caso de estudio. Elaboración propia.

Figura 112. Consumo energético ocasionado por uso de aire acondicionado de caso estudio. Elaboración propia.

Ilustraciones

Ilustración 1. Mapa de Mexicali. Obtenido de IMIP 2023 instituto municipal de investigación y planeación urbana de Mexicali. Todos los derechos reservados.

Ilustración 2. Clima. INEGI. Compendio de información geográfica municipal 2010. Mexicali, baja california. 2010.

Ilustración 3. Geología. INEGI. Compendio de información geográfica municipal 2010. Mexicali, baja california. 2010.

Ilustración 4. Edafología. INEGI. Compendio de información geográfica municipal 2010. Mexicali, baja california. 2010.

Ilustración 5. Plano hidrológico de la zona de estudio. Fuente: cartas de INEGI. Elaboración propia

Ilustración 6. Mapa de irradiación global horizontal de México. Global solar atlas 2.0.

Ilustración 7. Diagrama de días típicos de radiación solar en la ciudad de Mexicali, B.C. Elaboración propia.

Ilustración 8. Diagrama de días de máximas de radiación solar en la ciudad de Mexicali, B.C. Elaboración propia.

Bibliografía

Aguirre, M. (2022). What is a weather file and which ones do we reference.

Amaya, E. (2017). Subsidio eléctrico a la vivienda como subsidio perverso: Caso Mexicali B.C. Universidad Nacional Autónoma de México.

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

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.

Barranco, O. (2015). La arquitectura bioclimática. Módulo Arquitectura CUC, Vol.14 N°2 31-40.

Buen, O. (2016). Conuee y la normalización para la eficiencia energética. CONUEE.

Caballero, K. (2017). Subsidio eléctrico a la vivienda como subsidio perverso: Caso Mexicali B.C. Universidad Nacional Autónoma de México.

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.

CONUEE, SENER. (2017). Catálogo de tecnologías. Tecnologías energéticamente eficientes para la envolvente térmica de las edificaciones.

CONUEE, SENER. (2017). Generando ahorros de energía en las edificaciones: Una guía práctica para el cumplimiento de la NOM 008 y NOM 020.

CONUEE, SENER. (2017). Guía Rápida de Cálculo de la NOM-008-ENER-2001, 2017.

Cruz C. (2004). La arquitectura solar: estrategias y herramientas didácticas para el diseño. Universidad Nacional Autónoma de México.

Culasso, M. G., Ghezan, N., & Viencens, M. (2020). De lo virtual a lo material: diseño paramétrico en piezas cortas de madera. 11086/15119.

Design Builder (2010). Design Builder EnergyPlus Simulation Documentation: for Design Builder v2.3.

Design Builder, 2023. EnergyPlus Weather File (EPW) Format. Climatic Analytics.
<https://designbuilder.co.uk/cahelp/Content/EnergyPlusWeatherFileFormat.htm>

Diario Oficial. (2001). NOM-008-ENER-2001. Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales.

Diario Oficial. (2011). NOM-020-ENER-2001. Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios para no habitacional.

Echeverri, P. (2020). Importancia de la trayectoria solar en la arquitectura. Echeverrimontes.

EnergyPlus (2023). Sitio oficial de EnergyPlus. <https://energyplus.net/>

Esquivias, P., Moreno, D., Fernández, M. (2014). Ahorro energético y confort lumínico: la protección solar en el paradigma de la arquitectura actual. Urbanismo Sostenible.

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

Galindo-Díaz, J., Osuna-Motta, I., & Marulanda-Montes, A. (2020). De componer la fachada a diseñar la envolvente. El ejemplo del arquitecto Juvenal Moya en Cali. Revista De Arquitectura (Bogotá), 22(1). 94-106.

García A., Luna A., Bojórquez G. (2011). Confort Térmico y Consumo Energético por uso de Sistemas Constructivos para Muros, en Mexicali Baja California.

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 Volumen: XXXV

García, E. (1964). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen. UNAM.

García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen. UNAM.

Garduño, R. (1994). El Veleidoso Clima. Fondo de cultura económica, S. A. de C. V. recuperado el 07 de noviembre de 2021.

Gobierno de Navarra (s.f.). Meteorología y climatología de Navarra. Navarra.es.

Gómez A. (2018). Sol y Arquitectura. Laboratorio de Acondicionamiento ambiental FAU-URP.

Groat, L. and Wang, D. (2002). Architectural research methods. New York: Jhon Wiley & Sons.

Guadarrama, C. (2017). Luz natural en la arquitectura. Aportaciones científicas, tecnológicas y de diseño. Universidad Nacional Autónoma de México.

Heidari A. (2018). Arquitectura paramétrica en su segunda fase de Evolución. Journal Of Building Perfomance.

Hernández E. (1991). Arquitectura al Compas Solar. Universidad Nacional Autónoma de México.

Hernández S. (2008). El Diseño Sustentable como Herramienta para el Desarrollo de la Arquitectura y Edificación en México. Universidad de Guanajuato.

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.

Instituto Nacional de estadística y geografía. (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010, Mexicali. INEGI.

Int. Journal of Biometeorol, 36, 201-209, 1992. International Organization for Standardization (2005). ISO 7730: 2005 (E) Ergonomic of the thermal environment analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV.

Jauregui, E. (2000). El clima de la Ciudad de México. Universidad Nacional de México. Plaza y Valdez, S. A. de C. C.

Jones, R. (2013). Clásicos de Arquitectura: Edificio de la Asociación de Propietarios de Mill / Le Corbusier. ArchDaily México.

Jurado, O., Formica, J., Poblete, V., Funes, G., & Rodríguez, A. (2014). ¿Sustentabilidad paramétrica? Segundo Encuentro Investigadores de la RADU-2.014.

Koeppen Wilhelm (1948). Climatología, con estudio de los climas de la tierra. Ciudad de México DF: Fondo de Cultura Económica - CFE.

Ladybug Tools. (2023). Interfaz de la página oficial para descarga del plugin. Ladybug.

Linch, K. (1990). Planificación del sitio. Gustavo Gili, S.A., Barcelona.

Lloy, J. (2002). Arquitectura y entorno, el diseño de la construcción bioclimática. Editorial Blume, Barcelona.

Low-Rise Residential Buildings.

Martín-Monroy Manuel (2007). Manual de iluminación. Manuales de Diseño ICARO, Ayuntamiento y Universidad de las Palmas de Gran Canaria. págs. 26 - 61.

Mejía D. (2002). Diseño y Evaluación del control Solar en la Arquitectura: Caso de estudio La Paz, B.C.S. Universidad Nacional Autónoma de México.

Mejía, D., Morillón, D., Rodríguez, V. (s.f). Potencial estimado de ahorro y uso eficiente de energía en aires acondicionados mediante la protección solar. UNAM.

Miranda V. (s.f). Bio-arquitectura sustentable. Universidad Nacional Autónoma de México.

Morales L. (2005) Resultados del Programa ASI, Congreso de la Asociación de Empresas para el Ahorro de Energía en Edificios, México.

Morales, F. (1987). Arquitectura Vernácula en México. Editorial Trillas, México.

Morales, L. (2012). Arquitectura paramétrica aplicada en envolventes complejas con base en modelos de experimentación en el diseño arquitectónico. Legado De Arquitectura Y Diseño, 7(12), 23-34.

Morillón, D. (2004). Atlas del Bioclima en México. Universidad Nacional Autónoma de México.

Morillón, D. (2004). Modelo para diseño y evaluación del control solar en edificios. Serie investigación y desarrollo. Instituto de ingeniería UNAM.

Morillón, D. (2009). Atlas de la ventilación natural para la república mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México.

Morillón, D. (2011). Edificación sustentable en México: retos y oportunidades. Especialidad: Ingeniería Energética.

Morillón, D., Ceballos, F. (2015). Metodología para la sustentabilidad energética de los edificios, Vivienda net zero energy. Universidad Autónoma Nacional de México.

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).

Olgay, V. (2002). Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. Barcelona: Gustavo Gili.

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%a1zquez%29%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Pacheco L. (2012). Arquitectura paramétrica aplicada en envolventes complejas en base a modelos de experimentación en el diseño arquitectónico. Revista de Arquitectura e Ingeniería, vol. 6, núm. 3, diciembre, 2012, pp. 1-11

Peligros hidrometeorológicos. (s.f). Atlas de riesgos del municipio de Mexicali. Gobierno de Mexicali.

Radiografía de la energía en baja california. (s.f). El colegio de la frontera norte. Centros CONACYT.

Requena, I. (2009). Le Corbusier y el brise-soleil. Universidad de Alicante.

Requena-Ruiz, I. (2012). "Bioclimatismo en la arquitectura de Le Corbusier: El Palacio de los Hilanderos".

Revista Aluminio. (2011). KAWNEER proporciona eficiencia energética y diseño con sus parasoles Kalumen. Recuperado el 30 de noviembre del 2021: <http://revistaaluminio.com/kawneer-proporciona-eficiencia-energetica-y-diseno-con-sus-parasoles-kalumen/>

Rhinoceros. (2023). Rhinoceros. <https://www.rhino3d.com/es/>

Rojas M. (2013). Arquitectura sustentable ¿Utopía o posibilidad? Universidad Nacional Autónoma de México.

Romero, A. (2002). Implicaciones del acondicionamiento ambiental del sector residencial en el consumo de energía eléctrica bajo condiciones climáticas cálidas secas extremas: el caso de Mexicali, B.C. Universidad Nacional Autónoma de México.

Romo C. (2007). La Arquitectura Solar en México. Universidad Nacional Autónoma de México.

Ruiz, I. (2012). Bioclimatismo en la arquitectura de Le Corbusier: El Palacio de los Hilanderos.

Tapia, A. (2014). Envoltentes: la piel de los edificios. Energy Management Magazine.

Tejeda, A., Gómez, G. (2015). Portuario solar de México. Universidad de Colima., Universidad Veracruzana.

Torreblanca V. (2020). Evaluando confort térmico con adobe, bahareque, ladrillo y block: 3 zonas de estudio en Oaxaca. Universidad Nacional Autónoma de México.

TUDELA, F., Ecodiseño. México: Ediciones UAM, 223 pp., 1982.

UNEP-SBCI. (2009). Greenhouse Gas Emission Baselines and Reduction Potentials from Buildings in Mexico.

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/>

Vale, B., Vale, R. (1978). La casa autónoma: Diseño y planificación para la autosuficiencia. Editorial Gustavo Gilli, S. A.

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>

Zeevaert, L. (2021). Interacción del medio ambiente y la envolvente arquitectónica. Universidad Nacional Autónoma de México.