

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

**Área académica de Ingeniería y Arquitectura
Licenciatura en Arquitectura**

Evaluación del desempeño energético en fachada y su impacto en el confort y la salud de los usuarios. caso de estudio. Torre 2 del complejo Altea, Pachuca de Soto, Hidalgo

**Tesis presentada para obtener el título de
Arquitecto**

Alumno:

Javier Mauricio Diaz Barraza

Número de cuenta: 355904

Directora de tesis:

Dra. María del Rosario Dolores Mijangos

Codirector de tesis:

Dr. Carlos Alfredo Bigurra Alzati

Lugar y fecha:

Mineral de la Reforma, Enero de 2026



Mineral de la Reforma, Hgo., a 30 de enero de 2026

Número de control: ICBI-D/154/2026
Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado al egresado de la Licenciatura en Arquitectura **Javier Mauricio Díaz Barraza**, quien presenta el trabajo de titulación "**Evaluación del desempeño energético en fachada y su impacto en el confort y la salud de los usuarios. Caso de estudio. Torre 2 del complejo Altea, Pachuca de Soto, Hidalgo**", ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

- Presidente:** Dr. Francisco Omar Lagarda García
Secretario: Dr. Carlos Alfredo Bigurra Alzati
Vocal: Dra. María del Rosario Dolores Mijangos
Suplente: Dra. Alma Delia Juárez Sedano

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



GVR/MMM

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



uaeh.edu.mx

ÍNDICE

RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
I. INTRODUCCIÓN.....	6
1. Planteamiento del problema.....	6
2. Justificación de estudio.....	7
3. Objetivos.....	8
3.1 Objetivo general.....	8
3.2 Objetivos específicos.....	8
4. Hipótesis.....	9
5. Alcances y limitaciones.....	10
5.1 Alcances.....	10
5.2 Limitaciones.....	10
6.1 Enfoque metodológico.....	11
6.2 Diseño de la investigación.....	11
6.3 Herramientas y software.....	12
6.4 Variables y parámetros analizados.....	13
6.6 Etapas del proceso metodológico.....	14
6.7 Validación de resultados.....	14
II. ANTECEDENTES DEL TEMA.....	15
III. MARCO TEÓRICO Y LEGAL.....	17
1. Eficiencia energética en edificios.....	17
1.1 Conceptos básicos de energía y consumo.....	17
1.2 Balance energético en arquitectura.....	17
1.3 Normativas y estándares energéticos aplicables.....	18
2. Fachadas y su influencia en el comportamiento térmico.....	18
2.1 Tipologías de fachadas.....	18
2.2 Materiales y transmitancia térmica.....	19
2.3 Estrategias pasivas y activas de control térmico.....	19
3. Control solar en fachadas.....	20
3.1 Elementos de control solar arquitectónico.....	20
3.3 Antecedentes de estudios en climas templado-secos.....	20
4. Simulación computacional energética.....	21
4.1 Principios de simulación energética.....	21
4.2 Software empleados.....	21
5.1 Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011.....	22
5.2 NOM-008-ENER-2001.....	22
5.3 Norma internacional ISO 13790:2008.....	23
IV. Metodología.....	24
1. Selección del edificio de estudio.....	24
2. Modelados.....	30
3. Obtención, análisis e integración de los datos meteorológicos (EPW).....	33
3.1 Localización de la estación meteorológica.....	34

3.2 Obtención del archivo climático EPW.....	35
3.3 Análisis preliminar de los datos climáticos.....	36
3.4 Integración del modelo y los datos climáticos en Rhino.....	38
3.5 Conexión del archivo EPW con Grasshopper y Ladybug.....	38
4. Programación visual y flujo de trabajo.....	39
IV. Resultados y Análisis.....	42
1. Caracterización climática del sitio (base para el análisis).....	42
2. Análisis de horas de sol directo.....	44
3. Análisis de radiación solar incidente.....	46
4. Análisis comparativo de alta radiación solar en la fachada sur.....	48
4.1 Evaluación del impacto energético por alta radiación solar.....	48
4.2 Discusión de resultados.....	49
V. Conclusiones y Recomendaciones.....	50
VI. Anexos.....	52
Anexo A. Distribución de la torre y tipologías de vivienda.....	52
Anexo B. Modelo tridimensional del edificio y emplazamiento georreferenciado.....	54
Anexo C. Gráfica solar con respecto al emplazamiento.....	55
Anexo D. Gráfica solar con temperatura promedio diaria.....	55
Anexo H. Modelo base y configuración inicial del sitio.....	58
Anexo I. Modelo tridimensional del edificio – vistas generales.....	58
Anexo K. Comparación de radiación solar en diferentes superficies.....	60
Anexo L. Análisis de temperatura de bulbo seco.....	61
Anexo N. Análisis de radiación solar en planta y trayectoria anual.....	62
Anexo O. Diagramas climáticos del archivo EPW.....	63
Anexo P. Gráficas de radiación y nubosidad.....	66
Anexo R. Diagramas de confort térmico.....	67
Anexo R. Diagramas de confort térmico.....	68
VII. Bibliografía.....	69

RESUMEN

La presente investigación analiza el impacto de la radiación solar incidente en el desempeño energético de fachadas verticales mediante simulación computacional, tomando como caso de estudio la Torre 2 del Complejo Altea, ubicada en Pachuca de Soto, Hidalgo. El objetivo principal fue evaluar comparativamente tres escenarios de fachada: Caso Base, Edificio Real y Edificio Prototipo con elementos de control solar, con el propósito de determinar la influencia de estrategias pasivas en la reducción de la ganancia térmica y su efecto potencial en la eficiencia energética del edificio.

La metodología adoptó un enfoque cuantitativo y comparativo, empleando herramientas de modelado tridimensional y programación visual como Rhinoceros 3D, Grasshopper y Ladybug Tools, integradas con datos climáticos reales en formato EPW. Se realizaron análisis de geometría solar, horas anuales de sol directo y radiación solar incidente acumulada, expresada en kWh/m² y W/m², bajo las condiciones climáticas específicas del sitio.

Los resultados evidencian que el Caso Base presenta la mayor exposición solar y la más alta carga térmica potencial, mientras que el Edificio Real muestra una reducción parcial derivada de su configuración geométrica existente. El Edificio Prototipo logró disminuir significativamente la radiación incidente acumulada en la fachada sur, alcanzando reducciones cercanas al 50% en comparación con el Caso Base.

Se concluye que la incorporación de estrategias pasivas de control solar mejora el desempeño energético potencial de edificios verticales en climas templados de altitud, validando la simulación computacional como herramienta eficaz para la toma de decisiones arquitectónicas sustentables.

ABSTRACT

This research analyzes the impact of incident solar radiation on the energy performance of vertical facades through computational simulation, using Tower 2 of the Altea Complex in Pachuca de Soto, Hidalgo, Mexico, as a case study. The main objective was to comparatively evaluate three facade scenarios: the Base Case, the Existing Building, and the Prototype Building incorporating passive solar control elements, in order to determine the influence of passive design strategies on thermal gain reduction and their potential effect on overall building energy performance.

The study followed a quantitative and comparative methodology, employing three-dimensional modeling and visual programming tools such as Rhinoceros 3D, Grasshopper, and Ladybug Tools, integrated with real climate data in EPW format. Solar geometry, annual hours of direct sunlight, and cumulative incident solar radiation (kWh/m^2 and W/m^2) were analyzed under site-specific climate conditions.

Results indicate that the Base Case presents the highest solar exposure and thermal load potential, while the Existing Building shows a partial reduction due to its existing geometric configuration. The Prototype Building achieved a significant decrease in cumulative incident radiation on the south facade, reaching reductions of approximately 50% compared to the Base Case.

It is concluded that incorporating passive solar control strategies improves the potential energy performance of vertical residential buildings in temperate high-altitude climates and confirms computational simulation as an effective decision-making tool for sustainable architectural design.

I. INTRODUCCIÓN

1. Planteamiento del problema

En las últimas décadas, el sector de la construcción se ha consolidado como uno de los mayores consumidores de energía a nivel mundial. Los edificios, tanto comerciales como residenciales, demandan grandes cantidades de energía para mantener condiciones de confort térmico adecuadas. Una parte importante de este consumo se origina en el comportamiento térmico de la envolvente, especialmente en las fachadas, que son las superficies más expuestas a la radiación solar directa.

En México, los nuevos desarrollos urbanos tienden a priorizar la estética, la altura y la rentabilidad, sin considerar de manera suficiente el impacto energético derivado de los materiales y soluciones constructivas empleados en las fachadas. Esto provoca que los sistemas de climatización trabajen a mayor capacidad, incrementando los gastos energéticos y las emisiones contaminantes.

Ante este panorama, la incorporación de estrategias pasivas de control solar en las fachadas, como el uso de elementos de sombreado en vanos, se presenta como una alternativa para reducir la carga térmica que incide sobre la envolvente del edificio, mejorar el confort térmico interior y contribuir a la disminución del consumo energético. Estos dispositivos limitan la radiación solar directa sobre muros y ventanas, reducen la temperatura superficial de la fachada y disminuyen la ganancia de calor hacia el interior del edificio.

No obstante, aunque existen diversos estudios relacionados con el comportamiento térmico de la envolvente arquitectónica y el uso de elementos de sombreado, gran parte de la literatura se concentra en climas templados o húmedos y en edificaciones de baja altura. En el contexto mexicano, y particularmente en ciudades de clima templado-seco como Pachuca, aún es limitada la evidencia cuantitativa que evalúe el impacto real de estas estrategias en edificios verticales de uso habitacional o mixto, a través de herramientas de simulación energética que permitan comparar distintos escenarios de diseño de fachada.

2. Justificación de estudio

El crecimiento urbano y la densificación de las ciudades mexicanas han incrementado significativamente el consumo energético de los edificios, principalmente debido al uso intensivo de sistemas de climatización. En este contexto, el sector de la construcción representa uno de los principales consumidores de energía, siendo responsable de una proporción considerable de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a nivel nacional. Ante esta problemática, resulta necesario explorar **estrategias pasivas aplicadas a la envolvente arquitectónica** que permitan reducir la demanda energética sin comprometer el confort térmico interior.

El caso de estudio seleccionado, la **Torre 2 del complejo Altea en Pachuca, Hidalgo**, constituye un ejemplo representativo de edificación contemporánea con características arquitectónicas adecuadas para evaluar este tipo de estrategias. Su ubicación geográfica y orientación solar permiten analizar el comportamiento térmico y energético del edificio bajo condiciones climáticas reales del centro de México. Asimismo, el inmueble presenta superficies de fachada y vanos de dimensión considerable, lo que posibilita su análisis mediante **simulación computacional**, comparando distintos escenarios de diseño, como una **fachada convencional** y una **fachada con elementos de sombreado en ventanas**.

El presente trabajo busca justificar la pertinencia de **incorporar y evaluar dispositivos de control solar en las fachadas** como estrategia pasiva dentro de la arquitectura contemporánea mexicana, demostrando de manera cuantitativa su impacto en el desempeño energético del edificio. A través del uso de herramientas de simulación energética, se obtendrán resultados precisos sobre la demanda de energía para climatización, lo que permitirá valorar el potencial de estas soluciones para mejorar la eficiencia energética en climas templado-secos.

En suma, el estudio se justifica tanto por su **relevancia ambiental**, al contribuir a la reducción del consumo energético y de las emisiones asociadas de CO₂, como por su **valor técnico y académico**, al generar información cuantitativa que fortalezca el análisis del desempeño térmico de las fachadas y la aplicación de estrategias pasivas en edificaciones verticales dentro del contexto urbano mexicano

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Analizar comparativamente el desempeño energético de la fachada convencional y una fachada con elementos de control solar en vanos en la Torre 2 del complejo Altea, ubicada en Pachuca, Hidalgo, mediante simulaciones computacionales realizadas con Rhinoceros + Ladybug/Honeybee, con el fin de determinar el impacto de la configuración de la fachada vertical en la reducción del consumo energético del edificio.

3.2 Objetivos específicos

1. **Modelar tridimensionalmente la Torre 2 del complejo Altea en Rhinoceros**, definiendo las condiciones arquitectónicas, constructivas, climáticas y de orientación solar del sitio de estudio, con el fin de establecer una base realista para la simulación energética.
2. **Simular el comportamiento energético** de la fachada convencional y de la fachada con elementos de control solar en ventanas, bajo condiciones controladas, utilizando los complementos Ladybug y Honeybee.
3. **Comparar y evaluar los resultados obtenidos**, considerando la demanda energética para climatización, la temperatura superficial de la fachada y los porcentajes de ahorro energético, con el propósito de analizar la viabilidad de estrategias pasivas de control solar en edificaciones verticales ubicadas en climas templado-secos del contexto mexicano.

4. Hipótesis

La incorporación de elementos de control solar en la fachada de la Torre 2 del complejo Altea producirá una reducción significativa en el gasto energético destinado a climatización, en comparación con el modelo de fachada convencional. Esta disminución se atribuye a la capacidad de dichos elementos para reducir la ganancia solar directa, disminuir la temperatura superficial de la envolvente y mejorar el comportamiento térmico del edificio bajo las condiciones climáticas locales.

Asimismo, se espera que el modelo con elementos de sombreado en ventanas presente temperaturas superficiales exteriores más bajas, particularmente en las orientaciones con mayor exposición solar. De igual manera, la demanda energética total para climatización del modelo con control solar será menor que la del modelo de fachada convencional, evidenciando un mejor desempeño térmico de la envolvente. En contraste, el modelo de fachada convencional mostrará mayores ganancias térmicas y un consumo energético más elevado en comparación con el escenario que incorpora dispositivos pasivos de sombreado.

5. Alcances y limitaciones

5.1 Alcances

La modelación arquitectónica detallada del caso de estudio.

La definición de parámetros climáticos locales y condiciones de orientación solar propias de Pachuca, Hidalgo.

La simulación de la demanda energética anual y la temperatura superficial de la fachada en los distintos escenarios analizados.

El análisis comparativo de resultados, identificando el potencial de ahorro energético y mejora térmica derivado del uso de elementos de control solar en la fachada.

La propuesta técnica y conceptual de una **estrategia de sombreado en fachada** adecuada a las condiciones climáticas y arquitectónicas del edificio.

5.2 Limitaciones

El análisis se restringe a simulaciones energéticas, por lo que no se realizará una medición física directa en sitio.

Las simulaciones se enfocan exclusivamente en el comportamiento de la envolvente del edificio, sin considerar variaciones internas como ocupación, iluminación o cargas por equipos eléctricos.

El estudio no contempla el análisis de costos económicos ni aspectos de mantenimiento de los elementos de sombreado, limitándose al desempeño térmico y energético.

La precisión de los resultados dependerá de la calidad de los datos climáticos utilizados, del modelo digital y de los parámetros ingresados en el software de simulación.

Los resultados y conclusiones son aplicables al contexto climático y arquitectónico de Pachuca, por lo que su comportamiento podría variar en otras regiones o tipologías edificatorias.

6. Metodología general del trabajo

6.1 Enfoque metodológico

La presente investigación se enmarca dentro de un **enfoque cuantitativo y comparativo**, sustentado en la obtención, procesamiento y análisis de datos numéricos generados mediante **simulaciones computacionales**. El objetivo central es evaluar y contrastar el desempeño energético de **dos configuraciones de fachada** aplicadas a un mismo edificio: una **fachada convencional** y una **fachada que incorpora elementos de control solar en los vanos**.

El análisis se enfoca en la medición de **variables energéticas y térmicas**, con el propósito de determinar la influencia de cada configuración de fachada en la **eficiencia energética global del edificio**. Este enfoque resulta adecuado al buscar una interpretación objetiva basada en **resultados cuantificables y comparables**, obtenidos bajo condiciones climáticas controladas mediante herramientas de simulación.

6.2 Diseño de la investigación

El diseño metodológico adoptado es de tipo **experimental simulado**, ya que se basa en la recreación digital del **comportamiento energético y térmico de la envolvente del edificio** bajo condiciones climáticas reales y controladas, mediante herramientas de simulación computacional.

El caso de estudio seleccionado corresponde a la **Torre 2 del conjunto Altea Pachuca**, un edificio de departamentos localizado en la ciudad de Pachuca, Hidalgo, México. La elección de este caso responde a su **tipología residencial vertical** y a su representatividad dentro de la arquitectura contemporánea en **clima templado-seco**. Asimismo, su geometría, altura y orientación permiten una evaluación precisa de los **efectos de la radiación solar sobre las fachadas**, así

como del desempeño térmico y energético de la envolvente bajo distintos escenarios de configuración de fachada.

6.3 Herramientas y software

Para el desarrollo de la investigación se emplearán diversas **herramientas digitales y fuentes de información** reconocidas por su precisión y validez científica en el **análisis ambiental, climático y energético de edificaciones**, las cuales permiten obtener, procesar y analizar datos confiables bajo un enfoque cuantitativo.

- **Rhinoceros 3D**: Software de modelado tridimensional de alta precisión geométrica, utilizado para la representación detallada del edificio de estudio y la generación del modelo base para las simulaciones energéticas.
- **Grasshopper**: Entorno de modelado paramétrico integrado a Rhinoceros, empleado para la gestión de flujos de trabajo y algoritmos de simulación ambiental, facilitando la vinculación entre el modelo geométrico y los datos climáticos.
- **Ladybug y Honeybee**: Complementos de Grasshopper que permiten realizar análisis climáticos, estudios de radiación solar, horas de sol directo y simulaciones energéticas del edificio, utilizando el motor de cálculo **EnergyPlus**, ampliamente validado en investigaciones científicas sobre desempeño energético (Roudsari & Pak, 2013).
- **Climate Studio**: Software de simulación lumínica y energética avalado por **ASHRAE**, empleado como herramienta de apoyo para la verificación de resultados y el análisis del confort térmico interior, fortaleciendo la confiabilidad de los datos obtenidos (Solemma LLC, 2023).
- **Google Earth Pro**: Herramienta utilizada para la geolocalización del sitio, análisis del entorno inmediato, verificación de orientación y contexto urbano del edificio de estudio, así como para apoyar la correcta implantación del modelo digital.
- **Autodesk Revit**: Software BIM empleado como apoyo para la interpretación del sistema constructivo y la organización de la información arquitectónica del edificio, facilitando la comprensión de la envolvente y sus componentes.
- **Fuentes climáticas oficiales (CONAGUA y Servicio Meteorológico Nacional)**: Utilizadas para la obtención y validación de datos climáticos locales, tales como temperatura, radiación solar y condiciones atmosféricas predominantes en la ciudad de Pachuca, Hidalgo, garantizando la pertinencia y confiabilidad de la información utilizada en las simulaciones.

- **Herramientas de visualización y análisis de datos (Microsoft Excel y software de visualización de datos):** Empleadas para el procesamiento de resultados, elaboración de tablas comparativas, gráficas y diagramas que permiten interpretar de manera clara el comportamiento energético y térmico de los distintos escenarios analizados.

6.4 Variables y parámetros analizados

Las variables de análisis se centran en **indicadores energéticos, térmicos y de confort**, los cuales permiten valorar el desempeño de la **envolvente arquitectónica** bajo distintas configuraciones de fachada. Se incluyen las siguientes variables principales:

- Gasto energético total (kWh/año).
- Consumo energético por calefacción y enfriamiento (kWh/m²).
- Ganancia térmica solar (W/m²).
- Temperatura interior promedio (°C).
- Demanda energética por metro cuadrado útil (kWh/m²/año).
- Reducción porcentual del consumo energético entre modelos.
- Confort térmico interior, medido mediante la **temperatura operativa** y los parámetros establecidos por la norma **ASHRAE Standard 55-2017** (ASHRAE, 2017).

Asimismo, se consideran **variables complementarias**, tales como el **factor de sombra**, la **transmitancia térmica (U-value)** de los materiales de la envolvente y el **comportamiento de la radiación solar incidente en superficies verticales**, con el fin de establecer correlaciones entre el diseño de la fachada, la ganancia solar y el desempeño térmico interior del edificio.

6.5 Condiciones de simulación

Las simulaciones se realizarán con base en **condiciones climáticas reales** de la ciudad de Pachuca, Hidalgo, utilizando archivos meteorológicos en formato **.EPW (EnergyPlus Weather File)**, obtenidos de estaciones climatológicas locales o de bases de datos validadas por el **U.S. Department of Energy**.

Se integrarán parámetros de **latitud, orientación, radiación solar, temperatura ambiente, velocidad del viento y humedad relativa**, representativos del **clima templado-seco** de la región (INEGI, 2020).

Durante el desarrollo de las simulaciones se mantendrán **constantes** las condiciones de ocupación, horarios de uso y cargas internas del edificio, de modo que las diferencias observadas entre los escenarios analizados se atribuyan exclusivamente a las **características de la fachada y los elementos de control solar incorporados**.

6.6 Etapas del proceso metodológico

El proceso metodológico se estructura en **seis fases principales**, descritas a continuación:

1. **Investigación previa:** Revisión bibliográfica sobre eficiencia energética, comportamiento térmico de fachadas, control solar pasivo y herramientas de simulación computacional aplicadas a la arquitectura sustentable.
2. **Modelado del edificio actual:** Elaboración del modelo tridimensional de la Torre 2 del conjunto Altea Pachuca en Rhinoceros, con base en planos arquitectónicos y observaciones del edificio existente.
3. **Modelado base de referencia:** Simplificación del modelo para generar un escenario base con **fachada convencional**, el cual funciona como punto de comparación para el análisis energético.
4. **Modelado con propuesta de fachada con control solar:** Desarrollo de un modelo alternativo que incorpora **elementos de sombreado en vanos**, diseñados en función de la orientación y condiciones geométricas del edificio.
5. **Simulaciones computacionales:** Ejecución de ambos modelos mediante los complementos Ladybug y Honeybee con el motor de cálculo EnergyPlus, así como la verificación de resultados en Climate Studio, registrando variables de gasto energético, ganancia térmica, temperatura interior y confort térmico.
6. **Análisis comparativo y conclusiones:** Procesamiento de resultados, elaboración de tablas y gráficos comparativos, e interpretación de los datos obtenidos para determinar el impacto energético y térmico de las distintas configuraciones de fachada.

6.7 Validación de resultados

Los resultados obtenidos se comparan con los valores de referencia establecidos en la **NOM-008-ENER-2011** (Secretaría de Energía, 2011) y la norma **ASHRAE 90.1-2019** (ASHRAE, 2019), las cuales definen los niveles mínimos de eficiencia energética aplicables a edificaciones y envolventes térmicas.

Esta validación permitirá determinar el **grado de mejora en el desempeño energético** que aporta la **fachada con elementos de control solar** en comparación con la fachada convencional, con base en criterios técnicos reconocidos a nivel nacional e internacional.

II. ANTECEDENTES DEL TEMA

La relación entre arquitectura y clima ha sido un eje fundamental en el desarrollo histórico de la edificación. Desde las civilizaciones antiguas, las estrategias constructivas respondían directamente a las condiciones ambientales locales. En regiones cálidas y templadas, elementos como aleros, patios, muros gruesos y celosías permitían controlar la incidencia solar y regular la temperatura interior sin depender de sistemas mecánicos. Estas soluciones vernáculas constituyen los primeros antecedentes del control solar pasivo en fachadas, al integrar el conocimiento climático al diseño arquitectónico.

Con la Revolución Industrial y el surgimiento del Movimiento Moderno en el siglo XX, la arquitectura experimentó una transformación significativa. La incorporación masiva del acero y el vidrio dio lugar a fachadas ligeras y grandes superficies acristaladas, priorizando la transparencia y la estética sobre el comportamiento térmico. Sin embargo, esta tendencia incrementó las ganancias térmicas solares y la dependencia de sistemas de climatización artificial. La crisis energética de 1973 marcó un punto de inflexión al evidenciar la vulnerabilidad del modelo energético basado en combustibles fósiles, impulsando investigaciones orientadas a mejorar la eficiencia energética de los edificios (IEA, 2019).

A nivel internacional, el desarrollo de estándares como ASHRAE 90.1 y métodos de cálculo energético como los establecidos en la norma ISO 13790:2008 consolidaron el análisis cuantitativo del desempeño térmico de la envolvente. Estas herramientas permitieron evaluar el balance energético de los edificios considerando ganancias solares, transmitancia térmica y demanda de calefacción y enfriamiento (ISO, 2008; ASHRAE, 2019).

En México, la problemática energética en edificaciones se formalizó mediante la publicación de la NOM-008-ENER-2001 y la NOM-020-ENER-2011, las cuales establecen límites de transmitancia térmica y criterios de eficiencia para la envolvente en distintos usos y zonas climáticas (DOF, 2001; DOF, 2011). No obstante, gran parte de la investigación nacional se ha centrado en vivienda unifamiliar o edificaciones de baja altura, siendo limitada la evidencia aplicada a edificios residenciales verticales en climas templados de altitud.

Paralelamente, el avance de herramientas de simulación computacional como EnergyPlus y entornos paramétricos integrados a modelado tridimensional ha permitido analizar con mayor precisión la radiación solar incidente, las horas de sol directo y su impacto en el desempeño energético de fachadas (Roudsari & Pak, 2013). Estas tecnologías han transformado el diseño arquitectónico al facilitar la toma de decisiones basada en datos verificables.

En este contexto, el análisis del comportamiento solar en fachadas verticales mediante simulación computacional representa una continuidad histórica en la búsqueda de soluciones arquitectónicas adaptadas al clima, integrando tradición pasiva y tecnología digital para mejorar la eficiencia energética en edificaciones contemporáneas.

III. MARCO TEÓRICO Y LEGAL

1. Eficiencia energética en edificios

1.1 Conceptos básicos de energía y consumo

El gasto energético de un edificio se define como la cantidad de energía que requiere para mantener sus operaciones y condiciones de habitabilidad durante un periodo determinado. Este consumo incluye la climatización, la iluminación artificial, la ventilación y el funcionamiento de equipos eléctricos y mecánicos. La eficiencia energética busca reducir dicho consumo sin comprometer el confort de los usuarios, optimizando la relación entre la energía utilizada y el bienestar térmico alcanzado (Sleman & Atakara, 2024).

En la arquitectura contemporánea, el consumo energético está estrechamente ligado al diseño de la **envolvente del edificio**, ya que los materiales, la orientación, el nivel de aislamiento y el control de la radiación solar influyen directamente en las pérdidas y ganancias térmicas. Un diseño eficiente de la fachada permite disminuir la demanda de calefacción o refrigeración y, por ende, reducir el impacto ambiental y los costos de operación.

1.2 Balance energético en arquitectura

El balance energético de una edificación analiza la relación entre las **ganancias de calor** —principalmente radiación solar, cargas internas y transmisión térmica— y las **pérdidas de calor** —transmisión, ventilación e infiltraciones—. Este balance permite determinar la demanda de energía necesaria para mantener condiciones adecuadas de confort térmico a lo largo del año.

La norma **ISO 13790:2008** establece métodos de cálculo estandarizados para estimar la demanda energética de calefacción y refrigeración en edificaciones. Dichos métodos consideran las pérdidas de calor por transmisión, ventilación e infiltración, así como las ganancias solares e internas. Estos principios constituyen la base de las herramientas de simulación energética empleadas actualmente para analizar el comportamiento térmico de los edificios (ISO, 2008).

1.3 Normativas y estándares energéticos aplicables

En México, las principales normas relacionadas con la eficiencia energética en edificaciones son la **NOM-008-ENER-2001**, que regula la envolvente térmica de edificios de uso no residencial, y la **NOM-020-ENER-2011**, que establece los requisitos de eficiencia térmica para edificaciones de tipo habitacional. Ambas normas fijan valores máximos de transmitancia térmica (valor U) y coeficientes de sombreado, de acuerdo con las zonas climáticas del país, con el fin de limitar las ganancias de calor excesivas y reducir la demanda de energía para climatización.

A nivel internacional, los estándares de **ASHRAE** y la **ISO 13790:2008** proporcionan marcos de referencia para el cálculo de energía y confort térmico en edificios, permitiendo comparar el desempeño energético de distintas soluciones de envolvente y establecer criterios uniformes para su evaluación.

2. Fachadas y su influencia en el comportamiento térmico

2.1 Tipologías de fachadas

Las fachadas pueden clasificarse según su función constructiva y su comportamiento térmico. Existen fachadas **pesadas**, **ligeras**, **dobles o ventiladas**, así como configuraciones que incorporan **elementos de control solar**.

Las fachadas pesadas, como las de concreto o mampostería, presentan una alta inercia térmica que contribuye a estabilizar las temperaturas interiores. Las fachadas ligeras, como las de vidrio o paneles metálicos, poseen baja masa térmica y alta transmitancia, lo que puede incrementar la demanda energética si no se diseñan con estrategias adecuadas de sombreado. Por su parte, las fachadas dobles o ventiladas integran cámaras de aire que mejoran el aislamiento y permiten disipar el calor acumulado.

La incorporación de **elementos arquitectónicos de control solar**, como aleros, celosías o dispositivos de sombreado en vanos, permite reducir la radiación solar directa sobre la envolvente vertical, disminuyendo la ganancia térmica y mejorando el desempeño energético del edificio.

2.2 Materiales y transmitancia térmica

La transmitancia térmica (valor U) mide la cantidad de calor que atraviesa una superficie por metro cuadrado y por cada grado de diferencia de temperatura. Este valor depende de los materiales que co

mponen la envolvente, su espesor, densidad y conductividad térmica. Un bajo valor de transmitancia indica una mayor capacidad de aislamiento térmico.

Los materiales con mayor masa térmica, como el concreto o la piedra, contribuyen a retardar las fluctuaciones de temperatura, mientras que los materiales aislantes reducen las pérdidas de calor. El diseño eficiente de la envolvente debe equilibrar **inercia térmica, aislamiento y control de la radiación solar**, especialmente en fachadas con alta exposición.

2.3 Estrategias pasivas y activas de control térmico

Las estrategias pasivas buscan optimizar el comportamiento térmico de un edificio mediante el diseño arquitectónico, sin requerir consumo adicional de energía. Entre ellas se incluyen la orientación del edificio, el análisis de la radiación solar, el uso de dispositivos de sombreado, la ventilación natural y el diseño adecuado de la envolvente.

Las estrategias activas, en contraste, emplean sistemas mecánicos o tecnológicos, como equipos de climatización, para mantener el confort térmico interior. En climas templado-secos, la correcta aplicación de **estrategias pasivas de control solar en fachadas** permite reducir significativamente la carga térmica del edificio y, por ende, la demanda energética de los sistemas activos.

3. Control solar en fachadas

3.1 Elementos de control solar arquitectónico

Los elementos de control solar en fachadas incluyen dispositivos diseñados para limitar la incidencia directa de la radiación solar sobre los vanos y superficies verticales. Entre ellos se encuentran aleros, parasoles, celosías, brise-soleil y sistemas de sombreado fijo o móvil. Su efectividad depende de la orientación, geometría del edificio y condiciones climáticas del sitio.

Estos elementos permiten regular la cantidad de radiación que ingresa al edificio, reduciendo la ganancia térmica no deseada y mejorando el comportamiento térmico de la envolvente, especialmente en orientaciones con alta exposición solar.

3.2 Impacto térmico y energético del control solar

Diversos estudios han demostrado que la aplicación de estrategias de control solar en fachadas puede reducir de manera significativa la radiación incidente y la temperatura superficial de los muros, lo que se traduce en una disminución de la demanda energética para enfriamiento en edificios residenciales y de uso mixto.

El análisis de la radiación solar incidente y su distribución sobre la fachada permite identificar zonas críticas de ganancia térmica y evaluar la efectividad de los dispositivos de sombreado como estrategia pasiva para mejorar la eficiencia energética del edificio.

3.3 Antecedentes de estudios en climas templado-secos

Investigaciones previas realizadas en climas templados y templado-secos han evidenciado que la orientación y el diseño de los elementos de control solar influyen directamente en la reducción de la ganancia térmica y el consumo energético en edificaciones verticales. No obstante, en el contexto mexicano aún existen pocos estudios cuantitativos aplicados a edificios de vivienda vertical, particularmente en ciudades como Pachuca, Hidalgo.

4. Simulación computacional energética

4.1 Principios de simulación energética

La simulación energética permite predecir el comportamiento térmico y energético de un edificio mediante modelos computacionales que integran su geometría, materiales, orientación y condiciones climáticas. Estas herramientas proporcionan resultados sobre radiación solar, cargas térmicas, temperatura interior y consumo energético. La norma **ISO 13790:2008** establece los procedimientos base para este tipo de cálculos (ISO, 2008).

4.2 Software empleados

Entre los principales programas de simulación energética se encuentran **EnergyPlus**, **OpenStudio** y plataformas paramétricas como **Rhinoceros 3D** con el complemento **Grasshopper** y los plug-ins **Ladybug** y **Honeybee**. Estas herramientas permiten vincular la geometría del modelo con datos climáticos reales (archivos EPW), realizar análisis de radiación solar y evaluar el desempeño energético de distintas configuraciones de fachada.

4.3 Variables analizadas

Las simulaciones consideran variables como la radiación solar incidente, la temperatura superficial de las fachadas, la transmitancia térmica de los materiales, las ganancias y pérdidas de calor y la demanda energética anual de calefacción y refrigeración. El análisis comparativo de estas variables permite determinar el impacto del diseño de la envolvente y de los elementos de control solar en el desempeño térmico y energético del edificio.

5. Marco legal

El marco normativo que regula la eficiencia energética en edificaciones en México resulta esencial para contextualizar el análisis del comportamiento térmico de las fachadas verticales. En este estudio, cuyo caso de análisis corresponde a una **torre habitacional multifamiliar**, se consideran como referencia principal la **NOM-020-ENER-2011**, aplicable a edificaciones de uso habitacional, y de forma complementaria la **NOM-008-ENER-2001**, que regula edificaciones no habitacionales. Asimismo, se integra la norma internacional **ISO 13790:2008**, que constituye la base teórica para los métodos de cálculo energético empleados en la simulación computacional.

5.1 Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011

Eficiencia energética en edificaciones – Envoltente de edificios para uso habitacional, establece los lineamientos para limitar la ganancia de calor a través de muros, techos y ventanas en viviendas, con el fin de asegurar el confort térmico interior y reducir el consumo energético derivado del uso de sistemas de climatización (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2011). Esta norma introduce el concepto de *presupuesto energético*, que consiste en comparar el desempeño térmico del diseño propuesto contra un modelo base de referencia, ajustado según la zona climática del país. La metodología propuesta en la NOM-020 permite valorar globalmente el aislamiento térmico de la envoltente, por lo que su enfoque resulta directamente aplicable al presente estudio, al analizar el comportamiento energético de las fachadas convencionales y verdes en un edificio de vivienda vertical.

5.2 NOM-008-ENER-2001

Eficiencia energética en edificaciones – Envoltente de edificios para uso no residencial, establece los límites máximos de transmitancia térmica (valor U) y coeficientes de sombreado en muros, techos y ventanas para edificaciones comerciales, de oficinas, hospitales y otros usos no habitacionales (DOF, 2001). Aunque su campo de aplicación no incluye directamente a los edificios de vivienda, se considera relevante como **referencia complementaria**, ya que comparte los mismos principios de control térmico de la envoltente y reducción del consumo energético, especialmente en lo relativo a la ganancia solar y la eficiencia del aislamiento en diferentes zonas climáticas.

5.3 Norma internacional ISO 13790:2008

Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling, proporciona los métodos estandarizados para el cálculo del consumo energético destinado a calefacción y enfriamiento de los espacios interiores (International Organization for Standardization [ISO], 2008). Esta norma constituye una base teórica para los modelos de simulación utilizados en el presente trabajo, ya que define procedimientos de balance térmico compatibles con herramientas como *EnergyPlus*, motor de cálculo que integra los complementos *Ladybug* y *Honeybee* empleados para las simulaciones.

En conjunto, la **NOM-020-ENER-2011** establece los criterios nacionales aplicables al caso de estudio, mientras que la **NOM-008-ENER-2001** y la **ISO 13790:2008** refuerzan el contexto normativo y metodológico del análisis. Esta articulación normativa permite garantizar que los resultados obtenidos en la simulación estén alineados tanto con los estándares nacionales de eficiencia energética en edificaciones habitacionales como con los lineamientos internacionales de evaluación del desempeño energético.

IV. Metodología

1. Selección del edificio de estudio

Caso de estudio: Complejo Altea Luxury & Living (Pachuca, Hidalgo) Torre 2

La Torre Altea es un edificio habitacional vertical contemporáneo ubicado en la ciudad de Pachuca de Soto, Hidalgo, México. El conjunto se compone de una estructura principal de aproximadamente nueve niveles habitables, con una planta baja destinada a accesos, estacionamientos y áreas comunes. Su diseño arquitectónico combina líneas modernas, materiales aparentes y ventanales de gran formato, lo que le otorga una estética sobria y actual. Este tipo de edificación representa una tendencia creciente en la vivienda vertical de la ciudad, orientada hacia la densificación urbana y el aprovechamiento eficiente del suelo.

El edificio se localiza dentro de una zona urbana consolidada, caracterizada por un uso predominantemente residencial y de servicios, con vialidades amplias y zonas verdes que favorecen la ventilación y el confort urbano. Pachuca se encuentra a una altitud aproximada de 2,400 metros sobre el nivel del mar, condición que influye directamente en sus características ambientales y en la demanda energética de los edificios.

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la clasificación climática de Köppen modificada por García (2004), la ciudad presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (Cwb). Las temperaturas medias anuales oscilan entre 12 °C y 16 °C, con máximas promedio cercanas a 25 °C durante el verano y mínimas alrededor de 5 °C en invierno. La radiación solar global media se sitúa entre 5.0 y 5.5 kWh/m² por día, lo que confiere a la zona un potencial solar medio-alto, relevante para el análisis energético de fachadas.

En cuanto a la orientación, la torre presenta su fachada principal hacia el sur-suroeste, lo que permite un aprovechamiento eficiente de la iluminación natural a lo largo del día. No obstante, esta orientación también implica una mayor ganancia térmica durante los meses cálidos, por lo que resulta necesario considerar estrategias de sombreado y control solar. Las fachadas laterales, orientadas al este y oeste, reciben asoleamiento parcial, mientras que la fachada norte mantiene una exposición solar mínima y un comportamiento térmico más estable.

Los vientos dominantes en la región provienen del noreste y suroeste, favoreciendo una ventilación cruzada moderada en los departamentos, especialmente en los

niveles superiores. La combinación de altitud, radiación solar y orientación convierte a Pachuca en un caso de estudio pertinente para evaluar el desempeño energético y térmico de edificaciones habitacionales verticales.

Como parte del proceso de selección del edificio de estudio, en la **Figura 1.1** se muestra la localización urbana del Complejo Altea Luxury & Living en la ciudad de Pachuca de Soto, Hidalgo, lo cual permite contextualizar espacialmente el caso de estudio dentro de su entorno inmediato.



Figura 1.1. Localización urbana del Complejo Altea Luxury & Living en la ciudad de Pachuca de Soto, Hidalgo. *Fuente: Elaboración propia con base en imagen satelital.*

Con el fin de precisar la ubicación del edificio dentro de su contexto urbano inmediato, en la **Figura 1.2** se muestra la localización volumétrica del entorno que rodea a la Torre 2 del Complejo Altea Luxury & Living, lo que permite identificar la relación del edificio con las vialidades principales y las edificaciones colindantes.



Figura 1.2. Representación volumétrica del entorno urbano inmediato del Complejo Altea Luxury & Living, donde se aprecia la relación del conjunto con la vialidad principal y las edificaciones circundantes. Fuente: maps apple

Para complementar la selección del edificio de estudio y comprender las condiciones físicas del terreno, en la **Figura 1.3** se presentan las curvas de nivel del sitio donde se emplaza la Torre 2 del Complejo Altea Luxury & Living, las cuales permiten identificar la topografía y las pendientes del terreno.

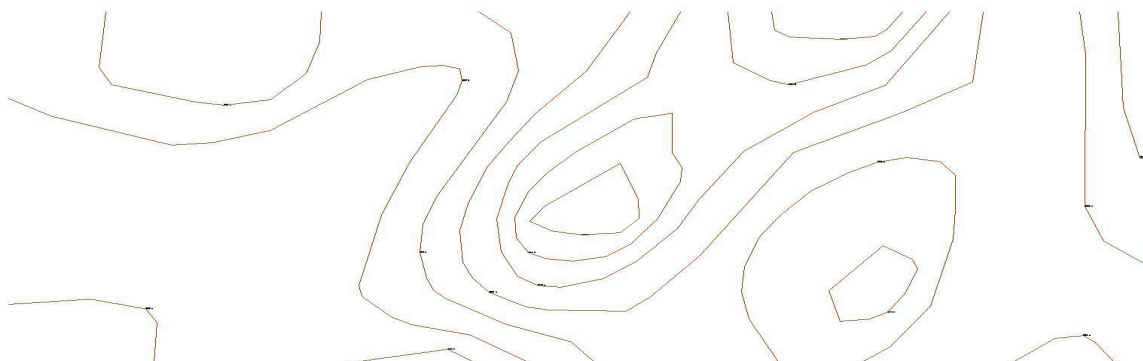


Figura 1.3. Curvas de nivel del terreno correspondiente a la Torre 2 del Complejo Altea Luxury & Living, que muestran la configuración topográfica y las pendientes del sitio. Fuente: *Elaboración propia*.

Con el propósito de analizar la relación del edificio con el terreno y su entorno inmediato, en la **Figura 1.4** se muestra la representación de las curvas de nivel y el perfil del sitio correspondiente a la Torre 2 del Complejo Altea Luxury & Living, lo cual permite comprender la configuración topográfica y su influencia en la implantación del edificio.



Figura 1.4. Curvas de nivel y perfil topográfico del sitio donde se emplaza la Torre 2 del Complejo Altea Luxury & Living.
Fuente: Elaboración propia con base en Google Earth.

Características constructivas y de envolvente

La Torre Altea cuenta con una estructura de concreto armado, basada en losas reticulares y columnas perimetrales, lo que proporciona rigidez y estabilidad ante cargas verticales y laterales. Los muros divisorios están contruidos con tabique ligero y paneles prefabricados, lo que contribuye a la optimización del peso estructural.

La envolvente arquitectónica combina materiales prefabricados, vidrio templado y recubrimientos metálicos, conformando un sistema mixto de alta expresividad formal. Las fachadas principales incorporan paneles compuestos de aluminio (ACP) en tonos metálicos y elementos verticales tipo madera que funcionan como rompesoles parciales, reduciendo la incidencia solar directa sobre los ventanales.

Los ventanales de piso a techo incrementan significativamente la entrada de luz natural, mejorando la iluminación interior durante el día; sin embargo, pueden generar mayores ganancias térmicas si no cuentan con un adecuado control solar pasivo o con vidrios de baja emisividad. Los vidrios templados utilizados presentan una ligera tonalidad gris que disminuye la transmisión de radiación solar, aunque su desempeño térmico es moderado.

En cuanto a los muros exteriores, estos están conformados principalmente por concreto aparente y acabados en pintura reflectante de color claro, lo que contribuye a reducir la absorción de calor. No obstante, el aislamiento térmico general del edificio es limitado, ya que no se identifican sistemas específicos de alta eficiencia energética.

El conjunto de estas características define una envolvente mixta de concreto y vidrio, cuyo comportamiento térmico depende en gran medida de la orientación y del tamaño de los vanos. Esta configuración resulta adecuada para analizar el impacto de las condiciones climáticas y de diseño sobre el consumo energético y el confort térmico interior del edificio.

Con el objetivo de reconocer las características formales y compositivas del edificio seleccionado, en las **Figuras 1.5, 1.6 y 1.7** se presentan diversas vistas de la envolvente arquitectónica de la Torre 2 del Complejo Altea Luxury & Living, las cuales permiten identificar su configuración volumétrica, la composición de sus fachadas, la disposición de vanos y balcones, así como los elementos arquitectónicos predominantes que definen su imagen urbana.



Figura 1.5. Vista de la envolvente arquitectónica de la Torre 2 del Complejo Altea Luxury & Living. Fuente: Imagen obtenida de material promocional inmobiliario



Figura 1.6. Vista de la envolvente arquitectónica de la Torre 2 del Complejo Altea Luxury & Living. Fuente: Imagen obtenida de material promocional inmobiliario



Figura 1.7. Vista de la envolvente arquitectónica de la Torre 2 del Complejo Altea Luxury & Living. Fuente: Imagen obtenida de material promocional inmobiliario

2. Modelados

MODELO 1: FACHADA EXISTENTE

Como parte del proceso de análisis del edificio seleccionado, en la **Figura 2.1**, **Figura 2.2** se presenta el modelo tridimensional de la Torre 2 del Complejo Altea Luxury & Living desarrollado en el software Revit, el cual fue utilizado como base para la representación geométrica y el posterior análisis energético del edificio.

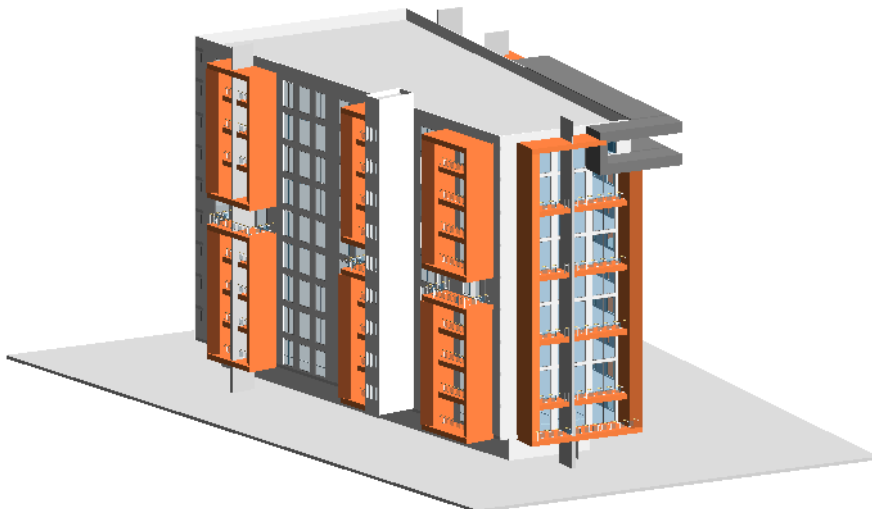


Figura 2.1 Modelo tridimensional de la Torre 2 del Complejo Altea Luxury & Living desarrollado en Revit, utilizado para la representación del edificio y la simulación energética. *Fuente: Elaboración propia.*



Figura 2.1 Modelo tridimensional de la Torre 2 del Complejo Altea Luxury & Living desarrollado en Revit, utilizado para la representación del edificio y la simulación energética. *Fuente: Elaboración propia.*

MODELO 2: FACHADA BASE

Con el fin de establecer el escenario de referencia para la evaluación energética, en la **Figura 2.3**, **Figura 2.4** se muestra el modelo tridimensional correspondiente al caso base de la Torre 2 del Complejo Altea Luxury & Living, desarrollado en el software Revit, el cual representa las condiciones originales del edificio sin la incorporación de estrategias adicionales de control solar.

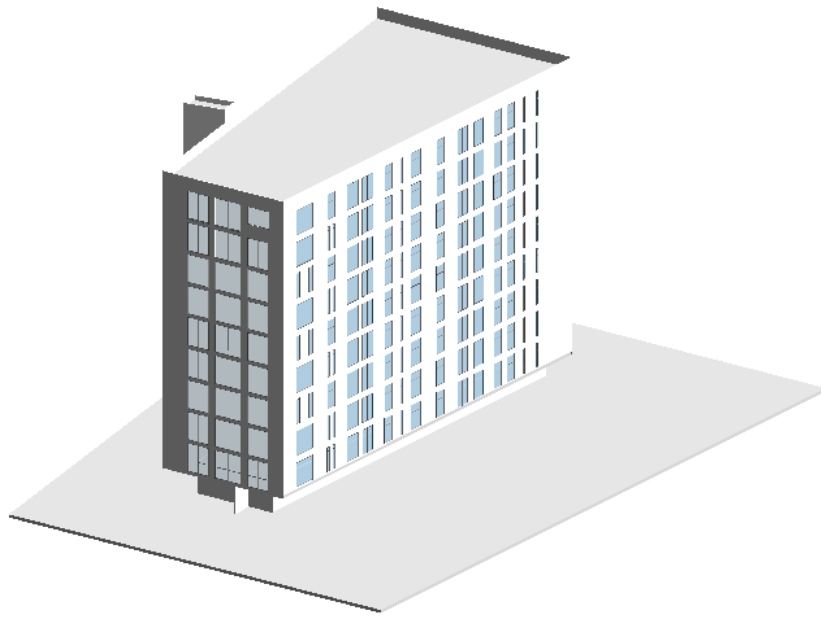


Figura 2.3.

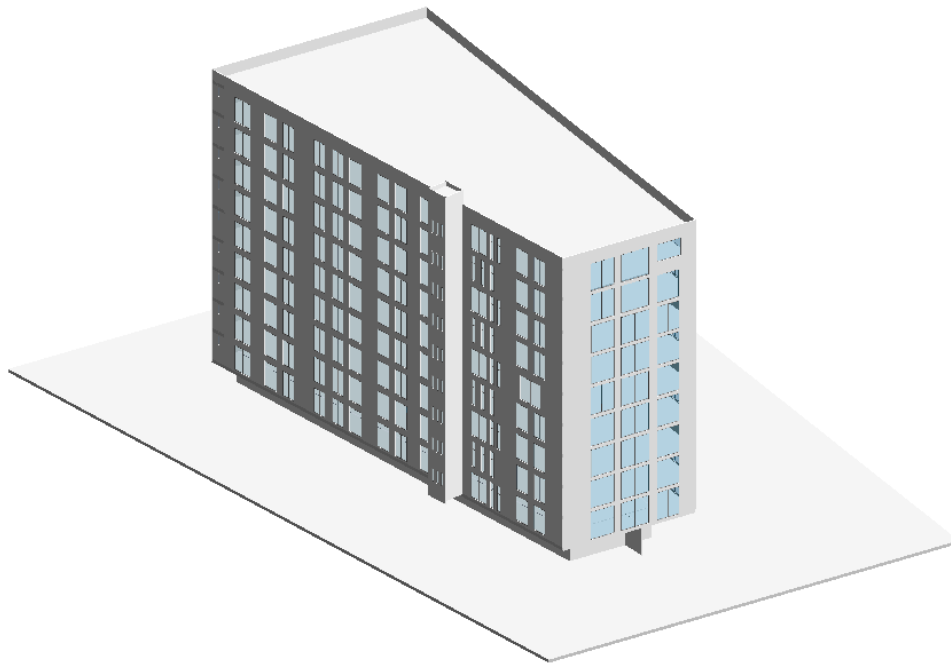


Figura 2.4.

MODELO3: PROTOTIPO

Para la evaluación del impacto de la estrategia propuesta, en la **Figura 2.5.**, **Figura 2.6.** se presenta el modelo tridimensional correspondiente al caso prototipo de la Torre 2 del Complejo Altea Luxury & Living, desarrollado en el software Revit, el cual incorpora los elementos de control solar en la envolvente del edificio para su análisis comparativo.

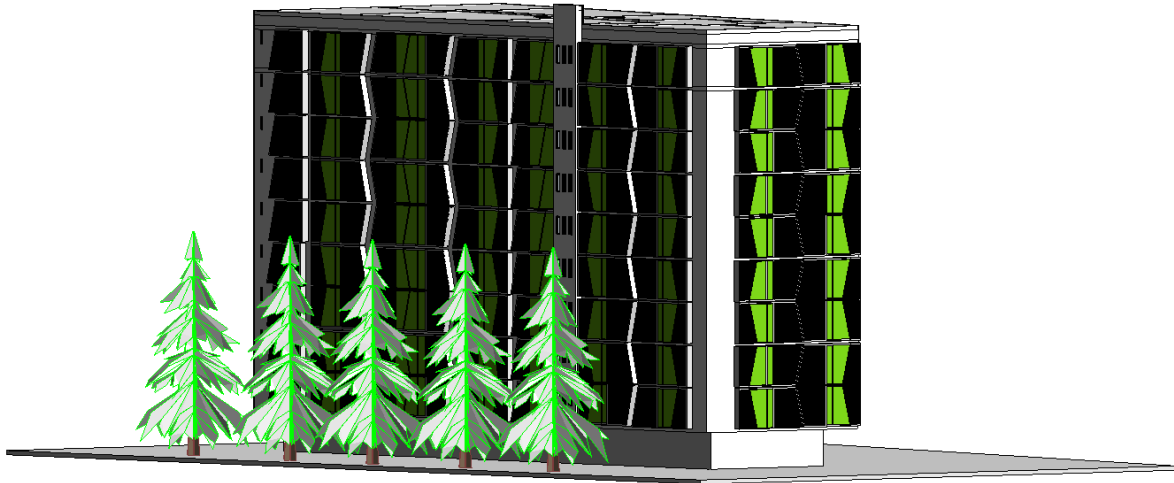


Figura 2.5

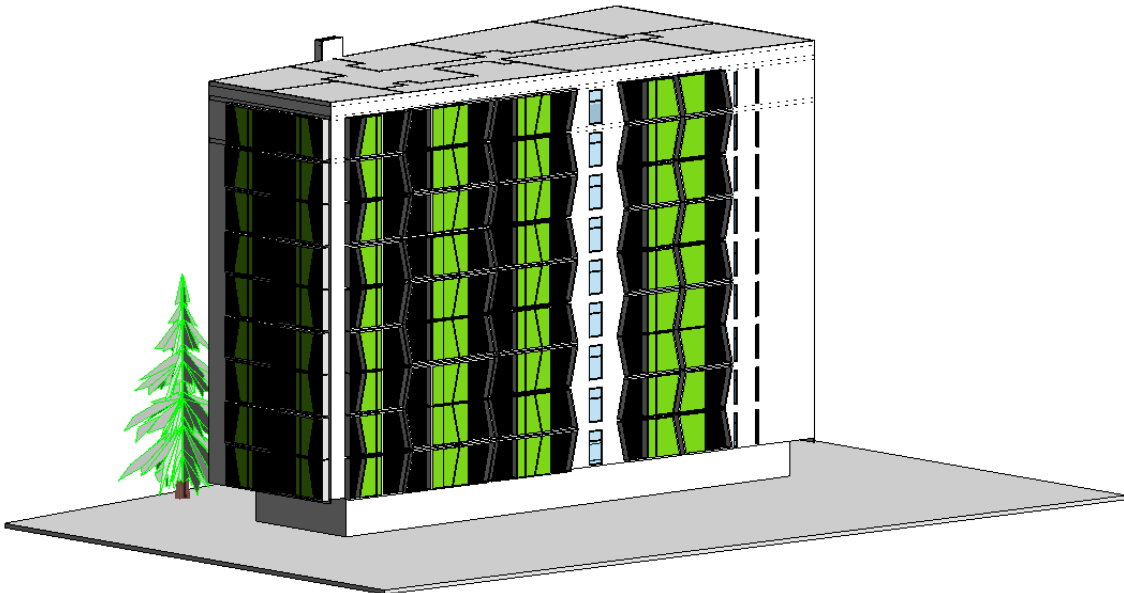


Figura 2.6

3. Obtención, análisis e integración de los datos meteorológicos (EPW)

Para garantizar que el análisis energético se desarrollara con información climática confiable y representativa del sitio de estudio, se llevó a cabo un proceso

sistemático de identificación, evaluación e integración de datos meteorológicos en formato **EPW (EnergyPlus Weather File)**.

3.1 Localización de la estación meteorológica

El proceso inició con la consulta de los **datos climatológicos proporcionados por CONAGUA** (FIGURA 3.1.), los cuales permitieron identificar la estación meteorológica más cercana y adecuada al emplazamiento del proyecto (FIGURA 3.2). Esta selección es fundamental, ya que la precisión en la distancia y representatividad de la estación influye directamente en la fidelidad de los resultados de simulación energética.

Logos: MEDIO AMBIENTE (SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES), CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA), SMN (SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL).

13022	
CLAVE	13022
NOMBRE	PACHUCA (OBS)
ESTADO	HIDALGO
MUNICIPIO	PACHUCA DE SOTO
ORG_CUENCA	AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO
CUENCA	RÍO DE LAS AVENIDAS DE PACHUCA
TIPO_EST	OBSERVATORIO
INICIO	1927-01-01
MAS_RECIENTE	2022-12-31
SITUACION	OPERANDO
LONGITUD	-98.74972222
LATITUD	20.08777778
ALTITUD	2425
DIARIOS	https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Normales_Climatologicas/Diarios/hqo/dia13022.tst
MENSUALES	https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Normales_Climatologicas/Mensuales/hqo/mes13022.tst
EXTREMOS	https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Normales_Climatologicas/Extremos/hqo/medex13022.tst
NORMALES_1981_2010	https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Normales_Climatologicas/Normales8110/hqo/nor8110_13022.tst
NORMALES_1991_2020	https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Normales_Climatologicas/Normales9120/hqo/nor9120_13022.tst

Cómo llegar: [Aquí](#) - [De aquí](#)

Google Earth
 Fechas de imágenes: 3/20/2025 20°05'22.42" N, 98°44'53.48" O, elevación 2369 m alt.ojo 4.52 km

FIGURA 3.1. estación climatológica



FIGURA 3.2. estación climatológica foto

3.2 Obtención del archivo climático EPW

Una vez definida la estación meteorológica, se procedió a obtener los archivos climáticos desde la plataforma (FIGURA 3.2.1):

- <https://climate.onebuilding.org>

Este repositorio compila archivos EPW (**Figura 3.2.1.**) elaborados a partir de información climática real y procesada bajo estándares TMY (Typical Meteorological Year).

Se descargó el archivo correspondiente a la estación identificada, garantizando que coincidiera con la ubicación y condiciones climáticas del área de estudio.

Hidalgo			
MEX_HID_Pachuca.766320_TMYx.2004-2018.zip	411 mil	MEX_HID_Pachuca.766320_TMYx.zip	433 mil
MEX_HID_Pachuca.766320_TMYx.2007-2021.zip	440 mil	MEX_HID_Tulancingo.766340_TMYx.2004-2018.zip	419 mil
MEX_HID_Pachuca.766320_TMYx.2009-2023.zip	444 K	MEX_HID_Tulancingo.766340_TMYx.2007-2021.zip	445 K

FIGURA 3.2.1 captura de climate.onebuilding.org

3.3 Análisis preliminar de los datos climáticos

Para interpretar y validar el contenido del archivo EPW se emplearon dos programas especializados:

a) Climate Consultant

Este software permitió visualizar los patrones climáticos del sitio, así como obtener recomendaciones de **estrategias pasivas** orientadas al confort térmico, entre ellas:

- Ventilación natural
- Sombras estacionales
- Ganancias solares controladas
- Estrategias de enfriamiento pasivo

Su análisis facilitó la comprensión del comportamiento térmico global del emplazamiento.

b) DataView

Este programa complementa la interpretación climática mediante:

- Gráficas de radiación solar directa normal

La **Figura 3.3.1.** correspondiente a la radiación directa muestra los valores horarios de energía solar incidente de manera perpendicular a la trayectoria del sol. Los registros presentan picos que alcanzan frecuentemente entre **700 y 1000 W/m²**, lo que indica una **alta disponibilidad de radiación directa** durante gran parte del año.

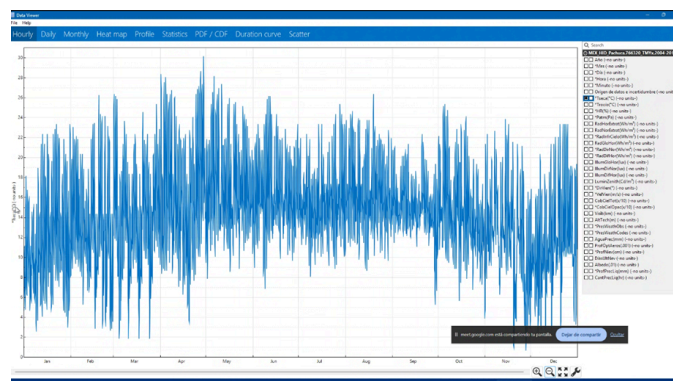


FIGURA 3.3.1. gráfica de radiación directa normal

- Gráficas de radiación solar difusa

La radiación difusa representa la energía solar que llega al plano horizontal tras ser dispersada por la atmósfera. Los valores registrados en la **Figura 3.3.2.** se concentran principalmente entre **0 y 300 W/m²**, con picos ocasionales superiores durante meses con mayor humedad o nubosidad, típicos de la temporada de lluvias.

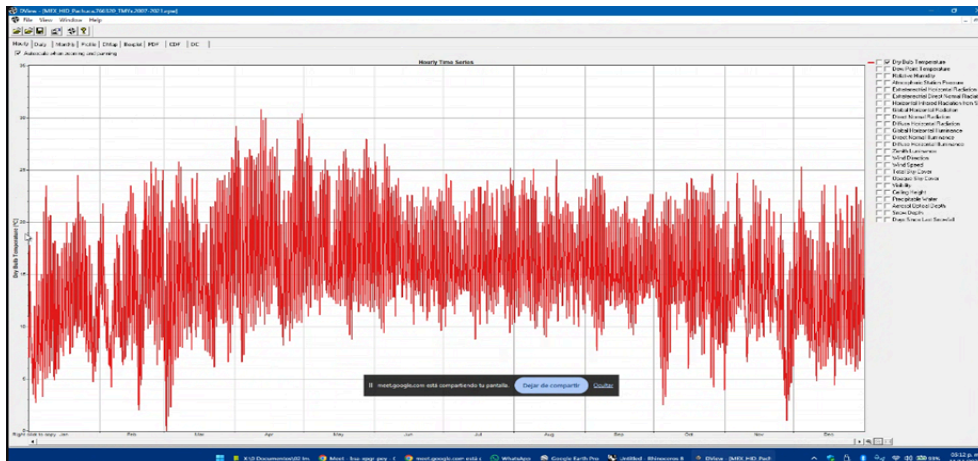
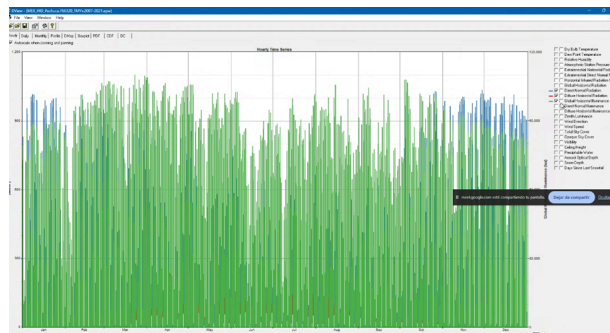


FIGURA 3.3.2. gráfica de radiación solar difusa

- Gráficas de radiación solar global

La radiación global corresponde a la suma de la radiación directa y difusa recibida sobre un plano horizontal. Los valores obtenidos se muestran en la **Figura 3.3.3.** una distribución más estable, alcanzando de manera recurrente rangos entre **400 y 900 W/m²**. Su comportamiento anual refleja con claridad la estacionalidad solar y la disponibilidad energética real que influye en el desempeño térmico general de las envolventes arquitectónicas.

La información obtenida sirvió como referencia para validar la consistencia del archivo EPW y para fundamentar decisiones de diseño bioclimático dentro del



proyecto.

3.4 Integración del modelo y los datos climáticos en Rhino

Después del análisis preliminar, el archivo EPW fue integrado al entorno de modelado digital:

a) Trasladar el modelo del sitio a Rhinoceros

Los modelos geométricos del proyecto fueron cargados en **Rhinoceros 3D**, donde se generó el terreno y su contexto inmediato utilizando:

- **Land Design**
- **Climate Studio**

Ambos programas permitieron ubicar correctamente el proyecto a partir de **sus coordenadas geográficas**, asegurando que las simulaciones consideraran la orientación real del edificio y su interacción con el entorno.

3.5 Conexión del archivo EPW con Grasshopper y Ladybug

La integración definitiva de los datos climáticos con el modelo se realizó mediante **Grasshopper** utilizando los componentes de **Ladybug Tools**.

El procedimiento consistió en:

- **Activación del entorno climático** mediante el componente *Ladybug*.
- **Importación del archivo EPW** con el componente *Import EPW*.
- **Vinculación del archivo con el modelo geométrico**, creando un entorno capaz de simular irradiación solar, análisis térmico y condiciones climáticas por hora.
- Confirmación del correcto enlace mediante gráficos generados automáticamente:
 - Rosa de vientos
 - Diagrama de radiación
 - Perfil horario de temperatura

- Gráficas psicrométricas

Este proceso permitió combinar el modelo tridimensional del edificio con datos climáticos reales, habilitando las simulaciones posteriores de energía y comportamiento térmico necesarias para los análisis de esta investigación.

4. Programación visual y flujo de trabajo

La etapa de programación visual se desarrolló mediante Rhinoceros 3D y Grasshopper, integrando el plugin Ladybug Tools para vincular el modelo geométrico con información climática local. El objetivo fue cuantificar, a partir de un modelo 3D **georreferenciado**, tres indicadores clave para el desempeño solar del edificio: **radiación solar anual incidente**, **geometría solar**, y **horas anuales de sol directo**. Estos análisis se realizaron con base en los datos meteorológicos oficiales (CONAGUA-SMN), con la finalidad de identificar periodos críticos de asoleamiento, orientar la interpretación energética del caso de estudio y sustentar la comparación entre variantes de fachada (por ejemplo, sin dispositivos vs. con sombreadores en vanos).

1) Datos de entrada y preparación del modelo

Para garantizar consistencia en los resultados, el proceso partió de:

- **Ubicación y georreferenciación del modelo:** se definieron coordenadas (latitud/longitud), norte real y contexto inmediato (volúmenes colindantes, elementos de sombra relevantes). Esto permitió que la posición solar y las sombras se calcularan con correspondencia espacial real.
- **Archivo climático:** se incorporó el archivo meteorológico correspondiente a la localidad (fuente CONAGUA-SMN), de donde se obtuvieron series horarias necesarias para los cálculos anuales.
- **Modelo 3D depurado:** se separaron las superficies de análisis (fachadas/vanos) del resto de la geometría; se cuidó la orientación de normales y la escala, para evitar errores de lectura en los componentes de radiación y asoleamiento.

2) Análisis de geometría solar

Se generó la **geometría solar** para visualizar la trayectoria del sol a lo largo del año y ubicar:

- posiciones solares representativas (solsticios y equinoccios),
- rangos horarios críticos (mañana/tarde),
- relación entre orientación de fachadas y altura solar.

Este análisis se utilizó como base interpretativa para explicar por qué ciertas orientaciones reciben mayor carga (p. ej. poniente por radiación de tarde) y para justificar la colocación de estrategias de control solar en vanos.

3) Radiación solar anual

El análisis anual de **radiación solar incidente** se aplicó sobre superficies específicas del edificio (fachadas y/o planos de ventana), mediante una malla de evaluación (grid) con resolución definida. Se configuraron parámetros que influyen directamente en la lectura:

- periodo anual (enero–diciembre),
- inclusión de sombras por contexto,
- densidad de puntos de análisis (resolución del grid),
- superficies objetivo (muros, vidrio o planos representativos del vano).

El resultado se expresó como mapas de radiación (gradientes) y valores acumulados por superficie, lo cual permitió **identificar zonas de mayor ganancia solar** y comparar el efecto geométrico de cada variante (por ejemplo, reducción de radiación en áreas de ventana al incorporar sombreadores).

4) Horas anuales de sol directo

Adicionalmente, se calculó el indicador de **horas de sol directo** para estimar el tiempo acumulado en el que cada superficie permanece expuesta a radiación solar sin obstrucción (sombra). A diferencia de la radiación (energía acumulada), este indicador se enfoca en la **duración de exposición**, útil para:

- Detectar sobreexposición en vanos.
- Reconocer patrones horarios estacionales (p. ej. tardes de meses cálidos).
- sustentar decisiones de control solar (dimensionamiento y prioridad de sombreadores por orientación).

5) Uso de resultados para la comparación de variantes

Los tres análisis (geometría solar, radiación anual y horas de sol directo) funcionaron como **diagnóstico climático-geométrico** previo y como soporte para la interpretación de resultados energéticos posteriores (por ejemplo, consumo, cargas y/o confort). En la comparación entre variantes, se consideró que:

- una reducción de **radiación incidente** y/o **horas de sol directo** sobre planos de ventana suele correlacionarse con menor ganancia térmica por asoleamiento,
- el impacto es más evidente en orientaciones críticas (típicamente poniente/oriente, dependiendo del caso y del contexto),
- la lectura conjunta (energía + duración + trayectoria solar) evita conclusiones incompletas, ya que una superficie puede tener pocas horas de sol directo pero alta radiación en periodos cortos (o viceversa).

6) Criterios de control y limitaciones

Para asegurar reproducibilidad, se mantuvieron constantes: ubicación, archivo climático, orientación del modelo, configuración del grid y consideración de sombras por contexto. Como limitación, estos análisis describen el comportamiento solar sobre geometría (y clima) y no sustituyen por sí mismos una simulación térmico-energética completa; sin embargo, aportan evidencia clara para justificar decisiones de fachada y explicar tendencias en los resultados comparativos.

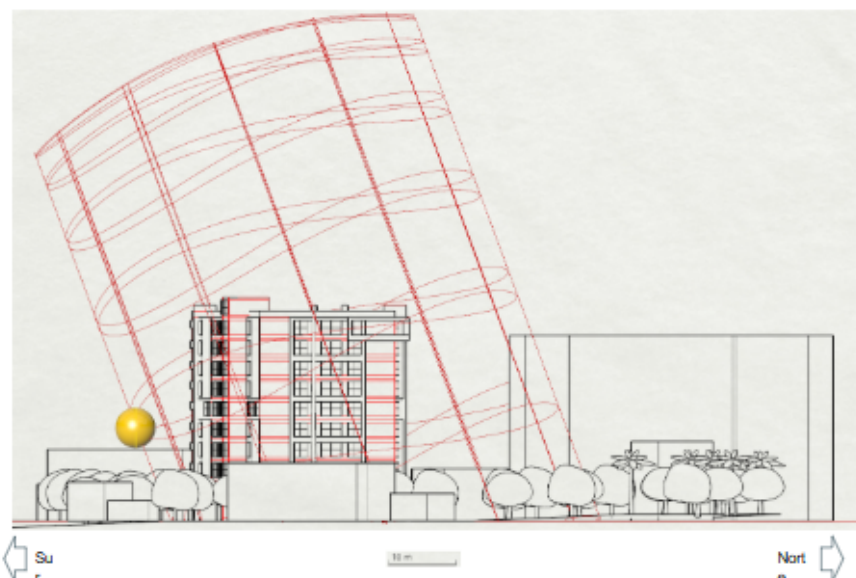
IV. Resultados y Análisis

1. Caracterización climática del sitio (base para el análisis)

Los diagramas climáticos generados para la ciudad de Pachuca de Soto, Hidalgo, permiten establecer el contexto ambiental bajo el cual se desarrolló el análisis del comportamiento solar del edificio. El rango de temperaturas evidencia una variación moderada a lo largo del año, con valores más elevados durante los meses de primavera y verano, y descensos térmicos en los meses de otoño e invierno, particularmente durante las horas nocturnas. Esta condición es característica de climas templados de altitud y resalta la importancia del control de las ganancias solares directas durante el día.

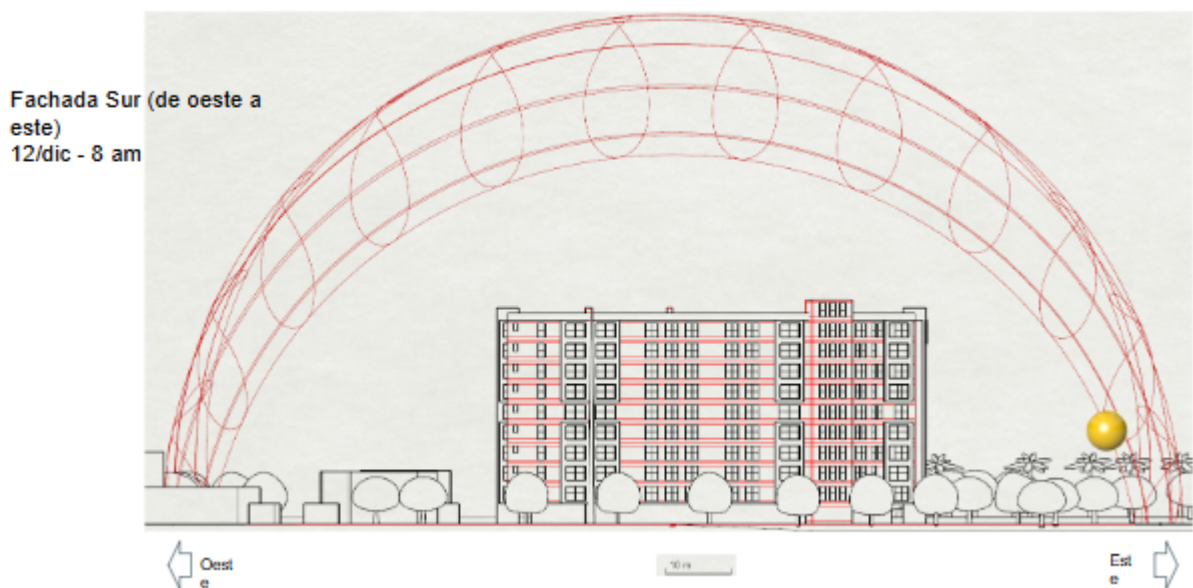
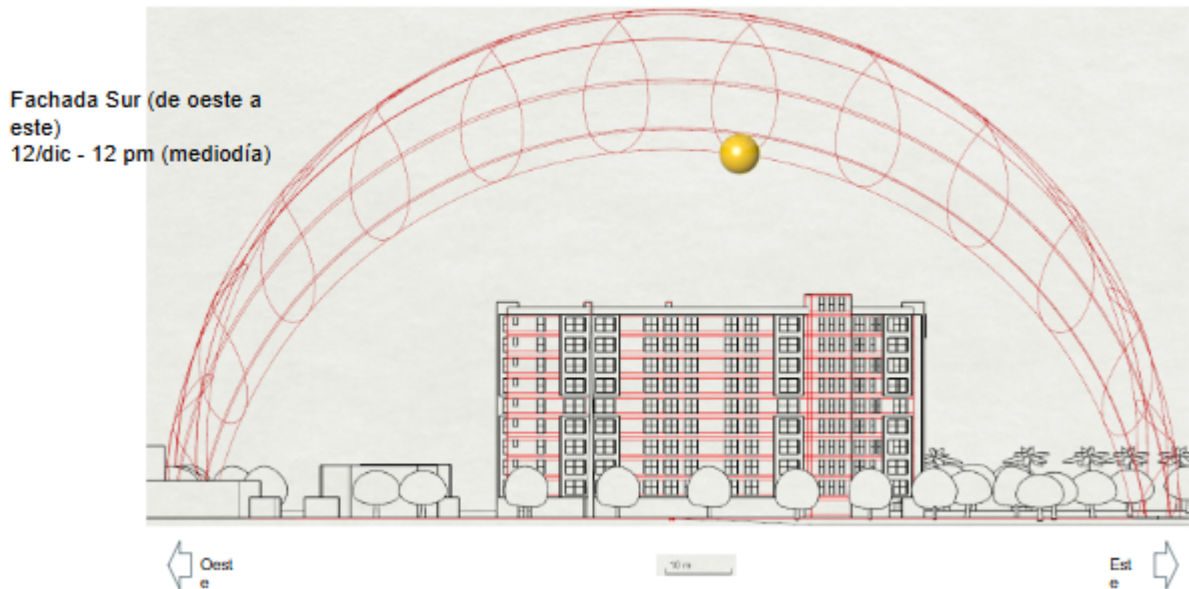
Las gráficas de promedios diarios mensuales muestran una oscilación térmica diaria considerable, lo cual incrementa la relevancia del asoleamiento como factor determinante en el confort térmico interior. De igual manera, los diagramas de radiación y cobertura del cielo indican que, a pesar de la presencia de nubosidad durante gran parte del año, la radiación solar directa sigue siendo un elemento significativo, especialmente en periodos de cielo parcialmente despejado. Estos resultados justifican la necesidad de evaluar detalladamente la incidencia solar sobre la envolvente vertical del edificio.

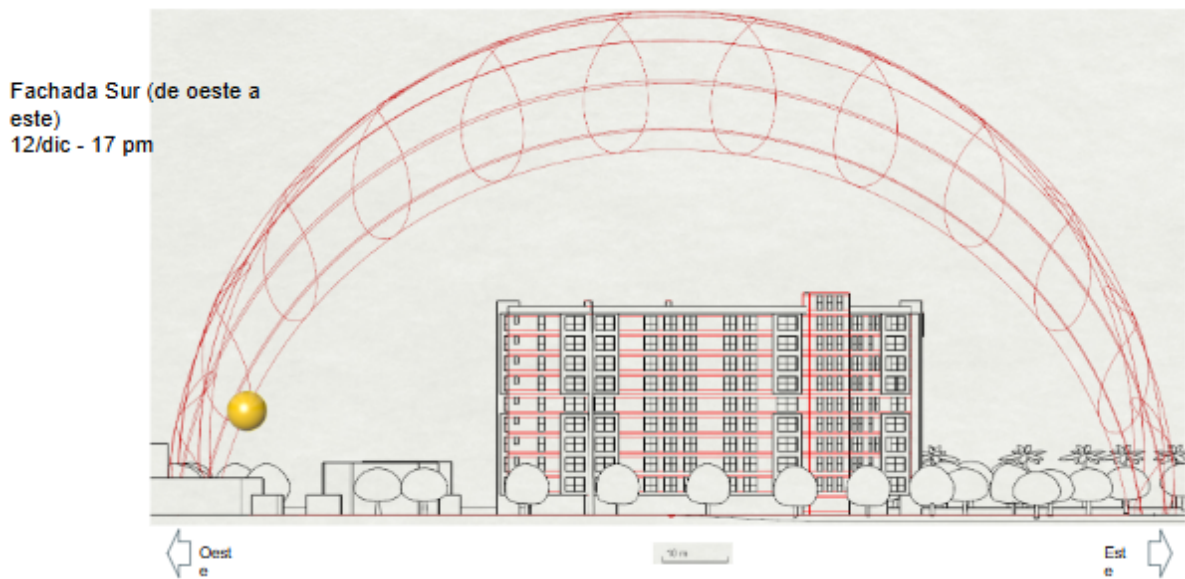
Fachada Este (de sur a norte)
12/dic - 8 am (por la mañana)



La gráfica solar estereográfica elaborada a partir del modelo 3D georreferenciado permitió visualizar la trayectoria anual del sol, considerando los ángulos de altura solar y azimut para la ubicación específica del caso de estudio. Los diagramas evidencian que durante el solsticio de invierno el sol presenta alturas solares bajas, generando trayectorias rasantes que inciden principalmente sobre las fachadas sur y este. En horarios matutinos, la fachada este recibe radiación directa con ángulos

oblicuos, mientras que en horarios vespertinos la incidencia se desplaza hacia la fachada oeste, la cual presenta mayor riesgo de sobreexposición térmica. La fachada norte, por su parte, muestra una menor incidencia directa a lo largo del año, confirmando su comportamiento más estable desde el punto de vista térmico.





2. Análisis de horas de sol directo

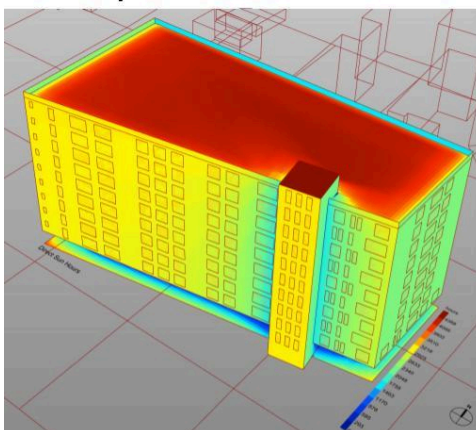
El análisis de horas de sol directo permitió cuantificar el tiempo anual de exposición solar sobre las fachadas del edificio.

En el edificio denominado “Caso Base”, los diagramas muestran una exposición elevada y continua en las fachadas sur, este y oeste, particularmente en los vanos, lo cual indica una alta ganancia solar directa. Esta condición implica un mayor potencial de sobrecalentamiento y, por ende, un incremento en la carga térmica

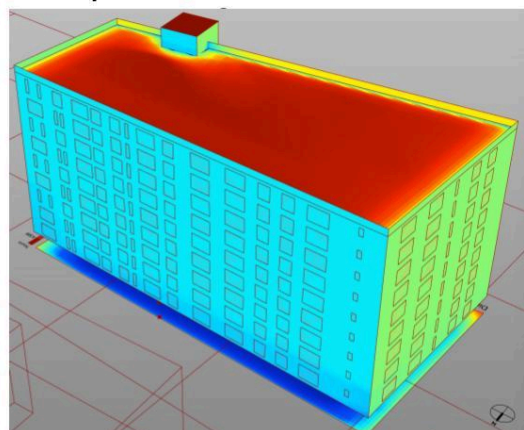
HORAS DE SOL DIRECTO

Calcule el número de horas de luz solar directa que recibe la geometría utilizando los vectores solares obtenidos.

Edificio “Caso Base”
Perspectiva con fachadas de Sur a



Edificio “Caso Base”
Perspectiva con fachadas de Norte a

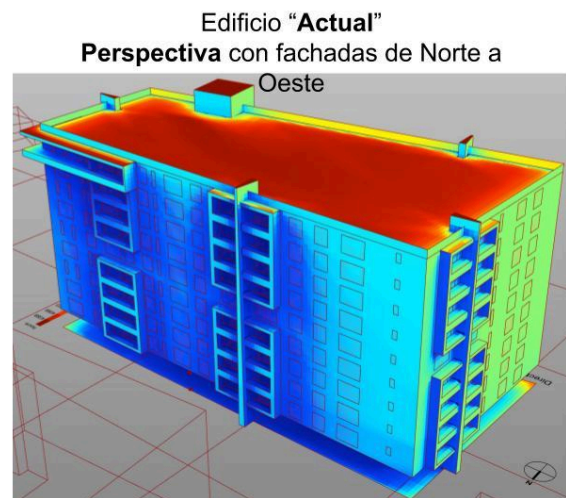
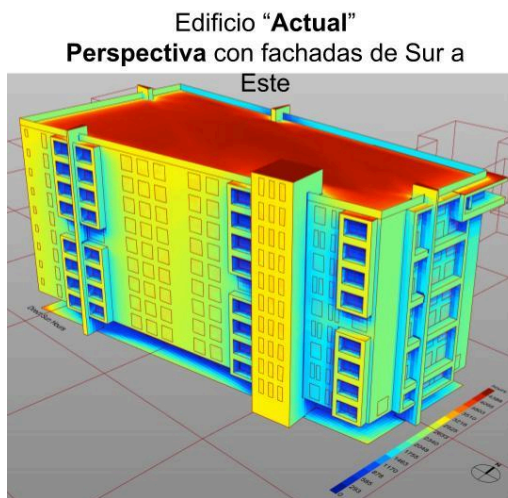


interior.

En el edificio "Actual", los resultados muestran una reducción parcial en las horas de sol directo respecto al caso base, atribuible a modificaciones geométricas y a la influencia del contexto inmediato. No obstante, las fachadas más expuestas continúan recibiendo una cantidad considerable de radiación directa, por lo que el problema de sobre asoleamiento no se elimina por completo.

HORAS DE SOL DIRECTO

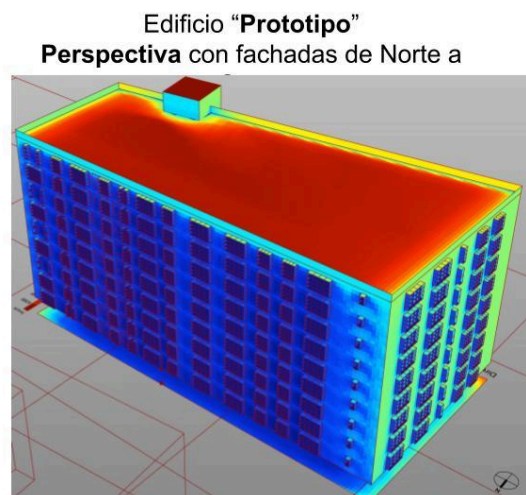
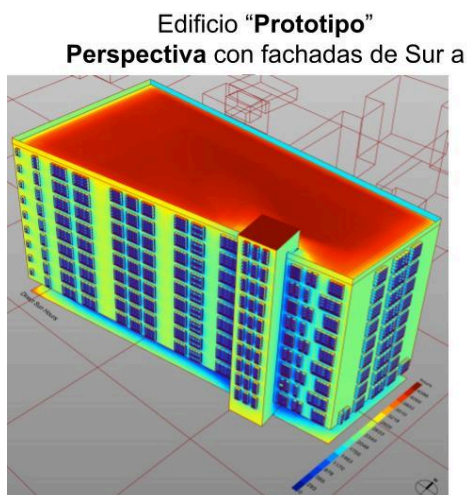
Calcule el número de horas de luz solar directa que recibe la geometría utilizando los vectores solares obtenidos.



En el edificio "Prototipo", los diagramas evidencian una disminución más clara y homogénea de las horas de sol directo, especialmente en las fachadas con mayor porcentaje de vanos. La comparación gráfica demuestra que los elementos de control solar incorporados logran interrumpir la incidencia directa durante los

HORAS DE SOL DIRECTO

Calcule el número de horas de luz solar directa que recibe la geometría utilizando los vectores solares obtenidos.

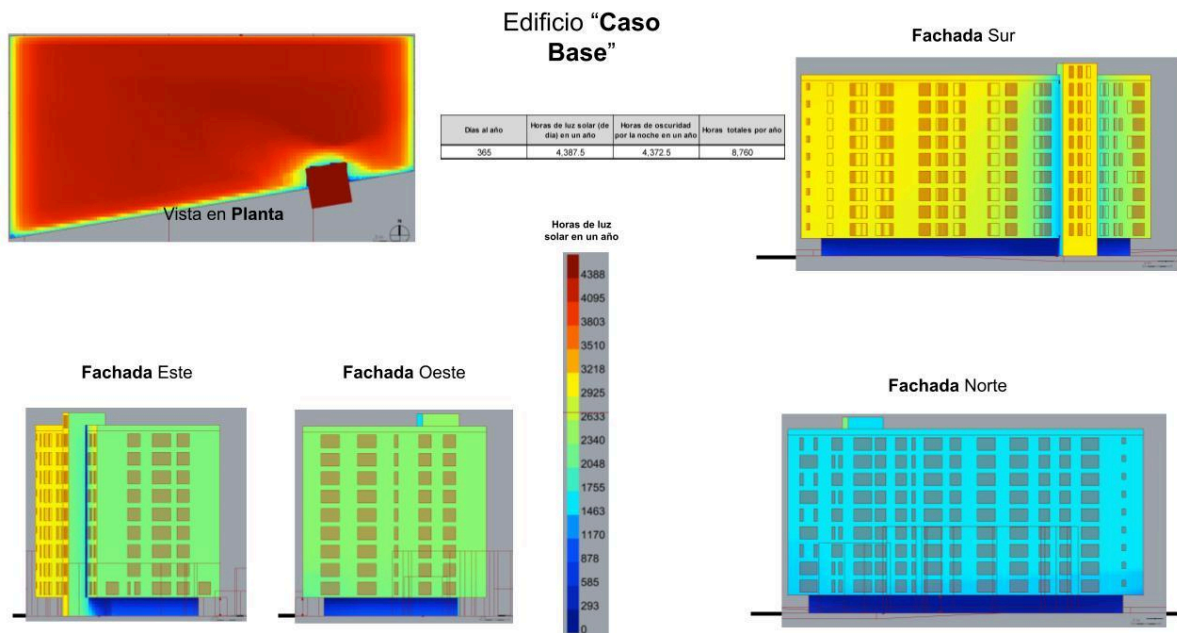


periodos más críticos del día, reduciendo la duración de la exposición solar sin anular el acceso a la iluminación natural.

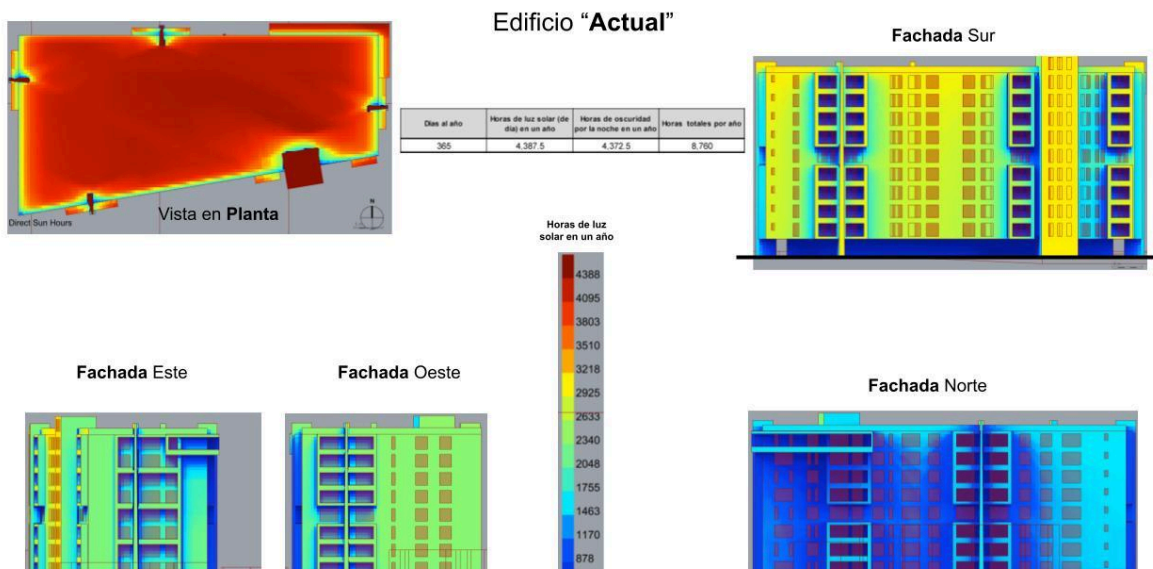
3. Análisis de radiación solar incidente

De manera complementaria, el análisis de radiación solar incidente anual permitió evaluar la energía acumulada sobre la envolvente vertical del edificio, expresada en kWh/m² y W/m².

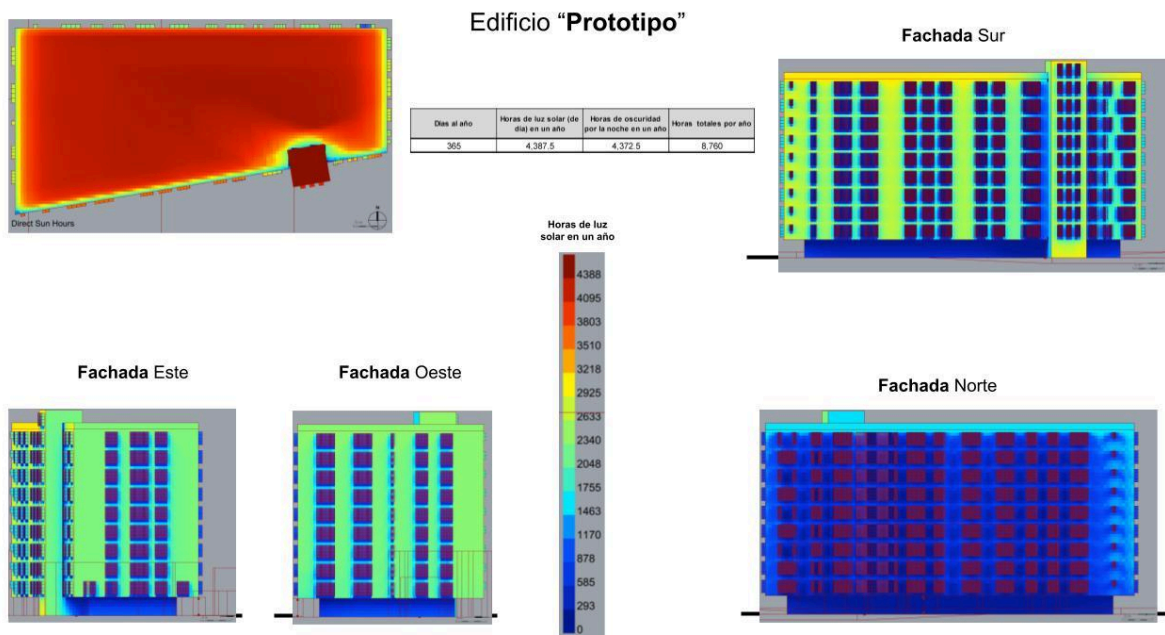
En el “Caso Base”, los mapas de radiación muestran valores elevados en las fachadas sur, este y oeste, con una acumulación energética considerable sobre los planos verticales.



En el edificio “Actual” se observa una reducción parcial de la radiación incidente; sin embargo, persisten áreas con alta carga energética, particularmente en orientaciones críticas.

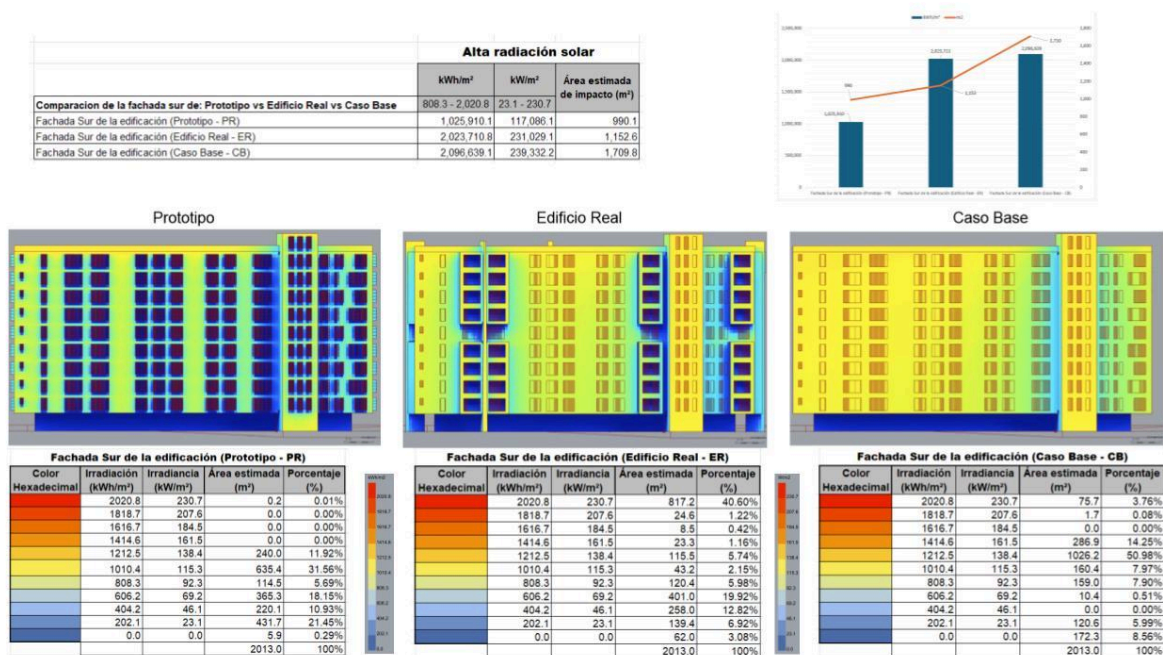


En contraste, el edificio “Prototipo” presenta una reducción significativa de la radiación solar incidente acumulada sobre la envolvente. Los resultados indican que los dispositivos de control solar no solo disminuyen la duración de la exposición, sino también la energía total recibida por las fachadas, lo cual tiene un impacto directo en el desempeño térmico del edificio.



La interpretación conjunta de la geometría solar, las horas de sol directo y la radiación solar incidente permite concluir que la modificación geométrica de la fachada mediante estrategias pasivas de control solar constituye una solución efectiva para reducir la ganancia térmica en edificios verticales ubicados en climas templados de altitud. Los resultados obtenidos confirman que el uso de programación visual y simulación climática proporciona criterios cuantificables y verificables que pueden ser considerados desde las etapas tempranas del diseño arquitectónico, contribuyendo a una toma de decisiones más informada en términos de eficiencia energética y confort térmico

4. Análisis comparativo de alta radiación solar en la fachada sur



El presente apartado expone el análisis comparativo de la **alta radiación solar incidente en la fachada sur** del edificio, considerando los tres casos de estudio definidos en la investigación: **Caso Base (CB)**, **Edificio Real (ER)** y **Edificio Prototipo (PR)**. El análisis se desarrolló a partir de simulaciones anuales de radiación solar, expresadas en **kWh/m²**, **W/m²** y **área estimada de impacto**, con el objetivo de evaluar el desempeño energético de la envolvente vertical y el efecto de las estrategias de control solar propuestas.

4.1 Evaluación del impacto energético por alta radiación solar

Los resultados obtenidos muestran que el **Caso Base** presenta los valores más elevados de radiación solar incidente en la fachada sur, alcanzando aproximadamente **2,096.64 kWh/m²** y **239.33 W/m²**, con un **área estimada de impacto de 1,709.8 m²**. La distribución cromática evidencia una exposición predominante a rangos altos de radiación, lo que indica una elevada ganancia térmica potencial sobre la envolvente vertical.

En el **Edificio Real**, los valores de radiación solar y el área de impacto se reducen de manera parcial, registrando aproximadamente **2,023.71 kWh/m²**, **231.03 W/m²** y un área afectada de **1,152.6 m²**. Esta disminución puede asociarse a la configuración geométrica existente y a la presencia de elementos constructivos que generan sombreado parcial; sin embargo, aún se identifican superficies extensas con alta incidencia solar.

Por su parte, el **Edificio Prototipo** presenta una reducción significativa de la radiación solar incidente, con valores cercanos a **1,025.91 kWh/m²** y **117.09 W/m²**, así como una **disminución del área de impacto a aproximadamente 990.1 m²**. Los mapas de radiación muestran una predominancia de rangos bajos y medios, lo que evidencia una reducción sustancial de la ganancia solar directa sobre la fachada sur.

4.2 Discusión de resultados

El análisis comparativo de los tres casos permite identificar una **mejora progresiva en el desempeño energético de la fachada sur**. El Caso Base representa la condición más desfavorable, caracterizada por una alta intensidad y extensión de la radiación solar incidente, lo cual implica una mayor ganancia térmica y un impacto negativo en el comportamiento energético del edificio.

El Edificio Real muestra un comportamiento intermedio, en el cual la radiación solar y el área afectada disminuyen parcialmente; no obstante, la ausencia de una estrategia integral de control solar provoca que persistan zonas con alta exposición, limitando la eficiencia energética de la envolvente.

En contraste, el Edificio Prototipo evidencia la efectividad de las estrategias pasivas de control solar aplicadas en la fachada. La reducción tanto de la intensidad de la radiación como del área de impacto confirma que dichas estrategias contribuyen de manera directa a la **disminución de la ganancia térmica**, lo cual se traduce en un mejor desempeño energético potencial y en condiciones más favorables de confort térmico interior.

En conjunto, los resultados demuestran que el análisis de alta radiación solar constituye un criterio fundamental para la toma de decisiones de diseño en fachadas verticales, y validan el uso de la simulación computacional como una herramienta eficaz para evaluar y optimizar el comportamiento energético de los edificios desde etapas tempranas del proyecto arquitectónico.

V. Conclusiones y Recomendaciones

La presente investigación tuvo como objetivo analizar el impacto energético de la radiación solar en fachadas verticales mediante simulación computacional, comparando tres escenarios: Caso Base, Edificio Real y Edificio Prototipo. A partir de los resultados obtenidos, se concluye que la radiación solar incidente constituye un factor determinante en el desempeño energético de la envolvente vertical, particularmente en fachadas con orientación sur en climas templados de altitud como el de la ciudad de Pachuca, Hidalgo.

El análisis del **Caso Base** evidenció una elevada exposición a la radiación solar, reflejada en altos valores de irradiancia y una amplia área de impacto sobre la fachada. Esta condición confirma que la ausencia de estrategias pasivas de control solar incrementa la ganancia térmica hacia el interior del edificio, lo cual puede derivar en mayores demandas energéticas para el acondicionamiento térmico y en una reducción del confort interior.

En el **Edificio Real**, los resultados mostraron una disminución parcial de la radiación solar incidente y del área afectada, atribuible a la configuración geométrica existente y a la presencia de ciertos elementos constructivos. No obstante, el análisis reveló que estas medidas resultan insuficientes para mitigar de manera homogénea la incidencia solar, manteniendo zonas con alta exposición y un impacto energético aún significativo.

El **Edificio Prototipo** presentó el mejor desempeño energético entre los tres casos analizados. La incorporación de estrategias pasivas de control solar permitió reducir de forma considerable tanto la intensidad de la radiación solar como el área de impacto en la fachada sur. Esta reducción sugiere una disminución efectiva de la ganancia térmica directa y, por lo tanto, un mejor comportamiento energético potencial del edificio, sin comprometer el acceso a la iluminación natural.

De manera general, los resultados confirman que la **simulación computacional mediante programación visual** es una herramienta eficaz para evaluar el comportamiento solar de las fachadas y para sustentar decisiones de diseño arquitectónico basadas en criterios climáticos. Asimismo, la comparación entre los tres escenarios demuestra que la integración temprana de estrategias pasivas de control solar puede mejorar significativamente el desempeño energético de los edificios, contribuyendo a una arquitectura más eficiente y sustentable.

Se recomienda priorizar la aplicación de **elementos de control solar en fachadas con mayor incidencia**, especialmente en orientaciones sur, este y oeste, donde la radiación solar directa presenta una mayor intensidad y duración a lo largo del año.

La correcta integración de estos elementos puede reducir de manera significativa la ganancia térmica sin afectar negativamente la iluminación natural ni la relación interior–exterior.

Asimismo, se sugiere complementar este tipo de estudios con simulaciones térmico-energéticas que permitan cuantificar de forma directa el impacto de la reducción de radiación solar en el consumo energético del edificio, fortaleciendo la relación entre diseño pasivo y eficiencia energética.

Finalmente, se concluye que el uso de herramientas digitales como Rhinoceros, Grasshopper y Ladybug, combinadas con bases de datos climáticas oficiales, permite desarrollar análisis precisos, verificables y replicables. Estos métodos aportan un soporte técnico sólido para la toma de decisiones en proyectos arquitectónicos y representan una oportunidad para mejorar la calidad ambiental y energética de la edificación contemporánea.

VI. Anexos

Anexo A. Distribución de la torre y tipologías de vivienda

Sky Home A

- 159.48 m².
- De 2 a 3 habitaciones, con opción de personalizar la tercera.
- Recámara principal con cuarto de baño y vestidor.
- Sala y comedor.
- Cocina con alacena.
- Habitación de servicio con cuarto de baño.
- 1 y 1/2 cuartos de baño adicionales.
- Laundry room.



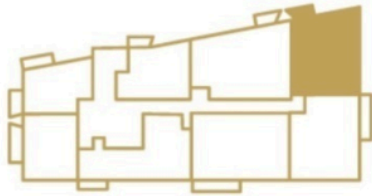
Sky home B

191.37 m²

Sky home D

153.12 m2

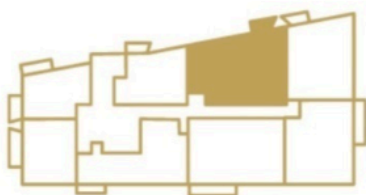
- Sala con balcón
- Comedor
- Cocina
- Medio baño
- Cuarto servicio
- Cuarto de lavado
- Recámara principal con baño y vestidor
- Recámara con baño



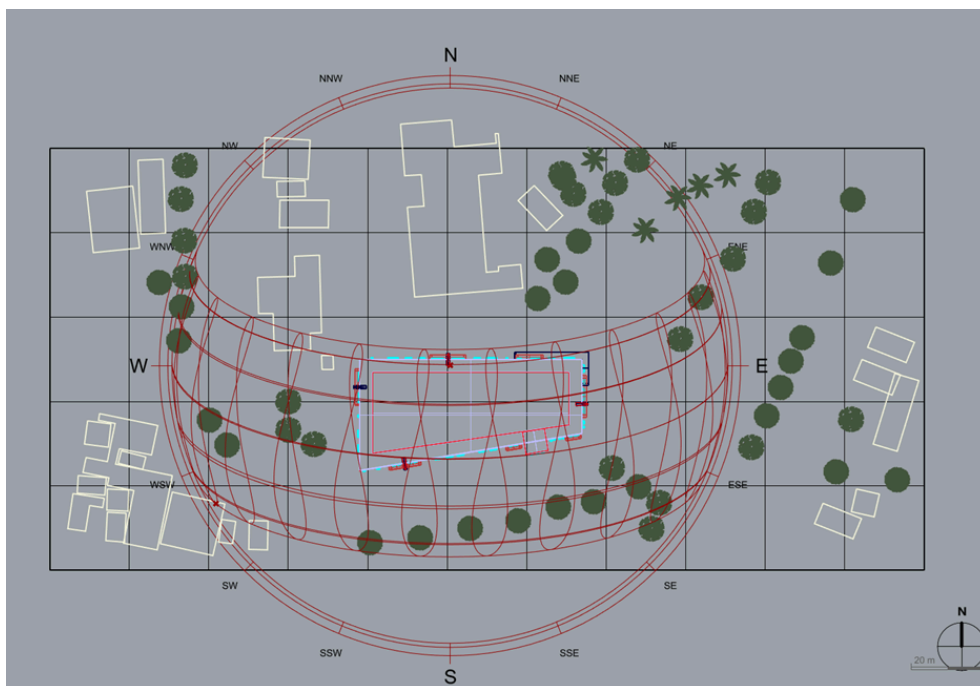
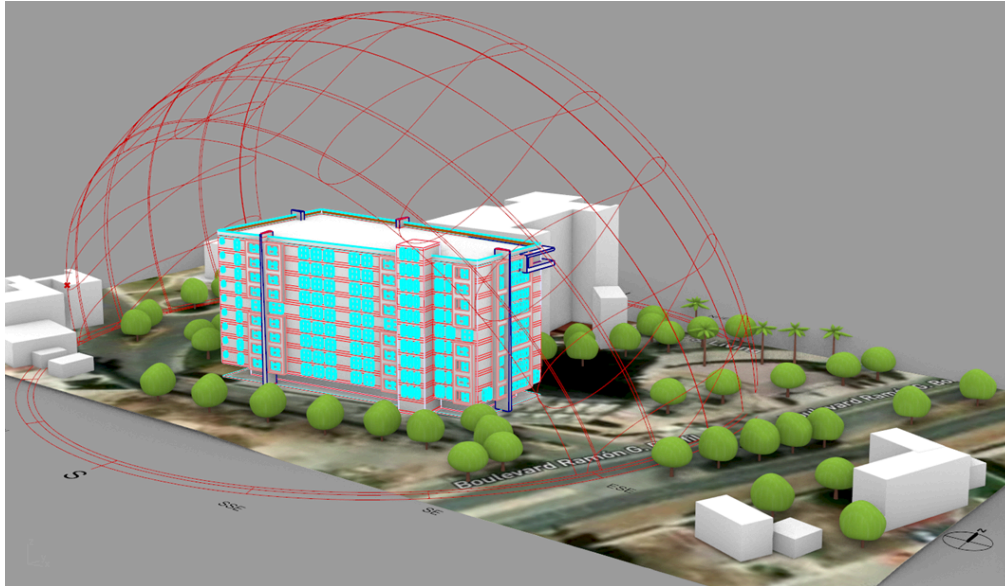
Sky home E

183.9 m2

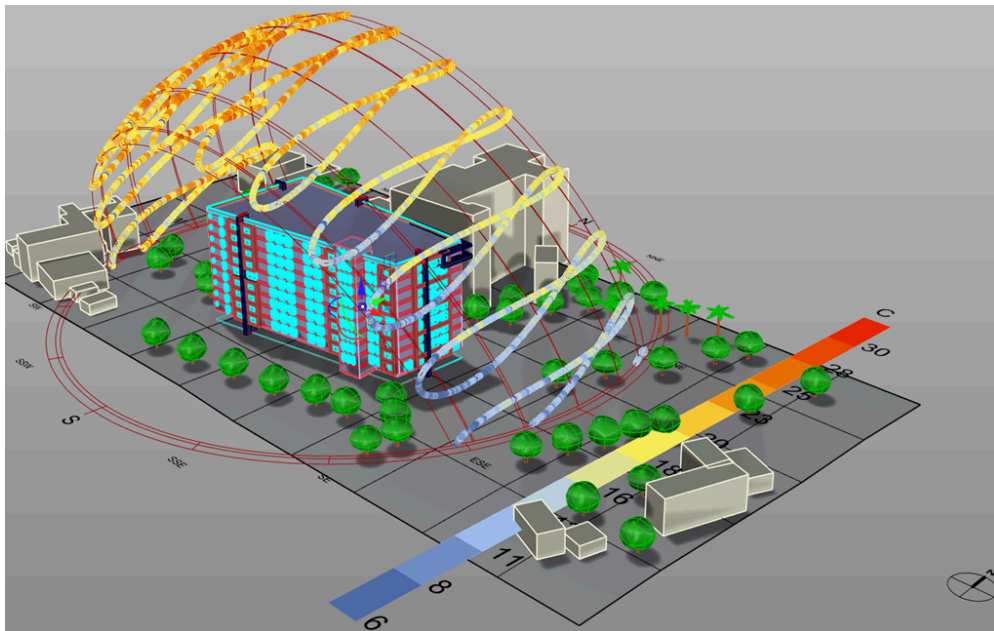
- Sala con balcón
- Comedor
- Cocina
- Medio baño
- Cuarto servicio
- Cuarto de lavado
- Recámara principal con baño y vestidor
- 2 Recámaras
- Baño completo



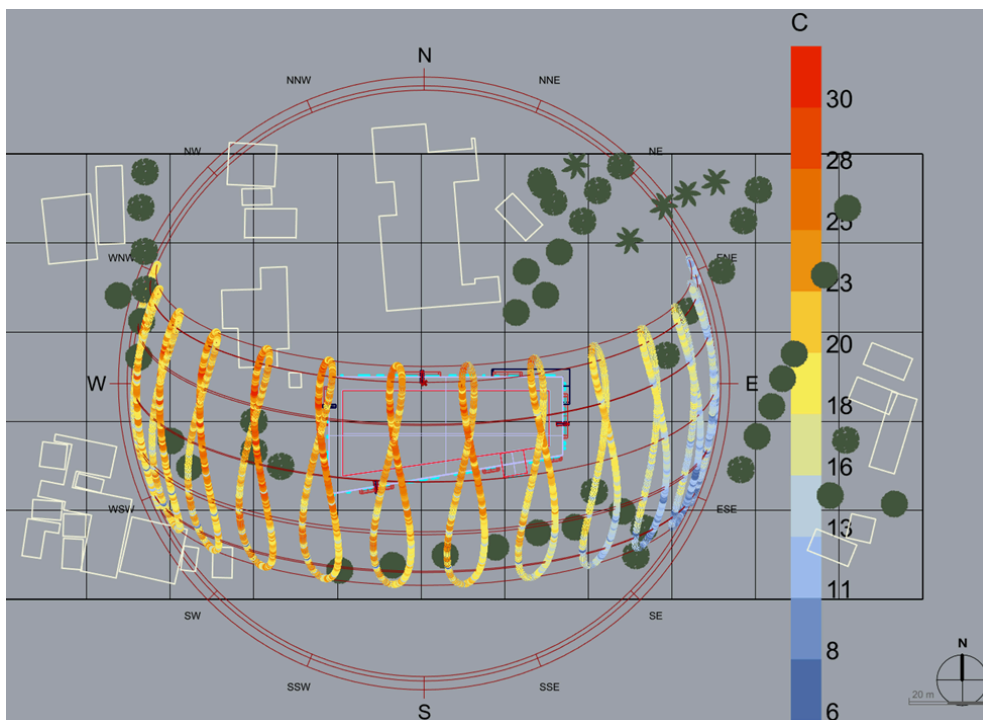
Anexo B. Modelo tridimensional del edificio y emplazamiento georreferenciado



Anexo C. Gráfica solar con respecto al emplazamiento

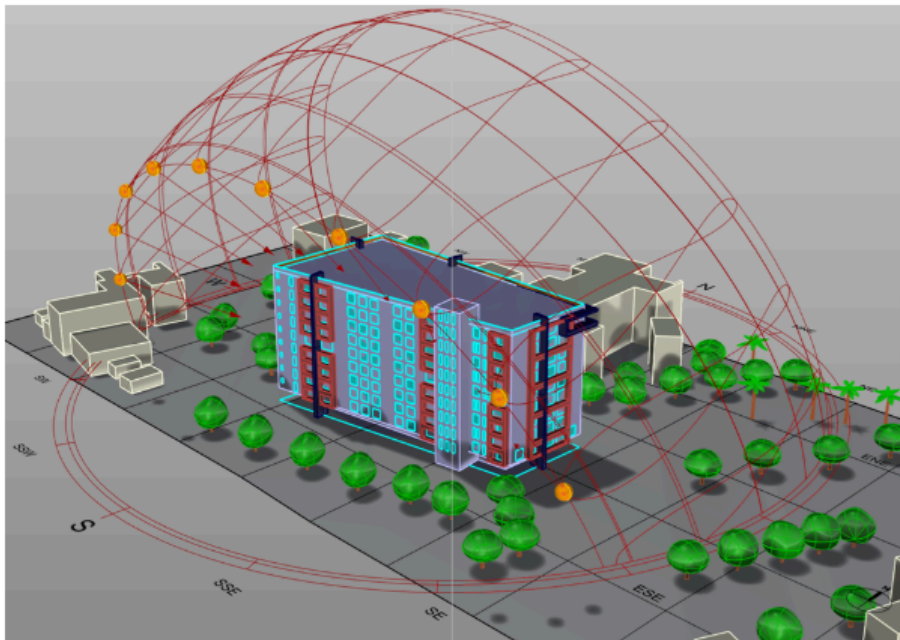


Anexo D. Gráfica solar con temperatura promedio diaria



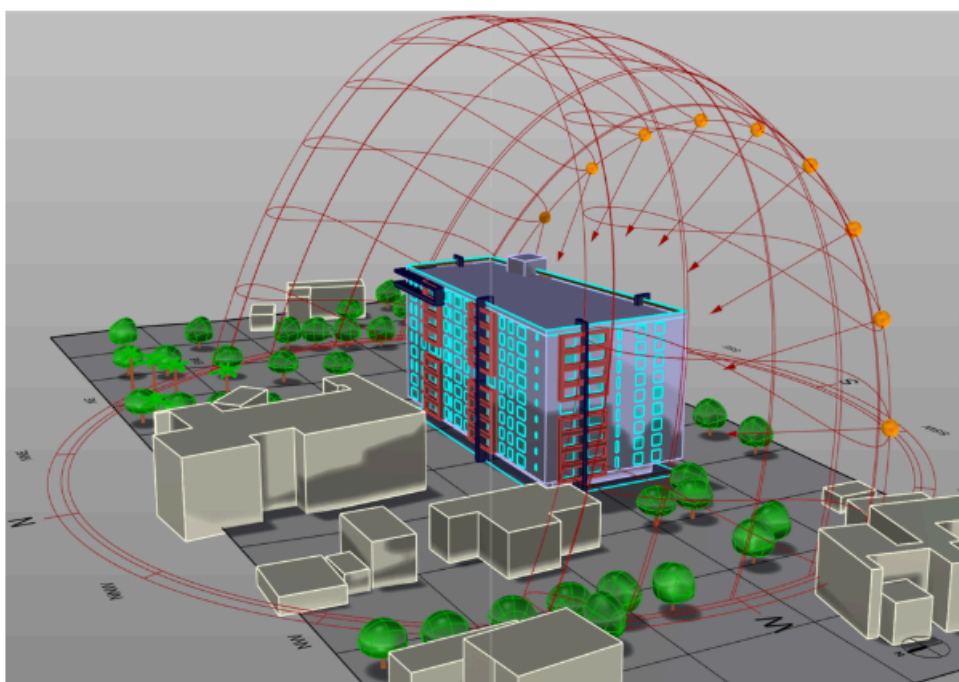
Anexo E. Trayectoria solar en fechas representativas

Gráfica Solar: indicando el arco del 1/diciembre con la altura del sol y el azimut en la siguientes horas de las 8:00, 9:00, 10:00, 11:00, 12:00, 13:00, 14:00, 15:00, 16:00 y 17:00 horas



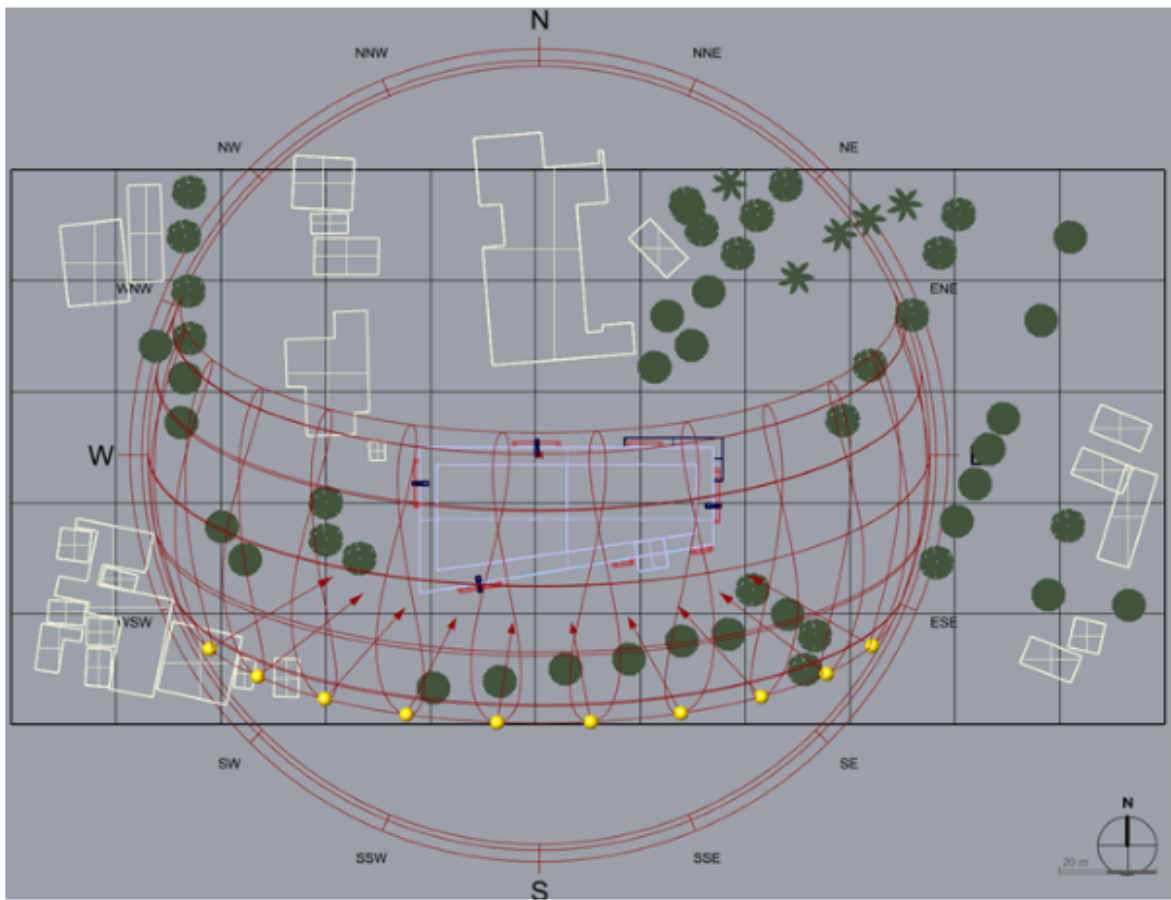
Perspectiva Sur-Este

Gráfica Solar: indicando el arco del 1/diciembre con la altura del sol y el azimut en la siguientes horas de las 8:00, 9:00, 10:00, 11:00, 12:00, 13:00, 14:00, 15:00, 16:00 y 17:00 horas



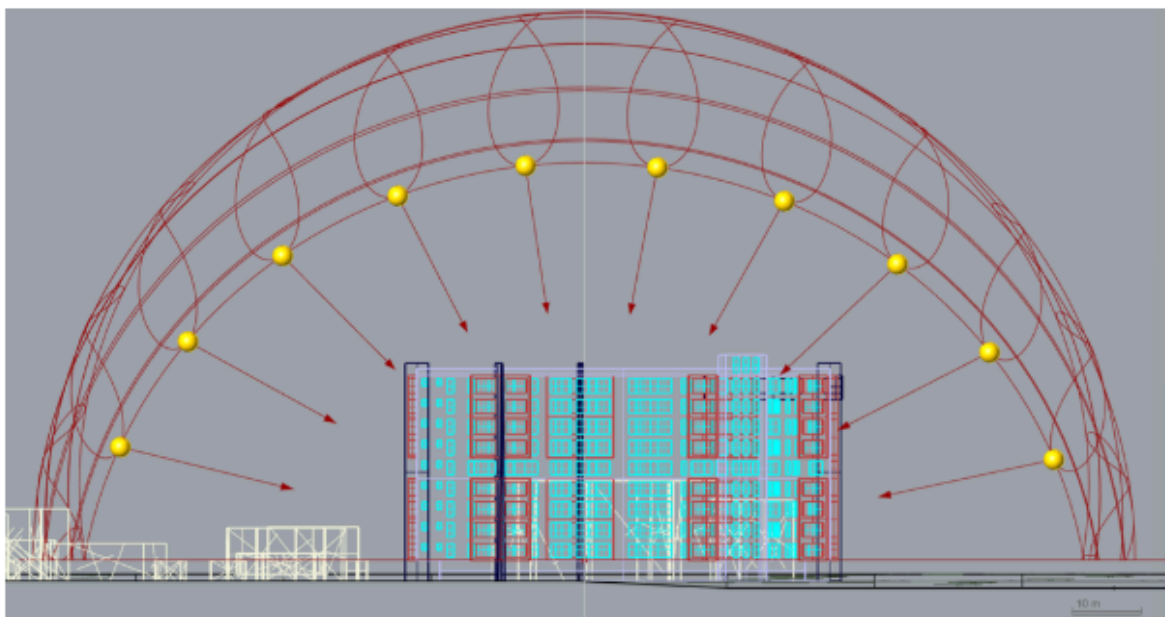
Perspectiva Norte-Oeste

Anexo F. Trayectoria solar en planta



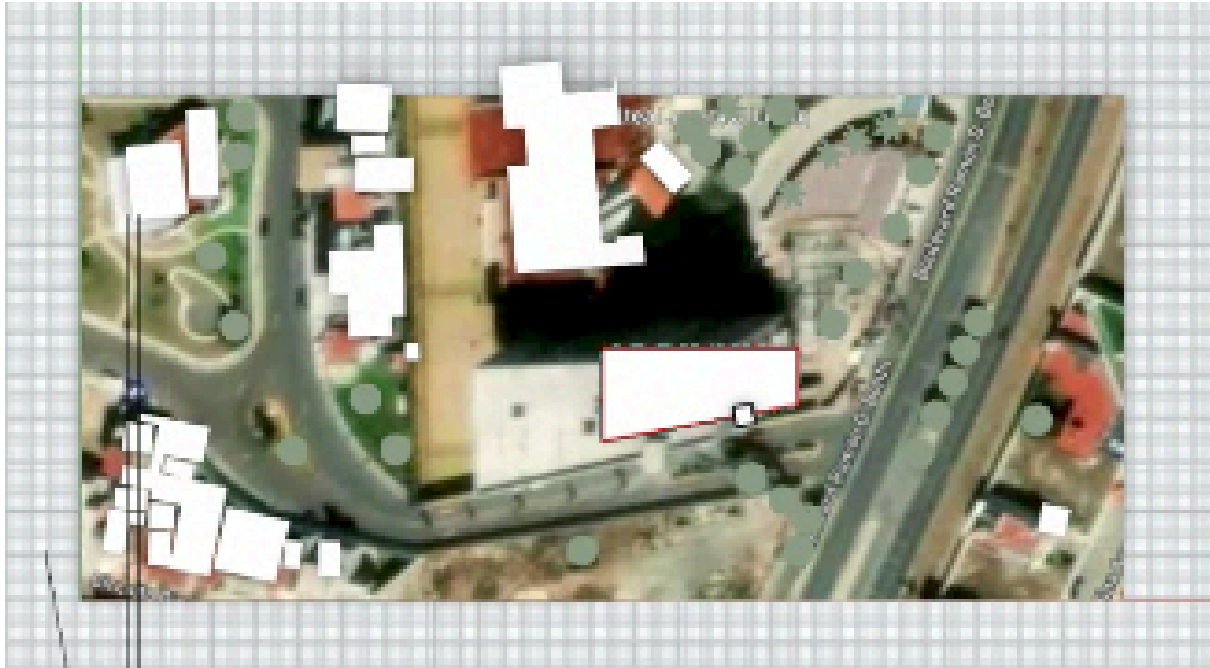
Planta

Anexo G. Análisis de asoleamiento por fachada



Fachada Sur

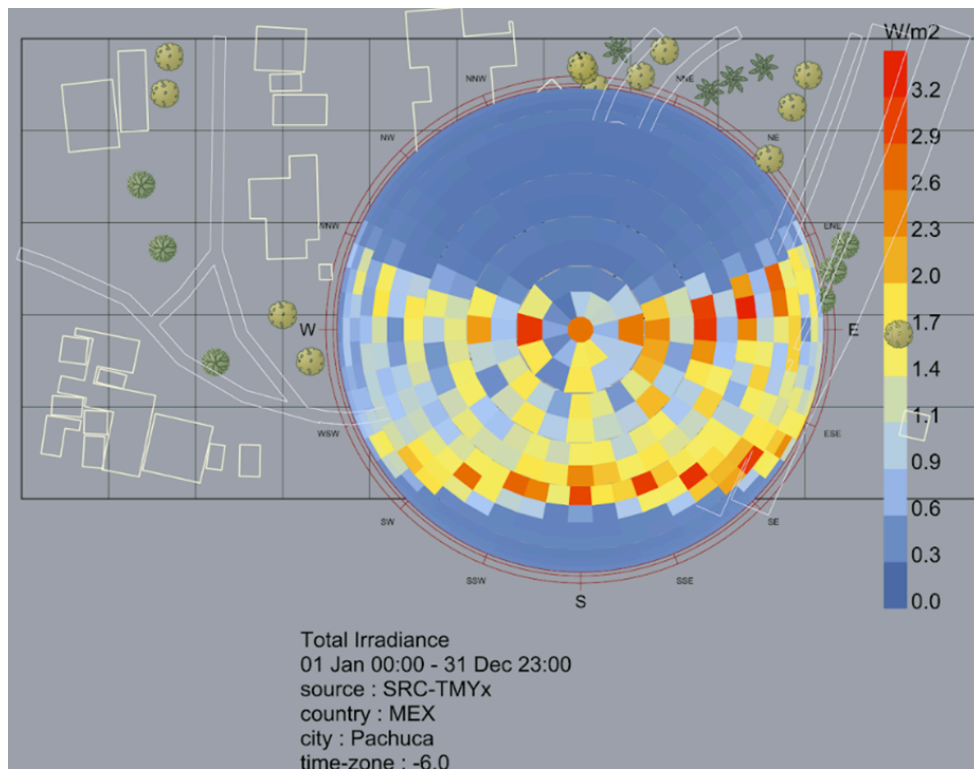
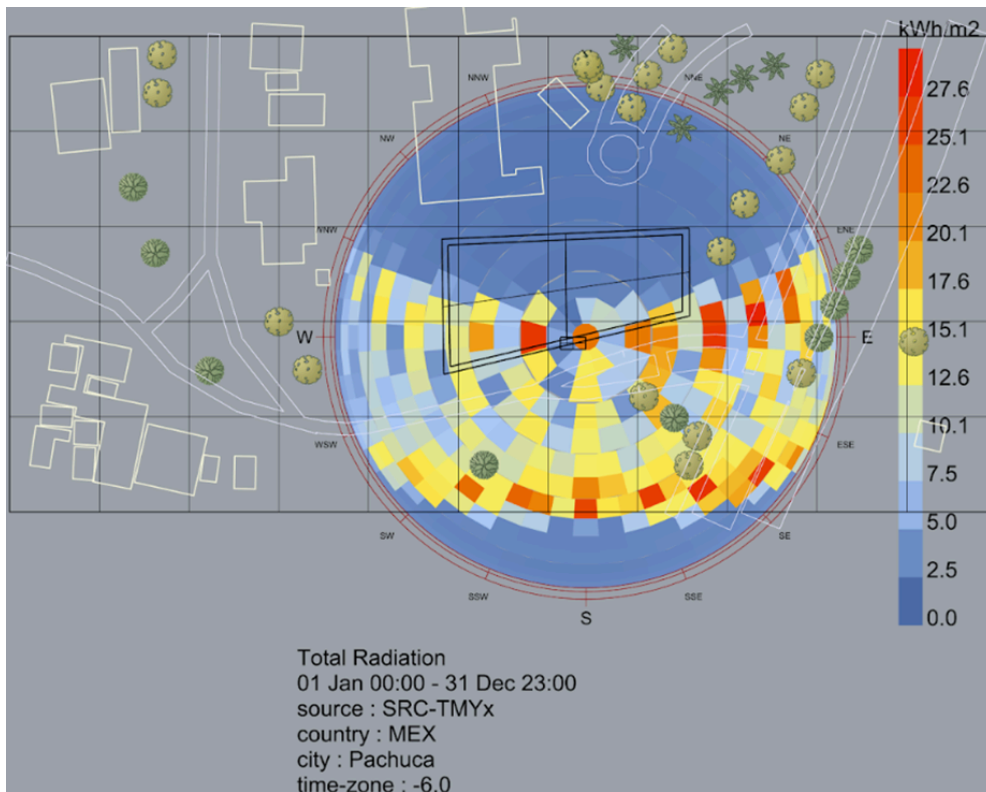
Anexo H. Modelo base y configuración inicial del sitio



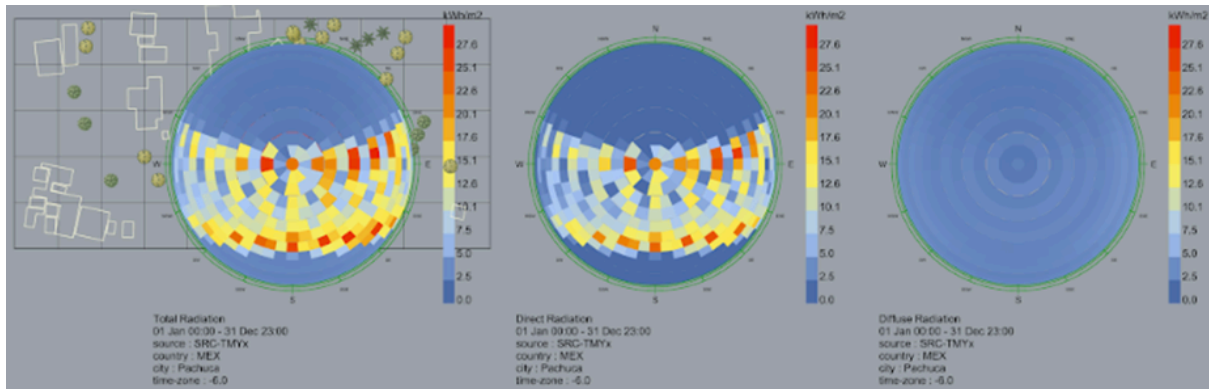
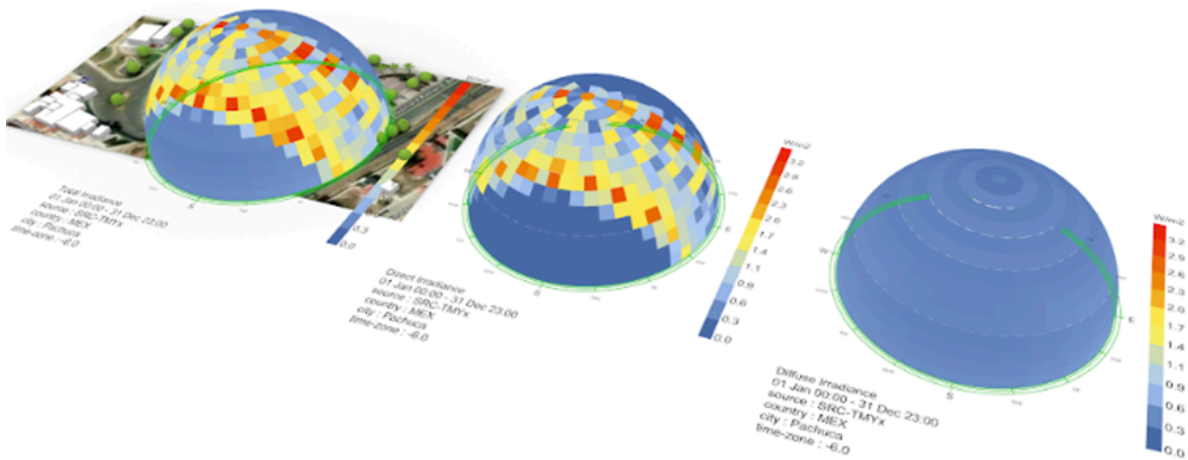
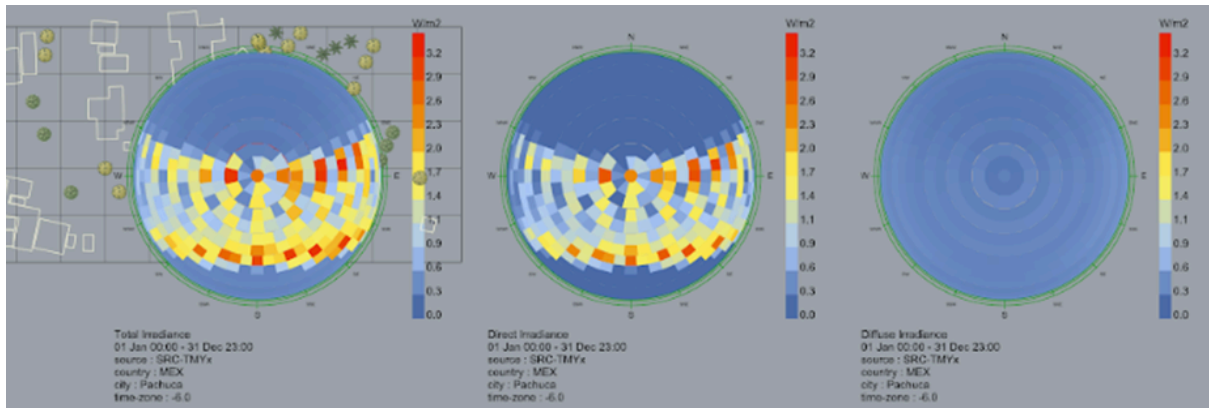
Anexo I. Modelo tridimensional del edificio – vistas generales



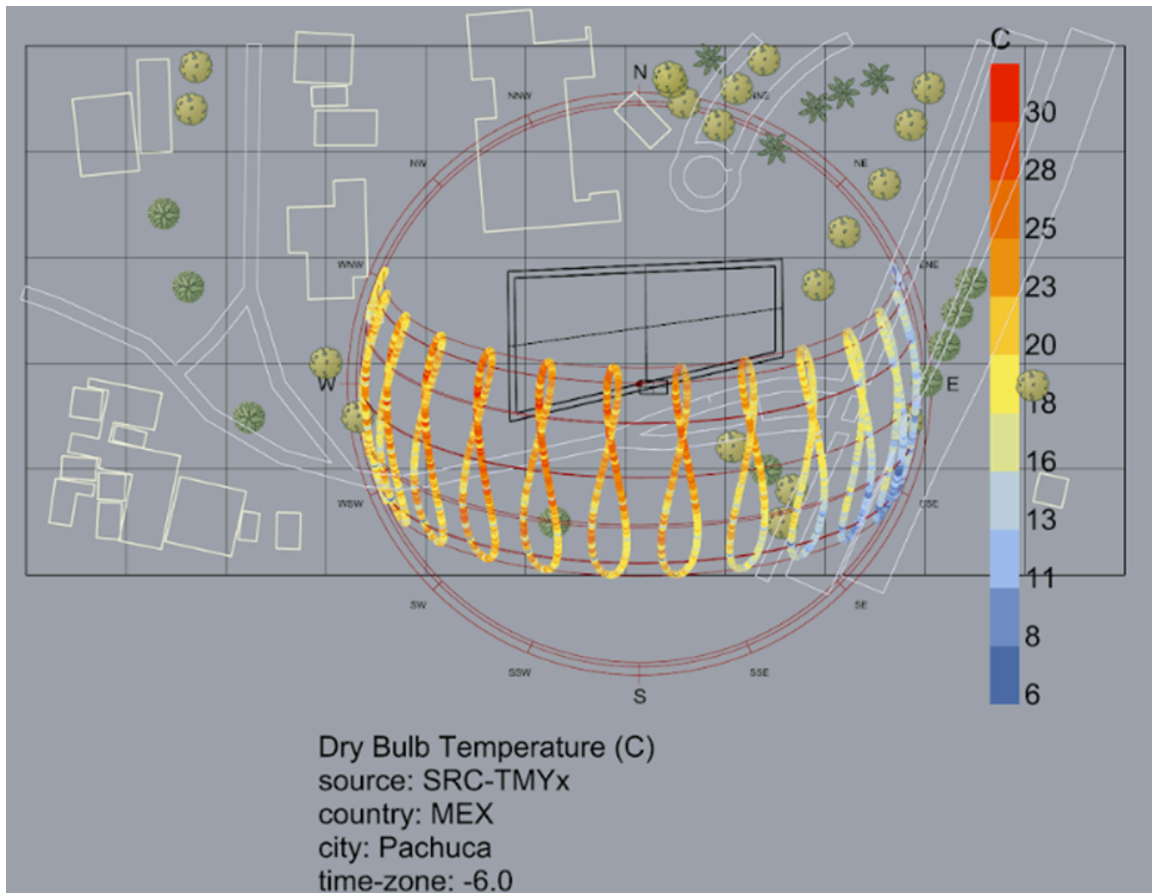
Anexo J. Análisis de radiación solar anual – envoltente



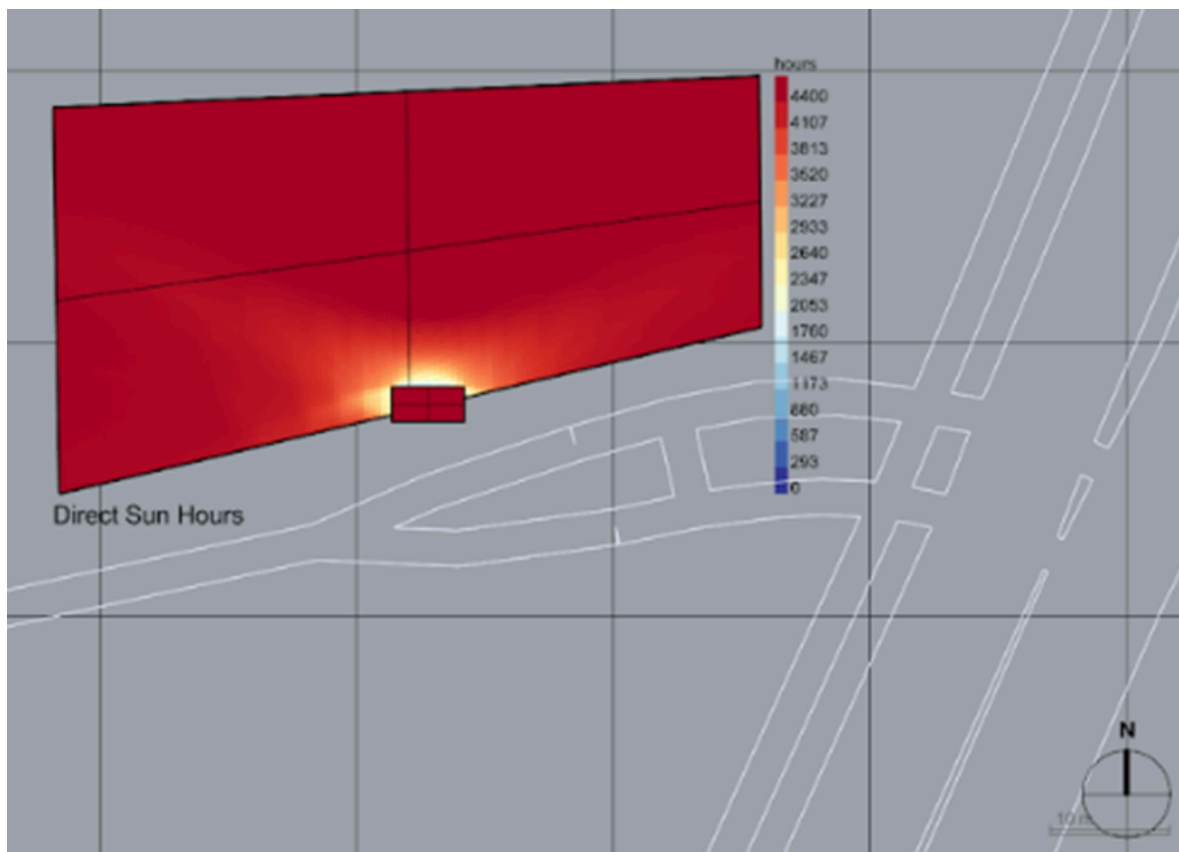
Anexo K. Comparación de radiación solar en diferentes superficies



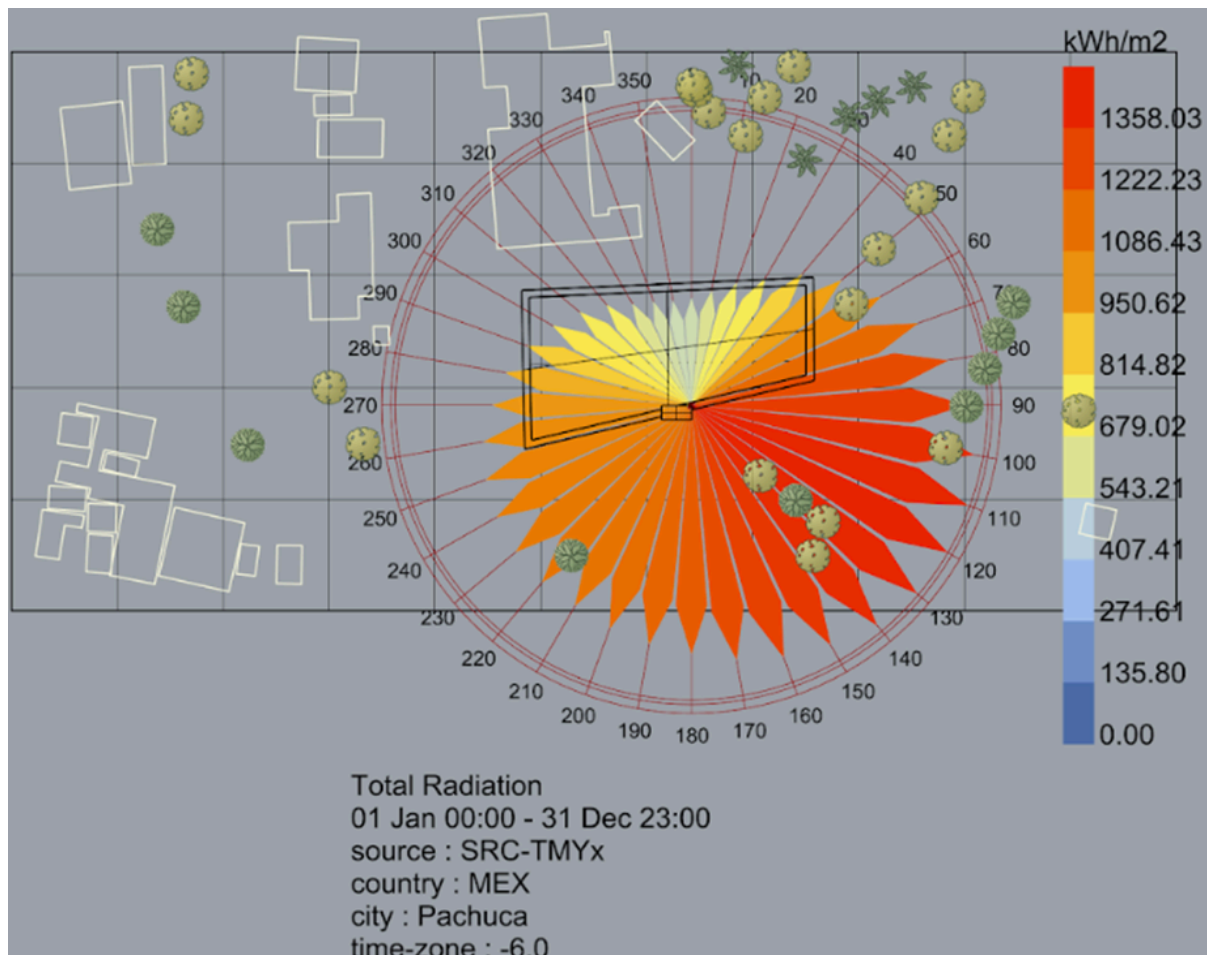
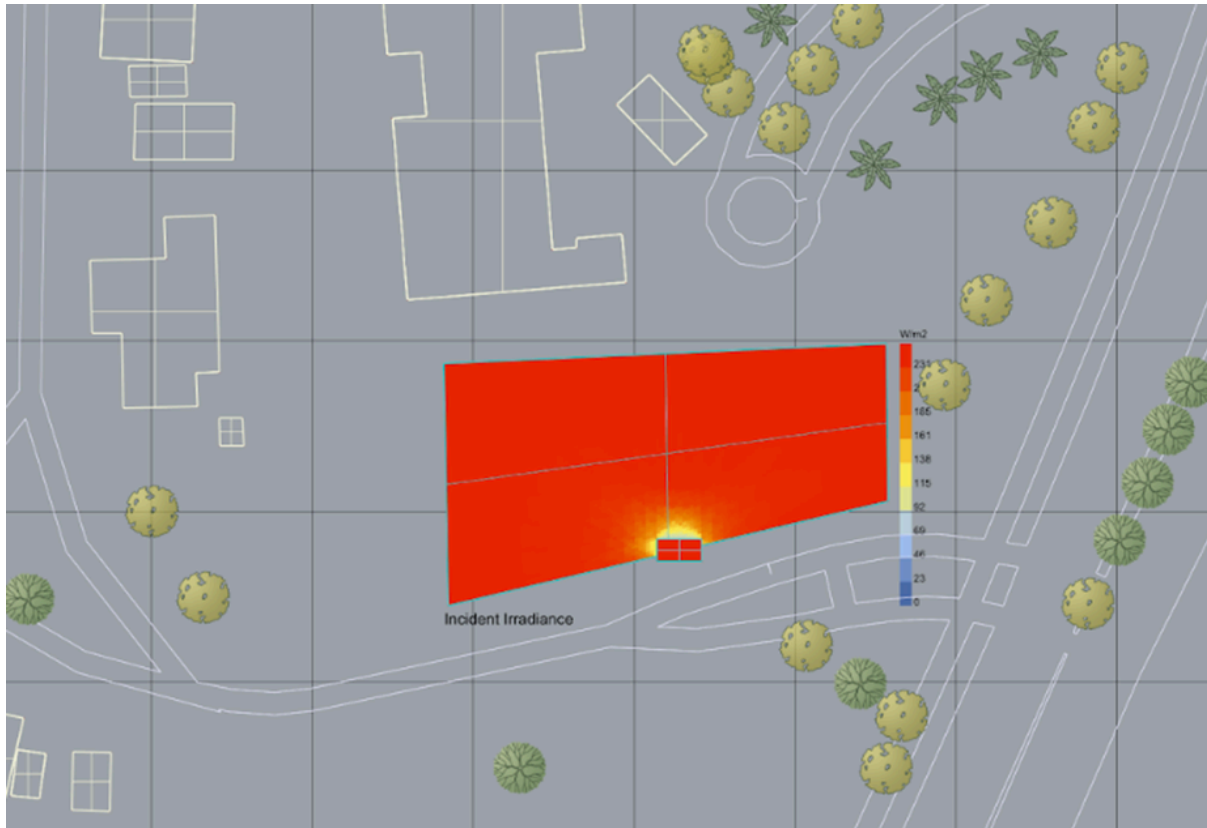
Anexo L. Análisis de temperatura de bulbo seco

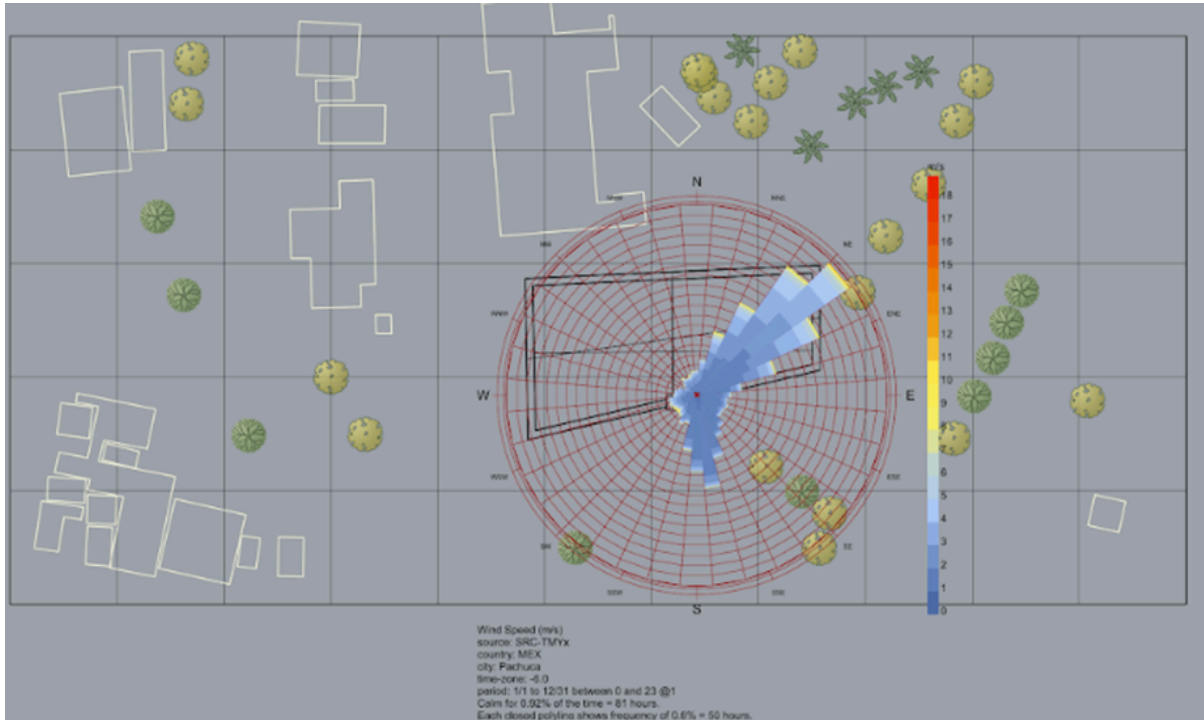


Anexo M. Análisis de horas de sol directo



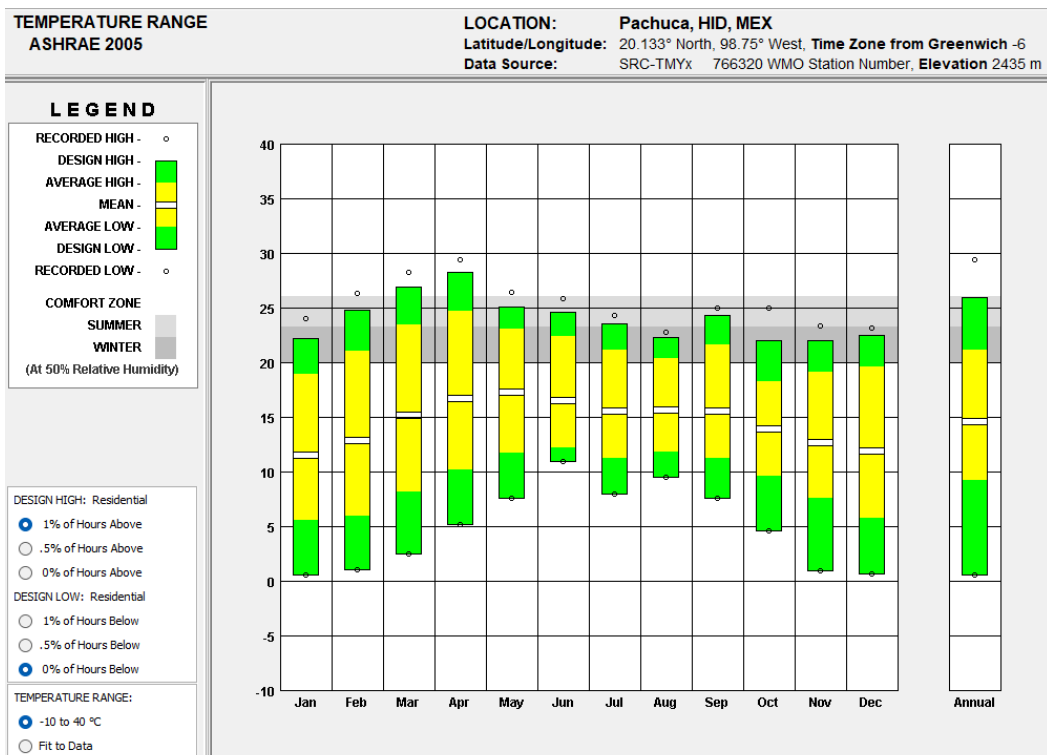
Anexo N. Análisis de radiación solar en planta y trayectoria anual





Anexo O. Diagramas climáticos del archivo EPW

Se presentan los diagramas climáticos obtenidos a partir del archivo EPW, incluyendo rangos de temperatura, promedios horarios, radiación solar y cobertura del cielo. Estos diagramas proporcionan el soporte climático necesario para el desarrollo de las simulaciones energéticas y solares realizadas en la investigación.



MONTHLY DIURNAL AVERAGES
ASHRAE 2005

LOCATION: Pachuca, HID, MEX
Latitude/Longitude: 20.133° North, 98.75° West, **Time Zone** from Greenwich -6
Data Source: SRC-TMYx 766320 WMO Station Number, **Elevation** 2435 m

LEGEND

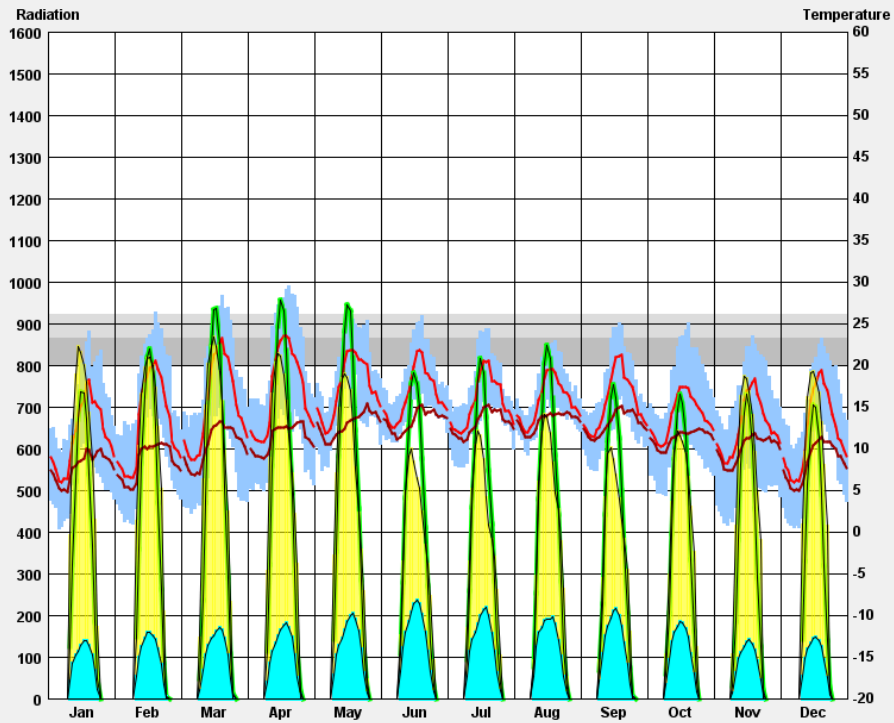
HOURLY AVERAGES

TEMPERATURE: (degrees C)
 — DRY BULB MEAN
 — WET BULB MEAN
 — DRY BULB (all hours)
COMFORT ZONE
 — SUMMER
 — WINTER
 (At 50% Relative Humidity)

RADIATION: (Wh/sq.m)
 — GLOBAL HORIZ
 — DIRECT NORMAL
 — DIFFUSE

Display Dry Bulb Temp
 (all hours)

TEMPERATURE RANGE:
 -10 to 40 °C
 Fit to Data



RADIATION RANGE

LOCATION: Pachuca, HID, MEX
Latitude/Longitude: 20.133° North, 98.75° West, **Time Zone** from Greenwich -6
Data Source: SRC-TMYx 766320 WMO Station Number, **Elevation** 2435 m

LEGEND

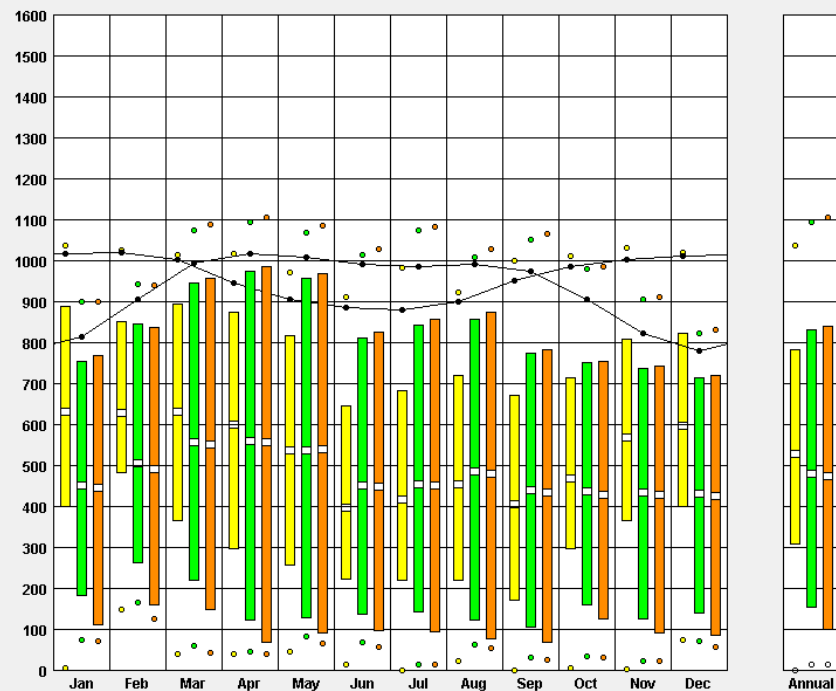
HOURLY AVERAGES
DAYLIT HOURS ONLY

RECORDED HIGH - ○
 AVERAGE HIGH -
 MEAN -
 AVERAGE LOW -
 RECORDED LOW - ○

RECORDED:
 DIRECT NORMAL
 GLOBAL HORIZONTAL
 TOTAL SURFACE
 (Wh/sq.m per hour)
THEORETICAL:
 —

Tilted Surface Radiation Input:
 Tilt degrees from Horizontal
 (Vertical = 90°)
 Bearing degrees from South
 (South = 0°, West = +90°)
 % Ground Reflectance
 (20% = grass)

PLOT:
 Hourly Avg Daily Total

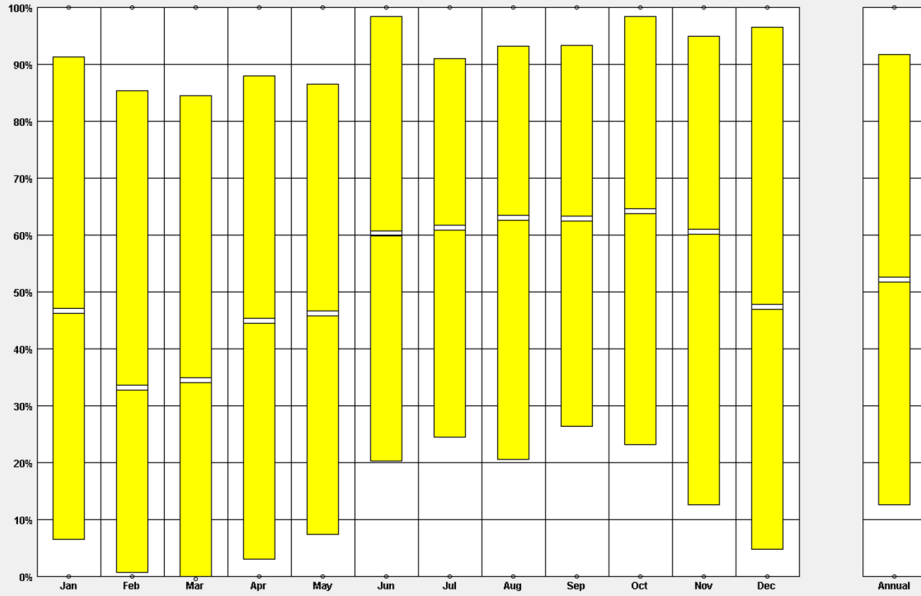


SKY COVER RANGE

LOCATION: Pachuca, HID, MEX
 Latitude/Longitude: 20.133° North, 98.75° West, Time Zone from Greenwich -6
 Data Source: SRC-TMYx 766320 WMO Station Number, Elevation 2435 m

LEGEND

- Total Cloud Cover 100%
- RECORDED HIGH ○
- AVERAGE HIGH ■
- MEAN ■
- AVERAGE LOW ■
- RECORDED LOW ○
- Clear Skies 0



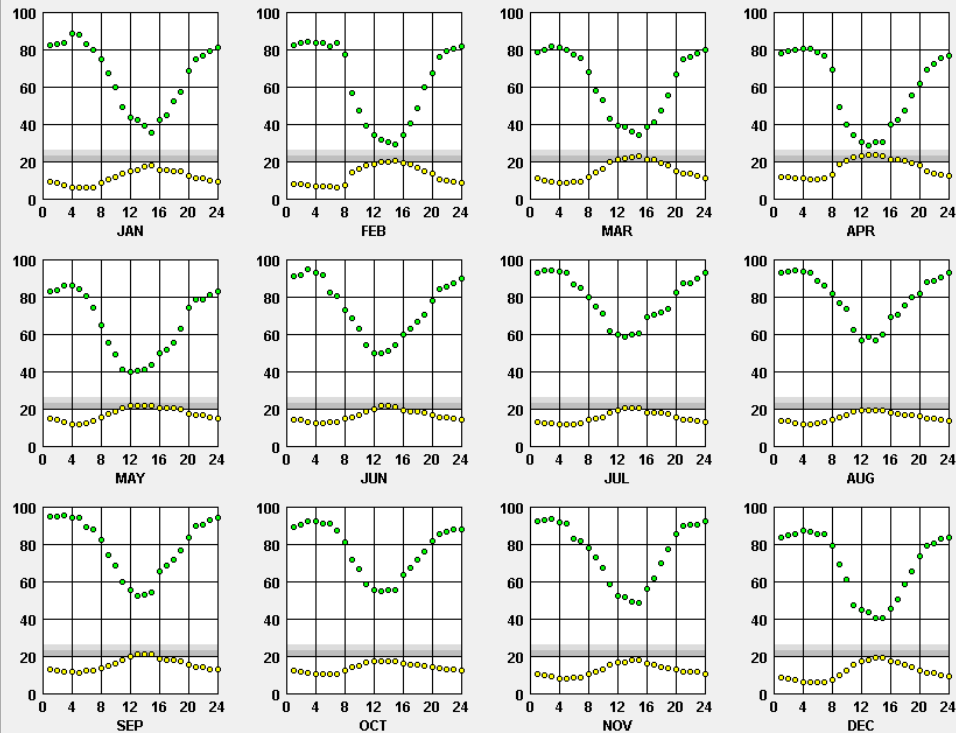
Back Next

DRY BULB X RELATIVE HUMIDITY
 ASHRAE 2005

LOCATION: Pachuca, HID, MEX
 Latitude/Longitude: 20.133° North, 98.75° West, Time Zone from Greenwich -6
 Data Source: SRC-TMYx 766320 WMO Station Number, Elevation 2435 m

LEGEND

- Dry Bulb ○
- Humidity ●
- Comfort Zone
- Summer
- Winter
- At 50%
- Relative Humidity



**DRY BULB X DEW POINT
ASHRAE 2005**

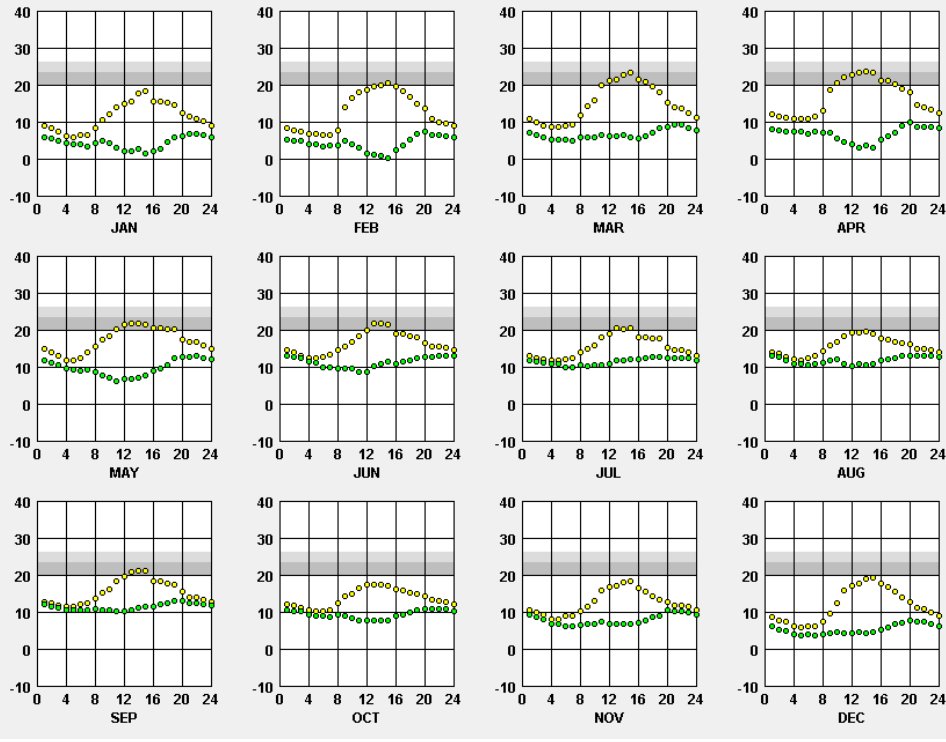
LOCATION: Pachuca, HID, MEX
Latitude/Longitude: 20.133° North, 98.75° West, **Time Zone from Greenwich** -6
Data Source: SRC-TMYx 766320 WMO Station Number, **Elevation** 2435 m

LEGEND

- Dry Bulb ●
- Dew Point ●
- Comfort Zone
- Summer
- Winter
- At 50% Relative Humidity

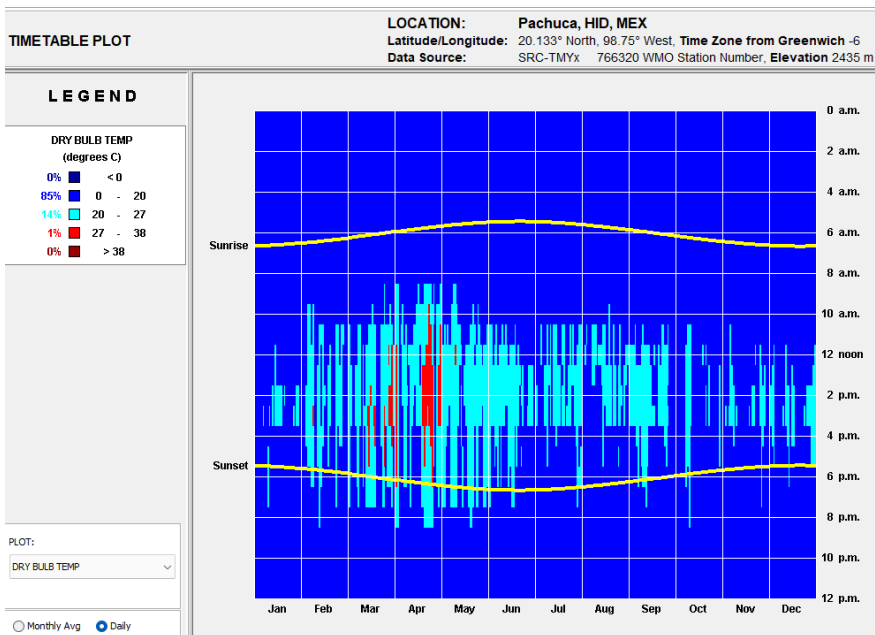
TEMPERATURE RANGE:

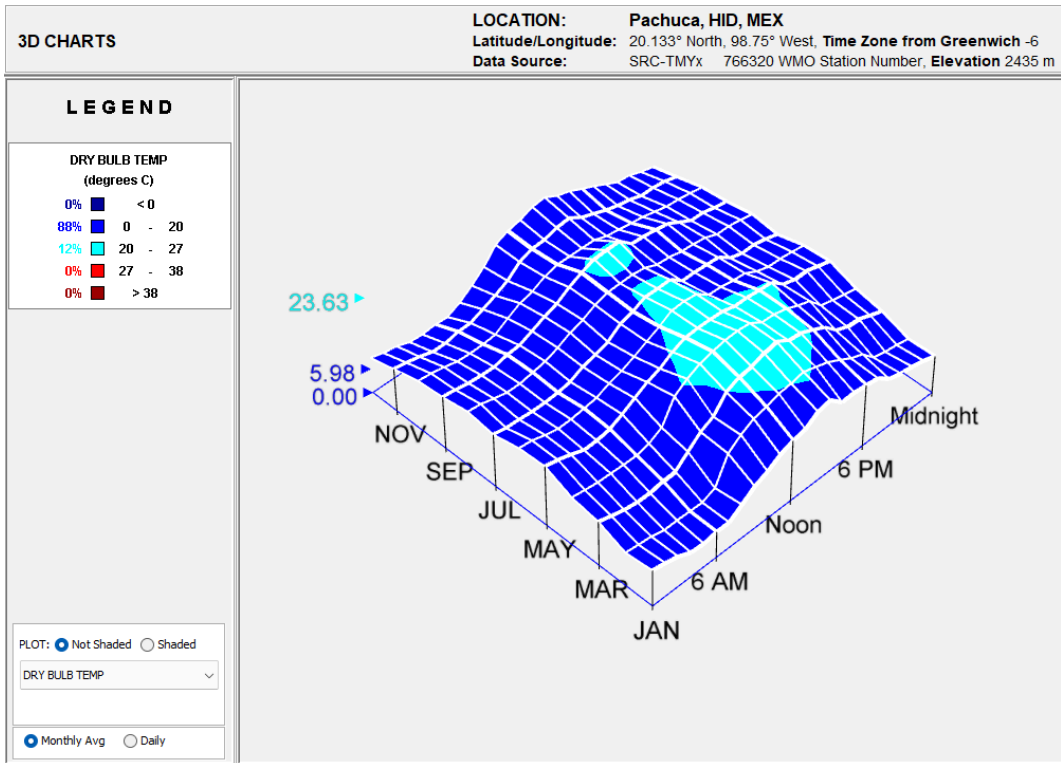
- 10 to 40 °C
- Fit to Data



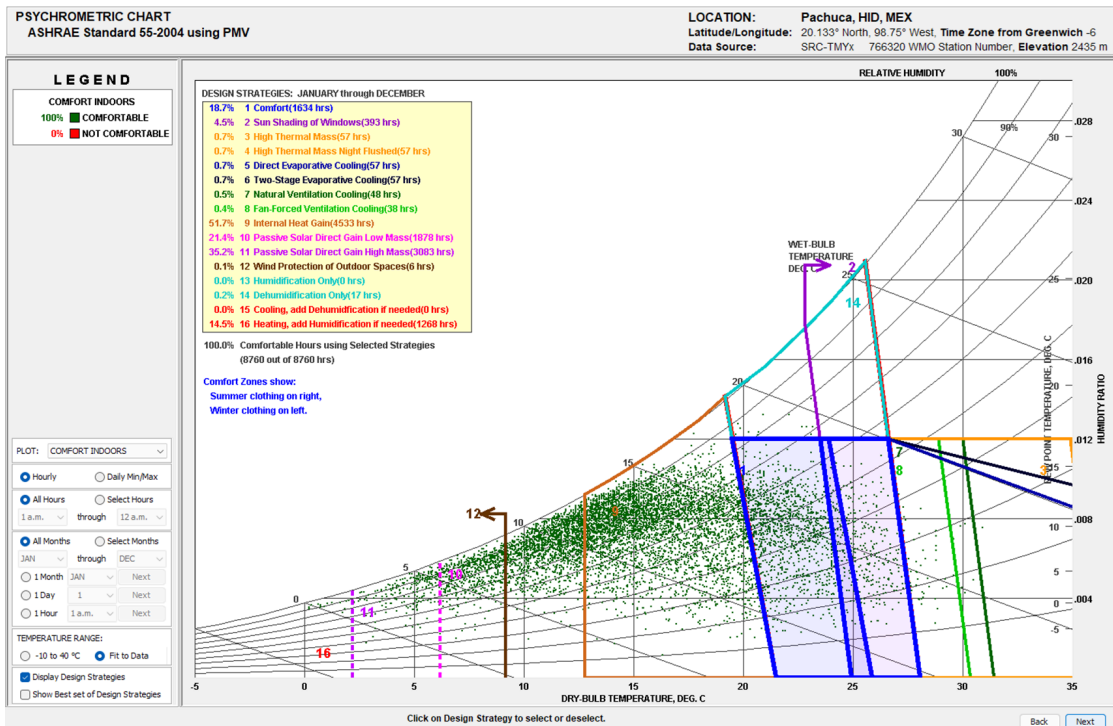
Anexo P. Gráficas de radiación y nubosidad

Las imágenes muestran las gráficas de radiación solar y cobertura del cielo, permitiendo identificar la variación mensual y anual de estos parámetros climáticos. Esta información fue utilizada para contextualizar los resultados de radiación solar y asoleamiento obtenidos en los modelos simulados.



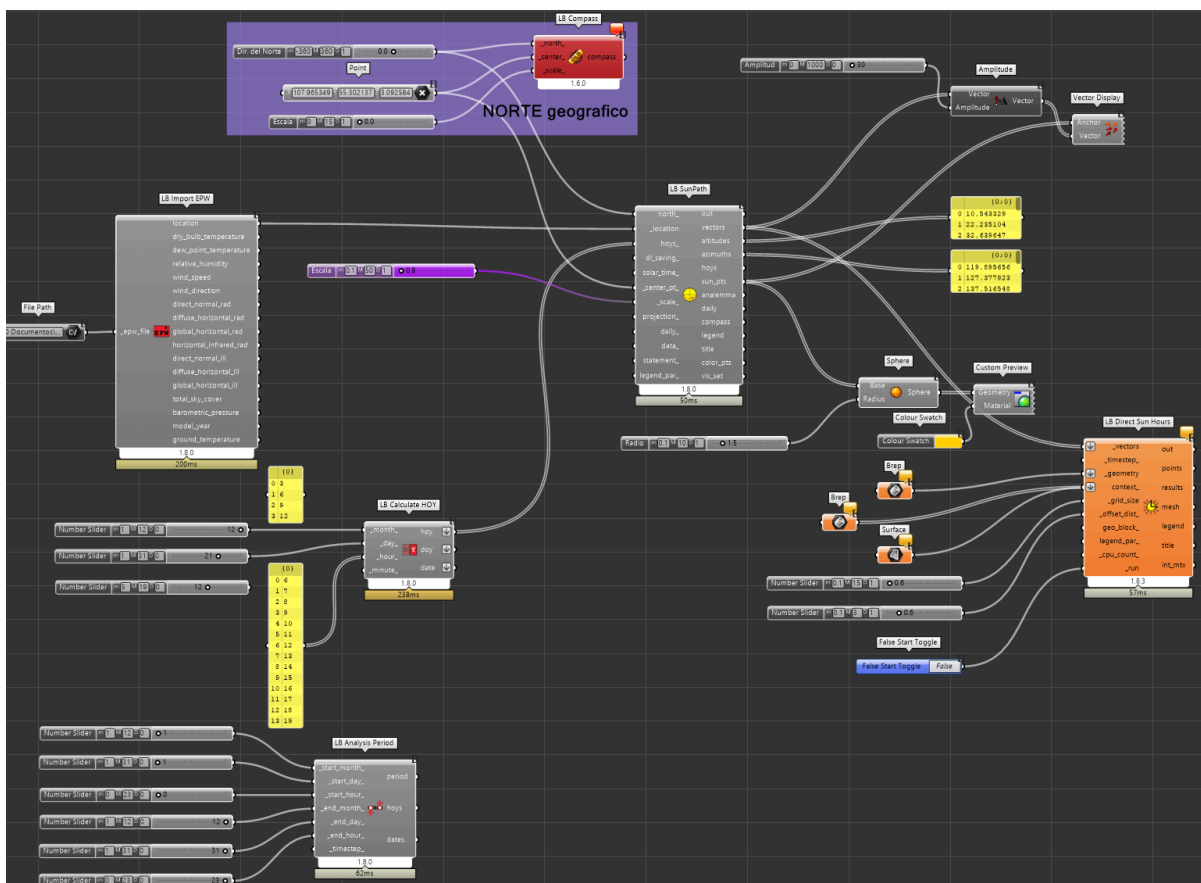
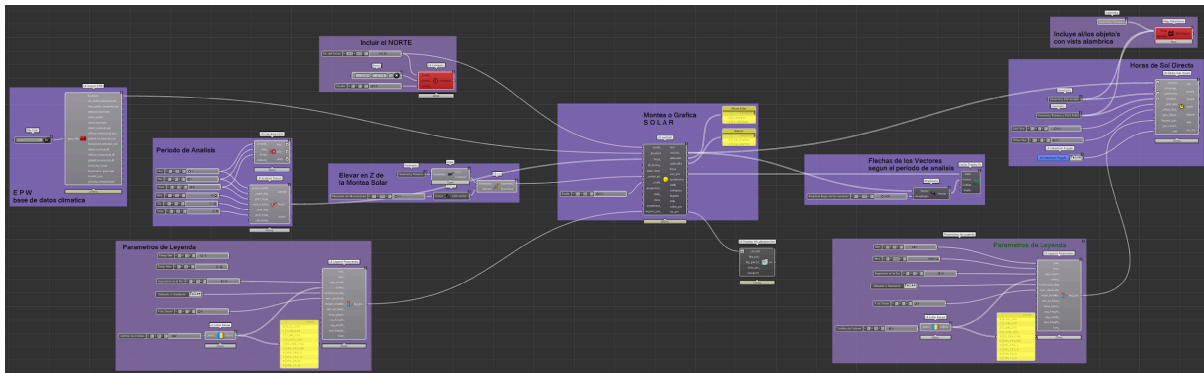


Anexo R. Diagramas de confort térmico



Anexo R. Diagramas de confort térmico

Las imágenes finales corresponden a los **diagramas de confort térmico**, donde se representan las condiciones ambientales del sitio en relación con las zonas de confort. Estos diagramas permiten identificar estrategias pasivas potenciales y sirven como respaldo climático para las decisiones de diseño propuestas en la investigación.



VII. Bibliografía

ASHRAE. (2017). *ASHRAE Standard 55-2017: Thermal environmental conditions for human occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

ASHRAE. (2019). *ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2019: Energy standard for buildings except low-rise residential buildings*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Comisión Nacional del Agua. (s.f.). *Datos climatológicos históricos*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua>

Diario Oficial de la Federación. (2001). *Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001, eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios para uso no residencial*. Secretaría de Energía.

Diario Oficial de la Federación. (2011). *Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011, eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios para uso habitacional*. Secretaría de Energía.

García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

INEGI. (2020). *Información climática y geográfica de México*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx>

International Energy Agency. (2019). *Global status report for buildings and construction 2019*. IEA. <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>

International Organization for Standardization. (2008). *ISO 13790:2008. Energy performance of buildings — Calculation of energy use for space heating and cooling*. ISO.

Roudsari, M. S., & Pak, M. (2013). Ladybug: A parametric environmental plugin for Grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. In *Proceedings of the 13th International IBPSA Conference*.

Servicio Meteorológico Nacional. (s.f.). *Información climatológica nacional*. Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx>

Sleman, M., & Atakara, M. (2024). Energy efficiency in contemporary buildings: Relationship between envelope design and energy consumption. *Journal of Building Performance and Energy*, 12(1), 45–60.

Solemma, LLC. (2023). *Climate Studio: Performance-based daylighting and energy modeling software*. <https://www.solemma.com>

U.S. Department of Energy. (s.f.). *EnergyPlus weather data (EPW files)*.
<https://energyplus.net/weather>