

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño fotovoltaico y análisis de ganancias solares en los edificios de la ESPOL

INGE-3113

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Francisco Daniel Caicedo González

Julio Danilo Pilco Martínez

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

En primer lugar, a Dios, por permitirme llegar a este momento tan importante de mi vida, por darme fortaleza en los momentos difíciles y guiarme a lo largo de todo mi camino académico.

A mi madre, por su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante durante toda mi formación estudiantil y personal. A mi padre, por sus consejos, su ejemplo y por motivarme a culminar esta etapa profesional. A mi hermano Sebastián, por su respaldo y compañía permanente.

A mi enamorada Melissa, por su comprensión, y apoyo durante todo este camino académico. A mis abuelos, por sus enseñanzas, valores y palabras de aliento que han contribuido a convertirme en la persona que soy el día de hoy.

Finalmente, a todas las personas que, de una u otra manera, han estado presentes brindándome su apoyo y motivación para alcanzar este logro.

Francisco Daniel Caicedo González

Agradecimientos

A la Escuela Superior Politécnica del Litoral, por la formación académica brindada y por facilitar los recursos necesarios para el desarrollo del presente trabajo.

De manera especial, expreso mi agradecimiento al PhD. Guillermo Soriano Idrovo, tutor de este proyecto, por su guía, apoyo y valiosos aportes de conocimiento durante todo el proceso de investigación, los cuales fueron fundamentales para la correcta ejecución y culminación de este trabajo.

Asimismo, agradezco a los docentes que contribuyeron con sus conocimientos y orientación a lo largo de mi formación profesional, así como a mi familia, por el respaldo constante y la motivación brindada durante esta etapa.

Francisco Daniel Caicedo González

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mis padres Julio y Rocío, quienes con su esfuerzo y apoyo han hecho posible que pueda culminar el reto de estudiar tan lejos de mi hogar.

A mi novia Mei que siempre ha estado allí en los buenos y malos momentos dándome ánimos para continuar y no rendirme, estaré eternamente agradecido.

Para mi mejor amiga Eli y mi gato Ramsés, aunque ya no estén en este mundo, siempre me han llevado de vuelta cuando me he perdido en el camino.

Julio Danilo Pilco Martínez

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento al Ingeniero Felipe Marcillo, su apoyo ha sido fundamental en la realización de este proyecto, deseándole éxitos en su etapa de docencia e investigación en la institución.

Al PhD. Guillermo Soriano, que ha fungido de tutor de este proyecto y ha estado presente en cada etapa de este, guiándonos de la mejor manera para que culminemos exitosamente este trabajo. A la institución y docentes que fueron un pilar en mi formación académica, así como ejemplo en mi integridad como persona y ética profesional.

Julio Danilo Pilco Martínez

Declaración Expresa


Nosotros Francisco Daniel Caicedo González y Julio Danilo Pilco Martínez, acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, octubre 21 del 2025.



Francisco Daniel
Caicedo González



Julio Danilo Pilco Martínez

Evaluadores

PhD. Miguel Ángel Quilambaqui Jara

Profesor de Materia

PhD. Guillermo Enrique Soriano Idrovo

Tutor de proyecto

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el potencial de captación de radiación solar en edificaciones del campus de la ESPOL, utilizando un edificio representativo como modelo para el análisis fotovoltaico. Se plantea como hipótesis que el uso de simulación geométrica detallada y análisis de sombreado permite estimar de manera confiable la capacidad máxima de aprovechamiento solar del campus, justificando la viabilidad técnica de futuras implementaciones. El estudio no tuvo como finalidad compensar la demanda eléctrica de los edificios, sino analizar el recurso solar disponible en cubiertas para fines de planificación energética.

El desarrollo del proyecto se realizó mediante la construcción de un modelo tridimensional del entorno edificado y la aplicación de simulaciones de radiación solar utilizando técnicas de raytracing con herramientas como Radiance y Ladybug Tools, empleando archivos climáticos tipo TMY. Para el edificio modelo (Rectorado), se analizó la distribución de módulos fotovoltaicos de 450 Wp sobre una superficie útil total de 759 m², estimándose una capacidad instalada aproximada de 60 kWp.

Los resultados principales mostraron una irradiación promedio anual de 1551.69 kWh/m²·año y de aproximadamente 4.3 kWh/m²·día, valor coherente con referencias nacionales. Se concluye que la metodología aplicada permite verificar la viabilidad técnica del aprovechamiento solar en el campus y constituye una base replicable para estudios a mayor escala.

Palabras clave: Raytracing, Sombreado, Viabilidad técnica, Energía solar, Irradiación

Abstract

The present research aims to evaluate the solar radiation harvesting potential of buildings within the ESPOL campus, using a representative building as a model for photovoltaic analysis. The hypothesis states that the use of detailed geometric simulation and shading analysis enables a reliable estimation of the maximum solar exploitation capacity of the campus, thereby justifying the technical feasibility of future implementations. The study was not intended to offset the electrical demand of the buildings but rather analyze the solar resources available on rooftops for energy planning purposes.

The project was developed through the construction of a three-dimensional model of the built environment and the application of solar radiation simulations using ray tracing techniques with tools such as Radiance and Ladybug Tools, employing TMY-type climate files. For the model building (Principalship), the distribution of 450 Wp photovoltaic modules was analyzed over a total usable area of 759 m², resulting in an estimated installed capacity of approximately 60 kWp.

The main results showed an average annual irradiation of 1551.69 kWh/m²-year and approximately 4.3 kWh/m²-day, values consistent with national references. It is concluded that the applied methodology allows the verification of the technical feasibility of solar energy exploitation on campus and constitutes a replicable basis for larger-scale studies.

Keywords: *Ray tracing, Shading, Technical feasibility, Solar energy, Irradiation*

Índice general

Resumen.....	viii
<i>Abstract</i>	ix
Índice general.....	x
Abreviaturas.....	xiv
Simbología	xv
Índice de figuras.....	xvi
Índice de tablas	xviii
Capítulo 1.....	1
1.1. Introducción	2
1.2. Descripción del Problema	2
1.3. Justificación del Problema	3
1.4. Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos específicos	5
1.5 Marco Teórico.....	5
1.5.1 Evaluación del recurso solar	5
1.5.2 Año meteorológico (TMY).....	6
1.5.3 Fuentes de información de radiación solar	6
1.5.4 Variables de radiación solar utilizadas en simulación	7
1.5.5 Climate Consultant.....	9

1.5.6	Radiación solar incidente sobre superficies	13
1.5.7	Estudio de sombras en la radiación incidente	13
1.5.8	Energía fotovoltaica	15
1.5.9	Contribución del proyecto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	15
Capítulo 2.....		18
2.1.	Metodología.	19
2.1.1	Flujo de Trabajo CAD/GIS/BIM y el concepto de gemelo Digital	19
2.2.	Niveles de detalle LOD en modelos urbanos	21
2.2.1.	Justificación de la metodología GIS + CAD.....	21
2.2.2.	Introducción a las herramientas de viabilidad.....	22
2.3.	Modelado digital 3D y configuración del análisis de raytracing	23
2.3.1	Levantamiento de modelos de edificaciones en Rhino 3D	24
2.3.2	Mallado del modelo 3D	25
2.3.3	Desarrollo del gemelo digital LOD1.....	26
2.4.	Creación de los bloques de funciones en Grasshopper y ejecución de simulaciones en Ladybug Tools	28
2.5.	Configuración del Análisis.....	30
2.5.1	Análisis del recurso solar en el sistema Radiance	30
2.5.2	Análisis de carga térmica y control pasivo por medio de EnergyPlus.....	31
2.5.3	Análisis de radiación solar con Grasshopper	32
2.6.	Proceso de diseño fotovoltaico.....	33

2.7.	Automatización y preanálisis solar	35
2.8.	Criterios de descarte climático y simulación final	36
Capítulo 3.....		38
3.1.	Resultados y Análisis	39
3.1.1	Resultados del Modelado 3D y Validación de la Geometría.....	39
3.2	Análisis de disponibilidad de superficie.....	40
3.3	Comparación con valores reales de potencial solar en Ecuador	54
3.4	Metodología para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos en tejados de edificaciones	70
3.4.1	Modelamiento geométrico y distribución de paneles en cubierta.....	71
3.4.2	Capacidad instalada y selección del inversor.....	72
3.4.3	Resultados de la simulación de la radiación solar	73
3.5	Marco Normativo Ecuatoriano Aplicable	74
3.6	Modelo lineal de dependencia térmica de la eficiencia fotovoltaica	74
3.7	Balance económico del diseño del sistema fotovoltaico	76
Capítulo 4.....		78
4.1	Conclusiones y recomendaciones.....	79
4.1.1	Conclusiones	79
4.1.2	Recomendaciones.....	81

Abreviaturas

ARCONEL Agencia de Regulación y Control de Electricidad

BIM Building Information Modeling

CAD Computer Aided Design

CNEL Corporación Nacional de Electricidad

DHI Diffuse Horizontal Irradiance

DNI Direct Normal Irradiance

EPW EnergyPlus Weather

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

ESMAP Energy Sector Management Assistance Program

FV Fotovoltaico

GHI Global Horizontal Irradiance

GIS Geographic Information System

INAMHI Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

LOD Level of Detail

NASA National Aeronautics and Space Administration

NEC National Electrical Code

NREL National Renewable Energy Laboratory

ODS Objetivos de Desarrollo Sostenible

PV Photovoltaic

SPD Surge Protective Device

TMY Typical Meteorological Year

UCLA University of California, Los Angeles

Simbología

A	Área de la superficie
AC	Corriente alterna
A_{Fv}	Superficie útil para instalación fotovoltaica
DC	Corriente continua
E_{Ac}	Energía eléctrica neta anual
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
ϵ	Emisividad del material
P	Potencia radiada
T	Temperatura absoluta
T_1	Temperatura de la superficie 1
T_2	Temperatura de la superficie 2
γ	coeficiente térmico del panel
η_{ref}	Eficiencia de referencia
T_{cell}	Temperatura del aire (bulbo seco)
T_{ref}	Temperatura de referencia

Índice de figuras

Figura 1 <i>Variables de radiación solar</i>	8
Figura 2 <i>Información del entorno de estudio</i>	9
Figura 3 <i>Rango de radiación del campus de la ESPOL</i>	10
Figura 4 <i>Rango de parámetros de radiación del entorno</i>	10
Figura 5 <i>Gráfico de sombra producida en el entorno con los parámetros climáticos ingresados</i>	11
Figura 6 <i>Parámetros del grafico del sombreado solar del campus ESPOL</i>	11
Figura 7 <i>Rango de cobertura del cielo enfocado en la ubicación geográfica del Campus</i>	12
Figura 8 <i>Parámetros de cobertura del cielo</i>	12
Figura 9 <i>ODS de la agenda 2030</i>	17
Figura 10 <i>Flujo de trabajo del proceso de diseño</i>	19
Figura 11 <i>Proceso de diseño y análisis fotovoltaico</i>	20
Figura 12 <i>Levantamiento de edificaciones en 3D a partir de planos bidimensionales</i>	25
Figura 13 <i>Mallado del relieve del campus ESPOL Gustavo Galindo</i>	26
Figura 14 <i>Desarrollo del modelo gemelo digital de los edificios</i>	28
Figura 15 <i>Interfaz del software Grasshopper</i>	30
Figura 16 <i>Modelado preliminar georreferenciado para el cálculo de radiación</i>	34
Figura 17 <i>Modelo preliminar con resultados de radiación incidente en el área de FCV</i>	35

Figura 18 <i>Programa de bloques de funciones general para el cálculo de radiación incidente</i>	36
Figura 19 <i>Vista de perspectiva del entorno de análisis (Campus de la ESPOL).</i>	40
Figura 20 <i>Escala de irradiación promedio en las superficies de análisis (Campus de la ESPOL).</i>	41
Figura 21 <i>Insolación Global en el Atlas solar del Ecuador con fines de generación eléctrica.</i>	55
Figura 22 <i>Simulación del sistema fotovoltaico en el edificio de rectorado del campus de la ESPOL</i>	72
Figura 23 <i>Radiación promedio sobre la superficie de los paneles fotovoltaicos en la superficie analizada</i>	73

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Segmentación de edificios del campus de la ESPOL</i>	42
Tabla 2 <i>Comparación con valores reales del Atlas Solar del Ecuador con fines de generación eléctrica</i>	55
Tabla 3 <i>Costos referenciales para el campus de la ESPOL y el edificio modelo (Rectorado)</i>	76

Capítulo 1

1.1. Introducción

La transición energética a nivel mundial impone la necesidad de optar por fuentes renovables para mitigar el cambio climático y lograr las metas de los objetivos de desarrollo sostenible (Irena, 2019). En este contexto, la energía solar fotovoltaica (PV) es fundamental para la generación distribuida y la reducción de las emisiones de carbono. A nivel nacional, Ecuador enfrenta una alta vulnerabilidad en su matriz energética, la cual depende en un 72% del recurso hídrico (Ministerio de Ambiente y Energía, 2024), lo que la hace apto a la variabilidad climática y las sequías, lo que provoca interrupciones en el suministro eléctrico. Ante esta problemática, el desarrollo de energías renovables no convencionales es una importante alternativa estratégica. La presente investigación aborda un déficit clave en la infraestructura de ESPOL: la ausencia de un análisis integral que cuantifique las ganancias solares y el potencial fotovoltaico en sus cubiertas. Esto es la principal limitante para la planificación de estrategias de eficiencia energética y la implementación efectiva del autoconsumo. Este trabajo materializa la aplicación de las competencias fundamentales de la Ingeniería Mecánica, al integrar principios de termodinámica, transferencia de calor, y análisis de sistemas energéticos. El alcance del proyecto se focaliza en entregar la propuesta de diseño y el estudio de viabilidad técnica-económica. El modelo desarrollado tiene un importante alcance con el sector productivo, ya que puede convertirse en un referente para promover soluciones que integren la energía solar fotovoltaica, con alta precisión, y que generen beneficios económicos y sostenibles.

1.2. Descripción del Problema

En la actualidad, el campus Gustavo Galindo Velasco de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) no cuenta con un estudio que analice globalmente tanto las posibles ganancias solares como el potencial de generación fotovoltaica que están disponibles en las cubiertas de las edificaciones. No obstante, existen antecedentes institucionales orientados a la realización de análisis preliminares para la identificación de ubicaciones candidatas para sistemas fotovoltaicos;

dichos estudios se fundamentan principalmente en criterios de disponibilidad de espacio, configuración del sistema eléctrico y estimaciones geométricas obtenidas mediante herramientas como Google Earth, sin incorporar un análisis específico de radiación solar ni de sombreado (ESPOL, 2025).

En particular, el estudio titulado “Propuestas preliminares para la ubicación de sistemas de generación fotovoltaica en el campus Gustavo Galindo Velasco de ESPOL” (ESPOL, 2025) propone diferentes opciones de implementación (sistemas centralizados, sistemas flotantes y sistemas de generación distribuida), los cuales afirman que se debe realizar estudios sobre sombras, validaciones estructurales y otros análisis técnicos previos a la implementación de sistemas fotovoltaicos. Para los sistemas de generación distribuida sobre cubiertas el informe concluye que el nivel de sombreado que puede generar la presencia de edificios cercanos, vegetación y diferencias de altura puede que condicione una disminución del rendimiento del sistema el cual no es avalado por el presente estudio, que es incapaz de evaluarlo por definición, por no ser su objetivo.

La falta de un estudio que cuantifique estas variables con modelos tridimensionales y simulaciones de radiación limita la identificación de las zonas optimizadas para el aprovechamiento solar y la estimación del potencial de generación fotovoltaica en el campus, lo cual cobra, precisamente en el ámbito nacional, toda su importancia debido a la vulnerabilidad que enfrenta el país y su dependencia de la generación hidroeléctrica y la limitación que impone la variabilidad climática. Esto viene a reforzar la exigencia de una planificación energética que sea más robusta y que base su estrategia en una generación diversificada a partir de fuentes renovables no convencionales.

1.3. Justificación del Problema

El presente trabajo puede ser justificado en función de la necesidad de ampliar y detenerse en las evaluaciones preliminares que existen sobre la implementación de los sistemas fotovoltaicos

en el campus ESPOL; pero siempre incluyendo la evaluación técnica que permita relacionar las ganancias solares, el análisis de las sombras y el potencial de la generación en cubiertas, en el contexto de un estudio institucional que realizó ESPOL en 2025, el cual en cierta medida es un antecedente relevante en el sentido de que detecta ubicaciones potenciales y restricciones técnicas del sistema eléctrico, ya que expone que son necesarios estudios de sombras y valoraciones más elaboradas con sentido permitiendo validar el funcionamiento de sistemas fotovoltaicos (ESPOL, 2025).

Por su parte, la literatura especializada muestra la dificultad que representa en un entorno construido no considerar el análisis de las sombras y la radiación incidente en superficies reales, y que podría llevar a una sobreestimación del potencial fotovoltaico, así como a diseños ineficaces, sobre todo para sistemas que se instalan en cubiertas urbanas (Sánchez & Cánovas, 2018; García et al., 2021). En este sentido, el desarrollo de un análisis que integre datos climáticos, geometría en tres dimensiones y simulación de la radiación permitiría reducir incertidumbres, priorizar áreas con mayor productividad solar y mejorar la toma de decisiones en la planificación energética institucional.

A través de una mirada institucional y estratégica, el presente proyecto proporciona un nivel detallado del contexto que no está previsto en los estudios preliminares existentes y que permite consolidar las bases para futuras decisiones de inversión en la apuesta de energías renovables. Asimismo, este proyecto aporta distintos tipos de valor, ya que permite diversificar la matriz energética del campus y la resiliencia frente a interrupciones del suministro eléctrico que pueda haber, de modo que la ESPOL pueda posicionarse como un símbolo de referencia sobre la gestión energética sostenible y desempeño energético en el ámbito académico.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar la propuesta de un sistema fotovoltaico eficiente, basado en el análisis de ganancias solares y el potencial de generación en los tejados de los edificios de la ESPOL, para promover la eficiencia energética y el autoconsumo.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Recopilar la información geoespacial y arquitectónica necesaria del campus, para la creación del Modelo 3D que posibilite la simulación precisa de las sombras.
2. Analizar las ganancias solares y las cargas térmicas en los edificios del campus de la ESPOL, mediante la técnica de *raytracing*, para la identificación de las áreas con mayor incidencia solar.
3. Desarrollar la propuesta de diseño fotovoltaico para los tejados de los edificios identificados, evaluando la eficiencia energética del sistema y cuantificando la cantidad de producción eléctrica alcanzable en el campus de la ESPOL.

1.5 Marco Teórico

1.5.1 Evaluación del recurso solar

La evaluación del recurso solar es fundamental para estimar las ganancias solares en edificios y el potencial de generación fotovoltaica en los tejados, ya que determina la magnitud, variabilidad y calidad de la radiación a lo largo del año. En estudios prácticos, este análisis no solo describe “cuánta radiación hay”, sino que también aporta evidencia con datos rastreables sobre qué información climática se emplea, cómo se procesa y por qué es adecuada para simulaciones energéticas y solares (Huld et al., 2018).

1.5.2 Año meteorológico (TMY)

Para estudios que requieren de resultados precisos, se emplean archivos del tipo TMY (año meteorológico típico), los cuales representan condiciones meteorológicas basadas en un período histórico. Su ventaja radica en que permiten trabajar con modelos horarios coherentes, necesarias para modelar radiación y variables meteorológicas vinculadas al rendimiento fotovoltaico, como la temperatura del aire (Huld et al., 2018). Además, los lineamientos técnicos este tipo de archivos (TMY) ayudan a comprender los supuestos, criterios de selección y limitaciones del “año representativo”, evitando interpretaciones erróneas cuando se extrapola a la producción anual (Wilcox & Marion, 2008). En este estudio, el uso de TMY y archivos EnergyPlus Weather (EPW) se considera fundamental, ya que conecta el clima del lugar con la simulación anual de irradiación incidente.

1.5.3 Fuentes de información de radiación solar

En general, es recomendable recolectar información entre:

- (i) Productos institucionales nacionales (para obtener un buen contexto y legitimidad en los resultados),
- (ii) Bases globales reconocidas (para comparación regional y consistencia), y
- (iii) Bases climáticas estructuradas para simulación.

En referencia a lo mencionado, NASA POWER permite acceder a parámetros solares y meteorológicos orientados al diseño de sistemas renovables y análisis energético (NASA, 2025). De forma complementaria, los productos del INAMHI aportan contexto nacional mediante cartografía de irradiación solar global (INAMHI, s. f.), lo cual es útil para ubicar el campus dentro del patrón espacial de radiación del país. Además, bases como Global Solar Atlas son referencias ampliamente utilizadas para visualizar GHI/DNI y potencial fotovoltaico, permitiendo contrastar

si el orden de magnitud del recurso local es coherente con la región (World Bank Group/ESMAP & Solargis, s. f.).

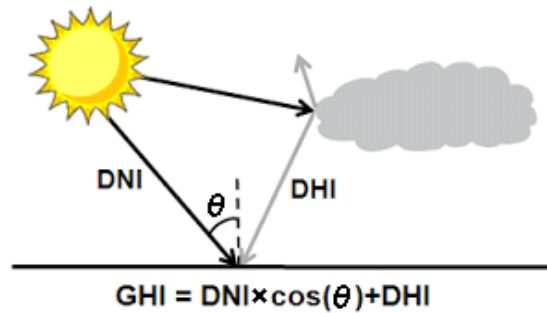
Desde el punto de vista metodológico, estas fuentes se emplean con dos propósitos: (1) contextualización del recurso (incluye mapas/atlas y comparación regional), y (2) obtención de series climáticas compatible con la simulación (series horarias y/o variables consistentes con herramientas energéticas). En plataformas como NASA POWER, el flujo típico consiste en seleccionar coordenadas del entorno analizado, definir el periodo de análisis y descargar variables de radiación y meteorológicas; posteriormente, estas series se revisan por consistencia y se comparan con referencias regionales antes de ser utilizadas como muestra. Realizar este proceso, reduce el riesgo de depender de una sola fuente y fortalece la trazabilidad del recurso solar empleado como entrada.

1.5.4 Variables de radiación solar utilizadas en simulación

Para estudios de radiación en superficies, las variables fundamentales para obtener los indicadores que se requieren son: GHI (Global Horizontal Irradiance), DNI (Direct Normal Irradiance) y DHI (Diffuse Horizontal Irradiance). La GHI representa la irradiancia total que incide sobre un plano horizontal y puede expresarse, como la suma de la componente difusa y la proyección de la componente directa normal, dependiente del ángulo vertical solar (National Renewable Energy Laboratory [NREL], 2025). La relación conceptual entre estas componentes se ilustra en la Figura 1.

Figura 1

Variables de radiación solar



La DNI corresponde a la irradiancia directa recibida en un plano perpendicular a los rayos solares, y es sensible a la nubosidad y a la atenuación atmosférica, mientras que la DHI representa la radiación dispersada por la atmósfera que llega desde múltiples direcciones del cielo sobre un plano horizontal (NREL, 2025). Esta diferenciación es clave, porque la proporción entre directa y difusa condiciona la sensibilidad al sombreado: la radiación directa puede bloquearse por completo por una obstrucción geométrica, mientras que la difusa se reduce según el cielo visible y su distribución angular, por lo que ignorar el efecto de las obstrucciones puede introducir sesgos en la estimación de la componente difusa en entornos obstruidos, lo cual es crítico para la radiación total incidente en la superficie (García et al., 2021).

En diferentes estudios relacionados estas variables representan la entrada climática, mientras que la salida de interés es la radiación resultante en cada superficie, que se encuentra afectada por distintos factores como: orientación, inclinación geometría del entorno y sombras. Por ello, la radiación resultante no es suficiente para realizar un análisis de esta magnitud, además se requiere llevar estas variables hacia las condiciones que presenta el entorno de estudio, para obtener valores más precisos en nuestros resultados.

1.5.5 Climate Consultant

Climate Consultant se incorpora como herramienta de diagnóstico climático porque traduce un archivo EPW/TMY en gráficos interpretables que permiten justificar decisiones de diseño y evaluar condiciones térmicas del sitio. Esto permite contextualizar por qué las ganancias solares y el sombreado son relevantes en el campus, conectando clima con estrategias y con necesidades de simulación (UCLA Energy Design Tools Group & California Energy Commission, 2020). En particular, sus salidas ayudan a identificar periodos críticos de aislamiento solar y condiciones ambientales que influyen tanto en ganancias solares como en el desempeño fotovoltaico.

Las figuras 2 a 8 muestran los principales resultados obtenidos del análisis climático del campus Gustavo Galindo Velasco, así como la caracterización del entorno de estudio, los intervalos de radiación solar, los parámetros climáticos relevantes, los patrones de sombreado solar y la cobertura del cielo correspondiente a su ubicación geográfica, identificando así los periodos críticos de exposición solar y las condiciones ambientales que influyen en las ganancias solares o en el potencial de funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos.

Figura 2

Información del entorno de estudio

LOCATION:	Campus ESPOL Proserpi, -, -
Latitude/Longitude:	2.148° South, 79.964° West, Time Zone from Greenwich -5
Data Source:	MN8 999 WMO Station Number, Elevation 101 m

Figura 5

Gráfico de sombra producida en el entorno con los parámetros climáticos ingresados

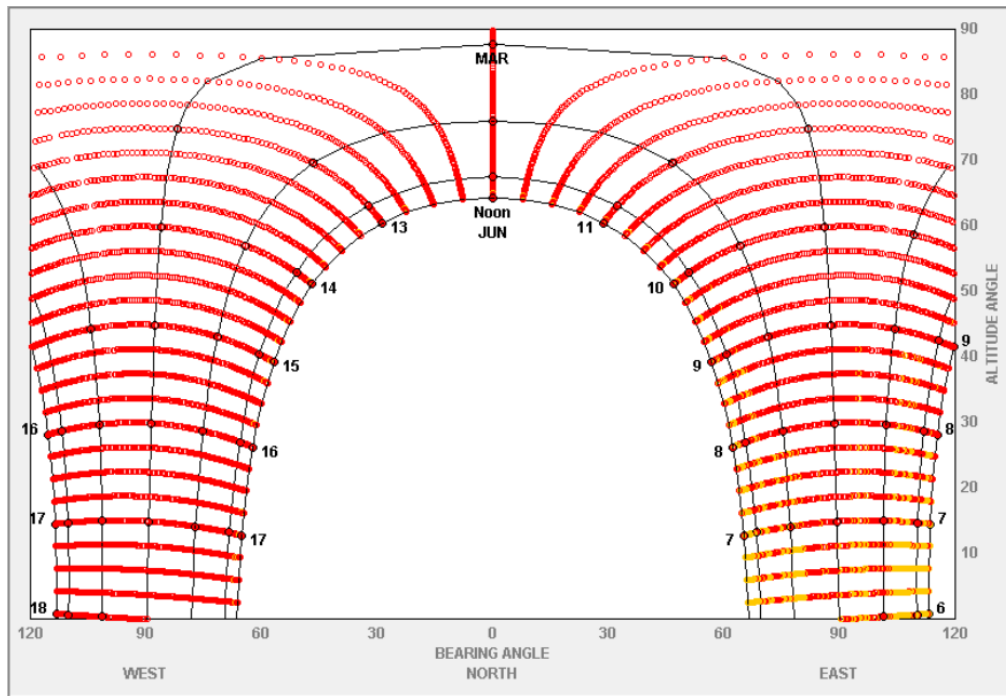


Figura 6

Parámetros del grafico del sombreado solar del campus ESPOL

LEGEND

- **WARM/HOT > 24°C**
(SHADE NEEDED)
1788 Hours Exposed
0 Hours Shaded
- **COMFORT > 20°C**
(SHADE HELPS)
175 Hours Exposed
0 Hours Shaded
- **COOL/COLD < 20°C**
(SUN NEEDED)
0 Hours Exposed
0 Hours Shaded

PLOT MONTHS:

SUMMER FALL

December 21 to June 21

WINTER SPRING

June 21 to December 21

Display Grid

Display Shading Calculator

Display Obstruction Elevation

Input Obstructions

Display Opposite Direction

Figura 7

Rango de cobertura del cielo enfocado en la ubicación geográfica del Campus

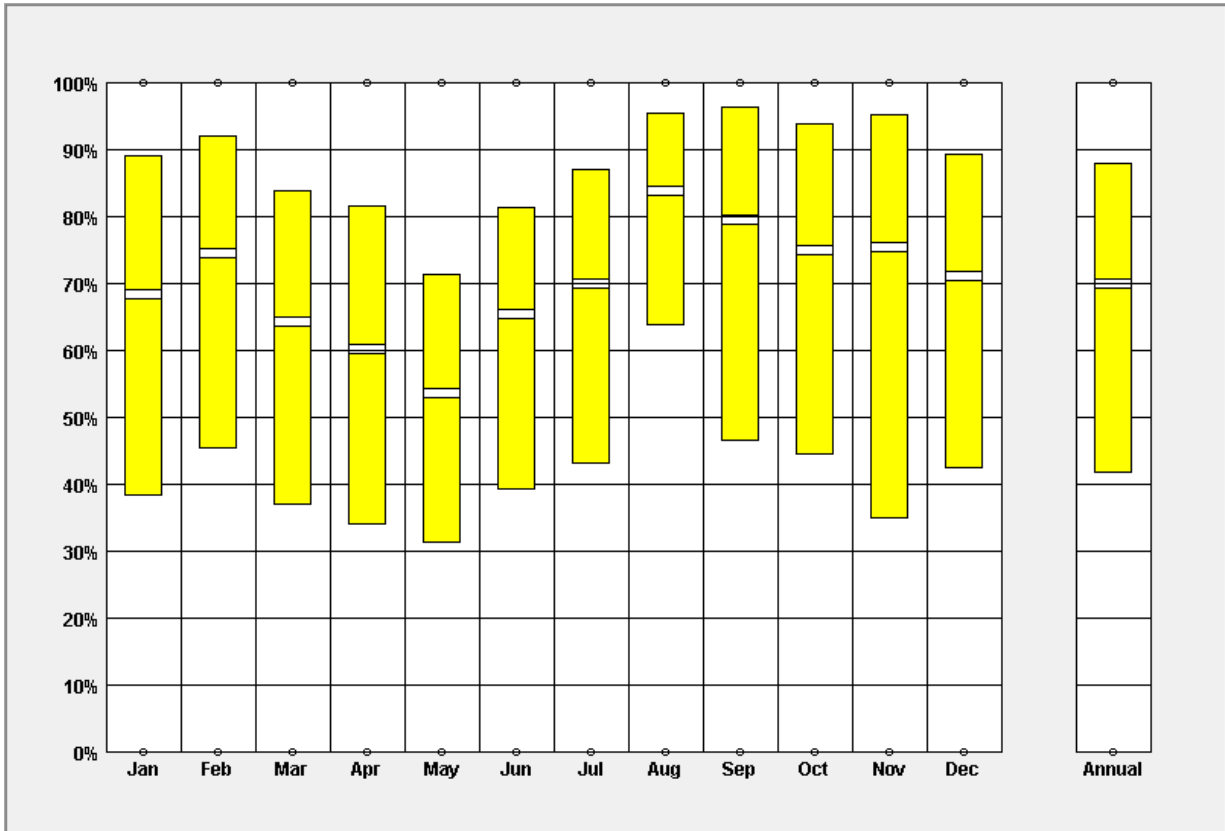
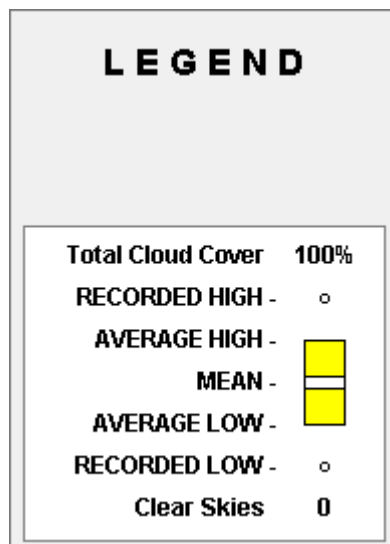


Figura 8

Parámetros de cobertura del cielo



1.5.6 Radiación solar incidente sobre superficies

En superficies, la radiación incidente se entiende como la suma de tres aportes: directa, difusa y reflejada. Aunque la radiación directa suele dominar en cielos despejados, la componente difusa puede tener un peso relevante en condiciones de nubosidad y en entornos que presentan obstrucciones, mientras que la componente reflejada depende del albedo y de la geometría del entorno (Sánchez & Cánovas, 2018). Esta descomposición es útil porque el sombreado impacta de forma distinta a cada componente, y por tanto afecta tantas ganancias solares como potencial fotovoltaico.

Para evaluar radiación en cubiertas, no basta con conocer la radiación horizontal: se requiere estimar radiación en el plano de la superficie. Este proceso combina geometría solar y modelos de transposición que transforman la radiación del plano horizontal al plano inclinado (Jiménez, Will, Rodríguez, 2017; Fadare, 2010). Sin embargo, en entornos urbanos el componente dominante de incertidumbre suele ser el sombreado, por lo que la precisión mejora cuando se integra transposición con simulación geométrica.

1.5.7 Estudio de sombras en la radiación incidente

En entornos construidos, el sombreado no depende únicamente de obstrucciones sobre la cubierta, sino también de obstrucciones lejanas asociadas al relieve o edificaciones distantes que modifican la disponibilidad del cielo y la trayectoria solar. En términos radiativos, la afectación no se limita a despreciar la componente directa cuando el sol se oculta; el problema más delicado aparece en la componente difusa, porque su estimación requiere representar qué porción del hemisferio aporta radiación hacia la superficie analizada y cómo se distribuye esa radiancia con el estado del cielo (García et al., 2021).

Además, la difusa no es uniforme en todo el análisis solar. Los modelos clásicos representan el cielo con un fondo isotrópico sobre el que se superponen regiones con mayor

contribución, típicamente una zona que rodea al Sol y una banda de horizonte. Esta estructura se justifica porque captura dos efectos: la intensificación alrededor del sol y el realce cercano al horizonte (Perez et al., 1987). Por ello, cuando el horizonte está parcialmente obstruido, no solo “se pierde cielo”, sino que potencialmente se recortan zonas relevantes para la difusa, lo cual vuelve crítico incorporar el perfil de horizonte en la determinación de irradiancia incidente sobre planos inclinados, especialmente en horas de ocaso.

El sombreado es generado por obstáculos cercanos a la superficie de captación y produce variaciones espaciales marcadas dentro de una misma cubierta. En la energía fotovoltaica esto es especialmente importante porque no solo reduce la irradiancia local, sino que puede amplificar pérdidas por desajustes eléctricos cuando existen zonas parcialmente sombreadas, incluso por obstáculos relativamente pequeños. De acuerdo con, Goss et al. (2014) señalan que en el modelado de sombreado es necesario considerar pérdidas originadas por obstrucciones tanto cercanas como lejanas capaces de sombrear tanto la radiación directa como parte de la difusa, y proponen un algoritmo eficiente que desarrolla un mapa de irradiancia a cada paso de tiempo, permitiendo cuantificar esas pérdidas con validación frente a mediciones.

De acuerdo con García et al. (2021) se evalúan modelos de difusa en planos inclinados adaptados a entornos obstruidos incorporando datos, precisamente para representar no solo “cuánto cielo se ve”, sino qué parte del aporte circunsolar queda recortada por la geometría detallada, demostrando un mejor desempeño dentro del mapa analizado.

Al mismo tiempo, la evidencia experimental refuerza que las obstrucciones no solo reducen la difusa promedio, sino que también generan distribuciones no uniformes en superficies inclinadas dentro de arreglos: Tschopp et al. (2021) describen este fenómeno como masking (reducción de radiación difusa incidente desde el cielo por obstrucciones del campo visual) y señalan que puede causar sesgos en la evaluación del desempeño si se mide o modela la irradiancia sin representar esa restricción de vista al cielo.

1.5.8 Energía fotovoltaica

1.5.8.1. Principio fotovoltaico y dependencia con la irradiancia. La energía fotovoltaica convierte radiación solar en electricidad a partir del efecto fotovoltaico en celdas semiconductoras. En términos prácticos, el parámetro que mejor conecta con el proyecto es que la potencia generada depende directamente de la irradiancia recibida en el plano del módulo, por lo que una estimación confiable de radiación incidente sobre cubiertas se traduce en una mejor estimación del potencial de generación (Agudo, 2019).

1.5.8.2. Tipos de sistemas fotovoltaicos. La clasificación entre sistemas fotovoltaicos aislados y conectados a red es útil para ubicar el tipo de solución tecnológica, pero en este proyecto lo relevante es la aplicación en entorno institucional, donde la integración a red y el autoconsumo suelen ser el escenario más viable (Colmenar Santos et al., 2015; Abella, 2005).

1.5.8.3. Factores que afectan el desempeño FV en cubiertas. En cubiertas urbanas, las pérdidas por sombreado suelen ser uno de los factores más determinantes en la productividad, porque no solo reducen irradiancia, sino que pueden limitar la colocación de módulos y afectar el rendimiento eléctrico del sistema si se instalan arreglos en zonas con sombra recurrente. Por ello, la evaluación del potencial fotovoltaico requiere integrar el archivo climático (TMY), geometría y sombras, para priorizar superficies con alta radiación anual. Esto justifica que el análisis de sombras y radiación incidente sea el núcleo técnico del proyecto y que la parte fotovoltaica se presente como consecuencia aplicada de ese resultado (Sánchez & Cánovas, 2018).

1.5.9 Contribución del proyecto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

La Agenda 2030 establece los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y sus metas como marco global para orientar acciones de sostenibilidad. En este contexto, el presente proyecto se vincula de forma directa con los ODS 7, 9 y 11, al proponer una metodología técnica para

cuantificar el recurso solar y el potencial fotovoltaico en cubiertas considerando condiciones reales de geometría y sombreado.

1.5.9.1. ODS 7: Energía asequible y no contaminante. El proyecto aporta a la transición energética mediante la identificación de superficies con mayor disponibilidad solar y menos pérdidas por sombras, lo cual favorece la integración de energía renovable en el campus y contribuye a mejorar el desempeño energético al orientar decisiones hacia zonas de mayor productividad solar.

1.5.9.2. ODS 9: Industria, innovación e infraestructura. La metodología de evaluación basada en datos climáticos, modelo 3D y simulación de radiación apoya la modernización de infraestructura hacia soluciones más sostenibles, coherente con la modernización de infraestructura con tecnologías más limpias y eficientes.

1.5.9.3. ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles. El enfoque desarrollado es transferible a otros entornos urbanos para apoyar la planificación y gestión sostenible del entorno construido.

La Figura 9 muestra los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos en la Agenda 2030, que sirven de marco para orientar acciones de sostenibilidad a nivel global (Naciones Unidas, 2015).

Figura 9*ODS de la agenda 2030*

Capitulo 2

2.1. Metodología.

2.1.1 Flujo de Trabajo CAD/GIS/BIM y el concepto de gemelo Digital

Para realizar el estudio, se definió un proceso ordenado, en el cual se definió un camino de trabajo claro que cubrió todas las fases de la investigación. El proceso comenzó con la obtención de la información en conjunto con la creación del modelo digital tridimensional. La metodología nos aseguró una conexión coherente entre las herramientas usadas, pasando del modelado de las estructuras de la zona de estudio (Campus de la ESPOL), a la automatización de los programas para la obtención de los resultados precisos sobre la energía y el calor.

Como se muestra en la Figura 10, el flujo de trabajo del proceso de diseño siguió un camino ordenado que conectó la obtención de información con la creación del modelo tridimensional. De manera complementaria, la Figura 11 detalla el proceso de diseño y análisis fotovoltaico.

Figura 10

Flujo de trabajo del proceso de diseño.

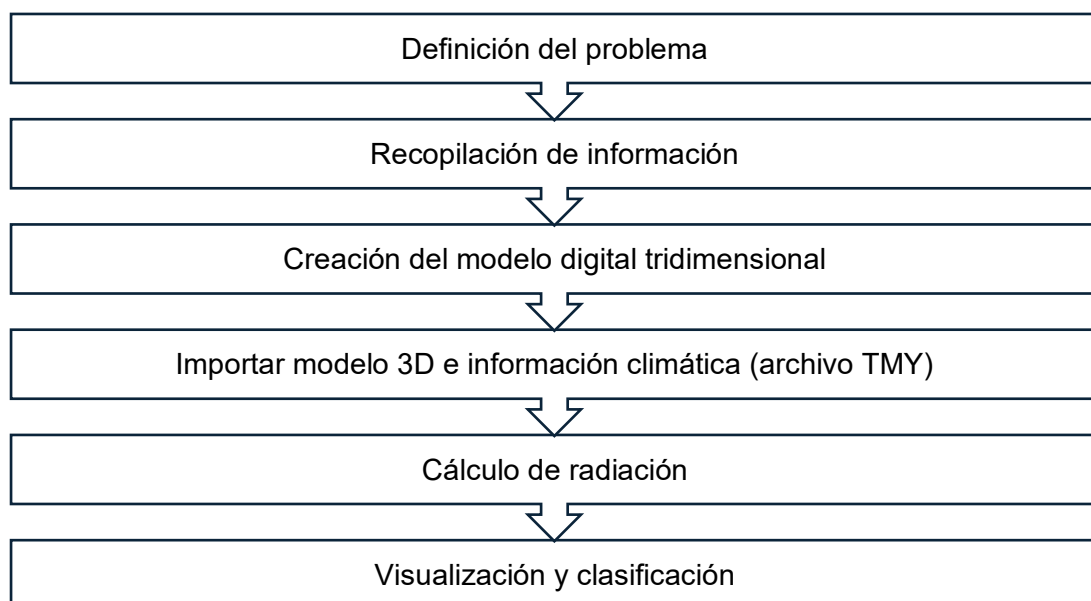
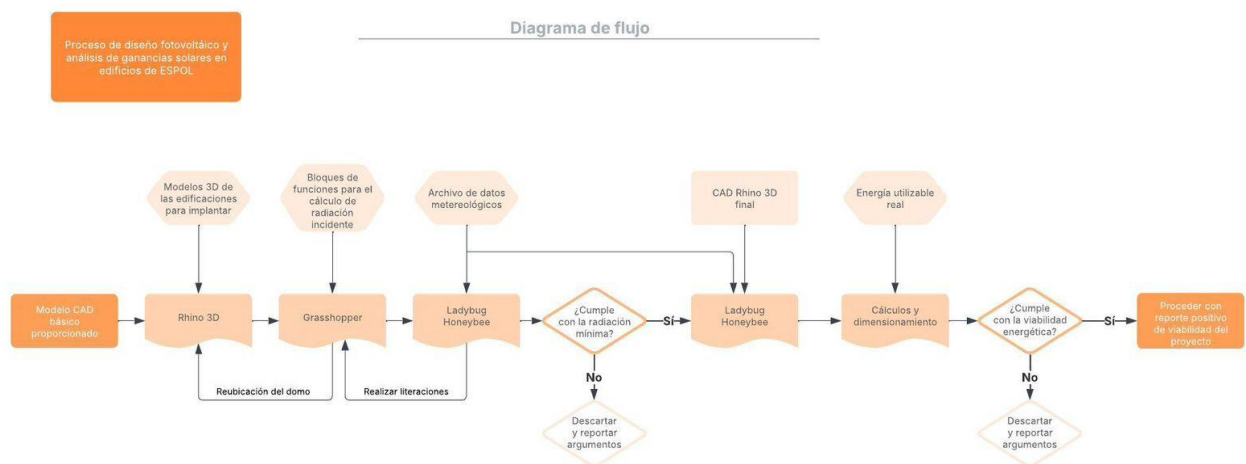


Figura 11

Proceso de diseño y análisis fotovoltaico.



El gemelo digital es un concepto utilizado como principio rector en trabajos de modelado, porque actúa con una capacidad dinámica capaz de simular y predecir los comportamientos energéticos de las edificaciones, a partir de los parámetros de operación y diseño (Rutkowski et al., 2024). Al trabajar bajo estas condiciones, el flujo metodológico integró las capacidades del CAD para garantizar la fidelidad geométrica del modelo, el GIS para la gestión y análisis de la información espacial, y el BIM para la asignación y administración de atributos que no pertenecen a los gráficos asociados a los componentes de construcción y energéticos del sistema, permitiendo la integración entre los datos geoespaciales utilizados en estudios de modelos tridimensionales (Fosu et al., 2024).

2.2. Niveles de detalle LOD en modelos urbanos

Para realizar el análisis de un entorno a gran escala, es necesario mantener un equilibrio con la precisión de las geometrías, con la finalidad de aprovechar al máximo las herramientas computacionales. En este estudio, se adoptó un nivel de especificación (LOD) inicial simplificado para el concepto de gemelo digital empleado, en concordancia con los estándares internacionales de modelado urbano. Los edificios se representaron como volúmenes básicos LOD1, donde la huella del edificio se extruyó verticalmente hasta una altura representativa. Esta simplificación se justificó debido a que el objetivo principal del estudio fue la evaluación del potencial fotovoltaico en las cubiertas, las cuales constituyen las superficies de las cuales se obtenga una mayor captación de radiación solar.

A pesar de que los detalles de las cubiertas y elementos estructurales encontrados fueron omitidos con el fin de reducir la complejidad en la simulación computacional del modelo, se mantuvo cuidadosamente la precisión geométrica de las cubiertas y la exactitud de la altura total de los edificios. Este planteamiento resulta fundamental, ya que diversos estudios han demostrado que el común denominador causante de errores en estudios de simulación de radiación solar está directamente asociado al sombreado proyectado por las estructuras edificadas circundantes, incluso más que al nivel de precisión geométrico de las cubiertas de los edificios. Al priorizar la precisión en la interacción de los edificios extruidos a nivel LOD1, se garantizó que el modelo simulado fuera computacionalmente viable para un análisis a escala urbana, sin comprometer la fidelidad de los resultados de radiación solar obtenidos (Nouvel et al., 2013).

2.2.1. Justificación de la metodología GIS + CAD

En este estudio, se empleó una metodología híbrida que fusionó las fortalezas del GIS y el CAD para que cada sistema por separado pueda superar sus limitaciones. Los datos de

entrada se obtuvieron del sistema GIS, el cual proveyó las coordenadas geográficas, las proyecciones horizontales de las edificaciones en dos dimensiones y el modelo digital de elevación lo que incluye la topografía terrestre para análisis geográficos, que nos permite tener más detalle acerca del relieve del terreno. Sin embargo, dado que los datos GIS carecen de estructura de limpia y orientada requerida para los softwares de simulación, la información se importó a un entorno CAD o paramétrico (Paietta & Zangheri, 2022). Posteriormente, se utilizaron diversos softwares requeridos para realizar diferentes tareas como la extrusión, limpieza y refinamiento de la geometría, asegurando obtener la calidad necesaria para la correcta simulación del modelo. Esta coordinación fue crucial para lograr un modelo estructuralmente adecuado para las simulaciones de sombreado y el cálculo de ray-tracing, ya que permitió integrar la precisión geográfica con la exactitud geométrica necesaria para modelar la interacción solar. Esta sinergia permitió capitalizar la capacidad del GIS para el manejo de gran data geográfica y la precisión del CAD para la representación 3D detallada (Cebecauer & Šúri, 2015).

2.2.2. Introducción a las herramientas de viabilidad

Rhino 3D y Grasshopper fueron los principales softwares donde se desarrolló la simulación, funcionando como interfaz geométrica del modelado. La integración de estos programas permitió un correcto manejo a pesar de trabajar con geometrías complejas en gran escala, así como la aplicación de flujos de trabajo paramétricos a través de programación visual, permitiendo realizar modificaciones en conjunto con las evaluaciones iterativas realizadas al modelado.

El análisis energético y climático se llevó a cabo utilizando las herramientas de código abierto Ladybug Tools, específicamente a través de sus complementos Ladybug y Honeybee, los cuales actuaron como el enlace directo para el análisis entre el entorno paramétrico y los

resultados de la simulación. Esta herramienta cumple con la capacidad necesaria para vincular modelos geométricos con herramientas que permitan realizar cálculos, facilitando que el proceso sea claro y que otros puedan obtener los mismos resultados (Roudsari & Pak, 2013; Azhar et al., 2014).

Otra herramienta que permitió el análisis detallado de la radiación solar, implementando la técnica de mallado fue Radiance, con la cual luego de la interpretación del archivo climático, permita la simulación de los fenómenos solares y luminosos a considerar en los entornos modelados. En conjunto, se trabajaba con EnergyPlus para la simulación térmica en los edificios en diferentes horarios, permitiendo evaluar el comportamiento energético bajo condiciones climáticas reales. Ambas extensiones de cálculo cuentan con un amplio respaldo en diferentes estudios investigaciones e incluso en la práctica profesional del diseño sostenible, lo que aseguró que las simulaciones otorguen resultados confiables y estén avalados bajo normas internacionales (Ward, 1994; U.S. Department of Energy, 2023).

2.3. Modelado digital 3D y configuración del análisis de raytracing

Esta etapa se centró en preparar la geometría del entorno para una simulación precisa de la interacción solar, ya que constituyó la base física sobre la que se construyó el gemelo digital. En esta fase, los datos geográficos se transformaron en una geometría tridimensional coherente, compatible con los algoritmos de simulación, lo que permitió la representación precisa tanto de los volúmenes construidos como del terreno circundante.

La calidad de los resultados obtenidos en etapas posteriores, en particular en el cálculo de la irradiancia solar, dependió directamente del nivel de precisión geométrica alcanzado durante esta preparación. La representación precisa de las alturas y formas entre los edificios resultó fundamental para que los algoritmos de raytracing calcularán correctamente el sombreado proyectado y, en consecuencia, capturan la variabilidad de la radiación solar

incidente en los tejados. Diversos estudios han indicado que una geometría urbana correctamente configurada es un factor determinante en la fiabilidad de las evaluaciones solares a escala urbana y de distrito (Ward, 1994). En este sentido, la configuración geométrica desarrollada se consolidó como el pilar sobre el que se basó la precisión de la evaluación del potencial fotovoltaico.

2.3.1 Levantamiento de modelos de edificaciones en Rhino 3D

El modelo tridimensional se creó en Rhino 3D, a partir de planos bidimensionales obtenidos del sistema de información geográfica. Estos planos se extruyeron verticalmente para alcanzar una altura representativa de cada edificio, lo que permitió una reconstrucción simplificada pero coherente del volumen urbano del área de estudio. Durante este proceso, se cuidó de que las geometrías generadas fueran superficies planas y limpias, evitando inconsistencias topológicas que pudieran afectar los cálculos posteriores.

La precisión en la definición geométrica de los volúmenes resultó especialmente relevante para el análisis del sombreado mutuo entre edificios, ya que errores en la representación geométrica pueden introducir desviaciones significativas en la estimación de la radiación solar incidente. Estudios previos han demostrado que la precisión de la geometría y la correcta representación de las relaciones entre los edificios son factores clave para garantizar resultados fiables en las evaluaciones solares urbanas y los análisis del potencial fotovoltaico (Azhar et al., 2014).

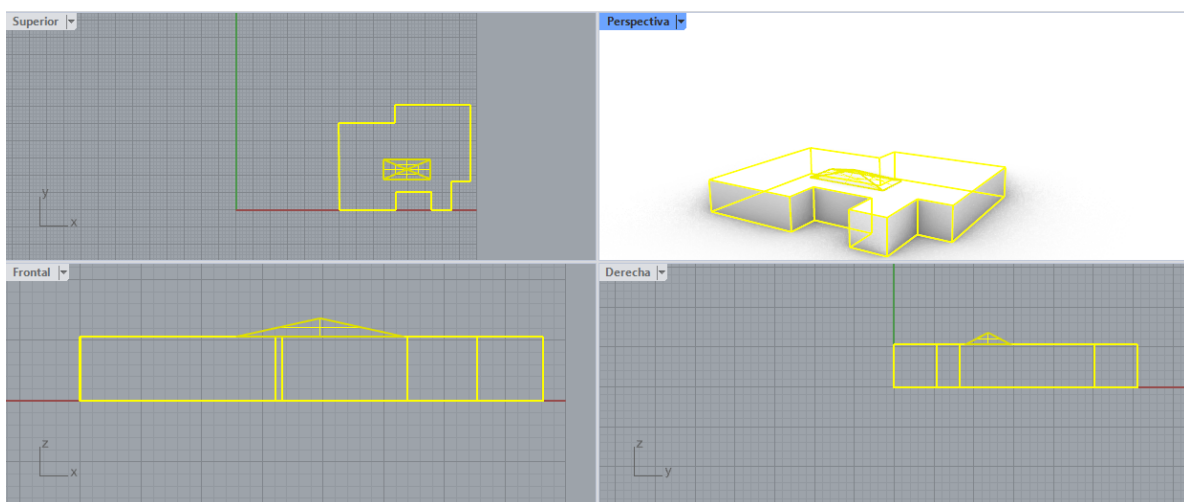
Como alternativa para obtener la geometría del entorno y las edificaciones a modelar, puede recurrirse a técnicas de captura de realidad como drones y LiDAR. Mediante vuelos fotogramétricos o escaneo LiDAR se generan nubes de puntos y modelos de superficie

georreferenciados, que luego se importan como referencia para reconstruir la geometría con mayor fidelidad dimensional.

Como se muestra en la Figura 12, el levantamiento de edificaciones en 3D se realizó a partir de planos bidimensionales, garantizando volúmenes coherentes para el análisis del sombreado y la radiación solar.

Figura 12

Levantamiento de edificaciones en 3D a partir de planos bidimensionales.



2.3.2 Mallado del modelo 3D

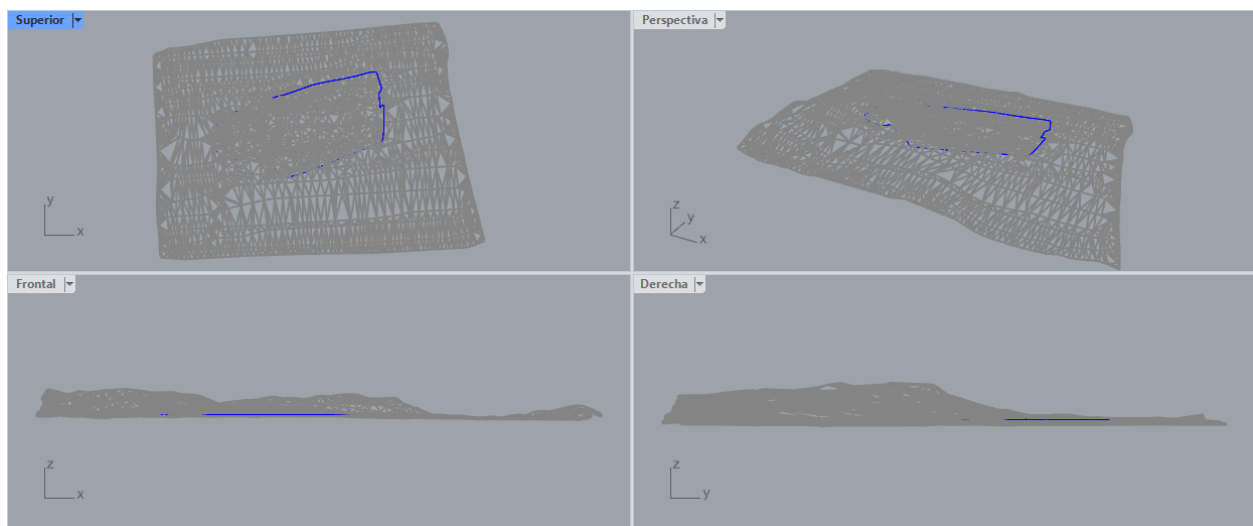
Para realizar el análisis raytracing, el mallado de las superficies de estudio formó una parte fundamental para su correcta ejecución, porque permitió cuantificar geoméricamente las áreas expuestas a la radiación solar. Para ello, de forma particular las cubiertas de las edificaciones fueron subdivididas en un mallado uniforme, con el objetivo de realizar un análisis focalizado y distribuido espacialmente de la radiación solar, para evitar asumir valores promedios sobre las áreas más extensas.

De acuerdo con Amillo et al., (2014), esta metodología de segmentación adecuada de las superficies permite mejorar la resolución en el análisis de ganancia solar. Realizar este enfoque, permitió que en la simulación se calculara la radiación de manera individual en cada celda del mallado, permitiendo obtener una mayor precisión de las variaciones que se generaban por las sombras de edificaciones vecinas u otro elemento del entorno.

Como se observa en la Figura 13, el mallado del relieve del campus permitió segmentar las superficies de las cubiertas para un análisis preciso de la radiación solar incidente.

Figura 13

Mallado del relieve del campus ESPOL Gustavo Galindo.



2.3.3 Desarrollo del gemelo digital LOD1

En esta etapa, se llevó a cabo la integración y automatización de los datos geográficos en el entorno paramétrico, permitiendo obtener una coherencia marcada entre el modelo analítico y la precisión en el cálculo de la radiación solar. La correcta estructuración de esta información permitió establecer una base geométrica consistente para el desarrollo del gemelo digital a nivel LOD1.

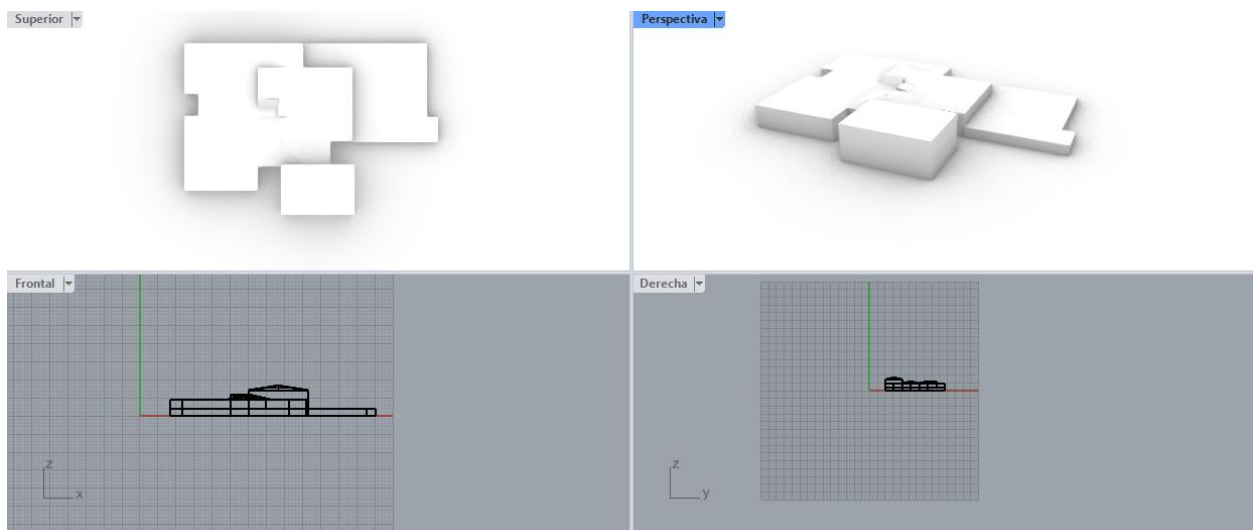
Para llevar a cabo este proceso, se incorporó el modelo digital de elevación, para representar adecuadamente la topografía del área de estudio. El uso de la topografía resultó esencial para simular el sombreado distante generado por la vegetación del entorno, que tiene una influencia (dependiendo de los casos suele ser más o menos significativo) en la disponibilidad del recurso solar por las sombras producidas. Basándonos, en diversos estudios que han demostrado que omitir la topografía en los análisis de captación solar puede llevar a una sobreestimación del potencial fotovoltaicos (Choi, et al., 2019).

Este fenómeno tiene un peso considerable en los periodos del ocaso, en nuestro estudio tenemos un pequeño rango de tiempo en el que se presenta este efecto, que produce que el sombreado proyectado por la topografía y distintos elementos se vuelva más extenso y persistente, afectando directamente la irradiancia recibida en las superficies de captación. Según Šúri et al., (2010), la consideración explícita del sombreado topográfico es fundamental para obtener estimaciones realistas del potencial fotovoltaico, en cualquier escala.

La integración de la topografía y los datos geográficos permitió estructurar un gemelo digital coherente a nivel LOD1 (Figura 14), garantizando una estimación más precisa de la radiación solar sobre las cubiertas.

Figura 14

Desarrollo del modelo gemelo digital de los edificios.



2.4. Creación de los bloques de funciones en Grasshopper y ejecución de simulaciones en Ladybug Tools

Para la automatización del proceso de modelado, Grasshopper fue la herramienta principal, debido a la capacidad para realizar iteraciones de forma eficiente dentro del entorno de diseño. A partir de esto, se desarrollaron los bloques de funciones, a partir de los parámetros establecidos, que permitieron sistematizar el proceso.

Los bloques funcionales, agilizaron el proceso de trazabilidad, permitiendo realizar modificaciones sobre la marcha en la geometría y los parámetros de análisis, logrando resultados óptimos que permitan garantizar la replicabilidad del modelo ante distintos escenarios. El uso de estos bloques de funciones mejora la eficiencia y coherencia de los resultados obtenidos en aplicaciones diseño urbano y energético (Ávila et al., 2016; Roudsari & Pak, 2013).

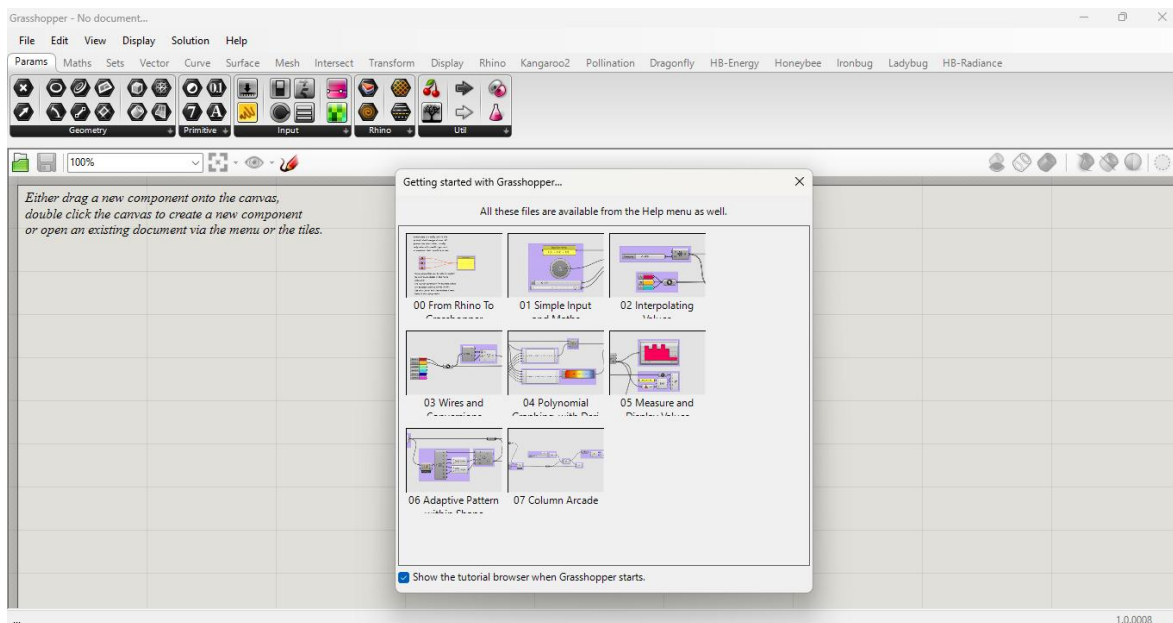
Culminado el proceso de preparación geométrica y el mallado del modelo, se procedió a la transferencia del modelo tridimensional y de la malla de análisis enfocado al entorno de simulación mediante el plugin Honeybee, perteneciente a la herramienta Ladybug Tools. En esta etapa, Honeybee tuvo su rol como el enlace entre el modelo geométrico generado en Grasshopper y los procesos de simulación ambiental y energética, permitiendo que el modelo sea apto para la ejecución de las tareas posteriores.

Durante este proceso, se asignaron los parámetros necesarios para el cálculo, tales como condiciones de uso, topografía y vínculos con los datos climáticos correspondientes al área de estudio. Este proceso, aseguró que las simulaciones y cálculos realizados dentro de estos programas sean coherentes y validados, lo que permite fortalecer la consistencia metodológica del análisis (Touloupaki & Theodosiou, 2017).

La automatización del proceso de modelado se realizó mediante bloques de funciones en Grasshopper, que facilitaron iteraciones eficientes y la trazabilidad de cambios en los parámetros geométricos y energéticos (Figura 15).

Figura 15

Interfaz del software Grasshopper.



2.5. Configuración del Análisis

2.5.1 Análisis del recurso solar en el sistema Radiance

Con ayuda del sistema Radiance, se logró estimar el potencial fotovoltaico del área de estudio a partir de un análisis detallado de la radiación solar, el cual se basa de técnicas raytracing para el cálculo estimativo de la interacción entre la radiación solar y la geometría del entorno. Para conseguir esos resultados, se incorporaron archivos TMY, correspondientes al año meteorológico típico en formato EPW que es compatible con el sistema, los cuáles ayudaron con la información de las condiciones climáticas locales, incluyendo radiación solar, temperatura y nubosidad. El uso de estos archivos permitió asegurar que los cálculos se fundamentarán en un año climáticamente representativo, evitando sesgos asociados a condiciones extremas o atípicas (Wilcox & Marion, 2008).

El uso de esta técnica permitió determinar la radiación solar total incidente sobre las celdas que conformaron la malla de análisis de las cubiertas. Este cálculo consideró de manera explícita la radiación directa, difusa y reflejada, así como los efectos de sombreado generados tanto por edificaciones vecinas como por el relieve del entorno (Amillo et al., 2014; Perez, et al., 2010).

2.5.2 Análisis de carga térmica y control pasivo por medio de EnergyPlus

Para complementar el análisis del recurso solar, se tuvo que realizar la simulación térmica del edificio utilizando EnergyPlus, ampliamente reconocido y validado para el estudio del comportamiento energético de edificaciones (U.S. Department of Energy, 2016). Con el modelo analítico ya definido, se procedió con el cálculo de las cargas térmicas de enfriamiento asociadas a la transferencia de calor a través de la envolvente del edificio, considerando las condiciones climáticas locales según las especificaciones geométricas constructivas del modelo.

Para esta aplicación, se evaluó la instalación de los paneles fotovoltaicos sobre la cubierta como una estrategia de control térmico pasivo, al actuar como elementos de sombreado que reducen la radiación solar incidente sobre la superficie del techo. Estudios sugieren desarrollar escenarios diferentes para verificar en términos cuantitativos la variación de las cargas térmicas atribuibles a la presencia de los paneles, como una estrategia para la ganancia térmica por radiación solar (Bojanoski et al., 2013; Mourshed, 2016). Por ello se construyeron dos escenarios de simulación: una base con cubierta típica, y otra alternativa que tiene la cubierta parcialmente expuesta al sol.

En consecuencia, la diferencia observada entre ambos escenarios con respecto las cargas térmicas, se consideraron como la reducción neta de la demanda de enfriamiento asociada al efecto de sombreado generado por los paneles fotovoltaicos.

2.5.3 *Análisis de radiación solar con Grasshopper*

El análisis de la radiación solar se llevó a cabo mediante el entorno paramétrico Grasshopper, apoyado en plugins especializados para simulación ambiental. De acuerdo con Fondoso et al. (2021), este tipo de plataformas no se limita a un único modelo físico, sino que integra distintos modelos y algoritmos numéricos para realizar la evaluación del sistema con los medios que actúan en ella. En este contexto, leyes fundamentales de la física, como la de Stefan-Boltzmann, forman parte del marco teórico general de la transferencia de calor por radiación.

En la práctica, Grasshopper, a través de sus extensiones como Ladybug y Honeybee, permite automatizar el cálculo de variables clave asociadas al desempeño solar y lumínico de los edificios, tales como la cantidad de horas de exposición solar, la distribución de la radiación incidente y los efectos de sombreado producidos por elementos del entorno.

Las fórmulas utilizadas por el software de Ladybug son las de irradiancia global sobre un plano inclinado estandarizadas del modelo de Pérez, y son las siguientes:

$$I_{tilted} = DNI \cdot \cos(\theta) + DHI \cdot f_{(Perez)(\theta_z, \beta)} + GHI \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \quad (2.1)$$

Donde el primer factor de radiación directa sobre el plano está dado por:

DNI: Irradiancia directa normal

θ : Ángulo de incidencia del sol sobre el plano inclinado

El segundo factor de radiación difusa está dado por:

DHI : Irradiancia difusa horizontal

θ_z : Ángulo cenital solar

β : Inclinación del plano

$F1$: Componente circumsolar

$F2$: Componente de brillo del Horizonte

El tercer factor de radiación reflejada por el suelo está dado por:

GHI : Irradiancia global horizontal

ρ : Albedo del suelo

Todos estos valores Ladybug los toma del archivo EPW utilizado, a excepción del albedo del suelo más conocido como reflectancia del suelo, al que le asigna un valor por defecto de 0.2 que concuerda totalmente con nuestro estudio.

2.6. Proceso de diseño fotovoltaico

El proceso de evaluación de la viabilidad del proyecto se ejecutó a través de un flujo de trabajo secuencial y validado, utilizando una cadena de softwares especializados, que integró el modelado paramétrico con la simulación energética, para conocer la viabilidad del proyecto aplicado a la vida real.

El proceso se inició a partir de un modelo CAD básico que proporcionó la geometría inicial de las edificaciones a ser estudiadas. Este modelo se cargó en el entorno Rhino 3D, para posteriormente realizar la extrusión de los edificios. La etapa en Rhino 3D tuvo como propósito la georreferenciación del terreno, asegurando que el modelo estuviese correctamente ubicado en el contexto geográfico real.

Como se puede evidenciar en la Figura 16, se realiza la georreferenciación mediante un punto en el plano de Rhino 3D, lo cual permite ubicar correctamente la cúpula de la trayectoria solar y determinar la orientación necesaria para un análisis preciso de radiación. Los resultados preliminares del cálculo de radiación sobre la facultad de FCV se presentan en la Figura 17, comprobando que la georreferenciación se realizó correctamente y que los valores obtenidos son consistentes con el rango esperado en el estudio.

Figura 16

Modelado preliminar georreferenciado para el cálculo de radiación.

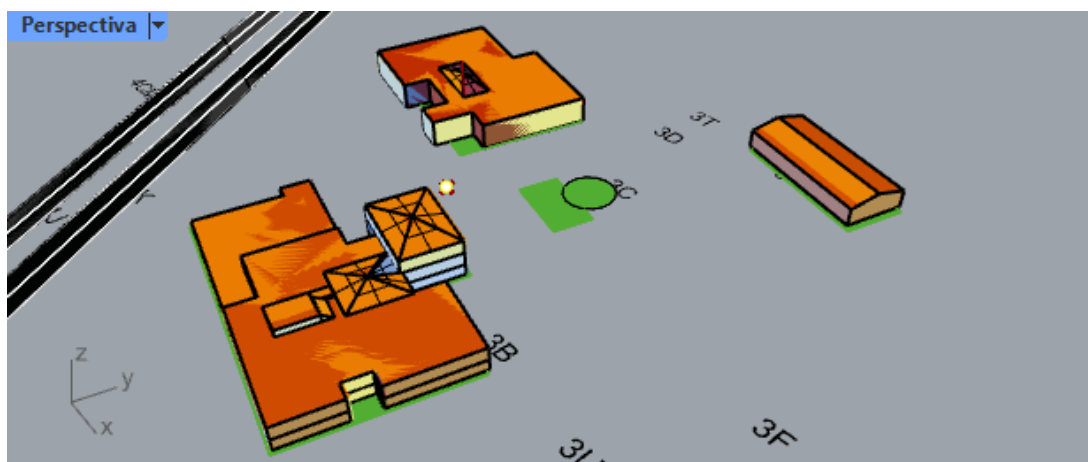
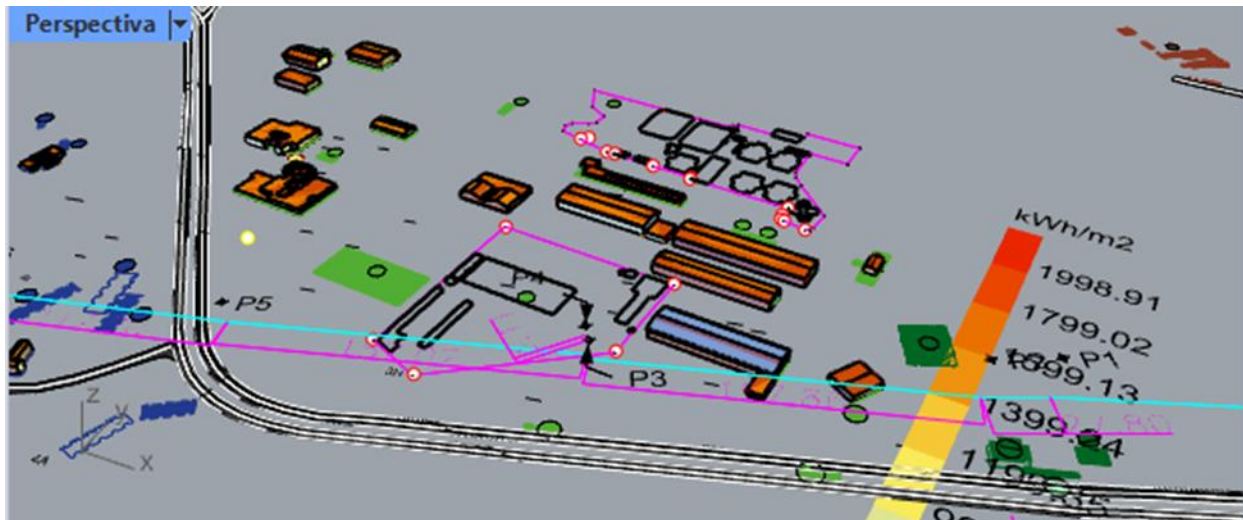


Figura 17

Modelo preliminar con resultados de radiación incidente en el área de FCV



Como se puede evidenciar en la Figura 16 se realiza la geo referencia mediante un punto en el plano de Rhino 3D para ubicar la cúpula de la trayectoria del sol sobre todo el plano, es muy importante esta parte del proceso ya que nos entrega también la orientación de la trayectoria la cual es fundamental para un análisis preciso en cuanto a radiaciones.

En la Figura 17 se muestra el cálculo preliminar de radiación sobre la facultad de FCV para comprobar que el punto de geo referencia ha sido definido correctamente y entrega valores coherentes al rango que se espera en el presente estudio.

2.7. Automatización y preanálisis solar

Una vez definida la geometría, se utilizó el software Grasshopper. En esta fase, se emplearon los bloques de función previamente creados para el cálculo de la radiación incidente, lo que automatizó la preparación de las superficies de análisis. Grasshopper se conectó con el plugin Ladybug Honeybee, que sirvió como interfaz para conectar los datos climáticos.

limitaciones de irradiación que motivaron dicha decisión. En contraste, para los casos favorables, el modelo geométrico del rectorado en Rhino 3D se utilizó para integrar las especificaciones técnicas de paneles e inversores del sistema juntamente con Honeybee Radiance. Este procedimiento permitió obtener una estimación de la energía neta en condiciones reales de operación, empleando una metodología de predicción de rendimiento a largo plazo sustentada con estudios previos (Mondol et al., 2007).

Capitulo 3

3.1. Resultados y Análisis

3.1.1 Resultados del Modelado 3D y Validación de la Geometría

Los resultados presentados corresponden a simulaciones realizadas con el gemelo digital LOD1 del área de estudio, desarrollado con información geográfica, climática y geométrica integrada representativa del entorno analizado (ver Figura 19).

El modelo se evaluó durante un año completo para capturar la variabilidad estacional del recurso solar y su influencia en la generación fotovoltaica.

Con respecto al análisis solar y energético se emplearon datos climáticos, correspondientes a un año meteorológico típico (TMY), lo que permitió garantizar que los resultados obtenidos fueran representativos de las condiciones climáticas promedio del sitio. Las simulaciones se realizaron bajo condiciones estacionarias para el análisis del recurso solar y bajo condiciones dinámicas para la evaluación térmica, manteniendo relación con los objetivos planteados.

En esta etapa se evaluaron principalmente dos componentes:

1. La disponibilidad y distribución espacial del recurso solar sobre las cubiertas de las edificaciones.
2. Impacto de la integración de paneles fotovoltaicos tanto en términos de generación energética como de reducción de las cargas térmicas del edificio.

Figura 19

Vista de perspectiva del entorno de análisis (Campus de la ESPOL).



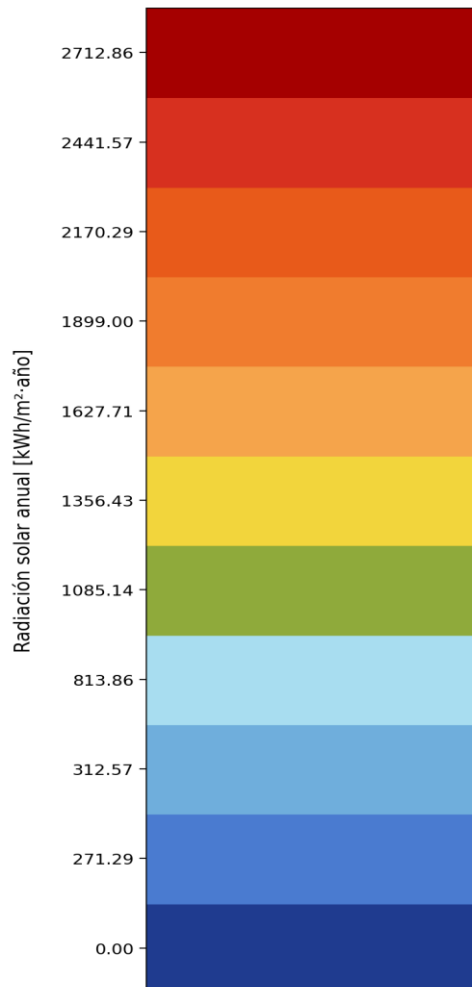
3.2 Análisis de disponibilidad de superficie

En esta sección se presentan los hallazgos obtenidos tras la simulación del recurso solar en el campus. Durante la evaluación preliminar, se observó que los valores promedio de radiación incidente no presentaban variaciones significativas entre las edificaciones, debido a que todas comparten la misma ubicación geográfica y condiciones climáticas. Por lo tanto, el uso de un valor numérico promedio resultó insuficiente como único criterio para discriminar la viabilidad de los edificios.

En consecuencia, el análisis se reorientó hacia el área de distribución de la irradiación sobre las cubiertas. Este enfoque priorizó la inspección visual de los mapas de radiación para identificar la superficie útil real, diferenciando las zonas de ganancia solar según la escala adjunta en la Figura 20, utilizando un valor promedio según el color marcado en cada superficie.

Figura 20

Escala de irradiación promedio en las superficies de análisis (Campus de la ESPOL).



A partir de estos patrones de sombreado, se realizó un filtrado detallado para descartar aquellas áreas donde la fragmentación de la superficie o la presencia de sombras críticas comprometían la instalación. A continuación, se detalla la evaluación de las cubiertas de aproximadamente 132 edificaciones, entre los cuales encontramos edificios de las facultades, administrativos, residencias, coliseos, bodegas, etc, para determinar su radiación incidente promedio y la viabilidad en la instalación de paneles fotovoltaicos.

Para el análisis del potencial energético en el campus de la ESPOL, se juntaron los datos de cada edificación, incluyendo su nomenclatura o nombre del edificio, la representación

de su modelo 3D en el mapa realizado, su potencial de radiación incidente promedio anual, obtenido de las simulaciones. Esta información se encuentra detallada en la Tabla 1:

Tabla 1

Segmentación de edificios del campus de la ESPOL

Nomenclatura	Descripción	Radiación incidente promedio [kWh/m²*año]	Área neta de potencial fotovoltaico [m²]
3A	FCV & CIDIS	1374.36	1192.4
3B	CENTROS FCV & TRANSESPOL	1374.36	877.40
3C	SEBIOCA	1374.36	433.90
3D	LABORATORIO	1374.36	60.55
3E	LABORATORIO	312.57	N/A
3F	BODEGAS	1374.36	888.82

3G	BabyESPOL & COMEDOR	1374.36	869.67
3I	TALLER DE MANTENIMIENTO	1374.36	878.41
3J	CONDUESPOL	1374.36	166.31
3K	CIBE	1374.36	948.40
3L	TALLER DE FUNDICIÓN	1374.36	53.55
3M	TALLER DE MAQUINARIAS Y HERRAMIENTAS	1374.36	130.88
3N	ESTACIÓN DE BICICLETAS Y CICLOVIA	813.86	N/A
3O	INVERNADERO	1374.36	762.52
3R	EDIFICIO 3R	271.29	N/A

4A	RESIDENCIA UNIVERSITARIA	312.57	N/A
4B	SUITES PROFESORES EXTRANJEROS	1374.36	520.78
4C	SUITES PROFESORES EXTRANJEROS	1374.36	323.17
4CG	VIVIENDA GUARDIA	1374.36	156.51
4D	BODEGA Y ARCHIVOS	1374.36	1194.16
4E	GALPÓN CHEERLEADERS	1374.36	625.08
4F	BAR DE CANCHAS	1374.36	424.24
4G	GRADAS Y CAMERINOS	1374.36	455.96
4H	VESTIDORES & BAÑOS	1374.36	273.90
4I	VESTIDORES PROFESORES	1374.36	56.70

4J	COMEDOR	813.86	N/A
4K	GIMNASIO	1374.36	86.85
4L	SALÓN DE RECREACIÓN	1374.36	175.93
4M	BODEGA	1374.36	251.31
4N	VESTIDORES	1374.36	170.00
4O	GALPONES	1374.36	280.99
4P	BODEGA	1374.36	282.27
4Q	OFICINA BOSQUE PROTECTOR	1374.36	82.28
4R	OFICINA SISTEMAS	1374.36	70.33
4S	PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA	1374.36	162.02
4T	COMEDOR	1374.36	94.74

5A	EDIFICIO PRINCIPAL FIMCM	1374.36	347.85
5B	SALA DE PROFESORES	1374.36	237.25
5C	LABORATORIOS	1627.71	114.70
5D	OCEANOGRAFÍA DIGITAL INAMHI	1627.71	98.97
5E	OFICINAS Y LABORATORIOS	1374.36	108.86
5F	LABORATORIO DE BIOMEDICINA	1627.71	412.74
5G	LABORATORIO/CSA	1627.71	317.90
5H	LABORATORIO DE INGENIERIA NAVAL	1374.36	326.80
5I	LABORATORIO ALPHA Y BETA	1374.36	43.53
5J	COMEDOR DE FIMCM	1374.36	140.10
5K	BLOQUE DE AULAS	1627.71	368.75
5N	EDIFICIO 5N	1374.36	116.81
5O	LABORATORIO EXPERIMENTAL	1374.36	74.56
5P	LABORATORIO	1374.36	57.81
6A	RECTORADO	1627.71	2276.65

	EDIFICIO ADMINISTRATIVO		
6B	FINANCIERO	1627.71	638.04
6C	COMEDOR	1627.71	64.84
6E	ESTACIÓN DE BICICLETAS	1627.71	66.05
7A	BIBLIOTECA	1374.36	180.31
7B	CENTRO CULTURAL	1374.36	1101.48
7C	ASOCIACIÓN DE PROFESORES	1374.36	95.06
8A	EDIFICIO FCSH	1627.71	126.41
8B	AULAS	1627.71	92.56
8C	OFICINAS DE PROFESORES	1627.71	552.79
8D	COMEDOR CELEX	1627.71	104.07
8F	AULAS CELEX	1374.36	271,46
8G	AULAS CELEX	1627.71	413.49

8H	AULAS CELEX	1627.71	422.82
8I	AULAS CELEX	1374.36	154.81
9A	EDIFICIO PRINCIPAL FCNM	1374.36	400.62
9B	AULAS Y LABORATORIOS	1374.36	701.54
9C	AULAS Y LABORATORIO	1374.36	75.01
9D	COMEDOR	1374.36	97.22
9E	AUDITORIUM	1374.36	81.28
9F	AULAS	813.86	N/A
9G	LAB. DE FÍSICA	1374.36	1151.24
9H	LAB. DE QUÍMICA	312.57	N/A
9I	AULAS	1374.36	805.15

9K	OFICINA DE DOCENTES	1374.36	411.14
9L	OFICINA DE DOCENTES	1374.36	480.05
9M	AULAS CICLO BÁSICO	1374.36	1109.49
10A	UNIDAD DE BIENESTAR ESTUDIANTIL POLITÉCNICO	1627.71	744.88
10AD2	GIMANSIO DE PROFESORES	1627.71	573.98
10AD3	COLISEO	1374.36	2347.20
10AD4	COLISEO VIEJO	1374.36	1401.60
10B	TALLER DE PRODUCCIÓN	1374.36	1104.77
10C	BAÑOS Y VESTIDORES	1627.71	53.39
11A	EDIFICIO PRINICPAL FIEC	1627.71	2605.06
11B	LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN	1374.36	1134.21

11C	LABORATORIOS VARIOS	1627.71	3060.38
11D	AULAS Y LAB. DE PROYECTOS ELÉCTRICOS	1627.71	1471.27
11E	CENTRO DE ESTUDIANTES	1374.36	202.26
11F	CLUBES ESTUDIANTILES Y CISCO	312.57	N/A
11G	CAFETERÍA	1374.36	23.46
12A	EDIFICIO PRINCIPAL FIMCP	1627.71	844.95
12B	ASOCIACIÓN DE ESTUDIANTES	271.29	N/A
12C	AULAS	1627.71	403.80
12D	COMEDOR	1627.71	167.19
12E	LEMAT	1374.36	88.05
12F	EDIFICO 12F	1374.36	147.25

12G	LABORATORIO Y BIBLIOTECA	1374.36	473.22
<hr/>			
12H	AUDITORIO Y AULAS	1374.36	669.96
<hr/>			
12I	ROBOTA	1374.36	265.06
<hr/>			
12J	LAB. DE HIDRÁULICA	1374.36	579.25
<hr/>			
12K	EDIFICIO 12K	1374.36	417.33
<hr/>			
12L	STEM	1374.36	1362.10
<hr/>			
12M	PARQUE AJÁ	312.57	N/A
<hr/>			
12N	PARQUE AJÁ	1374.36	532.23
<hr/>			
12O	ESTACIÓN DE BUSES	1374.36	155.76
<hr/>			
13A	EDIFICIO PRINCIPAL FICT	1374.36	689.60
<hr/>			

13B	LAB. DE MINERALURGIA & BAR	1374.36	330.55
13C	CLUB DE ARQUEOLOGIA	1374.36	524.51
13D	LABORATORIO DE SANITARIAS	1627.71	539.01
13E	LAB. DE GEOTECNIA	1374.36	403.13
13F	LABORATORIO	1374.36	581.51
13G	BIBLIOTECA FICT	1374.36	393.82
13H	AULA SATELITAL	1374.36	996.32
13I	FEPOL	1374.36	399.94
13J	SINDICATO DE PROFESORES	1627.71	104.99
13K	GTSI	1374.36	634.14
13L	I3LAB & BANCO DE PACÍFICO	1627.71	446.38

13M	COMEDOR	1627.71	1556.95
13N	CEMA	1374.36	285.02
13O	EDIFICIO 13O	1374.36	225.72
14A	EDIFICIO PRINCIPAL FADCOM	1374.36	848.72
14B	AULAS & TALLERES	1627.71	2030.28
14C	COMEDOR	1627.74	398.39

Los valores de radiación incidente promedio, en sus unidades [kWh/m² *año], forman parte de la base cuantitativa del estudio realizado. Para determinar la viabilidad, aplicamos un factor de conversión, que transforma la radiación promedio en un porcentaje de energía promedio aprovechable. Siguiendo con lo mencionado, para el factor común de radiación en la mayor parte de las edificaciones con un valor de 1374,36 [kWh/m² *año] se transformó a un 60% de aprovechamiento energético.

Este porcentaje nos permitió normalizar el área de las superficies, para obtener el área neta de potencial fotovoltaico. El valor transformado se ajusta proporcionalmente a la incidencia solar registrada, con edificaciones que superan el valor previamente mencionado que alcanzan un tope de 80% de aprovechamiento, mientras que las que presentan valores menores (como los 312,57 o 271,29 [kWh/m² *año]), se categorizaron como N/A (No Apto), debido a que su potencial promedio anual es muy despreciable. El área neta resultante no implica un valor de referencia por ocupación de paneles solares, sino que es un valor

representativo de la superficie optimizada de la edificación que es capaz de procesar el recurso solar disponible, bajo las condiciones climáticas y arquitectónicas en las que se encuentra.

Dentro de esta segmentación, encontramos una variabilidad significativa dependiendo de la morfología en la que se encuentra cada edificio. Existen edificios que presentan una alta capacidad de energía aprovechable, siendo el coliseo nuevo, el edificio con mayor área neta con un valor de 2347.20 [m²], seguido del edificio 3A con un valor de 1192.40 [m²]. Estas estructuras poseen esta característica debido a sus grandes superficies de cubierta, lo que les permite tener una incidencia solar prácticamente constante durante todo el año. A su vez, encontramos edificios como el 10A (Gimnasio) y el 11A (Edificio Principal de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación) que, a pesar de no contar con un área muy grande, presentan una radiación incidente mayor al promedio con un valor de 1627.71 [kWh/m² *año]. Esto se debe principalmente a su ubicación geográfica, permitiendo que sus cubiertas tengan un contacto de radiación directa por no tener edificaciones o vegetación muy cercano a su alrededor, Estos edificios forman parte de aquellos que poseen un factor de aprovechamiento mayor con un valor del 80%, lo que permite maximizar la utilidad de cada metro cuadrado de esa superficie.

La transformación de la radiación incidente en un área neta de potencial nos permite identificar con precisión las estructuras del campus que poseen las cualidades necesarias para formar parte de la transición hacia modelos de captación energética sostenible, ya que poseen una infraestructura y ubicación privilegiada, que permite aprovechar al máximo la disponibilidad del recurso solar para luego ser transformada en energía eléctrica.

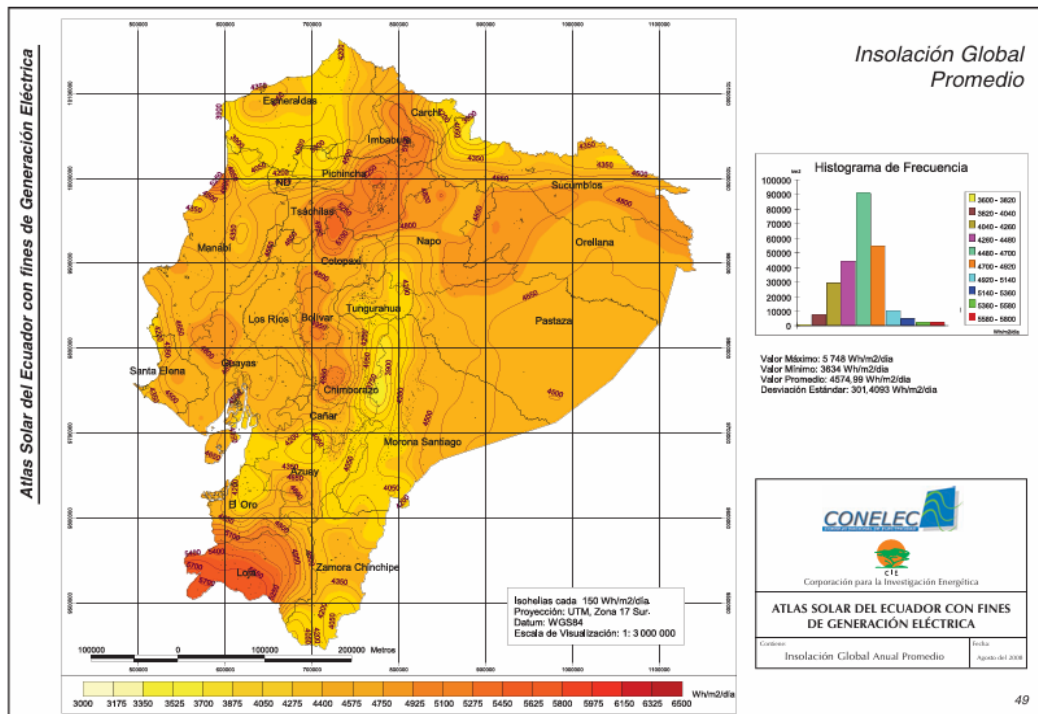
3.3 Comparación con valores reales de potencial solar en Ecuador

La validación de los datos de radiación obtenidos mediante la simulación en los softwares, frente a los valores de referencia del Atlas Solar del Ecuador con fines de generación

eléctrica, es un paso clave para garantizar la precisión del diseño fotovoltaico propuesto (ver Figura 21 y Tabla 2).

Figura 21

Insolación Global en el Atlas solar del Ecuador con fines de generación eléctrica.



Rango de acuerdo con la ubicación geográfica de la ESPOL: 4500 – 4650 Wh/m²*día

4500-4650 ---> 1643-1697

Tabla 2

Comparación con valores reales del Atlas Solar del Ecuador con fines de generación eléctrica.

Nomenclatura	Radiación incidente promedio [kWh/m ² *año]	Valor real a comparar [kWh/m ² *año]
--------------	--	---

3A	1374.36	1643 - 1697
3B	1374.36	1643 - 1697
3C	1374.36	1643 - 1697
3D	1374.36	1643 - 1697
3E	312.57	1643 - 1697
3F	1374.36	1643 - 1697
3G	1374.36	1643 - 1697
3I	1374.36	1643 - 1697
3J	1374.36	1643 - 1697
3K	1374.36	1643 - 1697

3L	1374.36	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

3M	1374.36	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

3N	813.86	1643 - 1697
-----------	--------	-------------

3O	1374.36	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

3R	271.29	1643 - 1697
-----------	--------	-------------

4A	312.57	1643 - 1697
-----------	--------	-------------

4B	1374.36	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

4C	1374.36	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

4CG	1374.36	1643 - 1697
------------	---------	-------------

4D	1374.36	1643 - 1697
4E	1374.36	1643 - 1697
4F	1374.36	1643 - 1697
4G	1374.36	1643 - 1697
4H	1374.36	1643 - 1697
4I	1374.36	1643 - 1697
4J	813.86	1643 - 1697
4K	1374.36	1643 - 1697
4L	1374.36	1643 - 1697

4M	1374.36	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

4N	1374.36	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

4P	1374	1643 - 1697
-----------	------	-------------

5A	1374.36	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

5B	1374.36	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

5C	1627.71	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

5D	1627.71	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

5E	1374.36	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

5F	1627.71	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

5G	1627.71	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

5H	1374.36	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

5I	1374.36	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

5J	1374.36	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

5K	1627.71	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

5N	1374.36	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

5O	1374.36	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

5P	1374.36	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

6A	1627.71	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

6B	1627.71	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

6C	1627.71	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

6E	1627.71	1643 - 1697
-----------	---------	-------------

7A	1374.36	1643 - 1697
7B	1374.36	1643 - 1697
7C	1374.36	1643 - 1697
8A	1627.71	1643 - 1697
8B	1627.71	1643 - 1697
8C	1627.71	1643 - 1697
8D	1627.71	1643 - 1697
8F	1374.36	1643 - 1697
8G	1627.71	1643 - 1697
8H	1627.71	1643 - 1697

8I	1374.36	1643 - 1697
9A	1374.36	1643 - 1697
9B	1374.36	1643 - 1697
9C	1374.36	1643 - 1697
9D	1374.36	1643 - 1697
9E	1374.36	1643 - 1697
9F	813.86	1643 - 1697
9G	1374.36	1643 - 1697
9H	312.57	1643 - 1697

9I	1374.36	1643 - 1697
9K	1374.36	1643 - 1697
9L	1374.36	1643 - 1697
9M	1374.36	1643 - 1697
10A (GIMNASIO)	1627.71	1643 - 1697
10AD2 (UBP)	1627.71	1643 - 1697
10AD3 (COLISEO NUEVO)	1374.36	1643 - 1697
10AD4 (COLISEO VIEJO)	1374.36	1643 - 1697
10B (LAB. PLÁSTICOS)	1374.36	1643 - 1697
10C (BODEGA)	1627.71	1643 - 1697

11A	1627.71	1643 - 1697
------------	---------	-------------

11B	1374.36	1643 - 1697
------------	---------	-------------

11C	1627.71	1643 - 1697
------------	---------	-------------

11D	1627.71	1643 - 1697
------------	---------	-------------

11E	1374.36	1643 - 1697
------------	---------	-------------

11F	312.57	1643 - 1697
------------	--------	-------------

11G	1374.36	1643 - 1697
------------	---------	-------------

12A	1627.71	1643 - 1697
------------	---------	-------------

12B	271.29	1643 - 1697
------------	--------	-------------

12C	1627.71	1643 - 1697
------------	---------	-------------

12D	1627.71	1643 - 1697
12E	1374.36	1643 - 1697
12F	1374.36	1643 - 1697
12G	1374.36	1643 - 1697
12H	1374.36	1643 - 1697
12I	1374.36	1643 - 1697
12J	1374.36	1643 - 1697
12K	1374.36	1643 - 1697
12L	1374.36	1643 - 1697

12M	312.57	1643 - 1697
------------	--------	-------------

12N	1374.36	1643 - 1697
------------	---------	-------------

12O	1374.36	1643 - 1697
------------	---------	-------------

13A	1374.36	1643 - 1697
------------	---------	-------------

13B	1374.36	1643 - 1697
------------	---------	-------------

13C	1374.36	1643 - 1697
------------	---------	-------------

13D	1627.71	1643 - 1697
------------	---------	-------------

13E	1374.36	1643 - 1697
------------	---------	-------------

13F	1374.36	1643 - 1697
------------	---------	-------------

13G	1374.36	1643 - 1697
------------	---------	-------------

13H	1374.36	1643 - 1697
------------	---------	-------------

13I	1374.36	1643 - 1697
------------	---------	-------------

13J	1627.71	1643 - 1697
------------	---------	-------------

13K	1374.36	1643 - 1697
------------	---------	-------------

13L	1627.71	1643 - 1697
------------	---------	-------------

13M	1627.71	1643 - 1697
------------	---------	-------------

13N	1374.36	1643 - 1697
------------	---------	-------------

13O	1374.36	1643 - 1697
------------	---------	-------------

14A	1374.36	1643 - 1697
------------	---------	-------------

14B	1627.71	1643 - 1697
14C	1627.74	1643 - 1697

La validación de los datos de radiación obtenidos mediante la simulación en los softwares, frente a los valores de referencia del Atlas Solar del Ecuador con fines de generación eléctrica es un paso clave para garantizar la precisión del diseño fotovoltaico propuesto. Al observar los datos en la Tabla 2, se evidencia una correlación coherente entre los resultados simulados y el rango de valor real de comparación (1643 - 1697 kWh/m²año). En la gran mayoría de los edificios analizados, como los bloques 3A al 3D, 4B al 4I y gran parte de la serie 13 y 14, se observa una radiación incidente promedio de 1374.36 kWh/m²año. Si bien este valor se sitúa un poco por debajo del rango óptimo del Atlas Solar, cabe mencionar que esta desviación no representa un error de cálculo, sino que valida la precisión del modelo tridimensional.

La simulación incorpora variables del mundo real que los atlas generales omiten por su carácter macro-climático, tales como la auto-sombra generada por la geometría de los techos, el sombreado arrojado por edificios cercanos de mayor altura y, fundamentalmente, la interferencia de la densa vegetación característica del campus Gustavo Galindo. Esta ligera reducción en la radiación incidente respecto al valor teórico es una representación fiable de la energía neta disponible en superficie, permitiendo que el dimensionamiento posterior se realice sobre bases muy cercanas a la realidad, evitando la sobreestimación del potencial energético y asegurando proyecciones financieras mucho más robustas para la institución.

La viabilidad técnica del proyecto se confirma de manera contundente para la mayor parte de infraestructuras evaluadas en el campus. Los edificios identificados con valores de 1627.71 kWh/m²año, entre los que destacan el Gimnasio (10A), edificios de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (11A, 11C, 11D) y diversos bloques de la serie 5, 6 y 8, muestran una eficiencia notable en la captación de recurso solar, aproximándose de manera notable al límite mínimo del rango del Atlas Solar mencionado. Estos edificios se presentan con las condiciones óptimas para la instalación de sistemas fotovoltaicos, debido a la exposición a la radiación. En estos casos específicos, el potencial de aprovechamiento energético superará significativamente las estimaciones iniciales, traducándose en una reducción drástica del período de retorno de la inversión y una contribución sustancial al ahorro operativo. La consistencia de estos valores por encima de los 1300 kWh/m²año en más del 80% de los puntos analizados permite afirmar que la propuesta de implementación fotovoltaica a gran escala en el campus no solo es posible, sino altamente recomendable desde una perspectiva de sostenibilidad energética.

La comparativa presentada, se presenta como una herramienta que permite tomar decisiones que separa el potencial teórico del aprovechamiento real del entorno analizado. La mayoría del campus presenta una oportunidad extraordinaria para la transición hacia energías renovables, con niveles de radiación que, aun con el impacto del sombreado simulado, garantizan un rendimiento energético saludable y predecible. La validación del modelo frente al Atlas Solar otorga al estudio un rigor técnico superior, demostrando que se ha considerado la complejidad física del entorno real. La viabilidad del proyecto queda así plenamente justificada para la infraestructura de la ESPOL, recomendando la ejecución prioritaria en los sectores que superan los 1300 kWh/m²*año, donde el aprovechamiento del recurso y el ahorro económico directo presentan sus mejores indicadores. Este estudio no solo cuantifica el recurso

solar disponible, sino que protege la inversión en el proyecto presentado, permitiendo optimizar los recursos hacia un futuro encaminado en la sostenibilidad energética del campus.

3.4 Metodología para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos en tejados de edificaciones

Para lograr obtener un valor aproximado de paneles necesarios en el campus, que permita aprovechar la capacidad de irradiación que presenta, seguimos el siguiente flujo presentado:

Realizamos la suma total de áreas neta de todos los edificios que cumplieron con la capacidad mínima aprovechable ($1374.36 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$), para obtener el área neta del campus.

La suma del área neta de todos los edificios del campus nos otorgó un valor de 60774.51 m^2 , para el cual solo utilizamos el 30% de su capacidad debido a que se considera un aproximado de 70% de pérdidas en superficies por distintos factores como sombras, componentes instalados e incluso la facilidad de instalación de los módulos en dichas áreas.

Utilizamos el 30% de capacidad de todas las cubiertas del campus obteniendo un resultado de 18232.35 m^2 permitiéndonos conocer la cantidad de módulos fotovoltaicos necesarios, siendo 8206 la cantidad óptima para cubrir la necesidad del campus.

Como resultado del proceso de selección por medio de simulación en Rhino 3D y los bloques de funciones de Grasshopper, se adoptó un módulo fotovoltaico comercial con dimensiones de $2.112 \text{ m} \times 1.052 \text{ m}$, equivalente a un área unitaria de 2.22 m^2 , y una potencia nominal de 450 Wp. La elección del panel se realizó con base en la recomendación de un experto en sistemas fotovoltaicos y en la disponibilidad comercial de módulos de alta eficiencia, adecuados para aplicaciones en cubiertas de edificaciones.

Este módulo permitió optimizar la relación entre potencia instalada y área disponible en la terraza del edificio analizado del campus de la ESPOL, facilitando un aprovechamiento eficiente de la superficie útil del tejado.

3.4.1 Modelamiento geométrico y distribución de paneles en cubierta

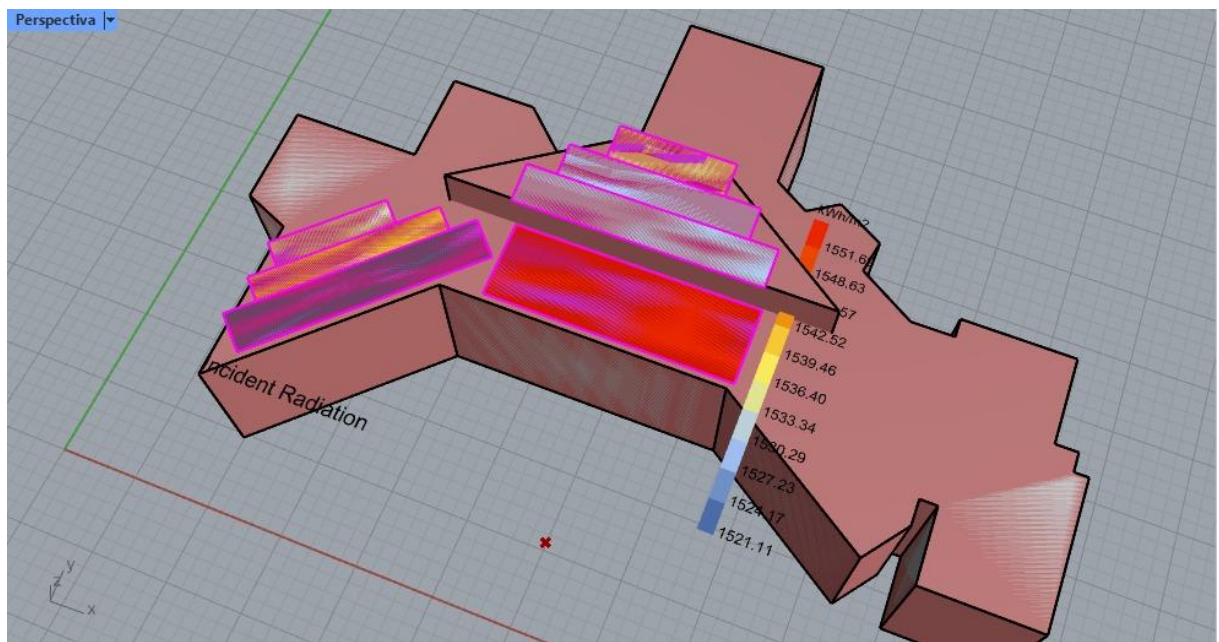
El modelamiento del sistema fotovoltaico se realizó tomando como referencia el Rectorado siendo edificio más representativo del campus de la ESPOL, considerando la configuración real de la superficie. A partir de este análisis, la superficie total disponible se dividió en dos zonas diferenciadas: una zona inferior de 442 m² y una zona superior con geometría triangular de 317 m².

En función de estas áreas y de las dimensiones del módulo fotovoltaico seleccionado, se logró una distribución total de 137 paneles, de los cuales 80 módulos se ubicaron en la zona inferior y 57 módulos en la zona superior. Esta disposición permitió maximizar la ocupación del tejado sin generar interferencias geométricas entre filas de paneles ni afectar la operatividad del edificio.

La Figura 22 muestra la disposición final de los módulos, prácticamente acostados sobre la superficie y la orientación considerada que es de 2° aproximadamente, para el análisis de radiación solar incidente.

Figura 22

Simulación del sistema fotovoltaico en el edificio de rectorado del campus de la ESPOL



3.4.2 Capacidad instalada y selección del inversor

A partir del número total de módulos instalados y de la potencia nominal de cada panel, se determinó la capacidad instalada del sistema fotovoltaico en la terraza del edificio. El cálculo se realizó multiplicando el número total de módulos por la potencia unitaria del panel:

$$(87 + 50) * 450W = 60 kW \quad (3.1)$$

Como resultado, se obtuvo una potencia instalada aproximada de 60 kWp, valor que sirvió como criterio principal para la selección del inversor. En función de este resultado, se seleccionó el inversor on-grid trifásico Solis S5-GC 50–60 kW, el cual cumple con los requisitos de potencia, compatibilidad eléctrica y operación en sistemas conectados a red.

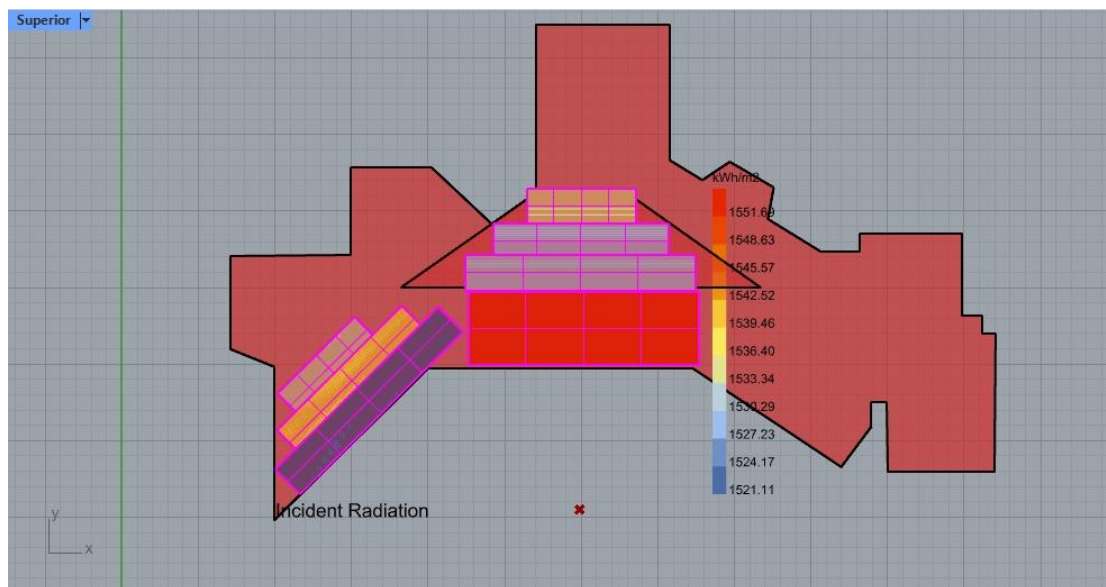
Además, la elección del inversor siguiendo las condiciones de operación garantizó que la potencia DC instalada se encuentre dentro del rango operativo recomendado por el fabricante, permitiendo un funcionamiento seguro y eficiente del sistema.

3.4.3 Resultados de la simulación de la radiación solar

Como parte del análisis energético, se realizó una simulación de radiación solar incidente sobre la superficie de los paneles fotovoltaicos. Los resultados obtenidos indicaron un valor promedio de 1551.69 [kWh/m²·año] sobre la cubierta analizada (ver Figura 23), según la escala de radiación mostrada en la simulación.

Figura 23

Radiación promedio sobre la superficie de los paneles fotovoltaicos en la superficie analizada



Para evaluar la coherencia de este resultado con datos climáticos regionales, dicho valor fue dividido entre 365 días, obteniéndose una irradiación diaria promedio aproximada de 4.3 [kWh/m²·día]. Este resultado se encuentra dentro del rango reportado por el Atlas Solar del Ecuador, el cual indica valores típicos entre 4.3 y 4.8 [kWh/m²·día] para la región analizada.

La concordancia entre los valores simulados y los datos oficiales valida el modelo geométrico y las condiciones de simulación empleadas, respaldando la viabilidad técnica del sistema fotovoltaico propuesto para su implementación en el edificio de la ESPOL.

3.5 Marco Normativo Ecuatoriano Aplicable

El diseño propuesto se alinea con las siguientes normativas:

Regulación ARCONEL 002/21: Establece las condiciones para la Microgeneración Fotovoltaica y el Autoconsumo en Ecuador. Define los límites de potencia para el intercambio de energía con la red eléctrica nacional.

Norma NTE INEN 2652: Relativa a la eficiencia energética y requisitos de los módulos fotovoltaicos.

Código Eléctrico Nacional (CPE INEN 019): Basado en el NEC (National Electrical Code), rige las protecciones, puestas a tierra y calibres de conductores para la seguridad del sistema.

Componente	Requisito Técnico / Norma
Estructuras	Aluminio anodizado con resistencia a vientos de 120 km/h (Costa).
Protecciones	Interruptores termomagnéticos DC y supresores de transientes (SPD).
Medidor	Medidor bidireccional homologado por CNEL (según Reg. 002/21).
Conductores	Cable tipo PV-Wire (resistente a rayos UV y altas temperaturas).

3.6 Modelo lineal de dependencia térmica de la eficiencia fotovoltaica

$$\eta(T) = \eta_{ref} \cdot [1 + \gamma(T_{cell} - T_{ref})] \quad (3.2)$$

Donde:

γ = coeficiente térmico del panel (-0.350%/°C)

$$\eta_{ref} = 0.203 \text{ (para nuestro panel utilizado)}$$

$$T_{cell} = \text{Temperatura del aire (bulbo seco)}$$

$$T_{ref} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

Este es un modelo empírico de primer orden que se ha validado experimentalmente y se usa de forma estándar en simulaciones energéticas, esta misma se basa en un balance energético sobre el módulo fotovoltaico que combina el principio de conservación de la energía mediante la primera ley de la termodinámica y transferencia de calor mediante los cálculos de convección, radiación térmica y conducción.

Algo importante que debemos acotar en este modelo es que originalmente es un sistema de cuarto grado pero que se simplifica al que usamos para modelación urbana y energética resultado de pruebas que validan que en rangos normales de operación el factor de eficiencia n vs la temperatura de la célula T_{cell} se puede aproximar a un sistema lineal de primer orden.

Temperatura máx. EPW ESPOL Campus Prosperina: 26 °C

Temperatura min. EPW ESPOL Campus Prosperina: 24 °C

Temperatura máx. EPW Ladybug Base Aerea: 31 °C

Temperatura min. EPW Ladybug Base Aerea: 28 °C

En base a estos valores de temperatura máxima y mínima de dos EPW diferentes procedemos a calcular el máximo y mínimo del factor de eficiencia del panel de acuerdo con las temperaturas.

Factor máx. EPW ESPOL Campus Prosperina a 26 °C: -0.35% de eficiencia

Factor min. EPW ESPOL Campus Prosperina a 24 °C: +0.35% de eficiencia

Temperatura máx. EPW Ladybug Base Aerea a 31 °C: -2.10% de eficiencia

Temperatura min. EPW Ladybug Base Aerea a 28 °C: -1.05% de eficiencia

3.7 Balance económico del diseño del sistema fotovoltaico

Número de paneles totales: 8206 paneles (utilizando el 30% del ANU)

Número de paneles en el rectorado: 80/57 paneles (utilizando el 30% del ANU)

Panel seleccionado: 470W MBB Half-Cell Module JAM72S20 445-470/MR

Costo del panel: £150.00 - \$202.50 USD (libre de costos de importación)

Tabla 3

Costos referenciales para el campus de la ESPOL y el edificio modelo (Rectorado)

Número de paneles	Costo individual	Costo final
8206	\$202.50	\$1661715
80	\$202.50	\$16200
57	\$202.50	\$11542.50

En base a estos resultados podemos observar que en el caso individual del rectorado el costo de la compra de los paneles solares a utilizar en las instalaciones PV que asciende a \$16200 en la Fase 1 de la parte inferior y \$11542.50 en la Fase 2 de la parte de arriba del techo, tomando en cuenta que se ha utilizado solo el 30% del Área Neta Utilizable.

Este mismo criterio se aplicó para el Área Neta Utilizable total de todo el campus utilizando solo el 30% de la misma, con lo cual obtenemos un valor de costo de los paneles solares a utilizar en las instalaciones PV que asciende a \$1661715, esta cantidad correspondería a la compra de los 8206 paneles de 450Wp de capacidad que en su máximo de eficiencia producirían teóricamente 3.69MWp.

Este valor de energía a producir se acerca bastante al valor entregado por el estudio del Ingeniero Valverde (ESPOL,2025) que es de 3.99MWp, por lo tanto, podemos afirmar que nuestro estudio se ha realizado bajo toda la rigurosidad tanto en el análisis de radiaciones como en los valores estimados utilizados y podemos acotar finalmente estos valores del mismo estudio muy importantes para nuestro análisis económico.

Costo por kWp: \$3788

m²/kWp: 2.8

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

Tras ejecutar las etapas de la metodología propuesta, que incluye desde el levantamiento de información, modelamiento tridimensional, simulación del recurso solar hasta el dimensionamiento fotovoltaico, se obtuvieron las siguientes conclusiones en base a los resultados y objetivos planteados en la presente investigación:

Se consolidó una base técnica consistente para el análisis de capacidad máxima de captación solar a escala del campus, al recopilar, organizar y utilizar información geográfica del conjunto de edificaciones de la ESPOL. Esta fase permitió representar la distribución espacial del entorno construido y disponer de un estudio confiable que permita la evaluación de sombras y exposición solar, condición necesaria para cualquier diseño fotovoltaico.

El modelamiento 3D desarrollado permitió evaluar de forma separada tanto el impacto del sombreado como la variación espacial de la radiación, evidenciando que las ganancias solares no se distribuyen de manera uniforme sobre las cubiertas. A partir de las simulaciones se identificaron superficies con mayor área captación de radiación solar y se descartaron zonas donde el sombreado o la geometría reducían el aprovechamiento. En consecuencia, el análisis basado en simulación resultó más representativo que asumir valores promedio, ya que permitió sustentar decisiones de diseño en áreas con un potencial realmente aprovechable.

El diseño fotovoltaico en el edificio de Rectorado fue técnicamente viable y coherente con las restricciones de la superficie, dado que se definió una distribución concreta de módulos en dos sectores de cubierta: 442 m² en la parte inferior y 317 m² en la sección superior, debido a que en la parte derecha de la superficie del edificio ya cuenta con paneles, por ello se descartó

esa sección de área. Con base en el módulo seleccionado, se determinó una configuración de 80 paneles en la zona inferior y 57 paneles en la zona superior, logrando maximizar el uso de superficie disponible manteniendo un criterio de orden y ocupación compatible con el espacio del edificio.

La selección del inversor se sustentó en la potencia instalada calculada y en la compatibilidad técnica con el sistema propuesto, dado que se estimó la capacidad instalada en la cubierta a partir del número de módulos y su potencia nominal, obteniéndose un valor aproximado de 137 módulos y de 60 kW respectivamente. Con este resultado se seleccionó un inversor *Solis S5-GC 50–60 kW*, que cumplió la condición de capacidad requerida para el arreglo instalado y mantuvo coherencia con el criterio de diseño conectado a red.

Los resultados de radiación simulada resultaron consistentes, validando el enfoque metodológico aplicado, ya que se obtuvo un valor de radiación incidente de 1551.69 [kWh/m²·año] en las superficies evaluadas. Al transformarlo a escala diaria, se obtuvo aproximadamente 4.3 [kWh/m²·día], valor dentro del rango del Atlas Solar del Ecuador (4.3–4.8 [kWh/m²·día]). Con este resultado, se respaldó la confiabilidad del modelamiento realizado y de la simulación, para sustentar decisiones preliminares de implementación fotovoltaica en el campus.

Asimismo, se determinó que la influencia de la temperatura ambiente sobre el desempeño de los paneles solares no representa una limitación significativa para el aprovechamiento del recurso solar. Mediante la aplicación de un modelo lineal se evidenció que las pérdidas asociadas al incremento de la temperatura de la célula se mantienen por debajo del 1 % bajo condiciones climáticas típicas del sitio de estudio y no superan el 2.1 % en

escenarios más exigentes, confirmando que la radiación solar disponible es el factor predominante en la generación fotovoltaica.

Adicionalmente, el análisis económico desarrollado permitió contextualizar los resultados técnicos obtenidos, sin que este estudio tenga como finalidad la compensación de la demanda eléctrica de las edificaciones. Bajo un criterio conservador de aprovechamiento del 30 % del área neta utilizable, se estimó una capacidad fotovoltaica teórica de 3.69 MWp para el campus, valor que se encuentra en respaldo con estudios institucionales previos.

4.1.2 Recomendaciones

Tras culminar lo planificado en la propuesta y considerando los alcances logrados, se presentan las siguientes recomendaciones que permitan fortalecer y ampliar la investigación en fases futuras:

Incrementar el nivel de detalle del modelamiento en los edificios priorizados, incorporando inclinaciones reales, equipos instalados en las superficies y obstáculos permanentes, con el fin de obtener una mayor precisión en el análisis de sombreado y delimitar con mayor precisión las áreas efectivas para instalación de paneles solares.

Realizar validación experimental del recurso solar mediante campañas de medición dentro del entorno analizado. Esto permitiría contrastar los resultados de simulación con datos reales y ajustar parámetros climáticos, reduciendo incertidumbres asociadas al uso de archivos tipo TMY o atlas.

Incorporar pérdidas y desempeño real del sistema fotovoltaico en la estimación energética (temperatura del módulo, pérdidas por cableado o suciedad, tiempo de vida útil y disponibilidad acorde al mercado nacional), para calcular indicadores como rendimiento global y obtener una proyección anual más cercana a la realidad con respecto a la generación.

Ampliar el análisis a un nivel económico-financiero, incorporando herramientas como HomerPro, periodo de retorno, escenarios de autoconsumo y comparación con consumo de planilla eléctrica del campus, de modo que se sustente la priorización de edificios y la viabilidad de implementación a escala campus.

Referencias

- Abella, M. A. (2005). *Sistemas fotovoltaicos*. SAPT Publicaciones Técnicas, SL.
- Agudo, M. Á. R. (2019). *Energía solar fotovoltaica*. Editorial Elearning, SL.
- Amillo, A. G., Huld, T., & Müller, R. (2014). A new database of global and direct solar radiation using the eastern meteosat satellite, models and validation. *Remote Sensing*, 6(9), 8165–8189.
- Aparicio, M. P. (2020). *Radiación solar y su aprovechamiento energético*. Marcombo.
- Antonio, C. S., David, B. D., Eduardo, C. F., & Alonso, C. G. M. (2015). *Generación distribuida, autoconsumo y redes inteligentes*. Editorial UNED.
- Ávila, A. M. M., Bravo, J. D., & Guerra, J. A. (2016). Desarrollo de un modelo geográfico para la evaluación del potencial fotovoltaico en entornos urbanos. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (18), 1.
- Azhar, S., Brown, J. W., & Sattineni, A. (2014). A case study of building performance analyses using building information modeling (pp. 213–222). Editor no identificado.
- Chiriboga, B., Mondragón, N., & Urquizo, J. (2009). *Simulación usando LabVIEW de la radiación incidente sobre superficies bajo diferentes condiciones aplicando un modelo de irradiancia solar basado en transmitancias*. Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).
- ESPOL. (2025). *Propuestas preliminares de ubicación para un sistema de generación fotovoltaica en el campus Gustavo Galindo Velasco de ESPOL*. Guayaquil, Ecuador.
- Fadare, D. A., Irimisose, I., Oni, A. O., & Falana, A. (2010). Modelado del potencial de energía solar en África mediante una red neuronal artificial.
- Fosu, R., Suprabhas, K., Rathore, Z., & Cory, C. (2015, October). Integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information Systems (GIS)—a literature

review and future needs. In *Proceedings of the 32nd CIB W78 Conference, Eindhoven, The Netherlands* (pp. 27–29).

Fondoso Ossola, S. T., Cristeche, J., Chevez, P. J., Barbero, D. A., & Martini, I. (2021).

Construcción de una herramienta digital para la simulación y el análisis de la radiación solar sobre edificios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 25.

Goss, B., Cole, I., Betts, T., & Gottschalg, R. (2014). Irradiance modelling for individual cells of shaded solar photovoltaic arrays. *Solar Energy*, 110, 410–419.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.09.037>

Huld, T., Paietta, E., Zangheri, P., & Pinedo Pascua, I. (2018). Assembling typical meteorological year data sets for building energy performance using reanalysis and satellite-based data. *Atmosphere*, 9(2), 53.

Ignacio García, M. de Blas, B. Hernández, C. Sáenz, J. L. Torres. (2021). Diffuse irradiance on tilted planes in urban environments: Evaluation of models modified with sky and circumsolar view factors. *Renewable Energy*, 180, 1194–1209.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.042>

IEEE Xplore: Kerekes, T., et al. Design of a Photovoltaic System for Rooftop Applications.

Esta publicación detalla el cálculo de P_{dc} y la selección de conductores PV-Wire bajo estándares internacionales.

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (s. f.). Visor hidrometeorológico (visor web). Recuperado el 13 de enero de 2026, de <http://www.inamhi.gob.ec/visor/visor>

Jiménez, V. A., Will, A., & Rodríguez, S. (2017). Estimación de radiación solar horaria utilizando modelos empíricos y redes neuronales artificiales. *Ciencia y Tecnología*, (17), 29–45.

- Kapsalis, V. C., Vardoulakis, E., & Karamanis, D. (2014). Simulation of the cooling effect of the roof-added photovoltaic panels. *Advances in Building Energy Research*, 8(2), 256–272.
- Mourshed, M. (2016). Climatic parameters for building energy applications: A temporal-geospatial assessment of temperature indicators. *Renewable Energy*, 94, 55–71.
- Mourshed, M. (2016). The impact of urban form on energy demand. *Energy and Buildings*, 130, 587–600.
- Mondol, J. D., Yohanis, Y. G., & Norton, B. (2007). Comparison of measured and predicted long term performance of grid a connected photovoltaic system. *Energy Conversion and Management*, 48(4), 1065–1080.
- Nandwani, S. S. (2005). *Energía solar. Conceptos básicos y su utilización*. Universidad Nacional, Heredia (Costa Rica), Jun, 1–26.
- National Aeronautics and Space Administration. (2025). *NASA POWER: Data Access Viewer (DAV)*. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- National Renewable Energy Laboratory. (2025). *Solar resource glossary*. <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/solar-glossary>
- Naciones Unidas, Asamblea General. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (Resolución A/RES/70/1)*. Naciones Unidas. <https://docs.un.org/es/a/res/70/1>
- Perez, R., Aguiar, R., Collares-Pereira, M., Dumortier, D., Estrada-Cajigal, V., Gueymard, C., ... & Zelenka, A. (2013). *Solar resource assessment: A review* (pp. 497–575). Routledge.

- Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., & Menicucci, D. (1987). A New Simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy*, *39*, 221–231. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(87\)80031-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(87)80031-2)
- Pérez, R., et al. (2013). *Solar resource assessment: A review* (pp. 497–575). Routledge.
- Rutkowski, R., Raczyński, M., Iwańkiewicz, R., & Nowak, R. (2024). Digital Twin in the Design and Dynamic Assessment of Energy Performance of Multi-Family Buildings. *Energies*, *17*(23), 6150.
- Sadeghipour Roudsari, M., Pak, M., & Viola, A. (2013, August). Ladybug: a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. In *Building Simulation 2013, Vol. 13*, 3128–3135.
- Sánchez, M. F., & Cánovas, S. F. (2018). *Energía Solar Fotovoltaica: Instalaciones Conectadas a Red y Aisladas* (6a ed.). Paraninfo.
- Šúri, M., Huld, T. A., Dunlop, E. D., & Ossenbrink, H. A. (2010). Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy*, *81*(10), 1295–1305.
- Touloupaki, E., & Theodosiou, T. (2017). Performance simulation integrated in parametric 3D modeling as a method for early stage design optimization—A review. *Energies*, *10*(5), 637.
- Torres-Gallo, R., Miranda-Lugo, P. J., & Martínez-Padilla, K. A. (2017). Diseño y construcción de un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar, utilizando PCM como fuente de almacenamiento térmico, para secado de yuca. *TecnoLógicas*, *20*(39), 71–83.
- Tschopp, D., Jensen, A. R., Dragsted, J., Ohnewein, P., & Furbo, S. (2021). Measurement and modeling of diffuse irradiance masking on tilted planes for solar engineering

applications. *Solar Energy*, 231, 365–378.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.083>

Twidell, J., & Weir, T. (2015). *Renewable Energy Resources* (3rd ed.). Routledge.

U.S. Department of Energy. (2023). *EnergyPlus™ documentation*. <https://energyplus.net>

Ward, G. J. (1994, July). The RADIANCE lighting simulation and rendering system. In *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (pp. 459–472).

Weather Spark. (2025). El clima y el tiempo promedio en todo el año en Guayaquil.

Weatherspark.com. https://es.weatherspark.com/y/19346/Clima-promedio-en-Guayaquil-Ecuador-durante-todo-el-a%C3%B1o#google_vignette

World Bank Group, Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), & Solargis.

(s. f.). *Global Solar Atlas*. Recuperado el 13 de enero de 2026, de

<https://globalsolaratlas.info/>

UCLA Energy Design Tools. (s. f.). *Climate Consultant (versión 6.0)* [Software]. Recuperado

el 13 de enero de 2026, de <https://energy-design-tools.sbse.org/>

Apéndice B

Hoja de datos

S5-GC(50-60)K

Modelo	50K	60K
Entrada (DC)		
Voltaje máximo de entrada		1100 V
Voltaje nominal		600 V
Voltaje de arranque		195 V
Rango de voltaje MPPT		180 - 1000 V
Corriente máxima de entrada	5 × 32 A	6 × 32 A
Corriente máxima de cortocircuito	5 × 40 A	6 × 40 A
Número de MPPT / Número máximo de cadenas de entrada	5 / 10	6 / 12
Salida (AC)		
Potencia nominal de salida	50 kW	60 kW
Potencia aparente máxima de salida	55 kVA	66 kVA
Potencia máxima de salida	55 kW	66 kW
Voltaje nominal de la red		3/N/PE, 220 V / 380 V, 230 V / 400 V
Frecuencia nominal de la red		50 Hz / 60 Hz
Corriente nominal de salida de red	76.0 A / 72.2 A	91.2 A / 86.6 A
Corriente máxima de salida	83.6 A	100.3 A
Factor de potencia		> 0.99 (0.8 capacitivo a 0.8 inductivo)
THDi		< 3%
Eficiencia		
Eficiencia máxima		98.7%
Eficiencia EU		98.3%
Protección		
Protección contra polaridad inversa DC		Sí
Protección contra cortocircuito		Sí
Protección de sobrecorriente de salida		Sí
Protección contra sobretensiones		DC Tipo II / AC Tipo II
Monitoreo de red		Sí
Protección Anti-isla		Sí
Protección de temperatura		Sí
Monitoreo de cadenas		Sí
Escaneo de curvas I/V		Sí
Escaneo múltiplo		Sí
AFCI 2.0 integrado		Opcional
Recuperación PID integrada		Opcional ⁽¹⁾
Interruptor de DC integrado		Sí
Datos generales		
Dimensiones (longitud × altura × ancho)		691 × 578 × 338 mm
Peso		53.7 kg
Topología		Sin Transformador
Consumo propio (noche)		< 1 W
Rango de temperatura de funcionamiento		-25 ~ +60°C
Humedad relativa		0 - 100%
Nivel de protección		IP66
Emisión de ruido (típica)		< 55 dB(A)
Enfriamiento		Refrigeración inteligente con ventilador
Altitud máxima de funcionamiento		4000 m
Estándar de conexión de red		G99, VDE-AR-N 4105/VDE V 0124, EN 50549-1, VDE 0126/UTE C 15/VFR:2019, RD 1699/RD 244/UNE 206006/UNE 206007-1, CEI 0-21, C10/11, NRS 097-2-1, EIFS 2018.2, IEC 62116, IEC 61727, IEC60068, IEC 61683, EN 50530
Estándar de seguridad / EMC		IEC 62109-1/-2, IEC62116 & IEC 61000-6-1/-2/-3/-4
Características		
Conexión de DC		Conector MC4
Conexión de AC		Terminal OT (máximo 70 mm ²)
Pantalla		LCD
Comunicación		RS485, USB, Opcional: Wi-Fi, GPRS

(1) Dada su lógica similar de funcionamiento, al integrar la función de recuperación nocturna de la degradación por potencial inducido (PID, por sus siglas en inglés), no se podrá utilizar la función de compensación de reactiva nocturna. Además, la opción de conexión a tierra negativa no está disponible en inversores con función de recuperación PID nocturna.

Apéndice C Hojas de cálculo de referencia del estudio institucional ESPOL (2025)

El Apéndice C contiene la hoja de cálculo original utilizada en el estudio “*Propuestas preliminares de ubicación para un sistema de generación fotovoltaica en el campus Gustavo Galindo Velasco de ESPOL*” (ESPOL, 2025), en la cual se presentan estimaciones preliminares del potencial fotovoltaico por edificación.