

Estudio de prefactibilidad para la implementación de un parque solar fotovoltaico en la Cárcava  
1 del sitio de disposición final de residuos sólidos El Carrasco

Dayron Herney Galvis Fernández y Daniel Fernando Ríos Calderón

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electricista

Director

María Alejandra Mantilla Villalobos

Doctora en Ingeniería – Área Ingeniería Electrónica

Codirectores

German Alfonso Osma Pinto

Doctor en Ingeniería – Área Ingeniería Eléctrica

Álvaro Viviescas Jaimes

Doctor en Ingeniería Estructural

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2022

### **Dedicatoria**

A Dios por su amor y guía incondicional, porque sin él nada de esto hubiera sido posible, desde principio a fin fue quien impulso mi vida personal y profesional.

A mi familia materna por su amor y comprensión, especialmente a mis padres quienes me apoyaron y educaron siempre. Y a mi hermano Ángel por ser mi fiel amigo y compañero en la mayor parte de esta etapa de mi vida.

A mi familia por ser el impulso que le faltaba a mi vida, a mi esposa Emma por su amor y por creer en mí siempre a pesar de las dificultades. Y a mi hijo Emmanuel por ser mi motor y mi razón de seguir adelante cada día.

A mi compañero de tesis Dayron por su amistad y carisma.

**Daniel Fernando Ríos Calderón.**

Este logro es totalmente gracias a la ayuda de Dios y mi familia, a mi tío Henry, mi papá Carlos, mi mamá Mayra y parte fundamental mi nona Eloína sin el apoyo de ellos nada de esto hubiese sido posible.

Finalmente, mis agradecimientos a mi compañero Daniel Ríos por el apoyo constante en este proyecto y a mi amigo Carlos Méndez que nos brindó un apoyo significativo.

**Dayron Herney Galvis Fernández.**

### **Agradecimientos**

Un agradecimiento muy especial para la directora de este trabajo de investigación, María Alejandra Mantilla y los codirectores German Alfonso Osma pinto y Álvaro Viviescas Jaimes por su apoyo y orientación en todo momento.

A la EMAB y su personal por su disposición y colaboración quienes muy amablemente nos recibieron en sus instalaciones y brindaron la información requerida en su debido momento.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Objetivos .....	15
1.1 Objetivo General .....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Marco legal, regulatorio y normativo .....	16
2.1 Marco legal .....	17
2.2 Marco regulatorio.....	19
2.3 Marco normativo y reglamentario: NTC 2050 y RETIE .....	21
3. Recomendaciones técnicas para la instalación de sistemas fotovoltaicos en rellenos sanitarios .....	22
3.1 Consideraciones sobre los sistemas fotovoltaicos en rellenos .....	23
3.1.1 Uso de la tierra y condiciones ecológicas .....	24
3.1.2 Adaptación de la tecnología fotovoltaica adecuada a las características de los rellenos .....	24
3.1.3 Infraestructura de transporte y transmisión eléctrica .....	25
3.1.4 Características del relleno sanitario .....	26
3.1.5 Interconexión .....	27
3.2 Consideraciones sobre las características físicas del relleno .....	27
3.2.1 Composición de los residuos .....	29
3.2.2 Asentamiento diferencial por descomposición .....	29
3.2.3 Gas de relleno y lixiviados.....	30

3.2.4 Sistemas de anclaje .....	30
3.2.5 Geomembranas integradas .....	31
3.2.6 Consideraciones sobre el peso del sistema .....	32
3.2.7 Protección contra rayos y puesta a tierra .....	32
3.2.8 Integración con sistemas de monitoreo y producción de gases .....	33
3.2.9 Control de polvo .....	33
4. Potencial energético de la zona.....	34
4.1 Medición .....	34
4.1.1 Estación Meteorológica Davis Vantage Pro2 .....	36
4.2 Perfil climático.....	38
4.2.1 Irradiancia solar .....	38
4.2.2 Temperatura ambiente .....	42
4.2.3 Velocidad del viento .....	44
4.2.4 Dirección del viento y rosa de vientos.....	46
4.2.5 Humedad .....	49
4.3 Comparativo de variables micro-climáticas entre diferentes fuentes .....	50
4.3.1. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS).....	51
4.3.2. NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) .....	51
4.3.3 Irradiación .....	52
4.3.4 Temperatura ambiente .....	54
4.3.5 Velocidad del viento .....	56
4.3.6 Humedad .....	58
5. Predimensionamiento del sistema fotovoltaico .....	60

5.1 Consideraciones iniciales.....	60
5.1.1 Características de la ubicación.....	60
5.1.2 Recursos y condiciones climáticas.....	64
5.2 Estrategia de dimensionamiento .....	65
5.2.1 Interfaz de PVSYST .....	65
5.2.2 Procedimiento de dimensionamiento.....	67
5.2.3 Modelamiento de pérdidas y otras consideraciones.....	69
5.3 Resultados y análisis.....	71
5.3.1 Componentes del sistema y generación.....	71
5.3.2 Costos del sistema.....	75
5.3.3 Análisis de resultados .....	77
6. Conclusión .....	78
7. Trabajos Futuros .....	80
Referencias Bibliográficas .....	81

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Ubicación geográfica estación meteorológica en El Carrasco .....	35
Figura 2. Ubicación de la estación meteorológica en sitio .....	36
Figura 3. Estación meteorológica Davis Vantage Pro2 en el sitio.....	37
Figura 4. Irradiancia solar medida la semana del 6 al 12 de septiembre del 2021. ....	39
Figura 5. Radiación solar u horas pico solar de 8 meses comprendidos de septiembre del 2021 hasta abril del 2022. ....	42
Figura 6. Temperatura medida la semana del 6 al 12 de septiembre del 2021.....	43
Figura 7. Temperatura máxima, mínima y promedio de 8 meses (septiembre del 2021 hasta abril del 2022). ....	44
Figura 8. Velocidad del viento medida la semana del 6 al 12 de septiembre del 2021. ....	46
Figura 9. Direcciones espaciales de 16 puntos .....	47
Figura 10. Rosa de vientos de las medidas registradas de velocidad y dirección del viento.....	48
Figura 11. Distribución de la velocidad del viento en porcentaje de frecuencia y horas. ....	49
Figura 12. Humedad relativa medida la semana del 6 al 12 de septiembre del 2021.....	50
Figura 13. Irradiación mensual de PVGIS, NASA Power y la Estación meteorológica. ....	52
Figura 14. Hora solar pico de PVGIS, Nasa POWER y la Estación meteorológica.....	53
Figura 15. Temperatura ambiente mensual de Nasa POWER y la Estación meteorológica. ....	55
Figura 16. Temperatura máxima y mínima de Nasa POWER y la Estación meteorológica. ....	56
Figura 17. Velocidad del viento mensual de Nasa POWER y la Estación meteorológica. ....	57

Figura 18. Velocidad del viento máxima mensual de Nasa POWER y la Estación meteorológica.....	58
Figura 19. Humedad relativa mensual de Nasa POWER y la Estación meteorológica. ....	58
Figura 20. Distrito regional de manejo integrado de Bucaramanga .....	61
Figura 21. Distribución de las cárcavas y celdas en El Carrasco.....	62
Figura 22. Localización del domo de la celda 1 .....	63
Figura 23. Área de estudio delimitada en amarillo. Obsérvese el área total de 7309 m <sup>2</sup> .....	64
Figura 24. Interfaz principal de PVSYST. La sección superior se destaca en verde y la sección inferior en azul. ....	66
Figura 25. Interfaz del botón Sistema de PVSYST. ....	66
Figura 26. Inclinação y azimut seleccionados para la instalación FV.....	67
Figura 27. Uso de la zona propuesta para el proyecto en el domo de la celda 1 de la cárcava 1.	69
Figura 28. Recorrido solar anual y línea del horizonte modificada para el sistema solar. ....	70
Figura 29. Diagrama de conexión de la instalación simplificado. Obsérvese que no todos los inversores reciben las 6 cadenas .....	72
Figura 30. Energía inyectada a la red diariamente en un año. ....	74
Figura 31. Potencia inyectada a la red en kW para una semana. ....	75
Figura 32. Flujo de caja para el proyecto.....	77

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Listado de decretos y resoluciones emitidos a partir de la Ley 1715 de 2014 relacionados con los SFV.....	20
Tabla 2. Resumen de los aspectos característicos de sistemas FV en rellenos sanitarios. ....	23
Tabla 3. Energía mensual promedio 8 meses comprendidos entre septiembre del 2021 y abril del 2022. ....	40
Tabla 4. Energía promedio anual .....	41
Tabla 5. Escala de Beaufort de clasificación de vientos según velocidad. ....	45
Tabla 6. Información mensual de 8 variables claves la instalación. Obtenida de PVSYST.....	73

## Resumen

**Título:** Estudio de pre-factibilidad para la implementación de un parque solar fotovoltaico en la Cárcava 1 del sitio de disposición final de residuos sólidos El Carrasco \*

**Autor:** Daniel Fernando Rios Calderon, Dayron Herney Galvis Fernández \*\*

**Palabras Clave:** Sistemas fotovoltaicos, rellenos sanitarios, estación meteorológica, irradiancia, hora solar pico, PVSYST.

### Descripción:

Esta investigación, cuyo objetivo es realizar un estudio de pre-factibilidad que considere factores climáticos, regulatorios, de seguridad y financieros para el desarrollo de un proyecto de generación fotovoltaica, en el sitio de disposición final de residuos sólidos El Carrasco del área metropolitana de Bucaramanga; Se presenta como un proyecto interesante y con un alto grado de favorabilidad.

Para la consecución del objetivo, en primera instancia, se realizó la medición y análisis de variables microclimáticas en sitio por medio de una estación meteorológica Davis Vantage Pro 2. Donde como resultado se presenta que la zona de estudio tiene un buen potencial energético para la generación fotovoltaica. Seguidamente se determinó la aplicabilidad de las disposiciones legales y regulatorias, presentando y relacionando los actos que se han emitido por las autoridades legislativas, ejecutivas y de regulación. Con todo esto y dándole cumplimiento a los objetivos se establecieron recomendaciones técnicas para sistemas de generación fotovoltaica en vertederos, esto mediante la consulta de diferentes fuentes y documentos técnicos.

Posteriormente se procedió a realizar un pre-dimensionamiento para el sistema fotovoltaico, apoyado de la herramienta PVSYST, donde se pudo determinar que el área disponible se puede usar para instalar más de 1 MWp de potencia FV, con una producción superior a los 1,6 GWh cada año. Posteriormente, se procedió a evaluar financieramente el proyecto, esto con el fin de obtener el flujo de caja, para analizar datos como: costo total de la instalación, costo de operación, periodo de recuperación y retorno de la inversión.

Por último, cabe mencionar que este proyecto se encuentra relacionado dentro de un trabajo de investigación en geofísica que evalúa las condiciones de estabilidad en el sitio de disposición final El Carrasco y que este último estructuró la realización de otros proyectos de pregrado en la escuela de ingeniería civil.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Directora: María Alejandra Mantilla Villalobos. Doctora en Ingeniería – Área Ingeniería Electrónica. German Alfonso Osma Pinto. Doctor en Ingeniería – Área Ingeniería Eléctrica. Álvaro Viviescas Jaimes. Doctor en Ingeniería Estructural.

## Abstract

**Title:** Pre-feasibility study for the implementation of a photovoltaic solar park in Cárcava 1 of the El Carrasco solid waste final disposal site \*

**Author:** Daniel Fernando Rios Calderon, Dayron Herney Galvis Fernández \*\*

**Key Words:** Photovoltaic systems, landfills, weather station, irradiance, peak solar time, PVSYST.

### Description:

This research, whose objective is to carry out a pre-feasibility study that considers climatic, regulatory, safety and financial factors for the development of a photovoltaic generation project, in the El Carrasco solid waste final disposal site in the Bucaramanga metropolitan area; it is presented as an interesting project with a high degree of favorability.

To achieve the objective, in the first instance, the measurement and analysis of microclimatic variables was carried out on site by means of a Davis Vantage Pro 2 weather station. Where as a result it is presented that the study area has a good energy potential for the generation photovoltaic. Next, the applicability of the legal and regulatory provisions was determined, presenting and relating the acts that have been issued by the legislative, executive and regulatory authorities. With all this and fulfilling the objectives, technical recommendations were established for photovoltaic generation systems in landfills, this by consulting different sources and technical documents.

Subsequently, a pre-sizing for the photovoltaic system was carried out, supported by the PVSYST tool, where it was possible to determine that the available area can be used to install more than 1 MWp of PV power, with a production greater than 1.6 GWh each year. Subsequently, the project was financially evaluated, this in order to obtain the cash flow, to analyze data such as: total cost of the installation, operating cost, recovery period and return on investment.

Finally, it is worth mentioning that this project is related to a geophysical research project that evaluates the stability conditions at the El Carrasco final disposal site and that the latter structured the realization of other undergraduate projects in the engineering school civil.

---

\* Degree Work

\*\* Department of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Advisor: María Alejandra Mantilla Villalobos. PhD in Electronic Engineering. Co-advisor: German Alfonso Osma Pinto. PhD in Electrical Engineering. Co-advisor: Álvaro Viviescas Jaimes. PhD in Structural Engineering.

## Introducción

En la actualidad, el potencial terreno que deja un relleno sanitario clausurado empieza a interesar a las comunidades para el desarrollo de programas de recuperación y transformación paisajística y social, todo esto, a través de parques, áreas de actividad deportivas, zonas de encuentro verdes y espacios de generación de energías renovables. Por suerte ya existen en la región ejemplos de utilización de estos espacios transformados en parques y centros de recreación como es el caso del parque contemplativo el Carrasco. (Jaramillo, 2002).

A través de nuevas iniciativas, gobiernos como el de los Estados Unidos promueven la utilización de propiedades que fueron rellenos sanitarios para la generación renovable, donde se han identificado varios beneficios de este proceso, como por ejemplo, que estos sitios pueden tener condiciones ambientales que no son adecuadas para la reurbanización y que están ubicados cerca de carreteras e infraestructura de transmisión y distribución de energía eléctrica, entre otros (EPA, Best Practices for Siting Solar Photovoltaics on Municipal Solid Waste Landfills, 2013).

El relleno sanitario es el método de disposición final que utiliza la mayoría de los sitios de residuos sólidos municipales (RSM). Es el único admisible en la actualidad, puesto que no representa peligro alguno ni riesgos para la salud pública. Además, presenta una gran ventaja frente a otros métodos ya que minimiza la contaminación y otros impactos negativos en el ambiente. Este método básicamente utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en un área lo más estrecha posible, compactando y enterrando los desechos diariamente para reducir su volumen. No se recomienda la construcción de infraestructura pesada sobre la superficie del relleno, debido a

su poca capacidad para soportar estructuras pesadas, además de los problemas que pueden ocasionar los hundimientos y generación de gases (Jaramillo, 2002).

Por su parte, el sector eléctrico pasa a ser una palanca fundamental para el desarrollo futuro de las ciudades y de la industria, por cuanto es el llamado para proponer la correcta distribución y aprovechamiento de residuos industriales y espacios factibles para la generación de energía eléctrica a partir de las fuentes renovables. En el caso particular de este proyecto, se hace énfasis en el potencial energético que representa el relleno sanitario de “EL CARRASCO”, para el cual se analiza y estima el potencial de generación que ofrecen los sistemas fotovoltaicos (FV) que permita el aprovechamiento de la energía solar, permitiendo presentar una oportunidad de implementación de generación alternativa en un sector específico de Bucaramanga (Pérez Aceros & Rodríguez Parada, 2021).

El Carrasco se encuentra ubicado en la parte suroccidental de Bucaramanga, donde recibe aproximadamente 750 toneladas al día de residuos sólidos, provenientes del área metropolitana de Bucaramanga y otros municipios (Assaf & Carrascal, 2012).

El cierre del relleno sanitario de Bucaramanga El Carrasco, debido a los fallos judiciales, ha hecho que la Alcaldía de Bucaramanga opte por cambiar la imagen pública del sitio, buscando mejorar la salud de los barrios que están alrededor del relleno. El aprovechamiento del espacio y la búsqueda de energía renovable son primordiales en este cambio (Cárdenas, 2019).

Como compensación ambiental se espera que El Carrasco sea un centro ambiental para la ciudad. Por esta razón, se busca la innovación ambiental mediante la implementación de un parque solar FV. Debido a la complejidad que representa realizar una construcción en una zona de estas características, es necesario el trabajo conjunto entre varios campos disciplinares que aborden las problemáticas. Por ello, fue necesario una previa evaluación geotécnica de las condiciones de

estabilidad del terreno realizado a partir de un trabajo de investigación de Maestría en Geofísica, un diseño conceptual de las estructuras metálicas realizado a partir de trabajos de grado en Ingeniería Civil y este trabajo de grado, el cual se centra en la realización de un estudio de prefactibilidad para la implementación del parque solar.

Este trabajo de grado plantea caracterizar diversos factores micro climáticos (irradiancia, temperatura, velocidad del viento y humedad), a partir de los datos obtenidos por medio de la estación meteorológica en sitio. Se realiza la medición y posterior análisis de las variables climáticas del sitio de disposición final de residuos sólidos El Carrasco, con el fin de comprender las condiciones meteorológicas relevantes y sus posibles efectos en el rendimiento del sistema FV.

La realización de un proyecto solar FV en un lugar contaminado, como lo es un sitio de disposición final, conlleva una serie de retos a la hora del diseño, es por eso que dentro del estudio de prefactibilidad es necesario describir las consideraciones a tener en cuenta con referente a seguridad eléctrica, ya que, existe la presencia de gases inflamables como el metano y el etano producido por las basuras.

Dentro de la planificación de instalaciones solares fotovoltaicas, como sistemas energéticos, para Colombia, es necesario tener en cuenta el marco legal, regulatorio y normativo que se ha emitido por las autoridades legislativas, ejecutivas y de regulación. Por tal razón, este trabajo identifica un compendio y breve resumen de las principales normativas necesarias para la implementación de un sistema FV de estas características.

Una vez caracterizadas las variables climáticas, identificado el marco legal, regulatorio y normativo, y teniendo en cuenta las consideraciones de seguridad en la zona, se realiza el pre-dimensionamiento del sistema solar FV mediante el software de dimensionamiento PVSYST y, en

consecuencia, la selección de equipos que hacen parte de la instalación fotovoltaica. Con esto es posible la realización del análisis financiero necesario.

Se espera que mediante el estudio de prefactibilidad en el relleno sanitario El Carrasco se dé un aprovechamiento al terreno, pues al ser un sitio potencialmente contaminado sus posibilidades de reutilización son muy pocas.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Realizar un estudio de pre-factibilidad que considere factores climáticos, regulatorios, de seguridad y financieros para el desarrollo de un proyecto de generación fotovoltaica, en el sitio de disposición final de residuos sólidos *El Carrasco* del área metropolitana de Bucaramanga.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Determinar el potencial energético en sitio a partir de la caracterización del comportamiento de variables micro-climáticas (irradiancia, temperatura, velocidad del viento y humedad).

Determinar la aplicabilidad de disposiciones legales y regulatorias vigentes para generación distribuida fotovoltaica.

Establecer recomendaciones técnicas aplicables para la instalación eléctrica asociada al sistema fotovoltaico, considerando la presencia de biogás y material particulado.

Realizar un pre-dimensionamiento del sistema fotovoltaico identificando características técnicas y financieras del proyecto en el sitio de interés.

## **2. Marco legal, regulatorio y normativo**

Esta sección presenta y relaciona los actos que se han emitido por las autoridades legislativas, ejecutivas y de regulación; con el objetivo de plantear los lineamientos, las políticas públicas, las normas y la regulación en materia de integración de generación no convencional en la matriz energética colombiana. En particular, se hace alusión a la generación fotovoltaica. El presente capítulo se divide en tres secciones:

- El marco legal consiste de los actos legislativos. Allí se trata la Ley 1715 de 2014 y su contenido, junto a la ley que la adiciona, la Ley 2099 de 2021.
- El marco regulatorio trata de los decretos y regulaciones de los diversos organismos Gobierno Nacional, derivados de la Ley 1715 de 2014. Incluye decretos del Ministerios de Minas y Energía (MME) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), así como resoluciones y documentos de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) y la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME).
- El marco normativo y reglamentario, en el que se describen las exigencias técnicas y estándares para buenas prácticas de ingeniería, en lo concerniente al trabajo con equipos de generación fotovoltaica.

## 2.1 Marco legal

En 2014, se promulgó una ley de interés social y utilidad pública, que fomenta el desarrollo de proyectos de generación no convencional, energías renovables, almacenamiento y eficiencia energética, que además incluye legislación sobre los mecanismos de respuesta a la demanda. Este marco legal es la Ley 1715 del 13 de mayo de 2014 “POR MEDIO DE LA CUAL SE REGULA LA INTEGRACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES AL SISTEMA ENERGÉTICO NACIONAL”, en la que participaron activamente el Congreso de la República, el Gobierno Nacional del expresidente Juan Manuel Santos Calderón, el Ministerio de Minas y Energía (MME), el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y el Ministerio de Hacienda y Crédito Público (MHCP). El objeto de esta ley, según su primer artículo es:

“(…) promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico (...) como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético.”

El fin de esta ley según el artículo segundo de la misma es:

“(…) establecer el marco legal y los instrumentos para la promoción del aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, lo mismo que para el fomento de la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para producción de energía, la eficiencia energética y la respuesta de la demanda.”

Para lograr cumplir estos objetivos, la ley delega responsabilidades al Gobierno Nacional, los gobiernos departamentales y los organismos del Estado (art. 6), ordena la promoción de estas tecnologías (Cap. II) y además crea fondos y programas (arts. 9 y 10.), e incentivos tributarios a la inversión en el desarrollo de proyectos FNCER y de eficiencia energética (Cap. III).

Esta ley creó los mecanismos de desarrollo y promoción para cada uno de los distintos tipos de FNCE (Cap. IV), la adopción de tecnologías de eficiencia energética (Cap. V) y la inclusión de FNCE y eficiencia energética en las soluciones para las Zonas No Interconectadas (Cap. VI). Por otra parte, ordena que el Gobierno Nacional tome acciones ejemplares de inclusión de todas estas temáticas en sus políticas, con el fin de eliminar barreras técnicas, administrativas y de mercado para la entrada de las FNCE al país (Cap. VII) y el fomento a la investigación y desarrollo tecnológico de estas tecnologías (Cap. VIII).

Finalmente, en el Capítulo IX, se exhorta al MADS a formular procedimientos para evaluar el impacto medioambiental de las diversas tecnologías de las que trata la ley. Así, termina el documento estableciendo los mecanismos de vigilancia y control que garanticen el cumplimiento de los objetivos de la Ley (Cap. XI).

Adicionalmente, tras la pandemia de COVID-19 se promulgó la Ley 2099 de 2021 que adicionó algunos aspectos a la Ley 1715 y se dictaron otras disposiciones. Esta ley amplía los beneficios para tecnologías y proyectos que promuevan la transición energética del país, se mejora el FENOGE, se incentiva el desarrollo de proyectos sobre hidrógeno verde y azul, se legisla sobre la inclusión de FNCER en las Zonas No Interconectadas, entre otros.

En términos generales, la Ley 2099 de 2021 adicionó ciertas disposiciones con el fin de mejorar las apuestas del país sobre la transición energética y la lucha contra el cambio climático y apostar por un mercado energético más innovador y competitivo. Con esto en mente, el Congreso

ratificó y amplió los beneficios de la Ley 1715 de 2014 para los proyectos de FNCER, deducción de inversiones, exclusión del IVA a los bienes y servicios, beneficios para la importación y reducción de los aranceles y la depreciación acelerada.

En particular, la nueva ley mejoró el incentivo de depreciación acelerada, que pasó de 20% a 33,3 % en la depreciación anual. Esto implica que ahora los componentes y activos del proyecto se depreciarán en 3 años y no en 5, como sucedía desde el 2014. Asimismo, se incluyeron más medidas para la eficiencia de la energía y se incluyeron estas tecnologías dentro de los beneficios de exclusión de IVA, depreciación acelerada y reducción de aranceles. Por otra parte, se estableció que dichos incentivos entran en vigencia por treinta años, partir de julio de 2021.

Finalmente, la Ley 2099 de 2021 fortaleció la regulación para la generación de energía a partir de fuente geotérmicas, ya que amplió su regulación y se creó el *Registro Geotérmico* y, además de que se exhortó a los entes reguladores a aplicar sanciones a aquellos que violen estas disposiciones. Una nueva apuesta de esta ley es por el hidrogeno como FNCER y se incluyen tres capítulos en materia de hidrógeno. En primer lugar, se introduce las definiciones de hidrógeno verde y de hidrógeno azul. Luego, se introduce una cláusula que exhorta al Gobierno Nacional a promover el uso del hidrógeno en los diferentes sectores de la económicos, especialmente en el sector energético y de transporte. Finalmente, da la potestad al Gobierno Nacional de diseñar la política pública de investigación, desarrollo e innovación de las técnicas, equipos y tecnologías asociadas con la cadena de valor de las FNCER, incluido el hidrógeno.

## **2.2 Marco regulatorio**

A partir de la entrada en vigor de la Ley 1715 de 2014, el Gobierno Nacional tuvo la obligación de emitir una decretos y resoluciones para reglamentar, generar lineamientos o crear procedimientos y requisitos para cumplir con las exigencias de la ley. El marco regulatorio de la ley asociado es extenso, por lo tanto, aquí se presentan aquellos decretos y resoluciones que más se enfocan en la generación de energía fotovoltaica y recomendaciones asociadas a esta tecnología. La Tabla 1 recopila los actos ejecutivos en orden cronológico.

**Tabla 1.**

*Listado de decretos y resoluciones emitidos a partir de la Ley 1715 de 2014 relacionados con los SFV.*

<b>Acto</b>	<b>Entidad</b>	<b>Objeto</b>
Decreto 2469 de 2014	MME	Por el cual se establecen los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración
Resolución 227 de 2015	CREG	Por la cual se define la metodología para determinar la energía firme de plantas solares fotovoltaicas
Resolución 0281 de 2015	UPME	Por la cual se define el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala (hasta 1 MW)
Decreto 2143 de 2015	MME	Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía en lo relacionado con la definición de los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en la Ley 1715 de 2014
Resolución 045 de 2016	UPME	Por la cual se establecen los procedimientos y requisitos para emitir la certificación y avalar los proyectos de fuentes no convencionales de energía (FNCE), con miras a obtener el beneficio de la exclusión del IVA y la exención de gravamen arancelario
Resolución UPME 143 de 2016	UPME	Por la cual se modifica el artículo quinto y se adicionan artículos y anexos a la Resolución UPME 0520 por medio de la cual se establece el Registro de Proyectos de Generación y se toman otras disposiciones.
Resolución MADS 1283 de 2016	MADS	Por la cual se establece el procedimiento y requisitos para la expedición de la certificación de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energías

Acto	Entidad	Objeto
		renovables – FNCER y gestión eficiente de la energía, para obtener los beneficios tributarios de la Ley 1715 de 2014
Decreto 348 de 2017	MME	Por el cual se adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política pública en materia de gestión eficiente de la energía y entrega de excedentes de autogeneración a pequeña escala
Resolución MADS 1988 de 2017	MADS	PROURE (Programas para Exclusión IVA)
Resolución UPME 585 de 2017	UPME	Procedimiento ante la UPME Exclusión de IVA
Resolución MADS 2000 de 2017	MADS	Procedimiento ante la ANLA para exclusión de IVA
Decreto 1543 de 2017	MME	Por el cual se reglamenta el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía, FENOGE
Resolución CREG 015 de 2018	CREG	Por la cual se establecen reglas generales de comportamiento de mercado para los agentes que desarrollen las actividades de los servicios públicos domiciliarios de energía eléctrica y gas combustible.
Resolución CREG 174 de 2021	CREG	Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional. Esta resolución derogó la Res. CREG 030 de 2018

*Nota:* MME se refiere al Ministerio de Minas y Energías, CREG se refiere a la comisión de Regulación de Energía y GAS, UPME a la Unidad de Planeación Minero-Energética y MADS al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

### 2.3 Marco normativo y reglamentario: NTC 2050 y RETIE

En lo que concierne a las normas, en primer lugar, aparece el cumplimiento de la Norma Técnica Colombiana 2050, el Código Eléctrico Colombiano, NTC 2050. En esta norma, existe una sección dedicada exclusivamente a la instalación del equipo FV, la Sección 690. En esta sección

se incluyen todas las licencias, exigencias y prohibiciones para la instalación de paneles FV.

Incluye subsecciones dedicadas a:

- Definiciones, tensiones nominales y generalidades: Inciso A.
- Componentes mínimos de la instalación hasta el inversor: Inciso A, Sección 690-4.
- Requisitos mínimos de los circuitos: Inciso B.
- El dimensionado de los conductores y elementos de corte: Incisos B y C.
- Las señalizaciones: RETIE e Inciso C.
- Los métodos de alambrado: Inciso D.
- El sistema de puesta a tierra: Inciso E.
- El rotulado del equipo y los datos de placa mínimos: Inciso F.
- Interconexión a una red y protocolos de operación anormal: Inciso G.
- Sobre los acumuladores: Inciso H y Sección 480.

Adicionalmente, aquellos sistemas FV que se conecten en paralelo a otras fuentes de generación, deben cumplir con las exigencias de la Sección 705 de la NTC 2050. Por otro lado, al considerar otros aspectos técnicos de carácter reglamentario, es indispensable el cumplimiento del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE). En este reglamento, se especifica que los equipos en SFV deben cumplir ciertos requisitos, demostrables a través de un Certificado de Conformidad de Producto. Los requisitos mínimos exigidos por el RETIE para los SFV son tres: cumplir con lo consignado en la Sección 690 de la NTC 2050, nunca superar los 220 V en sistemas SFV en unidades de vivienda y similares y, en caso de contar con almacenamiento, si la carga de acumulación supera los 1000 A/h, el sistema de almacenamiento se debe instalar en un cuarto aireado e independiente.

### **3. Recomendaciones técnicas para la instalación de sistemas fotovoltaicos en rellenos sanitarios**

Este capítulo describe las consideraciones más relevantes sobre la selección e instalación de sistemas FV en rellenos sanitarios. Esta información resulta relevante para la etapa de diseño conceptual del sistema y para asistir en la toma de decisiones sobre el proyecto. La mayoría de estas recomendaciones se dan desde un punto de vista de Ingeniería Eléctrica. Es posible que algunos factores referentes a las dinámicas mismas del relleno queden por fuera de las consideraciones, pues requieren estudios más profundos en el sitio.

A continuación, se abordan los aspectos técnicos relevantes para la instalación de sistemas FV en rellenos sanitarios, divididos en consideraciones sobre el sistema FV y consideraciones sobre el relleno sanitario. Este capítulo está basado en la revisión de la literatura, en particular, lo presentado en los documentos técnicos “*The Guide to Developing Solar Photovoltaics at Massachusetts Landfills*”, “*Best Practices for Siting Solar Photovoltaics on Municipal Solid Waste Landfills*” y algunos artículos científicos. Con el fin de facilitar la comprensión de las recomendaciones recopiladas, la Tabla 2 resume las consideraciones expuestas en este capítulo.

**Tabla 2.**

*Resumen de los aspectos característicos de sistemas FV en rellenos sanitarios.*

<b>Sobre los sistemas FV</b>	<b>Sobre el relleno</b>
Uso de la tierra	Composición de residuos
Condiciones ecológicas	Anclaje y asentamiento diferencial
Adaptación de la tecnología	Monitoreo de gases, lixiviados y polvo
Infraestructura	Sistemas de anclaje, tierras y peso del sistema
Características del sitio	Geomembranas
Interconexión	Peso del sistema

**3.1 Consideraciones sobre los sistemas fotovoltaicos en rellenos**

Esta sección examina en detalle los problemas relacionados con las características del sitio, la selección de los componentes del sistema FV y el desarrollo de un diseño conceptual basado en las características del sitio y los factores técnicos por considerar al evaluar el potencial del relleno para la instalación de sistemas FV.

### ***3.1.1 Uso de la tierra y condiciones ecológicas***

En primer lugar, el uso del suelo y la cobertura del suelo en el área que rodea el proyecto solar en un relleno pueden afectar el acceso a la radiación solar, ya que los edificios y las áreas boscosas pueden crear obstrucciones o sombras. El uso de la tierra en el área circundante también debe tenerse en cuenta al evaluar los impactos visuales de las alternativas del proyecto. Además de caracterizar el entorno construido en las inmediaciones de un proyecto potencial, es importante comprender su contexto ecológico. Esta información es útil cuando se consideran los impactos de las alternativas de sistemas FV en el entorno natural, ya sea directamente, al comprometer el acceso a la luz solar o alterar la cubierta vegetal que podría servir como hábitat; o indirectamente, al impactar en las condiciones hidrológicas y de sedimentación asociada (Sampson, 2009).

### ***3.1.2 Adaptación de la tecnología fotovoltaica adecuada a las características de los rellenos***

Una vez que las características físicas del relleno han sido analizadas por sus impactos en el proyecto, el siguiente paso es seleccionar las tecnologías del sistema FV apropiadas en función de las características del sitio y los requisitos del relleno. Si bien la información se presenta como

pasos secuenciales, es probable que el proceso de selección de tecnologías fotovoltaicas apropiadas sea un proceso iterativo que examine las compensaciones entre los componentes tecnológicos (Sampson, 2009).

Un paso inicial es la selección del tipo de módulo FV a utilizarse. Los módulos generalmente se evalúan en combinación con sistemas de montaje y con cimientos compatibles. Cada sistema FV integrado (módulos, sistema de montaje y cimientos) se debe evaluar con respecto a la compatibilidad con las condiciones del sitio, como se presenta en la siguiente sección.

Cuando se revisan las opciones para los soportes de cimientos, estas suelen ser cimientos de hormigón vertido poco profundos con balasto, un sistema de anclaje de muelle helicoidal o barrena o una geomembrana integrada con el sistema FV (Mohapatra et al., 2012). Por lo general, los sistemas de montaje de inclinación fija se seleccionan para aplicaciones en rellenos.

Los seguidores solares de uno o dos ejes se evitan en gran medida en las superficies de los rellenos por varias razones<sup>1</sup>. En primer lugar, los sistemas de seguimiento de un solo eje suelen diseñarse con pilotes hincados o cimientos de postes y pilares, que rara vez se utilizan en aplicaciones en estos sitios; mientras que los seguidores de doble eje generalmente requieren grandes cimientos de concreto que suelen ser demasiado pesados para usar en rellenos y también requieren una gran penetración en la tierra (Tansel et al., 2013).

### ***3.1.3 Infraestructura de transporte y transmisión eléctrica***

Los rellenos sanitarios pueden aprovechar la infraestructura civil existente de caminos y líneas de transmisión o distribución para el transporte de equipos durante la construcción y

---

<sup>1</sup> Estos seguidores tampoco se recomiendan para latitudes cercanas al Ecuador, debido a que la variación del recorrido solar no es lo suficientemente significativa como para que sea rentable.

conexión a la red, respectivamente. Las carreteras existentes pueden ser suficientes para transportar los materiales necesarios para la construcción del sistema solar, ya que probablemente estén diseñadas para acomodar los grandes camiones que normalmente se utilizan para transportar los desechos del relleno (Mohapatra et al., 2012). Es posible que se necesiten caminos de acceso adicionales para respaldar la operación y el mantenimiento del sistema FV.

Al evaluar proyectos solares en rellenos, también es importante identificar la ubicación y caracterizar la capacidad de carga total y disponible de las líneas de transmisión o distribución eléctrica cerca del relleno. Es necesario identificar si la energía de un proyecto solar propuesto se puede agregar a las líneas de distribución o transmisión existentes o si será necesario actualizar las líneas existentes para aceptar los niveles futuros planificados y potenciales de energía del proyecto.

#### ***3.1.4 Características del relleno sanitario***

La instalación de sistemas de energía solar fotovoltaica en un relleno puede depender de las características de éste, incluida la presencia de sistemas de ingeniería preexistentes, las características de la cubierta, la pendiente y la estabilidad del relleno, la composición de los desechos, el asentamiento, el control de la erosión y la cubierta vegetal, la recolección de lixiviados y gases y sistemas de tratamiento y gestión de aguas lluvias (Epa et al., 2013).

Es probable que las consideraciones para ubicar el sistema FV en un relleno varíen dependiendo de si el relleno sanitario ya está cerrado o aún no se ha cerrado. Cuando el relleno aún no se haya cerrado, pueden existir oportunidades para diseñar el proyecto solar como un componente integrado del proyecto general de cierre del relleno. Cuando el relleno ya ha sido

cerrado, las alternativas viables pueden estar más restringidas y el análisis de la zona debe considerar las características de la cubierta existente (Epa et al., 2013).

### ***3.1.5 Interconexión***

Todos los sistemas FV conectados a la red requieren un acuerdo de interconexión y no existen condiciones específicas para los sistemas basados en rellenos sanitarios. Un acuerdo de interconexión especifica los términos, condiciones y requisitos de equipo para un sistema FV interactivo con la red. Estos acuerdos generalmente se manejan a través de la empresa de distribución que atiende el sitio y su operador de red. En Colombia, esta actividad es regulada por la CREG según lo dispuesto en la Resolución 174 de 2021 de la CREG.

Según el tamaño del sistema FV y el operador de red, el proceso de interconexión puede llevar tiempo e incurrir en costos. En el caso de sistemas FV grandes que exportan energía a la red, es probable que el proceso sea más detallado y costoso.

## **3.2 Consideraciones sobre las características físicas del relleno**

Las características físicas del relleno influirán en las opciones de diseño del sistema FV. Donde haya poco espacio para modificar componentes específicos del relleno sin comprometer su función, estos componentes representarán una restricción de diseño. Cuando los componentes del relleno se puedan modificar, se tendrá una mayor flexibilidad (Cyrus et al., 2014). En cualquier caso, se debe considerar no solo las características del relleno tal como existen antes de la

construcción del sistema FV, sino también cómo el sistema FV puede alterar esas características (Epa et al., 2013). En última instancia, el diseño debe optimizar el rendimiento del sistema como un todo. Las características de la superficie del relleno sanitario que probablemente influirán en las opciones de diseño del sistema FV incluyen (Szabó et al., 2017):

- Pendiente del relleno y la orientación de la pendiente
- Grosor, profundidad y función de los componentes de la cubierta.
- Requisitos posteriores al cierre, monitoreo, mantenimiento y uso.

Estas características afectarán la selección y el diseño de los tipos de cimientos, los sistemas de montaje, los tipos de módulos FV y el área efectiva para la instalación del sistema FV. El diseño de los sistemas FV debe considerar cómo tener en cuenta estos factores de una manera que maximice la producción que puede lograr el sistema FV sin comprometer la operación segura y efectiva del relleno sanitario. Estas características se abordan en esta sección junto a su impacto en el montaje civil del sistema fotovoltaico.

### ***3.2.1 Composición de los residuos***

La composición de los desechos del relleno puede tener un impacto significativo en el proceso de diseño del sistema FV como resultado del posible asentamiento diferencial (es decir, el hundimiento de una estructura provocado por los esfuerzos en el suelo situado debajo de la misma), así como de la ubicación y función de los sistemas de recolección de lixiviados y gas del relleno ubicados dentro del material de desecho (Patrick et al., 2018).

### ***3.2.2 Asentamiento diferencial por descomposición***

El asentamiento diferencial ocurre cuando el material de desecho se descompone a diferentes velocidades en todo el relleno, lo que resulta en un asentamiento desigual de la tapa del relleno (Patrick et al., 2018). El asentamiento diferencial puede ser el resultado de diversos factores y, a menudo, es el resultado de la variación espacial y/o la falta de homogeneidad en la composición de los desechos (Epa et al., 2013). Este asentamiento resulta de procesos mecánicos, fisicoquímicos y biológicos, y los efectos de estos procesos en términos de asentamiento total y tasa de asentamiento difieren para los diferentes tipos de desechos. Las tasas de asentamiento generalmente disminuyen con el tiempo, aunque pueden aumentar a medida que un relleno sufre cambios en los procesos biológicos activos (Cyrus et al., 2014).

Algunos operadores de rellenos sanitarios hacen pronósticos que estiman el potencial de asentamiento uniforme y diferencial en todo el sitio. Estos pronósticos son útiles para evaluar la magnitud potencial del asentamiento uniforme y diferencial. En su defecto, se debe considerar hacer un pronóstico (Epa et al., 2013).

### ***3.2.3 Gas de relleno y lixiviados***

La composición de los desechos también influye en los requisitos de control de lixiviados y gases de relleno. Es posible que el diseño del sistema FV deba considerar el gas y los lixiviados que normalmente se encuentran asociados a los tipos de desechos en el relleno. La mitigación o prevención de emisiones de gas o lixiviados es una consideración que puede impulsar la selección del montaje y el diseño general del sistema FV. Por ejemplo, la selección de cimientos puede estar restringida para evitar crear fugas o cambiar el balance hídrico en el relleno.

### ***3.2.4 Sistemas de anclaje***

La selección del sistema de anclaje adecuado para el conjunto FV es uno de los pasos más críticos en la fase de diseño, ya que este sistema es el punto físico de contacto entre el sistema FV y la cubierta del relleno. Sobre la base de la información recopilada y las decisiones iniciales, la selección y el diseño final del sistema de anclaje implica equilibrar una serie de factores de diseño específicos de los rellenos sanitarios, incluidos los requisitos de peso del sistema, el asentamiento diferencial y la carga del viento (Patrick et al., 2018).

Se utilizan comúnmente cinco tipos de sistemas de anclaje para soportar sistemas FV en aplicaciones de rellenos (Epa et al., 2013):

- Zapatas de hormigón vertido poco profundas.
- Cimentaciones de hormigón prefabricadas.
- Losas de hormigón.
- Soportes de muelle helicoidales.
- Sistemas lastrados.
- Geomembranas integradas.

Si bien los cimientos de pilotes hincados se usan ampliamente en proyectos FV convencionales, por lo general no son adecuados para aplicaciones de rellenos (Epa et al., 2013). Dado que las cubiertas de los rellenos no siempre tienen una profundidad uniforme, existe el riesgo de que los postes de cimentación perforen la cubierta y el material de desecho se filtre o se comprometan la integridad de toda la superficie cubierta, lo que puede aumentar la amenaza para la salud humana y el medio ambiente.

### ***3.2.5 Geomembranas integradas***

Las geomembranas integradas fotovoltaicas son una solución de tecnología fotovoltaica emergente para aplicaciones en rellenos sanitarios. Una geomembrana con integración fotovoltaica es una cubierta de relleno, que generalmente comprende un material de poliolefina termoplástica, que se puede usar en lugar de una cubierta vegetal u otra cubierta final en el relleno (Patrick et al., 2018). Las geomembranas integradas con energía fotovoltaica generalmente solo se consideran antes de comenzar el proceso de cierre del relleno, ya que pueden ser en gran medida redundantes si se colocan sobre la cubierta final del relleno o pueden requerir la modificación tras el cierre del relleno.

### ***3.2.6 Consideraciones sobre el peso del sistema***

El peso total de un sistema FV convencional, determinado por el peso total del sistema de anclaje, el sistema de montaje y el panel FV seleccionado, es un criterio de diseño clave para los proyectos FV en rellenos sanitarios. Según el peso del sistema y el diseño del sistema de anclaje, se pueden calcular las cargas puntuales de peso muerto, que es la fuerza que el peso del sistema ejerce sobre la cubierta del relleno (Epa et al., 2013; Patrick et al., 2018). La carga de peso muerto del sistema FV debe compararse con la capacidad de soporte de la cubierta del relleno, que es una función de la profundidad y composición de la cubierta del relleno y de la composición del material de desecho en la celda del relleno.

### ***3.2.7 Protección contra rayos y puesta a tierra***

En las aplicaciones de relleno, los sistemas FV deben conectarse a tierra en el suelo, ya sea en áreas de amortiguamiento o en el material de la tapa del relleno, si se determina que el material y el grosor de la tapa son suficientes para disipar la carga eléctrica. Si el sistema FV está conectado a tierra en la tapa del relleno, las varillas de conexión a tierra no deben instalarse verticalmente de modo que perfora en la cubierta del relleno y sobresalgan los materiales de desecho, gases y lixiviados, ya que esto representa un peligro de incendio y explosión (Siqueira & Monteiro Filho, 2021).

### ***3.2.8 Integración con sistemas de monitoreo y producción de gases***

Se debe garantizar que el diseño del sistema FV sea compatible con los sistemas existentes de recolección, monitoreo y generación de gas del relleno (Mohapatra et al., 2012). El principal impacto de los sistemas de gas del relleno en el diseño del sistema FV es que los componentes del sistema FV deben colocarse a una distancia segura de los componentes del sistema de gas del relleno (Epa et al., 2013). Esto como una medida de seguridad contra la generación de chispas que se puede dar en el circuito del sistema FV, pues podría encender el gas de relleno. Además, cuanto más lejos esté el sistema FV de los sistemas de gas de relleno (y recolección de lixiviados) en la superficie del relleno o cerca de ella, es menos probable que los vehículos o equipos pesados de mantenimiento entren en contacto inadvertidamente con los equipos del sistema FV o dañen las tuberías por debajo del nivel del suelo (Patrick et al., 2018).

### ***3.2.9 Control de polvo***

El control del polvo suele ser un requisito para todos los sistemas FV montados en el suelo durante el proceso de construcción, en particular durante la fase de preparación y nivelación del sitio (Epa et al., 2013). El control del polvo generalmente se logra con el uso de camiones cisterna que rocían el suelo recién removido para evitar que los vientos dispersen la tierra fina y suelta por toda el área. El uso de camiones cisterna para el control de polvo es una práctica común durante las actividades de construcción (Patrick et al., 2018). Sin embargo, la principal preocupación es que el peso del camión cisterna no sea demasiado pesado para la superficie de la cubierta del relleno. Así, el uso de camiones cisterna demasiado pesados podría provocar el asentamiento

diferencial de la cubierta del relleno o representar una amenaza para los sistemas de recolección de lixiviados o gases del relleno sanitario (Mohapatra et al., 2012).

#### **4. Potencial energético de la zona**

Este capítulo presenta las características generales de las variables micro-climáticas de la zona en que se ubicaría el sistema FV, con el fin de determinar el potencial energético solar de la locación. Así, para el análisis del potencial energético, es importante conocer las características climáticas de la zona debido a que el desempeño de los sistemas FV está directamente relacionado con estas. El comportamiento de las variables micro-climáticas está determinado por la región geográfica. En Girón (Santander), el clima está clasificado como tropical y tiene un alto promedio de irradiancia solar durante el año. A continuación, se presentan las características de la medición, tales como el equipo de medida usado, las variables registradas, el tiempo de recolección de datos, entre otros, y posteriormente, se presenta un análisis de la medición.

##### **4.1 Medición**

La medición de las variables micro-climáticas se realizó durante ocho meses iniciando el mes de septiembre del 2021 y finalizando el mes de abril del 2022 en un intervalo de 10 minutos por medio de una estación meteorológica (Davis Vantage Pro2) ubicada detrás de los edificios administrativos de El Carrasco, con coordenadas 7°04'44" N 73°09'05" W a una altura de 786

metros sobre el nivel del mar, como se aprecia en la Figura 1. Se hizo seguimiento a las variables micro-climáticas más relevantes: irradiancia, velocidad del viento, temperatura y humedad.

### Figura 1.

*Ubicación geográfica estación meteorológica en El Carrasco*



*Nota.* Tomado de: (Google Earth).

La ubicación de la estación meteorológica se encuentra en un sitio estratégico del terreno puesto que al estar en una parte elevada no presenta interferencias ni obstáculos que pudieran afectar la medición de las variables de interés, esto es posible apreciar en la Figura 2, donde se muestra la estación en sitio, con su debido anclaje al suelo y así mismo la interconexión de este con el trípode de montaje que incluye la estación.

**Figura 2.**

*Ubicación de la estación meteorológica en sitio*



*Nota.* Tomado de: EMAB

#### ***4.1.1 Estación Meteorológica Davis Vantage Pro2***

Las estaciones meteorológicas Davis Vantage Pro2 son equipos que permiten obtener mediciones fiables y con gran precisión de las condiciones climatológicas, tales como la irradiancia, velocidad del viento, dirección del viento, temperatura, humedad, presión barométrica, presión y lluvia, etc. Esta estación toma los datos climáticos exteriores y los envía de forma inalámbrica a una consola a través de radiofrecuencia de baja potencia.

La estación está compuesta básicamente por dos componentes: el primero es el ISS (módulo de sensores integrados), el cual gestionan los sensores externos que se conforman por pluviómetro, anemómetro, sensor de temperatura, sensor de humedad, sensor de radiación solar y sensor de radiación UV; y el segundo es la consola que proporciona la interfaz al usuario junto con la visualización de datos y registro. Las variables meteorológicas registradas fueron:

- Irradiancia solar en  $\frac{W}{m^2}$
- Velocidad del viento en  $\frac{m}{s}$
- Temperatura en °C
- Humedad relativa en %

La Figura 3 presenta la estación meteorológica descrita ubicada en el sitio de interés para llevar a cabo la respectiva recolección de datos. Se aprecian los múltiples sensores.

**Figura 3.**

*Estación meteorológica Davis Vantage Pro2 en el sitio*



*Nota.* Tomado de: EMAB

## **4.2 Perfil climático**

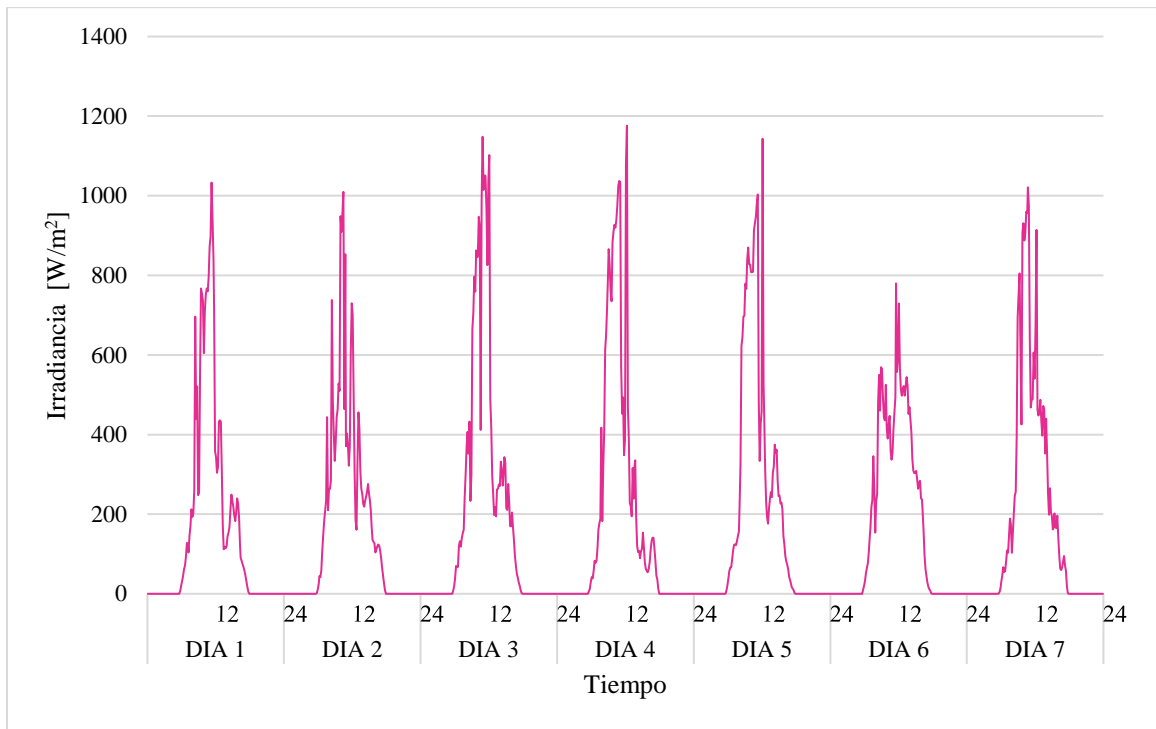
Esta sección presenta las características de los datos medidos. Se graficaron y analizaron las variables meteorológicas de interés registradas con la estación meteorológica, para ilustrar su comportamiento de una mejor manera.

### ***4.2.1 Irradiancia solar***

La irradiancia es el factor meteorológico principal y más importante en el diseño de sistemas FV. Éste representa la potencia proveniente de la radiación del Sol por unidad de área, generalmente su unidad de medida es el Watt por metro cuadrado ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) y a partir de éste es posible realizar los cálculos para el análisis del potencial solar. La Figura 4 representa la irradiancia global durante una semana, es posible notar un patrón similar a lo largo de toda la semana, existiendo picos de irradiancia en las horas cercanas al medio día, que superan los  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$  en 6 de los 7 días.

**Figura 4.**

*Irradiancia solar medida la semana del 6 al 12 de septiembre del 2021.*



Para evaluar el potencial solar de una manera más clara es necesario abordar dos temas claves, la energía promedio y las horas solares pico.

**4.2.1.1 Energía promedio mensual y anual.** La energía o irradiación representa la irradiancia (potencia) en un tiempo determinado, en este caso se analizó para cada mes y para un año. En la Tabla 3 se presenta la energía promedio para los 8 meses de estudio medida con la estación en sitio, donde en promedio la irradiación mensual es de aproximadamente 139  $[kWh/m^2]$ , siendo los meses de enero, febrero y octubre los de mayor irradiación superando los 150  $[kWh/m^2]$  y el mes de abril el de menor irradiación con un valor aproximado de 115  $[kWh/m^2]$ .

**Tabla 3.**

*Energía mensual promedio 8 meses comprendidos entre septiembre del 2021 y abril del 2022.*

Mes	Energía mensual promedio [ $kWh/m^2$ ]
Septiembre	134,44
Octubre	150,96
Noviembre	145,66
Diciembre	138,56
Enero	150,08
Febrero	141,39
Marzo	130,41
Abril	115,84

Teniendo en cuenta que para el análisis se realizó medición de tan solo 8 meses, en total 242 días, se llevó a cabo una proyección anual con los datos disponibles, obteniendo un valor de energía o irradiación solar promedio anual de 1670,2 [ $kWh/m^2/año$ ], lo que representa un recurso solar adecuado, por ejemplo, representa aproximadamente un 76,3% del recurso solar registrado en La Guajira (2190 [ $kWh/m^2/año$ ]), región que presenta el mayor valor de disponibilidad promedio de energía multianual en Colombia.

Si se observan otras regiones como la costa atlántica con 1825 [ $kWh/m^2/año$ ], el valor medido por este estudio representa el 91,51% del valor total de esta zona, mientras que si se compara con la región con menor disponibilidad de energía como lo es la costa pacífica (1278 [ $kWh/m^2/año$ ]), el valor anual en sitio representa el 130,69%. Por último, si se compara con el valor de la región en donde nos encontramos, es decir, andina (1643 [ $kWh/m^2/año$ ]) este representa el 101,65% de su valor (UPME-IDEAM 2005, pág. 20).

La Tabla 4 representa la irradiación promedio anual medida mediante tres estaciones meteorológicas (E1, E2 y E3) ubicadas en áreas estratégicas de la ciudad de Bucaramanga por la Corporación de la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB entre el año 2009 y 2012, y la

estación ubicada en la Universidad Industrial de Santander UIS (E4) en el año 2010. Donde se puede observar en la mayoría de los casos valores muy cercanos a los obtenidos por la estación meteorológica ubicada en el Carrasco (1670,2 [ $kWh/m^2/año$ ]) (VERGARA et al., 2014).

**Tabla 4.**

*Energía promedio anual (VERGARA et al., 2014).*

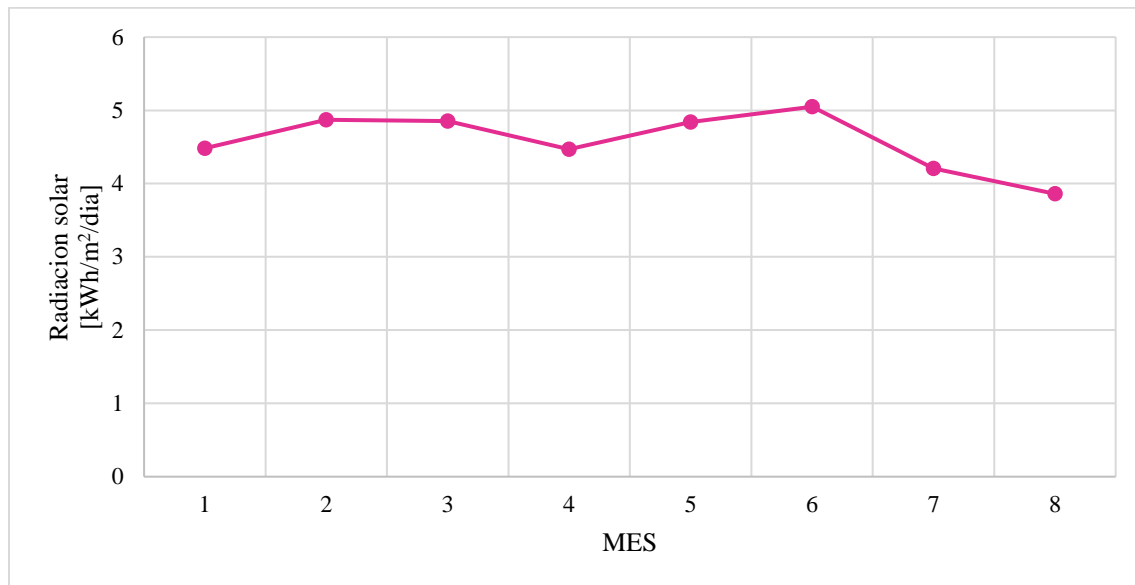
Estación	Año	Energía anual promedio [ $kWh/m^2$ ]
E1	2009	1722,2
	2010	1734,0
	2011	2016,7
E2	2011	1646,2
	2012	1715,1
E3	2010	1553,5
	2011	1673,7
E4	2012	1698,5
	2010	1186,6

**4.2.1.2 Horas solares pico (HSP).** La hora solar pico (HSP), podría definirse como una unidad encargada de medir la irradiación solar y definirla como el tiempo (en horas) de una hipotética irradiancia solar constante de 1.000 W/m<sup>2</sup>. Así entonces una irradiación mayor a 3 HSP se torna útil para la instalación de energía solar fotovoltaica (Igrahim et al., 2012).

De esta manera, la Figura 5 representa la radiación solar promedio día expresada en [ $kWh/m^2$ ] que corresponde también a las horas solares pico de cada uno de los ocho meses en que se realizó seguimiento, donde el mes inicial fue septiembre del 2021 y el final abril del 2022. Se observa que en promedio aproximadamente 4,58 HSP, teniendo un comportamiento ciertamente estable a lo largo de los 8 meses, siendo febrero el que presenta mayor radiación promedio por día, alcanzando las 5,05 HSP.

**Figura 5.**

*Radiación solar u horas pico solar de 8 meses comprendidos de septiembre del 2021 hasta abril del 2022.*



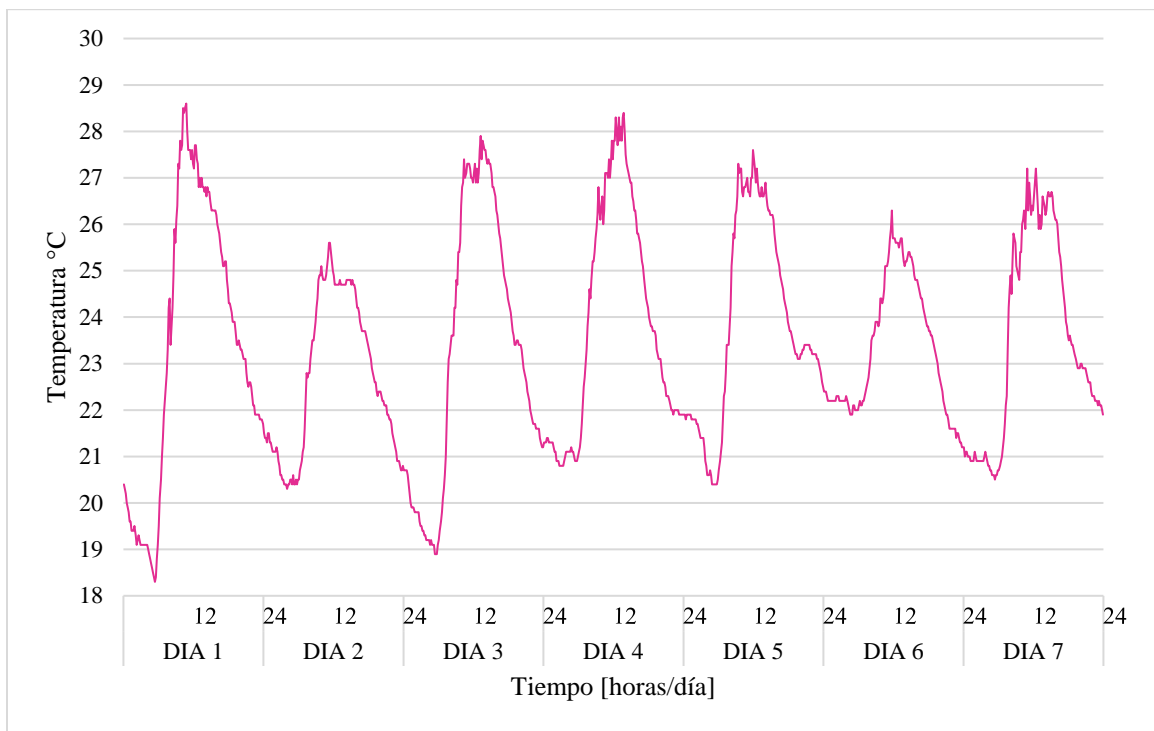
Así entonces es posible afirmar que en promedio se cumple con el criterio previamente descrito para considerar un potencial solar como útil para el funcionamiento de proyectos con paneles solares FV ( $\geq 3$  HSP).

#### **4.2.2 Temperatura ambiente**

Al igual que la irradiancia solar, la temperatura tiene una gran importancia para el estudio y diseño de sistemas FV. La Figura 6 muestra la temperatura ambiente del 6 al 12 de septiembre del 2021, en donde es posible notar un patrón similar durante todos los días, con picos superiores al medio día cercanos a los 27 °C y picos inferiores después de la media noche donde la temperatura más baja se presenta al amanecer con valores cercanos a los 20 °C.

**Figura 6.**

*Temperatura medida la semana del 6 al 12 de septiembre del 2021.*

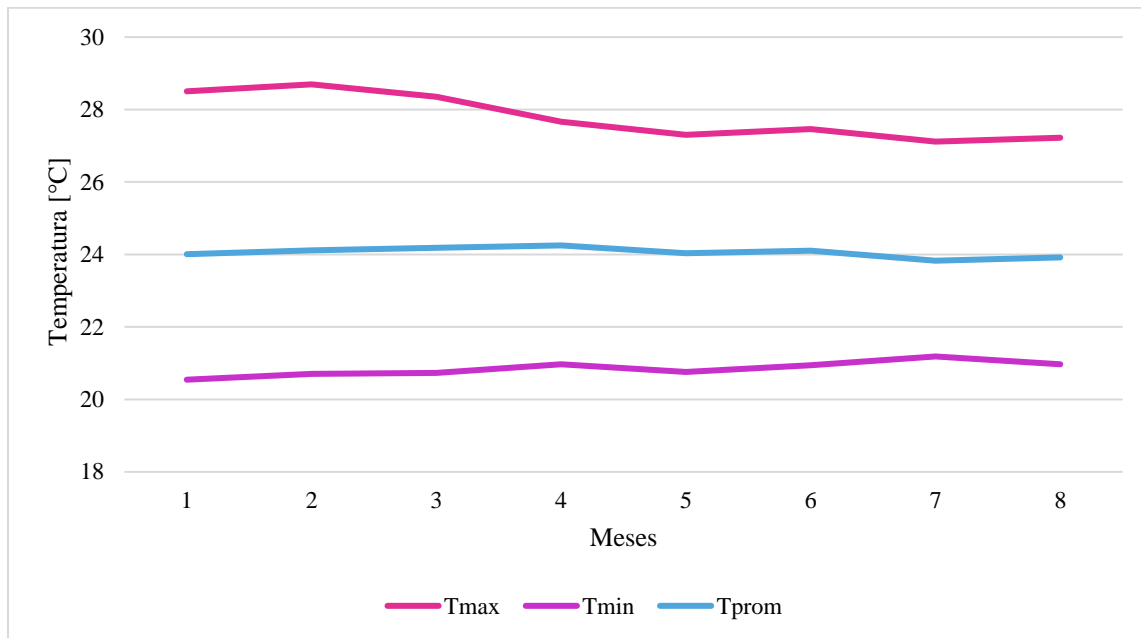


Es importante estudiar la variación de la temperatura a lo largo de los 8 meses medidos para tener una base sólida de datos, y poder considerar el efecto negativo de la temperatura ambiente en la operación de los paneles FV. La

Figura 7 representa el promedio de cada mes de temperatura máxima, mínima y media, donde se puede ver comportamientos muy estables durante los 8 meses con temperatura promedio de 24,05°C, presentándose una temperatura máxima de 27,79°C y una mínima de 20,85.

**Figura 7.**

*Temperatura máxima, mínima y promedio de 8 meses (septiembre del 2021 hasta abril del 2022).*



#### **4.2.3 Velocidad del viento**

La velocidad del viento mide la componente horizontal del desplazamiento del aire en un punto y un tiempo determinado en metros por segundo [m/s]. En la Figura 8 se observa el comportamiento de la velocidad del viento a lo largo de una semana comprendida entre el 6 y 12 de septiembre del 2021 medido con la estación meteorológica en sitio. Se observa que la mayor parte de cada día se reportan velocidades entre 0 – 1,5 m/s. Estas velocidades son clasificadas como vientos en calma y aire ligero, de acuerdo a la escala de Beaufort (ver Tabla 5). Los momentos más críticos ocurren alrededor del medio día con una velocidad máxima alcanzada de 5,4 m/s, que se encuentra en el límite entre brisa suave y moderada.

En la Figura 8 se aprecia que la velocidad del viento tiene un comportamiento similar cada día de la semana con picos de velocidad en horas cercanas al medio día, es posible notar que en 6 de los 7 días los picos de velocidad se encuentran entre los 5,5 y 6,2 m/s; lo que representaría los valores más críticos de esta variable.

**Tabla 5.**

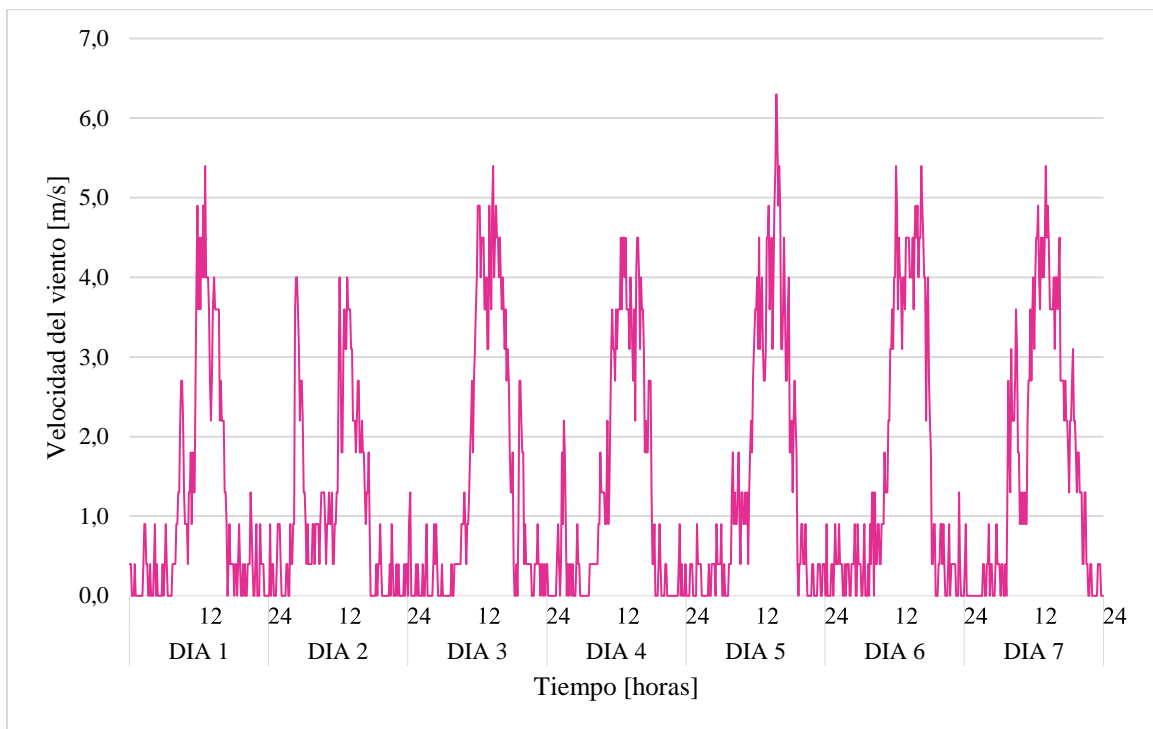
*Escala de Beaufort de clasificación de vientos según velocidad.*

<b>Escala</b>	<b>Denominación</b>	<b>Descripción del efecto de viento</b>	<b>Rango de velocidad (m/s)</b>
<b>0</b>	Calma	Calma, el humo asciende verticalmente	0 – 0,2
<b>1</b>	Aire ligero	El humo indica la dirección del viento	0,3 – 1,5
<b>2</b>	Brisa ligera	Se mueven las hojas de los árboles, empiezan a moverse los molinos	1,6 – 3,3
<b>3</b>	Brisa suave	Se agitan las hojas, ondulan las banderas	3,4 – 5,4
<b>4</b>	Brisa moderada	Se levanta polvo y papeles, se agitan las copas de los árboles	5,5 – 7,9
<b>5</b>	Brisa fresca	Pequeños movimientos de los árboles, superficie de los lagos ondulada	8 – 10,7
<b>6</b>	Viento fresco	Se mueven las ramas de los árboles, dificultad para mantener abierto el paraguas	10,8 – 13,8
<b>7</b>	Viento fuerte	Se mueven los árboles grandes, dificultad para andar contra el viento	13,9 – 17,1
<b>8</b>	Viento duro	El viento rompe las ramas, es imposible la marcha contra el viento	17,2 – 20,7
<b>9</b>	Viento muy duro	El viento ocasiona ligeros daños en las viviendas (arranca cañerías, chimeneas, tejados)	20,8 – 24,4
<b>10</b>	Temporal	Raro en los continentes, árboles arrancados, importantes daños en las viviendas	24,5 – 28,4
<b>11</b>	Borrasca	Observado muy raramente, acompañado de extensos destrozos	28,5 – 32,6
<b>12</b>	Huracán	Estragos graves y extensos	$\geq 32,7$

*Nota.* Tomado de: Retallack, (1991)

**Figura 8.**

*Velocidad del viento medida la semana del 6 al 12 de septiembre del 2021.*



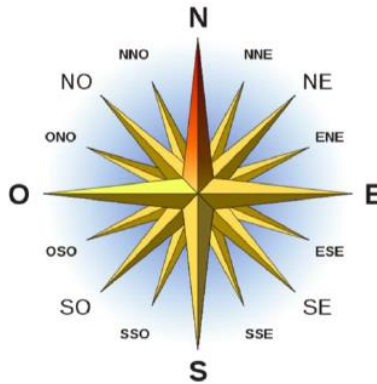
#### ***4.2.4 Dirección del viento y rosa de vientos***

La dirección mide la componente horizontal de la velocidad del viento, fue posible la medida de este mediante la veleta de la estación Davis antes descrita. Es de gran importancia tener en cuenta que la dirección indica de donde viene el viento, no hacia dónde va. La dirección del viento se mide en grados de 0 a 360 grados girando en el sentido de las agujas del reloj. La Figura 9 presenta una representación gráfica de direcciones con 16 puntos así:

- Cuatro Puntos Cardinales: Norte, Sur, Este y Oeste.
- Cuatro Puntos Laterales: Noreste, Noroeste, Sureste y Suroeste.
- Ocho Puntos Colaterales: NNE, ENE, NNO, ONO, SSE, ESE, SSO y OSO.

**Figura 9.**

*Direcciones espaciales de 16 puntos*



*Nota.* Tomado de: Lifeder (s.f.) *para que sirva rosa vientos* <https://www.lifeder.com/para-que-sirva-rosa-vientos/>

Para el análisis se obtuvieron datos de velocidad y dirección del viento de 158 días, normalmente, cuando se realizan estudios de velocidad y dirección del viento se toma una cantidad de datos históricos de manera anual, al no tener más datos medidos se procedió a extrapolar los datos 2,31 veces, para así obtener un aproximado anual.

Realizando el análisis de los datos obtenidos, se observó que la mayor parte del tiempo (38%) el viento proviene de la dirección norte, noroeste y nor-noroeste, un 16% de las direcciones nor-noreste, suroeste y oeste-suroeste, un 21% las restantes 10 direcciones; mientras, que en un 25% del tiempo no hay viento, como se puede observar en la Figura 10-a.

En lo que respecta a la velocidad promedio los vientos provenientes de las direcciones sur aparte de tener una menor presencia también representan valores bajos de velocidad promedio, siendo inferiores a 1 m/s; mientras que en los vientos provenientes de las direcciones norte la velocidad promedio se encuentra entre 1,7 y 3,2 m/s, tal como se muestra en la Figura 10-b.

**Figura 10.**

*Rosa de vientos de las medidas registradas de velocidad y dirección del viento.*



a) Rosa de frecuencia de dirección del viento

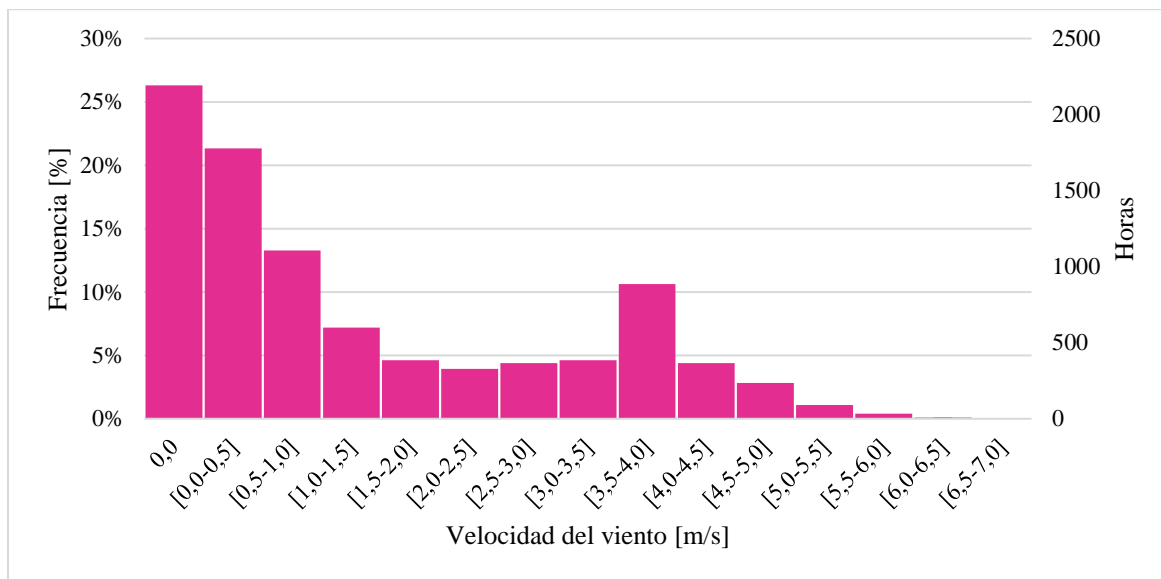
b) Rosa de velocidad promedio y dirección del viento.

En cuanto a la distribución de la velocidad del viento, se concentra la mayor parte en los valores menores a 1,5 m/s con un 58% del tiempo total, a excepción del rango entre 3,5 y 4 m/s que logra una significativo 10%, como se puede identificar en la

Figura *11*.

**Figura 11.**

*Distribución de la velocidad del viento en porcentaje de frecuencia y horas.*



Según lo descrito, es posible afirmar que el viento en El Carrasco presenta una pobre calidad en lo que respecta al potencial eólico, mientras que para el potencial solar representa una favorabilidad, ya que la circulación de aire influirá positivamente en la temperatura de operación de los paneles FV.

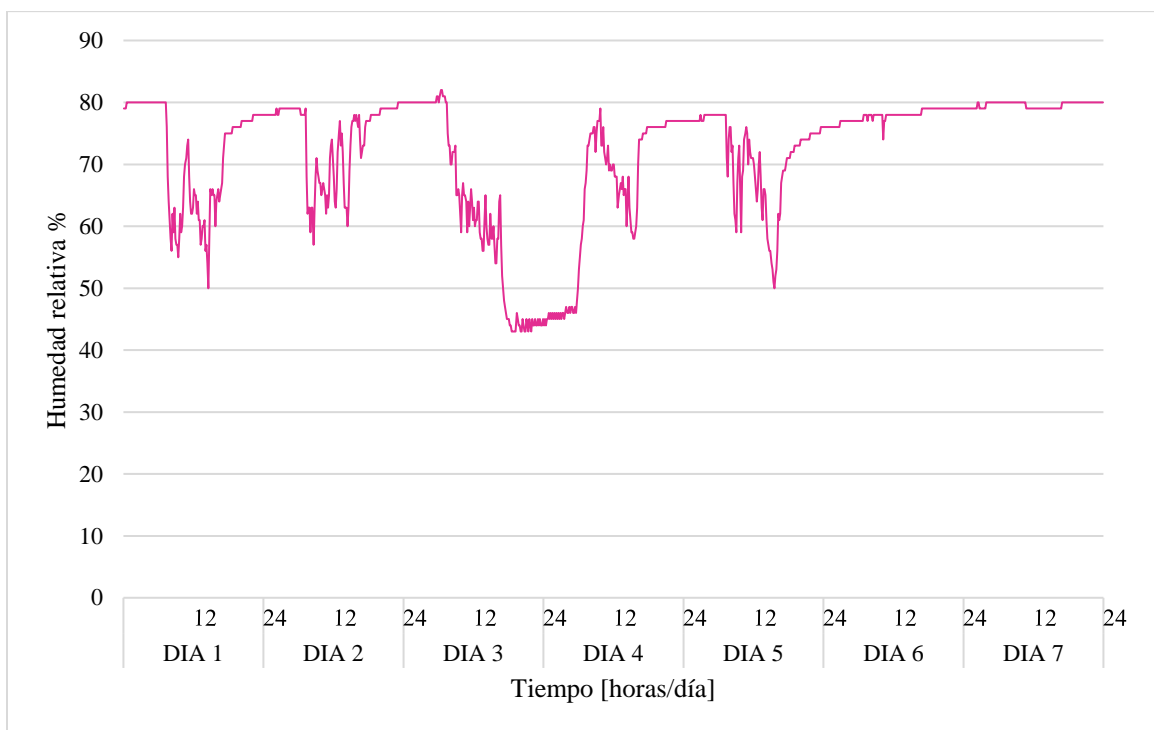
#### **4.2.5 Humedad**

La humedad es un componente natural de la atmosfera y describe la cantidad de vapor de agua presente en el aire, en condiciones normales siempre hay presencia de vapor de agua en el aire y la cantidad va a depender de diferentes factores, como lo pueden ser la temperatura ambiente, cercanía a masas de agua, frecuencia de lluvias, etc. La Figura 12 muestra la humedad relativa de una semana, donde se observa que en el primer día en promedio hay un 72% de humedad diaria.

En las horas de ausencia del Sol se encuentra cercana al 80%, mientras que durante el día cae a valores que oscilan entre 50 y 70%. Al analizar en la gráfica la semana completa es posible ver que la humedad en sitio tiene un comportamiento similar a lo largo de la semana, donde se puede observar una caída en el porcentaje de humedad en las horas del día.

### Figura 12.

*Humedad relativa medida la semana del 6 al 12 de septiembre del 2021.*



### 4.3 Comparativo de variables micro-climáticas entre diferentes fuentes

Esta sección establece una comparación entre las variables medidas a través de la estación meteorológica en sitio y dos fuentes de datos en línea, las cuales se enuncian a continuación.

#### ***4.3.1. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)***

PVGIS es una herramienta gratuita en línea (<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>) que tiene el fin de facilitar el estudio del recurso solar y potencial FV, proporcionando datos de irradiación solar y temperatura en una ubicación geográfica elegida. Esta desarrollado por la Unión Europea, más específicamente por la EU Science Hub. Esta herramienta resulta muy útil para realizar estudios de viabilidad de sistemas FV.

#### ***4.3.2. NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER)***

Nasa Power es una herramienta en línea (<https://power.larc.nasa.gov/>) que brinda conjuntos de datos solares y meteorológico. Esta herramienta es útil para el desarrollo de energías renovables, eficiencia energética y aplicaciones agrícolas.

Para la comparación se utilizaron datos de las siguientes características:

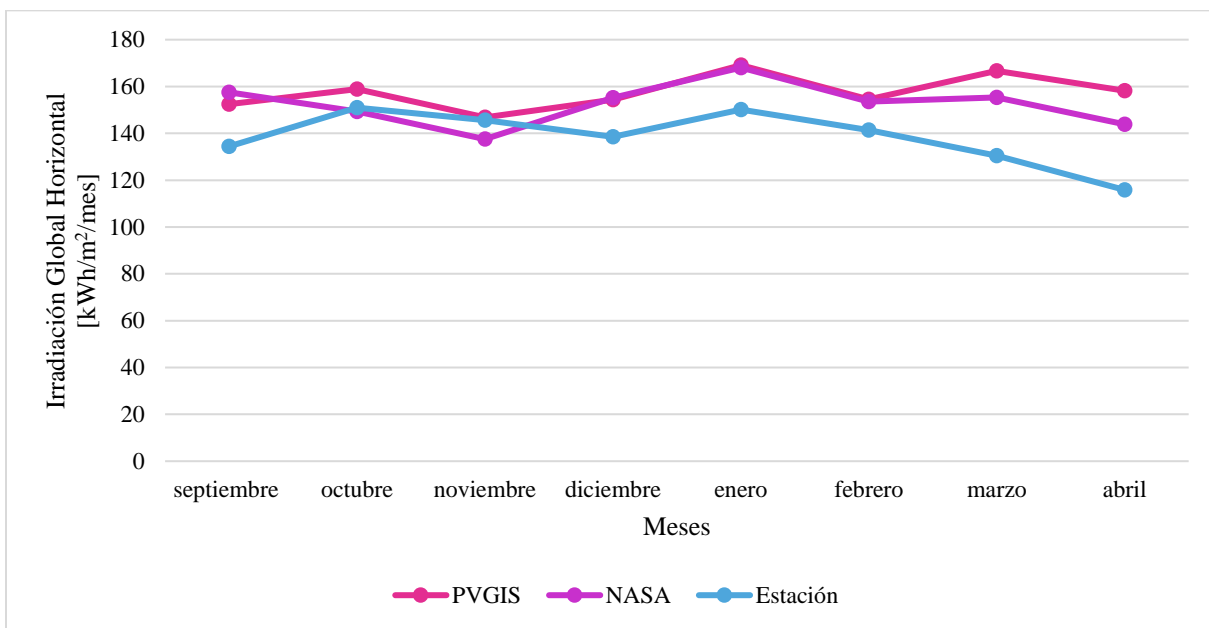
- Datos mensuales de la estación meteorológica desde septiembre del 2021 hasta abril del 2022
- Datos promedio mensuales desde el año 2009 hasta el año 2021 obtenidos de la base de datos de la Nasa.
- Datos promedio mensuales desde el año 2005 hasta el año 2015 obtenido de la base de datos de PVGIS.

**4.3.3 Irradiación**

La irradiación es la representación de la energía del sol en un área y tiempo determinado. La Figura 13 representa la irradiación mensual de las tres fuentes de datos en cada uno de los meses medidos en la estación, de donde es posible notar un comportamiento muy similar a lo largo del año.

**Figura 13.**

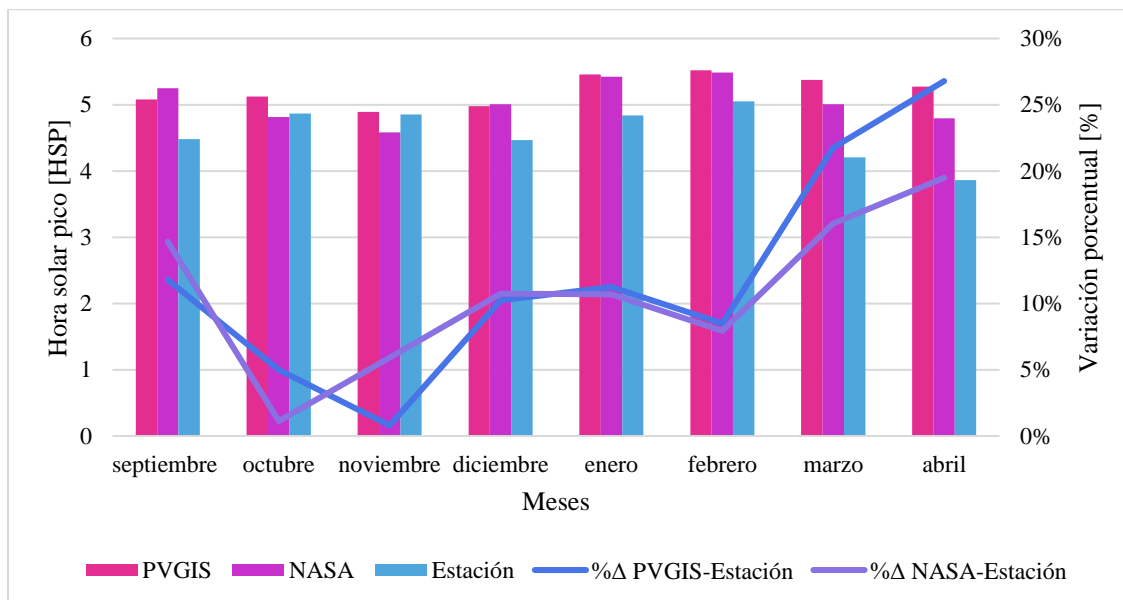
*Irradiación mensual de PVGIS, NASA Power y la Estación meteorológica.*



La Figura 14 presenta las horas solares pico de un día promedio desde las tres fuentes de datos antes mencionadas, donde es posible ver un menor valor en los datos obtenidos por la estación meteorológica y una variación considerable de la misma, en especial en los meses de marzo y abril. Esta variación en los datos es principalmente por la diferencia en el tiempo de toma de muestras (diferentes años) y debido a un largo periodo de lluvias en el año 2021 y 2022.

**Figura 14.**

*Hora solar pico de PVGIS, Nasa POWER y la Estación meteorológica.*



A continuación, se procedió a realizar el análisis comparativo de la variación porcentual en las tres fuentes de información, en este caso se comparó los datos obtenidos en PVGIS con los de la estación meteorológica en sitio y los datos obtenidos de la Nasa POWER y los de la estación meteorológica tal como se puede observar en la figura anterior.

De la información obtenida en la Figura 14 se encontró que para las dos graficas se presenta un comportamiento similar, aunque se evidencia que en los meses de marzo y abril existe una variación de los datos de 22% y 26%, respectivamente, en el caso de PVGIS, y 16% y 19 %, respectivamente, en el caso de NASA POWER. En los demás meses se encuentran valores de entre 0% y 15% en el caso de NASA POWER y entre 0% y 11% en el caso de PVGIS.

La variación que se presenta es posiblemente por una serie causas como:

- El periodo de medición: en el caso de la estación meteorológica en sitio se tomó la medida de los meses de septiembre del 2021 hasta abril del 2022, es decir, solo se

tomó una muestra por mes. Mientras que el periodo de medición de la base de datos Nasa POWER que se tomó un promedio de cada mes desde el 2009 hasta el 2021. Así mismo, los datos obtenidos en PVGIS se tomaron en un promedio mensual desde el 2005 hasta el 2015.

- El tipo medición: en el caso de la estación meteorológica se tomaron medidas del microclima del sitio, mientras que Nasa POWER y PVGIS establecen las medidas por medio de un modelo que aproxima las variables climáticas al microclima de la zona.

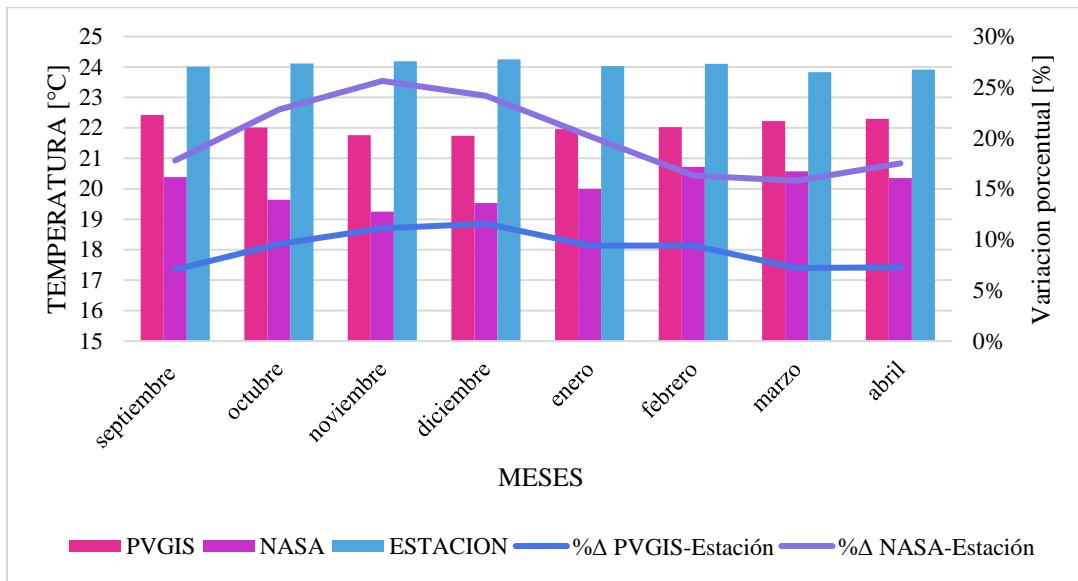
#### ***4.3.4 Temperatura ambiente***

La

Figura **15** presenta los valores promedio de temperatura ambiente en algunos meses del año de las tres fuentes de datos obtenidas, las cuales aunque presentan un comportamiento similar, los datos de la estación están considerablemente por encima de los otros dos, esto se deberá a que se midieron en una línea de tiempo diferente y que presenta una diferencia en la cantidad de datos, es decir en la estación solo fue 1 dato por mes, mientras que en PVGIS se obtienen 10 datos por mes y, por último, el NASA POWER presenta 12 datos por mes.

**Figura 15.**

*Temperatura ambiente mensual de Nasa POWER y la Estación meteorológica.*

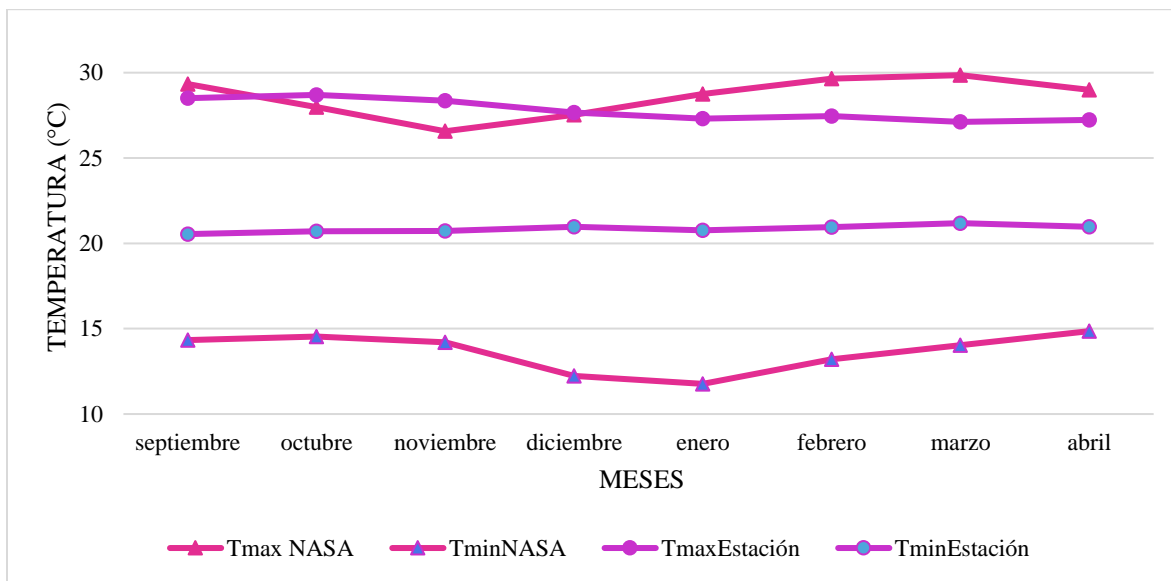


Al compararse los datos obtenidos en la base de datos de PVGIS y Nasa POWER con los de la estación meteorológica en sitio. Se evidencia una gran variación, pues se evidencia un cambio entre 6 y el 11% entre los datos de PVGIS y la estación meteorológica y un 15 al 25% en el caso de NASA POWER y la estación meteorológica.

En cuanto en los valores extremos de la temperatura ambiente, se presentan en la Figura 16, y fue obtenida de la base de datos de NASA POWER y la estación en sitio, donde los valores máximos rondan los 30 °C en los dos casos, mientras que los valores mínimos si difieren ampliamente. En la estación meteorológica los valores mínimos de temperatura son muy cercanos a los 20 °C.

**Figura 16.**

*Temperatura máxima y mínima de Nasa POWER y la Estación meteorológica.*



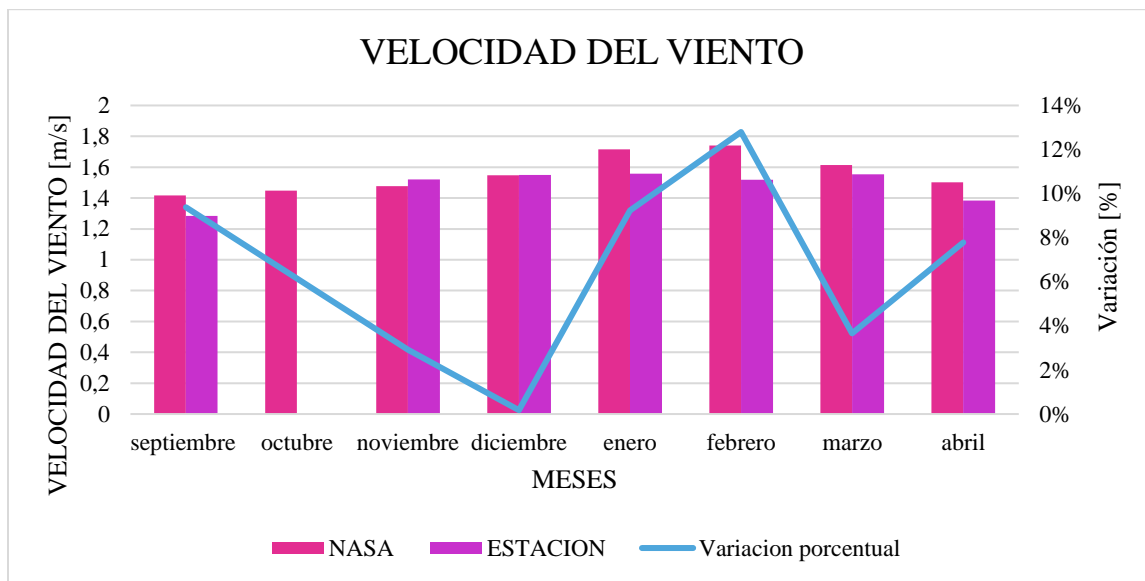
Así, se afirma que los datos medidos de temperatura en la estación meteorológica presentan una ventaja a la hora del pre-dimensionamiento, porque, a pesar de que tienen un comportamiento similar a las otras fuentes de datos, son los que tienen valores mayores y evitaría subestimar los efectos de la temperatura. Este mismo fenómeno se aprecia para las demás variables.

#### **4.3.5 Velocidad del viento**

A partir de la Figura 17 es posible observar el promedio mensual de velocidad del viento obtenido de la base de datos de la NASA y los obtenidos mediante la estación meteorológica en sitio, en la cual es posible observar un comportamiento similar a lo largo de los meses, pero con una brecha mayor en los meses de enero y febrero.

**Figura 17.**

*Velocidad del viento mensual de Nasa POWER y la Estación meteorológica.*



Es indispensable cuantificar la variación porcentual entre dos fuentes de información, tal y como se ve en la Figura 17. Con base a la información obtenida por la estación meteorológica en sitio y la base de datos de NASA POWER, se evidencia un porcentaje de error que va desde el 0,18% hasta 12,8%. El error que se presenta es posiblemente por una serie causas como:

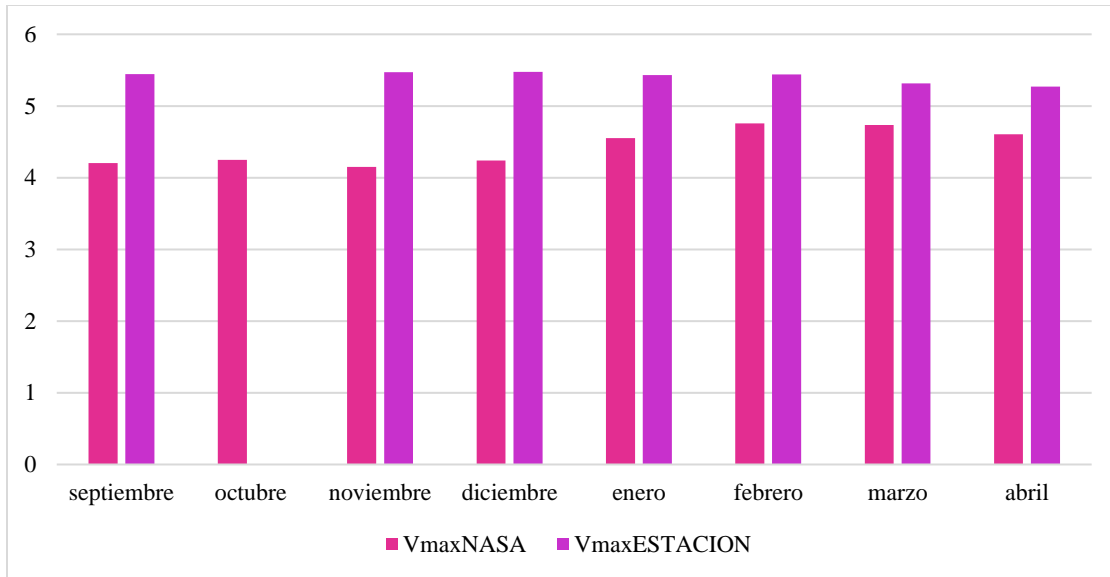
- El periodo de medición, en el caso de la estación meteorológica en sitio se tomó la medida de los meses de septiembre del 2021 hasta abril del 2022, es decir, solo se tomó 1 muestra por mes. Mientras que el periodo de medición de la base de datos Nasa POWER se tomó un promedio de cada mes desde el 2009 hasta el 2021.
- El tipo de medición, en el caso de la estación meteorológica se tomaron medidas del microclima del sitio, mientras que NASA POWER establecen las medidas por medio de un modelo que aproxima las variables climáticas al microclima en sitio.

La parte más crítica de la velocidad del viento es cuando es máxima, pues en la Figura 18 se puede observar los valores máximos mensuales del viento en donde se encuentra una mayor magnitud en los datos medidos por la estación, así que, aunque en promedio los valores del viento

diario son muy similares, se observa una velocidad máxima más crítica en los datos medidos por la estación en el año 2021 y 2022.

**Figura 18.**

*Velocidad del viento máxima mensual de Nasa POWER y la Estación meteorológica.*

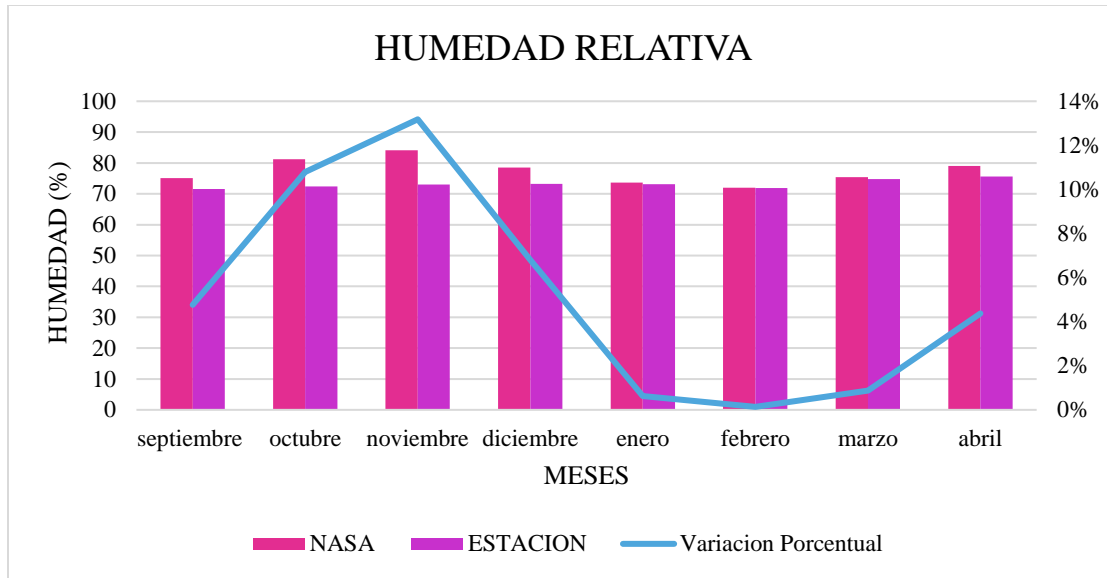


**4.3.6 Humedad**

La humedad se comporta de una manera cuasi constante durante el año y presenta una ligera variación entre los datos medidos por la estación y la base de datos de la NASA como se puede observar en la Figura 19.

**Figura 19.**

*Humedad relativa mensual de Nasa POWER y la Estación meteorológica.*



Al igual que con la velocidad del viento, es necesario el análisis de la variación porcentual entre las bases de datos que se están comparando. En este caso las obtenidas por la estación meteorológica en sitio y la información obtenida de NASA POWER. La línea azul de la Figura 19 representa el comportamiento de la variación porcentual mes a mes entre las dos fuentes de información, donde se encuentran errores bajos que se acercan a 0% en enero, febrero y marzo, y unos un poco más altos que se acercan al 14% en octubre y noviembre.

## **5. Predimensionamiento del sistema fotovoltaico**

El paso final para la consecución del objetivo general de este trabajo es realizar el predimensionamiento del sistema FV conectado a la red. Este dimensionamiento se hace considerando el área disponible y las tecnologías presentes con el apoyo del software PVSYST (v7.2), a partir de la información recogida por la estación meteorológica, la ubicación, entre otros.

### **5.1 Consideraciones iniciales**

El proceso de dimensionamiento en PVSYST, en general para cualquier software o estrategia de dimensionamiento, requiere recoger información concerniente a la ubicación y las condiciones meteorológicas (irradiancia, temperatura y viento). A continuación, se presenta un resumen sobre los datos iniciales usados para el dimensionamiento.

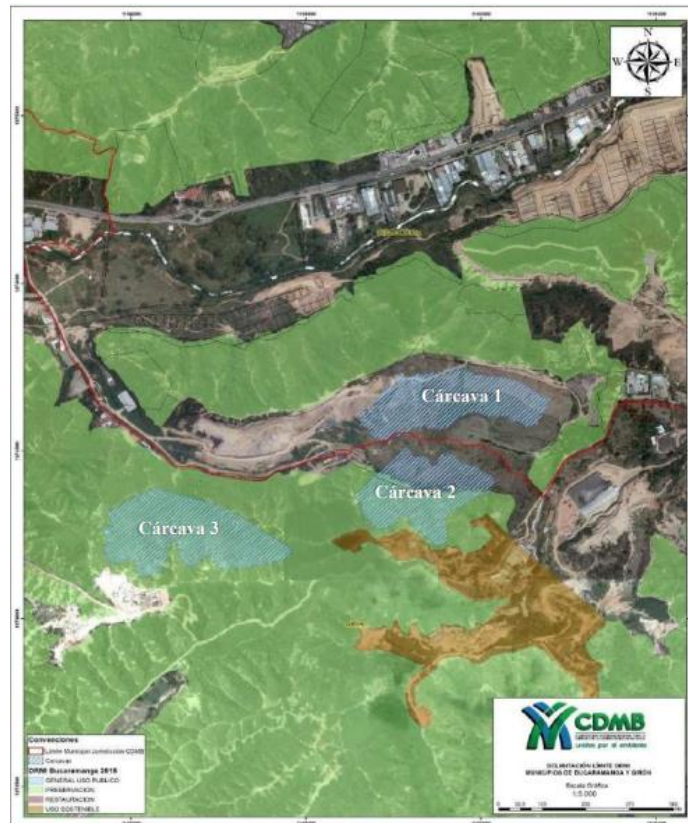
#### ***5.1.1 Características de la ubicación***

El sistema FV se planea ubicar en una zona abierta sobre el relleno sanitario El Carrasco. Este relleno se encuentra ubicado en inmediaciones de los municipios de Bucaramanga y Girón, en Santander (Colombia). La ubicación cuenta con un clima tipo tropical de sabana, descrito en detalle en el Capítulo 3. La ubicación exacta de la locación es  $7^{\circ}04'44''\text{N}$   $73^{\circ}08'37''$  con una elevación de 849 msnm, a tan solo  $7^{\circ}$  del Ecuador terrestre, lo cual da, en principio, una ubicación adecuada para el aprovechamiento del recurso solar durante todo el año.

El sitio de disposición final se encuentra compuesto principalmente por 3 cárcavas, como se puede apreciar en la Figura 20. La cárcava 1 tiene un área aproximada de 7 hectáreas y está compuesta por la zona 1 que se encuentra clausurada y la zona 2 que es el sitio donde se dispone en la actualidad; mientras que la cárcava 2 fue el lugar en el que se realizó la disposición de residuos en los años comprendidos entre 1978 y 1985 el cual llevaba el nombre de botadero a cielo abierto Malpaso. Por último, la cárcava 3 tiene un área aproximada de 12 hectáreas, en donde no se ha realizado ningún tipo de intervención (Sanguino, 2020). La cárcava 1 fue la zona principal para este trabajo y la Figura 21 presenta su configuración.

### Figura 20.

*Distrito regional de manejo integrado de Bucaramanga*



*Nota.* Tomado de Sanguino, (2020) p 117

**Figura 21.***Distribución de las cárcavas y celdas en El Carrasco**Nota.* Tomado de Sanguino, (2020) p 119

Con el fin de elegir una posible localización del proyecto se realizaron unas visitas de campo en la que se encontró que, en la cárcava 1, había una zona en la cual el terreno era mayoritariamente plano y además se encontraba ubicado en una cúpula libre de posibles obstáculos naturales como montañas cercanas, reduciendo la posibilidad de sombreados. Este terreno se encuentra ubicado en la celda 1 de la cárcava I, en una zona conocida como “Domo” que puede verse en la

Figura 22.

**Figura 22.**

*Localización del domo de la celda 1*



*Nota.* Tomado de: Adaptado de Google Earth).

El domo de la celda 1 presenta una fracción no aprovechable que son: vías de acceso, curvaturas de terreno, entre otros. Por tal razón, el área de trabajo es menor, y es posible verla en la Figura 23, donde se obtiene a través de la herramienta de Google Earth el valor de área de aproximadamente  $7310 \text{ m}^2$ .

**Figura 23.**

*Área de estudio delimitada en amarillo. Obsérvese el área total de 7309 m<sup>2</sup>*



*Nota.* Adaptado de Google Earth

**5.1.2 Recursos y condiciones climáticas**

Como se discutió ampliamente en el Capítulo 3, la locación cuenta con una temperatura templada y unas corrientes de viento de hasta 6 m/s, aunque en su mayoría el viento es leve tipo brisa suave. En el caso de la irradiancia solar, la Figura 4 presenta el comportamiento de una semana de la irradiancia solar, donde se observa un comportamiento que corresponde con nubosidades típicas de las regiones montañosas de la cordillera, no obstante, en término de irradiación, la locación recibe entre 4 y 5 HSP en promedio. Los datos usados para la simulación se tomaron de los registrados por la estación meteorológica y complementados con las bases de datos (PVGIS) para aquellos meses en que no se tiene registro.

## 5.2 Estrategia de dimensionamiento

El software PVSYST es un software popular en el dimensionamiento de sistemas que incluyan paneles fotovoltaicos. Cuenta con diversas fuentes de datos para información meteorológica, fabricantes de paneles fotovoltaicos, inversores y baterías, entre otros. El software es relativamente fácil de usar, pues cuenta con alertas y sugerencias sobre los pasos subsiguientes para el dimensionamiento.

### 5.2.1 Interfaz de PVSYST

La interfaz principal de PVSYST presenta dos secciones, una superior y una inferior. En la superior (*Proyecto*) se registra la información básica del proyecto, es decir, las condiciones de la ubicación (coordenadas geográficas e información climática), mientras que en la sección inferior (*Variante*) se encuentran una serie de botones que permiten configurar, registrar y definir las condiciones para la simulación. Cada uno de estos botones abre una ventana con los campos necesarios para rellenar, donde, por ejemplo, el botón Sistema abre la ventana que permite incluir el tipo de paneles y de inversores, y junto a su asistente y algoritmos internos definir la mejor tecnología para cubrir una determinada área con sistemas FV o alcanzar una determinada capacidad instalada. La

Figura **24** presenta la interfaz principal, mientras que la Figura 25 presenta la interfaz de la ventana de Sistema.

Figura 24.

Interfaz principal de PVSYST. La sección superior se destaca en verde y la sección inferior en azul.

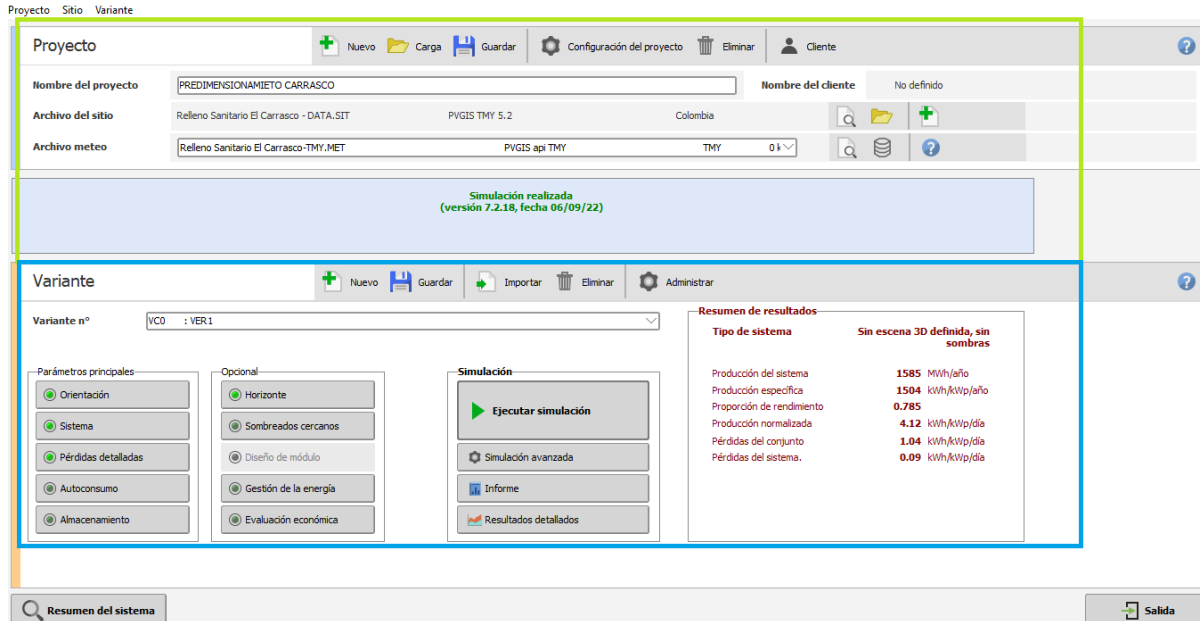
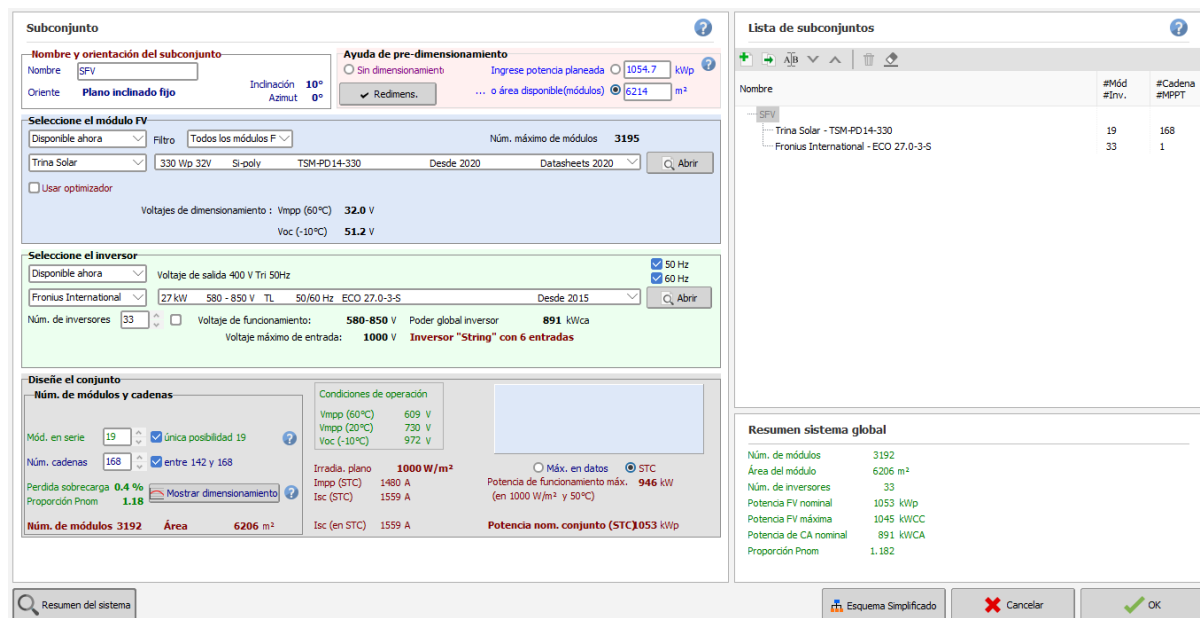


Figura 25.

Interfaz del botón Sistema de PVSYST.

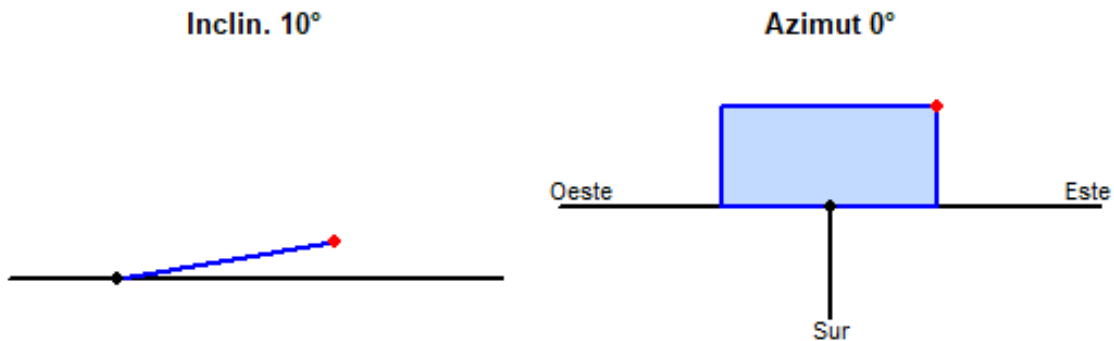


### 5.2.2 Procedimiento de dimensionamiento

El proceso de dimensionamiento se realizó siguiendo las sugerencias del software. En primer lugar, se especifica el nombre del proyecto, el archivo del sitio (ubicación geográfica) y el archivo meteorológico, donde se incluye la información de los perfiles de irradiancia, temperatura, viento y humedad. Seguidamente, se sigue la definición del azimut y la inclinación de los paneles solares. En este caso se optó por un sistema inclinado  $10^\circ$  de cara al sur (Azimut de  $0^\circ$ ) como se muestra en la Figura 26.

#### Figura 26.

*Inclinación y azimut seleccionados para la instalación FV.*



Seguidamente, se seleccionan la referencia de panel FV y del inversor en el botón de sistema. Para esto, antes de definir los componentes, se debe incluir el área disponible o la capacidad instalada esperada. En el caso de este trabajo, el área total es de  $7310 m^2$ , sin embargo, se destinará un  $15\%^2$  de esta área para la circulación del personal de mantenimiento y para el

---

<sup>2</sup> Las fuentes consultadas no recomiendan un área para la circulación, pues es una decisión que depende de cada proyecto y la experiencia de los diseñadores. Se determinó el valor de 15% de manera conservadora, con el fin de aprovechar la mayor cantidad de área y aun así dejar un espacio suficiente en caso de que se requiera.

espaciamiento de los sistemas tal que no existan sombreados de un panel sobre otro. Así, el área efectiva para los paneles es de  $6214 \text{ m}^2$ .

Los componentes seleccionados fueron el panel solar Trina Solar de 330 W referencia TSM-PD14-330, mientras que el inversor es un Fronius International de 27 kW referencia ECO 27.0-3-S MPPT de 6 entradas. La referencia de panel seleccionada queda a discreción del diseñador. En el caso de este trabajo, se seleccionó una referencia popular entre proyectos de gran envergadura de un fabricante con presencia en el país y con prestigio, como lo es TrinaSolar. En cuanto a la capacidad del panel, se prefirió esta referencia con un peso menor por unidad de área<sup>3</sup>, ya que el peso es un factor clave en los sistemas FV sobre vertederos. Asimismo, el precio por unidad de 330 W ronda los 0,20 a 0,30 USD/W, mientras que para referencias como la TrinaSolar Vertex de 580 W<sup>4</sup> ronda el valor de 1 USD/W<sup>5</sup> y solo se encontró importación.

El software internamente calcula la cantidad de paneles por *string* y la cantidad de *strings* considerando los límites de tensión, temperatura, corriente y potencia del inversor. Para estas dos tecnologías y considerando el área disponible, el software sugiere 19 módulos en serie (tamaño del *string*) y 168 cadenas. Teniendo en cuenta estos valores, el área de interés quedaría cubierta potencialmente con 1,05 MWp de sistemas fotovoltaicos, como se presenta en la Figura 27, donde se proponen senderos cada 10 hileras de conjuntos de paneles solares, una subestación en las zonas aledañas conectada subterráneamente al sistema solar para evitar trazar cableados sobre las vías de acceso.

---

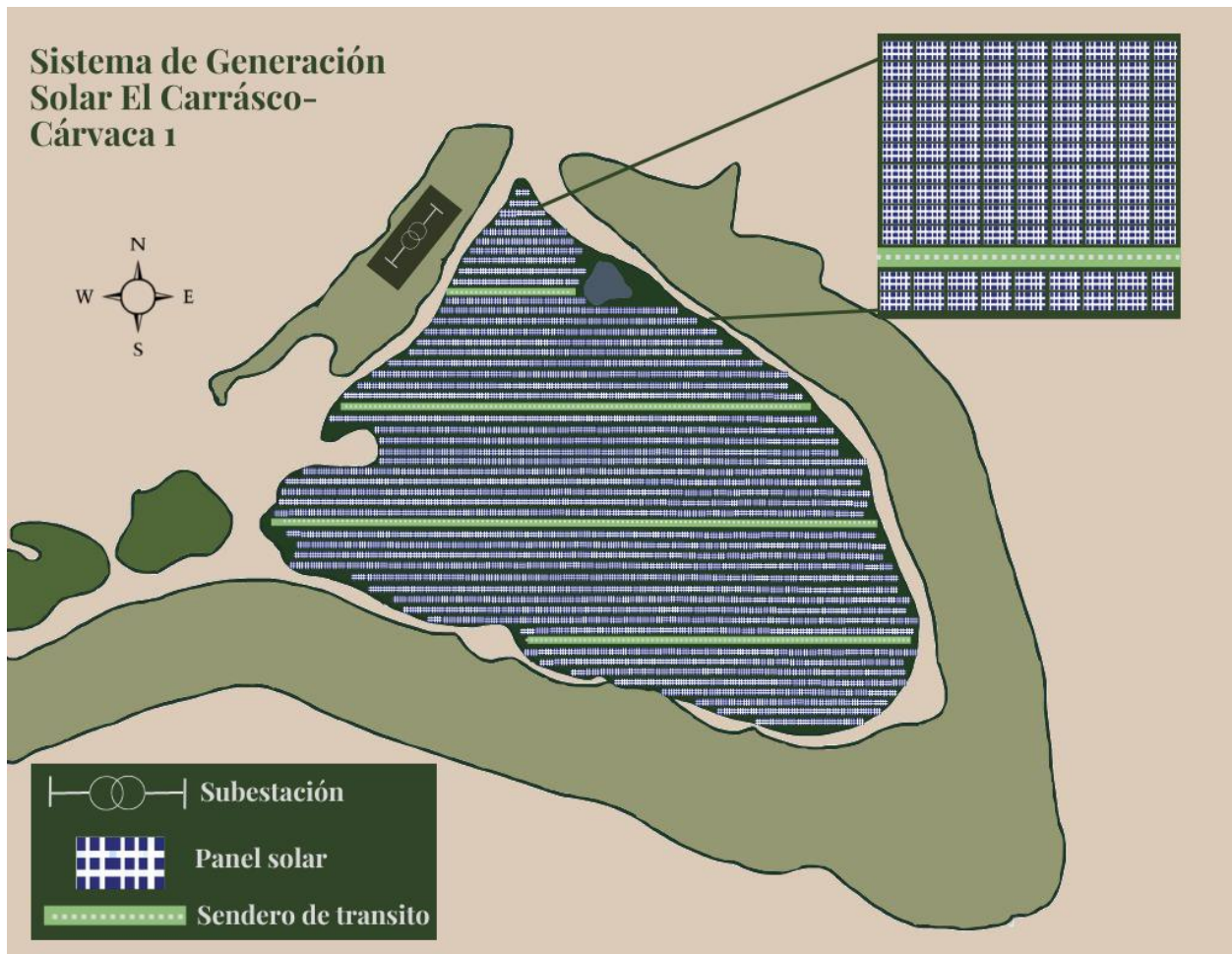
<sup>3</sup> Para el fabricante TrinaSolar, el peso por unidad de área de la referencia de 380 W es de  $11,5 \text{ kg/m}^2$ , mientras que para la referencia de 580 W es de  $12,5 \text{ kg/m}^2$  como es posible verificar en sus hojas de datos.

<sup>4</sup> Generalmente, los paneles de alta potencia son bifaciales, por lo que extraer su máxima potencia dependerá del albedo del terreno. Al ser el relleno un material con menor albedo que el concreto blanco o superficies reflectantes, el panel será subutilizado.

<sup>5</sup> El precio se verificó en vendedores alrededor del mundo (ver <https://cutt.ly/NNkTwQK>). Este aumento se debe a su mayor peso. También se espera que los equipos asociados a la instalación aumenten en relación.

**Figura 27.**

*Uso de la zona propuesto para el proyecto en el domo de la celda 1 de la cárcava 1.*



### 5.2.3 Modelamiento de pérdidas y otras consideraciones

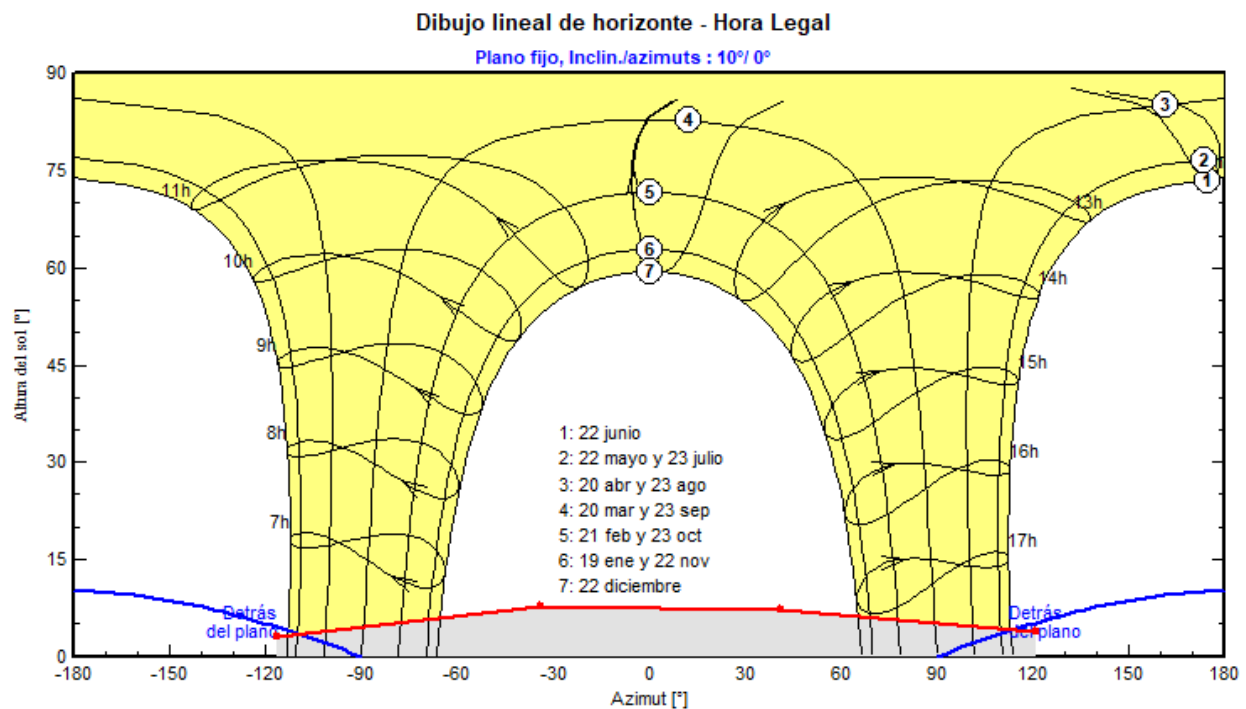
Las pérdidas se pueden modelar en el botón “Pérdidas detallas”. Aquí se pueden modelar las pérdidas óhmicas, térmicas, por suciedad, por calidad del módulo o envejecimiento, la alimentación directa de sistemas auxiliares, entre otros. Para este trabajo, se seleccionó el modelo por defecto para sistemas instalados al aire libre, el cual incluye unas pérdidas por temperatura de

29 W/m<sup>2</sup>K<sup>6</sup>, se incluyeron unas pérdidas de 2% anual por suciedad y el modelo de envejecimiento a partir de la garantía del fabricante provisto en PVSYST.

Adicionalmente, se modificó la línea horizonte, subiendo éste entre 5° y 10° para considerar los posibles sombreados de edificios o montañas cercanas. El recorrido solar y la línea de horizonte propuesta se presenta en la Figura 28. Finalmente, el factor difuso, es decir, la atenuación de la parte de la radiación difusa debido al sombreado del horizonte se definió como un 95 %.

**Figura 28.**

*Recorrido solar anual y línea del horizonte modificada para el sistema solar.*



<sup>6</sup> Estas pérdidas se refieren a que el aumento de 1 grado Kelvin sobre la temperatura de condiciones estándar genera 29 W de pérdidas por cada metro cuadrado de la instalación.

### 5.3 Resultados y análisis

Tras el proceso y configuración de la sección anterior del software, el sistema está listo para la simulación y la determinación de un pre-dimensionamiento del sistema FV. Esta sección presenta los resultados más relevantes de la simulación y su análisis.

#### 5.3.1 Componentes del sistema y generación

El sistema FV dimensionado cuenta con una potencia instalada de 1053 kWp repartida en 6214 m<sup>2</sup>, con un total producidos por 3192 módulos FV TrinaSolar policristalinos repartidos en 168 cadenas, gestionados a través de 33 inversores de 27 kW cuya capacidad total es de 891 kW, lo cual resulta en una relación de potencia de 1,18, sin embargo. Cada inversor tiene capacidad para 6 cada MPPT, es decir, en total se admiten 198 cadenas, pero dada la configuración dimensionada por PVSYST solo se usaron 168, por lo que quedan libre 30 entradas MPPT para adiciones futuras<sup>7</sup>. Se asignaron a 15 inversores 4 cadenas y a los 18 restantes tienen todas las 6 cadenas. El sistema produciría aproximadamente 1631 MWh/año, con una producción específica de 1548 kWh/kWp cada año. La producción energética mensual detallada, junto a algunas otras variables de interés se recogen en la

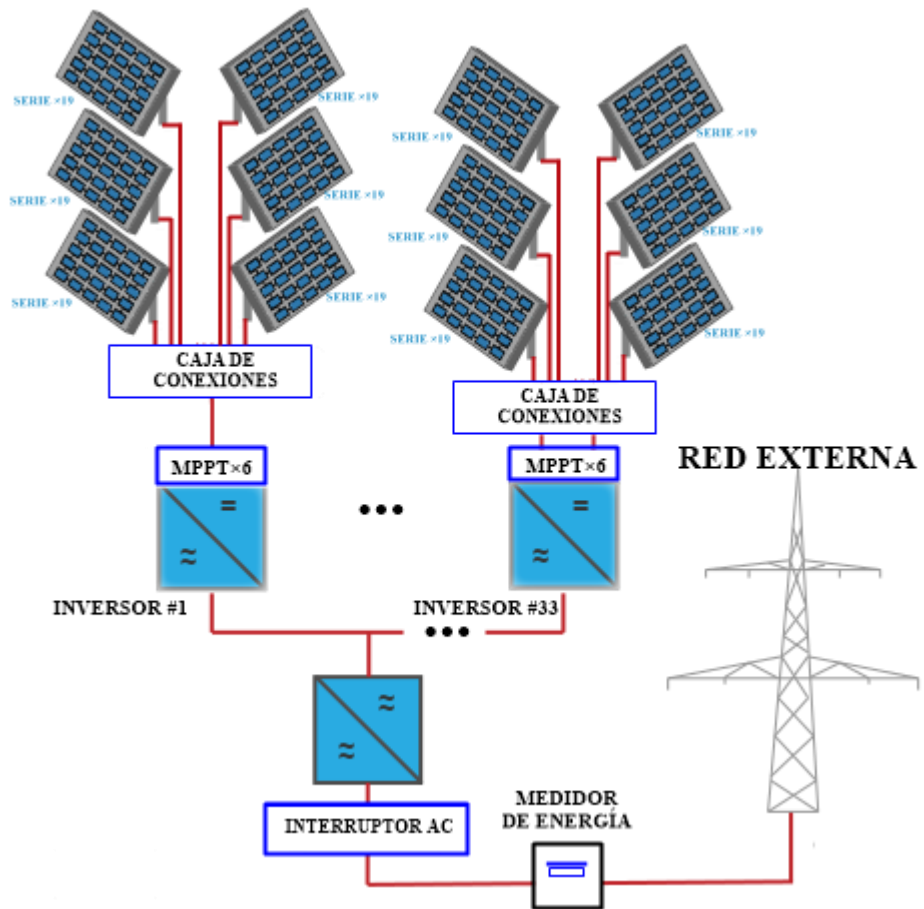
---

<sup>7</sup> Esto también surge de la limitante de equipos que presenta el PVSYST, se probó alrededor de 20 tipos de inversores que cumplieran con los requisitos de tensión máxima, potencia y demás condiciones de operación y este fue el de mejor desempeño.

Tabla 6. Finalmente, la Figura 29 presenta un diagrama de la conexión simplificado para el caso de estudio.

**Figura 29.**

*Diagrama de conexión de la instalación simplificado. Obsérvese que no todos los inversores reciben las 6 cadenas*



**Tabla 6.**

*Información mensual de 8 variables claves la instalación. Obtenida de PVSYST<sup>8</sup>.*

	<b>GlobHor</b> kWh/m <sup>2</sup>	<b>DiffHor</b> kWh/m <sup>2</sup>	<b>T_Amb</b> °C	<b>GlobInc</b> kWh/m <sup>2</sup>	<b>GlobEff</b> kWh/m <sup>2</sup>	<b>EArray</b> MWh	<b>E_Grid</b> MWh	<b>PR</b> ratio
<b>January</b>	153.2	71.55	19.60	164.9	156.5	143.3	140.3	0.808
<b>February</b>	169.2	60.17	20.30	178.8	171.2	153.5	150.4	0.798
<b>March</b>	186.9	81.56	20.47	189.6	181.8	164.2	160.9	0.805
<b>April</b>	153.3	89.32	21.10	150.0	142.4	130.4	127.7	0.808
<b>May</b>	154.9	83.43	20.88	148.0	140.2	128.9	126.2	0.810
<b>June</b>	153.4	73.86	20.34	144.1	136.3	125.3	122.7	0.808
<b>July</b>	154.8	72.95	20.38	146.5	138.8	127.4	124.7	0.808
<b>August</b>	165.0	85.21	20.21	159.7	151.7	139.3	136.4	0.811
<b>September</b>	157.0	77.44	20.22	156.8	149.3	136.2	133.4	0.807
<b>October</b>	159.0	78.46	20.28	164.2	156.6	142.3	139.4	0.806
<b>November</b>	135.1	75.51	19.57	142.7	135.1	124.7	122.1	0.812
<b>December</b>	157.7	66.75	19.59	172.1	163.3	149.5	146.4	0.808
<b>Year</b>	1899.4	916.20	20.24	1917.3	1823.0	1665.1	1630.6	0.807

La Tabla 6 presenta el comportamiento de la radiación promedio global, difusa, incidente y efectiva; junto a la temperatura. Adicionalmente, presenta la energía en MWh generada por toda la configuración y la energía inyectada a la red. Dado el modelo, los paneles FV generarían un total anual de 1665,1 MWh, mientras que a la red se inyectarían 1630,6 MWh lo que equivale a unas pérdidas totales de 34,5 MWh, lo cual equivale a un 2,1% de la generación de los paneles.

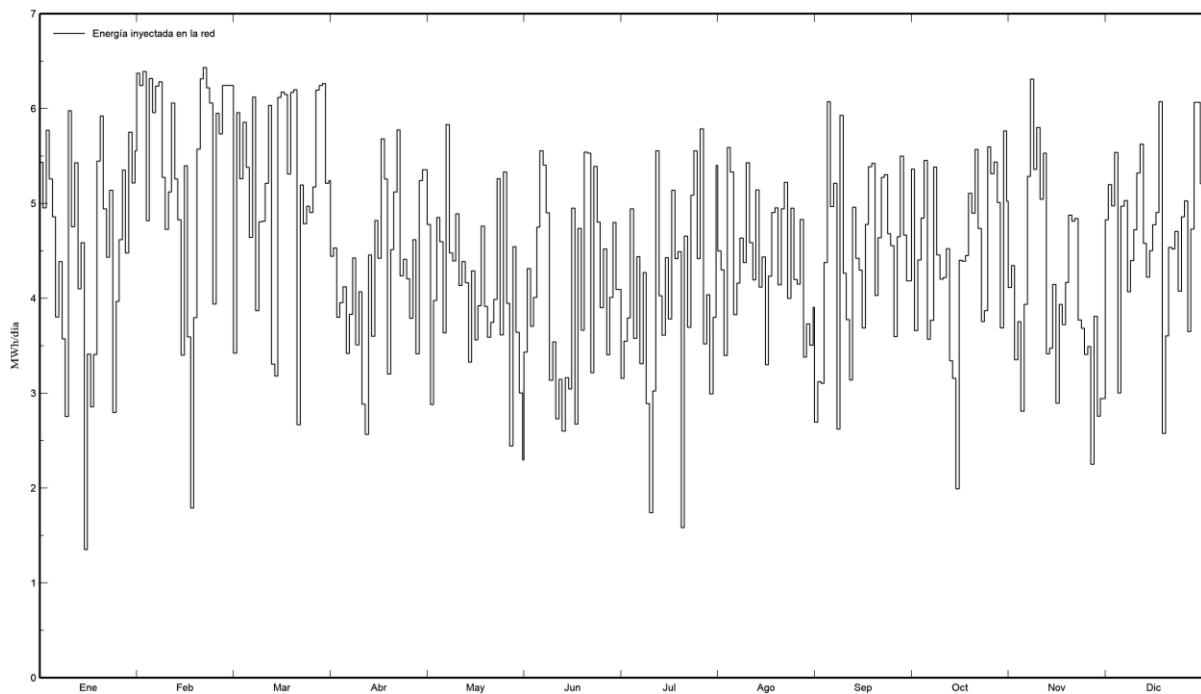
El Coeficiente de Rendimiento (*Performance Ratio* -PR) para esta instalación ronda el valor de 0,8, lo cual significa que, respecto a la capacidad total nominal que se esperaría generar, el sistema entregaría a la red el 80%. Así, el PR mide la relación entre la salida estimada y la salida ideal para un período determinado según la clasificación de la placa de identificación del sistema. El comportamiento diario de la energía generada también está disponible y se presenta en la Figura 30, donde se observa que los mayores picos se presentan en los meses de febrero y marzo, mientras

<sup>8</sup> La irradiación presentada aquí difiere de la medida por la estación meteorológica (Tabla 3). Esta diferencia surge del algoritmo de PVSYST, el cual toma un año modelo y lo modifica estocásticamente para que los valores tengan variabilidad de año a año.

que el resto del tiempo la generación decae un poco, pero se mantiene estable. La energía producida en el año varía abruptamente de día a día, variando de 1,5 MWh (valor mínimo) a 6,5 MWh (valor máximo) al día, pero la mayoría de los días se mantiene entre 3 y 5 MWh.

### Figura 30.

*Energía inyectada a la red diariamente en un año.*

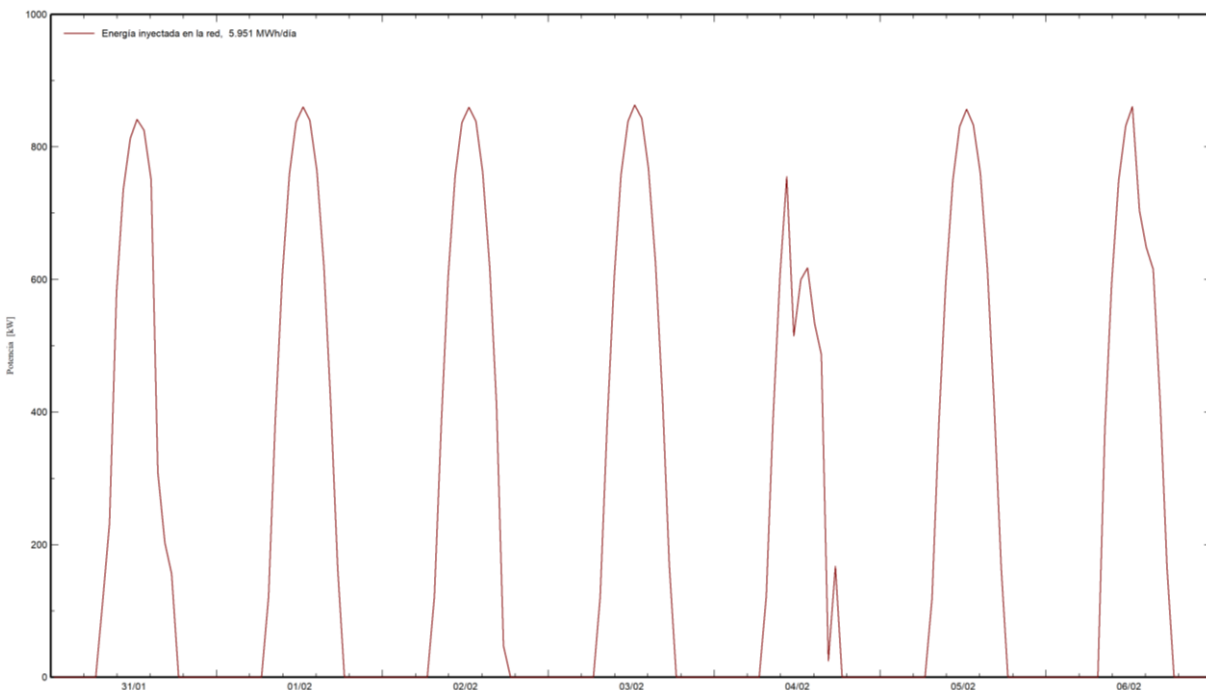


Para ver en detalle la operación del sistema, se observa en la

Figura **31** la potencia horaria inyectada a la red por el sistema. Los picos para esta semana se sitúan alrededor de 850 kW, con un día con una producción menor debido a una baja en los niveles de irradiancia cerca del mediodía.

**Figura 31.**

*Potencia inyectada a la red en kW para una semana.*



### **5.3.2 Costos del sistema**

Una función muy útil de PVSYST es su módulo de costos. Donde se puede modelar el comportamiento económico y financiero del sistema durante toda su vida útil. Allí se pueden incluir los costos detallados de operación y mantenimiento, incluyendo costos por componente, herrajería, cableado, salarios, limpieza, entre otros. Para el predimensionamiento, se consideraron: un solo costo total fijo de instalación de 0,75 USD/Wp. Este valor se obtuvo como un punto intermedio entre lo presentado por diversas fuentes, a saber: en España se reporta un precio de 0,55 USD/Wp durante el 2019 (Roca, 2019), el National Renewable Energy Laboratory de EE. UU. reporta un precio de 1,25 USD/Wp para el 2021 (NREL, 2022), el portal de estadísticas globales Statista reporta un valor global para el 2020 de 0,61 USD/Wp (Madhumitha, 2022),

mientras que el PV Magazine reporta precios entre 0,59 y 0,77 USD/Wp (Bellini, 2022). En Colombia, el comercializador AutoSolar reporta unos costos de instalación residencial de 3 a 4 millones por metro cuadrado reduciéndose hasta en un 75% para proyectos de gran magnitud, lo que equivaldría a 1,25 USD/Wp (AutoSolar, 2021). Mientras que el precio de O&M anual se encontró alrededor de 0,02 USD/Wp-año (NREL, 2022).

Por otra parte, se definió una vida útil de 25 años, depreciación lineal de acuerdo al fabricante y una inflación de 2,5% con una tasa de descuento del 1,5%. La tarifa de la energía se definió a partir del precio de los contratos de energía mayorista para octubre de 2022, ya que, debido a su tamaño, el generador no podría figurar como Autogenerador a Gran Escala ni Generador Distribuido, entrando a participar en el Mercado Mayorista de Energía<sup>9</sup>. Este precio equivale a 267 COP/kWh o 0,058 USD/kWh.

A partir del ingreso de estos parámetros se obtuvieron los siguientes resultados:

- Costo total de la instalación: 790.020,00 USD.
- Costos de operación: 25.333,75 USD.
- Costo presente neto: 964.795,90 USD.
- Periodo de recuperación: 10,8 años.
- Retorno de la inversión: 122,1 %.

El flujo de caja del proyecto se presenta en la Figura 32, donde se presenta el valor neto ingresos y egresos de cada año. Se evidencia que el software no toma en cuenta los costos asociados a reemplazos de equipos directamente, sino dentro del componente de operación. En

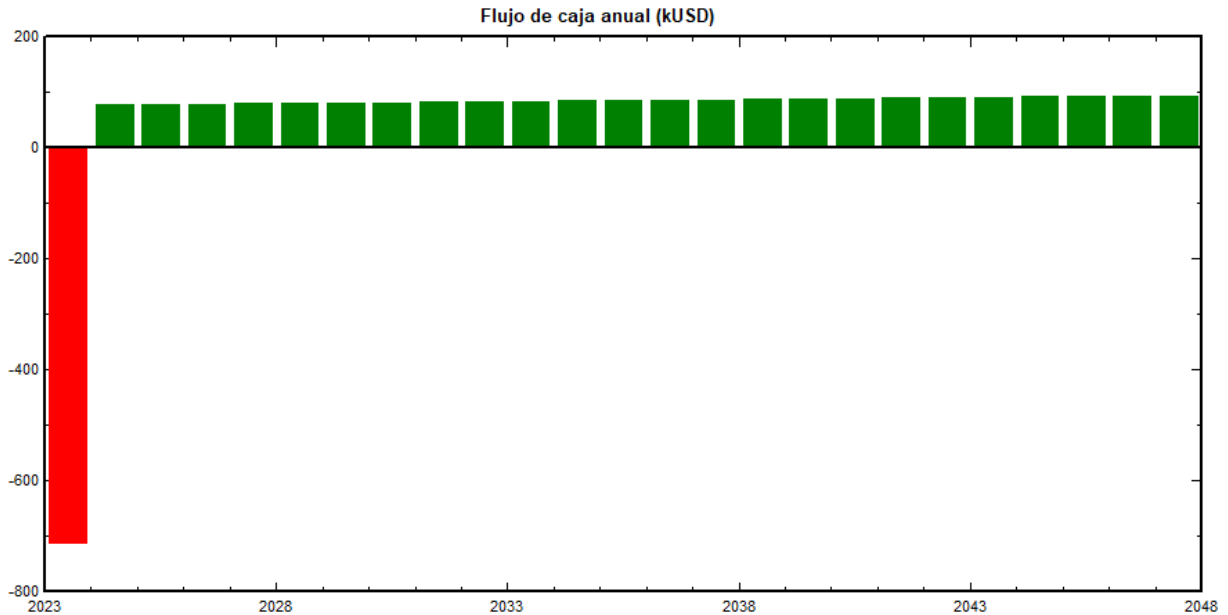
---

<sup>9</sup> Es muy común que estos generadores renovables participen en contratos directamente con Usuarios No Regulados y comercializadoras de energía, sin embargo, a través de subastas que promueven la integración de FNCER en la matriz energética colombiana.

todo caso, el costo presente neto revela que el proyecto necesita una fuerte inversión que ronda el millón de dólares si se consideran otros aspectos típicos de proyectos de ingeniería.

**Figura 32.**

*Flujo de caja para el proyecto.*



**5.3.3 Análisis de resultados**

PVSYST permitió determinar que el área disponible se puede usar para instalar más de 1 MWp de potencia FV, con una producción superior a los 1,6 GWh cada año. Esta es una cantidad para nada despreciable, pues si se considera un hogar promedio que consume 150 kWh cada mes, la energía de este sistema sería suficiente para alimentar más de 800 hogares. Así, esta alternativa del uso del terreno del relleno sanitario para un proyecto de energía renovable genera un impacto considerable y positivo. Por otra parte, en términos de costos, se evidenció que se requiere una

fuerte inversión superior a los seis mil millones de pesos colombianos para cubrir el área seleccionada de la cárcava 1 con sistemas fotovoltaicos, no obstante, en el largo plazo y dependiendo de las regulaciones, esta inversión se recuperaría y se podrían obtener beneficios económicos, haciendo que en la zona no solo se mitigue el impacto ambiental, sino que también se generen ganancias de tipo económico.

## **6. Conclusión**

En este trabajo de grado se desarrolló el estudio del pre-dimensionamiento de un sistema FV para un relleno sanitario en proceso de clausura llamado El Carrasco, ubicado en la ciudad de Bucaramanga (Colombia), específicamente, en el domo de la celda 1, que es parte de la Cárcava 1 del relleno. A partir de la legislación, normas y regulación, se abrió en el país la posibilidad de avanzar en diferentes clases de iniciativas que involucren FNCER y estrategias de gestión de la energía, siendo este uno de muchos proyectos que se han desarrollado en el país. No obstante, en el país no se identificó un marco legal o regulatorio para la aplicación concreta de que trata este proyecto (sistemas FV en rellenos sanitarios), por lo que no está del todo claro qué consideraciones se deban tener en cuenta a nivel local.

A pesar de la falta de experiencia en Colombia en sistemas FV en rellenos sanitarios, se evidenció que en el mundo se han desarrollado proyectos y guías técnicas sobre la instalación de sistemas FV en vertederos, que serán fundamentales a la hora de implementar estos proyectos en el país. A partir de la experiencia internacional, se identificaron factores clave que diferencian a

los sistemas FV convencionales de aquellos instalados en áreas de relleno sanitario, como lo son los riesgos de combustiones por la combinación de chispas en el sistema eléctrico con la producción de gases producto de la descomposición de las basuras. Otros factores relevantes son la acumulación de polvo debido a la aridez del terreno, la inestabilidad del suelo debido al asentamiento diferencial o los retos que presentan los sistemas de puesta a tierra al no ser el suelo convencional.

Por otra parte, para el proceso de pre-dimensionamiento se registraron variables climatológicas para la zona, evidenciándose un gran potencial para la generación de energía FV, debido a la brisa refrigerante, las temperaturas templadas y estables y los niveles altos de irradiación solar. Estos datos permitieron cuantificar la capacidad instalada del área disponible, que resultó ser de alrededor 1 MWp, con una producción 1,6 GWh al año, suficientes para alimentar a más de 800 hogares. Así, la posibilidad de aprovechar el área disponible en el relleno sanitario para la generación de energía y como medio complementario de mitigación resulta interesante. Sorteando las dificultades producto del terreno mismo, la escala del proyecto FV hace que esta manera de reusar la zona sea una posibilidad que se debe considerar seriamente, pues no existen muchas más alternativas para una locación inhabitable y seriamente contaminada.

Finalmente, a nivel profesional y personal, este trabajo permitió desarrollar habilidades de escritura, lectura y oralidad; a través de la consulta de fuentes de información, artículos, escritura técnica y presentación de proyectos a un público. Asimismo, fue una fuente de aprendizaje sobre sistemas de energías renovables, en particular, del proceso de diseño y dimensionamiento de sistemas FV e hizo posible que los autores se involucraran en problemas de ingeniería interdisciplinarios, al tratar un problema que surgió en conjunto con un proyecto de ingeniería civil.

## 7. Trabajos Futuros

A partir del desarrollo de este trabajo y sus limitaciones respecto al alcance y tiempo de ejecución, a continuación, se presenta una lista de posibles trabajos futuros que se derivarían de los resultados y lecciones de este trabajo:

- Avanzar en los estudios de conexión y las consideraciones para la conexión a ESSA. Es importante considerar costos, tiempos, nivel de tensión y la disponibilidad de la red eléctrica para la interconexión al sistema.
- Hacer un desglose de costos de CAPEX y OPEX con el fin de detallar cómo se componen para este proyecto en particular. Resulta imprescindible avanzar en el diseño detallado de costos, con el fin de elaborar un presupuesto más realista, destinar partidas a los diferentes gastos e identificar proveedores de los productos y servicios.
- Realizar estudios de los efectos corrosivos del gas y polvo de la zona. Pues el nivel de polvo y la emisión constante de gases del vertedero pueden tener efectos perjudiciales en la infraestructura civil del proyecto.
- Evaluar la necesidad de incorporar sistemas de compensación de energía reactiva y otras problemáticas de calidad de potencia, pues, debido al tamaño del sistema y el comportamiento de los inversores, podrían surgir situaciones donde la inyección de potencia reactiva o la distorsión de las ondas de tensión y corriente tenga repercusiones negativas al sistema.

**Referencias Bibliográficas**

- Assaf, K., & Carrascal, S. (2012). *Sitio de disposicion final de residuos solidos el carrasco y la afectacion a derechos fundamentales y colectivos. sitio de disposicion final de residuos solidos el carrasco y la afectacion a derechos fundamentales y colectivos*. Trabajo de Grado de Pregrado. UPB. Bucaramanga.
- AutoSolar. (2021). *¿Cuánto cuesta un panel solar?* AutoSolar Blog. <https://autosolar.co/paneles-fotovoltaicos/cuanto-cuesta-un-panel-solar#:~:text=¿Quieres saber cuánto cuesta un panel solar fotovoltaico%3F&text=A día de hoy%2C el,pesos colombianos por metro cuadrado.>
- Bellini, E. (2022). *Large scale solar reaches €0.02737-04939/kWh LCOE in Sweden*. *PV MAGAZINE*. <https://www.pv-magazine.com/2022/02/15/large-scale-solar-reaches-e0-02737-04939-kwh-lcoe-in-sweden/>
- Cárdenas; Luis. (2019). *Las irregularidades que llevaron al polémico de cierre de El Carrasco. Las Irregularidades Que Llevaron al Polémico de Cierre de El Carrasco*.
- Cyrs, W. D., Avens, H. J., Capshaw, Z. A., Kingsbury, R. A., Sahmel, J., & Tvermoes, B. E. (2014). Landfill waste and recycling: Use of a screening-level risk assessment tool for end-of-life cadmium telluride (CdTe) thin-film photovoltaic (PV) panels. *Energy Policy*, 68, 524–533. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.025>
- Epa, U., America, R.-P., & Initiative, L. (2013). *Best Practices for Siting Solar Photovoltaics on Municipal Solid Waste Landfills Best Practices for Siting Solar Photovoltaics on MSW Landfills*. *Environmental Protection Administration*. Report and Guide. Estados Unidos.

- Fantidis, J. G., Bandekas, D. v., Potolias, C., & Vordos, N. (2013). Cost of PV electricity - Case study of Greece. *Solar Energy*, 91, 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.02.001>
- Igrahim, S. et al., (s.f.) Linear Regression Model in Estimating Solar Radiation in Perlis. *Energy Procedia*, 18, 1402–1412. 2012. doi:10.1016/j.egypro.2012.05.156
- Jaramillo, J. (2002) *Guía para el diseño, construcción y operación de relenos sanitarios manuales*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. [https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/55275/OPSCEPISPUB0293\\_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/55275/OPSCEPISPUB0293_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Madhumitha, J. (2022). *Global benchmark capex for utility-scale solar PV 2010-2020*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/971982/solar-pv-capex-worldwide-utility-scale/>
- Mohapatra, P., Ali, S. M., Mishra, S. P., & Pradhan, A. (2012). Future aspects solar panel installation on closed landfills. *International Journal of Advances in Engineering & Technology* (Vol. 324, Issue 2).
- NREL. (2022). *Annual Technology Baseline. 2022 Electricity ATB*. [https://atb.nrel.gov/electricity/2022/utility-scale\\_pv](https://atb.nrel.gov/electricity/2022/utility-scale_pv).
- Osma, A. (2011) *Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles en el Edificio Eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander*. Proyecto de investigación de maestría: Universidad Industrial de Santander.
- Patrick, D. L., Murray, T. P., & Sullivan, R. K. (2018). *The Guide to Developing Solar Photovoltaics at Massachusetts Landfills Commonwealth of Massachusetts. Technical Report*.
- Perez Aceros, D., & Rodriguez Parada, P. (2021). *Aprovechamiento de un sistema híbrido biogás – solar en la zona del relleno sanitario “El Carrasco” para la generación de energía eléctrica. Aprovechamiento de un sistema híbrido biogás –solar en la zona del relleno*

- sanitario “El Carrasco” para la generación de energía eléctrica. Trabajo de Grado. Universidad Autónoma de Bucaramanga.* <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/14064>.
- Retallack, B. J. (1991). Compendio de apuntes para la formación del personal meteorológico de la clase IV. *Publicación Organización Meteorológica Mundial OMM- 266. Vol. II- meteorología. Ginebra, Suiza*
- Roca, R. (2019). *El coste medio por cada nuevo megavatio de renovable ascenderá a 1,68 millones hasta 2030: la FV, la más barata; termosolar y bombeo, las más caras.* El Periodico de La Energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/el-coste-medio-por-cada-nuevo-megavatio-de-renovable-ascendera-a-168-millones-hasta-2030-la-fv-la-mas-barata-termsolar-y-bombeo-las-mas-caras/>
- Sanguino, M. (2020) *Proyecto de investigación de maestría: Caracterización de la disposición final de residuos sólidos para el Área Metropolitana de Bucaramanga.* Universidad Santo Tomas.
- Siqueira, M. B., & Monteiro Filho, A. (2021). Hybrid concentrating solar-landfill gas power-generation concept for landfill energy recovery. *Applied Energy*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117110>
- Szabó, S., Bódis, K., Kougias, I., Moner-Girona, M., Jäger-Waldau, A., Barton, G., & Szabó, L. (2017). A methodology for maximizing the benefits of solar landfills on closed sites. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 76, pp. 1291–1300). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.117>

- Tansel, B., Varala, P. K., & Londono, V. (2013). Solar energy harvesting at closed landfills: Energy yield and wind loads on solar panels on top and side slopes. *Sustainable Cities and Society*, 8, 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.01.004>
- UPME-IDEAM. (2005) *Atlas de Radiación Solar de Colombia*. Bogotá, Colombia, Colombia: *Ministerio de Minas y Energía*. Unidad de Planeación Minero Energetica (UPME) y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).
- Vergara-Barrios, P. P., Rey-López, J. M., Osma-Pinto, G. A., & Ordóñez-Plata, G. (2014). Evaluación del potencial solar y eólico del campus centra de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga, Colombia. *Revista UIS Ingenierías*, 13(2), 49–57. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/49-57>