

Integración de la generación de energía fotovoltaica con la industria agropecuaria
en el municipio de Málaga Santander

Juan Pablo Ortiz Romero, Diego Andrés Cristancho Peñuela

Trabajo de Grado para Optar al Título de ingeniero electricista

Director

Gabriel Ordóñez Plata

PhD. En Ingeniería Eléctrica

Codirector

Julián Mauricio Botero Londoño

PhD. En ciencias agrarias

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Para mí mismo, el único incrédulo que nunca se apartó.

Juan Pablo

Dedicatoria

Dedico este logro a mis amados padres, cuyo apoyo inquebrantable y amor incondicional han sido mi faro en este viaje académico. A mi querida familia, por su constante aliento y comprensión.

A mi fiel compañero de cuatro patas, que ha llenado mis días de alegría.

A las personas que alguna vez formaron parte de este proceso, aunque hoy ya no estén a mi lado, su influencia y contribución siguen vivas en este trabajo. Gracias a todos por ser mi fuente de inspiración y motivación.

Diego Andres

Agradecimientos

A nuestro director, Dr. Gabriel Ordóñez Plata, por ser nuestra guía durante este proceso

A nuestro codirector, Dr. Julián Mauricio Botero por guiarnos y darnos herramientas para
realizar este proyecto

A la Universidad Industrial de Santander por la formación que nos ha brindado

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	10
Abstract	11
Introducción.....	13
1. Generalidades del trabajo de grado.....	16
1.1 Alcance	16
1.2 Objetivo General	17
1.3 Objetivos específicos.....	17
2. Estado del arte de sistemas agrovoltaicos.....	18
3. Marco normativo y regulatorio de implementación de fuentes no convencionales de energías renovables.....	21
4. Marco conceptual de la energía agrovoltaica	25
4.1 Transición energética	25
4.2 Energía agrovoltaica.....	25
4.3 Paneles solares	25
4.3.1 Paneles monocristalinos.....	26
4.3.2 Paneles policristalinos	26
4.4 Inversores.....	26
4.4.1 Inversor de onda pura	27
4.4.2 Inversor On Grid	27
4.4.3 Inversor hibrido.....	27
4.5 Baterías	28

4.5.1 Baterías de gel	28
4.5.2 Baterías AGM	28
4.5.3 Baterías de litio	29
4.6 Sistemas fotovoltaicos	29
4.6.1 Sistema On Grid.....	29
4.6.2 Sistema Off Grid	30
4.6.3 Sistema híbrido.....	30
4.7 Forrajes perennes	30
4.7.1 Tithonia diversifolia	30
4.7.2 Cynodon nlemfuensis	31
4.7.3 <i>Lolium perenne</i>	31
5. Valoración de condiciones agroclimáticas	32
5.1 Estimación de variables agroclimáticas en Málaga.....	33
6. Evaluación de forrajes perennes	40
6.1 Estimación de producción de materia fresca	40
6.2 Estimación de producción de materia seca.....	42
6.3 Análisis de la producción de biomasa	44
7. Costos de prefactibilidad de sistemas fotovoltaicos.....	46
7.1 Metodología LCOE.....	46
7.1.1 producción anual	46
7.1.2 Costo inicial	47
7.1.3 Costo anual.....	50
7.1.4 Calculo de viabilidad.....	50

7.2 Estimación de costos	51
7.3 Análisis de los costos de los sistemas propuestos.....	54
8. Conclusiones y recomendaciones	56
8.1 Conclusiones.....	56
8.2 Recomendaciones.....	57
Referencias Bibliográficas.....	59

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla1 <i>Variables agroclimáticas 2022 de Málaga, Santander</i>	34
Tabla2 <i>Variables agroclimáticas 2023 de Málaga, Santander</i>	34
Tabla3 <i>Producción de materia fresca por hectárea en un año (Ray Grass)</i>	41
Tabla4 <i>Producción de materia fresca por hectárea en un año (Tithonia diversifolia)</i>	41
Tabla5 <i>Producción de materia fresca por hectárea en un año (cynodon nlemfuensis)</i>	42
Tabla6 <i>Kilogramos de materia seca por metro cuadrado (Ray Grass)</i>	43
Tabla7 <i>Kilogramos de materia seca por hectárea en un año (Tithonia diversifolia)</i>	43
Tabla8 <i>Kilogramos de materia seca por hectárea en un año (cynodon nlemfuensis)</i>	44
Tabla9 <i>Relación de precios paneles solares según capacidad y tipo</i>	47
Tabla10 <i>Relación de precios inversores según capacidad y tipo</i>	48
Tabla11 <i>Relación de precios de baterías según capacidad y tipo</i>	48
Tabla12 <i>Relación de precios de cableado por metro</i>	49
Tabla13 <i>Relación de precios estructura por unidad</i>	49
Tabla14 <i>Relación de precios de por el kW instalado</i>	49
Tabla 15 <i>Estimación de costos de sistema On Grid</i>	51
Tabla 16 <i>Estimación de costos sistema Off Grid</i>	52
Tabla 17 <i>Estimación de costos sistema Híbrido</i>	53

Lista de figuras

Figura 1	<i>Comparativa por mes de radiación solar 2022-2023.</i>	35
Figura 2	<i>Comparativa por mes de Temperatura máxima 2022-2023.</i>	36
Figura 3	<i>Comparativa por mes de Temperatura mínima 2022-2023.</i>	36
Figura 4	<i>Comparativa por mes de Temperatura promedio 2022-2023.</i>	37
Figura 5	<i>Comparativa por mes de probabilidad de precipitación 2022-2023.</i>	37
Figura 6	<i>Comparativa por mes de lluvia 2022-2023.</i>	38
Figura 7	<i>Comparativa por mes de Nubosidad 2022-2023.</i>	38
Figura 8	<i>Comparativa por mes de Horas de luz solar 2022-2023.</i>	39
Figura 9	<i>Producción de biomasa anual.</i>	45
Figura 10	<i>Comparación del precio del kW vs el LCOE en sistema On Grid en Málaga Santander.</i>	51
Figura 11	<i>Comparación del precio del kW vs el LCOE en sistema Off Grid en Málaga Santander.</i>	52
Figura 12	<i>Comparación del precio del kW vs el LCOE en sistema Híbrido en Málaga Santander.</i>	53

Resumen

TITULO: Integración de la generación de energía fotovoltaica con la industria agropecuaria en el municipio de Málaga Santander.*

PALABRAS CLAVE: Transición energética, energía fotovoltaica, agricultura, forrajes perennes, energía agrovoltaica, integración, Málaga, Santander, viabilidad.

AUTORES: Juan Pablo Ortiz Romero – Diego Andrés Cristancho Peñuela.**

DESCRIPCIÓN: En este trabajo de grado se presenta el análisis de alternativas de implementación de sistemas agrovoltaicos en el municipio de Málaga Santander, con el fin de avanzar en la transición energética mediante fuentes de energía renovables que traigan beneficios económicos, sociales y ambientales al municipio. Al mismo tiempo que se estaría dejando un estudio para conocer la viabilidad de generación de proyectos enfocados al desarrollo e implementación de sistemas agrovoltaicos en regiones de Santander y de Colombia.

La energía agrovoltaica se trata de un sistema en el que se instalan paneles solares encima de los cultivos, combinando así la producción agrícola con la generación fotovoltaica sobre un mismo terreno, lo que permite aprovechar el espacio disponible y aumentar la eficiencia de uso de la tierra.

Se dan a conocer los principales factores para tener en cuenta a la hora de implementar un sistema agrovoltaico, siendo estos: las condiciones agroclimáticas, la estimación de producción de biomasa y la estimación de costos del sistema fotovoltaico. Determinando que estos factores son cruciales para determinar la viabilidad de integración de ambos sectores. Esta viabilidad se hace para el caso los forrajes perennes, ya que estos son una de las cosechas más comunes en el municipio de Málaga.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisiomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: PhD. Gabriel Ordóñez Plata. Codirector: PhD. Julián Mauricio Botero Londoño

Abstract

TITLE: Integration of Photovoltaic Energy Generation with the Agricultural Industry in the Municipality of Málaga, Santander. *

KEY WORDS: Energy Transition, Photovoltaic Energy, Agriculture, Perennial Forages, Agrovoltaic Energy, Integration, Málaga, Santander, Viability.

AUTHORS: Juan Pablo Ortiz Romero – Diego Andrés Cristancho Peñuela.**

DESCRIPTION: This degree work presents an analysis is presented regarding the alternatives of implementing agrovoltaic systems in the municipality of Málaga, Santander, aiming to advance the energy transition through renewable energy sources that bring economic, social, and environmental benefits to the municipality. Simultaneously, we are conducting a study to assess the feasibility of projects focused on the development and implementation of agrovoltaic systems in the Santander region and Colombia as a whole.

Agrovoltaic energy involves a system where solar panels are installed above crops, combining agricultural production with photovoltaic generation on the same land. This approach allows for the utilization of available space and enhances land use efficiency.

We highlight the key factors to consider when implementing an agrovoltaic system, including agroclimatic conditions, biomass production estimation, and photovoltaic system cost estimation. It is determined that these factors are critical in assessing the feasibility of integrating both sectors. This feasibility assessment focuses on perennial forages, as they are one of the most common crops in the municipality of Málaga.

* Degree Work

** Faculty of Physiomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Electrical Engineering. Director: PhD. Gabriel Ordóñez Plata. Co-director: PhD. Julián Mauricio Botero Londoño

Glosario

Materia fresca: Cantidad de biomasa o material vegetal en un estado recién cosechado. Antes de que se haya eliminado la humedad.

Materia seca: Parte de la biomasa que queda después de eliminar toda la humedad.

LCOE : Costo nivelado de la electricidad

Producción anual: Cantidad total generada o producida en un año.

PND: Plan Nacional de Desarrollo

Introducción

Imagínese un mundo donde los campos de cultivo no solo producen alimentos, sino también energía renovable, ¿Es esto acaso posible?, estamos hablando de energía agrovoltaica, la cual combina la agricultura con la energía fotovoltaica sobre un mismo terreno (C. Dupraz H. M., 2011), permitiendo así a los agricultores cultivar y generar energía eléctrica al mismo tiempo.

Santander es uno de los destinos turísticos más grandes de toda Colombia, siendo desde el 2016 el cuarto departamento más visitado a nivel turístico en el país (COTELCO, 2017), debido a sus espectaculares paisajes naturales, su distinguida cultura y por tener lugares únicos tales como el cañón del Chicamocha, el segundo cañón más grande del mundo, el Páramo de Santurbán, entre muchos otros. En 2018 se registró la marca más alta de visitantes extranjeros al departamento, con un total de 52.165 y un incremento del 27% frente a 2017 (Ramirez, 2019), logrando en el proceso que muchos decidan vivir en la región, provocando esto un incremento en el consumo de energía eléctrica, esto sumado al constante crecimiento de la población, se observó que la región oriental en 2022 tuvo un aumento de la demanda eléctrica del 9,07% con respecto al 2021 y estimaciones de aumento para los próximos años por parte del mercado mayorista eléctrico (XM) y el UPME (XM, 2023) (UPME, 2016).

A su vez Santander es el segundo departamento del país con mayor autogeneración de energía solar a pequeña escala, con una participación del 11,1% en el 2022, con alrededor de 3300 usuarios (Pita, 2023), esto les permite a los usuarios generar energía eléctrica para su consumo y la venta en caso de tener excedentes. En la actualidad se está llevando a cabo el proyecto parque solar Chicamocha, el cual cuenta con cuatro parques solares que generarán alrededor de 80 MW de energía, y se estima que para el 2023 estará terminado (Rueda, 2022)

En la agricultura de Santander una de las cosechas más comunes son los forrajes perennes, los cuales son plantas utilizadas en la producción de alimento para animales, que pueden crecer y producir durante varios años consecutivos sin necesidad de volver a sembrarlos (Bauer, 2018). Estos forrajes son esenciales para la producción de alimentos para animales, especialmente para la producción ganadera, ya que ofrecen una fuente constante de alimento para el ganado, reduciendo la necesidad de alimentación adicional y permitiendo una producción más sostenible.

Por otra parte, la transición energética en Colombia tiene como objetivo reemplazar gradualmente las fuentes de energía no renovables (Duque, 2021) (energías, 2022), aumentando las fuentes renovables no convencionales como: eólica, solar, biomasa, pequeñas centrales hidráulicas y geotérmica, con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que generan los combustibles fósiles al medio ambiente, y a su vez producir energía eléctrica de manera sostenible.

El uso de energías no renovables está limitado principalmente al uso de combustibles fósiles, los cuales, según estudios realizados por la universidad de Valladolid en España (I. Capellán, 2014), se agotarán en unos años, en vista de esto, las energías renovables son la alternativa para este problema, debido a que su potencial es casi inagotables. A su vez las empresas generadoras de energía están directamente relacionadas al lograr adaptarse a la transición energética, ya que el modelo de producción a largo plazo con energías no renovables ya no será sostenible ni eficiente y constantemente se identifican nuevas demandas por parte de los consumidores.

La energía agrovoltáica permite no solo producir energía renovable, sino también mejorar la eficiencia en el uso del agua y la fertilidad del suelo (H. Marrou L. G., 2013). Además, la

combinación de la agricultura y la energía fotovoltaica puede generar nuevas oportunidades de negocio y mejorar la calidad de vida. En Málaga, Santander, la implementación de sistemas agrovoltaicos podría ser una excelente oportunidad para mejorar la producción de cultivos y aumentar las reservas alimentarias, a la vez que se genera energía de fuentes renovables y de esta forma se contribuye a la mitigación de los impactos del cambio climático.

En la actualidad no se cuentan con estudios de referencia para conocer la viabilidad de generación de proyectos enfocados a contribuir con el desarrollo e implementación de sistemas agrovoltaicos en regiones geográficas específicas de Santander. Con el desarrollo de este trabajo se está dejando un estudio base para conocer la viabilidad de implementación de sistemas agrovoltaicos en el municipio de Málaga Santander, promoviendo el uso de energías renovables para avanzar en la transición energética del país, para un futuro con generación de energía eléctrica más limpia y sostenible.

1. Generalidades del trabajo de grado

En este capítulo se presenta el alcance del trabajo de grado, al igual que los objetivos generales y específicos. Con esto se logra hacer énfasis en el cumplimiento de los objetivos a lo largo del trabajo de grado.

1.1 Alcance

Este proyecto de grado se realiza únicamente para los pisos térmicos de Málaga, realizando un análisis de las condiciones agroclimáticas, considerando factores como la radiación solar, las temperaturas máximas y mínimas, la precipitación, la nubosidad y las horas de luz natural. Estos datos son fundamentales para evaluar la viabilidad de la implementación de sistemas agrovoltáicos.

También se evalúan detalladamente los forrajes perennes más comunes en la región, como el Ray Grass (*Lolium perenne*), Botón de oro (*Tithonia diversifolia*) y el pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*). Se estima su producción de materia fresca y materia seca en condiciones de sombra y sin sombra para determinar su viabilidad en la integración de sistemas agrovoltáicos.

Se calculan los costos asociados con la implementación de sistemas fotovoltaicos en el municipio de Málaga. Esto incluye la producción anual de energía, el costo inicial de implementación y el costo anual de mantenimiento. Realizando a su vez un análisis de viabilidad del sistema mediante la metodología LCOE, comparando el costo de la energía generada (LCOE) con el precio del kWh en la región.

El proyecto contribuirá al avance de la transición energética en el país, al promover el uso de fuentes de energía renovable y sostenible en el sector agropecuario. Además, sentará las bases para posibles proyectos futuros de sistemas agrovoltaicos en Santander y Colombia.

1.2 Objetivo General

Determinar las alternativas de integración de la energía fotovoltaica con la industria agropecuaria en el municipio de Málaga, Santander.

1.3 Objetivos específicos

- Valorar las condiciones agroclimáticas del municipio de Málaga.
- Evaluar los tipos de forrajes perennes que pueden integrarse con paneles solares y estimar su producción de biomasa.
- Estimar los costos de implementación de los sistemas fotovoltaicos en base a la capacidad de generación dada por los vatios pico en el municipio de Málaga.
- Determinar la viabilidad de producción de los forrajes perennes integrados con los paneles solares.

2. Estado del arte de sistemas agrovoltaicos

En el contexto de la creciente demanda de fuentes de energía renovable y la necesidad de optimizar el uso de la tierra en la industria agropecuaria, varios estudios y artículos académicos han explorado la integración de la generación de energía fotovoltaica con actividades agrícolas, dando origen a la noción de "agrovoltaica".

Según el estudio realizado en el artículo "Combining solar PV panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes" (C. Dupraz H. M., 2011) destaca la oportunidad de maximizar el uso de la tierra al combinar paneles solares fotovoltaicos con cultivos alimenticios. El artículo plantea el concepto de sistemas agrivoltaicos y se sugiere que esta combinación puede incrementar significativamente la productividad de la tierra, proporcionando un enfoque eficiente para la generación de energía y la producción de alimentos. A su vez, se aborda cómo la sombra parcial de los paneles solares afecta el microclima y, por ende, el crecimiento de los cultivos. "Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels?" (H. Marrou L. G., 2013). Este enfoque permite evaluar cómo la radiación solar modificada y las condiciones de humedad pueden influir en el rendimiento de los cultivos, siendo crucial para optimizar la colocación de paneles y garantizar el crecimiento óptimo de los cultivos.

La investigación realizada en el artículo "Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications" (Stephan Schindele, 2020) se centra en el análisis tecnológico y económico de los sistemas agrofotovoltaicos, destacando la importancia de equilibrar el costo de implementación con el rendimiento esperado y considera las implicaciones políticas de promover esta innovación. Adicionalmente, se encontró que la energía agrovoltaica puede generar sinergias beneficiosas

entre los sectores de energía y agricultura, además de reducir la huella de carbono, esta integración puede diversificar los ingresos de los agricultores y contribuir al desarrollo sostenible. (Sinergias entre sectores: Energía Agrovoltáica) (Jimenez).

Se analiza en el artículo "Dual use of agricultural land: Introducing 'agrivoltaics' in Phoenix Metropolitan Statistical Area, USA" (Debaleena Majumdar, 2018), la introducción de la agrivoltáica en el Área Estadística Metropolitana de Phoenix. Este estudio pone en relieve cómo la coexistencia de cultivos y paneles solares puede transformar la utilización de la tierra, generando impactos positivos en la producción agrícola y energética. De igual forma se explora cómo la energía solar se aplica en la agricultura para diversos fines ("Uso de la energía solar en la agricultura"), como riego, iluminación en invernaderos y bombeo de agua. Esta integración puede conducir a reducciones significativas en los costos operativos y contribuir a la sostenibilidad del sector agrícola.

Así mismo las comunidades energéticas hacen parte fundamental en la integración de la energía agrovoltáica (Susana Soeiro, 2020). La cual proporciona un valioso antecedente al examinar en detalle los beneficios y los impulsores de la energía renovable comunitaria (CE) a través de un análisis de encuestas. Los resultados de este estudio destacan la creciente importancia de la CE como una solución energética sostenible, especialmente enfocada en sus beneficios ambientales, y subrayan la necesidad de considerar cuidadosamente el impacto de la CE en el entorno y la comunidad local. Estos hallazgos respaldan la relevancia de explorar la integración de sistemas energéticos comunitarios en el contexto de la transición energética y la sostenibilidad a nivel local y regional.

La integración de energía fotovoltaica con la industria agropecuaria promete beneficios ambientales considerables. La generación de energía solar reduce la dependencia de combustibles fósiles, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuyendo a la mitigación del cambio climático. Además, la combinación de sistemas agrovoltaicos puede reducir la necesidad de deforestación y la conversión de tierras para la generación de energía, conservando los ecosistemas naturales y la biodiversidad (C. Dupraz H. M., 2011).

La integración de sistemas agrovoltaicos tiene el potencial de mejorar la productividad en ambos frentes. La generación de energía solar diversifica los ingresos y proporciona una fuente de ingresos adicional para los agricultores, mientras que la sombra parcial de los paneles solares puede proteger los cultivos del estrés por calor, aumentando su rendimiento y calidad. Esto también permite la cosecha de productos de alto valor en un ambiente más controlado (Stephan Schindele, 2020).

Los antecedentes presentados resaltan la importancia de un diseño y planificación adecuados para lograr la eficiente coexistencia de paneles solares y cultivos. La interacción entre la radiación solar, el microclima y el rendimiento de los cultivos es un factor clave a considerar en la implementación de sistemas agrovoltaicos. Además, el análisis económico y la consideración de políticas juegan un papel esencial para garantizar la viabilidad financiera y la promoción de esta innovación.

3. Marco normativo y regulatorio de implementación de fuentes no convencionales de energías renovables

En este capítulo se resumen las leyes, resoluciones, decretos reglamentarios y normativas relacionadas con la implementación de fuentes de generación no convencionales con sistemas renovables en Colombia.

3.1 Ley 1715 de 2014

La Ley 1715 de 2014 en Colombia tiene como su propósito central la creación de un entorno jurídico y la implementación de herramientas legales destinadas a fomentar la utilización de fuentes de energía no convencionales, especialmente las de naturaleza renovable, así como promover la inversión, la investigación y el avance de tecnologías limpias para la generación de energía. Esta ley también establece beneficios tributarios que incluyen deducciones en el impuesto de renta, beneficios en el impuesto sobre la renta, tratamiento tributario preferencial para inversionistas en ciencia, tecnología e innovación, descuentos tributarios a la inversión en proyectos de innovación tecnológica, incentivos para la contratación de investigadores y beneficios para la propiedad industrial. Estos beneficios buscan impulsar la inversión en ciencia, tecnología e innovación, así como promover la transición hacia fuentes de energía más limpias. (Congreso de la República, 2014).

3.2 Resolución CREG 030 de 2018

Esta resolución establece los criterios para la certificación de proyectos de generación de energía a partir de fuentes no convencionales de energía renovable en Colombia. la certificación de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de

energías renovables (FNCER) es otorgada por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (UPME, 2018)

3.3 Resolución 1283 de 2016

Mediante la Resolución 1283 de 2016, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece los procedimientos y criterios necesarios para la emisión de la certificación de beneficio ambiental con respecto a nuevas inversiones en proyectos de fuentes de energía renovable no convencional (FNCER) y la gestión eficiente de la energía. Esto se hace en cumplimiento de la legislación vigente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016).

3.4 Decreto 1303 de 2018

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en virtud del Decreto 1303/2018, establece que, en un plazo máximo de seis meses a partir de la entrada en vigor del certificado de exclusión del Impuesto al Valor Agregado (IVA), los beneficiarios pueden hacer efectivos los beneficios e incentivos fiscales, en cumplimiento de las disposiciones legales vigentes. Esto contribuye al estímulo de proyectos y acciones relacionados con la sostenibilidad ambiental y energética, de acuerdo con las leyes existentes (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

3.5 Resolución CREG 174 de 2021

Esta resolución define las reglas que permiten a los usuarios conectarse al operador de red como auto generadores o generadores distribuidos de manera ágil y sencilla. (Ministerio de minas y energías, 2021)

3.6 Resolución 319 de 2022 de la UPME

Mediante la Resolución 319/2022, la Unidad de Planeación Minero Energética establece los requisitos y el procedimiento que deben seguirse para la evaluación de las solicitudes de certificación que permiten acceder a los incentivos fiscales contemplados en la Ley 1715 de 2014. Este proceso es administrado por el Ministerio de Minas y Energía, y tiene como objetivo promover el uso de energías renovables y tecnologías limpias (UPME, 2022).

3.7 Artículo 235 de la Ley 2294 de 2023 del Plan Nacional de Desarrollo 2022 – 2026

El PND permite que las comunidades puedan constituir Comunidades Energéticas con el fin de generar, comercializar y/o utilizar eficientemente la energía a través del uso de fuentes no convencionales de energía renovables -FNCER-, combustibles renovables y recursos energéticos distribuidos (Funcion Publica, 2023).

3.8 NTC 2050

La Norma Técnica Colombiana 2050 establece las directrices para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de instalaciones eléctricas en sistemas de baja, media y alta tensión. Esta norma abarca diversos aspectos, como la seguridad eléctrica, protección contra sobretensiones, sistemas de puesta a tierra, distribución eléctrica y métodos de cableado. Fue establecida con el propósito de garantizar la seguridad eléctrica y la conformidad con los estándares en el diseño y operación de instalaciones eléctricas (NTC 2050, 2019).

3.9 Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)

El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIIE) es un documento normativo que establece los requisitos necesarios para garantizar la seguridad de las personas, los animales y el medio ambiente en relación con productos e instalaciones eléctricas. Esto se logra mediante la regulación detallada de estándares y prácticas que deben seguirse en la ejecución de proyectos eléctricos, asegurando así su adecuado funcionamiento y cumplimiento de normas de seguridad establecidas por CIDET (CIDET, 2021).

4. Marco conceptual de la energía agrovoltaica

En este capítulo se proporciona la base conceptual necesaria para analizar y abordar las temáticas del trabajo de grado. En él se definen los principios y conceptos necesarios para la comprensión de los tópicos relacionados con la energía agrovoltaica.

4.1 Transición energética

La transición energética busca transformar los sistemas de producción y consumo de energía de fuentes no renovables y contaminantes hacia fuentes renovables y más limpias, con el objetivo de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los efectos del cambio climático. Sus principales objetivos son: reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, aumentar la seguridad energética, promover la eficiencia energética, fomentar la innovación y el desarrollo tecnológico en el sector energético, crear empleos y fomentar el crecimiento económico sostenible (VILCHES, 2014).

4.2 Energía agrovoltaica

La energía agrovoltaica es una aplicación energética que combina la producción de energía solar con la producción agrícola en un mismo espacio, obteniendo dos beneficios en un mismo lugar: producción de alimentos y generación de energía renovable. Además, puede reducir los costos de producción agrícola, ya que proporciona sombra para los cultivos y reduce la evaporación del agua, mejorando la eficiencia en el uso del recurso hídrico (C. Dupraz H. M., 2011).

4.3 Paneles solares

Los paneles solares son dispositivos que aprovechan la energía del sol para generar electricidad, compuestos por celdas fotovoltaicas que convierten la luz solar en electricidad

mediante un proceso llamado efecto fotovoltaico. Generan corriente eléctrica continua que puede ser utilizada para alimentar dispositivos eléctricos o almacenarla en baterías para su uso posterior, al igual que son una fuente de energía renovable y limpia, y su uso ayuda a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y a mitigar el impacto del cambio climático (CELSIA, 2018).

4.3.1 Paneles monocristalinos

Los paneles solares monocristalinos son un tipo de panel solar fotovoltaico fabricado con células solares de silicio monocristalino, obtenidas a partir de un único cristal de silicio, lo que les otorga una estructura uniforme y una mayor eficiencia en la conversión de la energía solar en electricidad, teniendo una mayor generación de electricidad por unidad de superficie expuesta a la luz solar. Además, tienen una vida útil más larga y un mejor rendimiento en condiciones de baja luminosidad. No obstante, su fabricación es más costosa (Hilcu, otovo, 2021).

4.3.2 Paneles policristalinos

Los paneles solares policristalinos son un tipo de panel solar fotovoltaico que se fabrican con células solares de silicio policristalino. Los paneles solares policristalinos tienen una eficiencia ligeramente menor que los paneles monocristalinos, lo que significa que generan menos electricidad por unidad de superficie expuesta a la luz solar. Sin embargo, su fabricación es menos costosa, lo que se traduce en un precio final más accesible (Hilcu, otovo, 2021).

4.4 Inversores

Un inversor es un dispositivo que convierte corriente continua (DC) en corriente alterna (AC) ajustando la polaridad y amplitud de la tensión de entrada. Se utiliza para alimentar dispositivos que requieren corriente alterna, como electrodomésticos y equipos electrónicos. Un inversor se utiliza para convertir la corriente continua generada por los paneles solares en

corriente alterna, permitiendo aprovechar la energía solar generada y utilizarla en sistemas eléctricos convencionales (Diaz, 2022).

4.4.1 Inversor de onda pura

Los inversores de onda pura son dispositivos electrónicos que desempeñan un papel crucial en la conversión de la energía de corriente continua (CC), como la de una batería, en una forma de onda de corriente alterna (CA) que se asemeja a una señal sinusoidal pura. La característica distintiva de estos inversores es su capacidad para generar una salida de alta calidad, sin distorsiones, lo que los hace ideales para aplicaciones sensibles a la calidad de la energía eléctrica, como dispositivos electrónicos y equipos médicos críticos (Merlin, 2022).

4.4.2 Inversor On Grid

Los inversores *On Grid*, también conocidos como inversores conectados a la red, son dispositivos diseñados para funcionar en conjunto con la red eléctrica convencional. Su función principal es tomar la energía de fuentes como paneles solares y convertirla en corriente alterna que se puede utilizar en el hogar. Además, estos inversores permiten la inyección de energía excedente en la red pública, lo que puede reducir significativamente o incluso eliminar la factura de electricidad al aprovechar la generación distribuida (SURIA ENERGY, s.f.).

4.4.3 Inversor híbrido

Los inversores híbridos son dispositivos que combinan características de los inversores de onda pura y los inversores on-grid. Están diseñados para sistemas de energía que integran fuentes renovables, como paneles solares, con sistemas de almacenamiento de energía, como baterías. Una de sus principales ventajas es la capacidad de funcionar tanto conectados a la red como en modo independiente (off-grid) en caso de cortes de energía. Esto proporciona

flexibilidad y resiliencia al permitir el uso de energía renovable y almacenada cuando la red no está disponible (AUTOSOLAR, 2021).

4.5 Baterías

Una batería es un dispositivo electroquímico que almacena energía en forma de reacciones químicas y la libera en forma de electricidad cuando se requiere. En sistemas fotovoltaicos, las baterías funcionan como dispositivos de almacenamiento intermedio, capturando la energía generada por los paneles solares y liberándola posteriormente. Esto asegura un flujo constante de energía y contribuye a la estabilidad y confiabilidad del sistema fotovoltaico al sincronizar la oferta y la demanda de energía en tiempo real (Edpenergia, 2021).

4.5.1 Baterías de gel

Las baterías de gel son un tipo de batería recargable que utiliza un electrolito en estado de gel en lugar de líquido. Sus principales ventajas incluyen mayor seguridad debido a la ausencia de fugas y derrames, una vida útil prolongada y una resistencia a condiciones extremas de temperatura. Estas características hacen que las baterías de gel sean ideales para aplicaciones donde la fiabilidad y la seguridad son fundamentales (REBACAS, 2019).

4.5.2 Baterías AGM

Una batería AGM (Absorbent Glass Mat) es una variante de las baterías de plomo-ácido selladas, la cual utiliza una estera de vidrio absorbente para retener el electrolito en lugar de un electrolito líquido. Estas tienen ventajas como una baja tasa de autodescarga y la ausencia de derrames de ácido, al igual que la resistencia a vibraciones y su capacidad de entrega de corriente (REBACAS, 2019).

4.5.3 Baterías de litio

Las baterías de litio se distinguen por su capacidad para almacenar una abundante cantidad de energía en un espacio compacto y liviano. Son adecuadas para aplicaciones portátiles y sistemas de almacenamiento de energía debido a su eficiencia y larga vida útil. Aunque son más costosas en términos iniciales, su mayor eficiencia y durabilidad a lo largo del tiempo pueden compensar este costo adicional. Las baterías de litio también tienen una tasa de auto descarga más baja y son capaces de proporcionar energía constante a lo largo de su ciclo de vida (IBERDROLA, s.f.).

4.6 Sistemas fotovoltaicos

Un sistema fotovoltaico es un conjunto de paneles solares que están diseñados para generar electricidad a partir de la energía del sol. El sistema fotovoltaico consta de los paneles solares, que están conectados entre sí para formar un conjunto, y de otros componentes, como el inversor y el sistema de almacenamiento de energía. Los paneles solares convierten la energía solar en electricidad en forma de corriente continua, que luego es transformada por el inversor en corriente alterna. El sistema de almacenamiento de energía permite almacenar la electricidad generada por el sistema fotovoltaico para su uso posterior, lo que permite maximizar su aprovechamiento (QuimiNet, 2011).

4.6.1 Sistema On Grid

Un sistema *On Grid* es un tipo de sistema fotovoltaico que está conectado a la red eléctrica convencional, lo que permite reducir los costos de energía eléctrica. Cuando el sistema genera más electricidad de la que se consume, el excedente se inyecta en la red eléctrica, lo que se traduce en un crédito en la factura de electricidad. Los sistemas *On Grid* no requieren la

instalación de baterías, lo que reduce significativamente los costos de instalación y mantenimiento (SOLCOR, s.f.).

4.6.2 Sistema Off Grid

Un sistema *Off Grid*, también conocido como sistema aislado, es un tipo de sistema fotovoltaico que no está conectado a la red eléctrica convencional. En este tipo de sistema, los paneles solares generan electricidad que se almacena en baterías para su uso posterior. Los sistemas *Off Grid* son adecuados para zonas remotas donde no hay acceso a la red eléctrica convencional, y también pueden ser utilizados como sistemas de respaldo en caso de apagones o fallos en la red eléctrica (SOLCOR, s.f.).

4.6.3 Sistema híbrido

Un sistema híbrido es un tipo de sistema fotovoltaico que combina elementos de los sistemas *On Grid* y *Off Grid*. Este tipo de sistema utiliza los paneles solares para generar electricidad, que puede ser utilizada para alimentar dispositivos eléctricos o almacenar en baterías para su uso posterior (Energías Inteligentes, 2014).

4.7 Forrajes perennes

Los forrajes perennes son plantas que tienen una vida útil de varios años y son utilizadas como alimento para el ganado. A diferencia de los forrajes anuales, que deben ser replantados cada año, los forrajes perennes pueden proporcionar alimento de manera continua durante varios años. Además, los forrajes perennes tienen la capacidad de retener el suelo y reducir la erosión, lo que puede mejorar la salud del suelo y reducir los problemas ambientales (Bauer, 2018).

4.7.1 *Tithonia diversifolia*

La *Tithonia diversifolia* es una planta perenne originaria de América Central que crece rápidamente, alcanzando alturas de hasta 3-4 metros en un plazo corto de tiempo. Esta planta se

utiliza en agricultura como fuente de abono orgánico y para la producción de forraje para el ganado. Además, tiene la capacidad de mejorar la fertilidad del suelo y de controlar algunas plagas de insectos (A. Pérez, 2009).

4.7.2 *Cynodon nlemfuensis*

Cynodon nlemfuensis, conocido también como Pasto Estrella, es una planta perenne originaria de África ampliamente utilizada como forraje para el ganado. Esta especie posee una notable capacidad de producción y puede alcanzar alturas de hasta 5 metros, brindando una fuente abundante de hojas y tallos verdes que representan un valioso recurso nutricional para el ganado (Pastos y Forrajes, 2019).

4.7.3 *Lolium perenne*

El *Lolium perenne*, también conocido como Ray-Grass, es una planta herbácea perenne utilizada comúnmente como forraje para el ganado en las regiones templadas y subtropicales. Es una planta de crecimiento rápido y alta productividad, que produce hojas verdes y nutritivas para el ganado. Tiene una alta tolerancia al pastoreo y es capaz de regenerarse rápidamente después de ser cortado. Además, es resistente a enfermedades y plagas, y puede crecer en una amplia variedad de suelos y condiciones climáticas (Semillas Dalmau, 2022).

5. Valoración de condiciones agroclimáticas

Al implementar un sistema fotovoltaico y llevar a cabo la cosecha de forrajes, es fundamental considerar las condiciones agroclimáticas, ya que estas tienen un impacto directo en la eficiencia tanto de la generación de energía eléctrica como en la producción de biomasa.

La eficiencia óptima de los paneles solares se basa en una serie de condiciones ambientales críticas que influyen en su funcionamiento y rendimiento. Esto se debe a que, en estas condiciones, la resistencia eléctrica de los materiales utilizados en los paneles es la más baja, lo que permite una conversión de energía solar a eléctrica más eficiente. En temperaturas extremadamente altas o bajas, la eficiencia de los paneles tiende a disminuir.

Por otro lado, en días lluviosos, aunque la lluvia puede contribuir parcialmente a la limpieza superficial de los paneles, también conlleva una mayor nubosidad. Esta nubosidad reduce significativamente la cantidad de radiación solar directa que llega a los paneles generando irradiación difusa, lo que resulta en una disminución de la eficiencia de conversión de energía solar. Además, la humedad residual en los paneles puede causar pérdidas adicionales de eficiencia debido a la difusión de la luz.

La duración de las horas de luz solar es un factor determinante en la generación de energía solar. Durante el día, cuando el sol está presente, la radiación solar es significativamente más intensa cerca del mediodía solar, permitiendo una producción de energía máxima.

La consideración de estas variables es igualmente esencial en el proceso de cosecha, ya que el tipo de cultivo que se desee plantar requiere condiciones específicas para su desarrollo y óptima producción. La temperatura ambiente, es de igual forma importante para el crecimiento y exitosa producción de ciertos cultivos, ya que influye en la velocidad de desarrollo, la fotosíntesis y la formación de frutos. Además, la precipitación debe ser adecuada y bien

distribuida a lo largo del ciclo de cultivo, ya que el exceso o la falta de agua pueden tener un impacto negativo en la calidad y el rendimiento de la cosecha.

Las horas de luz solar también cumplen una función importante en la agricultura, ya que afectan directamente la tasa de fotosíntesis y el metabolismo de las plantas. La duración y la intensidad de la luz solar son factores críticos para garantizar una adecuada producción de energía mediante la fotosíntesis y, por ende, un crecimiento saludable de los cultivos.

5.1 Estimación de variables agroclimáticas en Málaga

Se estiman las condiciones agroclimáticas del municipio de Málaga Santander, del 2022 y 2023, tomando varios datos de referencia de varias estaciones meteorológicas como el de la Universidad Industrial de Santander, el aeropuerto de Palonegro, el IDEAM y la NASA. Haciendo una comparativa entre ambos años y teniendo principal énfasis en la estación de la universidad y el aeropuerto ya que estas dos estaciones son las más cercanas al punto de estudio. Obteniendo resultados muy similares de radiación, temperatura, nubosidad y horas de luz solar entre ambos años, presentando un cambio significativo en la cantidad de mm/m^2 de lluvia, observando un incremento en el 2023 con respecto al 2022. Los datos del 2023 fueron tomados hasta el mes de septiembre, los meses restantes del año fueron llenados según estimaciones de las mismas estaciones meteorológicas mencionadas anteriormente. Las tablas 1 y 2 muestran las variables agroclimáticas durante los años 2022 y 2023 en el municipio de Málaga.

Tabla1*Variables agroclimáticas 2022 de Málaga, Santander*

2022	PROMEDIO
Radiación Solar [kW/m ²]	5,158
Temperatura Máxima [°C]	27,808
Temperatura Mínima [°C]	10,510
Temperatura Promedio [°C]	17,217
Precipitación [%días]	14,708
Lluvia [mm/m ²]	53,917
Nubosidad [%]	84,833
Horas de luz natural [h]	11,992

Nota. Fuente: Autores, 2023

Tabla2*Variables agroclimáticas 2023 de Málaga, Santander*

2023	PROMEDIO
Radiación Solar [kW/m ²]	5,208
Temperatura Máxima [°C]	24,117
Temperatura Mínima [°C]	11,924
Temperatura Promedio [°C]	18,020
Precipitación [%días]	15,458
Lluvia [mm/m ²]	99,833
Nubosidad [%]	86,500
Horas de luz natural [h]	12,117

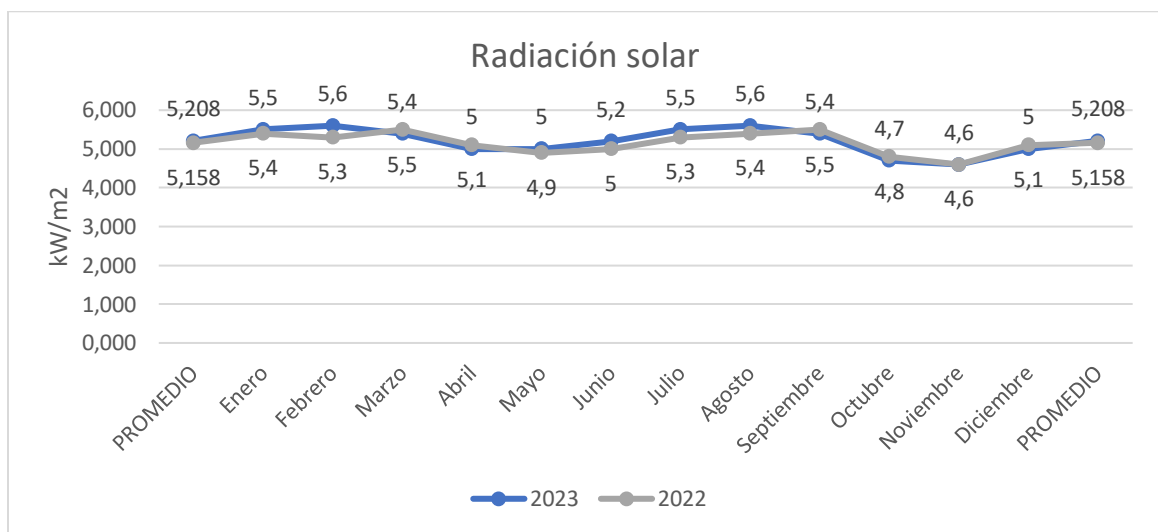
Nota. Fuente: Autores, 2023

A continuación, se hace la comparativa de ambos años para cada una de las variables, resaltando las variaciones más significativas en cada una de estas.

Se observó una radiación promedio constante a lo largo de los dos años, sin embargo, se obtiene una radiación solar promedio mayor en 2023 (ver Figura 1).

Figura 1

Comparativa por mes de radiación solar 2022-2023.

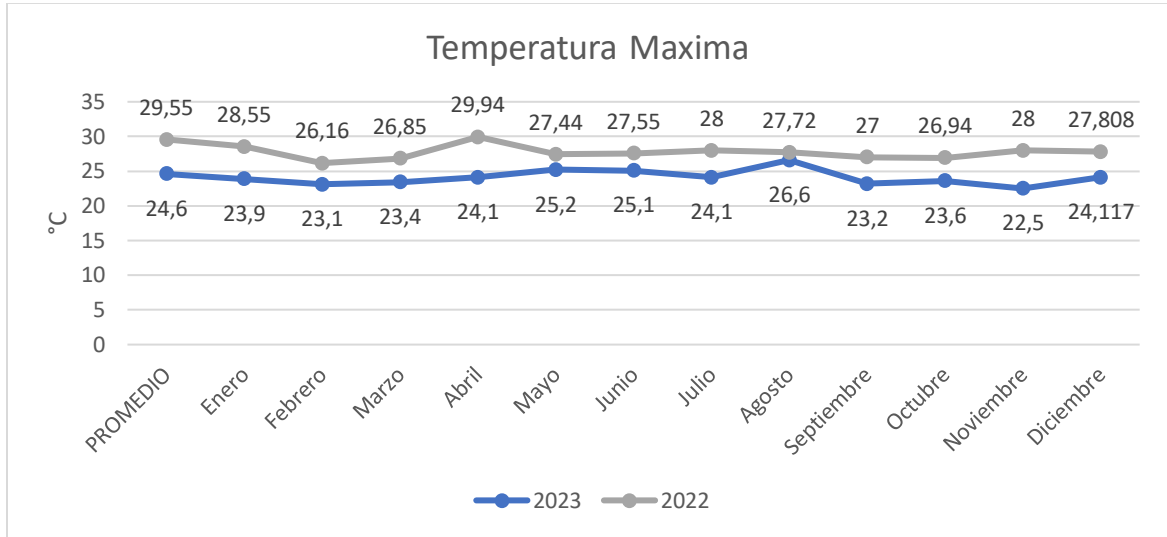


Nota. Fuente: Autores, 2023

La comparativa obtenida entre las temperaturas de cada año muestran un promedio de temperatura máxima mayor en 2022 (ver Figura 2), un promedio de temperatura mínima menor en 2022 (ver Figura 3) y una temperatura promedio mayor en 2023 (ver Figura 4). Manteniéndose muy similar a lo largo del año, y obteniendo resultados similares.

Figura 2

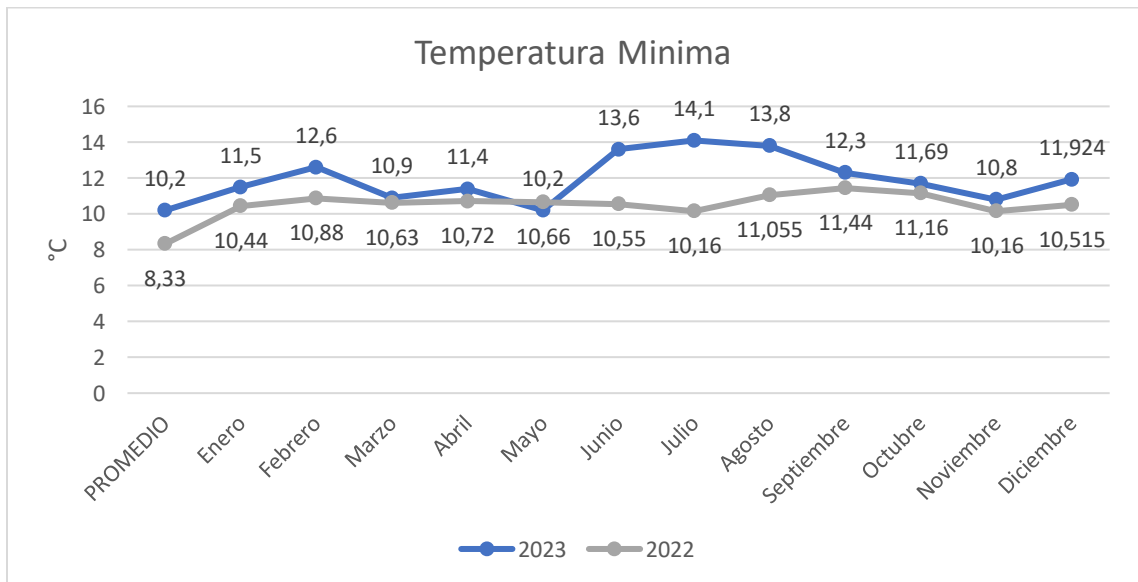
Comparativa por mes de Temperatura máxima 2022-2023.



Nota. Fuente: Autores, 2023

Figura 3

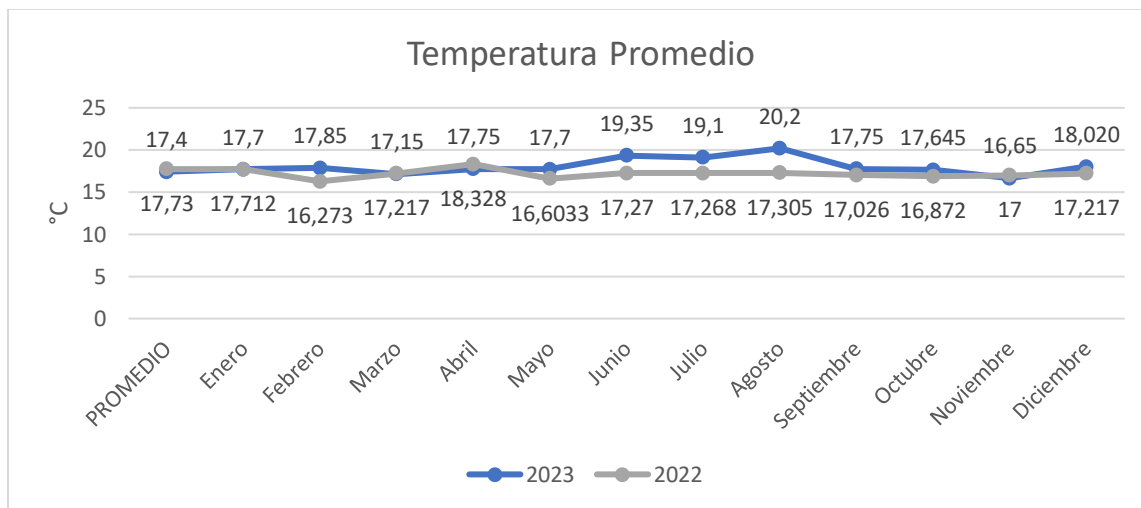
Comparativa por mes de Temperatura mínima 2022-2023.



Nota. Fuente: Autores, 2023

Figura 4

Comparativa por mes de Temperatura promedio 2022-2023.

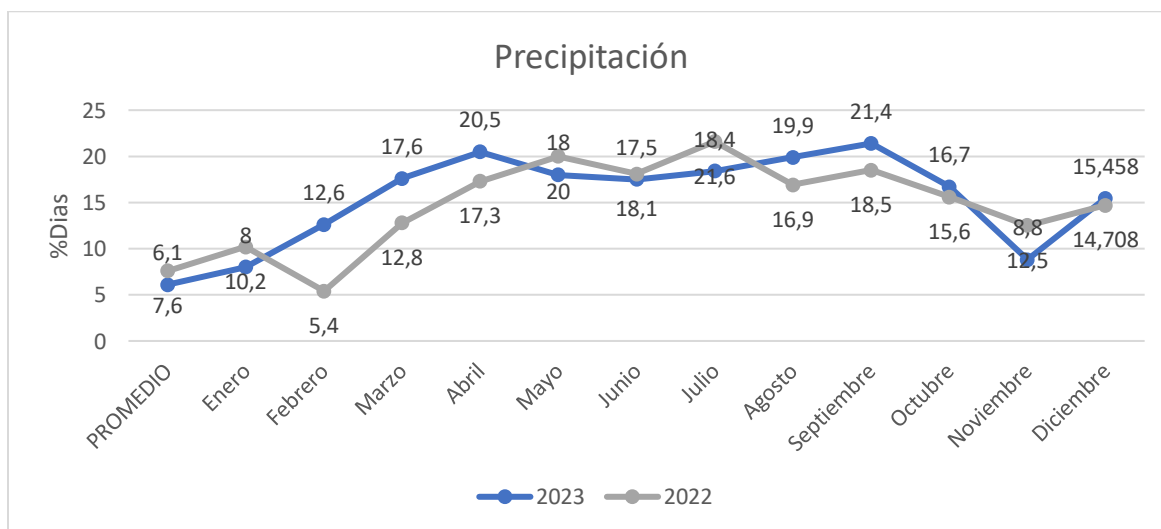


Nota. Fuente: Autores, 2023

Se observa un promedio muy similar en días con probabilidad de lluvia en ambos años (ver Figura 5), y un aumento significativo en los mm/m² de lluvia en 2023 frente a 2022 (ver Figura 6).

Figura 5

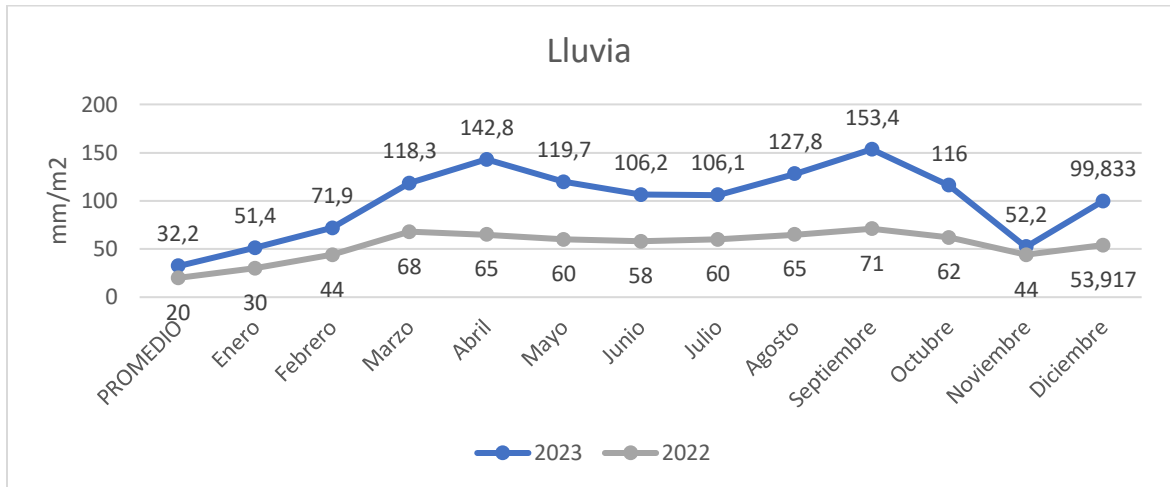
Comparativa por mes de probabilidad de precipitación 2022-2023.



Nota. Fuente: Autores, 2023

Figura 6

Comparativa por mes de lluvia 2022-2023.

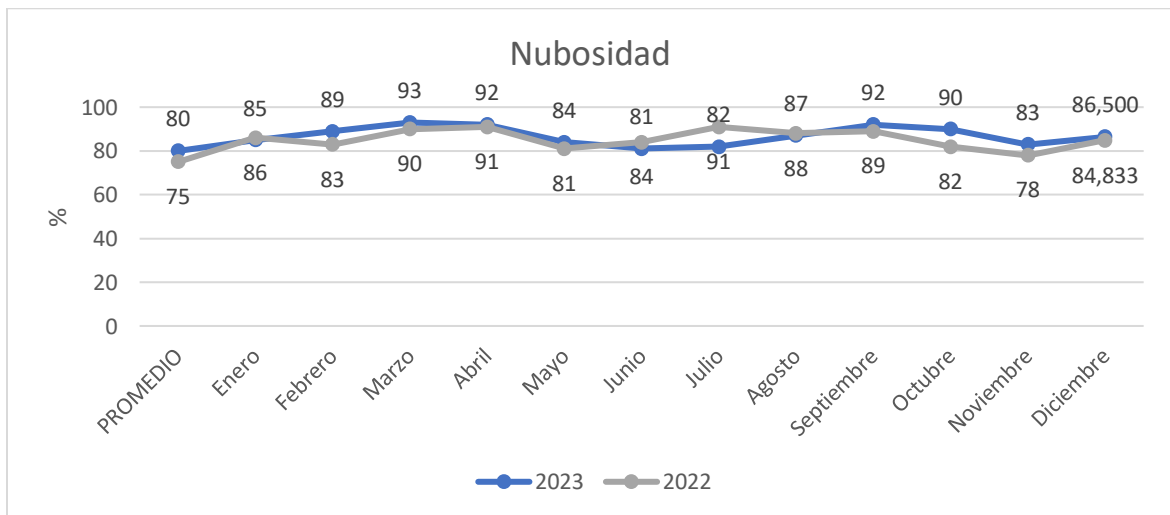


Nota. Fuente: Autores, 2023

Se observó una mayor nubosidad en 2023 con respecto a 2022 (ver Figura 7), al igual que una mayor cantidad de horas luz solar (ver Figura 8).

Figura 7

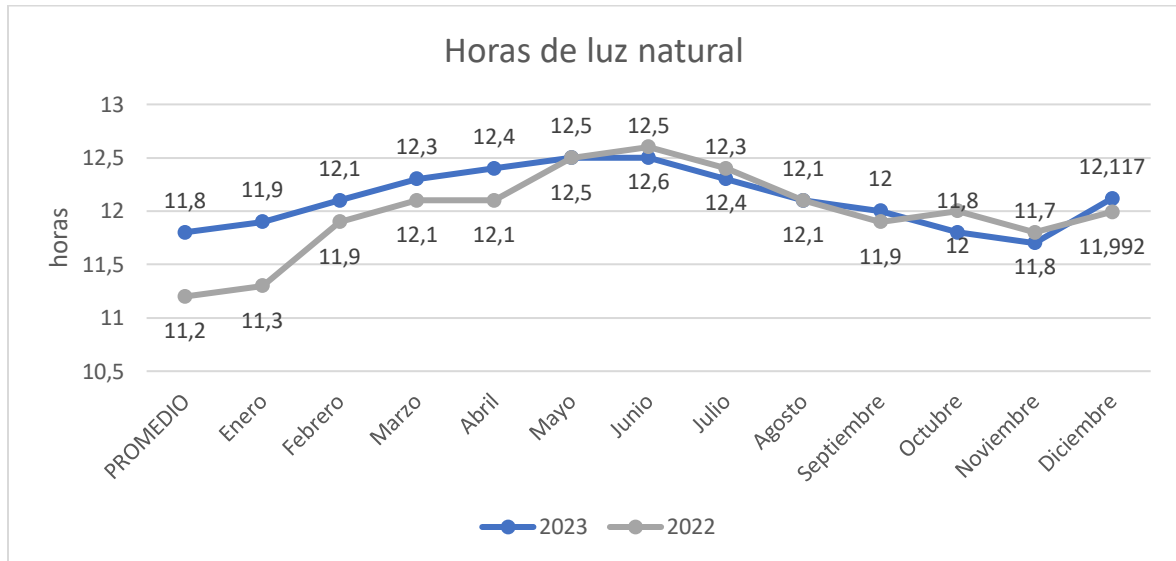
Comparativa por mes de Nubosidad 2022-2023.



Nota. Fuente: Autores, 2023

Figura 8

Comparativa por mes de Horas de luz solar 2022-2023.



Nota. Fuente: Autores, 2023

Los paneles solares funcionan óptimamente con rangos de temperatura entre los 20 y los 25 grados Celsius (°C) (SOLARAMA, 2023), y con radiación solar mayor a los 1000 W/m² (Hogar Sense, 2023). Al igual se deben tener en cuenta la nubosidad y la precipitación, ya que son factores que influyen en la eficiencia de los paneles.

6. Evaluación de forrajes perennes

Para determinar la viabilidad de integración de la industria agropecuaria con la generación de energía eléctrica en Málaga Santander, se debe analizar varios factores relacionados con el tipo de cosecha que se planea implementar. Estos factores incluyen la productividad en términos de kilogramos de materia fresca por metro cuadrado (Kg/m^2) y kilogramos de materia seca por metro cuadrado (Kg/m^2), al igual, que el periodo de recolección de biomasa, contenido de materia seca, producción bajo condiciones normales y bajo condiciones de sombra.

Para llevar a cabo este proyecto, se estimaron estos datos utilizando los forrajes perennes más comunes en Málaga, tales como: *Lolium perenne*, *Tithonia diversifolia* y *Cynodon nlemfuensis*. Estas estimaciones se llevaron a cabo simulando la sombra que generarían los paneles solares sobre los forrajes al momento de realizar la integración. Con el objetivo de valorar su viabilidad de integración con los paneles solares.

6.1 Estimación de producción de materia fresca

Se llevó a cabo la medición de la producción de materia fresca obtenida mediante el corte en un metro cuadrado de cada uno de los forrajes simultáneamente, haciendo el corte en intervalos de 40 días y registrando estos datos a lo largo de un período de 5 meses. Esto para los forrajes sin y con sombreado. Posteriormente se estimó su producción por hectárea en un año. Obteniendo un aumento de producción de biomasa en el Ray-Grass, y una disminución poco significativa en el botón de oro y el pasto estrella. Las tablas 3 a 5 muestran los resultados obtenidos para los tres forrajes en la producción de materia fresca.

Tabla3

Producción de materia fresca por hectárea en un año (Ray Grass).

	Ray-grass (<i>Lolium perenne</i>)	Ray-grass (<i>Lolium perenne</i>)	
	sombra	sin sombra	
kilogramos de materia fresca por metro cuadrado (Kg/m ²)	1,34	1,24	Corte 1
	1,36	1,22	Corte 2
	1,35	1,25	Corte 3
	1,33	1,26	Corte 4
Promedio	1,345	1,2425	
kilogramos de materia fresca por hectárea (Kg/ha)	13450	12425	
kilogramos de materia fresca por hectárea (Kg/ha) anual	122.731,25	113.378,13	

Nota. Fuente: Autores, 2023

Tabla4

Producción de materia fresca por hectárea en un año (Tithonia diversifolia).

	Boton de oro (<i>Tithonia diversifolia</i>)	Boton de oro (<i>Tithonia diversifolia</i>)	
	sombra	sin sombra	
kilogramos de materia fresca por metro cuadrado (Kg/m ²)	1,41	1,78	Corte 1
	1,45	1,81	Corte 2
	1,54	1,76	Corte 3
	1,49	1,7	Corte 4
Promedio	1,4725	1,7625	
kilogramos de materia fresca por hectárea (Kg/ha)	14725	17625	
kilogramos de materia fresca por hectárea (Kg/ha) anual	134.365,63	160.828,13	

Nota. Fuente: Autores, 2023

Tabla5

Producción de materia fresca por hectárea en un año (cynodon nlemfuensis).

	pasto estrella (cynodon nlemfuensis)	pasto estrella (cynodon nlemfuensis)	
	sombra	sin sombra	
kilogramos de materia fresca por metro cuadrado (Kg/m ²)	1,45	1,56	Corte 1
	1,44	1,54	Corte 2
	1,52	1,65	Corte 3
	1,48	1,66	Corte 4
Promedio	1,4725	1,6025	
kilogramos de materia fresca por hectárea (Kg/ha)	14725	16025	
kilogramos de materia fresca por hectárea (Kg/ha) anual	134.365,63	146.228,13	

Nota. Fuente: Autores, 2023

6.2 Estimación de producción de materia seca

Para la estimación de producción de materia seca se lleva la materia fresca a un horno durante 24 horas a 105 grados Celsius (°C), con el fin de deshidratar la materia fresca y obtener la cantidad real de biomasa producida. Siendo la materia seca entre el 17% y 19% de la materia fresca cortada para los tres forrajes. Las tablas 6 a 8 muestran los resultados obtenidos para los tres forrajes en la estimación de materia seca.

Tabla6

Kilogramos de materia seca por metro cuadrado (Ray Grass).

	Ray-grass (<i>Lolium perenne</i>) sombra	Ray-grass (<i>Lolium perenne</i>) sin sombra	
Contenido en materia seca	17,2	18,4	
kilogramos de materia seca por metro cuadrado (Kg/m ²)	0,23048	0,21328	Corte 1
	0,23392	0,20984	Corte 2
	0,2322	0,215	Corte 3
	0,22876	0,21672	Corte 4
Promedio	0,23134	0,21371	
kilogramos de materia seca por hectárea (Kg/ha)	2313,4	2137,1	
kilogramos de materia seca por hectárea (Kg/ha) anual	21.109,78	19.501,04	

Nota. Fuente: Autores, 2023

Tabla7

Kilogramos de materia seca por hectárea en un año (Tithonia diversifolia).

	Boton de oro (<i>Tithonia diversifolia</i>) sombra	Boton de oro (<i>Tithonia diversifolia</i>) sin sombra	
Contenido en materia seca	17,9	18,6	
kilogramos de materia seca por metro cuadrado (Kg/m ²)	0,24252	0,30616	Corte 1
	0,2494	0,31132	Corte 2
	0,26488	0,30272	Corte 3
	0,25628	0,2924	Corte 4
Promedio	0,25327	0,30315	
kilogramos de materia seca por hectárea (Kg/ha)	2532,7	3031,5	
kilogramos de materia seca por hectárea (Kg/ha) anual	23.110,89	27.662,44	

Nota. Fuente: Autores, 2023

Tabla8

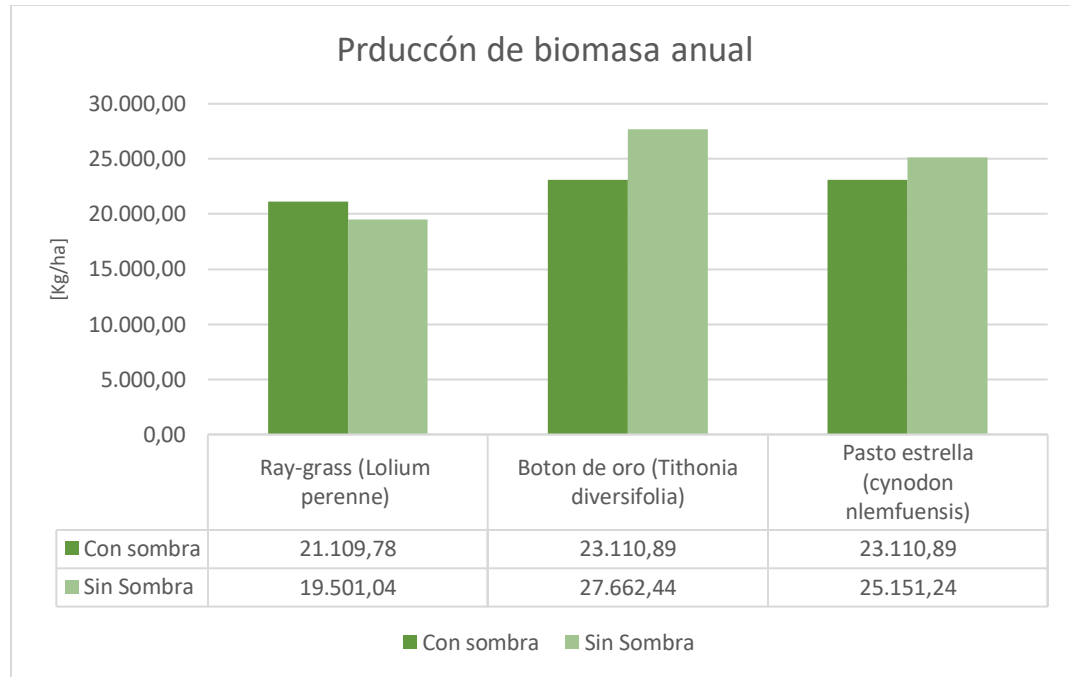
Kilogramos de materia seca por hectárea en un año (cynodon nlemfuensis).

	pasto estrella (cynodon nlemfuensis)	pasto estrella (cynodon nlemfuensis)	
	sombra	sin sombra	
Contenido en materia seca	17,5	18,1	
kilogramos de materia seca por metro cuadrado (Kg/m ²)	0,2494	0,26832	Corte 1
	0,24768	0,26488	Corte 2
	0,26144	0,2838	Corte 3
	0,25456	0,28552	Corte 4
Promedio	0,25327	0,27563	
kilogramos de materia seca por hectárea (Kg/ha)	2532,7	2756,3	
kilogramos de materia seca por hectárea (Kg/ha) anual	23.110,89	25.151,24	

Nota. Fuente: Autores, 2023

6.3 Análisis de la producción de biomasa

Según los datos obtenidos, en condiciones de sombra el *Lolium perenne* (Ray-Grass) es el único forraje que experimenta un aumento en su producción de biomasa, obteniendo un aumento de un 8 por ciento (%) al estar bajo condiciones de sombra. Por otro lado, los otros dos tipos de forraje muestran una disminución en su producción bajo estas condiciones, teniendo el *Tithonia diversifolia* (Boton de oro) una disminución del 17% y el *Cynodon nlemfuensis* (Pasto estrella) del 8%, pero de igual forma mostrando una buena producción de biomasa, llegando a ser bajo con condiciones de sombra mayor que la del Ray-Grass. Demostrando esto su viabilidad de implementación con el sistema fotovoltaico. La Figura 9 muestra la producción de biomasa con sombra y sin sombra para los tres cultivos perennes.

Figura 9*Producción de biomasa anual.*

Nota. Fuente: Autores, 2023

7. Costos de prefactibilidad de sistemas fotovoltaicos

Para comprender el impacto y viabilidad de implementar un sistema fotovoltaico, es esencial explorar en detalle los costos asociados a la instalación, operación y mantenimiento de estos sistemas. A su vez es necesario verificar que sea viable la implementación de este sistema, haciendo una comparación de precios con el del kWh en el sector, mediante la metodología LCOE (Costo nivelado de energía).

7.1 Metodología LCOE

Para llevar a cabo la metodología LCOE es necesario calcular la producción anual, el costo inicial y el costo anual. Para esto se debe tener conocimiento de los siguientes datos: capacidad del sistema en watts pico (Wp), horas de sol al año y vida útil del sistema.

7.1.1 producción anual

Para estimar la producción anual de energía eléctrica del sistema que se va a instalar se puede usar la siguiente ecuación:

$$\text{Producción Anual} = kWp \times HSP \times 365 \times FC \quad (1)$$

Dónde:

- kWp es la capacidad nominal del sistema en kilovatios pico
- HSP son las horas de luz natural pico en un día.
- 365 son los días del año.
- FC es la eficiencia del sistema.

Nota: Las horas de luz natural son obtenidas de la estimación de condiciones agroclimáticas. La eficiencia es dada por el proveedor.

7.1.2 Costo inicial

Para hacer una adecuada estimación del costo inicial de implementación de un sistema fotovoltaico se deben tener en cuenta varios factores tales como: tipo de panel solar, capacidad del panel solar, capacidad del sistema, tipo de sistema, estructura, cableado, etc. Para calcular el costo inicial se deben sumar los costos de todos los equipos que lleve según el sistema, teniendo en cuenta el número de paneles, inversores y baterías según la necesidad requerida.

Costo inicial

$$= \text{Paneles solares} + \text{Inversor} + \text{Baterias} + \text{Cableado} + \text{Estructura} \\ + \text{instalación (2)}$$

A continuación, se presentan en las tablas 9 a 14 los precios actualizados a 2023 de los elementos, cableado y estructuras según las características más comerciales de 3 distribuidores. La Tabla 14 resume los costos asociados por kWh instalado considerando tres distribuidores.

Tabla9

Relación de precios paneles solares según capacidad y tipo.

	Distribuidor 1			Distribuidor 2			Distribuidor 3		
Capacidad [W]	335 [Wp]	450 [Wp]	545 [Wp]	335 [Wp]	450 [Wp]	550 [Wp]	455 [Wp]	500 [Wp]	550 [Wp]
Panel Solar Monocrystalino	\$ 800.000	\$ 890.000	\$ 1.100.000	\$ 560.000	\$ 680.000	\$ 760.000	\$ 675.000	\$ 693.000	\$ 777.000
Panel Solar Policristalino	\$ 670.000	-	-	\$ 450.000	-	-	-	-	-
Vida util [años]	25 años			25 años			25 años		

Nota. Fuente: Autores, 2023

La cantidad de paneles solares dependerá de la capacidad en Wp que se requiera para el sistema y de la capacidad del panel solar seleccionado.

$$N^{\circ}\text{Paneles} = \text{Capacidad del sistema}/\text{Capacidad del panel solar (3)}$$

Tabla10

Relación de precios inversores según capacidad y tipo.

	Distribuidor 1			Distribuidor 2			Distribuidor 3		
Capacidad [W]	500 [w]	600 [w]	800 [w]	600 [w]	1000 [w]	1500 [w]	1000 [w]	1500 [w]	3000 [w]
Inversor onda pura	\$ 702.500	\$ 750.300	\$ 1.248.000	\$ 484.530	\$ 797.009	\$ 813.919	\$ 625.000	\$ 906.500	\$ 1.587.000
Capacidad [W]	6 [kw]	10 [kw]	15 [kw]	6 [kw]	8 [kw]	10 [kw]	5 [kw]	10 [kw]	15 [kw]
Inversor On Grid	\$ 7.545.000	\$ 9.480.000	\$ 11.400.000	\$ 7.067.300	\$ 10.916.700	\$ 13.754.200	\$ 6.641.000	\$ 8.594.000	\$ 11.647.000
Capacidad [W]	6 [kw]	8 [kw]	10 [kw]	3 [kw]	6 [kw]	-	6 [kw]	8 [kw]	10 [kw]
Inversor hibrido	\$ 5.511.000	\$ 12.270.000	\$ 14.333.000	\$ 9.921.400	\$ 11.590.300	-	\$ 7.294.000	\$ 8.296.000	\$ 16.800.000

Nota. Fuente: Autores, 2023

El número de inversores dependerá de las cargas del sistema en VA, la capacidad del inversor seleccionado y el factor de simultaneidad.

$$N^{\circ}\text{Inversores} = \text{Cargas del sistema}/\text{Capacidad del inversor (4)}$$

Tabla11

Relación de precios de baterías según capacidad y tipo.

	Distribuidor 1			Distribuidor 2			Distribuidor 3		
Capacidad [Ah]	100 [Ah]	150 [Ah]	200 [Ah]	100 [Ah]	150 [Ah]	200 [Ah]	100[Ah]	150 [Ah]	250 [Ah]
Bateria de Gel	\$ 765.000	\$ 930.000	\$ 1.550.000	\$ 751.000	\$ 1.123.000	\$ 1.483.000	\$ 698.000	\$ 843.000	\$ 1.630.000
Bateria AGM	-	-	\$ 1.550.000	-	-	-	\$ 680.000	\$ 1.550.000	\$ 1.428.000
Bateria de Litio	\$2.450.000	\$ 4.500.000	\$ 4.400.000	\$ 4.998.000	\$ 6.314.000	-	-	-	-
Voltaje [V]	12 [V]	12 [V]	12 [V]	12-24 [V]	12-24 [V]	12-24 [V]	12 [V]	12 [V]	12 [V]

Nota. Fuente: Autores, 2023

El número de baterías dependerá de la carga requerida, la capacidad y tensión de la batería seleccionada, factor de descarga y capacidad de almacenamiento.

$$\text{N}^\circ \text{Baterias} = \frac{\frac{\text{Energía del sistema}}{\text{Tensión de la batería} * \text{Factor de descarga}}}{\text{Capacidad de la batería}} \quad (5)$$

Tabla12

Relación de precios de cableado por metro

	Distribuidor 1	Distribuidor 2	Distribuidor 3
Cableado	\$ 49.000,00	\$ 30.000,00	\$ 81.000,00

Nota. Fuente: Autores, 2023.

Tabla13

Relación de precios estructura por unidad

	Distribuidor 1	Distribuidor 2	Distribuidor 3
Estructura	\$ 680.000,00	\$ 632.000,00	\$ 765.000,00

Nota: Este precio es para una estructura elevada a 2 metros del suelo, diseñada para un panel de 2,12x1,05 metros. Fuente: Autores, 2023

Tabla14

Relación de precios de por el kWh instalado

	Distribuidor 1	Distribuidor 2	Distribuidor 3
Instalación	\$ 3.000.000,00	\$ 4.560.250,00	\$ 5.126.510,00

Nota. Estos costos de instalación tienen en cuenta protecciones eléctricas, conexión a la red, medidor de flujo, etc.

7.1.3 Costo anual

Para hacer el cálculo del costo anual de la energía generada se tiene en cuenta el costo inicial, costo de operación y vida útil del sistema. Se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Costo anual} = \frac{\text{Costo inicial} + \sum \text{Costo de operación y mantenimiento}}{\text{Vida útil del sistema}} \quad (6)$$

Nota: El costo de operación y mantenimiento en Colombia oscila entre los 2-5 millones de pesos anuales. Incluye mantenimiento preventivo, limpieza, revisión y mediciones de cargas para verificar comportamiento.

7.1.4 Calculo de viabilidad

El costo nivelado de energía (LCOE) se calcula dividiendo el costo anual de la energía generada por la producción anual de energía:

$$LCOE = \text{Costo anual} / \text{Producción anual} \quad (7)$$

Para que el sistema sea viable el LCOE calculado debe ser menor al precio del kWh en el sector, en este caso en Málaga. De lo contrario se estaría haciendo una mayor inversión en generar energía eléctrica que de la que se haría comprando a la red eléctrica.

$$LCOE < kWh \quad (8)$$

7.2 Estimación de costos

A continuación, la Tabla 15 presenta las estimaciones de los costos según el tipo de sistema y capacidad y en la Figura 10 se comparan el precio del kW con el LCOE de un sistema *On Grid* en el municipio de Málaga.

Tabla 15

Estimación de costos de sistema On Grid

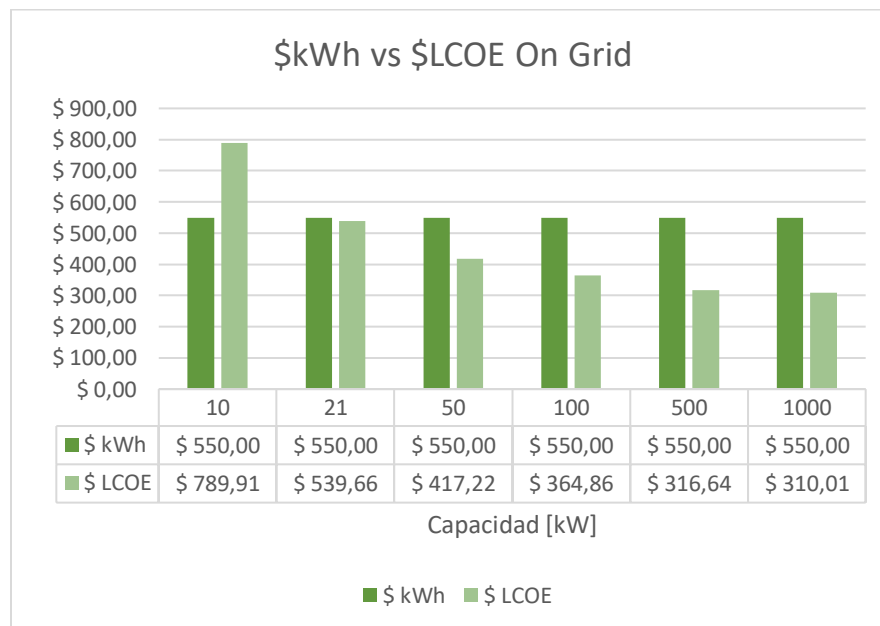
Tipo de sistema	Capacidad [kW]	Costo inicial	Costo Anual	Producción anual [kWh]
On Grid	10	\$ 74.576.000,00	\$ 6.983.040,00	8.840,30
	21	\$ 150.464.000,00	\$ 10.018.560,00	18.564,63
	50	\$ 348.544.000,00	\$ 18.441.760,00	44.201,50
	100	\$ 681.376.000,00	\$ 32.255.040,00	88.403,00
	500	\$ 3.361.544.000,00	\$ 139.961.760,00	442.015,00
	1000	\$ 6.701.376.000,00	\$ 274.055.040,00	884.030,00

Nota. Los cálculos se realizaron con los precios, ecuaciones y metodologías dadas anteriormente.

Se toma una eficiencia de 20% del sistema. Inversores On Grid.

Figura 10

Comparación del precio del kWh vs el LCOE en sistema On Grid en Málaga Santander



Nota. Se toma como valor del kW el suministrado por la Electrificadora de Santander (ESSA), para el estrato 3. Fuente: Autores, 2023.

Por otra parte, la Tabla 16 presenta las estimaciones de los costos según el tipo de sistema y capacidad y en la Figura 11 se comparan el precio del kW con el LCOE de un sistema *Off Grid* en el municipio de Málaga.

Tabla 16

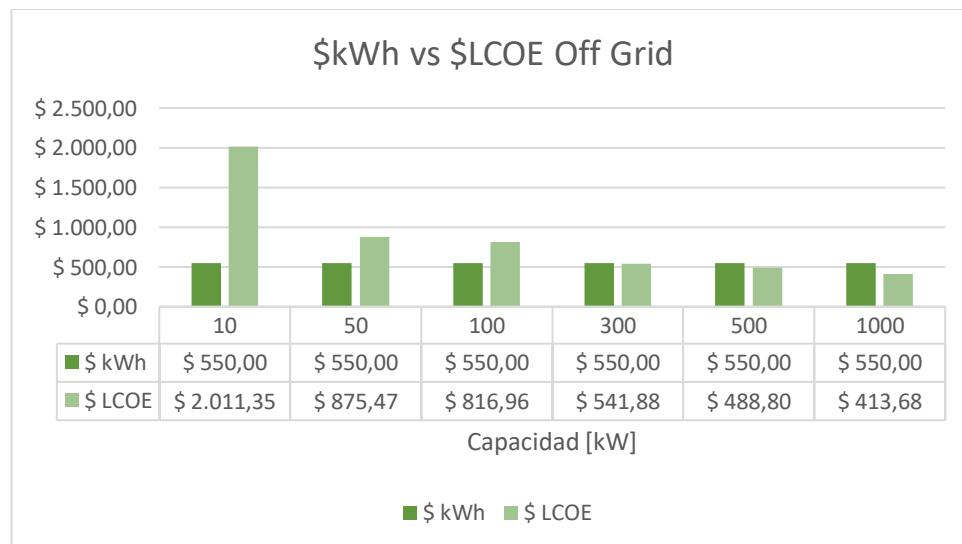
Estimación de costos sistema Off Grid

Tipo de sistema	Capacidad [kW]	Costo inicial	Costo Anual	Producción anual [kWh]
Off Grid	10	\$ 319.524.000,00	\$ 17.780.960,00	8.840,30
	50	\$ 829.923.000,00	\$ 38.696.920,00	44.201,50
	100	\$ 1.655.534.000,00	\$ 72.221.360,00	88.403,00
	300	\$ 3.442.804.000,00	\$ 143.712.160,00	265.209,00
	500	\$ 5.238.973.000,00	\$ 216.058.920,00	442.015,00
	1000	\$ 8.967.634.000,00	\$ 365.705.360,00	884.030,00

Nota. Fuente: Autores, 2023. Se toma una eficiencia de 20% del sistema. Y baterías de litio con vida útil de 7 años. Inversores onda pura.

Figura 11

Comparación del precio del kW vs el LCOE en sistema Off Grid en Málaga Santander



Nota. Se toma como valor del kW el suministrado por la Electrificadora de Santander (ESSA), para el estrato 3. Fuente: Autores, 2023

Para el sistema híbrido, la Tabla 17 presenta las estimaciones de los costos según el tipo de sistema y capacidad y en la Figura 12 se comparan el precio del kW con el LCOE para el municipio de Málaga.

Tabla 17

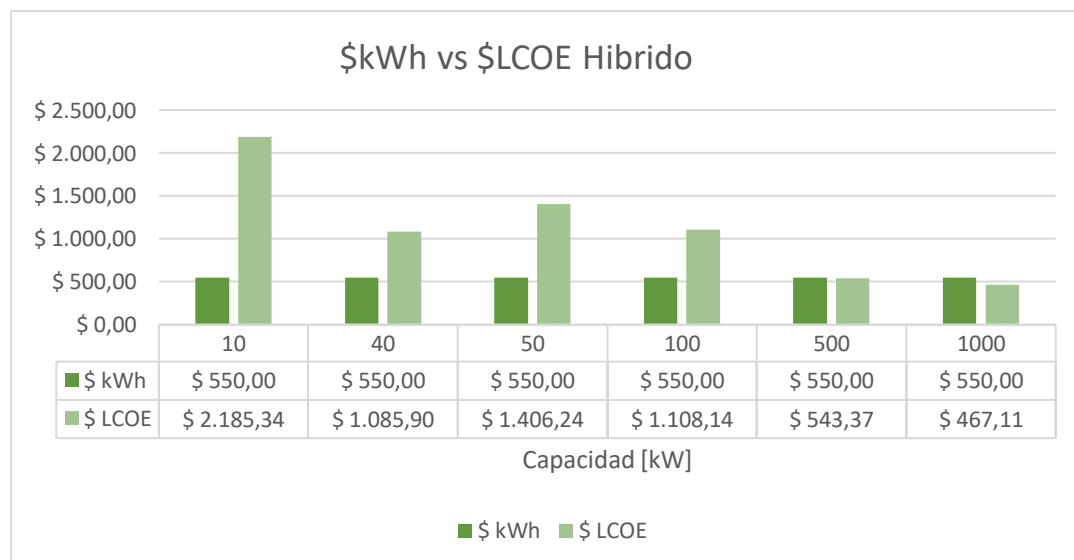
Estimación de costos sistema híbrido

Tipo de sistema	Capacidad [kW]	Costo inicial	Costo Anual	Producción anual [kWh]
Hibrido	10	\$ 332.976.000,00	\$ 19.319.040,00	8.840,30
	40	\$ 809.968.000,00	\$ 38.398.720,00	35.361,20
	50	\$ 1.391.444.000,00	\$ 62.157.760,00	44.201,50
	100	\$ 2.274.076.000,00	\$ 97.963.040,00	88.403,00
	500	\$ 5.816.944.000,00	\$ 240.177.760,00	442.015,00
	1000	\$ 10.123.576.000,00	\$ 412.943.040,00	884.030,00

Nota. Fuente: Autores, 2023. Se toma una eficiencia de 20% del sistema. Y baterías de litio con vida útil de 5 años. Inversores híbridos.

Figura 12

Comparación del precio del kW vs el LCOE en sistema Híbrido en Málaga Santander



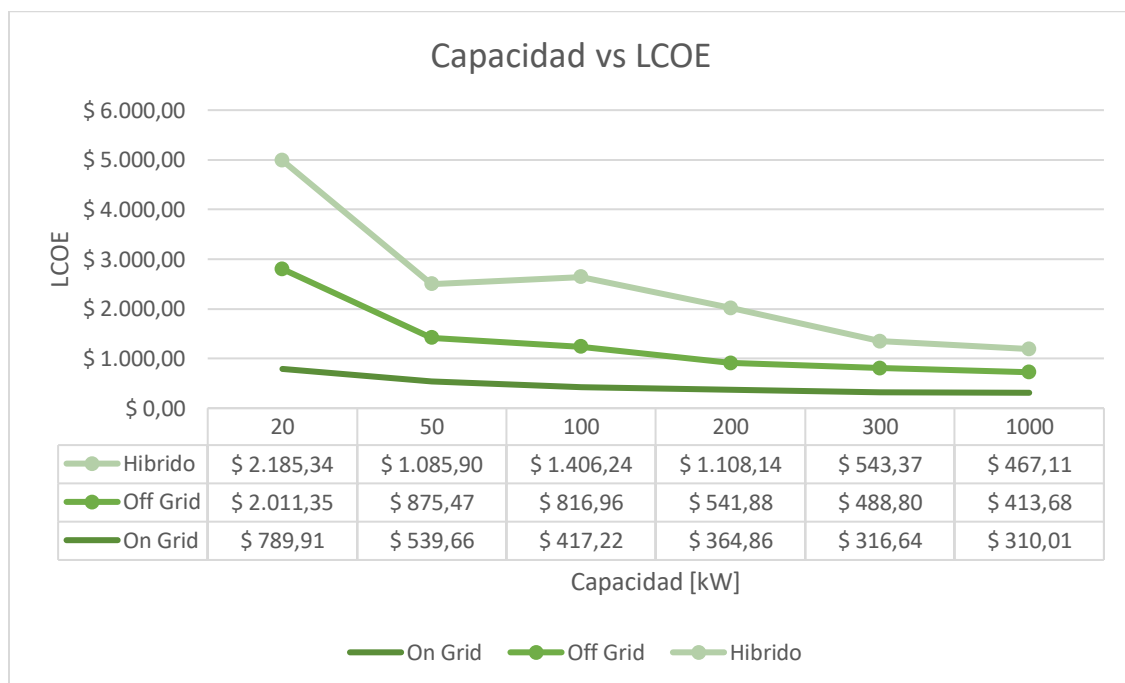
Nota. Se toma como valor del kW el suministrado por la Electrificadora de Santander (ESSA), para el estrato 3. Fuente: Autores, 2023.

7.3 Análisis de los costos de los sistemas propuestos

Se obtiene que para que la implementación de un sistema fotovoltaico sea viable, debe tener una capacidad mínima de ya sea 21, 300 y 500 [kW], para sistemas *On Grid*, *Off Grid* e Híbridos respectivamente. Mostrando además que su viabilidad es directamente proporcional a la capacidad del sistema, siendo que entre mayor sea la capacidad, menor será el costo de producción de energía anual o LCOE. En la Figura 14 se realiza una comparación del comportamiento del LCOE según el tipo y capacidad del sistema fotovoltaico.

Figura 13

Comportamiento del LCOE según la capacidad del sistema



Nota. Fuente: Autores, 2023.

Se obtiene que realmente la única opción viable es el sistema On Grid, ya que los sistemas Off Grid e Híbrido, para ser viables deben ser de una capacidad muy alta y tener una alta cantidad de baterías, las cuales significan el 40-45% del costo del sistema a lo largo de su vida útil.

Es importante resaltar que dependiendo de la cantidad de paneles solares y el área de plantación de los forrajes se puede tener una pequeña parte de los forrajes beneficiados por la sombra de los paneles, esto debido a que, si se tiene una hectárea de forraje, para lograr cubrir esa área con los paneles solares, se debe instalar por ejemplo un sistema de 200 [kW], con un aproximado de 4500 paneles de 450 [W] de capacidad, y con una dimensión de 2 metros cuadrados (m^2) de área.

8. Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones relevantes del trabajo de grado.

8.1 Conclusiones

Como conclusiones del trabajo de grado se tienen las siguientes:

- El municipio de Málaga, Santander, presenta condiciones agroclimáticas favorables para la integración de sistemas fotovoltaicos con la industria agropecuaria. La radiación solar, las temperaturas y las horas de luz natural proporcionan un entorno adecuado para la generación de energía solar y el crecimiento de cultivos. Por otro lado, la alta nubosidad afecta directamente la eficiencia de los paneles solares, bajando así su producción de energía.
- Según los resultados obtenidos, los tres forrajes de estudio demostraron ser viables en términos de producción de biomasa bajo condiciones de sombra, aumentando el Ray-Grass su producción bajo la sombra de los paneles solares, y el botón de oro y pasto estrella manteniendo una producción de biomasa lo suficientemente alta para considerarlos una opción viable para la integración.
- Los resultados de viabilidad de implementación de un sistema fotovoltaico según la metodología LCOE, destaco que entre mayor sea la capacidad del sistema y por ende el costo inicial, mayor será la viabilidad de este. Siendo la producción anual lo suficientemente alta para cubrir los gastos del proyecto en los años de la vida

útil de este. Se obtuvo que el único sistema que se considera viable es el sistema On Grid.

- Es posible avanzar con la transición energética en el municipio de Málaga mediante la energía agrovoltaica, integrando forrajes perennes con un sistema solar fotovoltaico diseñado a las necesidades específicas del municipio, generando una ganancia económica, ayudando a la mitigación de los gases de efecto invernadero y promoviendo el desarrollo de proyectos enfocados al uso de energías renovables. Al igual que obteniendo todos los beneficios que trae esta integración, tales como el aprovechamiento de la tierra, protección de los cultivos, ahorro de recursos hídricos y aumento en la eficiencia de los paneles.

8.2 Recomendaciones

Algunas recomendaciones son las siguientes:

- Para lograr acercarse cada vez más a datos reales a la hora de realizar el análisis de la viabilidad, es recomendable calcular el dimensionamiento del área disponible de forrajes y de la demanda requerida según consumo de cargas o presupuesto para implementación de proyectos.
- También es importante tener en cuenta la integración con las comunidades energéticas, ya que esto puede ser una gran ayuda a la hora de implementar la energía agrovoltaica.
- De igual manera es necesario hacer un estudio sobre el tipo de cosecha que se quiera implementar con el sistema fotovoltaico, ya que pueden existir algunas que el efecto de la sombra genera un impacto más negativo que positivo, o en el caso

de estudio del botón de oro y pasto estrella pese a que reducen su producción de biomasa, no es lo suficientemente significativa para considerar su inviabilidad.

- Es importante tener en cuenta las recomendaciones y los análisis de viabilidad dados en este documento para avanzar al siguiente nivel, el cual sería la implementación de la energía de proyectos relacionados con la energía agrovoltáica.

Referencias Bibliográficas

- A. Pérez, I. M. (2009). *Tithonia diversifolia. Pastos y Forrajes*.
- AUTOSOLAR. (2021). Obtenido de <https://autosolar.co/aspectos-tecnicos/que-son-los-inversores-hibridos>
- Bauer, D. (2018). *Lesion 9: Produccion de forrajes perennes*.
- Byrne, J. W. (2002). A cooperative approach to the development of locally sustainable energy systems in the developing and developed countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 373-398.
- C. Dupraz, H. M. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy Journal*.
- C. Dupraz, H. M. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*.
- CELSIA. (2018). *Paneles solares ¿Cómo funcionan y qué son?* Obtenido de <https://www.celsia.com/es/blog-celsia/paneles-solares-como-funcionan-y-que-son/>
- CIDET. (2021). Obtenido de <https://blog.cidet.org.co/qu%C3%A9-es-un-certificado-retie-para-instalaciones->
- Congreso de la republica. (2014). Obtenido de <https://www.senado.gov.co/>
- COTELCO. (2017). *CENTRO DE PENSAMIENTO TURÍSTICO DE COLOMBIA*. Obtenido de <https://cptur.org/ICTRC/departamentos#santander>
- Debaleena Majumdar, M. J. (2018). Dual use of agricultural land: Introducing ‘agrivoltaics’ in Phoenix Metropolitan Statistical Area, USA. *Landscape and Urban Planning*.
- diaz, a. (2022). *otovo*. Obtenido de <https://www.otovo.es/blog/placas-solares/inversores-solares/>

Duque, I. (2021). Transición energética: un legado para el presente y el futuro . *La Imprenta Editores S.A.*

edpenergia. (17 de septiembre de 2021). Obtenido de <https://www.edpenergia.es/es/blog/ahorro-y-eficiencia/baterias-paneles-solares/#:~:text=La%20batería%20para%20paneles%20solares,instalación%20fotovoltaica%20no%20produce%20energía.>

Energias Inteligentes. (2014). Obtenido de <http://www.energiasinteligentes.com/noticias/9/sistemas-hibridos-principio-de-funcionamiento-y-preguntas-frecuentes>

energias, M. d. (10 de Noviembre de 2022). *miniambiente*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/gobierno-petro-anuncia-cuales-seran-los-primeros-pasos-para-la-construccion-de-la-hoja-de-ruta-para-la-transicion-energetica-justa-en-colombia/>

Funcion Publica. (2023). Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=209510>

H. Marrou, L. G. (2013). Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology*.

H. Marrou, L. G. (2013). Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology*.

Hilcu, M. (2021). *otovo*. Obtenido de <https://www.otovo.es/blog/placas-solares/placas-solares-monocristalinas/>

Hilcu, M. (2021). *otovo*. Obtenido de <https://www.otovo.es/blog/placas-solares/placas-solares-policristalinas/>

Hogar Sense. (2023). Obtenido de <https://www.hogarsense.es/placas-solares/rendimiento-panel-solar#:~:text=As%C3%AD%20se%20define%20rendimiento%20de,W%2Fm2%20de%20potencia>.

I. Capellán, M. M. (2014). Agotamiento de los combustibles fósiles y escenarios socio-económicos: un enfoque integrado. *Energy*.

IBERDROLA. (s.f.). Obtenido de <https://www.iberdrola.com/innovacion/baterias-ion-litio>

Jimenez, M. J. (s.f.). Sinergias entre sectores: energía agrovoltáica. *Revista Gerencia de Riesgos y Seguros*.

Merlin, L. (octubre de 2022). *Leroy Melvin*. Obtenido de <https://www.leroymerlin.es/ideas-y-consejos/bricopedia/inversor-de-onda-pura.html#:~:text=Es%20un%20dispositivo%20que%20ayuda,que%20llega%20a%20los%20hogares>.

Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible. (2016). Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/>

Ministerio de minas y energía. (2015). Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/es/>

Ministerio de minas y energía. (2018). Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/es/>

NTC 2050. (2019).

pastos y forrajes. (2019). Obtenido de <https://infopastosyforrajes.com/pasto-de-pastoreo/pasto-estrella/>

Pita, M. L. (19 de Enero de 2023). *Vanguardia*. Obtenido de <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/santander-el-segundo-departamento-con-mayor-autogeneracion-a-pequena-escala-de-energia-solar-ni5648186>

QuimiNet. (2011). Obtenido de <https://www.quiminet.com/articulos/que-es-un-sistema-fotovoltaico-2638847.htm>

Ramirez, G. (2019). *Santander se prepara para ser protagonista*. Obtenido de Especiales Vanguardia: <https://m.vanguardia.com/especiales-vanguardia/contenido/centenario/turismo-y-medio-ambiente/como-nos-ven.html#>

REBACAS. (2019). Obtenido de https://www.rebacas.com/blog-baterias/39_bateria-de-gel-o-agm-que-las-diferencia-.html#:~:text=Una%20Batería%20de%20Gel%20es,en%20Agm%2C%20fibra%20de%20Vidrio.&text=-Mantienen%20la%20carga%20más%20tiempo%20siendo%20almacenadas.&text=-Mejor%20rendimiento%2

REBACAS. (2019). Obtenido de https://www.rebacas.com/blog-baterias/39_bateria-de-gel-o-agm-que-las-diferencia-.html#:~:text=Una%20Batería%20de%20Gel%20es,en%20Agm%2C%20fibra%20de%20Vidrio.&text=-Mantienen%20la%20carga%20más%20tiempo%20siendo%20almacenadas.&text=-Mejor%20rendimiento%2

REBACAS. (2019). Obtenido de https://www.rebacas.com/blog-baterias/39_bateria-de-gel-o-agm-que-las-diferencia-.html#:~:text=Una%20Batería%20de%20Gel%20es,en%20Agm%2C%20fibra%20de%20Vidrio.&text=-Mantienen%20la%20carga%20más%20tiempo%20siendo%20almacenadas.&text=-Mejor%20rendimiento%2

- Rueda, D. P. (2 de Febrero de 2022). *Vanguardia*. Obtenido de <https://www.vanguardia.com/economia/local/proyecto-de-energia-solar-en-la-mesa-de-los-santos-estaria-listo-en-2023-HG4811119>
- semillas dalmau*. (2022). Obtenido de <https://www.semillasdalmau.com/lolium-perenne/>
- SOLARAMA. (2023). *Condiciones climáticas favorables para un sistema fotovoltaico*. Obtenido de SOLARAMA: <https://solarama.mx/blog/condiciones-climaticas-favorables-para-sistema-fotovoltaico/>
- SOLCOR. (s.f.). Obtenido de <https://solcorchile.com/on-grid-off-grid/#:~:text=El%20concepto%20on%20grid%20hace,la%20generada%20por%20los%20paneles>
- SOLCOR. (s.f.). Obtenido de <https://solcorchile.com/on-grid-off-grid/#:~:text=El%20concepto%20on%20grid%20hace,la%20generada%20por%20los%20paneles>
- Stephan Schindele, M. T. (2020). Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied Energy*.
- SURIA ENERGY. (s.f.). Obtenido de <https://www.suriaenergy.com/energia-solar-que-es-un-inversor-ongrid-o-gridtie#:~:text=Un%20inversor%20On-Grid%20o%20también%20llamado%20Grid-Tie%2C,inyectar%20en%20una%20red%20eléctrica.>
- Susana Soeiro, M. F. (2020). Community renewable energy: Benefits and drivers. *Energy Reports*, 134-140.
- UPME. (2016). Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia. *Sub dirección de demanda, Bogotá*.

UPME. (2022). Obtenido de

https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_upme_0319_2022.htm

VILCHES, A. G. (2014). La Transición Energética. Una Nueva Cultura de la Energía.

XM. (19 de Enero de 2023). Obtenido de <https://www.xm.com.co/noticias/5541-en-2022-la-demanda-acumulada-del-ano-crecio-334-en-comparacion-con-el-2021>