

**Análisis multiespacial del potencial de radiación solar incidente en las provincias de
Boyacá, Colombia para la implementación de futuros proyectos de energía fotovoltaica**

Autores:

Héctor Gabriel Infante Sánchez

Jonatan Gustavo Bonilla Gaona

Universidad Santo Tomás

Programa de Ingeniería Ambiental

Tunja, Boyacá

2021

**Análisis multiespacial del potencial de radiación solar incidente en las provincias de
Boyacá, Colombia para la implementación de futuros proyectos de energía fotovoltaica**

Autores:

Héctor Gabriel Infante Sánchez

Jonatan Gustavo Bonilla Gaona

Trabajo presentado para optar al título de Ingeniero Ambiental

Msc. Iván Gustavo Pirazán Cuervo

Asesor / director

Universidad Santo Tomás

Programa de Ingeniería Ambiental

Tunja, Boyacá

2021

Tabla de contenido

Resumen	IX
Abstract	X
Introducción	1
1. Capítulo I - Planteamiento del proyecto	2
1.1. Formulación del problema	2
1.2. Planteamiento del problema	3
1.3. Pregunta de investigación	5
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
2. Capítulo II - Marco de referencia	6
2.1. Marco teórico	6
2.1.1. Caracterización de la radiación solar para la estimación del potencial de energía fotovoltaica	6
2.1.2. Radiación Solar para la Región Cundiboyacense-Colombia	8
2.1.3. Energía fotovoltaica en Colombia	9
2.1.4. Atlas Global Solar	10
2.2. Marco conceptual	12
2.2.1. Energía solar fotovoltaica	12
2.2.2. Clasificación de sistema fotovoltaicos	12
2.3. Estado del Arte	13
2.3.1. Caracterización del potencial energético de las energías renovables	13
2.3.2. Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica	14
2.3.3. Acceso remoto de sistemas solares fotovoltaicos autónomos	15
2.3.4. La energía solar fotovoltaica en Colombia: potenciales, antecedentes y perspectivas	16
2.3.5. Impacto de la penetración de la energía solar fotovoltaica en los sistemas de distribución	17
2.3.6. Diseño de un Sistema solar fotovoltaico autónomo para una institución educativa rural	18
2.3.7. Determinación y análisis espacio temporal de la radiación global	19
2.4. Marco legal	19

2.4.1.	Para energías renovables no convencionales	19
2.4.2.	Requisitos legales	20
2.4.3.	Normas nacionales	20
2.4.4.	Normas internacionales	21
3.	Capítulo III - Diseño metodológico	21
3.1.	Tipo de investigación	21
3.2.	Recolección de datos secundarios	22
3.3.	Área de estudio	22
3.4.	Trabajo práctico	24
3.5.	Modelo de radiación solar	25
3.5.1.	Entradas de datos de satélites geoestacionarios	25
3.5.2.	Algoritmos utilizados	26
3.6.	Modelo de Energía fotovoltaica	27
3.7.	Procesamiento	27
3.7.1.	Descarga de datos	28
3.7.2.	Delimitación del área de estudio	28
3.7.3.	Análisis irradiación global horizontal (GHI)	29
3.7.4.	Análisis potencial de energía fotovoltaico (PVOUT)	29
3.7.5.	Análisis porcentaje de pendiente del terreno y/o zona de estudio	29
3.7.6.	Tabulación de tablas y graficas de apoyo	29
4.	Capítulo IV - Presentación y análisis de resultados	31
4.1.	Generalidades	31
4.1.1.	Precipitación	31
4.1.2.	Temperatura	33
4.1.3.	Clasificación climática	34
4.2.	Provincia Márquez	36
4.2.1.	Irradiación horizontal global – GHI de la Provincia	36
4.2.2.	Potencial de Energía Fovovoltaica de la provincia (Promedio Anual / Mensual a largo plazo de los totales diarios	37
4.2.3.	Pendiente de la provincia	37
4.3.	Provincia Occidente	39
4.3.1.	Irradiación horizontal global – GHI de la Provincia	39

4.3.2. Potencial de Energía Fotovoltaica de la provincia (Promedio Anual / Mensual a largo plazo de los totales diarios _____	40
4.3.3. Pendiente de la provincia _____	41
4.4. Provincia Ricaurte _____	42
4.4.1. Irradiación horizontal global – GHI de la Provincia _____	42
4.4.2. Potencial de Energía Fotovoltaica de la provincia (Promedio Anual / Mensual a largo plazo de los totales diarios _____	43
4.10.3. Pendiente de la provincia _____	44
4. Discusión de resultados _____	48
5. Capítulo V - Viabilidad del aprovechamiento del potencial de energía solar fotovoltaica en Boyacá _____	52
6.1. Viabilidad Técnica _____	52
6.2. Viabilidad Social _____	54
6.3. Viabilidad Ambiental _____	55
6.4. Viabilidad Económica _____	56
6. Conclusiones _____	56
Bibliografía _____	60
Anexos _____	65

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1. Distribución consumo energía mundial – 2016. Fuente: Tomado de REN21 (2017).	3
Ilustración 2. Inversiones por departamento (cifras en millones). Fuente: Tomado de UPME (2020) – Grafico: LR-VT.	4
Ilustración 3. Trayectoria Sol-Tierra. Los nombres de los solsticios y equinoccios están particularizados para el hemisferio Norte. Fuente: Tomado de (Perpiñán Lamigueiro, 2013).	7
Ilustración 4. Diagrama de clasificación de la instalación de los sistemas FV. Fuente: Tomado de (Monsolar, 2018).	13
Ilustración 5. Mapa del departamento de Boyacá. Fuente: Dirección de Sistemas de Información, Departamento Administrativo de Planeación de Boyacá	23
Ilustración 6. Mapa provincias y municipios, Dpto. de Boyacá. Fuente: Dirección de Sistemas de Información, Departamento Administrativo de Planeación de Boyacá	24
Ilustración 7. Restauración de la radiación solar en el modelo de satélite de irradiación Solargis. Fuente: Elaboración propia.	27
Ilustración 8. Descarga de datos. Fuente: Elaboración propia.	28
Ilustración 9. Delimitación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.	28
Ilustración 10. Análisis irradiación global horizontal (GHI). Fuente: Elaboración propia.	29
Ilustración 11. Análisis potencial de energía fotovoltaico (PVOUT). Fuente: Elaboración propia.	29
Ilustración 12. Análisis porcentaje de pendiente del terreno y/o zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.	29
Ilustración 13. Tabulación de tablas y graficas de apoyo. Fuente: Elaboración propia.	29
Ilustración 14. Número de días con lluvia total anual. Departamento de Boyacá. Fuente: Atlas Climatológico, IDEAM (2015).	32
Ilustración 15. Precipitación total anual (mm). Departamento de Boyacá. Fuente: Tomado de Atlas Climatológico, IDEAM (2015).	33
Ilustración 16. Temperatura media anual (C°). Departamento de Boyacá. Fuente: Tomado de Atlas Climatológico, IDEAM (2015).	34
Ilustración 17. Clasificación Climática. Departamento de Boyacá. Fuente: Tomado de Atlas Climatológico, IDEAM (2015).	35
Ilustración 18. Gráfica de barras del GHI de la Provincia Márquez. Fuente: Elaboración propia.	36
Ilustración 19. Mapa de Irradiación horizontal global - GHI de la provincia Márquez. Fuente: Elaboración propia.	36
Ilustración 20. Gráfica de barras del Potencial de Energía Fotovoltaica de la Provincia Márquez. Fuente: Elaboración propia.	37
Ilustración 21. Mapa de Potencial de Energía Fotovoltaica de la Provincia Márquez. Fuente: Elaboración propia.	37

Ilustración 22. Gráfico de barras de Pendientes de la Provincia Márquez. Fuente: Elaboración propia.	38
Ilustración 23. Mapa de Pendientes de la Provincia Márquez. Fuente: Elaboración propia.	38
Ilustración 24. Gráfica de barras del GHI de la Provincia Occidente. Fuente: Elaboración propia.	39
Ilustración 25. Mapa de Irradiación horizontal global - GHI de la provincia Occidente. Fuente: Elaboración propia.	39
Ilustración 26. Gráfica de barras del Potencial de Energía Fotovoltaica de la Provincia Occidente. Fuente: Elaboración propia.	40
Ilustración 27. Mapa de Potencial de Energía Fotovoltaica de la Provincia Occidente. Fuente: Elaboración propia.	40
Ilustración 28. Gráfico de barras de Pendientes de la Provincia Occidente. Fuente: Elaboración propia.	41
Ilustración 29. Mapa de Pendientes de la Provincia Occidente. Fuente: Elaboración propia.	41
Ilustración 30. Gráfica de barras del GHI de la Provincia Ricaurte. Fuente: Elaboración propia.	42
Ilustración 31. Mapa de Irradiación horizontal global - GHI de la provincia Oriente. Fuente: Elaboración propia.	42
Ilustración 32. Gráfica de barras del Potencial de Energía Fotovoltaica de la Provincia Ricaurte. Fuente: Elaboración propia.	43
Ilustración 33. Mapa de Potencial de Energía Fotovoltaica de la Provincia Ricaurte. Fuente: Elaboración propia.	43
Ilustración 34. Gráfico de barras de Pendientes de la Provincia Ricaurte. Fuente: Elaboración propia.	44
Ilustración 35. Mapa de Pendientes de la Provincia Ricaurte. Fuente: Elaboración propia.	44

Lista de tablas

Tabla 1. Normas nacionales aplicables para Colombia.	20
Tabla 2. Normas internacionales aplicables en Colombia.....	21
Tabla 3. simulación de energía fotovoltaica a través de algoritmos y bases internas de SOLARGIS.	24
Tabla 4. Datos de entrada utilizados en el modelo de Solargis para Colombia.	25
Tabla 5. Irradiación horizontal global - GHI de provincia Márquez.	36
Tabla 6. Potencial de Energía Fotovoltaica de Provincia Márquez.	37
Tabla 7. Pendiente de Provincia Márquez.	38
Tabla 8. Irradiación horizontal global - GHI de Provincia Occidente.	39
Tabla 9. Potencial de Energía Fotovoltaica de Provincia Occidente.	40
Tabla 10. Pendiente de Provincia Occidente.	41
Tabla 11. Irradiación horizontal global - GHI de Provincia Ricaurte.	42
Tabla 12. Potencial de Energía Fotovoltaica de Provincia Ricaurte.....	43
Tabla 13. Pendiente de Provincia Ricaurte.....	44
Tabla 14. Irradiación horizontal global promedio anual / mensual a largo plazo de los totales diarios	45

Resumen

Colombia se encuentra en la búsqueda de dar cumplimiento a los compromisos adquiridos en la Cumbre Mundial de Cambio Climático en París (COP21). Donde se busca la reducción del veinte por ciento (20%) en la emisión de gases de efecto invernadero para el año 2030. Por lo tanto, Colombia debe centrar sus esfuerzos en la creación y apoyo de proyectos relacionados con fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER). Por consiguiente, este proyecto busca determinar y analizar el potencial de radiación solar existente en el departamento de Boyacá (Colombia). Con el fin de determinar las provincias o áreas, que presentan mayor potencial de radiación solar y por lo mismo una mayor viabilidad para la implementación de proyectos de energía fotovoltaica, utilizando los Sistemas de Información Geográfico (SIG) y el software ArcGIS, el cual cuenta con flujos de trabajo adecuados para mayor fidelidad en el procesamiento de imágenes satelitales, las cuales fueron obtenidas del ATLAS GLOBAL SOLAR de SOLARGIS y el GRUPO DEL BANCO MUNDIAL, evidenciando que las provincias de Ricaurte, Occidente y Márquez, cuentan con los valores máximos de potencial de energía fotovoltaica (PVOU) e irradiación global horizontal (GHI) en relación con el área de incidencia, determinando que el municipio de Puerto Boyacá, perteneciente a la provincia de Occidente, cuenta con alta viabilidad, para el emplazamiento de proyectos de energía solar fotovoltaicos, ya que cuenta con factores climáticos y geográficos, que favorecen la incidencia solar en la zona. Por lo tanto esta investigación contribuye al desarrollo de una base para impulsar la exploración y creación de proyectos que fomenten este tipo de energías limpias las cuales generarían como resultado beneficios económicos, sociales y ambientales a los habitantes del mismo y al país en general, ya que actualmente este departamento cuenta con la tarifa de energía más alta regulada por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) donde se tienen en cuenta variables que determinan una tarifa específica, la cual se vería reducida al implementar este tipo de proyectos en la región.

Palabras clave: COP21, FNCER, Radiación Solar, Provincias y energía fotovoltaica.

Abstract

Colombia is seeking to fulfill the commitments made at the World Summit on Climate Change in Paris (COP21). Where the reduction of twenty percent (20%) in the emission of greenhouse gases is sought by the year 2030. Therefore, Colombia should focus its efforts on the creation and support of projects related to non-conventional sources of renewable energy. (FNCER). Therefore, this project seeks to determine and analyze the potential for solar radiation in the department of Boyacá (Colombia). In order to determine the provinces or areas that have the greatest potential for solar radiation and therefore greater viability for the implementation of photovoltaic energy projects, using Geographic Information Systems (GIS) and ArcGIS software, which has with adequate workflows for greater fidelity in the processing of satellite images, which were obtained from SOLARGIS ATLAS GLOBAL SOLAR and the WORLD BANK GROUP, showing that the provinces of Ricaurte, Occidente and Márquez have the maximum potential values of photovoltaic energy (PVOUT) and horizontal global irradiation (GHI) in relation to the area of incidence, determining that the municipality of Puerto Boyacá, belonging to the province of Occidente, has high viability, for the location of photovoltaic solar energy projects , since it has climatic and geographical factors, which favor the solar incidence in the area. Therefore, this research contributes to the development of a base to promote the exploration and creation of projects that promote this type of clean energy which would generate economic, social and environmental benefits to the inhabitants of the same and to the country in general, since Currently, this department has the highest energy rate regulated by the Energy and Gas Regulation Commission (CREG) where variables that determine a specific rate are taken into account, which would be reduced when implementing this type of projects in the region. .

Key words: COP21, FNCER, Solar Radiation, Provinces and photovoltaic energy.

Introducción

Según (Hartmann, 2016), La energía proveniente del sol, genera un ambiente estable y confortable en la superficie terrestre, siendo el factor principal para la vida en el planeta tierra. El sol es el cuerpo central perteneciente a nuestro sistema solar. Fue formado por grandes reacciones químicas en una enorme nube conformada por aire frío interestelar hace 6.500 millones de años. Esta estrella emite diferentes tipos de radiación, la cual hace de fuente para la producción de energía por medio del uso de celdas fotovoltaicas. Para conocer la forma en que la radiación interactúa con la corteza terrestre, es necesario saber que la fuente principal de energía de la tierra, es emitida por el sol. dicha energía contiene luz visible, lo cual se puede relacionar con la radiación electromagnética (Bautista & Palacio, 2011).

Es importante señalar que la radiación solar, consta de diferentes aplicativos en la actualidad, ya que también se utiliza en campos como la meteorología, hidrología, climatología, así mismo para la obtener la ganancia térmica en edificios. (Yao et al., 2014).

Para poder calcular la radiación solar, es importante tener en cuenta variables atmosféricas, que forman procesos de absorción, reflexión y dispersión, evitando que la totalidad de la radiación solar extraterrestre entre a la superficie de la tierra, (SOLARGIS.,2021). Por lo tanto, en esta investigación se utiliza la metodología basado en la obtención de radiación solar basado en satélites, que están compuestos por diferentes parámetros, utilizando GHI (promedio a largo plazo de totales diarios de irradiación horizontal global) y PVOUT (promedio a largo plazo de totales diarios de energía fotovoltaica).

Teniendo en cuenta la actual problemática de demanda de energía eléctrica, tanto a nivel nacional como a nivel mundial, es importante conocer las aplicaciones de la radiación emitida por el sol, para la generación de energía, generando mapas de radiación solar mediante el modelo de satélites, con el objeto de identificar a nivel regional, que provincias pertenecientes al departamento de Boyacá, tienen los índices de radiación más altos y cuales tienen mayor viabilidad para la implementación de futuros proyectos fotovoltaicos.

1. Capítulo I - Planteamiento del proyecto

1.1. Formulación del problema

La energía es la base para el desarrollo de toda sociedad o comunidad, ya que a partir de ella se obtiene luz, servicios esenciales en los campos de la medicina, educativos, privados etc. Siendo fuente indispensable para el crecimiento económico y social. Teniendo en cuenta que según el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 7— Se requiere su cumplimiento para lograr los demás ODS, y constituye el eje de los esfuerzos para hacer frente al cambio climático. Según El Banco Mundial (2018) a la fecha, alrededor de más de 1000 millones de personas aún viven sin electricidad, y cientos de millones más viven con un suministro insuficiente o poco confiable.

Al mismo tiempo, aproximadamente 3000 millones de personas utilizan combustibles contaminantes como leña u otra biomasa para cocinar o como medio de calefacción para sus hogares, lo que genera contaminación del aire en espacios abiertos y cerrados que tiene impactos generalizados en la salud, donde claramente se podrían disminuir dichos impactos negativos y llegar a una mayor extensión poblacional a partir de la implementación de las fuentes no convencionales de energía renovable, teniendo en cuenta que en la actualidad los niveles de emisiones atmosféricas son bastante elevadas dando razón de ser al COP21, donde además de plantear el objetivo de reducir el veinte por ciento (20%) en la emisión de gases de efecto invernadero para el año 2030 , se tiene en cuenta reducir el aumento de la temperatura global a dos grados centígrados (3,6 grados Fahrenheit) al final de este siglo. Demostrando así que el cambio climático ocurre cada vez más a pasos acelerados donde si se actúa a tiempo se lograrán disminuir impactos graves al clima, la vida humana, animal, vegetal y del planeta en general, por lo cual se debe dar un cambio significativo y dejar atrás la fuente de energía a través de combustibles fósiles.

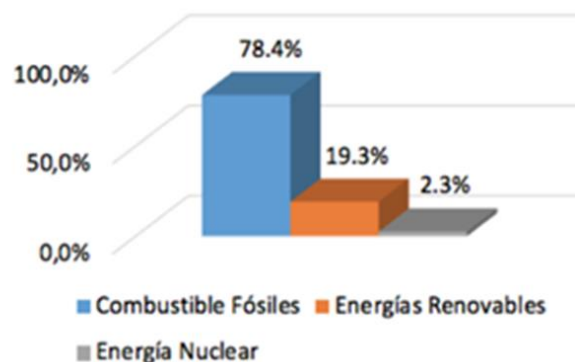


Ilustración 1. Distribución consumo energía mundial – 2016. **Fuente:** Tomado de REN21 (2017).

Según Hernández, A., (2020) La matriz energética de América Latina y el Caribe está compuesta principalmente por hidrocarburos. La mayor aportación la hace el gas natural (34%); seguido por el petróleo (31%). La disponibilidad de dicha matriz energética y su acceso varían significativamente de país a país, como al interior de cada uno de ellos. Si bien se estima que en América Latina 97% de la población tiene acceso a la energía eléctrica, aproximadamente un 10% (es decir, 65 millones de personas, una cantidad superior a la población total de Colombia) aún no alcanzan a cubrir sus requerimientos energéticos básicos para una vida digna, es decir, viven en pobreza energética.

1.2. Planteamiento del problema

En cuanto a Colombia su cobertura energética es relativamente alta ya que se estima que aproximadamente cuenta con un acceso a energía eléctrica por población entre en 98-99%, pero cuenta con graves falencias en la transición y requiere de cifras de dinero bastantes altas para el mejoramiento y calidad en el servicio básico. Según la UPME (2020) Colombia tendría que invertir un poco más de 7,41 billones de pesos en los próximos tres años para mejorar el acceso a la energía eléctrica de los cuales \$3,6 billones, es decir, 48% irían a soluciones aisladas con micro redes híbridas, mientras que 43% para soluciones aisladas individuales.



Ilustración 2. Inversiones por departamento (cifras en millones). **Fuente:** Tomado de UPME (2020) – **Grafico:** LR-VT.

Llevando dicha problemática directamente al departamento se puede evidenciar también el alto costo que las familias boyacenses actualmente deben cancelar debido a los elevados costos que se generan en la producción de energía del departamento y de igual forma es notorio el atraso del país con el cumplimiento del compromiso adquirido en el COP21 con el fin de disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, debido a la falta o el bajo incursionamiento e implementación de fuentes no convencionales de energías renovable (FNCER) especialmente en el departamento de Boyacá. Teniendo en cuenta que el gobierno colombiano aprobó la ley 1715 de 2014, la cual busca “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, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético.

Con los mismos propósitos se busca promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda”. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se deben generar las bases de investigación para la creación de proyectos de energía fotovoltaica en Boyacá, ya que en la actualidad es muy bajo su participación en este tipo de energías limpias y los estudios actuales son muy generales, llegando a la necesidad de realizar este tipo de estudios con el fin de determinar el potencial de radiación solar del departamento en un contexto más específico y detallado.

Por ello, con el propósito de conocer este fenómeno se formuló la siguiente pregunta de investigación.

1.3. Pregunta de investigación

¿Cuál es el potencial de radiación solar incidente en las provincias del departamento de Boyacá, Colombia, a partir del análisis de sensores remotos como base para la implementación de futuros proyectos de energía fotovoltaica?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar el potencial de radiación solar incidente en las provincias del departamento de Boyacá, Colombia, a partir del análisis de sensores remotos como base para la implementación de futuros proyectos de energía fotovoltaica.

1.4.2. Objetivos específicos

- Calcular el potencial de radiación solar de las trece (13) provincias del departamento de Boyacá, a través de los sistemas de información geográfico (SIG) mediante los datos suministrados por los sensores remotos de La Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA).
- Determinar el potencial energético del departamento de Boyacá, mediante la generación de mapas de radiación solar, especificando las áreas de mayor incidencia para producción de energía.
- Identificar la viabilidad del aprovechamiento del potencial de áreas para la producción de energías limpias, mediante el aprovechamiento de energía solar fotovoltaica en el departamento de Boyacá.

2. Capítulo II - Marco de referencia

2.1. Marco teórico

2.1.1. Caracterización de la radiación solar para la estimación del potencial de energía fotovoltaica

Los rangos de sensibilidad a la radiación solar de algunos instrumentos fotovoltaicos (incluyendo paneles solares, piranómetros, entre otros), están entre los 0.4 y los 1.1 micrómetros lo que indica que la respuesta solar de estos instrumentos ocurre solo en una banda espectral estrecha, que incluye el rango visible (Duffie et al., 2020; Iqbal, 2012; UPM E et al., 2018). El sol emite radiación electromagnética, la cual es un tipo de energía que se propaga como un conjunto de ondas a la velocidad de la luz, estas ondas se componen por la superposición de campos perpendiculares (eléctrico y magnético) y no necesitan que haya un medio material para propagarse por lo que se propagan en el vacío (Correa Sánchez, 2020).

La cantidad de radiación solar disponible en cualquier punto de la superficie terrestre va a depender de factores astronómicos, geográficos y atmosféricos. Aunque según algunos autores (Duffie et al., 2020; Iqbal, 2012; Liou, 2002) es registrado que el factor principal reductor de la cantidad de radiación solar disponible en la superficie serán las nubes. Se han desarrollado modelos teóricos de radiación solar que pretenden estimarla al tope de la atmosfera y en superficies inclinadas y horizontales sobre la tierra, como el presentado en Kumar et al. (1997). Este autor también expone que. La radiación del sol contribuye cerca del 99.8% de la energía terrestre, esta radiación recibida en un sitio, dependerá del flujo de radiación fuera de la atmósfera, la masa óptica de aire, el vapor de agua y el contenido de aerosoles (Kumar et al., 1997).

Uno de los primeros pasos para conocer la cantidad de la radiación solar que va a estar disponible en superficie para la generación de energía fotovoltaica, es la cuantificación de la cantidad de tiempo que un lugar en específico va a estar expuesto a los rayos del sol y como se distribuyen o varían estas horas de incidencia a lo largo del año (Correa Sánchez, 2020). Dada la órbita elíptica sobre la que gira la Tierra alrededor del sol y la declinación del planeta sobre su propio eje, la relación posicional de la Tierra con respecto al sol cambia día tras día del año y así

mismo la distribución de la radiación total sobre una superficie va a ser función de la latitud del sitio y de la declinación terrestre (Iqbal, 1983).

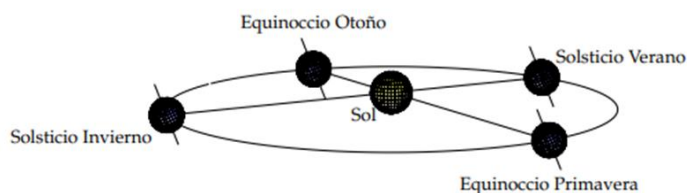


Ilustración 3. Trayectoria Sol-Tierra. Los nombres de los solsticios y equinoccios están particularizados para el hemisferio Norte. **Fuente:** Tomado de (Perpiñán Lamigueiro, 2013).

Se puede establecer que la potencia entregada por un generador fotovoltaico representa un incremento directamente proporcional al nivel de radiación efectiva incidente en el mismo. El cálculo de la radiación efectiva incluye las caídas o pérdidas por reflexión, consecuencia relacionada con el ángulo formado entre la línea que une el generador con el sol y la perpendicular al plano del módulo (Perpiñán Lamigueiro, 2013). A medida que mayor es el ángulo establecido entre la línea que une el generador con el sol, mayor es la radiación reflejada (Perpiñán Lamigueiro, 2013).

La radiación del sol viaja a través del espacio vacío en todas direcciones. No hay pérdidas visibles por interacción con el medio físico. Sin embargo, la irradiancia solar, definida como la densidad del flujo de radiación solar, disminuye con el cuadrado de la distancia. Parte de esta radiación solar está bloqueada por la Tierra. Dada la relación entre la distancia al Sol y el tamaño de la Tierra, se puede suponer que este valor es constante en toda la superficie exterior de la atmósfera. (De Miguel, Bilbao, Aguiar, Kambezidis, & Negro, 2001).

Cuando la radiación proveniente del sol ingresa a la atmósfera y es interceptada por moléculas como las de oxígeno, ozono, vapor de agua y dióxido de carbono, esta energía entrante se convierte en calor a partir de un proceso selectivo basado en las longitudes de onda, es decir, que la energía que liberan estas moléculas contenidas en la masa de aire al absorber radiación solar, se invierte en un incremento de su propia temperatura (Iqbal, 1983; Liou, 2002). Las nubes han sido descritas como el bloqueo más importante para la cantidad de radiación solar que está en superficie, porque intervienen tanto en los procesos de absorción como de dispersión de la

El precursor inicial que planteó las primeras investigaciones fue Black (1956), dando a conocer la repartición de la irradiación solar en Latinoamérica, estableciendo correlaciones entre nubosidad y la radiación entrante a la corteza terrestre. Años después, Landsberg (1961) realizó la publicación de su investigación, teniendo como base mediciones durante el año geofísico internacional, generando mapas de distribución anual de radiación global.

2.1.2. Radiación Solar para la Región Cundiboyacense-Colombia

Debido al auge de implementación de energías limpias en nuestro país, es de vital importancia, la generación de estudios detallados, de la radiación solar incidente a lo largo del país. (Karakoti, Das, & Bandyopadhyay, 2013). La generación de estudios detallados por regiones, genera datos precisos para la formulación de diferentes tipos de sistemas de conversión de energía solar. (Casaravilla & Chaer, 2008), ya sea fotovoltaica o solar térmica (Meisen, 2009).

La generación de mapas detallados, son una herramienta asequible a los usuarios que quieran formular e implementar un sistema de radiación solar, en el mundo existen entidades encargadas de la generación de dichos mapas a nivel general, como es el caso de Europa con el Atlas de radiación solar (Scharmer & Greif, 2000). Estados Unidos de América, el Laboratorio Nacional de Fuentes Renovables de Energía (NREL por sus siglas en inglés) constan con una página web (Mola, 2003) donde se encuentran los mapas mensuales de radiación solar. Y en Colombia en el año 2004, se realiza la publicación del Atlas de Radiación solar de Colombia (Nrel., 2013) que está conformado por mapas de radiación solar a nivel nacional.

Este mapa cubrió la totalidad del territorio colombiano y utilizó la información de 71 estaciones radiométricas y 383 estaciones donde se mide brillo solar. Los métodos utilizados en el desarrollo de los mapas de radiación solar están basados en mediciones directas, métodos satelitales (Drews, 2007) y modelos basados en métodos empíricos (Chen, Ersi, Yang, Lu, & Zhao, 2004) e híbridos (Yang, Marcelo, & Germán, 2012). Para ambientes tropicales los métodos basados en imágenes satelitales presentan altos niveles de error (Janjai, 2010) por los pronunciados gradientes de humedad.

La distribución espacial de la radiación solar por lo general se presenta en forma de mapas de radiación solar que consignan la radiación solar diaria promedio para cada mes del año. En Colombia el último mapa fue publicado en el año 2004. En la actualidad se cuenta con un mayor cubrimiento de radiómetros lo que hace que se cuenten con registros más actualizados y más confiables (Rodríguez, Ávila, & Benítez, 2015).

2.1.3. Energía fotovoltaica en Colombia

La demanda energética en Colombia y en todo el mundo va aumentando a medida que las demandas del crecimiento demográfico e industrial aumentan el consumo de energía y, en consecuencia, crean problemas económicos, sociales y ambientales. Una posible solución para satisfacer esta demanda y disminuir los problemas generados, por la explotación de combustibles fósiles. Sin embargo, debido a los costos que involucran implementar energías limpias, las personas naturales y jurídicas no son motivadas a realizar el cambio. (Gómez-Ramírez, Murcia-Murcia, & Cabeza-Rojas, 2017).

Hoy, Colombia depende de fuentes de energía que requieren el uso de recursos naturales como petróleo, carbón y agua (inundaciones), por lo que están tratando de satisfacer de manera eficiente la demanda eléctrica en todas las regiones del país, para disminuir la contaminación ambiental (Martínez González, Orlandini, & Herrero López, 2011; XM - Compañía de Expertos en Mercados, 2017); La energía fotovoltaica es una excelente solución a esta situación porque es fácil de instalar y usar (lugares aislados), genera electricidad inagotable (el sol), tiene una buena fuente de energía solar y es amigable con el medio ambiente. (Hernández Rueda & Ramírez Contreras, 2015; Eraso Checa & Erazo de la Cruz, 2012). Además, los sistemas fotovoltaicos son fáciles de instalar, tienden a ser de bajo costo, requieren poco mantenimiento, tienen una larga vida útil y las celdas solares no cuentan con grandes costos económicos. (Sevilla Jiménez, Golf Laville, & Driha, 2013).

Un atlas de la radiación solar, ultravioleta y de ozono de Colombia. Está destinado a mostrar y reportar la disponibilidad de energía solar en la Tierra a través de estaciones meteorológicas (información radioactiva) de la radiación solar de la Tierra, la radiación solar y la luminosidad solar. (Rodríguez & González, 1992; MME, INEA & HIMAT, 1993). Hay 550

estaciones de satélite convencionales y automatizadas en todo el país, 71 de las cuales están dedicadas a mediciones directas de luminosidad solar, 383 a mediciones de luminosidad solar convencional y 96 a mediciones de humedad y temperatura relativa. Variables correlacionadas con la irradiancia superficial El aislamiento global se estima mediante la recopilación de información de todas las estaciones meteorológicas (550), y la luminosidad solar se obtiene de 479 estaciones. (UPME, IDEAM, and MME, 2005). Este atlas consta de cuatro colecciones de trece mapas de irradiancia y luminosidad solar creados por el Instituto de Meteorología, Hidrología y Medio Ambiente -IDEAM y la Unidad de Planeación Energética y Minera -UPME. Desde 1981, se han establecido niveles promedio de radiación y radiación mensuales y anuales, estos valores se expresan en kilovatios-hora por metro cuadrado. (kWh/m²) (IDEAM & UPME, 2016).

2.1.4. Atlas Global Solar

El objetivo principal de Atlas Global SOLAR es proporcionar un acceso rápido y fácil a los datos del potencial de energía fotovoltaica y de recursos solares a nivel mundial, con un clic del mouse (SOLARGIS & Grupo del Banco Mundial, 2019).

Las capas de SIG y los mapas de carteles que muestran el potencial de recursos a nivel mundial, regional y nacional se pueden encontrar en la sección Descarga. En la sección Base de conocimientos se puede encontrar una descripción más detallada de los datos proporcionados, la metodología para estimar el potencial de los recursos solares y una guía sobre cómo usarlos.

El Banco Mundial y la Corporación Financiera Internacional, colectivamente el Grupo del Banco Mundial, han proporcionado el Atlas Global Solar además de una serie de capas de datos SIG globales, regionales y nacionales y mapas de carteles, para respaldar la ampliación de la energía solar en nuestro país. Este trabajo está financiado por el Programa de Asistencia para la Gestión del Sector de la Energía (ESMAP), un fondo fiduciario de donantes múltiples administrado por el Banco Mundial y respaldado por 13 donantes bilaterales oficiales. Es parte de una iniciativa global ESMAP sobre mapeo de recursos de energía renovable que incluye biomasa, pequeñas centrales hidroeléctricas, energía solar y eólica (SOLARGIS & Grupo del Banco Mundial, 2019).

El Grupo del Banco Mundial ha seleccionado a Solargis como su proveedor global de datos solares y servicios de evaluación de energía solar relacionados. Este Atlas Solar Global ha sido preparado por Solargis bajo un contrato con el Banco Mundial, basado en una base de datos de recursos solares que poseen y mantienen. Para consultas comerciales, comuníquese directamente con Solargis.

Global Solar Atlas es una herramienta en línea que le proporcionará una descripción general del potencial de energía solar para un sitio o región (SOLARGIS & Grupo del Banco Mundial, 2019).

El Atlas Solar Global ofrece 4 características clave:

- Mapas interactivos: Los mapas interactivos permiten la visualización del potencial de recursos solares para una región y proporcionan valores promedio anuales para cada clic en el mapa.
- Calculadora de rendimiento de energía fotovoltaica: La calculadora de rendimiento fotovoltaico permite calcular el rendimiento energético a largo plazo de un sistema fotovoltaico personalizado. Las estimaciones de rendimiento energético se proporcionan como perfiles de 12x24 (mes x hora) que permiten comprender la variabilidad estacional e intradiaria de la producción fotovoltaica.
- Mapas descargables y datos SIG: La sección de descarga permite descargar mapas de carteles con fines de presentación. Además, las capas de datos GIS se pueden descargar para análisis geoespacial avanzado utilizando software como QGIS, ArcGIS.
- Estadísticas del potencial solar nacional y regional: Se han preparado instantáneas a nivel de país del potencial de la energía solar para ayudar a los responsables políticos y a los investigadores a comprender el potencial teórico y práctico de la energía solar para los países y regiones de interés.

El objetivo del Global Solar Atlas es proporcionar datos fiables de nivel introductorio para ayudar a los responsables de la formulación de políticas, los investigadores y las empresas solares comerciales a tomar mejores decisiones. Para el análisis específico del proyecto de grandes centrales eléctricas, los datos disponibles a través del Atlas Solar Global son adecuados solo para análisis preliminares. Las estimaciones de rendimiento fotovoltaico no tienen en cuenta muchos

factores importantes que pueden afectar el rendimiento potencial de una planta de energía fotovoltaica. Para las grandes centrales eléctricas, se recomienda trabajar con herramientas de estimación de rendimiento más detalladas para obtener una estimación precisa del rendimiento energético (SOLARGIS & Grupo del Banco Mundial, 2019).

2.2.Marco conceptual

2.2.1. Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica incluye la conversión directa de la radiación solar en energía eléctrica. Esta conversión a energía eléctrica se logra mediante el uso de las características de los materiales semiconductores en las células fotovoltaicas. La luz solar está compuesta por fotones o partículas de alta energía. Estos fotones tienen diferentes energías, correspondientes a diferentes longitudes de onda del espectro solar. Cuando los fotones golpean la célula fotovoltaica, se reflejan o se absorben. Solo los fotones absorbidos pueden generar electricidad. Cuando se absorbe un fotón, la energía del fotón se transfiere a un electrón en un átomo de la célula. Usando esta nueva energía, los electrones pueden escapar de las posiciones normales asociadas con los átomos y convertirse en parte de la corriente en el circuito.

La parte más importante de un panel fotovoltaico es la capa semiconductor, porque aquí es donde se genera la corriente de electrones. Estos semiconductores se procesan especialmente para formar dos capas dopadas diferentes (tipo p y tipo n) para formar un campo eléctrico, una parte es positiva y la otra parte es negativa. Cuando la luz solar incide en la célula, se liberan electrones y estos son capturados por el campo eléctrico para formar una corriente eléctrica. Es por esto que estas baterías están fabricadas con este tipo de material, un material que actúa como aislante a bajas temperaturas y como conductor cuando aumenta la energía (Secretaría de Energía, 2008).

2.2.2. Clasificación de sistema fotovoltaicos

Las instalaciones fotovoltaicas se dividen en dos grandes grupos en función del objetivo de la mismas: instalaciones aisladas de la red, cuya finalidad es satisfacer total o parcialmente la demanda de energía eléctrica convencional residencial o de una comunidad, y las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red, que tienen como objetivo fundamental entregar la energía a la

red eléctrica pública; esta última, de gran superficie, se está utilizando como superficie de terminación e imagen en el edificio (Revista de urbanismo, 2005):

- Instalaciones aisladas de la red: Se utilizan en áreas remotas donde las redes públicas son inaccesibles. Instalado en el campo, iluminación de zona aislada, comunicaciones, balizas, bombas de agua.
- Instalaciones conectadas a la red: En este caso, la red pública actúa como un depósito de energía inagotable, aceptando toda la energía disponible en los sistemas fotovoltaicos y fotovoltaicos instalados en viviendas y edificios.
- Instalaciones híbridas: En este caso, la red pública actúa como un almacén infinito de energía y recibe toda la energía disponible del sistema solar, ya sea instalado en una casa o edificio, pero de todos. Se trata de una combinación de módulos de energía solar y una o más fuentes de energía auxiliares, como turbinas eólicas y motores diésel. Este sistema es más confiable que el sistema anterior porque el suministro no se ve afectado por la reducción de la captación y producción de energía del sistema de energía solar, que se complementa con otros tipos de producción, renovables o no. A continuación se ejemplifica el orden de los sistemas, de acuerdo a la instalación:

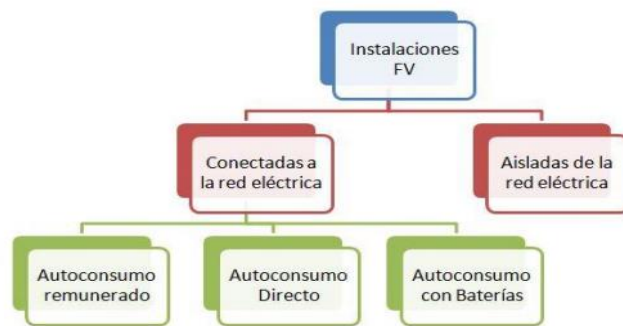


Ilustración 4. Diagrama de clasificación de la instalación de los sistemas FV. Fuente: Tomado de (Monsolar, 2018).

2.3.Estado del Arte

2.3.1. Caracterización del potencial energético de las energías renovables

Moreno Collado, Ana María.

Universidad de León.

La autora expone mediante la realización de un trabajo investigativo de doctorado cuyo objetivo del trabajo era desarrollar una metodología que permitiera seleccionar la ubicación mediante GIS, de pequeñas plantas de biomasa en la comarca de Payuelos para la generación de electricidad, teniendo en cuenta como factores determinantes de su ubicación la producción de biomasa, las comunicaciones, la edad de la población, etc. En ese trabajo también se llevaba a cabo un pronóstico sobre los cultivos, que tras la transformación en regadío ocuparían los nuevos regadíos de la comarca de Payuelos. En la forma de vida actual, la energía es fundamental. Se utiliza para desplazarse, poner en maniobra las instalaciones agrícolas e industriales, calentar y enfriar las edificaciones, es necesaria para que funcionen las máquinas y electrodomésticos, aparatos de ocio y entretenimiento que tenemos en los hogares y para la iluminación pública y particular en los domicilios, entre otros usos.

[...] Se desarrolló un modelo predictivo basado en datos de producción en la planta de energía solar Santa Marta I, este patrón de disminución estacional ha sido validado durante un mes completo, el modelo predictivo desarrollado permitirá estimar cuánto daño recibirán los paneles en los próximos años, prediciendo así el proceso de producción a largo plazo, aunque estos modelos no son los más estudiados, puesto que las grandes plantas fotovoltaicas necesitan modelos de predicción a corto plazo que les haga ir al mercado con una estimación lo más exacta posible, de su producción en las siguientes seis horas o incluso en los próximos minutos. Los cambios a lo largo del tiempo en el rendimiento de esta familia de paneles se basan en los datos de producción reales de los módulos solares y los análisis realizados en la fecha de fabricación se registran por completo. Además, esta predicción es muy realista ya que incluye eventos inesperados como cortes de energía o cortes de energía [...] (Moreno Collado, 2015).

2.3.2. Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica

(Salamanca-Ávila, 2017), expone mediante la publicación de un artículo de investigación titulado ‘Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica. Caso de aplicación en la ciudad de Bogotá’ en la Revista Científica – Universidad Distrital Francisco José de Caldas, donde plantea que el uso de sistemas fotovoltaicos es un tema de mucho interés en la actualidad e implementar ese tipo de sistemas aislados en la ciudad de Bogotá es posible, también expone que la energía

solar es un recurso renovable, es decir, está siempre disponible, no se agota y se puede aprovechar en cualquier momento gracias a que es posible almacenarla mediante celdas eléctricas de acopio.

El autor presenta los dificultosos escenarios medioambientales, la contaminación ahondada por el desarrollo de carácter tecnológico en la construcción de celdas solares cada vez más eficientes y eficaces, han contribuido a que en los tiempos actuales se promuevan el uso de las energías renovables como la energía solar. Adicionalmente, se ha incrementado el uso de estos sistemas pues el nivel de contaminación que produce es muy bajo y los costos de instalación se recuperan al reducir la facturación del consumo de energía prestado por empresas de servicios públicos. Este artículo es importante porque trata la implementación de estos sistemas fotovoltaicos en escenarios específicos del país tropical.

[...] De la evaluación de costos se ultima que un proyecto de este tipo, donde acontecen los 25 años previstos de funcionamiento, en ningún momento cabe la posibilidad de recuperar la inversión fondeada inicial, mucho menos de generar un ingreso armonioso por la ejecución e implementación de este sistema. Se tiene que no es viable el proyecto desde el punto de vista económico, ya que lo que va a generar realmente es un gasto adicional al proyecto global. Pero si lo que se está buscando realmente es contribuir con el cambio climático, como se pudo apreciar, es posible efectuar algún tipo de sistema fotovoltaico en la ciudad de Bogotá y de esta forma suplir a la ciudad con una parte de la energía eléctrica que se consume [...] (Salamanca-Ávila, 2017).

2.3.3. Acceso remoto de sistemas solares fotovoltaicos autónomos

Garzón Morales, Víctor Alfonso.

Universidad Católica de Colombia.

(Figuerola-Cuello, Pardo-García, & Díaz-Rodríguez, 2017) exponen mediante la publicación de una investigación titulada ‘Sistema control supervisor de clientes con acceso remoto para sistemas solares fotovoltaicos autónomos’ en la Revista Scielo - de Investigación, Desarrollo e Innovación una reflexión sobre los Sistemas Solares Autónomos Fotovoltaicos (APSS), en la cual se presenta unos inconvenientes de carácter importante, siendo el principal de ellos, la falta de un sistema de control energético para optimizar su funcionamiento, este trabajo

presenta el análisis y diseño de un Sistema de Control de Supervisor de Acceso Remoto – RASCS, para clientes con acceso remoto de sistemas solares fotovoltaicos de 500 W.

[...] Utilizando la metodología aplicada, se puede inferir que el análisis de criticidad del proceso es una buena estrategia para implementar el control de supervisión en los sistemas SFVA ubicados en áreas desconectadas. El sistema de control de resultados gestiona tres variables clave para medir y gestionar la energía consumida por los usuarios de SFVA. El nivel de carga de la batería debe permanecer por encima del mínimo aprobado para el funcionamiento adecuado de la corriente consumida por cada dispositivo o carga aprobados por el diseñador [...] (Figueroa-Cuello, Pardo-García, & Díaz-Rodríguez, 2017).

2.3.4. La energía solar fotovoltaica en Colombia: potenciales, antecedentes y perspectivas

(Gómez Ramírez, 2018), expone mediante la publicación de una tesis de pregrado en ingeniería mecánica titulada ‘La energía solar fotovoltaica en Colombia: potenciales, antecedentes y perspectivas’ para optar el título de ingeniero mecánico de la Universidad Santo Tomás con la finalidad de mostrar y analizar en cuanto a: el aprovechamiento, los beneficios, que tan favorable es la ubicación geográfica de Colombia, en que zonas se ha invertido más en estas tecnologías, que zonas cuentan con mayor potencial solar (recurso solar - radiación) y porque no se ha extendido en todo el país esta fuente de generación renovable.

Además, los autores autorizan fondos y organizaciones de apoyo financiero y técnico que regulan la energía solar, medidas preferenciales en organizaciones y políticas, regulaciones, leyes y tributación, proyectos actuales, inversiones actuales y futuras en este elemento de empresas con fines de lucro, posibles usos a través de electricidad. sistemas; Al invertir en este desarrollo para mejorar la eficiencia energética, educar y motivar a los colombianos a cambiar a fuentes de energía renovable, se debe seguir el desarrollo y dirección de esta tecnología en el país. Este levantamiento es necesario para presentar todos los documentos materiales y resúmenes de levantamientos necesarios para realizar la aplicación del proyecto sobre las características del sistema de energía solar en Colombia.

[...] La demanda de energía en Colombia y en todo el mundo está aumentando debido al crecimiento de la población, el crecimiento industrial, las necesidades de consumo de energía y los desafíos económicos, sociales y ambientales. Una posible solución para satisfacer esta necesidad y paliar los problemas que provoca la generación eléctrica en la actualidad es la energía solar. Colombia tiene un buen potencial de radiación solar en todo su territorio y esta fuente de energía se puede utilizar para una variedad de tecnologías. Sin embargo, esto no es suficiente para motivar a las personas naturales y jurídicas a destinar recursos para tales actividades debido al costo inicial y al desconocimiento de esta fuente de energía [...] (Gómez Ramírez, 2018).

2.3.5. Impacto de la penetración de la energía solar fotovoltaica en los sistemas de distribución

(Correa Flórez, Marulanda García, & Panesso Hernández, 2016), presentan la publicación de un artículo de investigación titulado ‘Impacto de la penetración de la energía solar fotovoltaica en los sistemas de distribución: caso de estudio basado en supuestos del contexto colombiano’ en la Revista Tecnura de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas un método de evaluación para la penetración de energía solar fotovoltaica en sistemas de distribución. Esta evaluación busca minimizar los costos de pérdida de energía durante la vida útil de un panel fotovoltaico e incluye el cálculo del costo total de energía e inversión, operación y mantenimiento del panel. En el segundo ejemplo, los autores proponen un método asociado a parámetros específicos para ser utilizado en base a un estudio reciente en Colombia con el objetivo de sugerir una alternativa más práctica. El problema de optimización se resuelve utilizando algoritmos genéticos especiales probados con un sistema de prueba IEEE 37 bus modificado para cubrir el comportamiento de cargas residenciales e industriales. Tras la investigación, descubrimos que el consumo de energía saliente se grafica en relación con la cantidad de autobuses equipados con paneles solares. El bus que sale de la fuente de alimentación es más atractivo para la instalación de paneles fotovoltaicos en términos de inversión y costo total de energía. La importancia de este estudio es que los resultados de la evaluación muestran una reducción en la pérdida de potencia en la línea. También demuestra los beneficios de brindar asistencia eléctrica local a personas con discapacidades. Este escenario muestra que los paneles solares pueden proporcionar un retorno de la inversión tanto desde el punto de vista del operador de la red como del inversor.

[...] La metodología presentada nos permite evaluar la inclusión de LVP en la perspectiva del barco en términos de pérdida de energía y costos totales asociados durante la vida útil de esta tecnología. El estudio combina la electricidad y las variables del mercado para reflejar escenarios más realistas [...] (Correa Flórez, Marulanda García, & Panesso Hernández, 2016).

2.3.6. Diseño de un Sistema solar fotovoltaico autónomo para una institución educativa rural

(Ariel Mesa, Sanabria, & Javier Pérez, 2016), expone mediante la publicación de un artículo científico en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sede Sogamoso titulado ‘Diseño de un Sistema solar fotovoltaico autónomo para una institución educativa rural en el municipio de Páez – Boyacá’ donde muestra el diseño de una instalación fotovoltaica autónoma, destinada a proveer energía eléctrica a una Institución Educativa ubicada en la vereda Santa Rita, área rural del municipio de Páez - Boyacá. La investigación demandó de un esfuerzo dado que el centro educativo presenta un difícil acceso (se encuentra a más de tres horas del casco urbano del municipio con vías en difícil situación, mientras el municipio a su vez, dista más de cuatro horas de la capital del departamento (118 km), razón por la cual, los entes territoriales y la empresa de energía del departamento no han podido llevar el servicio debido a los altos costos que implica instalar y mantener esta red, por lo que se puede considerar a la Zona como No Interconectada (ZNI). La carencia del energético actualmente impide que estos niños puedan acceder a una alimentación escolar digna, a condiciones de iluminación adecuadas para sus actividades y a recursos educativos tan importantes como lo son las tecnologías de la información. Los resultados evidenciados muestran la caracterización energética y la determinación de las condiciones de la aplicación, los potenciales del recurso energético renovable en el sitio, y el diseño de cada uno de los componentes del sistema fotovoltaico autónomo. Se incluye al final, algunos análisis del diseño obtenido y comparaciones entre diferentes opciones tecnológicas.

[...] La metodología de diseño llevada a cabo puede replicarse con facilidad para cualquier otra institución educativa con las mismas características donde se espera que el sistema implementado pueda resolver parte de las necesidades energéticas [...] (Ariel Mesa, Sanabria, & Javier Pérez, 2016).

2.3.7. Determinación y análisis espacio temporal de la radiación global

El autor expone mediante la realización de una tesis de maestría un trabajo que tiene como objetivo explicar el proceso de determinación de la radiación solar global y analizar su comportamiento en el altiplano de Puno durante el periodo 2007 al 2013 en las zonas de Circunlacustre, Puna húmeda y clima de altura; Este estudio se debe a la falta de datos sobre el aislamiento total. Los autores utilizaron el modelo de Bristol y Campbell para estimar la irradiancia solar global diaria y para estimar la transmitancia atmosférica máxima a partir de los datos diarios de temperaturas extremas producidos por los registros y datos de la Oficina Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de Puno de la Estación Meteorológica de la Escuela Vocacional. Matemáticas y Ciencias Físicas en la Universidad Nacional del Altiplano. Asimismo, la aplicación del modelo de Bristow y Campbell es útil para obtener una base de datos completa del conteo total diario de cuarentena en Masocrus con un promedio anual máximo de 27.2984 KWh / my el promedio anual mínimo en julio. Este valor está por encima de los 24 KWh / my es útil para aplicaciones solares, según la Agencia Latinoamericana de Energía. También convierte la energía solar en energía eléctrica o térmica. Esto podría ayudar a resolver algunos de los problemas de frío y heladas más urgentes que enfrentan las personas, los animales y las plantas en las tierras altas andinas de la región de Puno.

2.4.Marco legal

2.4.1. Para energías renovables no convencionales

El marco legal para la realización y desempeño de las energías renovables no convencionales se estipulan a continuación: En años pasados el Gobierno Nacional aprobó distintas normas como son:

- Ley 697 (Congreso de la República de Colombia, 2001)
- Ley 788 (Congreso de la República de Colombia, 2002)
- Ley 1715 (Congreso de la República de Colombia, 2014)
- Ley 1753 (Congreso de la República de Colombia, 2015)
- Decreto 3683 (Presidencia de la República de Colombia, 2003)
- Decreto 139 (Presidencia de la República de Colombia, 2005)
- Resolución 0563 (UPME, 2012)

2.4.2. Requisitos legales

- Paneles fotovoltaicos: deben cumplir con las especificaciones contempladas en la norma IEC-61730 de 2009.
- Reguladores de carga solar: se debe cumplir con la norma NTC6016 de 2013.
- Inversores: para artefactos electrodomésticos y similares norma NTC2183 de 2014 y NTC5759 de 2010.
- Baterías: se debe cumplir la norma NTC 5287 de 2009.

2.4.3. Normas en Colombia

Tabla 1. Normas Colombia.

Norma	Título
NTC 2774:1990	ENERGÍA SOLAR. EVALUACIÓN DE MATERIALES AISLANTES TÉRMICOS EMPLEADOS EN COLECTORES SOLARES
NTC 3507:1993	ENERGÍA SOLAR. INSTALACIÓN DE SISTEMAS DOMÉSTICOS DE AGUA CALIENTE QUE FUNCIONAN CON ENERGÍA SOLAR
NTC 4368:1997	EFICIENCIA ENERGÉTICA. SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA CON ENERGÍA SOLAR Y COMPONENTES
NTC 5291:2004	SISTEMAS DE CALENTAMIENTO SOLAR DOMESTICO DE AGUA (TRANSFERENCIA DE CALOR DE UN LIQUIDO A OTRO)
GTC 108:2004	ENERGÍA SOLAR. ESPECIFICACIONES PARA SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA CON ENERGÍA SOLAR, DESTINADA AL USO DOMESTICO.
NTC 2775:2005	ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA. TERMINOLOGÍA Y DEFINICIONES
NTC 2883:2006	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS (FV) DE SILICIO CRISTALINO PARA APLICACIÓN TERRESTRE. CALIFICACIÓN DEL DISEÑO Y APROBACIÓN DE TIPO.
NTC 5509:2007	ENSAYO ULTRAVIOLETA PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS (FV)
NTC 5627:2008	COMPONENTES DE ACUMULACIÓN, CONVERSIÓN Y GESTIÓN DE ENERGÍA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS. CALIFICACIÓN DEL DISEÑO Y ENSAYOS AMBIENTALES
NTC 5709:2009	EXPRESIÓN ANALÍTICA PARA LOS PERFILES SOLARES DIARIOS.
NTC 5818:2010	DISPOSITIVOS DE CONTROL ELÉCTRICO AUTOMÁTICO PARA USO DOMÉSTICO Y ANÁLOGO. REQUISITOS PARTICULARES PARA REGULADORES DE ENERGÍA
NTC 5898:2011	MONITORIZACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS. GUÍAS PARA LA MEDIDA, EL INTERCAMBIO DE DATOS Y EL ANÁLISIS
NTC 2631:2012	ENERGÍA SOLAR. CÁLCULO DE TRANSMITANCIA Y REFLECTANCIA FOTOMÉTRICAS EN MATERIALES SOMETIDOS A RADIACIÓN SOLAR
NTC 5434-1:2013	SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS Y COMPONENTES. COLECTORES SOLARES. PARTE 1. REQUISITOS GENERALES
LEY 1715	REGULA LA INTEGRACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES AL SISTEMA ENERGÉTICO NACIONAL

RETIE	REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS
--------------	---

Fuente: Elaboración propia.

2.4.4. Normas internacionales

Tabla 2. Normas internacionales aplicables en Colombia.

Normas	Título
ISO 22975-1:2016	SOLAR ENERGY -- COLLECTOR COMPONENTS AND MATERIALS -- PART 1: EVACUATED TUBES -- DURABILITY AND PERFORMANCE
ISO 9806:2017	SOLAR ENERGY -- SOLAR THERMAL COLLECTORS -- TEST METHODS
ISO 22975-3:2014	SOLAR ENERGY -- COLLECTOR COMPONENTS AND MATERIALS -- PART 3: ABSORBER SURFACE DURABILITY
IEC 60904-1 ED3	PHOTOVOLTAIC DEVICES - PART 1: MEASUREMENT OF PHOTOVOLTAIC CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS
IEC 63092-2 ED1	PHOTOVOLTAICS IN BUILDINGS – PART 2: BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS
UNE-EN 50380:2018	REQUISITOS DE MARCADO Y DE DOCUMENTACIÓN PARA LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
UNE-EN 61829:2016	CAMPOS FOTOVOLTAICOS DE SILICIO CRISTALINO. MEDIDA EN EL SITIO DE CARACTERÍSTICAS I-V

Fuente: Elaboración propia.

3. Capítulo III - Diseño metodológico

3.1. Tipo de investigación

Este proyecto se desarrollará teniendo en cuenta un factor cuantitativo, obteniendo como resultado una investigación de tipo teórico práctica.

Se realiza una recopilación de información teórica y conceptual de trabajos y prácticas, libros, tesis, proyectos, artículos indexados y demás, relacionados al cálculo y/o medición del potencial de radiación solar a nivel regional, nacional e internacional. Llevando con ello lectura

crítica, analítica y reflexiva con el fin de evaluar las metodologías utilizadas en cada uno de ellos con el fin de determinar los métodos adecuados y más eficientes para ponerse en práctica en la etapa experimental de este proyecto.

3.2.Recolección de datos secundarios

Para llevar a cabo un análisis adecuado y preciso se tendrá en cuenta la recolección de datos primarios obtenidos de las diferentes plataformas digitales teniendo en cuenta: gráficos, tablas de datos, atributos, imágenes satelitales de radares remotos correspondientes a las entidades u organizaciones como: La Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio NASA, El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, La Unidad de Planeación Minero Energética UPME y demás. De tal forma de obtener los suficientes datos para la evaluación de los diferentes criterios y variables climatológicas.

3.3.Área de estudio

La presente investigación inició con la delimitación del espacio geográfico a estudiar, donde se eligió el departamento de Boyacá, Colombia. Teniendo en cuenta las trece (13) provincias que hacen parte de su territorio: Sugamuxi, Tundama, Valderrama, Norte, Gutiérrez, Centro, Neira, Oriente, Lengupa, Libertad Ricaurte, Márquez y Occidente.

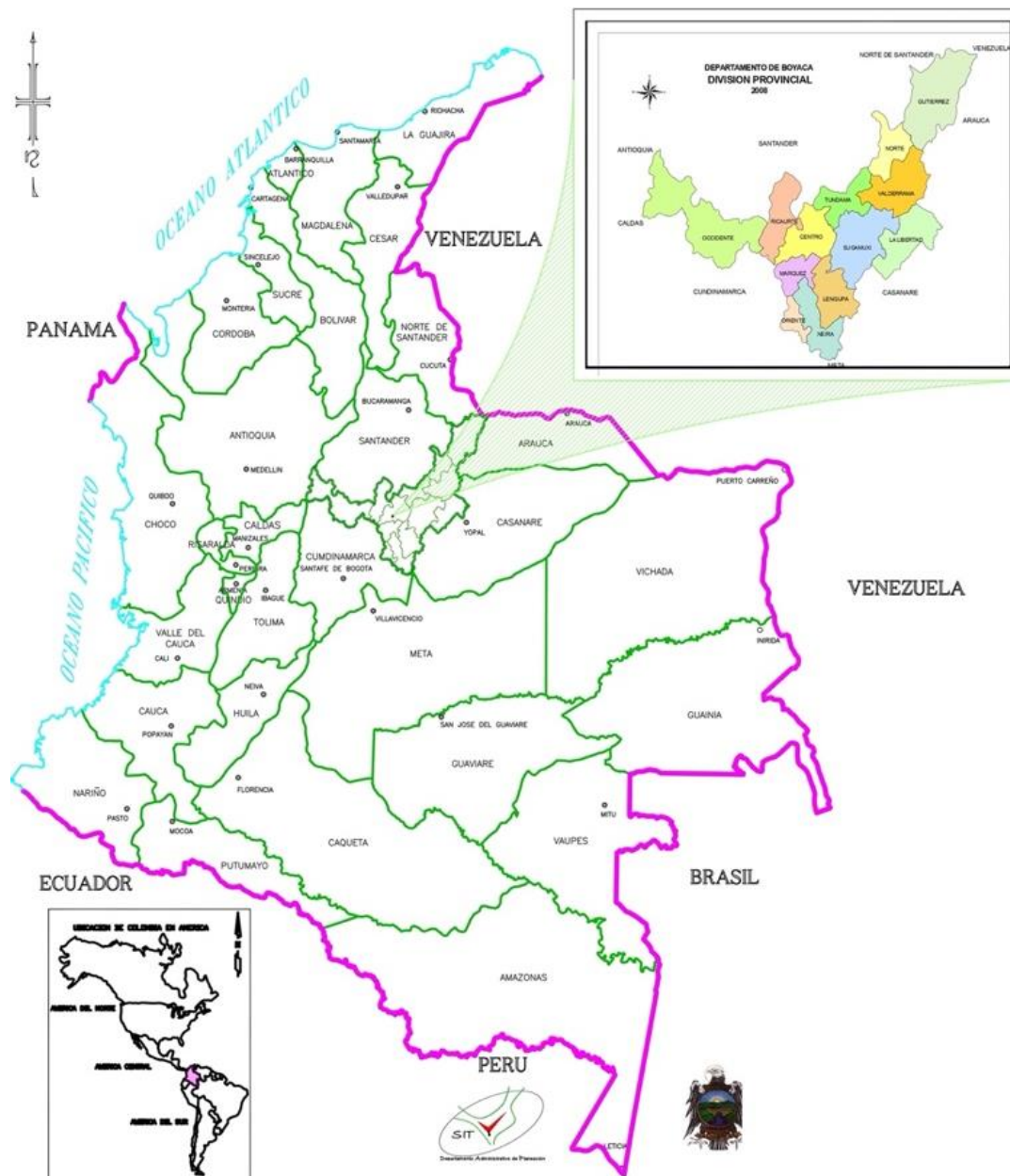


Ilustración 5. Mapa del departamento de Boyacá. Fuente: Dirección de Sistemas de Información, Departamento Administrativo de Planeación de Boyacá

Boyacá es uno de los departamentos que hacen parte de las 32 entidades territoriales, designadas como departamentos, que hacen parte de la república de Colombia. Cuenta con una superficie aproximada de 23.189 km², conformado por 123 municipios, donde la ciudad de Tunja es su capital, está dividido en 13 provincias y cuenta con una población aproximada de 1,217 millones de habitantes (DANE 2018).



Ilustración 6. Mapa provincias y municipios, Dpto. de Boyacá. Fuente: Dirección de Sistemas de Información, Departamento Administrativo de Planeación de Boyacá

3.4.Trabajo práctico

Para la ejecución del proyecto se tuvo en cuenta la metodología utilizada y desarrollada por la empresa SOLARGIS (2019) en nombre del Grupo del Banco Mundial con los fondos del Programa de Asistencia para la Gestión del Sector Energético (ESMAP). La cual consiste en la creación de un atlas mundial (“Global Solar Atlas”) basado en tres modelos diferentes: Modelo de radiación solar, modelo de temperatura del aire y como último modelo de simulación de energía fotovoltaica. Considerando que la modelación que conlleva estos dos primeros genera capas de datos pre calculados, para así llevar a cabo una simulación de energía fotovoltaica a través de algoritmos y bases internas de SOLARGIS.

Tabla 3. simulación de energía fotovoltaica a través de algoritmos y bases internas de SOLARGIS.

Entradas de usuario	Modelos de calculo	Salida del atlas
- Localiación del proyecto -Información del sistema fotovoltaico	-Radiación solar (kWh/m2) -Temperatura (°C / °F) -Simulación fotovoltaica	- GHI: Irradiación horizontal global - DNI: Irradiación horizontal difusa - TEMP: Temperatura del aire a 2 m sobre el nivel del suelo en °C - GTI: irradiación global para una superficie inclinada óptimamente -PVOUT: potencial de energía fotovoltaica - OPTA: inclinación óptima del módulo fotovoltaico para maximizar la rendimiento anual

Fuente: Elaboración propia.

3.5. Modelo de radiación solar

Los métodos llevados a práctica por SOLARGIS consideran el factor de atenuación de la radiación solar a través de la atmósfera hasta que llega al suelo. Para calcular los parámetros de los recursos solares, su modelo emplea:

3.5.1. Entradas de datos de satélites geoestacionarios

SOLARGIS tiene en cuenta que los modelos de irradiación solar más avanzados (como el suyo) utilizan los datos de entrada modernos (satélites y atmósfera), que han sido controlados y verificados sistemáticamente. El modelo y los datos de entrada se integran y ajustan regionalmente para funcionar de manera confiable en una amplia gama de condiciones geográficas. Este proceso se basa en una base teórica sólida y muestra resultados consistentes y computacionalmente estables. Teniendo a su favor y según la empresa los métodos antiguos no suelen ser demasiado complicados y, por lo tanto, no alcanzan la precisión de sus modelos actuales. Incluso si estos modelos se basan en principios similares, las diferencias en la implementación pueden conducir a resultados diferentes. SOLARGIS & Grupo del Banco Mundial. (2019).

De esta forma la obtención de datos del continente americano y específico para Colombia SOLARGIS toma como referencia las fuentes de datos suministradas por la (NASA), Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF), Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) y Misión topográfica Radar Shuttle (SRTM) los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4. Datos de entrada utilizados en el modelo de Solargis para Colombia.

ENTRADAS	FUENTE DE DATOS DE ENTRADA		COBERTURA ESPACIAL	REPRESENTACIÓN DE TIEMPO	PASO DE TIEMPO	RESOLUCIÓN APROXIMADA DE CUADRICULA
Profundidad óptica atmosférica	MERRA-2 reanalysis	NASA	Mundial	1994 a 2002	Diario	55Km
	MACC-II reanalysis	ECMWF		2003 a 2012	Mensual Diario	125Km
	MACC-II Operacional			2013 a la actualidad	Diario	125Km (85Km desde 2015)

						(45Km desde 2016)
Vapor de agua	CFSR	NOAA	Mundial	1994 a 2010	1 hora	35Km
	GFS			2011 a la actualidad	3 horas	55Km
Índice de nubosidad	GOES EAST	NOAA	Norte y sur América	1999 a la actualidad	30min	3 a 4Km
	GOES WEST					
Altitud y horizonte	SRTM3	SRTM	Mundial	-	-	90 Metros

Fuente: SOLARGIS (s.f.) Solar radiation modeling. <https://solargis.com/docs/methodology/solar-radiation-modeling>

3.5.2. Algoritmos utilizados

En el algoritmo de Solargis se utilizan datos de entrada avanzados. Como resultado, los datos satelitales pueden garantizar una cobertura de tiempo muy alta (más del 99% en la mayoría de las áreas). Los datos de series de tiempo proporcionados utilizan algoritmos inteligentes que llenan cualquier vacío sobre el mapa o área de estudio. El paso de tiempo principal de los parámetros solares es de 15 minutos para el área de satélites MSG, 30 minutos para el área de satélites MFG y MTSAT y 30 minutos para el área de satélites GOES. Los parámetros atmosféricos (aerosol y vapor de agua) representan datos diarios. La resolución espacial de los datos de Meteosat, GOES y MTSAT considerados en el esquema de cálculo es de aproximadamente 3 km en el punto subsatelital. La salida del modelo se vuelve a muestrear en una cuadrícula regular de 2 minutos de arco (aproximadamente 4x4 km) en el sistema de coordenadas geográficas WGS84. SOLARGIS & Grupo del Banco Mundial. (2019). Methodology Global Solar Atlas

La restauración de la radiación solar en el modelo de satélite de irradiación Solargis se divide en tres pasos:

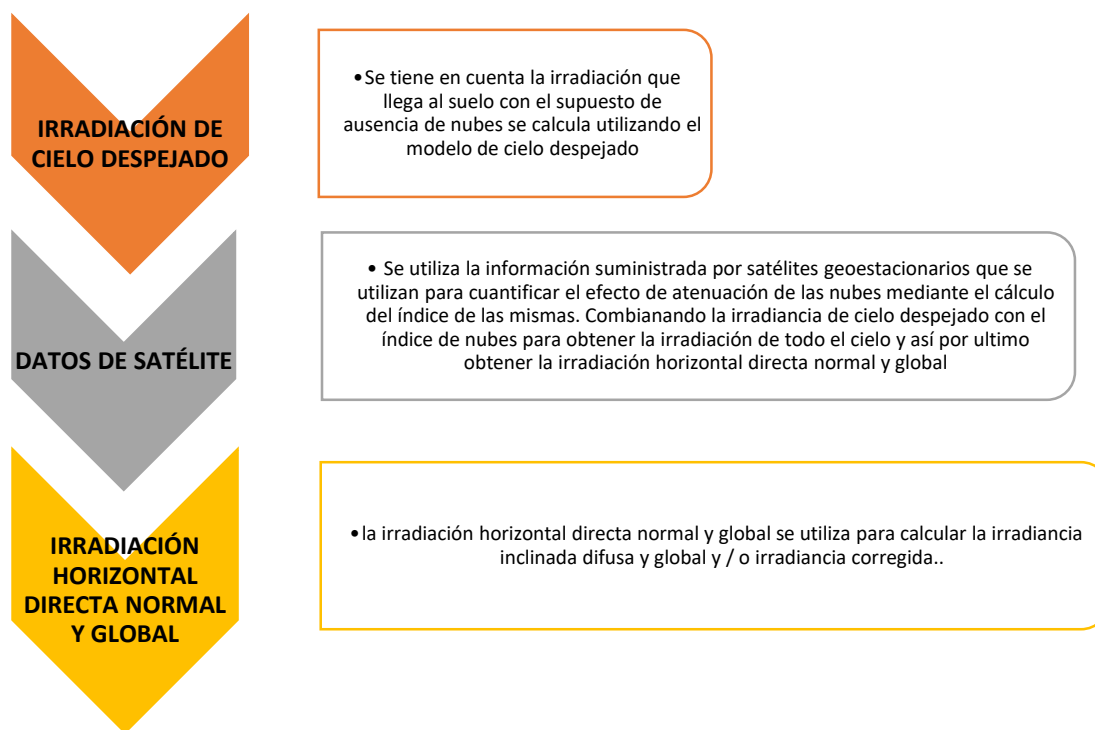


Ilustración 7. Restauración de la radiación solar en el modelo de satélite de irradiación Solargis.
Fuente: Elaboración propia.

3.6. Modelo de Energía fotovoltaica

Según SOLARGIS y su Atlas Global Solar la energía eléctrica producida por un sistema fotovoltaico (PV) depende de varios factores externos. El principal es la cantidad de radiación solar que cae sobre la superficie del módulo fotovoltaico, que a su vez depende de las condiciones climáticas locales y del método de instalación del módulo, como fijo o seguimiento, ángulo de inclinación, etc. El único parámetro que afecta la potencia de salida del módulo fotovoltaico es la tarea de estimar la eficiencia energética a largo plazo del sistema, que se reducirá a la irradiación global promedio en el plano de búsqueda. Sin embargo, la temperatura es un componente secundario crucial. SOLARGIS & Grupo del Banco Mundial. (2019).

3.7. Procesamiento

Teniendo en cuenta la metodología realizada por (SOLARGIS.,2019) se llevó a cabo la descarga de datos SIG generados y suministrados por los mismos de manera general para toda Colombia, generando con estos datos un estudio detallado y enfocado al departamento de Boyacá y sus trece

(13) provincias de forma global e individual, teniendo como base dos (2) representaciones temporales de datos solares y potenciales de energía fotovoltaica, se tuvo en cuenta:

1. Promedio anual / mensual a largo plazo de los totales diarios
2. Promedio a largo plazo de los totales anuales / mensuales

Este proyecto se enfocó principalmente en tres (3) variables de estudio: potencial de energía fotovoltaica (PVOUT), irradiación horizontal global (GHI) y porcentaje de pendiente. Dichas variables se evaluaron a través del software ArcGIS 10.3.1 bajo el siguiente esquema de trabajo

3.7.1. Descarga de datos

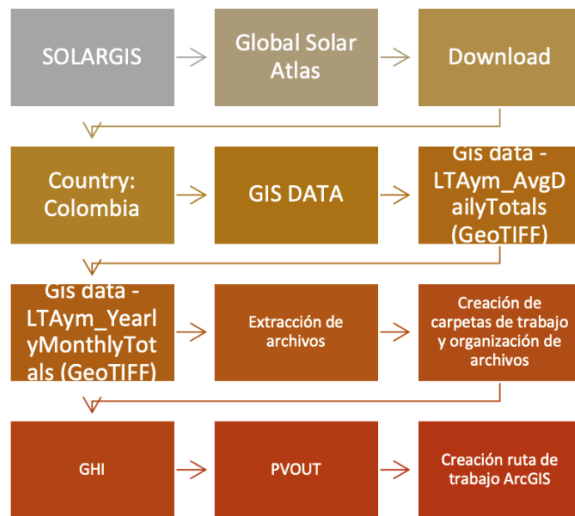


Ilustración 8. Descarga de datos. Fuente:
Elaboración propia.

3.7.2. Delimitación del área de estudio



Ilustración 9. Delimitación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

3.7.3. Análisis irradiación global horizontal (GHI)



Ilustración 10. Análisis irradiación global horizontal (GHI). **Fuente:** Elaboración propia.

3.7.5. Análisis porcentaje de pendiente del terreno y/o zona de estudio

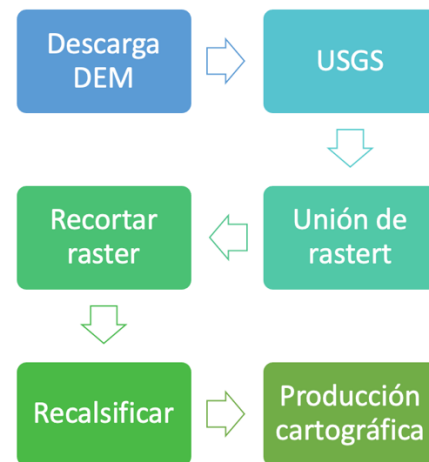


Ilustración 12. Análisis porcentaje de pendiente del terreno y/o zona de estudio. **Fuente:** Elaboración propia.

3.7.4. Análisis potencial de energía fotovoltaico (PVOU)



Ilustración 11. Análisis potencial de energía fotovoltaico (PVOU). **Fuente:** Elaboración propia.

3.7.6. Tabulación de tablas y graficas de apoyo

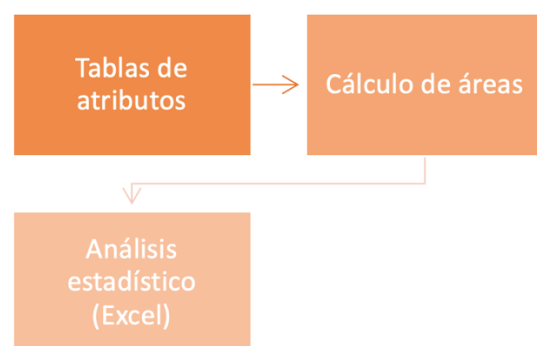


Ilustración 13. Tabulación de tablas y graficas de apoyo. **Fuente:** Elaboración propia.

El análisis de resultados es el paso por el cual toda investigación ordena y clasifica los datos obtenidos en campo, se representan de forma estadística, con el objetivo de hacer más entendible el documento (Santillan, 2010).

Se determina la viabilidad de cada provincia, para la producción de energía solar, teniendo en cuenta los valores de radiación obtenidos GHI (promedio a largo plazo de totales diarios de irradiación horizontal global) Y PVOUT (promedio a largo plazo de totales diarios de energía fotovoltaica), por los mapas generados de cada provincia, adicional los mapas de pendientes del departamento de Boyacá, donde se logra determinar las áreas con mayor porcentaje de inclinación, teniendo inferencia en la implementación de proyectos de energía solar.

Adicionalmente se tienen en cuenta variables climatológicas y geográficas, como lo son, relieves, localización, nubosidad, temperatura entre otras, con el fin de poder desarrollar este capítulo.

4. Capítulo IV - Presentación y análisis de resultados

4.1.Generalidades

4.1.1. Precipitación

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2015) La distribución de la precipitación en el departamento de Boyacá tiene una gran variabilidad en todo su territorio. Las áreas con menor precipitación (500 a 1,000 mm por año) distribuidas a lo largo del Altiplano Cundiboyacense se ubican en el este y oeste de la zona, y las lluvias aumentan en esta área. En el este, se producen precipitaciones topográficas correspondientes a la vertiente oriental de la cordillera oriental, y los valores registrados están en el rango de 2000 a 5000 mm o más. Hacia el oeste, a lo largo del Valle del Magdalena, la precipitación anual fluctúa entre 2000 y 3000 mm. Las condiciones de lluvia varían. En la parte central y occidental del sector se observó un comportamiento bimodal, con una estación seca mayor a principios de año y una estación menos evidente a mitad de año. Las temporadas de lluvias en estas dos regiones son de marzo a mayo y de septiembre a noviembre. La parte oriental del departamento es característica de la provincia de Orinoquia, es una estación seca única de diciembre a marzo, y la temporada de lluvias dura el resto del año, con las mayores precipitaciones de junio a julio. En el altiplano Cundiboyacense, el número de días de lluvia fluctúa entre 100 y 150, mientras que en los municipios de las faldas de la Orinoquia aumenta a 250 días. El resto del departamento registra de 150 a 250 días lluviosos cada año.

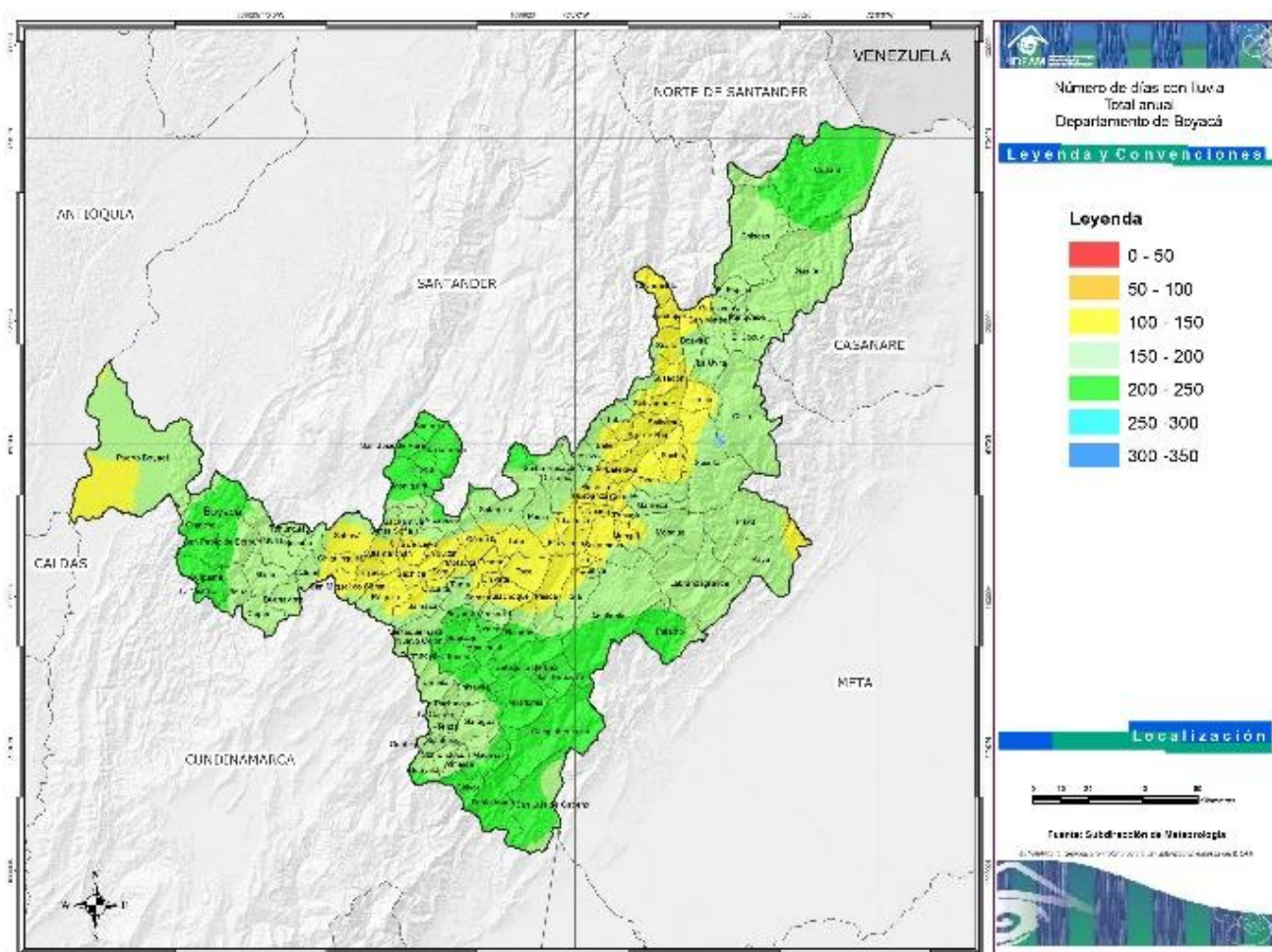


Ilustración 14. Número de días con lluvia total anual. Departamento de Boyacá. **Fuente:** Atlas Climatológico, IDEAM (2015).

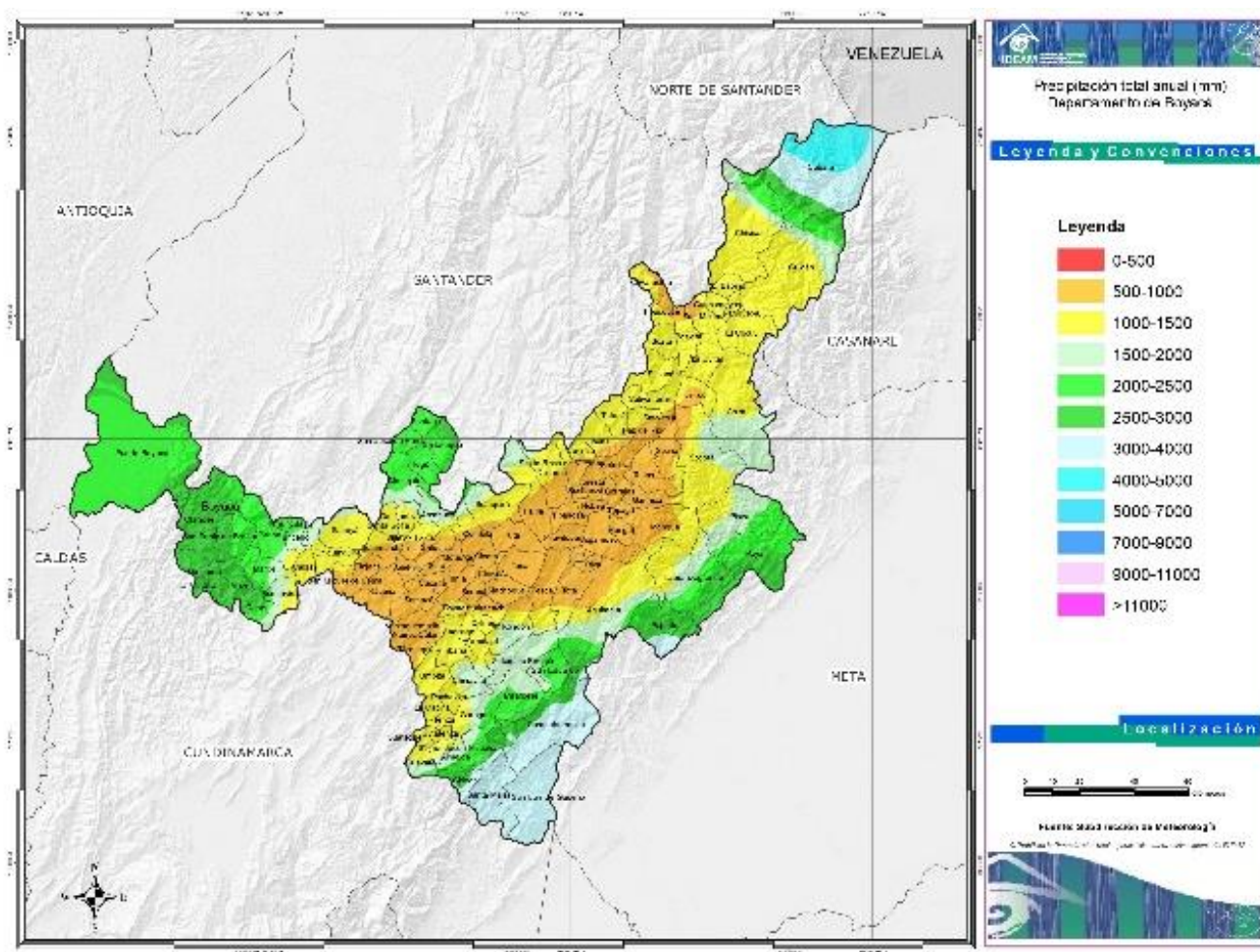


Ilustración 15. Precipitación total anual (mm). Departamento de Boyacá. **Fuente:** Tomado de Atlas Climatológico, IDEAM (2015).

4.1.2. Temperatura

La mayoría de municipios del departamento cuenta con pisos térmicos entre fríos y muy fríos. La altitud de Muzo y Otanche en el occidente mostró temperaturas superiores a los 20 grados centígrados, hasta alcanzar la temperatura más alta en el municipio de Puerto de Boyacá sobre el río Magdalena.

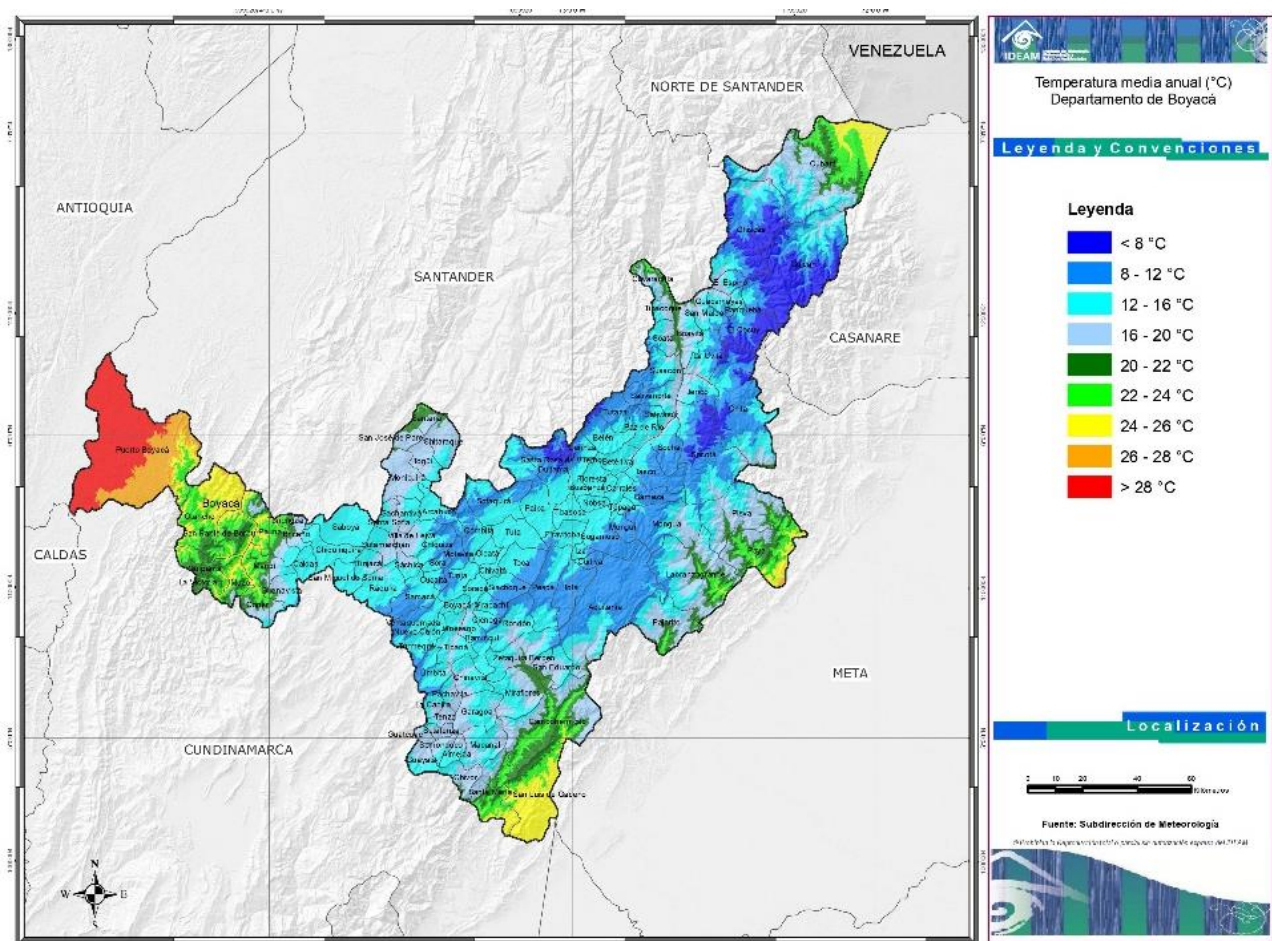


Ilustración 16. Temperatura media anual (C°). Departamento de Boyacá. **Fuente:** Tomado de Atlas Climatológico, IDEAM (2015).

4.1.3. Clasificación climática

El clima frío y muy frío de todos los niveles de humedad ocupa la mayor parte del sector. El este está dominado por el frío y la humedad, y el oeste y el altiplano Cundiboyacense tienen climas fríos, semiáridos y semihúmedos. Un clima templado ocurre en el borde de las estribaciones este y oeste de la cordillera con una extensión limitada hacia el este y el oeste. El clima cálido es húmedo y semihúmedo, ubicado en Cubará en el norte, San Luis de Gaceno en el límite con Meta y Puerto Boyacá en Magdalena.

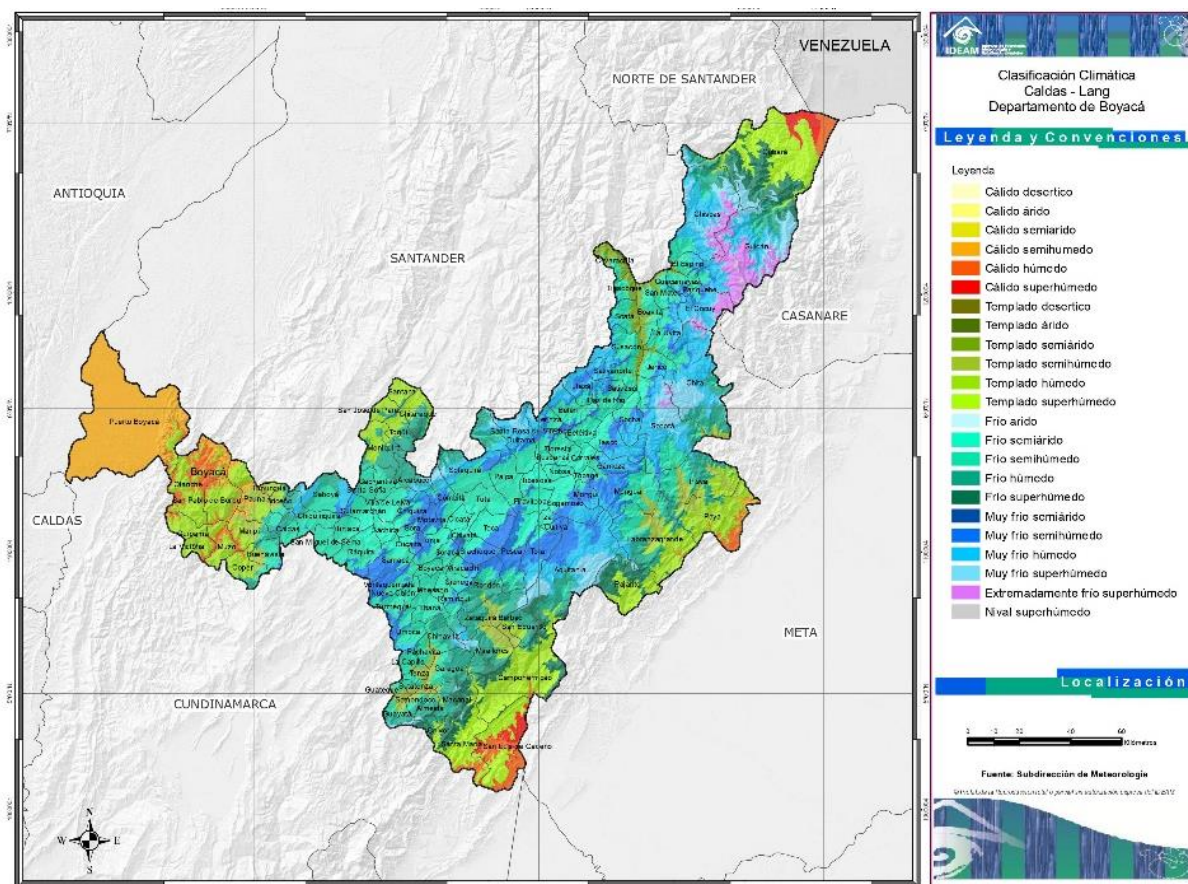


Ilustración 17. Clasificación Climática. Departamento de Boyacá. Fuente: Tomado de Atlas Climatológico, IDEAM (2015).

A continuación, se relacionan los resultados obtenidos de las tres provincias con mayores índices de radiación solar:

4.2.Provincia Márquez

4.2.1. Irradiación horizontal global – GHI de la Provincia

Tabla 5. Irradiación horizontal global - GHI de provincia Márquez.

PROVINCIA MÁRQUEZ		
GHI (kWh/m2)	Área (Ha)	%
3.253 - 3.887	14784.93	15.49
3.887 - 4.521	35819.81	37.52
4.521 - 5.155	44862.60	46.99
TOTAL ÁREA (Ha)	95467.00	

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 5. determina los rangos respectivos de la irradiación global horizontal (GHI) en unidades de kWh/m2, correspondientes a la provincia Márquez del departamento de Boyacá, la cual cuenta con un área de 95467.00 Ha, dando como resultado un máximo en la zona oeste de la provincia, con un valor entre 4.521 - 5.155 kWh/m2 equivalente al 46.99 % de su área total y un valor mínimo ubicado en la zona noreste con resultados entre 3.253 - 3.887 kWh/m2 equivalente al 15.49 %. Adicionalmente el rango más relevante corresponde a un GHI de

4.52 – 5.16 kWh/m2, presente en el 46.99 % de su área total.

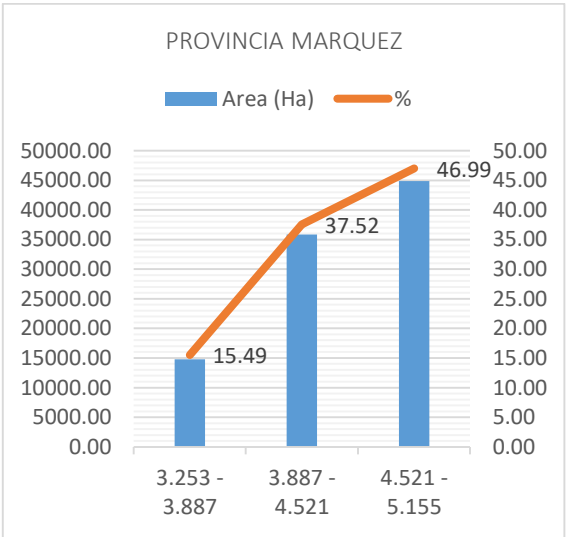


Ilustración 18. Gráfica de barras del GHI de la Provincia Márquez. Fuente: Elaboración propia.

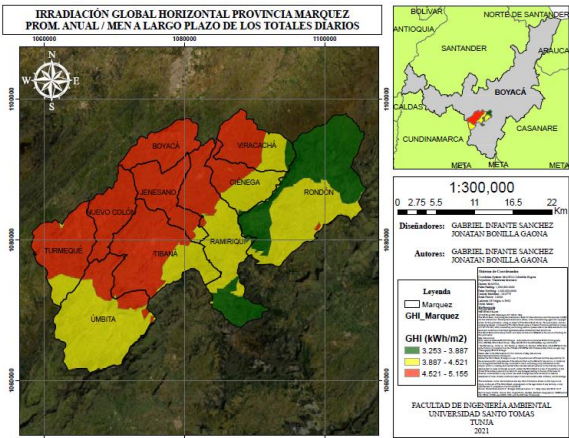


Ilustración 19. Mapa de Irradiación horizontal global - GHI de la provincia Márquez. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Potencial de Energía Fotovoltaica de la provincia (Promedio Anual / Mensual a largo plazo de los totales diarios)

Tabla 6. Potencial de Energía Fotovoltaica de Provincia Márquez.

PROVINCIA MÁRQUEZ		
PVOUT (kWh/kWp)	Área (Ha)	%
2.669 - 3.040	5175.58	5.42
3.040 - 3.410	20423.41	21.39
3.410 - 3.781	27117.11	28.40
3.781 - 4.151	42748.80	44.78
TOTAL ÁREA (Ha)	95467.00	

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 6. determina los rangos respectivos de potencial de energía fotovoltaica (PVOUT) en unidades de kWh/kWp, correspondientes a la provincia Márquez del departamento de Boyacá, la cual cuenta con un área de 95467.00 Ha, dando como resultado un máximo en la zona oeste de la provincia, con un valor entre 3.781 - 4.151 kWh/m² equivalente al 44.78 % de su área total y un valor mínimo ubicado en la zona noreste con resultados entre 2.7 – 3 kWh/m² equivalente al 5.42 %. Adicionalmente el rango más relevante corresponde a un PVOUT de 3.781 - 4.151 kWh/m², presente en el 44.78 % de su área total.

4.2.3. Pendiente de la provincia

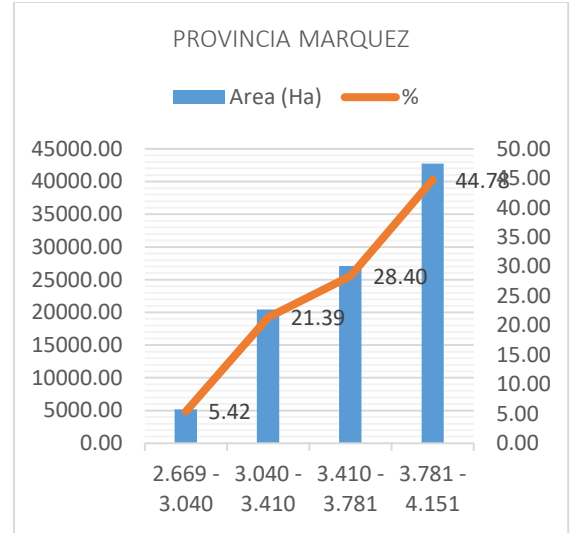


Ilustración 20. Gráfica de barras del Potencial de Energía Fotovoltaica de la Provincia Márquez. *Fuente:* Elaboración propia.

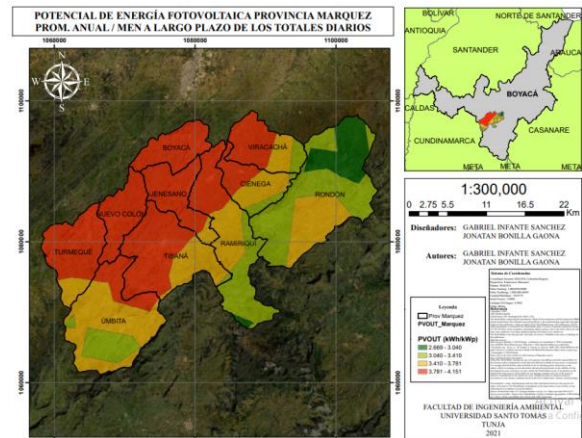


Ilustración 21. Mapa de Potencial de Energía Fotovoltaica de la Provincia Márquez. *Fuente:* Elaboración propia.

Tabla 7. Pendiente de Provincia Márquez.

PROVINCIA MÁRQUEZ		
Pendiente (%)	Área (Ha)	%
0-3	1532.08	1.60
3-6	4974.77	5.21
6-9	9374.45	9.82
9-15	33552.71	35.15
15-25	38353.22	40.17
25-50	7611.39	7.97
50-54,19	67.35	0.07
TOTAL área (Ha)	95466	

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 7. determina los rangos respectivos de las pendientes en unidades de porcentaje (%), correspondientes a la provincia Márquez del departamento de Boyacá, la cual cuenta con un área de 95466 Ha, dando como resultado un máximo en la zona noroeste de la provincia, con un valor entre 50-54,19 % equivalente al 0.07 % de su área total y un valor mínimo ubicado en la zona centro y noreste con resultados entre 0 – 3 % equivalente al 1.60 %. Adicionalmente el rango más relevante corresponde a una pendiente de 15-25 %, presente en el 40.17 % de su área total.

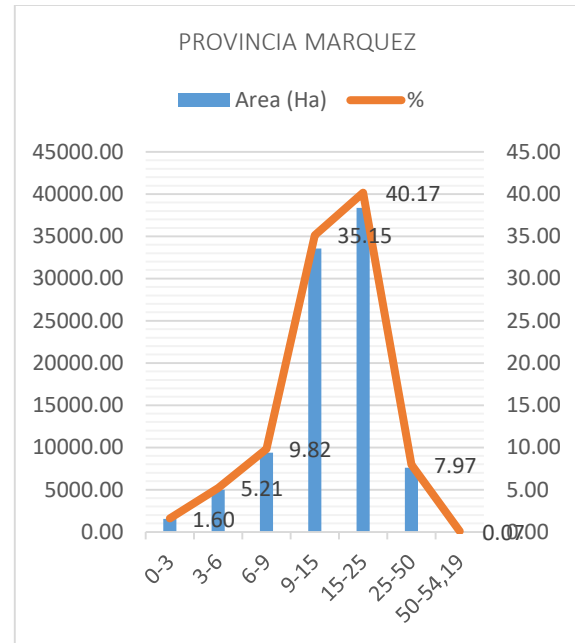


Ilustración 22. Gráfico de barras de Pendientes de la Provincia Márquez. **Fuente:** Elaboración propia.

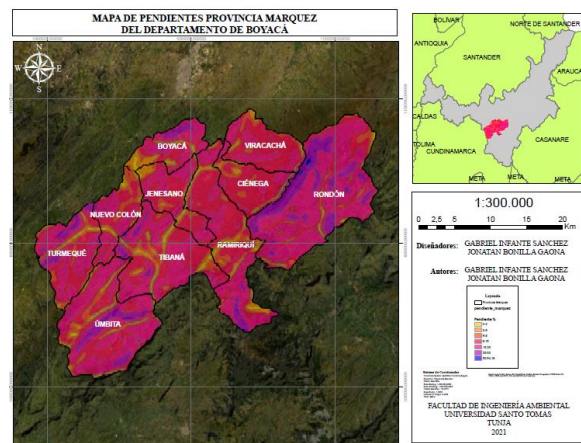


Ilustración 23. Mapa de Pendientes de la Provincia Márquez. **Fuente:** Elaboración propia.

4.3. Provincia Occidente

4.3.1. Irradiación horizontal global – GHI de la Provincia

Tabla 8. Irradiación horizontal global - GHI de Provincia Occidente.

PROVINCIA OCCIDENTE		
GHI (kWh/m ²)	Área (Ha)	%
3.887 - 4.521	2197.46	0.57
4.521 - 5.155	48329.02	12.48
5.155 - 5.789	168132.41	43.43
5.789 - 6.424	168457.04	43.52
TOTAL ÁREA (Ha)	387116	

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 8. determina los rangos respectivos de la irradiación global horizontal (GHI) en unidades de kWh/m², correspondientes a la provincia Occidente del departamento de Boyacá, la cual cuenta con un área de 387116 Ha, dando como resultado un máximo en la zona noroeste de la provincia, con un valor entre 5.789 - 6.424 kWh/m² equivalente al 43.52 % de su área total y un valor mínimo ubicado en la zona suroeste y este con resultados entre 3.887 - 4.521 kWh/m² equivalente al 0.57 %. Adicionalmente el rango más relevante corresponde a un GHI de 5.789 - 6.424 kWh/m², presente en el 43.52 %

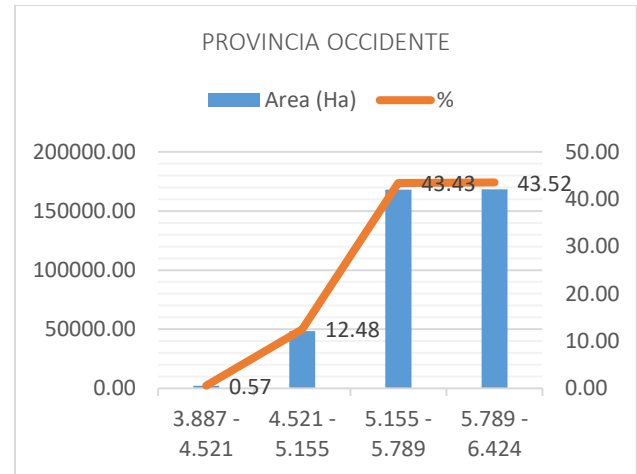


Ilustración 24. Gráfica de barras del GHI de la Provincia Occidente. *Fuente: Elaboración propia.*

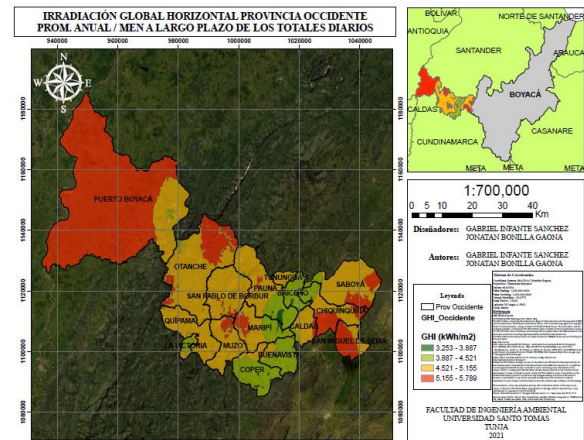


Ilustración 25. Mapa de Irradiación horizontal global - GHI de la provincia Occidente. *Fuente: Elaboración propia.*

4.3.2. Potencial de Energía Fotovoltaica de la provincia (Promedio Anual / Mensual a largo plazo de los totales diarios)

Tabla 9. Potencial de Energía Fotovoltaica de Provincia Occidente.

PROVINCIA OCCIDENTE		
PVOUT (kWh/kWp)	Área (Ha)	%
3.040 - 3.410	27059.42	6.99
3.410 - 3.781	63725.24	16.46
3.781 - 4.151	136633.42	35.30
4.151 - 4.522	159584.58	41.22
TOTAL ÁREA (Ha)	387116	

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 9. determina los rangos respectivos de potencial de energía fotovoltaica (PVOUT) en unidades de kWh/kWp, correspondientes a la provincia Occidente del departamento de Boyacá, la cual cuenta con un área de 387116 Ha, dando como resultado un máximo en la zona central de la provincia, con un valor entre 4.151 - 4.522 kWh/m² equivalente al 41.22 % de su área total y un valor mínimo ubicado en la zona noreste con resultados entre 3.040 - 3.410 kWh/m² equivalente al 6.99 %. Adicionalmente el rango más relevante corresponde a un PVOUT de 4.151 - 4.522 kWh/m², presente en el 41.22 % de su área total.

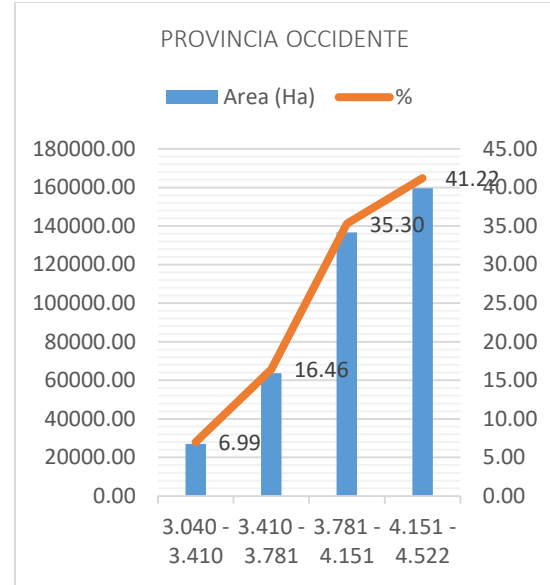


Ilustración 26. Gráfica de barras del Potencial de Energía Fotovoltaica de la Provincia Occidente. **Fuente:** Elaboración propia.

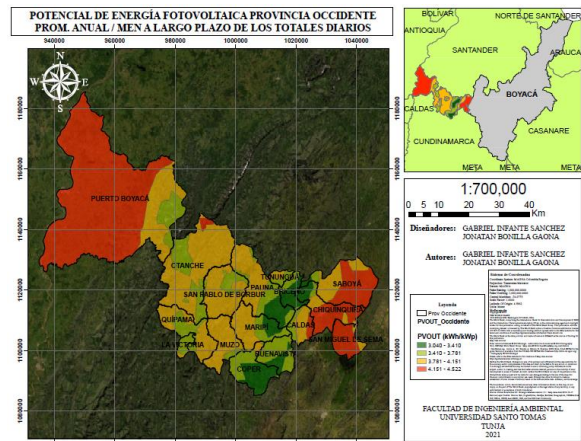


Ilustración 27. Mapa de Potencial de Energía Fotovoltaica de la Provincia Occidente. **Fuente:** Elaboración propia.

4.3.3. Pendiente de la provincia

Tabla 10. Pendiente de Provincia Occidente.

PROVINCIA OCCIDENTE		
Pendiente (%)	Área (Ha)	%
0-3	135007.44	34.88
3-6	23839.49	6.16
6-9	29535.41	7.63
9-15	72771.45	18.80
15-25	86236.96	22.28
25-50	39135.12	10.11
50-67.63	458.01	0.12
TOTAL área (Ha)	387116	

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 10. determina los rangos respectivos de las pendientes en unidades de porcentaje (%), correspondientes a la provincia Occidente del departamento de Boyacá, la cual cuenta con un área de 387116 Ha, dando como resultado un máximo en la zona sureste de la provincia, con un valor entre 50-67.63 % equivalente al 0.12 % de su área total y un valor mínimo ubicado en la zona centro y noreste con resultados entre 0 – 3 % equivalente al 34.88 %. Adicionalmente el rango más relevante corresponde a una pendiente de 0 - 3%, presente en el 34.88 % de su área total.

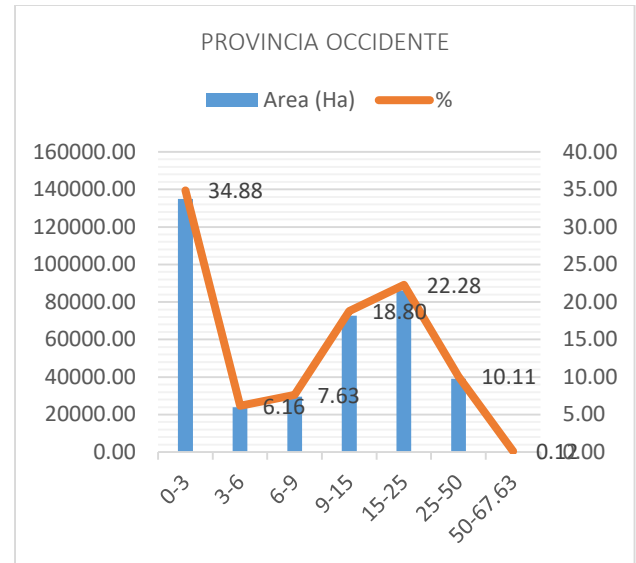


Ilustración 28. Gráfico de barras de Pendientes de la Provincia Occidente. **Fuente:** Elaboración propia.

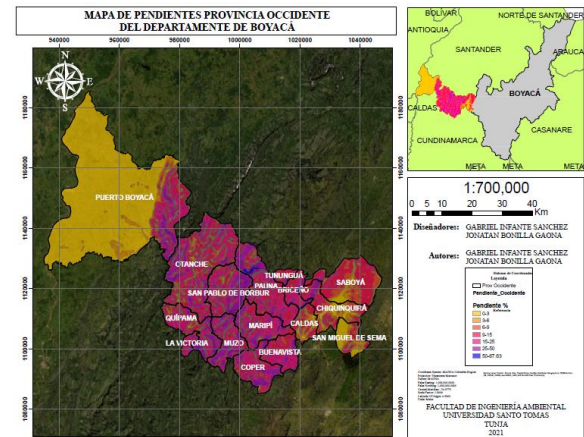


Ilustración 29. Mapa de Pendientes de la Provincia Occidente. **Fuente:** Elaboración propia.

4.4. Provincia Ricaurte

4.4.1. Irradiación horizontal global – GHI de la Provincia

Tabla 11. Irradiación horizontal global - GHI de Provincia Ricaurte.

PROVINCIA RICAURTE		
GHI (kWh/m ²)	Área (Ha)	%
3.253 - 3.887	0.28	0.0002
3.887 - 4.521	3414.06	2.25
4.521 - 5.155	50455.72	33.22
5.155 - 5.789	85965.18	56.60
5.789 - 6.424	12033.64	7.92
TOTAL ÁREA (Ha)	151869	

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 11. determina los rangos respectivos de la irradiación global horizontal (GHI) en unidades de kWh/m², correspondientes a la provincia Ricaurte del departamento de Boyacá, la cual cuenta con un área de 151869 Ha, dando como resultado un máximo en la zona noroeste de la provincia, con un valor entre 5.789 - 6.424 kWh/m² equivalente al 7.92 % de su área total y un valor mínimo ubicado en la zona este y este con resultados entre 3.253 - 3.887 kWh/m² equivalente al 0.0002 %. Adicionalmente el rango más relevante corresponde a un GHI de 5.155 - 5.789 kWh/m², presente en el 56.60 %.

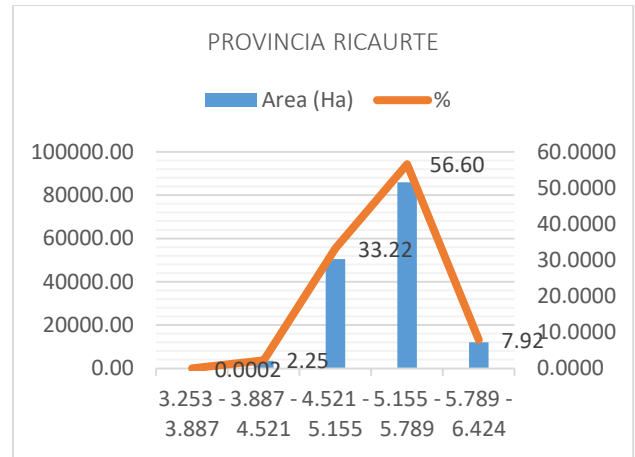


Ilustración 30. Gráfica de barras del GHI de la Provincia Ricaurte. *Fuente: Elaboración propia.*

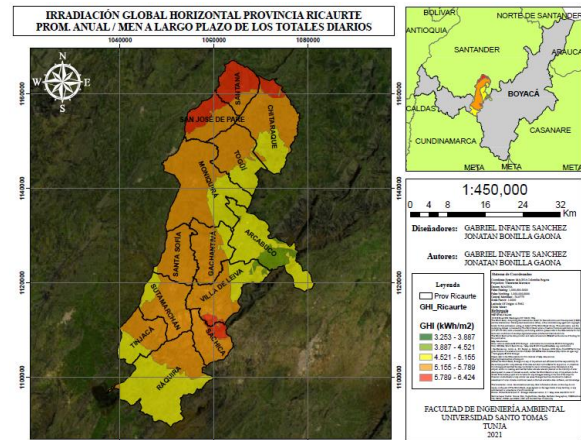


Ilustración 31. Mapa de Irradiación horizontal global - GHI de la provincia Ricaurte. *Fuente: Elaboración propia.*

4.4.2. Potencial de Energía Fotovoltaica de la provincia (Promedio Anual / Mensual a largo plazo de los totales diarios)

Tabla 12. *Potencial de Energía Fotovoltaica de Provincia Ricaurte.*

PROVINCIA RICAURTE		
PVOUT (kWh/kWp)	Área (Ha)	%
3.410 - 3.781	4122.84	2.71
3.781 - 4.151	41736.19	27.48
4.151 - 4.522	73637.75	48.49
4.522 - 4.892	32340.73	21.30
TOTAL ÁREA (Ha)	151869	

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 12. determina los rangos respectivos de potencial de energía fotovoltaica (PVOUT) en unidades de kWh/kWp, correspondientes a la provincia Ricaurte del departamento de Boyacá, la cual cuenta con un área de 151869 Ha, dando como resultado un máximo en la zona central de la provincia, con un valor entre 4.522 - 4.892 kWh/m² equivalente al 21.30 % de su área total y un valor mínimo ubicado en la zona suroeste con resultados entre 3.410 - 3.781 kWh/m² equivalente al 2.71 %. Adicionalmente el rango más relevante corresponde a un

PVOUT de 4.151 - 4.522 kWh/m², presente en el 48.49 % de su área total.

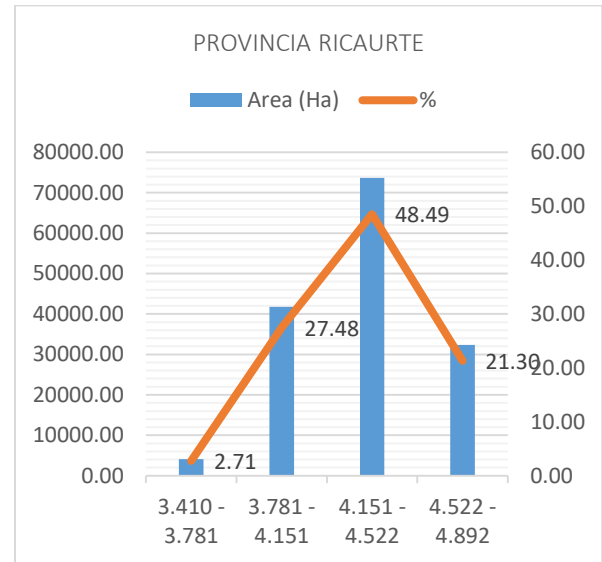


Ilustración 32. Gráfica de barras del Potencial de Energía Fotovoltaica de la Provincia Ricaurte. **Fuente:** Elaboración propia.

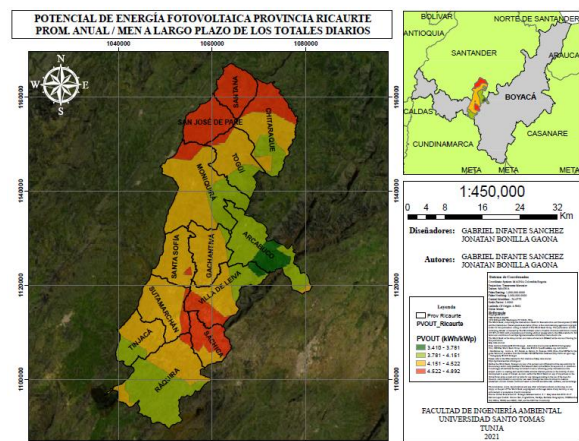


Ilustración 33. Mapa de Potencial de Energía Fotovoltaica de la Provincia Ricaurte. **Fuente:** Elaboración propia.

4.10.3. Pendiente de la provincia

Tabla 13. Pendiente de Provincia Ricaurte.

PROVINCIA RICAURTE		
Pendiente (%)	Área (Ha)	%
0-3	8491.02	5.5910
3-6	19556.66	12.8773
6-9	26996.22	17.7760
9-15	61061.20	40.2065
15-25	28885.58	19.0201
25-46.36	6837.76	4.5024
TOTAL área (Ha)	151869	

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 13. determina los rangos respectivos de las pendientes en unidades de porcentaje (%), correspondientes a la provincia Ricaurte del departamento de Boyacá, la cual cuenta con un área de 151869 Ha, dando como resultado un máximo en la zona norte de la provincia, con un valor entre 25-46.36 % equivalente al 4.5024 % de su área total y un valor mínimo ubicado en la zona centro y noreste con resultados entre 0 – 3 % equivalente al 5.5910 %. Adicionalmente el rango más relevante corresponde a una

pendiente de 9-15 %, presente en el 40.2065 % de su área total.

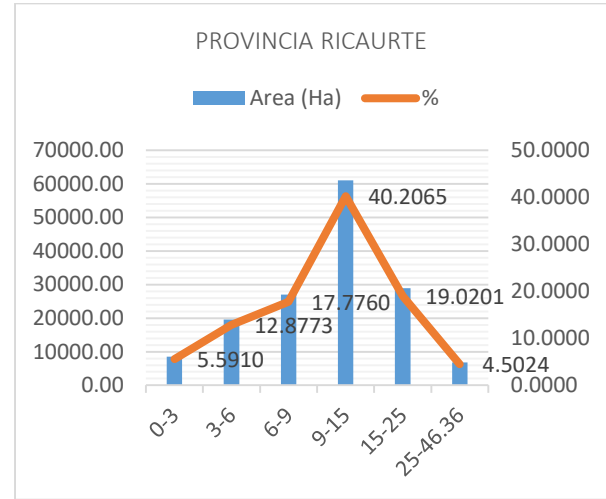


Ilustración 34. Gráfico de barras de Pendientes de la Provincia Ricaurte. **Fuente:** Elaboración propia.

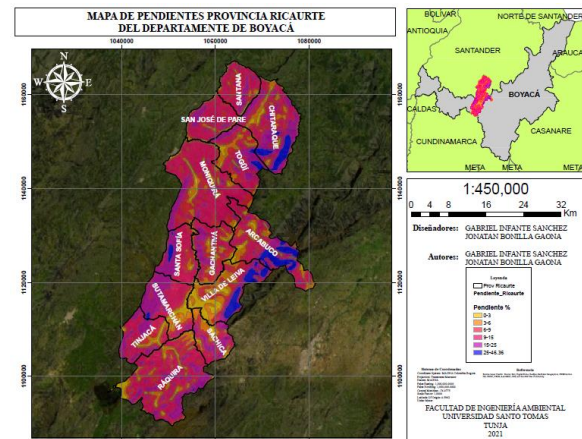


Ilustración 35. Mapa de Pendientes de la Provincia Ricaurte. **Fuente:** Elaboración propia.

Tabla 14. Irradiación horizontal global promedio anual / mensual a largo plazo de los totales diarios

	PROVINCIA CENTRO			PROVINCIA GUTIERREZ			PROVINCIA LENGUPA		
RANGO	GHI (kWh/m2)	Área (Ha)	%	GHI (kWh/m2)	Área (Ha)	%	GHI (kWh/m2)	Área (Ha)	%
Mínimo	3.253-3.887	2628.88	1.49	1.985-2.619	120.72	0.04	2.619-3.253	91.136	0.069
Máximo	5.789-6.424	359.68	0.20	5.789-6.424	319.46	0.10	4.521-5.155	33057.315	10.351

	PROVINCIA LIBERTAD			PROVINCIA MARQUEZ			PROVINCIA NEIRA		
RANGO	GHI (kWh/m2)	Área (Ha)	%	GHI (kWh/m2)	Área (Ha)	%	GHI (kWh/m2)	Área (Ha)	%
Mínimo	2.619-3.253	1051.46	0.58	3.253-3.887	14784.93	15.49	3.253-3.887	2774.58	2.02
Máximo	5.155-5.789	3289.42	1.82	4.521-5.155	44862.60	46.99	5.155-5.789	100.96	0.07

	PROVINCIA NORTE			PROVINCIA OCCIDENTE			PROVINCIA ORIENTE		
RANGO	GHI (kWh/m2)	Área (Ha)	%	GHI (kWh/m2)	Área (Ha)	%	GHI (kWh/m2)	Área (Ha)	%
Mínimo	3.887-4.521	130.47	0.12	3.887-4.521	2197.46	0.57	3.253-3.887	1474.78	2.92
Máximo	5.789-6.424	34646.10	30.74	5.789-6.424	168457.04	43.52	5.155-5.789	45.57	0.09

	PROVINCIA RICAURTE			PROVINCIA SUGAMUXI			PROVINCIA TUNDAMA		
RANGO	GHI (kWh/m2)	Área (Ha)	%	GHI (kWh/m2)	Área (Ha)	%	GHI (kWh/m2)	Área (Ha)	%
Mínimo	3.253-3.887	0.28	0.0002	2.619-3.253	170.92	0.07	3.887-4.521	1142.64	0.97
Máximo	5.789-6.424	12033.64	7.92	5.155-5.789	51101.90	20.17	5.155-5.789	48794.82	41.39

	PROVINCIA VALDERRAMA		
RANGO	GHI (kWh/m2)	Área (Ha)	%
Mínimo	3.253-3.887	30988.21	15.52
Máximo	5.789-6.424	2265.42	1.13

Tabla 15. Potencial de energía fotovoltaica (PVOUT) promedio anual / mensual a largo plazo de los totales diarios

RANGO	PROVINCIA CENTRO			PROVINCIA GUTIERREZ			PROVINCIA LENGUPA		
	PVOUT (kWh/kWp)	Área (Ha)	%	PVOUT (kWh/kWp)	Área (Ha)	%	PVOUT (kWh/kWp)	Área (Ha)	%
Mínimo	2.669 - 3.040	546.22	0.31	2.299 - 2.669	17512.16	5.48	2.669 - 3.040	2889.67	2.20
Máximo	4.522 - 4.892	5873.25	3.33	4.522 - 4.892	10089.77	3.16	3.781 - 4.151	11417.56	8.68

RANGO	PROVINCIA LIBERTAD			PROVINCIA MARQUEZ			PROVINCIA NEIRA		
	PVOUT (kWh/kWp)	Área (Ha)	%	PVOUT (kWh/kWp)	Área (Ha)	%	PVOUT (kWh/kWp)	Área (Ha)	%
Mínimo	2.299 - 2.669	490.43	0.27	2.669 - 3.040	5175.58	5.42	2.669 - 3.040	204.22	0.15
Máximo	4.151 - 4.522	4084.94	2.26	3.781 - 4.151	42748.80	44.78	4.151 - 4.522	1781.59	1.29

RANGO	PROVINCIA NORTE			PROVINCIA OCCIDENTE			PROVINCIA ORIENTE		
	PVOUT (kWh/kWp)	Área (Ha)	%	PVOUT (kWh/kWp)	Área (Ha)	%	PVOUT (kWh/kWp)	Área (Ha)	%
Mínimo	3.781 - 4.151	10474.80	9.29	3.040 - 3.410	27059.42	6.99	3.040 - 3.410	6440.88	12.75
Máximo	4.892 - 5.263	2225.27	1.97	4.151 - 4.522	159584.58	41.22	4.151 - 4.522	5084.65	10.07

RANGO	PROVINCIA RICAURTE			PROVINCIA SUGAMUXI			PROVINCIA TUNDAMA		
	PVOUT (kWh/kWp)	Área (Ha)	%	PVOUT (kWh/kWp)	Área (Ha)	%	PVOUT (kWh/kWp)	Área (Ha)	%
Mínimo	3.410 - 3.781	4122.84	2.71	2.669 - 3.040	8915.85	3.52	3.410 - 3.781	1035.18	0.88
Máximo	4.522 - 4.892	32340.73	21.30	4.522 - 4.892	125.96	0.05	4.522 - 4.892	1072.95	0.91

RANGO	PROVINCIA VALDERRAMA		
	PVOUT (kWh/kWp)	Área (Ha)	%
Mínimo	2.669 - 3.040	76.95	0.04
Máximo	4.892 - 5.263	1233.89	0.62

Tabla 16. Pendiente provincias de Boyacá

RANGO	PROVINCIA CENTRO			PROVINCIA GUTIERREZ			PROVINCIA LENGUPA		
	Pendiente (%)	Área (Ha)	%	Pendiente (%)	Área (Ha)	%	Pendiente (%)	Área (Ha)	%
Mínimo	0-3	21683.52	12.30	0-3	11537.49	3.68	0-3	1169.77894	0.89
Máximo	50-55.12	70.59	0.04	50-69.44	10185.18	3.25	50-62,28	174.21907	0.13

RANGO	PROVINCIA LIBERTAD			PROVINCIA MARQUEZ			PROVINCIA NEIRA		
	Pendiente (%)	Área (Ha)	%	Pendiente (%)	Área (Ha)	%	Pendiente (%)	Área (Ha)	%
Mínimo	0-3	439.00	0.24	0-3	1532.08	1.60	0-3	12318.92	8.95
Máximo	50-68.62	557.29	0.31	50-54,19	67.35	0.07	25-50,95	1677.54	1.22

RANGO	PROVINCIA NORTE			PROVINCIA OCCIDENTE			PROVINCIA ORIENTE		
	Pendiente (%)	Área (Ha)	%	Pendiente (%)	Área (Ha)	%	Pendiente (%)	Área (Ha)	%
Mínimo	0-3	1320.17	1.17	0-3	135007.44	34.88	0-3	425.22	0.84
Máximo	50-58,78	353.49	0.31	50-67.63	458.01	0.12	50-63,17	366.52	0.73

RANGO	PROVINCIA RICAURTE			PROVINCIA SUGAMUXI			PROVINCIA TUNDAMA		
	Pendiente (%)	Área (Ha)	%	Pendiente (%)	Área (Ha)	%	Pendiente (%)	Área (Ha)	%
Mínimo	0-3	8491.02	5.5910	0-3	16768.21	6.62	0-3	7769.74	6.59
Máximo	25-46.36	6837.76	4.5024	50-57.67	203.99	0.08	50-55.26	74.06	0.06

RANGO	PROVINCIA VALDERRAMA		
	Pendiente (%)	Área (Ha)	%
Mínimo	0-3	2898.02	1.45
Máximo	50-60.68	55.72	0.03

4. Discusión de resultados

Generalmente en la región andina se evidencia un comportamiento de carácter bimodal, esto significa que, en el transcurso del año, hay dos períodos tanto de alta como de baja radiación global, en donde los dos periodos de valores significativos o altos para la región ocurren entre enero y febrero, y el de baja radiación global se ve reflejado en julio y agosto (puede incluir septiembre en algunas temporadas). Los meses con los niveles de irradiancia más bajos toman lugar en abril, mayo, octubre y noviembre. Generando un comportamiento unimodal en algunas zonas de Boyacá, con los valores más altos a principios y finales de año, y los más bajos entre julio y septiembre. Evidentemente, el conocimiento de la distribución espacial y temporal del potencial de la energía solar es trascendental para la caracterización del territorio estratégico, y el propósito es explorar y utilizar la energía solar a través de la energía fotovoltaica en los lugares más adecuados dando solución a necesidades energéticas a nivel económico, social ambiental y sus diversas aplicaciones.

Dentro de las características del departamento de Boyacá se tiene un complejo de condiciones topográficas con grandes montañas, valles estrechos y amplias llanuras, esta geomorfología determina una diversidad de climas que lo hacen catalogar como un archipiélago climático. La particularidad inicialmente inscrita genera en los diversos fenómenos de la climatología del territorio como aspectos de la precipitación, sequía, frío y vientos; imposibilita establecer un modelo generalizado para las condiciones de radiación solar, dado que aporta un alto porcentaje de nubosidad en diferentes provincias. Se establece también como una región de microclimas, “Por lo general se encuentran dos lugares adyacentes, obviamente de la misma zona geográfica, los factores naturales los convierten en dos lugares con características climáticas completamente diferentes.” (Acevedo Latorre, 1952). Con respecto a la situación geográfica, Boyacá al igual que el territorio colombiano, no tiene un ciclo estacional de temperatura constante, esto se evidencia en los diferentes mapas asociados a las trece (13) provincias realizados para este trabajo. Este está marcado por el nivel de altura y se caracteriza por la uniformidad de los meses del año, con solo pequeñas fluctuaciones observadas (que se pueden ver en los mapas de pendientes de las provincias). Si se tiene en cuenta el registro diario, la oscilación es más evidente, en la que se puede analizar la amplitud de los cambios diurnos y nocturnos. Las fluctuaciones de temperatura

en áreas de gran altitud también son grandes, con heladas (temperatura bajo cero) y rocío congelado comúnmente denominado “escarcha” fenómenos que ocurren con bastante frecuencia dando afectación a los cultivos de la región

Para generar el análisis de los mapas de irradiación global horizontal media en las trece provincias (13) del departamento de Boyacá, esto producto de la resultante de observaciones en superficie y de los resultados de la modelación de la radiación global se debe tener en cuenta unos criterios geográficos, climáticos y meteorológicos de la zona de estudio. Los mapas se realizaron con base en los promedios anuales/mensuales a largo plazo de los totales diarios de la irradiación global horizontal determinada a través de imágenes raster provenientes del ATLAS GLOBAL SOLAR de SOLARGIS en conjunto con el Grupo del Banco Mundial y complementadas con información del IDEAM. Entre los lineamientos establecidos se debe tener en cuenta a partir de un modelo que usa como entrada, datos derivados de datos satelitales y de superficie relacionadas con cubrimiento de nubes, profundidad óptica de aerosoles, vapor de agua precipitable, albedo, presión atmosférica y la columna de ozono.

Durante el desarrollo del proyecto de investigación se pudo corroborar que en el departamento de Boyacá se presentan unos valores de irradiación global horizontal (GHI) comprendidos en un rango de siete (7) valores que van desde 1.98 kWh/m² hasta 6.42 kWh/m² dentro de un espacio geográfico de 2'313.754 hectáreas (Ha) resultantes de la suma de las trece (13) provincias que contempla la globalidad del departamento; para de esta forma obtener un resultado escalonado de menor a mayor influencia que comienza con el primer valor y rango más bajo de GHI, obteniendo un resultado de 1.985 a 2.619 kWh/m² con la suma de 120 hectáreas correspondientes al 0.01% del área total del departamento lo que indica ser el rango con menor presencia en todo el área de estudio, el segundo valor y rango obtenido inicia en 2.619 a 3.253 kWh/m² con un área total de 25804Ha equivalentes al 1.12% del área total, el tercer valor y rango resultante parte desde 3.253 hasta 3.887 kWh/m² con un área 245282Ha semejantes al 10.6% del área total, el cuarto valor y rango obtenido inicia desde 3.887 a 4.521 kWh/m² con un área contemplada de 552288Ha las cuales indican un 23.87% del área total, el quinto valor y rango resultante comienza desde 4.521 y finaliza en 5.155 kWh/m² estando presente en 743202Ha, indicando ser el rango con mayor presencia sobre todo el departamento con un 32.12% del área total, el sexto valor y rango inicia

desde 5.155 a 5.789 kWh/m² y posee 528976 Ha a lo largo del departamento con una cobertura del 22.86% del área total, por último el séptimo valor y rango continua desde 5.789 y finaliza en 6.424 kWh/m² con un área equivalente a 218081Ha que simbolizan un 9.43% del área total del departamento. Evidentemente, no todos los puntos de la superficie terrestre reciben la misma cantidad de radiación solar. La posición relativa de la tierra con respecto al sol y su movimiento alrededor de la estrella, por ejemplo, el ecuador recibe más energía que los polos, y la energía alcanza a ser más alta en temporadas de sol que en invierno. (IDEAM, 2010).

Teniendo en cuenta la relación de energía recibida y el área de influencia de cada rango se validó que el potencial de energía fotovoltaica (PVOUT) del departamento contempla sus resultados en un rango de ocho (8) valores que inician desde 2.299 kWh/kWp hasta 5.263 kWh/kWp dentro de dicho espacio geográfico, para así nuevamente obtener un resultado escalonado de menor a mayor relación de energía recibida y área influencia, comenzando con el primer valor y rango más bajo de PVOUT, obteniendo un resultado de 2.299 a 2.669 kWh/kWp con la suma de 18003 hectáreas correspondientes al 1% del área total del departamento lo que indica ser el rango con menor presencia a lo largo de toda área de estudio, el segundo valor y rango obtenido inicia en 2.669 a 3.040 kWh/kWp con un área total de 89940Ha equivalentes al 4% del área total, el tercer valor y rango resultante parte desde 3.040 hasta 3.410 kWh/kWp con un área 330547Ha semejantes al 14% del área total, el cuarto valor y rango obtenido inicia desde 3.410 a 3.781 kWh/kWp con un área contemplada de 497960Ha las cuales indican un 22% del área total, el quinto valor y rango resultante comienza desde 3.781 y finaliza en 4.151 kWh/kWp estando presente en 634844Ha, indicando ser el rango con mayor presencia de Boyacá en términos de PVOUT con un 28% del área total, áreas que corresponden a las provincias de Centro, Gutiérrez, Libertad, Neira, Norte, Occidente, Oriente, Ricaurte, Sugamuxi, Tundama y Valderrama (11 de las 13 provincias), el sexto valor y rango inicia desde 4.151 a 4.522 kWh/kWp y posee 613798Ha a lo largo del departamento con una cobertura del 27% del área total siendo este rango el segundo con mayor presencia en todo el departamento, el séptimo valor y rango continua desde 4.522 y finaliza en 4.892 kWh/kWp con un área equivalente a 63971Ha que simbolizan un 3% del área total del departamento, por último el octavo valor y rango persiste desde 4.892 hasta 5.263 kWh/kWp finaliza con un área correspondiente a 35800 Ha equivalentes al 2% del área total del departamento.

Adicionalmente el departamento en general cuenta con una clasificación de pendientes que va desde 0% hasta más de 60% de su área total ya anteriormente mencionada, Se tiene en cuenta que el rango de pendiente bajo oscila entre el 0% y el 9% correspondiente al 27.3% del área total (630340Ha), por consiguiente el rango de pendiente moderado equivalente al rango entre 9% y 25% teniendo en sus valores la mayor área de la misma con 1'265.830Ha equivalentes al 54.9% del área total del departamento y por último se cuenta con el rango de pendiente alto donde sus valores inician desde 25% hasta >60% dando como resultado la menor ocupación respecto al área del departamento con 410495Ha correspondientes al 17.8% del área total. Por lo tanto, es importante tener en cuenta, el porcentaje de inclinación del terreno a la hora de implementar un proyecto de energía solar fotovoltaica, ya que, a mayor grado de inclinación, mayor serán los costos de instalación, funcionamiento y distribución.

Las variables climatológicas son importantes al momento de analizar la radiación solar, ya que pueden cambiar significativamente la cantidad de radiación solar entrante a la superficie terrestre, por lo tanto para esta investigación se toman en cuenta el número días de lluvia anuales por cada provincia (ilustración 14) y la clasificación climática del departamento de Boyacá (ilustración 17), relacionando los números de días de lluvia con la nubosidad presente y la clasificación climática con la altura sobre el nivel del mar (m.s.n.m), evidenciando que las provincias de Centro, Norte, Sugamuxi, Tundama, Ricaurte, Occidente y Valderrama, tienen un rango aproximado de 100 a 200 días de lluvia, presentando mayor incidencia solar, tanto de irradiación global horizontal (GHI), como de potencial de energía fotovoltaica (PVOOUT), con rangos de 5.789 - 6.424 GHI (kWh/m²) y 4.522 - 4.892 PVOOUT (kWh/kWp), adicionalmente la altura sobre el nivel del mar es un factor importante, ya que las provincias que están ubicadas a una mayor altura, reciben altos niveles de radiación, como es el caso de la provincia Gutiérrez, que maneja un valor máximo de radiación de 5.789 - 6.424 GHI (kWh/m²) y 4.522 - 4.892 PVOOUT (kWh/kWp), cabe recalcar que el área de incidencia de radiación solar en dicha provincia es baja, ya que el número de días de lluvia varía entre los 200 a los 250 días por año aproximadamente, lo que genera un porcentaje de nubosidad alto a lo largo de la provincia.

5. Capítulo V - Viabilidad del aprovechamiento del potencial de energía solar fotovoltaica en Boyacá

6.1. Viabilidad Técnica

En el marco de la sostenibilidad energética mundial se juega un papel importante el uso eficiente de la energía que para ello se tiene en cuenta las tres (3) provincias con mayor potencial energético. Se presentan las siguientes provincias con los respectivos municipios asociados:

Tabla 26. Cuadro comparativo de las provincias con mayor potencial energético.

Provincia Márquez	Provincia Occidente	Provincia Ricaurte
Municipios: Turmequé, Nuevo Colón, Boyacá, Viracachá, Jenesano, Tibaná, Ciénaga.	Puerto Boyacá, Saboyá, Chiquinquirá, San Miguel de Sema.	San José de Pare, Santana, Sáchica, Satumarchán, Villa de Leyva.
Área de 95467.00 Ha	Área de 387116 Ha	Área de 151869 Ha
Resultado un máximo en la zona oeste de la provincia, con un valor entre 3.781 - 4.151 kWh/m2 equivalente al 44.78 % de su área total	Resultado un máximo en la zona central de la provincia, con un valor entre 4.151 - 4.522 kWh/m2 equivalente al 41.22 % de su área total	Resultado un máximo en la zona central de la provincia, con un valor entre 4.522 - 4.892 kWh/m2 equivalente al 21.30 % de su área total
Valor mínimo ubicado en la zona noreste con resultados entre 2.7 – 3 kWh/m2 equivalente al 5.42 %.	Valor mínimo ubicado en la zona noreste con resultados entre 3.040 - 3.410 kWh/m2 equivalente al 6.99 %.	Valor mínimo ubicado en la zona suroeste con resultados entre 3.410 - 3.781 kWh/m2 equivalente al 2.71 %.
Rango más relevante corresponde a un PVOUT de 3.781 - 4.151 kWh/m2, presente en el 44.78 % de su área total.	Rango más relevante corresponde a un PVOUT de 4.151 - 4.522 kWh/m2, presente en el 41.22 % de su área total.	Rango más relevante corresponde a un PVOUT de 4.151 - 4.522 kWh/m2, presente en el 48.49 % de su área total.

Fuente: Elaboración propia.

Para generar un análisis de la viabilidad técnica de proyectos que estarán encaminados en la formulación y evaluación de sistemas fotovoltaicos solares para suplir de energía eléctrica la región se plantea que es posibles proyectos pilotos en la provincia Márquez, provincia Ricaurte y provincia Occidente. Dentro de las provincias se establece un mayor auge e impacto por el potencial de energía fotovoltaica en los municipios de Puerto Boyacá de la provincia Occidente resultado máximo de potencia de energía fotovoltaica en la zona central de la provincia, hacia el río Magdalena, con un valor entre 4.151 - 4.522 kWh/m² equivalente al 41.22 % de su área total y en los municipios de Sáchica y Villa de Leyva de la provincia Ricaurte resultado en un máximo en la zona central de la provincia, con un valor entre 4.522 - 4.892 kWh/m² equivalente al 21.30 % de su área total.

Por ende, se podría comenzar por la etapa de diseño en la cual el área de ingeniería establecerá planos detallados y con la especificación adecuada de cada componente necesario para los diferentes sistemas fotovoltaicos; posterior a esto se propone comprender la sinergia de los componentes técnicos fotovoltaicos solar como módulos solares, equipos electrónicos y demás materiales; también es necesario establecer los criterios logísticos de suministro para el abastecimiento oportuno de los sistemas en todo el territorio; finalmente exponer de una forma estructurada la implementación de los sistemas fotovoltaicos junto a la sustitución tecnológica de iluminación y la instalación del sistema regulado complementario al proyecto.

La gran mayoría de proveedores en todo el país proporcionan estos sistemas solares fotovoltaicos, pero no brindan servicios técnicos a los clientes durante la instalación. Por las razones anteriores, han surgido las siguientes preguntas: ¿Existe algún tipo de guías o manuales de instalación que puedan implementar la implementación de sistemas solares fotovoltaicos antes mencionada en base a normas técnicas aplicables a condiciones específicas del campo colombiano? En la actualidad, tanto a nivel nacional como internacional cuentan con manuales de sistemas solares fotovoltaicos, pero se puede decir que algunos de ellos se basan en la experiencia, ya que no hacen referencia a especificaciones técnicas para su desarrollo, mientras que otros reflejan especificaciones aplicables. El sitio de implementación del proyecto es generalmente un

área rural. Por tanto, este proyecto de exploración se enfoca en poder solucionar estos problemas, pues actualmente no hay conocimiento de un manual práctico de los sistemas solares fotovoltaicos que brinde a los usuarios una visión económica del retorno de la inversión de acuerdo con el país. Y las normas técnicas internacionales aplicables a las condiciones especiales en las zonas rurales. Es importante tener en cuenta todos los elementos técnicos para la viabilidad del proyecto:

- Paneles fotovoltaicos.
- Controlador.
- Inversor.
- Baterías.
- Transferencia eléctrica.

Teniendo en cuenta las condiciones específicas del Magdalena medio en el espacio geográfico de Puerto Boyacá y también el espacio geográfico de Villa de Leyva se puede establecer según la eficiencia energética de las provincias, la provincia Occidente es la provincia más apta para generar una campaña de exploración y empezar a establecer una comisión técnica para un proyecto de energía solar fotovoltaica. Se deben tener criterios geomorfológicos, climáticos, hidrológicos, de condiciones topografías y de precipitaciones.

Las condiciones geomorfológicas del Valle medio del Magdalena favorecen de una forma significativa esta clase de proyectos, dado que El Valle Medio del Magdalena es una semifosa, Las estructuras internas de este bloque son en general suaves, su característica principal es la asociación de un anticlinal, una falla inversa, paralela al mismo y próxima a la cresta y una red de fallas directas en la cresta anticlinal (Julivert, 1961). También las condiciones de precipitaciones, de temperatura y de nubosidad favorecen la incidencia directa de la radiación solar, por ende, satisface exitosamente las necesidades mínimas económicas de un proyecto de carácter productivo de exploración y de explotación de energía solar fotovoltaica.

6.2. Viabilidad Social

Desde el componente de investigación, además de realizar una adecuada implementación, se pretende realizar un seguimiento especial de la operación a cada proceso con el fin de brindar al encargado de los proyectos futuros de energía solar fotovoltaica, la capacitación necesaria para el manejo correcto del sistema fotovoltaico solar. Dentro del componente del proyecto se debería

realizar cartillas de socialización para las personas que están en el territorio y así generar un buen trabajo con la comunidad para buscar la validación de la población y las bondades del proyecto. Es importante entablar dialogo con los futuros beneficiados en las cuales se explica qué es un sistema solar fotovoltaico, de que está compuesto, las buenas prácticas de su uso y las restricciones de su funcionamiento. De esta forma se logra que cada persona se apropie del conocimiento sobre el sistema fotovoltaico del territorio.

6.3. Viabilidad Ambiental

En vista del entusiasmo actual por el uso de fuentes de energía alternativas como los sistemas fotovoltaicos, es necesario profundizar en este campo en Colombia, y es necesario determinar que dichos proyectos deben estar bien respaldados por requisitos técnicos nacionales y estándares internacionales. Equipado con sistemas de batería, controladores e inversor. En la actualidad, la sociedad ve la implementación de sistemas fotovoltaicos, determinando la posibilidad de implementar estos sistemas en áreas con las mejores condiciones para la radiación solar, y siempre busca comprender estos nuevos paradigmas para promover la implementación de las energías renovables. El sector, la energía y la gente de la región.

Dependiendo de su ubicación, las plantas de energía solar más grandes del mundo pueden causar degradación del suelo y pérdida de hábitat; pero en las condiciones específicas de Puerto Boyacá y Villa de Leyva se puede establecer una sinergia exitosa entre los sistemas de energía fotovoltaica con las practicas agroindustriales de la zona, así se puede proteger la economía dependiente del sector agrícola y establecer criterios rigurosos de cumplimiento ambiental. Es por eso, que el factor de demanda total del suelo depende de las variables climatológicas y geográficas presentes en la zona, además de la tecnología usada para producir energía.

Los sistemas solares de energía fotovoltaica, son de gran ayuda para la producción de energía limpia, disminuyendo en gran medida la explotación de combustibles fósiles, evitando la producción de gases contaminantes a la atmósfera.

Por lo anterior se resumen algunos beneficios de la implementación de dichos sistemas:

- Desarrollo económico sostenible.
- Atención a la demanda energética de los diversos sectores económicos de la región.
- Impacto social.

- Preservación ambiental.
- Reducción de gases contaminantes a la atmósfera.

6.4. Viabilidad Económica

Al igual que con la energía eólica, hay varias razones para considerar que, en el campo de la energía solar fotovoltaica, el nicho de mercado puede brindar oportunidades con potencial para aportar importantes beneficios al sector energético nacional. El primero es el costo tecnológico de costo mínimo, especialmente los módulos o baterías solares fotovoltaicos. Todos los procesos se basan en la búsqueda de eficiencias en la cadena de suministro, la mejora para la competitividad de los servicios a través de la diferenciación y la reducción en los costos por optimización pueden establecerse como criterios básicos en los futuros proyectos de energía solar fotovoltaica, tanto en Puerto Boyacá por todo el Magdalena medio y también en Villa de Leyva. Por lo anterior se establece metodologías para la implementación de sistemas de energía solar fotovoltaica, las cuales deben incluir estudios de mercado, que analicen detalladamente la demanda energética de la población, para poder determinar los costos técnicos de implementación de dichos sistemas. Cabe recalcar que Colombia está cada vez más cerca de poder prestar servicios de calidad, para evitar cualquier tipo de percance técnico.

6. Conclusiones

- Las provincias geográficas de Boyacá como lo son la Provincia de Márquez, Norte, Occidente, Ricaurte y Sugamuxi determinan los mayores rangos respectivos de la irradiación global horizontal (GHI) en unidades de kWh/m², evidenciando la gran capacidad de exploración de acuerdo a la radiación solar incidente en las provincias y posterior explotación de energía fotovoltaica con unos valores entre 5.789 - 6.424 kWh/m². Se calculó el potencial de radiación solar de las trece (13) provincias del departamento de Boyacá, mediante los sistemas de información geográfico (SIG) mediante los datos suministrados por el ATLAS GLOBAL SOLAR de SOLARGIS y el grupo del banco mundial.

- Generar estudios para incentivar positivamente la generación de investigaciones que relacionen el potencial de radiación solar y las áreas de incidencia con el fin de dar a conocer las áreas con mayor viabilidad, desplegando campos de exploración para futuros proyectos de energía solar fotovoltaica. Teniendo en cuenta la relación de energía recibida y el área de influencia de cada rango se validó que el potencial de energía fotovoltaica (PVOUT) del departamento contempla sus resultados en un rango de ocho (8) valores que inician desde 2.299 kWh/kWp hasta 5.263 kWh/kWp dentro de un mismo espacio geográfico de 2'313.754 hectáreas (Ha), Las provincias geográficas de Boyacá que determinan mayor rango respectivo de potencial de energía fotovoltaica (PVOUT) en unidades de kWh/kWp es la provincia de Márquez y de Occidente. La importancia de este último radica en que los municipios de Puerto Boyacá, Saboya y Chiquinquirá, los cuales representan mayor auge para futuros proyectos energéticos en el territorio, dado que la cual cuenta con un área de 387116 Ha, dando como resultado un máximo en la zona central de la provincia, con un valor entre 4.151 - 4.522 kWh/m² equivalente al 41.22 % de su área total. El quinto valor y rango resultante comienza desde 3.781 y finaliza en 4.151 kWh/kWp estando presente en 634844 Ha, indicando ser el rango con mayor presencia de Boyacá en términos de PVOUT con un 28% del área total, áreas que corresponden a las provincias de Centro, Gutiérrez, Libertad, Neira, Norte, Occidente, Oriente, Ricaurte, Sugamuxi, Tundama y Valderrama.
- Los proyectos exploratorios de energía fotovoltaica deben estar de la mano de un enfoque de planificación como dimensión de la gestión productiva de la región, que conlleve a mejorar al máximo la calidad de vida de la población, partiendo del uso de lineamientos que busquen el desarrollo integrado de los territorios, promoviendo potencializar a los agentes locales - municipales como punto de partida del ordenamiento de procesos, con planificación de mayor escala, a través de figuras asociativas que faciliten articulación del territorio y mejoren las condiciones productivas de proyectos energéticos solucionando la seguridad energética del país y de la región, por medio de la potenciación de las capacidades locales teniendo como sujeto de desarrollo a la sociedad boyacense.

- Al generar un estudio riguroso de los diferentes escenarios de Irradiación horizontal global – GHI, Potencial de Energía Fotovoltaica de la provincia (Promedio Anual / Mensual a largo plazo de los totales diarios y de la Pendiente en función netamente de las provincias geográficas de Boyacá, se tuvo en cuenta diferentes criterios de análisis para abarcar un mayor compendio de calidades académicas. Fue importante el factor de la distribución de la precipitación en este sector, ya que tiene una gran variabilidad en todo el departamento. Las condiciones de lluvia varían, en la parte central y occidental del sector, donde se observa un comportamiento bimodal, con una estación seca mayor a principios de año y una estación menos evidente a mitad de año. Las temporadas de lluvias en estas dos regiones son de marzo a mayo y de septiembre a noviembre. La parte oriental del departamento es característica de la Orinoquia y la parte central, es una estación seca única de diciembre a marzo, y la temporada de lluvias dura el resto del año, con las mayores precipitaciones de junio a julio. La temperatura también es un factor de análisis importante, ya que la mayoría de municipios del departamento cuenta con pisos térmicos entre fríos y muy fríos. La altitud de Muzo y Otanche en el occidente muestra temperaturas superiores a los 20 grados centígrados, hasta alcanzar la temperatura más alta en el municipio de Puerto de Boyacá sobre el río Magdalena, dado que, es una región despejada de nubes y un porcentaje muy bajo de nubosidad, esto genera una incidencia directa de la energía solar sobre la superficie, de hecho, este municipio es el de mayor incidencia solar y satisface las necesidades para un proyecto exploratorio de energía fotovoltaica en la región. En el departamento de Boyacá se presentan unos valores de irradiación global horizontal (GHI) comprendidos en un rango de siete (7) valores que van desde 1.98 kWh/m² hasta 6.42 kWh/m² dentro de un espacio geográfico de 2'313.754 hectáreas (Ha) resultantes de la suma de las trece (13) provincias que contemplan el departamento.
- Actualmente el mayor reto de trascendencia internacional en una escala de importancia considerable, es la necesidad de generar alternativas de producción de energía limpia, disminuyendo en gran parte los impactos ambientales generados por la explotación de combustibles fósiles, contribuyendo al desarrollo sostenible, para ello esta clase de trabajos busca acondicionar los escenarios de exploración de la energía solar fotovoltaica, para suplir las necesidades de la seguridad energética del país. Para Colombia se plantea una

transición inteligente entre las energías de sectores fósiles hacia energías más limpias como la energía solar, como se ha planteado anteriormente dentro de las trece (13) provincias asociadas al departamento de Boyacá se resalta la provincia de Márquez, Norte, Occidente, Ricaurte y Sugamuxi, donde puede ser útil campañas de exploración para analizar y realizar a mayor profundidad estudios del potencial de energía solar fotovoltaica en estas zonas.

Bibliografía

- Acevedo Latorre, Eduardo. Panorama Geoeconómico del Departamento de Boyacá, en Anales de Economía y Estadística, Tercera Época, Número 07, Oct – dic. 1952, p.24.
- Ariel Mesa, L., Sanabria, C. A., & Javier Pérez, W. (2016). *Diseño de un Sistema solar fotovoltaico autónomo para una institución educativa rural en el municipio de Páez - Boyacá*. Obtenido de Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sede Sogamoso: http://cici.unillanos.edu.co/media2016/memorias/CICI_2016_paper_148.pdf
- Baldasano, J. M., Calbó, J., & Moreno, J. (1994). *Atlas de radiació solar a Catalunya (dades del període 1964-1993)*. Informe RS94. Institut de Tecnologia y Modelització Ambiental - Universitat Politècnica de Catalunya. Terrassa. 57 p. + armexos.
- Bautista, F., & Palacio, J. L. (2011). Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales. *Técnicas de Muestreo Para Manejadores de Recursos Naturales, January 2004*. <https://doi.org/10.22201/ciga.9786070221279p.2011>
- Black, J. N., 1956. The distribution of solar radiation over the earth's surface. Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol. B 7:165-189.
- Bonilla Perez, J. (2014). *Evaluación de la oferta solar potencial para la producción de electricidad en zona rural del municipio de Sogamoso (Boyacá, Colombia)*. Bogotá DC: Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales - Facultad de Ingeniería Geográfica y Ambiental - Ingeniería Geográfica y Ambiental. Bogotá DC.
- Casaravilla, G., & Chaer, R. P. (2008). *Modelo de Series de Tiempo de Radiación Solar para Simulador de Instalaciones Fotovoltaicas*. pp 88–90.
- Chen, R., Ersi, K., Yang, J., Lu, S., & Zhao, W. (2004). *Validation of five global radiation models with measured daily data in China*. Conversion and Management, 45, pp 11-12.
- Correa Flórez, C. A., Marulanda García, G. A., & Panesso Hernández, A. H. (10 de 09 de 2016). *Impacto de la penetración de la energía solar fotovoltaica en sistemas*. Obtenido de Revista Tecnura - Universidad Distrital Francisco José de Caldas - DOI: <http://http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a06>: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/issue/view/799>
- Correa Sánchez, N. (2020). Caracterización de la radiación solar para la estimación del potencial de energía fotovoltaica en entornos urbanos, caso de estudio: Valle de Aburrá. Medellín - Minas - Maestría en Ingeniería - Recursos Hidráulicos.
- De Miguel, A., Bilbao, J., Aguiar, R., Kambezidis, H., & Negro, E. (2001). «Diffuse solar irradiation model evaluation in the north mediterranean belt area». Obtenido de Solar Energy, 70(2), pp.

- Drews, A. (2007). *Preparation of a global radiation data set based on the Heliosat method*.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. John Wiley & Sons.
- Eraso Checa, F., & Erazo de la Cruz, O. (2012). “*Potencial Natural para el Desarrollo Fotovoltaico en Colombia*,”. U mariana, p. 52–59.
- Figuerola-Cuello, A. N., Pardo-García, A., & Díaz-Rodríguez, J. L. (2017). *Sistema control supervisor de clientes con acceso remoto para sistemas solares*. Obtenido de Rev.investig.desarro.innov, 7(2), 367-378. doi: 10.19053/20278306.v7.n2.2017.6104: <http://www.scielo.org.co/pdf/ridi/v7n2/2389-9417-ridi-7-02-367.pdf>
- Font Tullot, I. (1983). *Atlas climático de España*. Madrid, España: Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones. Instituto Nacional de Meteorología. 103 mapas.
- Gómez Ramírez, J. (2018). *La energía solar fotovoltaica en Colombia: potenciales, antecedentes y perspectivas*. Obtenido de Universidad Santo Tomás - Pregrado Ingeniería Mecánica: <http://hdl.handle.net/11634/10312>
- Gómez-Ramírez, J., Murcia-Murcia, J., & Cabeza-Rojas, I. (2017). *La energía solar fotovoltaica en Colombia: Potenciales, Antecedentes y Perspectivas*. Bogotá, Colombia: Universidad Santo Tomás - Facultad de Ingeniería Mecánica.
- H. Rodríguez and F. González, “Manual de Radiación Solar en Colombia,” Univ. Nac. Colomb., vol. 1, 1992.
- Hartmann, D. L. (2016). *Global Physical Climatology*. (Elsevier, Ed.) (Second edition). USA.
- IDEAM - ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR, ULTRAVIOLETA Y OZONO DE COLOMBIA - DISTRIBUCIÓN GLOBAL DE LA IRRADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL – Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2010. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Distribucion-global-de-la-Irradiacion-Global-Horizontal.pdf>.
- IDEAM and UPME, “Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia - Presentación.” [Online]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Presentacion.pdf>. [Accessed: 25-Feb-2016].
- Iqbal, M. (1983). *Solar radiation*.
- Iqbal, M. (2012). *An introduction to solar radiation*. Elsevier.
- Janjai, S. (2010). *A method for estimating direct normal solar irradiation from satellite data for a tropical environment*. Solar Energy, 84(9), pp168–169.

- Julivert, M. (1961). *Las estructuras del valle medio del Magdalena y su significación*. Revista Boletín de Geología: Universidad de Santander.
- Karakoti, I., Das, P. K., & Bandyopadhyay, B. (2013). *An analytical study on daily solar radiation data*. Current Science, 105(2), pp 215–224.
- Kumar, L., Skidmore, A. K., & Knowles, E. (1997). Modelling topographic variation in solar radiation in a gis environment. International Journal of Geographical Information Science, 11(5), 475-497.
- Landsberg , H. (1961). Solar Radiation over the Earth's Surface. Solar Energy, vol. V, N° 3, pp. 95-98.
- Liou, K.-N. (2002). An introduction to atmospheric radiation. Elsevier.
- Löf, G. O. G., Duffie, J. A. and Smith, C. O. (1966). World Distribution of Solar Radiation. Solar Energy, vol. 10, N° 1, pp. 27-37.
- Martínez González, A., Orlandini, A., & Herrero López, S. (2011). “*Crisis, Cambio Global y Energía,*”. Rev. Econ. Mund., vol. 29, no. 1576–162, pp. 263–284.
- Meisen, P. (2009). *Renewable energy potential of latinamerica*. pp 81.
- MME, INEA, and HIMAT, “Atlas de Radiación Solar de Colombia.” 1993.
- Mola, A. L. (2003). *Atlas de energía solar*. Lima, Perú: pp. 03.
- Monsolar. (2018). *Tipos de sistema solares fotovoltaicos*. Obtenido de <https://www.monsolar.com/blog/tipos-sistemas-solares-fotovoltaicos/>
- Moreno Collado, A. (2015). *Caracterización del Potencial Energético de las Energías Renovables en una comarca agrícola de Leçon y planificación de su explotación*. León, México: Universidad de León - Departamento de Biodiversidad y Gestión Ambiental - Tesis Doctoral.
- Nrel. (2013). *Radiación Solar*. Obtenido de <http://www.nrel.gov/gis/solar.html>.
- Núñez, J. M., & Pérez, J. (1977). *Distribució del balam; de la radiació a Catakmya*. Barcelona, España: Institut d'Estudis Catalans. Arxius de la Secció de Ciències, LVI. lEe. 122 p.
- OMM (1982). Boetín de la OMM, Vol 31. Número 01. Organización Meteorológica Mundial. Avalaible: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3345.
- P., Schlusel, P., Van Baelen, J., & Zus, F. (2015). A review of the remote sensing of lower

- Perpiñán Lamigueiro, O. (03 de 2013). *Energía Solar Fotovoltaica*. Obtenido de <http://procomun.wordpress.com/documentos/libroesf>
- Perpiñán, O. (2012). «*solaR: Solar Radiation and Photovoltaic Systems with R*». Obtenido de Journal of Statistical Software 50(9), pp. 1–32: <http://www.jstatsoft.org/v50/i09/>
- Pons, X. (1996). "*Estimación de la Radiación Solar a partir de modelos digitales de elevaciones. Propuesta metodológica*". A: VII Coloquio de Geografía Cuantitativa, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. Juaristi, J. i Moro, I. (eds.) Vitoria-Gasteiz.
- Quispe Huamán, L. (2018). *Determinación y análisis espacio - temporal de la radiación solar global en el altiplano de Puno*. Puno, Perú: Universidad Nacional del Altiplano - escuela de Posgrado - Programa de Maestría - Maestría en Ciencias de la Ingeniería Agrícola.
- Revista de urbanismo. (12 de 06 de 2005). *Sistemas fotovoltaicos en Arquitectura y Urbanismo*. Obtenido de Revista Electrónica del Departamento de Urbanismo. N°12. ISSN 0717-5051: https://web.uchile.cl/vignette/revistaurbanismo/CDA/urb_simple/0,1310,SCID%253D14982%2526ISID%253D530%2526IDG%253D2%2526ACT%253D0%2526PRT%253D14974,00.html
- Rodríguez, D., Ávila, M., & Benítez, J. A. (29 de 07 de 2015). *Atlas de Radiación Solar Para La Región Cundiboyacense– Colombia Por Medio De Datos Radiométricos*. Obtenido de Universidad Distrital Francisco José de Caldas: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.142>
- Salamanca-Ávila, S. (01 de 09 de 2017). *Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica. Caso de aplicación en la ciudad de Bogotá*. Obtenido de Revista Científica • Universidad Distrital - ISSN 0124-2253 • e-ISSN 2344-2350 • Septiembre-Diciembre • Bogotá-Colombia • No. 30 (3) • pp. 263-277: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/revcie/index>
- Santillan, V. A. (2010). *slideshare.net*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/falakioto/analisis-de-datos-6349556>
- Scharmer, K., & Greif, J. (2000). *Vol. 1: Fundamentals and maps (1st ed., Vol. 1)*. París, Francia.
- Secretaría de energía. (2008). *Energías Renovables - Energía solar fotovoltaica*. Obtenido de Coordinación de Energías Renovables - Dirección Nacional de Promoción - Subsecretaría de Energía Eléctrica: https://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_solar.pdf
- Sevilla Jiménez, M., Golf Laville, E., & Driha, O. M. (2013). "*Las energías renovables en España*". Estud. Econ. Apl., vol. 31, no. 1, 1697–5731 (online) – 1133–3197 (print), pp. 35–58.
- SOLARGIS & Grupo del Banco Mundial. (2019). *Methodology Global Solar Atlas*. Recuperado 3 de mayo de 2021, de <https://globalsolaratlas.info/support/methodology>

SOLARGIS & Grupo del Banco Mundial. (s. f.). Global Solar Atlas. Recuperado 2 de mayo de 2021, de <https://globalsolaratlas.info/download/colombia>

SOLARGIS & Grupo del Banco Mundial. (s. f.-a). PV energy modeling. Recuperado 22 de abril de 2021, de <https://solargis.com/docs/methodology/pv-energy-modeling>

SOLARGIS & Grupo del Banco Mundial. (s. f.-b). Solar radiation modeling. Recuperado 20 de abril de 2021, de <https://solargis.com/docs/methodology/solar-radiation-modeling>

UPME, I. et al. (2018). Atlas de Radiación solar de Colombia.

UPME, IDEAM, and MME, “Atlas de radiación solar de Colombia,” pp. 13–22, 2005.

Wallace, J. M. & Hobbs, P. V. (2006). Atmospheric science: an introductory survey, volume 92. Elsevier.

Wenham, S. R., Green, M. A., & Watt, M. E. (2000). *Applied Photovoltaics*. Centre for Photovoltaic.

Wulfmeyer, V., Hardesty, R. M., Turner, D. D., Behrendt, A., Cadeddu, M. P., Di Girolamo, A. Review of the Remote Sensing of Lower-Tropospheric Thermodynamic Profiles and its Indispensable Role for the Understanding and the Simulation of Water and Energy Cycles. A reviews of Geophysics.

XM - Compañía de Expertos en Mercados. (2017). “XM - Compañía de Expertos en Mercados S.A. ESP. Obtenido de Demanda de energía nacional: <http://informesanuales.xm.com.co/2015/SitePages/operacion/3-1-Demanda-de-energia-nacional.aspx>.

Yang, H. D., Marcelo, E., & Germán, A. (2012). *Estimación de la Irradiación Solar Media Mensual, para la Ciudad de Catamarca usando modelos híbridos*. Estimation of Global Solar Irradiation ,foRthe City of Catamarca using the Hybrid.

Yao, W., Li, Z., Wang, Y., Jiang, F., & Hu, L. (2014). Evaluation of global solar radiation models for Shanghai , China. Energy Conversion and Management, 84, 597 612. 2014.04.017

Anexos

Mapas irradiación global directa GHI, provincias departamento de Boyacá – ver PDF adjuntos

Mapas potencial de energía fotovoltaica PVOUT, provincias departamento de Boyacá – ver PDF adjuntos

Mapas pendientes, provincias departamento de Boyacá – ver PDF adjuntos