UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis integrado basado en el método multicriterio MCDM y sistemas de información geográfica para la selección de sitios óptimos para la instalación de parques de generación fotovoltaica en Colombia.

Laura Daniela Jaimes Martínez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Humanas, Departamento de Geográfica.

Bogotá, Colombia

2024

Análisis integrado basado en el método multicriterio MCDM y sistemas de información geográfica para la selección de sitios óptimos para la instalación de parques de generación fotovoltaica en Colombia.

Laura Daniela Jaimes Martínez

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Especialista en Análisis Espacial

Director:

Docente Gabriel Triana Zárate

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Humanas, Departamento de Geográfica.

Bogotá, Colombia

2024

La vie, c'est comme une bicyclette, il faut avancer pour ne pas perdre l'équilibre.

Albert Einstein

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a la Universidad Nacional de Colombia, por brindarme la oportunidad de formarme académicamente en un ambiente de excelencia. La educación que he recibido en esta institución ha sido fundamental para mi desarrollo profesional y personal.

Agradezco de manera especial a mis padres, quienes han sido mi apoyo incondicional a lo largo de esta travesía académica. Su amor ha sido la fuerza que me ha impulsado a alcanzar mis metas y cumplir mis sueños, me han enseñado a no rendirme y ver lo capaz que soy. Sin su respaldo y confianza en mis capacidades, este logro no habría sido posible. Gracias por creer en mí.

También quiero agradecer a la vida por brindarme la oportunidad de estudiar y seguir aprendiendo. Los días en la universidad fueron gratos y han sido un paso más hacia la realización de mis objetivos. La posibilidad de acceder a la educación superior ha cambiado parte mi vida, abriéndome puertas y ofreciendo nuevas perspectivas. Estoy inmensamente agradecida por cada aprendizaje, por cada reto superado y por cada momento de crecimiento personal y académico.

Finalmente, extiendo mi gratitud a todos mis profesores, por su guía y por inspirarme a ser siempre mejor. A mis amigos y compañeros de estudio, de quienes aprendí también. Y a todas las personas que, aunque no mencionadas aquí, han dejado una huella en mi formación.

Análisis integrado basado en el método multicriterio MCDM y sistemas de información geográfica para la selección de sitios óptimos para la instalación de parques de generación fotovoltaica en Colombia.

Resumen

Ante la necesidad de reducir el consumo de combustibles fósiles debido al calentamiento global, las energías limpias, como la solar, se presentan como una opción clave para un futuro energético sostenible. La energía solar, inagotable y disponible para la humanidad por generaciones, ha ganado relevancia en Colombia y el mundo. La implementación de proyectos que aprovechen esta fuente requiere seleccionar sitios óptimos, un proceso crítico que debe considerar factores climáticos, ambientales, físicos y sociales. En particular, los aspectos sociales están a menudo marcados por intereses diversos que, en algunos casos, pueden ser conflictivos. En este sentido la investigación propone una combinación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y herramientas de toma de decisiones multicriterio (MCDM) para integrar estos intereses de manera objetiva, aplicando el proceso analítico jerárquico (AHP) para ponderar los criterios. El modelo busca identificar los sitios ideales para granjas solares en Colombia, equilibrando la máxima producción de energía, la minimización de costos y la reducción de impactos ambientales, mientras asegura una representación equitativa de los diferentes actores involucrados.

Palabras clave: Energía solar, análisis espacial, evaluación multicriterio, sistemas de información geográfica, dinámica socioambiental.

Integrated analysis based on the multicriteria method MCDM and geographic information systems for the selection of optimal sites for the installation of photovoltaic generation parks in Colombia.

Abstract

With the need to reduce the use of fossil fuels due to global warming, clean energy, such as solar energy, is presented as a key option for a sustainable energy future. Solar energy, which is inexhaustible and has been available to mankind for generations, has become increasingly important in Colombia and around the world. The implementation of projects that make use of this source requires the selection of optimal sites, a critical process that must take into account climatic, environmental, physical and social factors. The social aspects, in particular, are often characterised by different interests, some of which may be conflicting. In this sense, the research proposes a combination of Geographic Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) tools to integrate these interests in an objective manner, using the Analytical Hierarchical Process (AHP) to weight the criteria. The model aims to identify the ideal locations for solar farms in Colombia, balancing maximum energy production, minimisation of costs and reduction of environmental impact, while ensuring a fair representation of the different stakeholders involved.

Keywords: Solar energy, spatial analysis, multi-criteria evaluation, geographic information systems, socio-environmental dynamics.

Contenido

1. Planteamiento del problema 10

1.1 Objetivos 12

1.1.1 Objetivo general 12

1.1.2 Objetivos específicos 12

2. Antecedentes 13

3. Marco Teórico 19

3.1 Energías renovables 19

3.2 Energía Solar Fotovoltaica 20

3.3 Colombia y la energía solar fotovoltaica 21

3.1 Normativa Ambiental 22

3.1.1 Licencia ambiental. 23

3.1.2 Consulta previa 23

3.1.3 Permiso de ocupación de causes 24

3.1.4 Permiso aprovechamiento forestal 24

3.1.5 Otros permisos. 25

4. Metodología 26

4.1 Modelo espacial Multicriterio 27

4.2 Validación del modelo 31

4.3 Datos utilizados en el modelo 32

4.3.1 Criterios que viabilizan 32

4.3.2 Restricciones 34

5. Resultados 36

5.1 Ponderación de criterios 36
5.2 Modelo espacial multicriterio.....37
5.2.1 Normalización de los criterios 38
5.2.2 Especialización de criterios que viabilizan 40
5.2.3 Especialización de las restricciones.....46
5.2.4 Mapas de idoneidad.....47
5.3 Validación del Modelo 55
6. Conclusiones y recomendaciones.....61
6.1 Conclusiones 61
6.2 Recomendaciones 62
7. Bibliografía.....64

Listado de figuras

Figura 3-1 Tipos de energías renovables 19
Figura 3-2 Parque Solar El Paso, Colombia. 20
Figura 3-3 Número de proyectos por tipo de Energía 21
Figura 3-4 Capacidad en MW por tipo de proyecto 22
Figura 4-1 Esquema metodológico para la selección de sitios óptimos 26
Figura 4-2 Esquema metodológico del Modelo espacial multicriterio 27
Figura 4-3 Ejemplo de estructura jerárquica de un modelo AHP basado en SIG 28
Figura 4-4 Superposición ponderada (Weighted Overlay). 31
Figura 5-1 Idoneidad criterio Radiación Solar 42
Figura 5-2 Idoneidad criterio Pendiente 42
Figura 5-3 Idoneidad criterio Dirección de exposición al Sol 43
Figura 5-4 Idoneidad criterio Temperatura Promedio 43
Figura 5-5 Idoneidad criterio Elevación del terreno 44
Figura 5-6 Idoneidad criterio Cobertura de la Tierra 44
Figura 5-7 Idoneidad criterio Brillo Solar 45
Figura 5-8 Idoneidad criterio Vocación del Suelo 45
Figura 5-9 Restricciones 46
Figura 5-10 Mapa Idoneidad Colombia 48
Figura 5-11 Mapa Áreas con Restricciones 49
Figura 5-12 Mapa Idoneidad de las áreas sin restricción 50
Figura 5-13 Porcentaje de Idoneidad del Área Total 51
Figura 5-14 Porcentaje de Idoneidad del Área sin Restricción 52
Figura 5-15 Idoneidad Alta y Muy Alta 53
Figura 5-16 Proyectos en operación UPME 56
Figura 5-17 Superposición de los proyectos solares con el modelo 57
Figura 5-18 Idoneidad de los proyectos actuales según modelo 60

Listado de tablas

Tabla 2-1 Referencia estudio analizado Uyan y Dogmus 13
Tabla 2-2 Referencia estudio analizado Sánchez Lozano et al. 14
Tabla 2-3 Referencia estudio analizado Garni y Awasthi.....14
Tabla 2-4 Referencia estudio analizado Mensour et al. 15
Tabla 2-5 Referencia estudio analizado Sarawata et al. 16
Tabla 2-6 Criterios evaluados en los estudios analizados 16
Tabla 2-7 Metodologías empleadas.....17
Tabla 4-1 Comparación de pares en la técnica AHP para los casos en los que el primer elemento es más sensible o intenso que el segundo elemento. 28
Tabla 4-2. Comparación de pares en la técnica AHP para los casos en los que el primer elemento es menos sensible o intenso que el segundo elemento. 29
Tabla 5-1 Criterios elegidos que viabilizan 32
Tabla 5-2 Restricciones 34
Tabla 5-3 Matriz resultados peso para cada criterio por experto.....36
Tabla 5-4 Peso por cada criterio.....37
Tabla 5-5 Normalización Criterios que Viabilizan 38

1. Planteamiento del problema

En la XXI conferencia sobre Cambio Climático (COP 21) celebrada en 2015, 195 países acordaron y firmaron el Acuerdo de París. Este acuerdo global tiene como objetivo principal abordar el desafío del cambio climático. (Amini *et al.*, 2023). La meta central del Acuerdo de París es reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) a nivel mundial y mantener el aumento de la temperatura global por debajo de los dos grados centígrados.

Colombia ha establecido metas de descarbonización, comprometiéndose a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 51% para 2030 y alcanzar la neutralidad de carbono para 2050. La transición energética juega un papel fundamental en el logro de estos objetivos, impulsando la adopción de energías renovables como la solar. Esta transición busca disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, fomentar la eficiencia energética y promover tecnologías limpias, contribuyendo así a la reducción de la huella de carbono y al cumplimiento de las metas climáticas nacionales. (MADS, 2022)

La transición energética es proceso que implica cambiar la manera en que se produce energía. Entre los cambios más importantes está la sustitución de los combustibles fósiles por fuentes de energía renovable, como la eólica y la solar. En Colombia este tipo de energías empezaron a ser parte de la agenda desde la publicación de la Ley 1715 de 2014. (García Orrego, 2021).

La energía desempeña un papel clave en nuestra sociedad, ya que de ella dependen actividades como la vivienda, el transporte, la industria y la agricultura (Esmaeilpour and Kheirizadeh Arouq, 2024). Si bien la mayor parte del suministro energético mundial se basa en el petróleo, es bien sabido que estos combustibles tienen un impacto negativo en el medio ambiente. En este sentido, las crecientes preocupaciones por el cambio climático, el calentamiento global y la contaminación ambiental han dado lugar a un uso incremental de las energías renovables a lo largo del siglo XXI.(Tavana *et al.*, 2017).

En Colombia, aproximadamente el 75% de la energía eléctrica proviene de fuentes renovables, siendo las hidroeléctricas la principal fuente de generación. Otras energías

renovables, como la solar y la eólica representan un porcentaje menor, cercano al 2%. Por otro lado, las fuentes no renovables, como el petróleo, el gas natural y el carbón, aportan alrededor del 23% de la energía total del país. Este panorama resalta la importancia de impulsar las energías renovables no convencionales para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y avanzar en la transición energética. (UPME, 2023)

La energía fotovoltaica solar (PV) es una fuente de energía importante para satisfacer la demanda de electricidad en países en desarrollo sin emitir contaminantes a la atmósfera. La generación de electricidad a partir de la energía solar tiene varias ventajas, como períodos de amortización, materia prima (inagotable), costos de mantenimiento y operación más bajos que otras fuentes.(Uyan and Dogmus, 2023).

La ubicación estratégica de parques solares en zonas óptimas es clave para avanzar en la descarbonización de Colombia. Por un lado, la energía eléctrica generada a partir de paneles solares hace parte de las energías renovables y limpias. Esta alternativa no emite gases de efecto invernadero (GEI), lo que contribuye significativamente a la reducción de las emisiones de gases contaminantes y a la mitigación del cambio climático. (López *et al.*, 2020). Por otro lado, la implementación de sistemas fotovoltaicos para aprovechar la energía solar se presenta como una alternativa viable y fundamental en la transición energética, facilitando el reemplazo de fuentes de energía no renovables. (Silva Granada, 2016).

Por lo anterior, es útil realizar un análisis espacial multicriterio, que determine las zonas óptimas para la implementación de parques solares en el territorio colombiano por medio de herramientas de los sistemas de información geográfica (SIG), ya que puede ser una herramienta valiosa para la toma de decisiones en proyectos de energía eléctrica solar, en los cuales están involucradas entidades públicas y privadas.

Como resultado, se logra identificar fácilmente áreas o rutas que presenten la combinación más adecuada de variables para la implementación de un proyecto de energía solar. Esto se hace teniendo en cuenta tanto las restricciones técnicas y ambientales ya existentes como aquellas que están contempladas en la legislación vigente.(García Orrego, 2021).

La pregunta central que guía esta investigación es: ¿Cuáles son los sitios con mayor potencial o idóneos para la instalación de plantas de generación de energía solar en Colombia?

1.1 Objetivos

A continuación, se presentan el objetivo general y los objetivos específicos que dan pie al desarrollo de esta investigación.

1.1.1 Objetivo general

Identificar las zonas óptimas para la ubicación e implementación de plantas de energía solar en el territorio colombiano (área continental).

1.1.2 Objetivos específicos

- Implementar un modelo espacial multicriterio MDCM mediante la técnica APH para determinar los sitios idóneos donde instalar las plantas de energía solar en Colombia.
- Validar los resultados con los proyectos de generación de energía solar instalados actualmente reportados por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME).

2. Antecedentes

La urgente necesidad de mitigar el cambio climático, desestimulando el uso de combustibles fósiles y la creciente demanda de fuentes de energía renovable han generado un gran interés en la energía solar fotovoltaica como una fuente de energía limpia y sostenible. La viabilidad de los proyectos de energía solar depende en gran medida de la selección adecuada de ubicaciones óptimas. La identificación de zonas teniendo en cuenta diversos factores resulta importante para maximizar la producción energética y la rentabilidad de estos proyectos. De manera que, se realiza una revisión de literatura donde se abordan metodologías para la determinación de zonas óptimas para la implementación de proyectos de energía solar fotovoltaica.

En este capítulo, se presentarán diversos estudios previos que han abordado la selección de sitios óptimos para la instalación de parques de generación fotovoltaica en distintas partes del mundo, empleando metodologías basadas en el método multicriterio MCDM y sistemas de información geográfica (SIG). La búsqueda de estos artículos y estudios se realizó a través de diferentes portales de revistas científicas reconocidas, tales como ScienceDirect, IEEE Xplore, SpringerLink y Wiley Online Library, entre otros. Se aseguró que las publicaciones seleccionadas provinieran de revistas pertenecientes al cuartil Q1, representando las de mayor prestigio y calidad en el ámbito académico. Esta revisión de la literatura proporcionará un contexto sólido y comparativo para el análisis específico del caso colombiano, identificando enfoques metodológicos, criterios evaluativos y resultados relevantes que puedan enriquecer y guiar la investigación presente.

Tabla 2-1 Referencia estudio analizado Uyan y Dogmus

Autores	Título del estudio
Mevlut Uyan · Ozgul Lutfiye Dogmus	An Integrated GIS-Based ANP Analysis for Selecting Solar Farm Installation Locations: Case Study in Cumra Region, Turkey
	https://doi.org/10.1007/s10666-022-09870-1

Fuente: Elaboración propia

De manera general, se concluye que (Uyan and Dogmus, 2023) utilizaron una combinación híbrida de MCDM y SIG para determinar las ubicaciones más adecuadas para plantas solares fotovoltaicas en Turquía, y demostraron que el 13.9% de las áreas son altamente adecuadas para albergar esas plantas. Aunque el valor de radiación solar y la pendiente son los criterios más importantes para la selección de sitios de granjas solares, no se

utilizaron en este estudio. Es claro en este estudio que el AHP no considera las dependencias mutuas entre atributos al obtener sus grados de importancia, por lo tanto, se desarrolló el proceso analítico en red (ANP) para hacer frente a esta dificultad

Tabla 2-2 Referencia estudio analizado Sánchez Lozano et al.

Autores	Título del estudio
Juan M. Sánchez-Lozano, Jerónimo Teruel-Solano, Pedro L. Soto-Elvira, M. Socorro García-Cascales	Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain
	http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.01

Fuente: Elaboración propia

En España la técnica de GIS y MCDM fue utilizada por (Sánchez-Lozano *et al.*, 2013) con el fin de obtener la evaluación de la ubicación óptima de plantas de energía solar fotovoltaica en el área de Cartagena (Región de Murcia); este estudio reveló que el 25.05% de la superficie es válida para implementar plantas fotovoltaicas solares. En este estudio recomiendan evaluar varios criterios ambientales, áreas protegidas, impacto visual, puntos de interés social, y áreas de difícil acceso como colinas o laderas empinadas.

Se implementó el método TOPSIS el cual basa su operación en el cálculo de las distancias al punto ideal y al punto anti- ideal. Se eligió esta metodología porque no requiere una evaluación por parte del experto para cada una de las alternativas. También usaron la técnica AHP con revisión de literatura y estudios previos.

Tabla 2-3 Referencia estudio analizado Garni y Awasthi

Autores	Título del estudio
Hassan Z. Al Garni, Anjali Awasthi	Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia
	http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.024

Fuente: Elaboración propia

Las técnicas de MCDM y SIG han sido aplicadas con éxito por (Garni and Awasthi, 2017) para identificar los sitios más adecuados para proyectos fotovoltaicos a gran escala en Arabia Saudita; este estudio mostró que el 16% del área estudiada es prometedora y adecuada para desplegar plantas de energía fotovoltaica. El modelo utilizado en este estudio considera diferentes aspectos, como factores económicos y técnicos, esto con el objetivo de asegurar el logro de la máxima potencia y al mismo tiempo minimizar el costo del proyecto.

En este estudio se lleva a cabo la aplicación de SIG-AHP, la cual se encuentra entre los enfoques más utilizados para integrar AHP con otras técnicas de apoyo a la toma de decisiones. El AHP ha sido aceptado por la comunidad científica internacional como una técnica de Toma de Decisiones Multicriterio (MCDM) robusta y flexible que facilita la resolución de problemas de decisión complejos

Una limitación de este estudio es el uso de un número reducido de puntos para el proceso de interpolación de temperatura, lo que podría reducir la precisión de la capa de temperatura. No se tuvieron en cuenta otros criterios de decisión para enriquecer el modelo propuesto, como el crecimiento de la población, sitios patrimoniales, distribución de vegetación e impacto visual.

Tabla 2-4 Referencia estudio analizado Mensour et al.

Autores	Título del estudio
O. Nait Mensour, B. El Ghazzani, B. Hlimi, A. Ihlal	A geographical information system-based multi-criteria method for the evaluation of solar farms locations: A case study in Souss-Massa area, southern Morocco
	https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.063

Fuente: Elaboración propia

(Mensour *et al.*, 2019) utilizaron una combinación híbrida de MCDM, SIG y métodos de Proceso Analítico Jerárquico para seleccionar un sitio apropiado para el despliegue de granjas solares en Marruecos; los resultados de este estudio demostraron que en la región de Souss-Massa el 24.08% del área estudiada ofrece sitios adecuados para albergar granjas fotovoltaicas.

En este trabajo el factor climático o la irradiación solar son criterios cruciales, por lo cual recomiendan que debieran tenerse en cuenta en la selección del sitio adecuado para un proyecto de energía solar fotovoltaica a gran escala. Este trabajo se lleva a cabo la MCDM, metodología que ha encontrado su aplicación básica en la planificación de energías renovables, ya que permite a los tomadores de decisiones prestar atención a todos los criterios disponibles según su importancia, mientras se tienen en cuenta otros propósitos para tomar decisiones apropiadas según la prioridad.

No se tuvieron en cuenta aspectos sociales importantes como los sitios con potencial arqueológico, adicional, no se tuvo en cuenta la temperatura del aire como criterio a pesar de que se mencionó en la revisión bibliográfica que hicieron.

Tabla 2-5 Referencia estudio analizado Sarawata et al.

Autores	Título del estudio
S. K. Saraswata, Abhijeet K. Digalwara, S. S. Yadava, Gaurav Kumar	MCDM and GIS based modelling technique for assessment of solar and wind farm locations in India
	https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.056

Fuente: Elaboración propia

Por último, (Saraswat *et al.*, 2021) realizaron el estudio en India con el fin de investigar la idoneidad espacial de las ubicaciones de plantas solares y eólicas basándose en perspectivas técnicas, económicas y socioambientales, el análisis lo desarrollaron mediante el uso conjunto de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y enfoques de Toma de Decisiones Multicriterio (MCDM); el trabajo de investigación muestra que el 4.13% del área de estudio (133,874 km²) es altamente adecuada para el despliegue de plantas solares, mientras que el 0.91% del área total (29,457 km²) es altamente adecuada para los parques eólicos.

El artículo tiene en cuenta varias sugerencias realizadas por expertos regionales, partes interesadas, expertos de diferentes asociaciones medioambientales, profesionales de la energía y autoridades de planificación, lo que aumenta la aceptabilidad y viabilidad del trabajo de investigación.

El análisis se ha realizado utilizando datos de acceso público de diversas fuentes fiables, pero estos datos no están tan actualizados en comparación con los datos disponibles comercialmente. Los resultados pueden mejorarse aún más utilizando datos medidos disponibles en el terreno.

Como resumen de esta revisión, la siguiente tabla se presentan los criterios de decisión considerados en cada estudio:

Tabla 2-6 Criterios evaluados en los estudios analizados

Criterios	Uyan and Ozgul	Sánchez et al.	Garni and Awasthi	Mensour et al.	Sarawat et al.
Dirección de exposición al sol	✓	✓	✓	✗	✗
Distancia desde líneas de transmisión	✓	✓	✗	✓	✓
Distancia desde aguas superficiales	✓	✗	✗	✓	✓
Distancia desde el centro de transformación	✓	✗	✗	✗	✗
Distancia desde áreas residenciales	✓	✓	✓	✓	✓
Distancia desde carreteras y vías férreas	✓	✓	✓	✓	✓

Criterios	Uyan and Ozgul	Sánchez et al.	Garni and Awasthi	Mensour et al.	Sarawat et al.
Capacidad agrológica	✗	✓	✗	✗	✗
Pendiente	✗	✓	✓	✓	✓
Distancia desde las subestaciones	✗	✓	✓	✗	✗
Radiación Solar	✗	✓	✓	✓	✓
Temperatura promedio	✗	✓	✓	✗	✗
Distancia desde los aeropuertos	✗	✗	✗	✓	✓
Elevación	✗	✗	✓	✓	✓
Áreas de importancia ambiental	✗	✗	✗	✓	✓
Distancia desde plantas de energía existentes	✗	✗	✗	✗	✓
Uso del suelo	✗	✗	✗	✓	✓

Fuente: Elaboración propia

La radiación solar, la distancia desde aguas superficiales y la pendiente, son los criterios que más estudios incluyeron en su análisis. Por otro lado, la distancia desde las plantas de energía existentes y la capacidad agrológica, solo fueron utilizados en un estudio.

En la siguiente tabla se presentan las metodologías desarrolladas en cada estudio:

Tabla 2-7 Metodologías empleadas

Metodologías	Uyan and Ozgul	Sánchez et al.	Garni and Awasthi	Mensour et al.	Sarawat et al.
Proceso Analítico de Red (ANP)	✓	✗	✗	✗	✗
Toma de decisiones multicriterio (MCDM)	✓	✓	✓	✓	✓
Técnica de Preferencia de Orden por Similitud con la Solución Ideal (TOPSIS)	✗	✓	✗	✗	✗
Proceso de jerarquía analítica (AHP)	✗	✓	✓	✓	✓
Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG)	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Elaboración propia

Como común denominador se presenta la integración de técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y metodologías para la toma de decisiones multicriterio (MCDM), y como complemento de cada uno, se llevan a cabo otras metodologías que facilitan el proceso.

Por un lado, el proceso de jerarquía analítica se implementó en cuatro de los cinco estudios; esta metodología proporciona un marco estructurado para descomponer un problema complejo en subproblemas más manejables y jerarquizarlos en función de su importancia relativa. En el contexto de la selección de zonas óptimas, AHP permite evaluar y comparar múltiples criterios para luego ponderar de acuerdo con su relevancia en la toma de

decisiones. Asimismo, AHP facilita la incorporación de la opinión de expertos y partes interesadas en el proceso de toma de decisiones, enriqueciendo la evaluación y promoviendo una selección de zonas óptimas más informada y objetiva.

Por otro lado, TOPSIS proporciona una metodología sistemática para evaluar y comparar diferentes alternativas de ubicación en función de múltiples criterios relevantes, esta técnica permite asignar pesos a cada criterio de acuerdo con su importancia relativa, reflejando las preferencias y prioridades específicas de los interesados en el proyecto. Además, TOPSIS ayuda a identificar las zonas óptimas al calcular la proximidad relativa de cada alternativa a la solución ideal y a la solución peor en términos de los criterios establecidos. Esto permite clasificar las ubicaciones de manera objetiva, indicando cuáles son las más adecuadas para la implementación de paneles solares.

Finalmente, ANP permite abordar la complejidad y las interrelaciones entre los diferentes criterios y subcriterios involucrados en la selección de zonas óptimas. Al modelar esta complejidad a través de una red, se pueden capturar y analizar las dependencias y retroalimentaciones entre los factores, logrando así una evaluación más precisa y holística.

De manera que, AHP se centra en la jerarquía y relaciones jerárquicas, mientras que ANP amplía esta estructura para modelar relaciones de red más complejas, incluyendo dependencias y feedback entre criterios, proporcionando así una representación más completa y precisa de situaciones de toma de decisiones complejas.

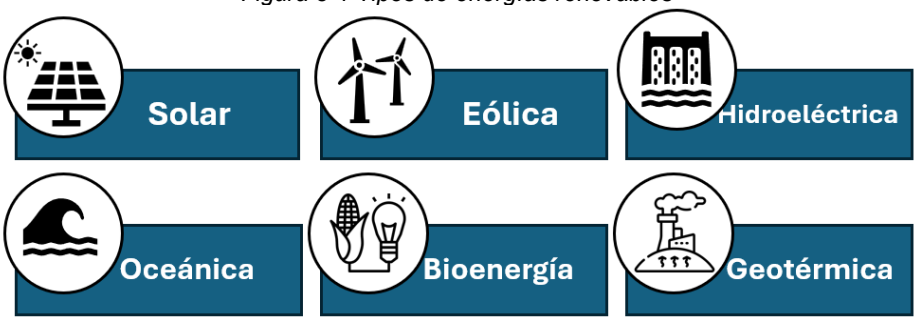
3. Marco Teórico

En este capítulo, se profundizará en los conceptos fundamentales y las bases teóricas que sustentan la investigación.

3.1 Energías renovables

Las energías renovables se originan de fuentes naturales que se reponen a un ritmo más rápido del que se consumen, como la luz solar y el viento, las cuales se renuevan de manera continua, son abundantes y están presentes en diversos entornos. En contraste, los combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas, son fuentes de energía no renovables que requieren cientos de millones de años para formarse. Al quemarse, estos combustibles liberan energía, pero también emiten gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO_2), Metano (CH_4) y Óxidos de nitrógeno (N_2O), que son perjudiciales para el medio ambiente. (NACIONES UNIDAS, 2019)

Figura 3-1 Tipos de energías renovables



Fuente: Elaboración propia a partir de: (NACIONES UNIDAS, 2019)

La generación de energía a partir de fuentes renovables emite significativamente menos gases contaminantes que la quema de combustibles fósiles. La transición de las energías de origen fósil, que actualmente son los mayores responsables de las emisiones, hacia las energías renovables es crucial para mitigar el calentamiento global y facilitar la adaptación al cambio climático.(SE for all, 2022)

En la actualidad, las energías renovables no solo son más económicas en la mayoría de los países, sino que también generan tres veces más empleos que los combustibles fósiles.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), alrededor del 99 % de la población mundial respira aire que no cumple con los estándares de calidad adecuados, lo que pone en riesgo su salud. Los materiales perjudiciales en forma de pequeñas partículas y dióxido

de nitrógeno provienen principalmente de la quema de combustibles fósiles. El cambio hacia fuentes de energía limpias, como la solar y la eólica, no solo ayuda a mitigar el cambio climático, sino que también reduce la contaminación del aire, mejorando la salud pública.

3.2 Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar, que se refiere a la radiación emitida por el sol utilizada para generar electricidad, es una fuente renovable con bajos costes de mantenimiento y no emite gases de efecto invernadero. Además, ayuda a reducir las emisiones de carbono y los contaminantes ambientales. (EMR, 2023).

Figura 3-2 Parque Solar El Paso, Colombia.

Fuente:(Enel Green Power, 2019)

De todas las tecnologías solares, la fotovoltaica es la que está creciendo más rápidamente a nivel mundial. Esta tecnología se fundamenta en las celdas solares. El principio de funcionamiento de las celdas solares se basa en el efecto fotovoltaico, donde la luz que incide sobre un dispositivo semiconductor de dos capas genera una diferencia de voltaje entre dichas capas. Este voltaje puede conducir una corriente a través de un circuito externo, lo que permite producir trabajo útil. (Estrada Gasca, 2013)

Entre todas las fuentes de energía, la solar es la más abundante y puede ser captada incluso en días nublados. La Tierra recibe energía solar a una tasa aproximadamente 10,000 veces mayor que el consumo energético de la humanidad. Las tecnologías solares pueden generar calor, refrigeración, iluminación natural, electricidad y combustibles para diversas aplicaciones, convirtiendo la luz solar en electricidad mediante paneles fotovoltaicos o espejos que concentran la radiación solar. Aunque la cantidad de luz solar

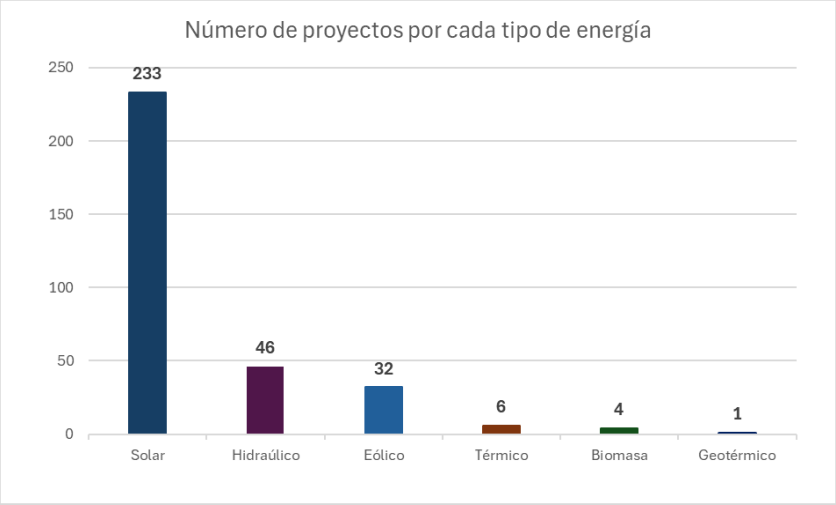
varía entre países, la energía solar puede contribuir significativamente a la canasta energética de cualquier nación. (NACIONES UNIDAS, 2019)

3.3 Colombia y la energía solar fotovoltaica

La generación de energía en Colombia es fundamental para el desarrollo económico del país, según el estudio de competitividad global de energía 2012, realizado por el instituto Choiseul y KPMG, este informe resalta el gran potencial de la generación de energía eléctrica en Colombia, considerándola una de las más competitivas a nivel mundial. Concluye que el sector eléctrico colombiano es de alta calidad, confiable y respetuoso con el medio ambiente. (Cortés and Arango Londoño, 2017)

En Colombia, la energía eléctrica proviene principalmente del recurso hídrico. Según el Sistema de Información Eléctrico Colombiano (SIEL), el 68% de la capacidad de generación entregada al Sistema Interconectado Nacional (SIN) proviene de grandes y pequeñas centrales hidroeléctricas. El 31% proviene de centrales térmicas que utilizan carbón, gas u otros combustibles, y el 1% restante se compone de aprovechamientos de biomasa, granjas solares y parques eólicos. Sin embargo, estos porcentajes varían según la época del año. En meses de abundancia hídrica, las centrales hidroeléctricas pueden cubrir hasta el 85% de la demanda, pero en temporadas de sequía, este porcentaje disminuye, comprometiendo la capacidad del sistema para satisfacer la demanda. Al 31 de marzo de 2024, se registraron 322 proyectos vigentes en el sistema de información de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME).

Figura 3-3 Número de proyectos por tipo de Energía

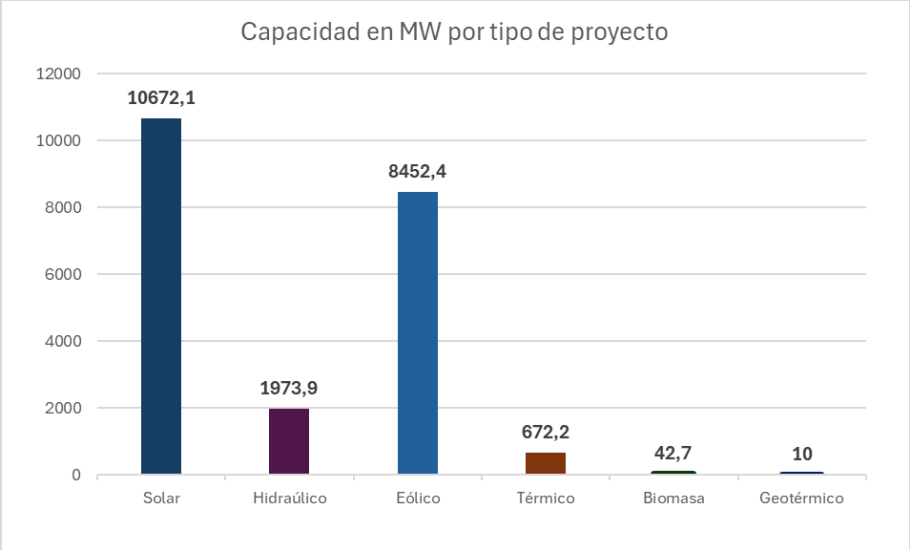


Fuente: (UPME, 2024)

De los proyectos vigentes 233 son de tipo solar, 46 de tipo hídrico, seguido de 32 de tipo eólico con 12 costa afuera y 20 costa adentro, 6 proyectos de tipo térmico, 4 proyectos de biomasa, y finalmente 1 geotérmico.(UPME, 2024).

En términos de potencia (MW) acumulada para los proyectos vigentes, en la siguiente figura muestra los proyectos vigentes con corte a 31 de marzo del 2024, y se puede observar mayor participación en los proyectos de las tecnologías eólica y solar.

Figura 3-4 Capacidad en MW por tipo de proyecto



Fuente: (UPME, 2024)

El mercado de energía solar en Colombia está experimentando un auge significativo debido al aumento de la demanda en zonas comerciales y residenciales, impulsado por el incremento en los precios de los combustibles fósiles y las facturas de electricidad. La energía solar, siendo un método eficaz para generar electricidad a costos más bajos, se está convirtiendo en una opción atractiva. Además, el gobierno colombiano está implementando medidas de apoyo al mercado solar, como la exención del IVA y los derechos de aduana en máquinas y equipos de generación de energía. Estas políticas también fomentan la inversión extranjera, contribuyendo al aumento de proyectos de energía solar en Colombia. (EMR, 2023)

3.1 Normativa Ambiental

A continuación, se mencionan los principales permisos y autorizaciones legales necesarios para la implementación de proyectos de generación de energía fotovoltaica en Colombia.

Aunque estos proyectos se caracterizados por su bajo impacto ambiental directo, por el uso mínimo de recursos naturales, y la cantidad de permisos requeridos en comparación con otras tecnologías energéticas es menor, existen diversas normativas que regulan estos permisos, y que igual se deben tener presente.

3.1.1 Licencia ambiental.

En el Artículo 2.2.3.2.2 del Decreto 1076 de 2015, se especifican los proyectos, obras y actividades que requieren licencia ambiental y que son competencia directa de la ANLA, mencionando en el numeral 4, literal b) los proyectos de exploración y uso de fuentes de energía alternativa con capacidad instalada igual o superior a cien (100) MW.

En el Artículo 2.2.3.2.3 del mismo Decreto, se detallan aquellos proyectos sujetos a licenciamiento ambiental por parte de las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), especificando en el numeral 4, literal d) los proyectos de exploración y uso de fuentes de energía con capacidad instalada entre diez (10) MW y cien (100) MW.

Además, en el artículo 2.2.2.3.4.2 se menciona la exigibilidad del Diagnóstico Ambiental de Alternativas para los proyectos fotovoltaicos con capacidad instalada superior a diez (10) MW.

3.1.2 Consulta previa

Los proyectos de generación de energía fotovoltaica en Colombia requieren consulta previa cuando se desarrollan en territorios que son habitados o utilizados por comunidades étnicas, como pueblos indígenas, afrodescendientes, palenqueros y raizales, o comunidades ROM, de acuerdo con lo estipulado en la Ley 21 de 1991, que ratifica el Convenio 169 de la OIT. Esta consulta es un derecho fundamental de estas comunidades y tiene como objetivo garantizar su participación en las decisiones que puedan afectar sus derechos colectivos, el uso de sus territorios ancestrales, o sus prácticas culturales, sociales, y económicas. (Rodríguez and Baquero, 2020). La consulta previa es obligatoria cuando los proyectos energéticos, como los parques solares, implican la utilización, intervención, o afectación de tierras sobre las que estas comunidades tienen derechos territoriales, bien sea porque son poseedores legales del territorio (resguardos, consejos comunitarios) o porque tienen un vínculo ancestral o cultural con las áreas en cuestión. Además, debe llevarse a cabo antes de que se tome cualquier decisión administrativa o se otorgue una licencia que habilite la ejecución del proyecto. El proceso busca obtener el

consentimiento libre, previo e informado de las comunidades, lo que implica dialogar y acordar sobre las medidas de manejo ambiental, mitigación de impactos, y compensaciones que puedan ser necesarias para evitar vulnerar sus derechos.

3.1.3 Permiso de ocupación de causes

El permiso de ocupación de cauce es un requisito que deben cumplir los proyectos de generación de energía fotovoltaica cuando implican la intervención, modificación, o uso de un cauce natural, ribera o lecho de un cuerpo de agua, como ríos, quebradas o lagos. Este permiso es necesario cuando la construcción de la infraestructura fotovoltaica o la instalación de equipos requieren cruzar o modificar un cauce, o cuando se instalan estructuras que interfieren con el flujo de agua. Este tipo de intervención puede incluir actividades como la construcción de canales, drenajes, o infraestructuras temporales durante las fases de instalación. El permiso debe ser solicitado ante la autoridad ambiental competente en la región o ante la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), si el proyecto tiene una envergadura nacional o regional significativa. Este permiso está regulado por el Decreto 1541 de 1978, que establece las condiciones para el uso y aprovechamiento de aguas en Colombia, y es complementado por el Decreto 1076 de 2015, que compila las disposiciones del sector ambiental.

3.1.4 Permiso aprovechamiento forestal

El permiso de aprovechamiento forestal es un requisito que deben cumplir los proyectos de generación de energía fotovoltaica cuando implican la tala, poda, o intervención en áreas forestales, ya sea bosques naturales, plantaciones forestales, o coberturas vegetales significativas, ubicadas en el área donde se desarrollará el proyecto. Este permiso es necesario si la instalación de paneles solares, infraestructuras asociadas (como subestaciones o líneas de transmisión), o vías de acceso implican la remoción de vegetación. La finalidad del permiso es garantizar que se minimicen los impactos sobre los recursos forestales y que se adopten medidas de compensación, como la reforestación o restauración de áreas afectadas. La solicitud de este permiso debe radicarse ante la autoridad ambiental regional competente, como las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), o ante la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), dependiendo de la magnitud del proyecto. Este procedimiento está regulado por la Ley 99 de 1993, que establece el marco para la protección de los recursos naturales en Colombia, y la Resolución 192 de 2014, que define los lineamientos para el aprovechamiento forestal y la

compensación ambiental. Estas normativas buscan proteger la biodiversidad y asegurar el uso sostenible de los recursos forestales en el país.

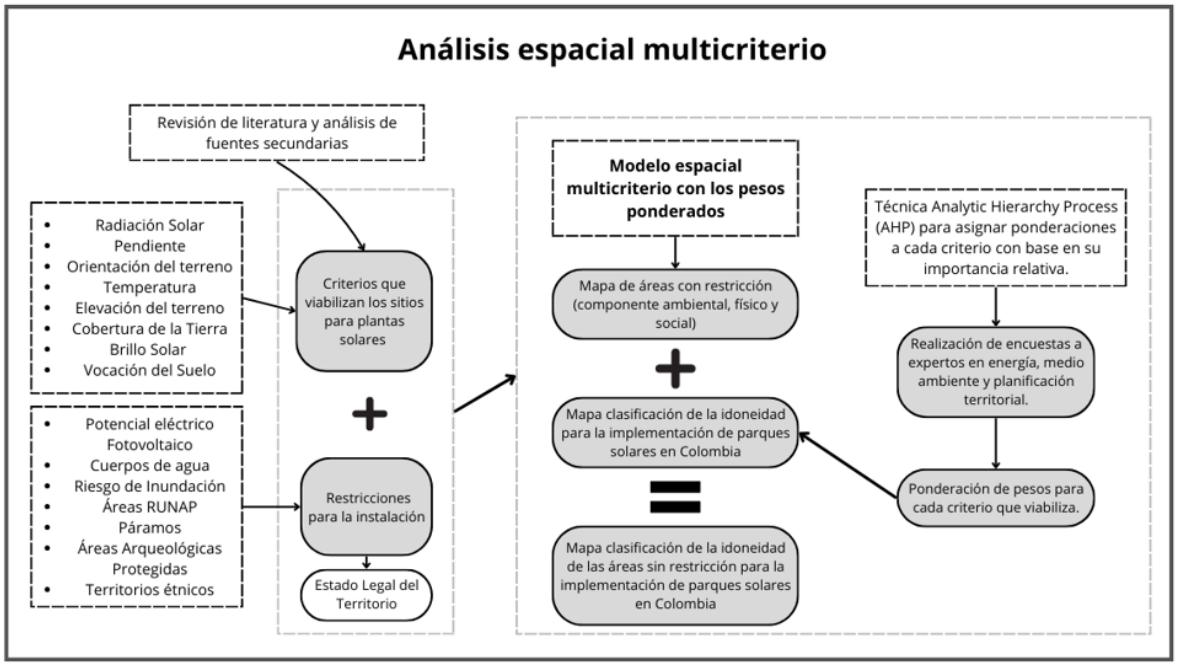
3.1.5 Otros permisos.

Para los proyectos de generación de energía solar, aunque existen permisos como la concesión de aguas superficiales o subterráneas, el permiso de emisiones atmosféricas y el permiso de vertimientos, estos no son comúnmente solicitados debido a la baja interferencia que las plantas fotovoltaicas tienen con los recursos hídricos y el ambiente. La concesión de aguas (Decreto 1541 de 1978) es necesaria solo si el proyecto requiere un suministro considerable de agua, por ejemplo, para la limpieza de los paneles solares o durante la fase de construcción, algo poco frecuente. Del mismo modo, el permiso de emisiones atmosféricas (Decreto 1076 de 2015) se solicita principalmente para proyectos que generan emisiones contaminantes, lo cual no aplica en la operación de los parques solares, dado que no producen emisiones directas. El permiso de vertimientos (Ley 1333 de 2009) se solicita si hay descargas de aguas residuales al suelo o cuerpos de agua, lo cual tampoco es común en plantas fotovoltaicas, ya que el uso de agua es limitado y se gestiona de manera controlada. Sin embargo, lo que sí es necesario en la mayoría de los casos es el permiso para el uso de energía eléctrica (Resolución CREG 030 de 2018), que permite la conexión a la red eléctrica nacional. Este permiso es esencial para garantizar que la energía generada pueda ser inyectada al Sistema Interconectado Nacional (SIN), regulando aspectos técnicos y de seguridad en la conexión del proyecto a la red de distribución o transmisión eléctrica del país.

4. Metodología

La metodología se divide en tres pasos principales que representan las fases utilizadas en esta investigación para identificar los sitios adecuados para la generación de energía solar. Primero la determinación de los criterios, luego la aplicación de la técnica del Proceso Analítico Jerárquico con el fin de establecer la ponderación de los criterios y, por último, el modelo espacial multicriterio, que permite identificar las zonas óptimas para la instalación de parques solares.

Figura 4-1 Esquema metodológico para la selección de sitios óptimos



Fuente: Elaboración propia

Antes de realizar el modelo espacial multicriterio, se identificaron los criterios que se tuvieron cuenta en la determinación de zonas óptimas para la implementación de plantas de energía solar. Estos criterios se dividen en dos grupos, las restricciones y los criterios que viabilizan.

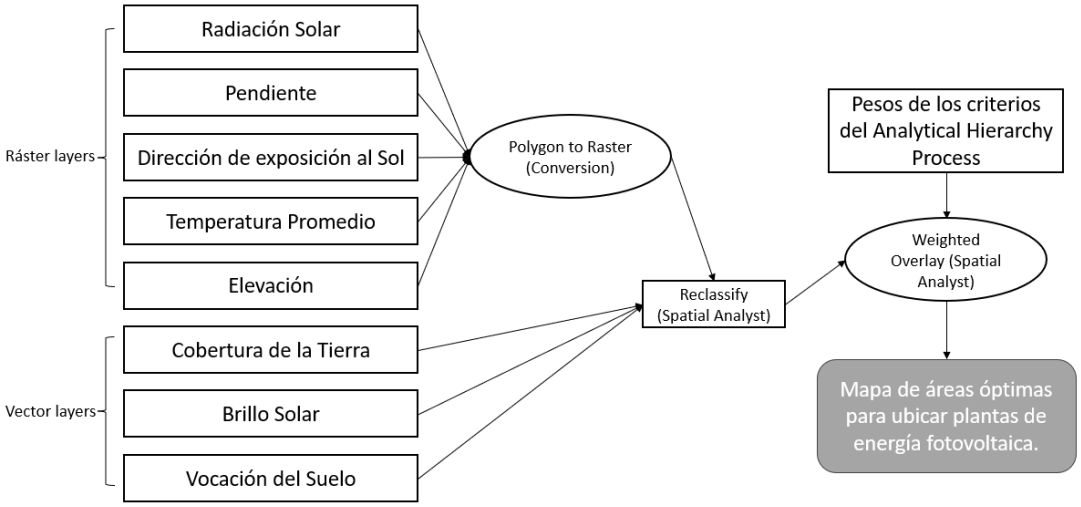
Cada criterio fue seleccionado de acuerdo con los siguientes lineamientos:

- Datos Actualizados: Información reciente que permita un análisis actual.
- Mapeables: Indicadores faciles de espacializar.
- Evaluables: Fácil de calificar de acuerdo con lo expresado por los expertos.

4.1 Modelo espacial Multicriterio

La metodología para aplicar el modelo espacial multicriterio después de identificar las restricciones y los criterios que viabilizan la ubicación de parques solares implica una serie de pasos sistemáticos, culminando en la combinación de los factores a través de álgebra de mapas, usando los pesos ponderados obtenidos mediante la técnica AHP (Analytic Hierarchy Process).

Figura 4-2 Esquema metodológico del Modelo espacial multicriterio



Fuente: Elaboración propia

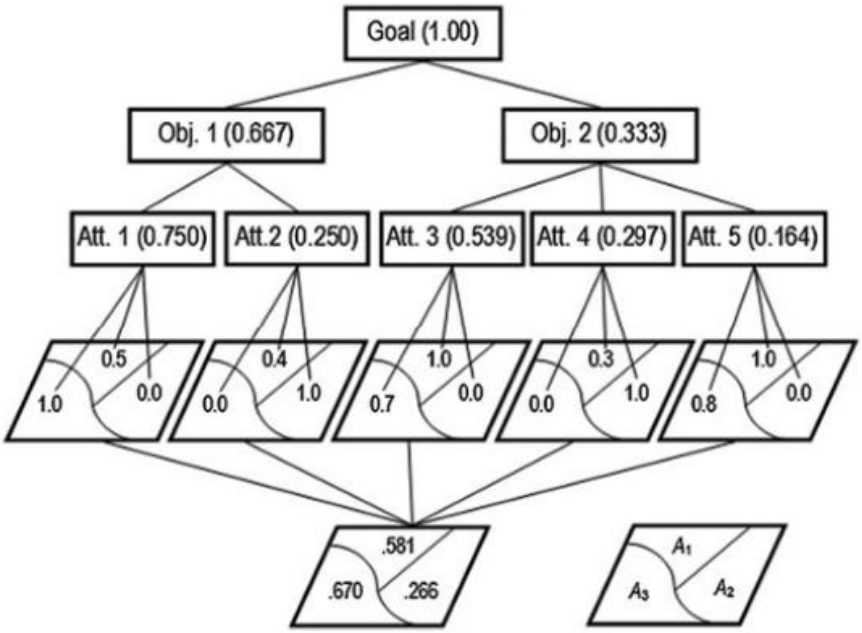
Analytical Hierarchy Process

El proceso de jerarquía analítica (AHP) es un método de análisis de decisiones multicriterio que se basa en tres principios: descomposición, juicio comparativo y síntesis de prioridades. Estos principios permiten dividir el problema en una jerarquía, comparar por pares los elementos de cada nivel y sintetizar las prioridades obtenidas en los niveles inferiores. El AHP se implementa en tres pasos: desarrollar la jerarquía, asignar pesos a los elementos mediante comparaciones por pares y construir una clasificación general de prioridades.(Malczewski and Rinner, 2015)

Típicamente, la estructura jerárquica consta de cuatro niveles: meta, objetivos, atributos y alternativas. El nivel superior de la estructura jerárquica es el objetivo final de la decisión en cuestión. La jerarquía desciende de lo general a lo más específico hasta alcanzar un nivel

de atributos. Este es el nivel contra el cual se evalúan las alternativas de decisión del nivel más bajo de la jerarquía. Cada nivel está vinculado con el nivel superior.

Figura 4-3 Ejemplo de estructura jerárquica de un modelo AHP basado en SIG



Fuente: (Malczewski and Rinner, 2015)

Para la ponderación de los criterios se define una escala de nueve elementos que representan los distintos grados o niveles para discriminar la intensidad de la relación entre los elementos de un conjunto determinado. Esto asegura que todas las comparaciones y mediciones se realicen en la misma escala. Dado que los criterios del estudio son diversos, es crucial realizar mediciones uniformes. A continuación, se presenta el significado de cada valor de la escala:

Tabla 4-1 Comparación de pares en la técnica AHP para los casos en los que el primer elemento es más sensible o intenso que el segundo elemento.

IMPORTANCIA	INTENSIDAD	SIGNIFICADO
1	Igual o diferente a..	Al comparar un elemento con otro, hay indiferencia entre ellos
3	Ligeramente más sensible/intenso	Al comparar un elemento con el otro, el primero es ligeramente más sensible/intenso que el segundo
5	Más sensible/intenso que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera más sensible/intenso que el segundo
7	Mucho más sensible/intenso que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera mucho más sensible/intenso que el segundo
9	Absolutamente o	Al comparar un elemento con el otro, el primero se

IMPORTANCIA	INTENSIDAD	SIGNIFICADO
	muchísimo más sensible/intenso que...	considera absolutamente o muchísimo más sensible/intenso que el segundo

Fuente: (Saaty, *1980)*

Para el caso de los valores recíprocos de la escala, la interpretación es completamente análoga, esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4-2. Comparación de pares en la técnica AHP para los casos en los que el primer elemento es menos sensible o intenso que el segundo elemento.

IMPORTANCIA	INTENSIDAD	SIGNIFICADO
1/3	Ligeramente menos sensible/intenso que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera ligeramente menos sensible o intenso que el segundo.
1/5	Menos sensible/intenso que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera menos sensible/intenso que el segundo
1/7	Mucho menos sensible/intenso que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera mucho menos sensible/intenso que el segundo
1/9	Absolutamente o muchísimo menos sensible/intenso que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera absolutamente o muchísimo menos sensible/intenso que el segundo

Fuente: (Saaty, *1980)*

Los resultados obtenidos luego de la aplicación de la metodología permitirán la asignación de los pesos a cada componente del factor analizado, en el que se busca representar el grado relativo de importancia ante el nivel de restricción para determinar las zonas óptimas para la implementación de parques solares. El cual está dado en porcentaje.

Aplicación de encuestas

Para obtener los resultados aplicando la metodología propuesta, se realizó una encuesta a 11 expertos en las áreas de ingeniería ambiental, ingeniería química, ingeniería catastral, biología, antropología, geología y geografía. El formato de esta encuesta es se presenta a continuación, y sus respuestas se encuentran en el anexo A.

Normalización de los criterios

Los criterios seleccionados no tienen la misma unidad (por ejemplo, la pendiente expresada en porcentaje, la elevación en metros sobre el nivel del mar, etc.) por lo que no pueden utilizarse en el proceso de ubicación de plantas solares fotovoltaicas. De manera que, es necesario ajustar las unidades para cada mapa temático.

En general, en la aplicación de un modelo multicriterio, la normalización de los datos tiene varios objetivos principales. En primer lugar, las unidades de todos los mapas temáticos

deben coincidir. De este modo, los mapas temáticos carecen de dimensiones. En segundo lugar, cada mapa temático se reclasifica en función del objetivo de la investigación. (Agyekum *et al.*, 2021)

Cada criterio es transformado en una escala común, para permitir su comparación. De manera que se tengan:

- Escalas de medición: Los datos originales de los criterios que viabilizan se convierten en valores normalizados entre 1 y 5, donde 1 representa un lugar poco adecuado y 5 el lugar más adecuado. Por otro lado, con las restricciones se dan valores de 0 y 1, donde 0 es con restricción y 1 es sin restricción.
- Reclasificación: Para criterios que viabilizan, la reclasificación se da asignando valores más altos a áreas con mayor idoneidad.

Creación de capas geográficas

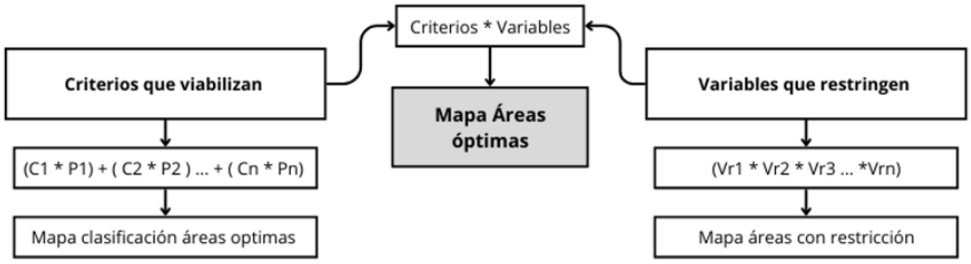
Para cada criterio que viabiliza y restricción, se crean **capas geográficas** en un Sistema de Información Geográfica (SIG) en Ráster a partir de los shapes obtenidos de diferentes geovisores y bases de datos. Estas capas corresponden a mapas temáticos que reflejan la distribución espacial de cada criterio en la región de estudio. Estas capas geográficas tienen en cada value de cada celda la reclasificación correspondiente.

Cada mapa temático normalizado se utiliza de forma continua (en lugar de discreta) en el proceso de superposición de las capas en el contexto de los sistemas de información geográfica (SIG). Esto elimina en gran medida las incertidumbres asociadas a la reclasificación de capas.

Aplicación del álgebra de mapas - Superposición ponderada (Weighted Overlay).

Se realiza el álgebra de mapas para combinar todas las capas de criterios y restricciones aplicando los pesos ponderados obtenidos del AHP.

Figura 4-4 Superposición ponderada (Weighted Overlay).



Fuente: Elaboración propia

Las fórmulas de algebra de mapas son las siguientes:

$$Criterios = (Criterio\ 1\ \times\ Peso\ 1\ ) + (Criterio\ 2\ \times Peso\ 2) + \cdots (Criterio\ n\ \times Peso\ n)$$

$$Restricciones = Varible\ restrictiva\ 1\ \times Variable\ restrictiva\ 2 \times \ldots Variable\ restrictiva\ n$$

$$Mapa\ final = Criterios\ \times Restricciones$$

El resultado del álgebra de mapas es un **mapa de zonificación** que muestra las áreas más aptas para la instalación de parques solares. En este mapa, cada píxel tiene un valor de adecuación que refleja la combinación de criterios que viabilizan y las restricciones. Luego esta cada resultante se convierte en polígono para poder calcular áreas y realizar análisis.

4.2 Validación del modelo

La metodología para la fase 4 de este trabajo consistió en validar los resultados obtenidos del modelo de selección de sitios óptimos para la instalación de parques solares con la ubicación actual de los proyectos activos y en operación de energía solar en Colombia, reportados por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) a agosto de 2024. Para ello, se realizó una georreferenciación precisa de cada uno de los proyectos reportados por la UPME, ubicándolos espacialmente. Posteriormente, se utilizó la herramienta Add Surface Information del módulo 3D Analyst, lo que facilitó la extracción de información de los valores de píxel del modelo para las ubicaciones de los parques solares, lo que permitió determinar la clasificación que el modelo asignaba a cada sitio. A partir de este análisis, se identificó si los proyectos actualmente en operación están localizados en áreas consideradas óptimas por el modelo o si se encuentran en zonas con restricciones. Cabe resaltar que se incluyeron únicamente los proyectos con una capacidad instalada de 100 MW o más, ya que son los que requieren licencia ambiental ante la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).

4.3 Datos utilizados en el modelo

Los datos utilizados en el modelo se dividen en dos grupos, los criterios que viabilizan y las restricciones, a continuación, se presenta la información contemplada y su aporte a la investigación.

4.3.1 Criterios que viabilizan

A continuación, en la siguiente tabla, se resumen los criterios identificados como viabilizadores para la ubicación de parques de energía solar en Colombia.

Tabla 4-3 Criterios elegidos que viabilizan

Criterios	Dimensión	Fuente	Representación
Radiación Solar	Física	Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia. (IDEAM, 2016)	Campo Continuo
Pendiente	Física	A partir del DEM Colombia 12.5 – ALOS PALSAR	Campo Continuo
Dirección de exposición al sol	Física	A partir del DEM Colombia 12.5 – ALOS PALSAR	Campo Continuo
Temperatura promedio	Física	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2021b)	Campo Continuo
Elevación	Física	A partir del DEM Colombia 12.5 – ALOS PALSAR	Campo Continuo
Cobertura de la Tierra	Biótica	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2021a)	Objeto Discreto
Brillo Solar	Física	Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia. (IDEAM, 2016)	Objeto Discreto
Vocación del Suelo	Física	Datos Abiertos Agrología, (IGAC, 2013)	Objeto Discreto

Fuente: Elaboración propia a partir de las fuentes de los datos utilizados en la investigación.

La **radiación solar** es el criterio más importante en la selección de sitios para plantas de energía fotovoltaica, ya que directamente influye en la cantidad de energía que puede generar un panel solar. (Akkas *et al.*, 2017). En Colombia, la radiación solar varía significativamente según la región. Las zonas del norte del país, como La Guajira, presentan valores superiores a los 5,5 kWh/m²/día, lo que las convierte en áreas de alto potencial. En contraste, las regiones andinas, debido a la mayor nubosidad y la variabilidad climática, tienen niveles más bajos de radiación, lo que reduce su idoneidad. (IDEAM, 2016).

La **pendiente del terreno** es crucial en la ubicación de plantas solares, ya que influye en la instalación y rendimiento de los paneles. (Ruiz *et al.*, 2019). Terrenos con pendientes

pronunciadas, como los encontrados en las zonas montañosas de Colombia, presentan desafíos para la instalación de equipos y pueden generar sombras que disminuyen la eficiencia. En cambio, terrenos planos o con una ligera inclinación son más adecuados, ya que permiten una disposición óptima de los paneles. (Castro *et al.*, 2013).

En Colombia, la mejor **dirección de exposición al sol (orientación del terreno)** para maximizar la captación solar es hacia el norte, debido a la posición geográfica del país, cercano al ecuador. (García-Olivares *et al.*, 2012). En cambio, terrenos orientados hacia el este u oeste tienen una eficiencia reducida, ya que captan menos luz directa durante las horas pico de radiación solar.

La **temperatura promedio** afecta el rendimiento de los paneles solares, ya que estos funcionan de manera más eficiente a temperaturas moderadas. (Skoplaki and Palyvos, 2009). Aunque Colombia tiene un clima cálido en muchas regiones, las altas temperaturas pueden reducir la eficiencia de conversión de los paneles fotovoltaicos.

La **elevación del terreno** influye en varios factores, como la temperatura y la densidad del aire, que afectan el rendimiento de las plantas solares. (Khan, Ali and Pamucar, 2023). En áreas de mayor elevación, como los Andes colombianos, las temperaturas más bajas pueden ser beneficiosas para la eficiencia de los paneles, pero la mayor nubosidad y la inclinación del terreno presentan desafíos adicionales.(Zhang *et al.*, 2020).

La **cobertura de la tierra** es esencial al seleccionar sitios para proyectos solares, ya que influye en la viabilidad de la instalación y en el impacto ambiental. Áreas cubiertas por vegetación densa, bosques o cultivos requieren deforestación o modificación del uso del suelo, lo que puede ser costoso y perjudicial desde el punto de vista ambiental. (Fang, Li and Song, 2018).

El **brillo solar**, que se refiere al número de horas de sol disponible, es un criterio clave para el diseño de plantas solares. (Rigo *et al.*, 2020). En Colombia, las zonas con más brillo solar, como el norte del país y las regiones costeras, son ideales para maximizar la captación de energía. (Rivas, 2021). Una mayor cantidad de horas de brillo solar asegura una producción más estable y eficiente a lo largo del día.

La **vocación del suelo** define qué usos están permitidos o son más adecuados para una zona específica según sus características geográficas, climáticas y ambientales. (Llano, Salazar and Lopez, 2019). Para proyectos solares, es preferible identificar terrenos que no

compitan con actividades agrícolas intensivas ni con áreas urbanas de expansión. (Kaliappan and Selvan, 2024).

4.3.2 Restricciones

En la siguiente tabla, se resumen los criterios identificados que restringen la ubicación de parques de energía solar en Colombia.

Tabla 4-4 Restricciones

Criterios	Dimensión	Fuente	Representación
Potencial Eléctrico Fotovoltaico	Física	Mapa de recurso Solar (WORLD BANK GROUP, SOLARGIS and ESMAP, 2020)	Campo Continuo
Cuerpos de agua	Física	Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2020)	Objeto Discreto
Riesgo de inundación	Física	Sistema de Información Ambiental de Colombia - (IDEAM, 2012)	Objeto Discreto
Áreas Protegidas RUNAP	Biótica	Sistema de Información Ambiental de Colombia - (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2024)	Objeto Discreto
Páramos	Biótica	ICDE - (Sistema de Información Geográfica para la Planeación y el Ordenamiento Territorial – SIGOT, 2018)	Objeto Discreto
Áreas Arqueológicas Protegidas	Cultural	Instituto Colombiano de Antropología e Historia - (ICANH, 2019)	Objeto Discreto
Territorios étnicos	Cultural	Portal de Datos Abiertos de la ANT (Agencia Nacional de Tierras, 2024)	Objeto Discreto

Fuente: Elaboración propia a partir de las fuentes de los datos utilizados en la investigación.

Las áreas **RUNAP (Registro Único Nacional de Áreas Protegidas)** incluyen parques nacionales, reservas naturales y otras zonas protegidas bajo leyes ambientales en Colombia. Estas áreas son esenciales para la conservación de la biodiversidad, la regulación climática y la protección de ecosistemas frágiles. (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2023). La legislación colombiana prohíbe la instalación de infraestructura energética en estas zonas, lo que las convierte en restricciones absolutas para el desarrollo de plantas fotovoltaicas.(MADS, 2022).

El **potencial eléctrico fotovoltaico** mide la cantidad de electricidad que un sistema fotovoltaico puede generar en función de la radiación solar disponible en una zona específica.(WORLD BANK GROUP, SOLARGIS and ESMAP, 2020). En Colombia, se considera que un área con menos de 1.400 kWh/kWp/año tiene un bajo potencial para la generación de energía solar, lo que la hace inviable económicamente. (UPME, 2015).

Las áreas con **riesgo por inundación** son zonas donde existe una alta probabilidad de que el terreno se inunde durante la temporada de lluvias. En Colombia, este riesgo es frecuente en áreas cercanas a ríos y zonas de baja altitud. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) clasifica las áreas con alto riesgo de inundación, lo que hace inviable instalar plantas fotovoltaicas en estas zonas, ya que las inundaciones recurrentes afectarían gravemente la operación y el mantenimiento de las instalaciones.

Los **territorios étnicos**, como los resguardos indígenas y territorios colectivos afrocolombianos, son áreas protegidas bajo la legislación colombiana debido a su importancia cultural y social. Las comunidades étnicas tienen derechos sobre el uso y la gestión de sus territorios, lo que restringe el desarrollo de proyectos energéticos sin la debida consulta previa y el consentimiento informado de estas comunidades. (Rodríguez and Baquero, 2020).

Las áreas cercanas a los **ríos** son consideradas zonas de protección ambiental y de alto riesgo, ya que los cuerpos de agua son cruciales para la biodiversidad y el equilibrio ecológico. La normativa colombiana establece franjas de protección a lo largo de los cauces de los ríos para evitar daños ambientales y prevenir desastres como inundaciones. Según el Código de Recursos Naturales (Decreto Ley 2811 de 1974), se deben respetar las zonas de manejo ambiental alrededor de los ríos.

Los **páramos** son ecosistemas únicos que actúan como reservorios de agua y juegan un papel crucial en la regulación hídrica de Colombia. El país alberga más del 50% de los páramos del mundo, que están protegidos por leyes nacionales debido a su fragilidad ambiental y su importancia para el suministro de agua a las principales ciudades. (Ballesteros and Rivera, 2023). La Ley de Páramos (Ley 1930 de 2018) prohíbe cualquier tipo de actividad minera, agropecuaria o energética en estas áreas.

Las **áreas arqueológicas protegidas** en Colombia son zonas declaradas de interés cultural por su valor histórico y patrimonial. El Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH) gestiona y protege estos sitios, donde cualquier tipo de construcción o modificación del terreno está estrictamente regulada o prohibida. (Leguizamón, 2019).

5. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, organizados de forma secuencial. Primero, se presenta la ponderación de los criterios que viabilizan obtenida mediante la técnica AHP, basada en las respuestas de expertos, detallando el peso relativo de cada criterio. Luego, se exponen los mapas de cada criterio que viabiliza y de cada restricción. También, se muestra el mapa resultante de la suma ponderada de los criterios, que evidencia las zonas excluidas o no aptas para el desarrollo de proyectos fotovoltaicos. Finalmente, se presenta el mapa final de áreas potenciales, donde se integran los criterios que viabilizan y las restricciones para identificar las zonas óptimas para la ubicación de parques solares. Por último, se realiza una validación de los resultados obtenidos con las ubicaciones actuales de parques solares registradas por la UPME, evaluando la concordancia entre las áreas potenciales identificadas y las ya utilizadas para la generación de energía solar en el país.

5.1 Ponderación de criterios

En esta investigación, para obtener la ponderación de los criterios que viabilizan la ubicación de parques solares, se utilizó la técnica AHP (Analytic Hierarchy Process) a través de encuestas realizadas a 11 expertos. Cada uno completó una matriz de comparación pareada, asignando valores según su experiencia. Ver: Anexo 1-Encuestas APH. Primero, se recopilaron las matrices de cada experto, lo que permitió obtener 11 matrices individuales de comparación entre los criterios. Luego, se calcularon los promedios de las comparaciones pareadas. Una vez promediadas, las comparaciones fueron normalizadas, dividiendo cada valor por la suma de su columna respectiva, lo que permitió obtener una matriz normalizada.

Tabla 5-1 Matriz resultados peso para cada criterio por experto

Criterio		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 6	Exp. 7	Exp. 8	Exp. 9	Exp. 10	Exp. 11	Peso %
Radiación solar	**a**	30,12	19,91	20,27	30,44	33,59	34,14	12,64	9,57	27,52	20,62	30,26	**24,5**
Pendiente	**b**	6,14	3,11	2,96	20,15	5,19	3,67	6,44	12,20	9,02	5,94	6,66	**7,4**
Orientación del terreno	**c**	20,61	3,10	27,93	13,79	16,11	15,52	20,15	6,47	24,09	20,10	7,29	**15,9**
Temperatura promedio	**d**	8,65	23,17	14,85	5,71	8,81	7,60	1,77	4,19	13,32	10,35	16,61	**10,5**
Elevación	**e**	3,09	5,65	6,07	5,78	8,28	5,27	3,94	3,58	6,91	13,87	14,22	**7,0**
Cobertura	**f**	16,18	20,55	6,68	7,67	9,86	4,91	6,45	8,02	7,32	2,42	2,57	**8,4**
brillo Solar	**g**	11,17	9,58	13,73	14,99	15,87	27,32	11,82	15,38	10,26	15,11	19,14	**14,9**

Criterio		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 6	Exp. 7	Exp. 8	Exp. 9	Exp. 10	Exp. 11	Peso %
Vocación del suelo	**h**	4,04	14,93	7,51	1,46	2,30	1,57	36,79	40,58	1,55	11,61	3,25	**11,4**

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de las encuestas.

A partir de esta matriz, se calcularon los pesos finales de cada criterio promediando los valores normalizados de cada fila.

Tabla 5-2 Peso por cada criterio

Criterio	Peso %
Radiación solar	24,5
Orientación del terreno	15,9
brillo Solar	14,9
Vocación del suelo	11,4
Temperatura promedio	10,5
Cobertura	8,4
Pendiente	7,4
Elevación	7,0

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de las encuestas.

Estos pesos representan la importancia relativa de cada criterio en el análisis y fueron utilizados en el modelo espacial multicriterio para determinar las áreas más adecuadas para la instalación de plantas solares fotovoltaicas en Colombia.

5.2 Modelo espacial multicriterio

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el análisis de idoneidad para la ubicación de parques solares fotovoltaicos en Colombia. En primer lugar, se muestran los resultados de la normalización de cada criterio que viabiliza, lo cual permitió estandarizar los criterios para su correcta comparación. A continuación, se presentan los mapas de los criterios viabilizadores, que reflejan cómo se distribuyen espacialmente cada criterio que viabiliza estos proyectos. Posteriormente, se exponen los mapas de las restricciones, lo que permitió identificar las áreas con restricciones para la instalación de parques solares. Finalmente, se presentan los mapas de las áreas disponibles en Colombia, con su respectivo nivel de idoneidad, que clasifica las zonas en diferentes categorías según su potencial para el desarrollo de proyectos de energía solar.

5.2.1 Normalización de los criterios

Los resultados de la normalización muestran cómo cada criterio viabilizador fue clasificado en una escala de 1 a 5, donde 5 representa una idoneidad muy alta y 1 una idoneidad muy baja. Cada criterio se normalizó de acuerdo con sus unidades de medida. Esta clasificación permite estandarizar diferentes criterios para compararlos de manera efectiva en el análisis multicriterio.

Tabla 5-3 Normalización Criterios que Viabilizan

Criterio	Normalización	Descripción
Radiación Solar	2,0 a 3,0 kW/m2 día → Idoneidad muy baja (1)	Una mayor cantidad de radiación solar disponible significa que los paneles podrán generar más electricidad por metro cuadrado de instalación, lo que mejora la eficiencia general del sistema. (Enel X, 2023)
	3,0 a 3,5 kW/m2 día → Idoneidad Baja (2)	
	3,5 a 4,5 kW/m2 día → Idoneidad Media (3)	
	4,5 a 5,0 kW/m2 día → Idoneidad Alta (4)	
	5,0 a 6,0 kW/m2 día → Idoneidad Muy Alta (5)	
Pendiente	>15% → Idoneidad Muy Baja (1)	Las pendientes suaves o planas son ideales para la ubicación de parques solares debido a su facilidad de instalación, menor costo y mejor captación de radiación solar, también reduce el riesgo de erosión, lo que facilita el mantenimiento. (Ruiz *et al.*, 2019)
	10 – 15% → Idoneidad Media (3)	
	5 – 10% → Idoneidad Alta (4)	
	0 – 5% → Idoneidad muy Alta (5)	
Dirección de exposición al sol	Sur, Este, Oeste, Suroriente y Suroccidente →Idoneidad Media (3)	En Colombia, la orientación del terreno hacia el norte es preferida para la instalación de paneles solares debido a su ubicación cercana al ecuador. (Autosolar Energía de Colombia, 2021)
	Nororiente y Noroccidente → Idoneidad Alta (4)	
Dirección de exposición al sol	Plano y Norte → Idoneidad Muy Alta (5)	
Temperatura promedio	< 2°C → Idoneidad Muy Baja (1)	Según los estándares de fabricación, una temperatura entre 18°C y 24°C es el rango óptimo de temperatura para los paneles solares fotovoltaicos. (Enel X, 2023)
	2 – 6°C → Idoneidad Baja (2)	
	>24°C →Idoneidad Media (3)	
	6 – 12°C → Idoneidad Media (3)	
	12 – 18°C → Idoneidad Alta (4)	
	18 – 24°C → Idoneidad Muy Alta (5)	
Elevación	4000–5000 msnm→Idoneidad Muy Baja (1)	Las zonas de mayor altitud presentan desventajas para la instalación de parques solares, estas áreas suelen tener condiciones climáticas más adversas, como nubosidad y tormentas. Adicional, logística de acceso y mantenimiento también puede ser más complicada y costosa debido a la dificultad de transporte en terrenos montañosos. (Saraswat *et al.*, 2021)
	3000 – 4000 msnm →Idoneidad Baja (2)	
	2000 – 3000 msnm→Idoneidad Media (3)	
	1000 - 2000 msnm → Idoneidad Alta (4)	
Elevación	0-1000 msnm → Idoneidad Muy Alta (5)	

Criterio	Normalización	Descripción
Cobertura de la Tierra	Bosques, áreas húmedas y superficies de agua → Idoneidad Muy Baja (1)	Las coberturas ideales para parques solares incluyen tierras agrícolas no productivas, zonas industriales, terrenos degradados y techos de edificios comerciales. Estas áreas permiten maximizar el uso del suelo y reducen el impacto ambiental al aprovechar espacios ya alterados. (UPME, 2023)
	Territorios Artificializados →Idoneidad Baja (2)	
	Territorios Agrícolas Idoneidad Muy Alta (5)	
Brillo Solar (Horas de Sol al día)	< 2 horas → Idoneidad Muy Baja (1)	Cuantas más horas de sol reciben los paneles, mayor es su capacidad para generar energía. En áreas con más horas de sol, los paneles pueden operar a su máxima capacidad durante más tiempo, lo que aumenta la producción de energía. (ICEX España, 2022)
	2 - 3 horas → Idoneidad Baja (2)	
	3 - 5 horas → Idoneidad Media (3)	
	5 - 7 horas → Idoneidad Alta (4)	
	7 - 9 horas → Idoneidad Muy Alta (5)	
Vocación del Suelo	Aeropuertos, Conservación de Suelos y Cuerpos de agua → Idoneidad Muy Baja (1)	Un suelo con vocación agrícola puede no ser ideal para un parque solar debido a su valor para la producción de alimentos. En cambio, terrenos áridos o con baja productividad agrícola pueden ser más adecuados, permitiendo un uso eficiente del espacio sin competir con la agricultura. (Llano, Salazar and Lopez, 2019)
	Base militar, Cantera, Forestal, Fosa de mina de carbón → Idoneidad Baja (2)	
	Agroforestal, Rellenos Sanitarios → Idoneidad Media (3)	
	Agrícola, Ganadera, Saladares, Tierra de relave de carbón y Zonas urbanas → Idoneidad Alta (4)	
	Arenal, Edificación y Represas → Idoneidad Muy Alta (5)	

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, las restricciones se normalizaron asignando un valor de 1 a las áreas disponibles para la instalación de parques solares, y un valor de 0 a las áreas con restricciones. De esta manera, se detallan los territorios donde es posible o no desarrollar proyectos de energía solar, brindando un panorama claro de las limitaciones geográficas en el territorio colombiano.

Criterio	Condición	Descripción
Potencial de energía solar PV	Rentable	El mínimo de potencial eléctrico fotovoltaico que un área debe tener para que sea rentable la instalación de un parque de energía solar es 1,200 kWh/kWp al año. (Región Administrativa y de Planeación Especial RAP-E and Universidad Distrital Francisco José de Caldas., 2020)
Cuerpos de agua	Ronda de 100 m a lado y lado.	La ronda o franja de protección de los cuerpos de agua, que incluye ríos, lagos y humedales, es de 100 metros en cada lado del cauce. (Decreto 1076 de 2015)
Riesgo de inundación	Zonas	Áreas susceptibles de inundación, zonas con alta

Criterio	Condición	Descripción
	Inundables	probabilidad de que el terreno se inunde durante la temporada de lluvias. (IDEAM, 2012)
Áreas Protegidas	Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP) capa RUNAP	Área definida geográficamente, que haya sido designada, regulada y administrada a fin de alcanzar los objetivos específicos de conservación. Las áreas protegidas son de diversos tipos y deben corresponder a una categoría de manejo, conforme el nivel de biodiversidad que protejan, su estado de conservación, el tipo de gobernanza y la escala de gestión (Decreto 1076 de 2015) (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2023).
Páramos	Áreas declaradas como Páramos	Los páramos son ecosistemas estratégicos por su papel en la regulación del ciclo hidrológico que sustenta el suministro de recurso hídrico para consumo humano y desarrollo de actividades económicas de más del 70% de la población colombiana. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)
Zonas con alto valor arqueológico	Áreas Arqueológicas Protegidas delimitadas por el ICAHN	Los parques arqueológicos son una figura administrativa de manejo y gestión de un área arqueológica protegida cuyas características museables, expositivas y socioculturales propician la visita regular de públicos para su puesta en valor, apropiación social y disfrute del patrimonio arqueológico. (ICANH, 2019)
Territorios étnicos	Áreas declaradas como Resguardos Indígenas, Comunidades negras y Zonas de Reserva Campesina por la ANT.	Clasificaciones territoriales que tienen el objetivo de proteger y reconocer los derechos territoriales de las comunidades que las habitan. Estas categorías son fundamentales para la protección de los derechos territoriales de las comunidades indígenas, afrodescendientes y campesinas, y son parte de un marco legal más amplio que busca asegurar la diversidad cultural y el respeto por los modos de vida de estas comunidades en Colombia. (Agencia Nacional de Tierras, 2024)

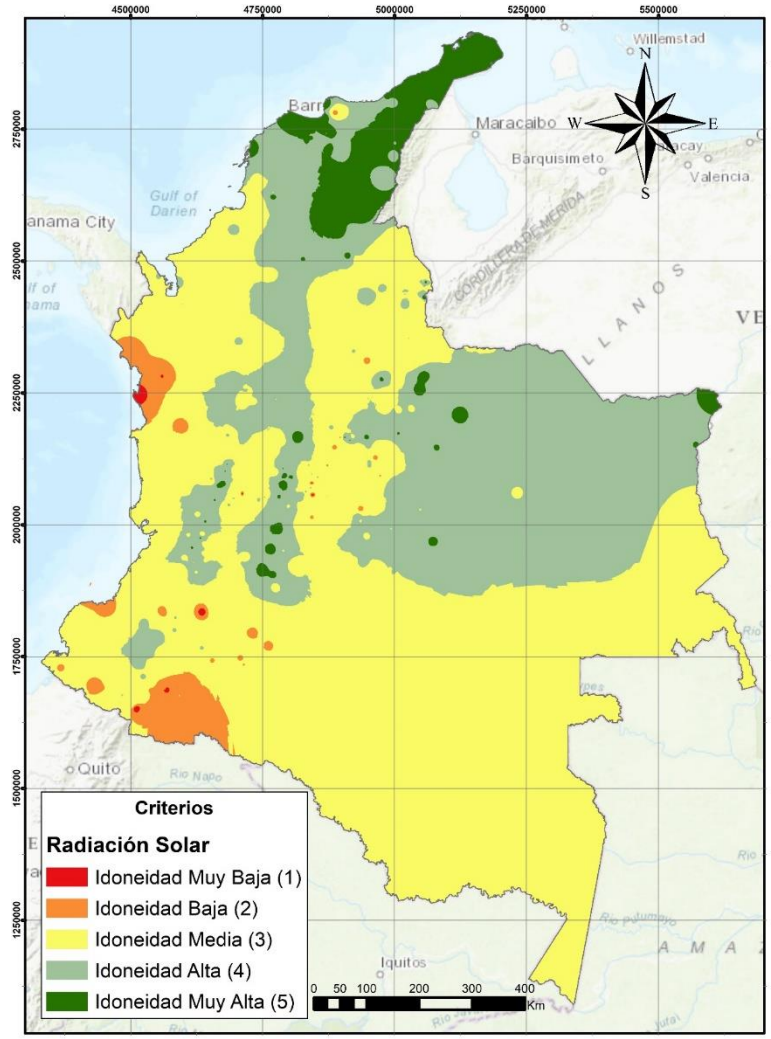
Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Especialización de criterios que viabilizan

A continuación, se presentan los mapas correspondientes a cada uno de los criterios que viabilizan la ubicación de plantas de energía solar fotovoltaica en Colombia. Estos mapas permiten visualizar las zonas idóneas del país según cada criterio evaluado, así como sus características específicas. Cada mapa resalta las áreas con diferentes niveles de idoneidad, clasificados en función de la radiación solar, la pendiente del terreno, la orientación, la temperatura promedio, la elevación, la cobertura de la tierra, el brillo solar y

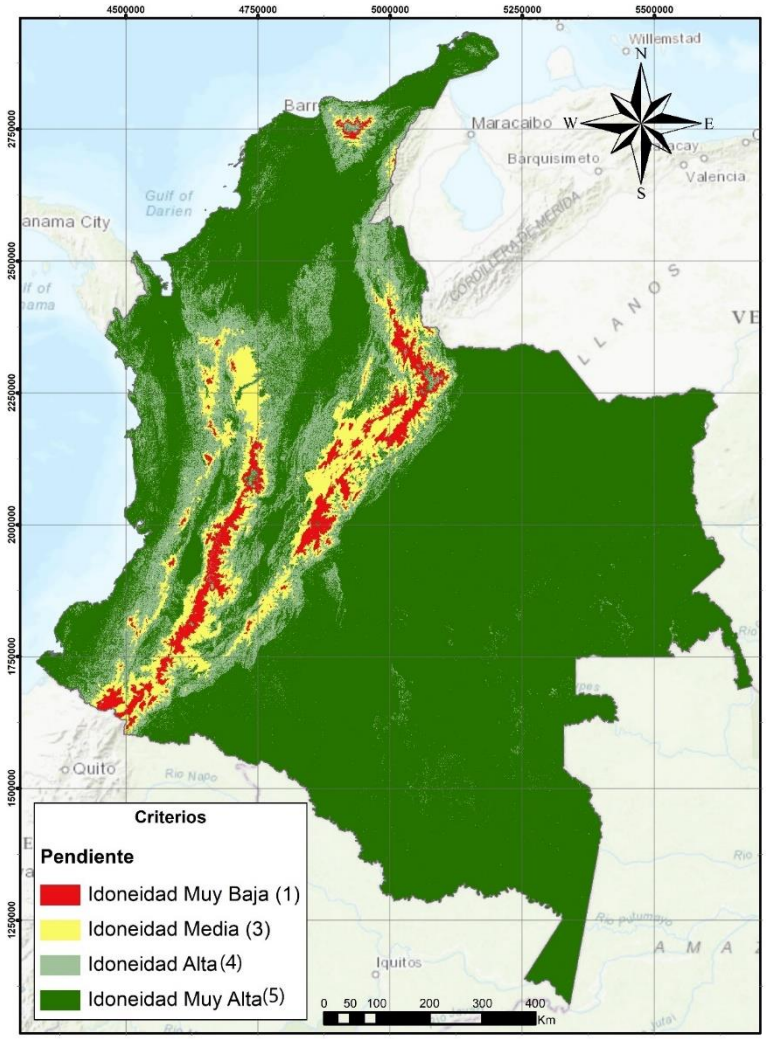
la vocación del suelo. Esta representación geoespacial no solo facilita la identificación de las regiones más adecuadas para la instalación de paneles solares, sino que también proporciona una base sólida para comprender cómo cada criterio contribuye a la viabilidad del proyecto en términos de eficiencia energética y sostenibilidad. Al analizar estos mapas, se pueden discernir patrones geográficos que apoyan la toma de decisiones informadas en la planificación de futuras instalaciones de energía solar en el país.

Figura 5-1 Idoneidad criterio Radiación Solar



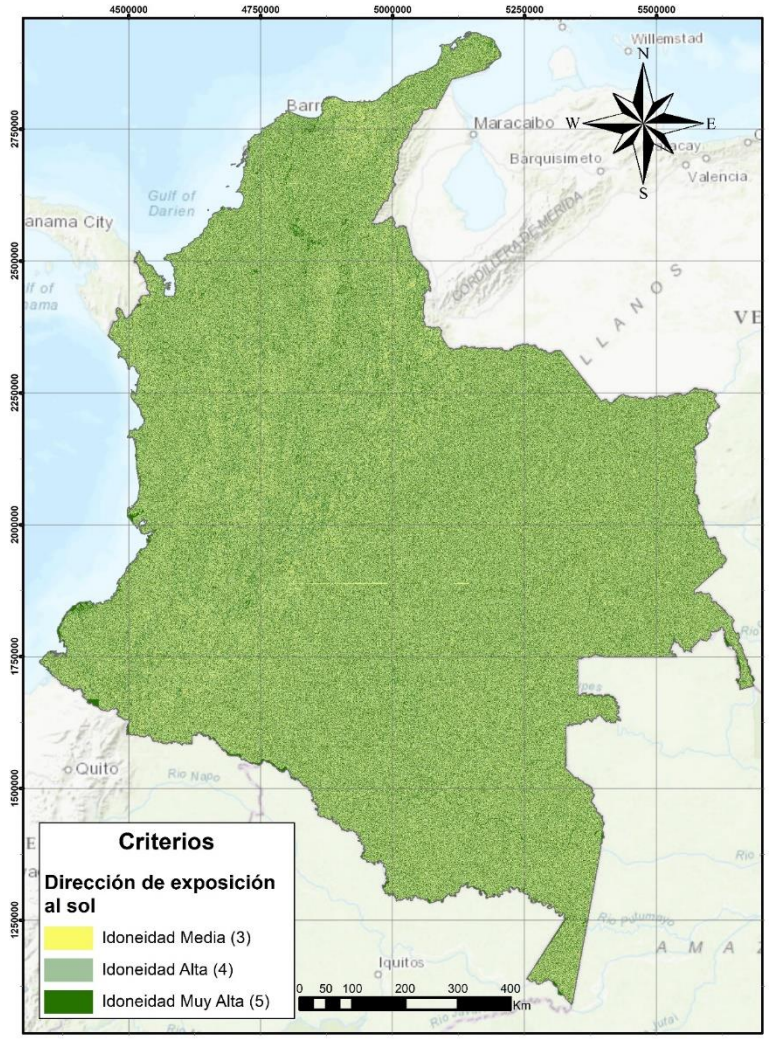
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-2 Idoneidad criterio Pendiente



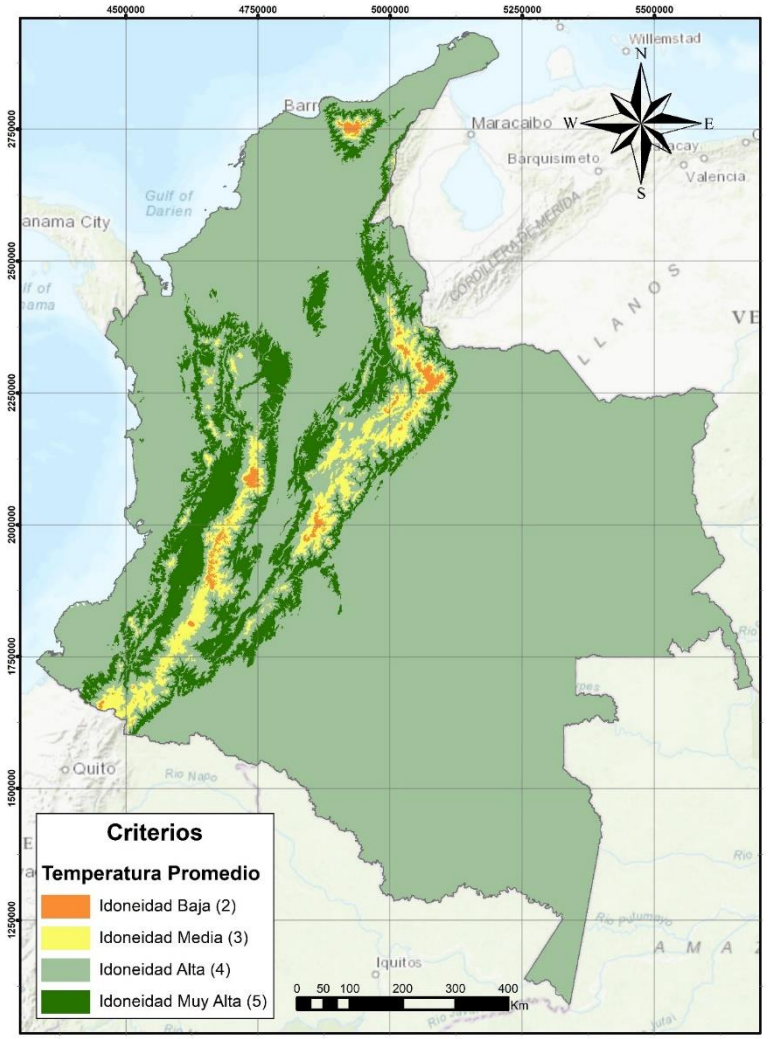
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-3 Idoneidad criterio Dirección de exposición al Sol



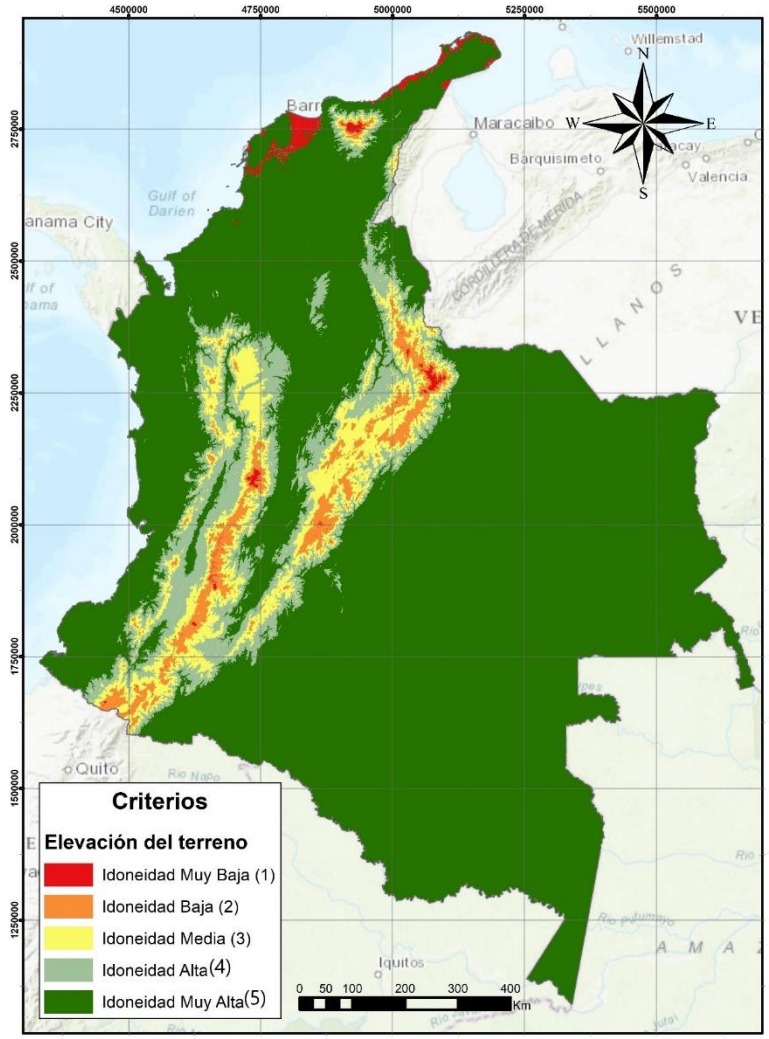
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-4 Idoneidad criterio Temperatura Promedio



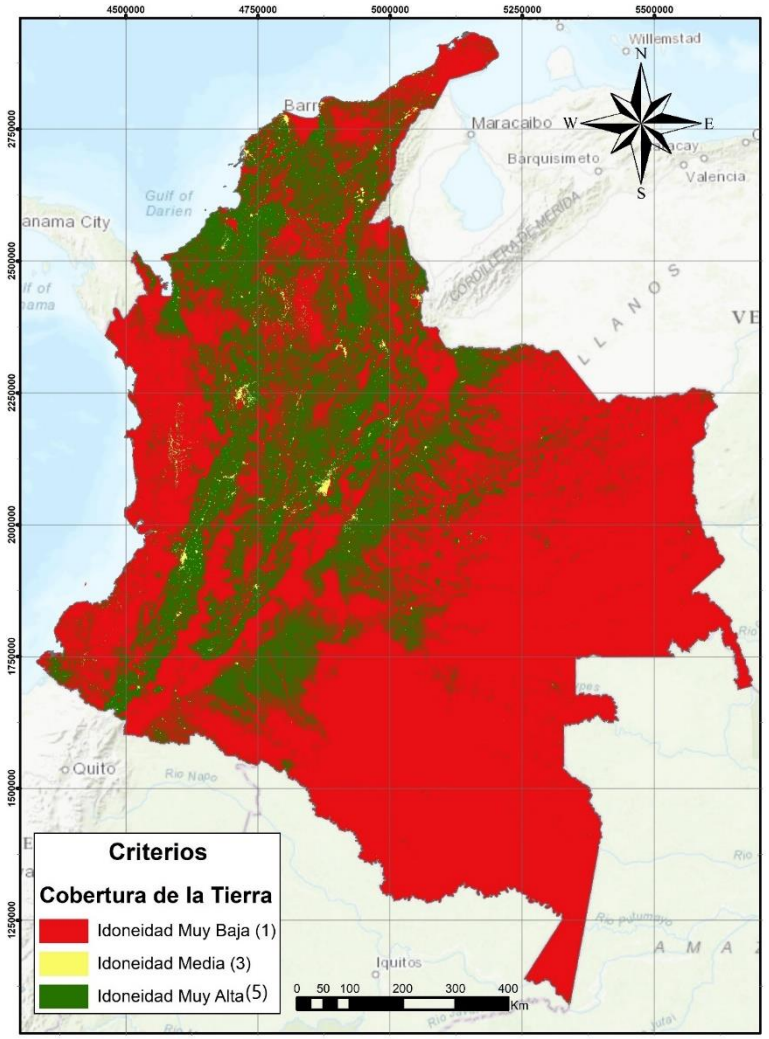
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-5 Idoneidad criterio Elevación del terreno



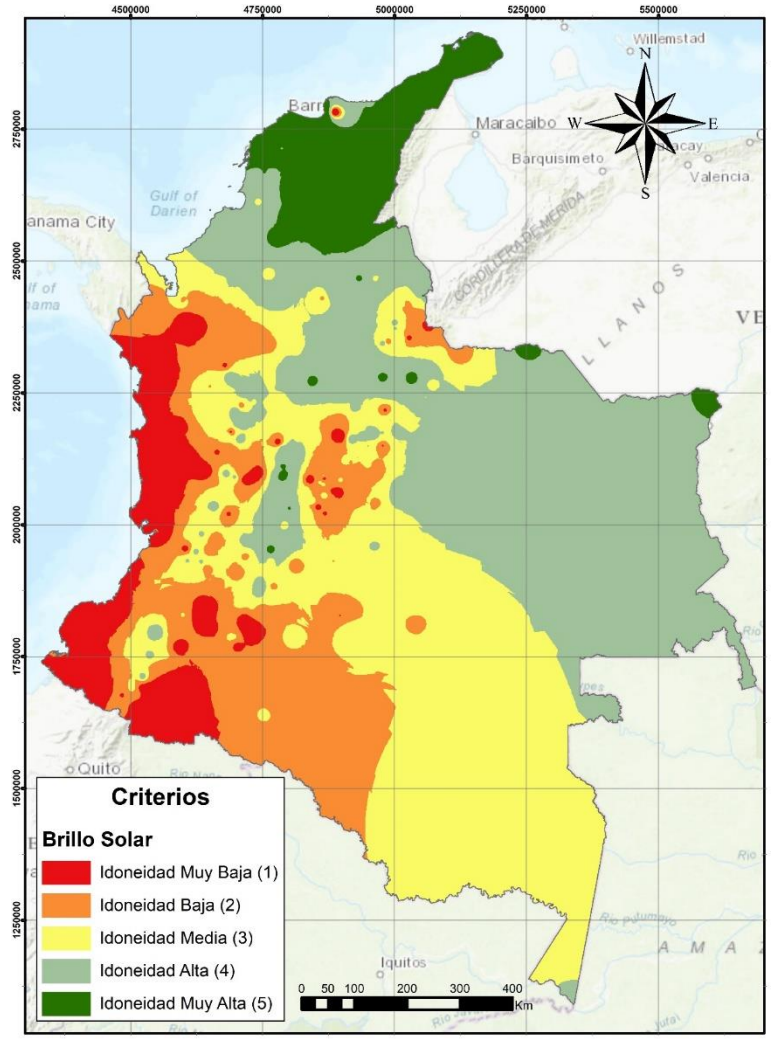
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-6 Idoneidad criterio Cobertura de la Tierra



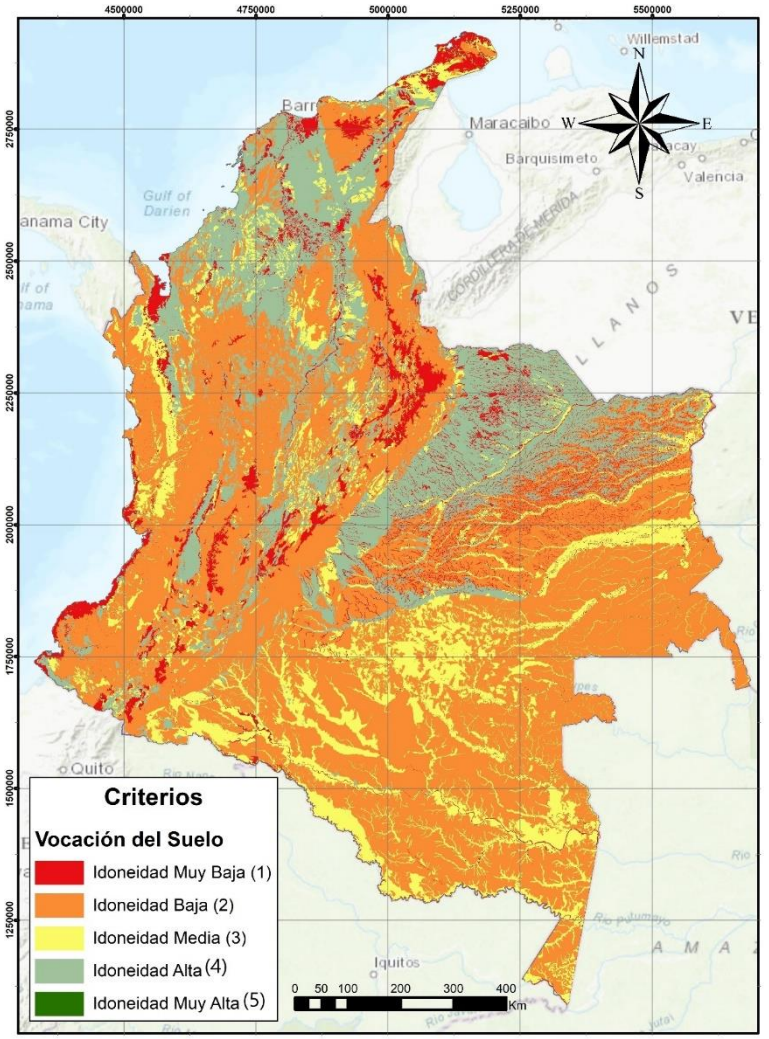
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-7 Idoneidad criterio Brillo Solar



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-8 Idoneidad criterio Vocación del Suelo

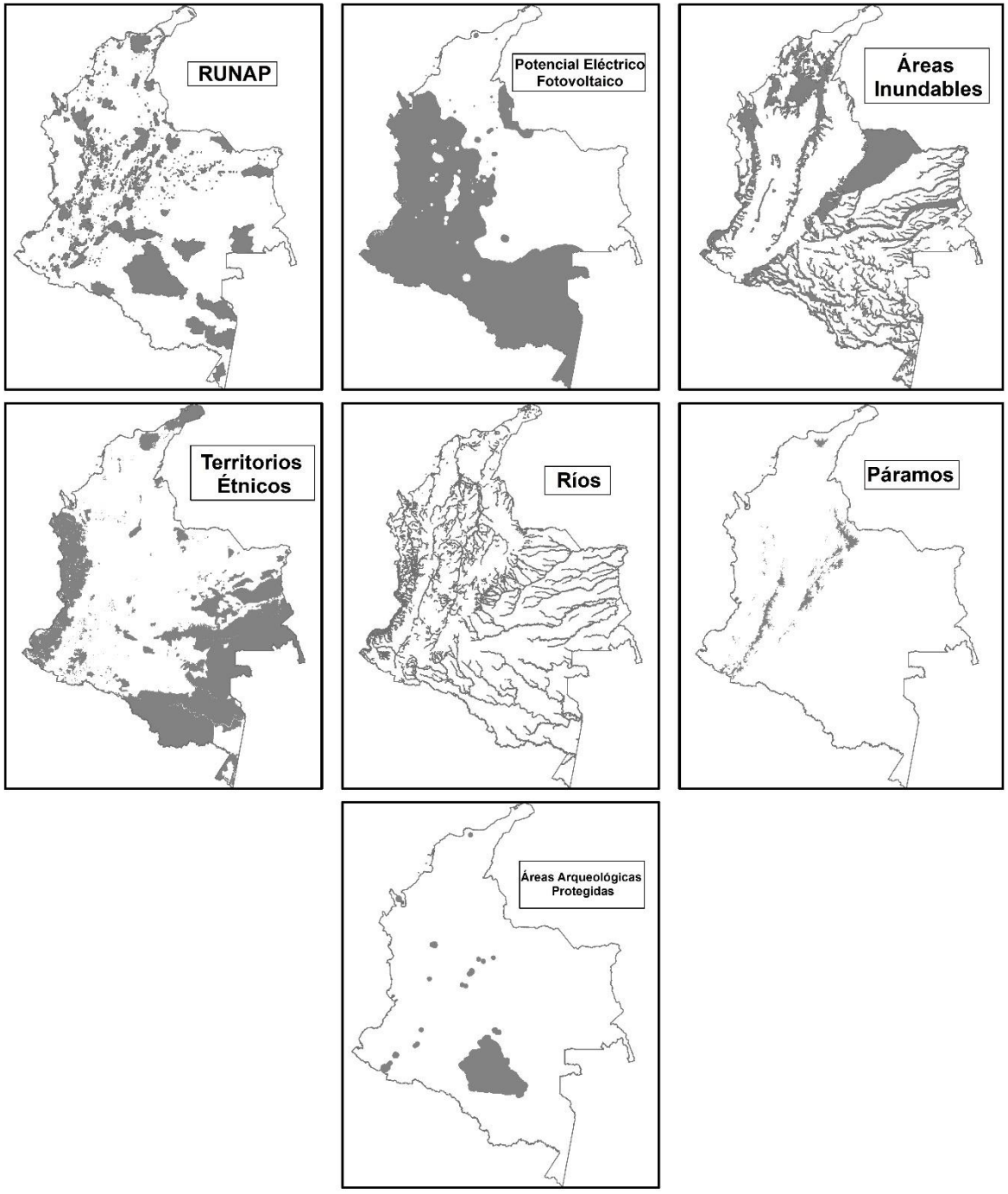


Fuente: Elaboración propia

5.2.3 Espacialización de las restricciones

A continuación, se presentan los mapas de restricciones, los cuales muestran las áreas del territorio colombiano que presentan limitaciones para el desarrollo de proyectos sin la obtención de permisos adicionales.

Figura 5-9 Restricciones

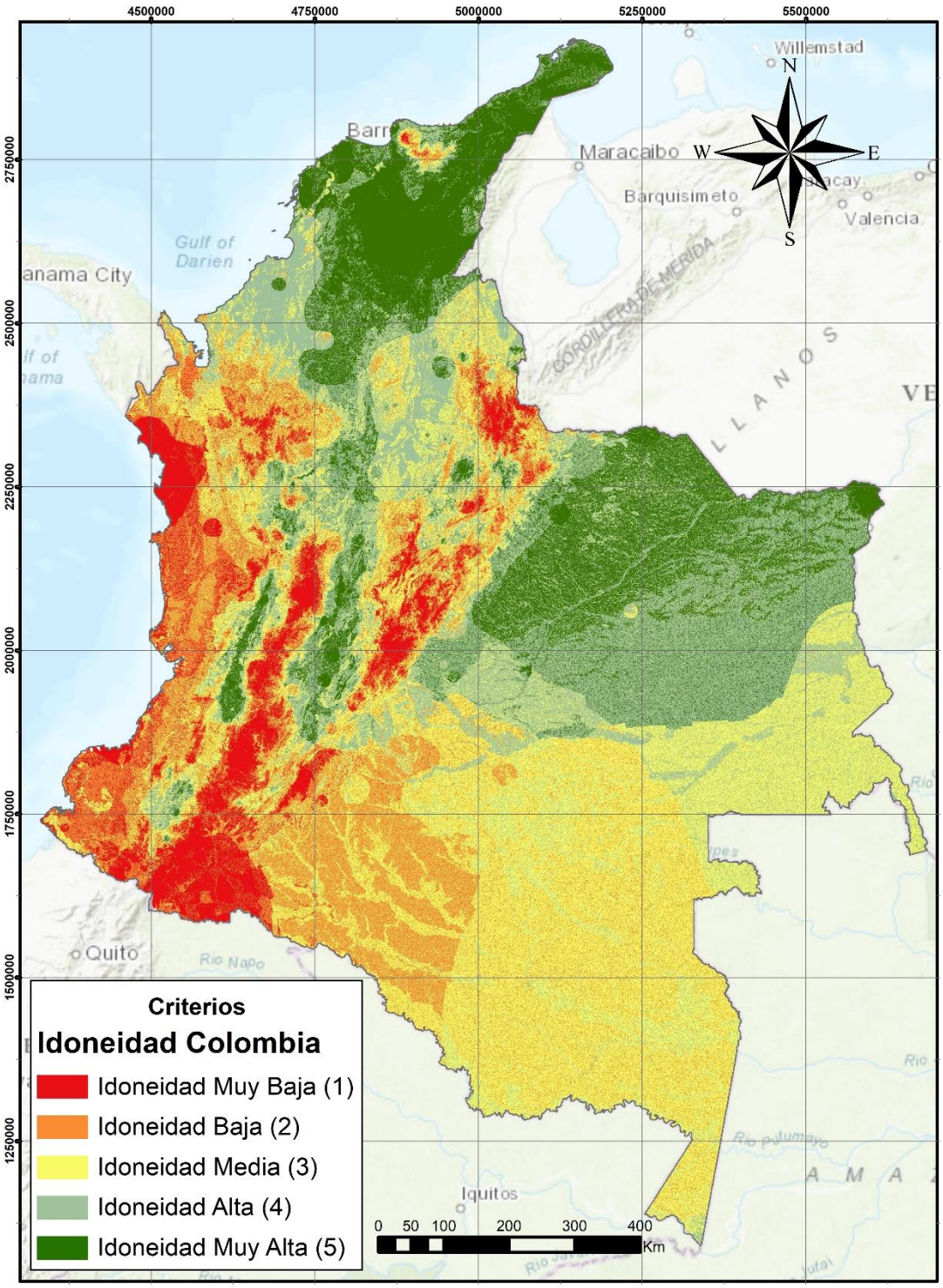


Fuente: Elaboración propia

5.2.4 Mapas de idoneidad

El siguiente mapa presenta la zonificación de idoneidad para la instalación de plantas solares fotovoltaicas en todo el territorio continental colombiano, resultado de la suma ponderada de los criterios que viabilizan el desarrollo de estos proyectos. En este mapa, las áreas en color verde representan las zonas con idoneidad muy alta, es decir, aquellas que cumplen con las condiciones óptimas para la implementación de parques solares. En contraste, las áreas en color rojo muestran las zonas con idoneidad muy baja, donde las condiciones no son favorables para este tipo de proyectos. Las diferentes tonalidades entre verde y rojo reflejan la gradación de la idoneidad, permitiendo identificar claramente las áreas más adecuadas para aprovechar el potencial solar del país.

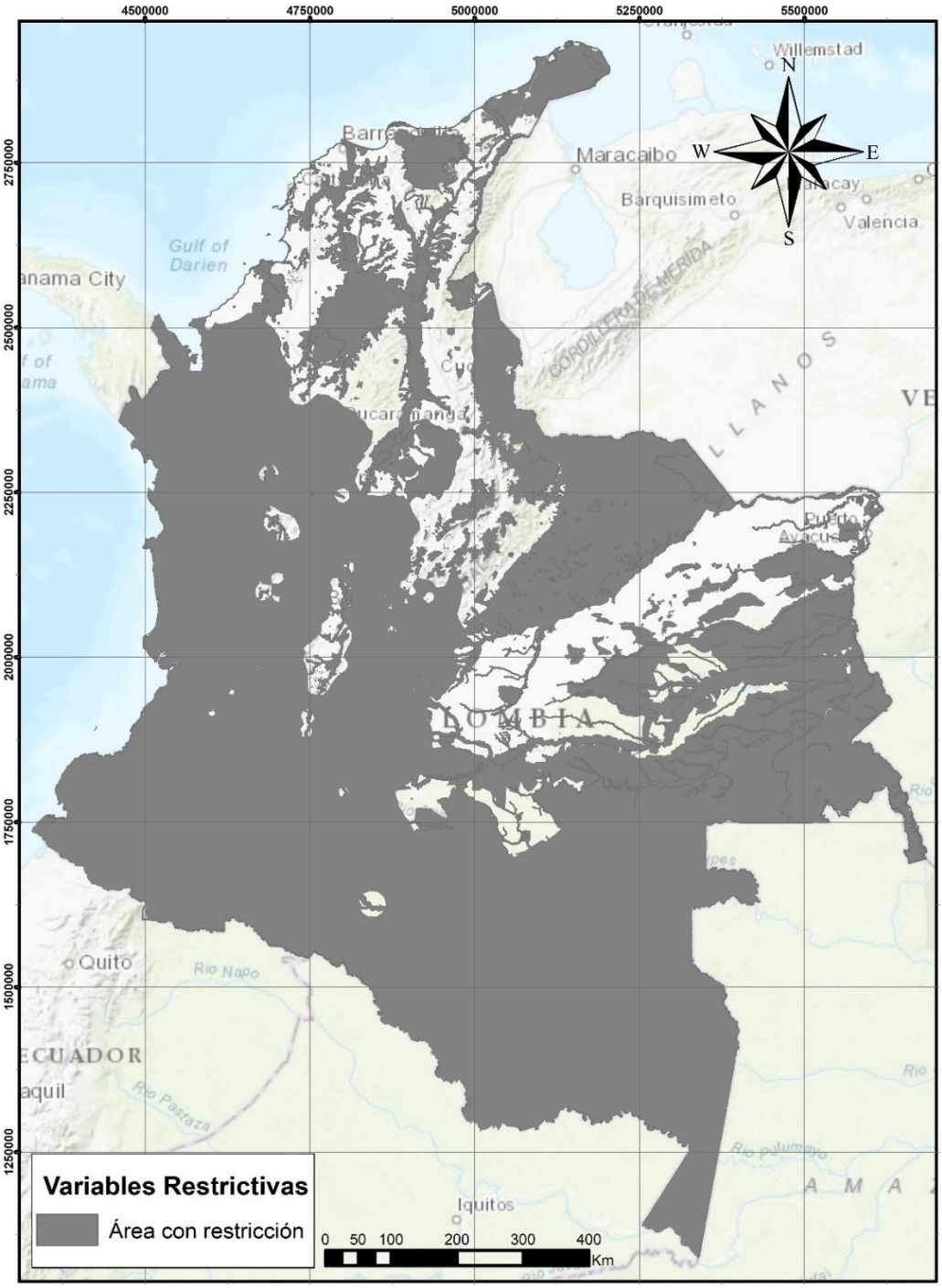
Figura 5-10 Mapa Idoneidad Colombia



Fuente: Elaboración propia

El siguiente mapa permite identificar las regiones donde existen restricciones legales, ambientales o técnicas, resultado de la suma de todas las áreas con restricción identificadas en el numeral 5.3.3.

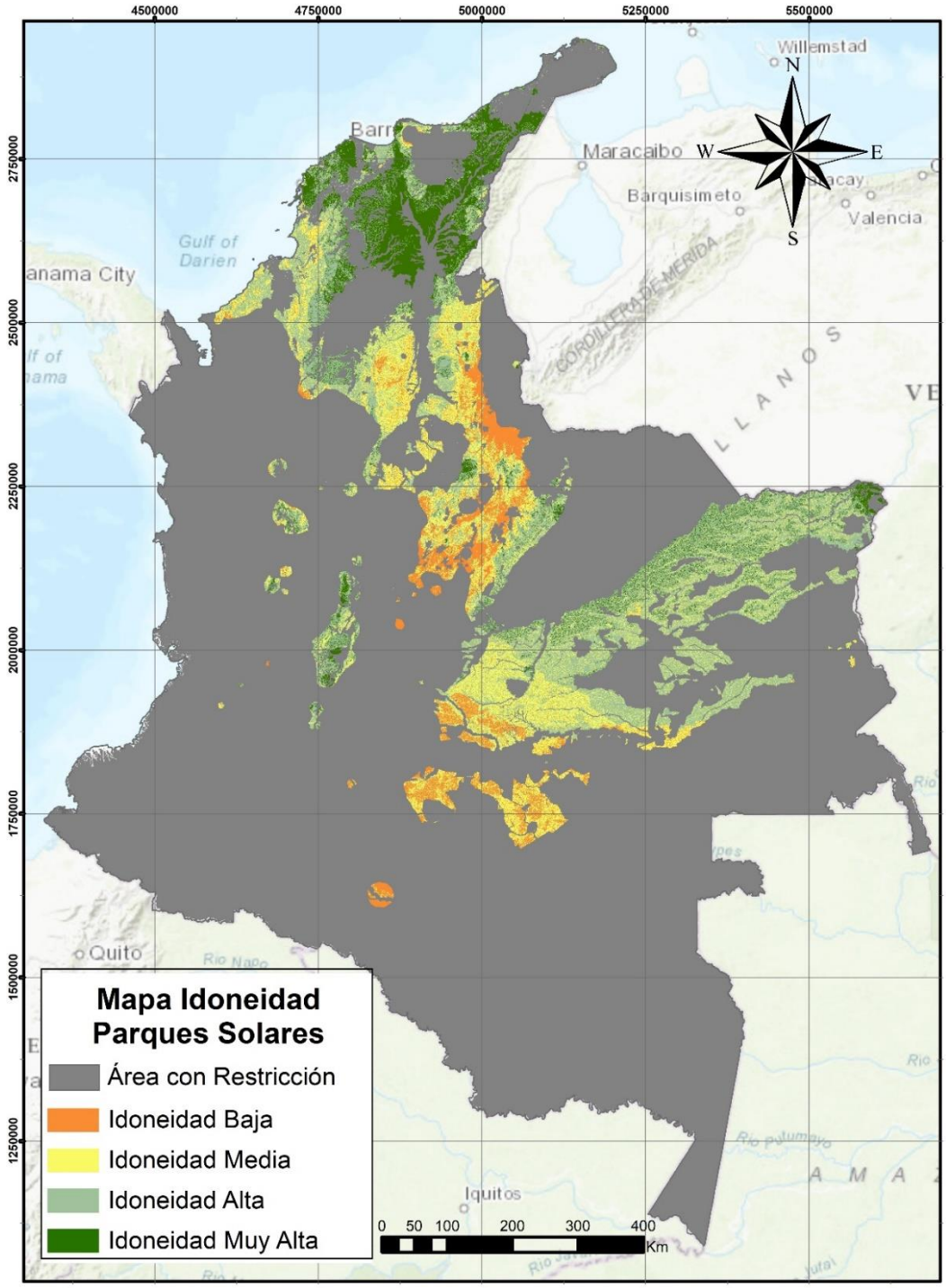
Figura 5-11 Mapa Áreas con Restricciones



Fuente: Elaboración propia

El mapa final integra tanto la clasificación de idoneidad de las áreas sin restricción como las áreas con restricción en todo el territorio continental colombiano.

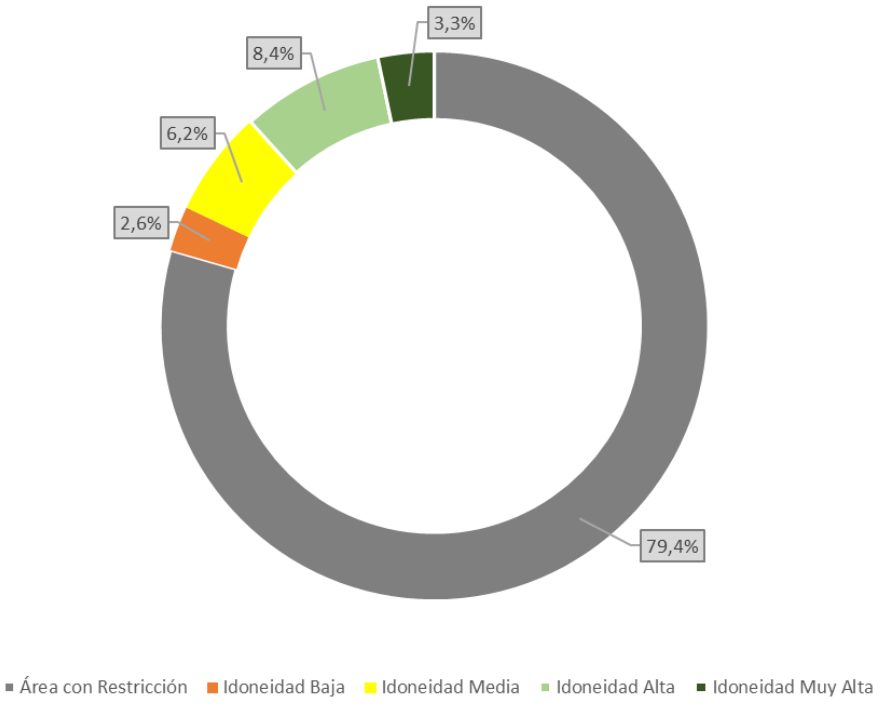
Figura 5-12 Mapa Idoneidad de las áreas sin restricción



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos tras la aplicación del álgebra de mapas, que combina la ponderación de criterios viabilizadores y la multiplicación por las restricciones identificadas, revelan una distribución clara de las áreas aptas para la instalación de parques solares en el territorio continental colombiano. Se observa que un 79,4% del territorio presenta algún tipo de restricción, lo que implica que gran parte del país tiene limitaciones significativas para el desarrollo de proyectos fotovoltaicos, ya sea por razones ambientales, sociales o normativas. Sin embargo, dentro del 20,6% restante, se identifican zonas con diferentes grados de idoneidad: un 2,6% del territorio tiene idoneidad baja, lo que sugiere que estas áreas podrían no ser óptimas sin intervenciones adicionales; un 6,2% presenta idoneidad media, lo que indica un potencial moderado para la implementación de proyectos; un 8,4% muestra idoneidad alta, siendo regiones con condiciones favorables; y finalmente, un 3,3% del territorio se clasifica como de idoneidad muy alta, representando las zonas más propicias para la instalación de parques solares, con óptimas condiciones de irradiación y mínimas restricciones. Estos resultados destacan la necesidad de focalizar los esfuerzos de desarrollo de proyectos solares en áreas con alta y muy alta idoneidad, al tiempo que se gestionan cuidadosamente las restricciones en gran parte del país.

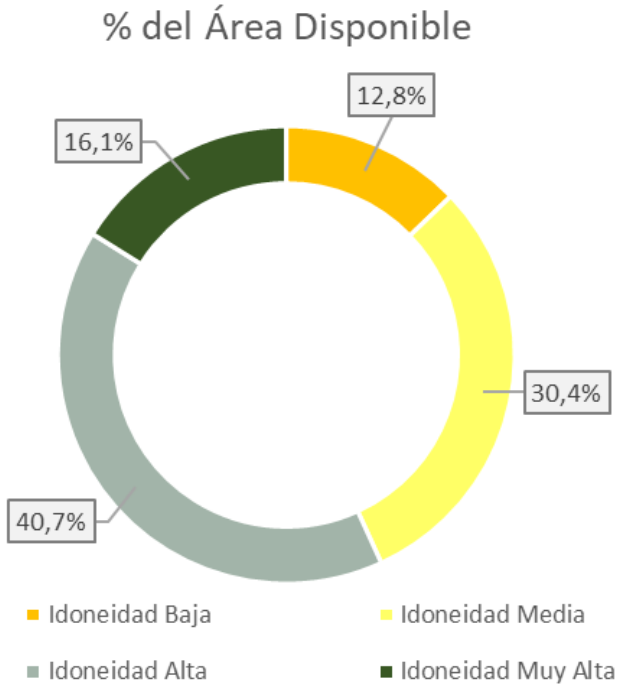
Figura 5-13 Porcentaje de Idoneidad del Área Total



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos después de aplicar el álgebra de mapas muestran que el 20,6% del territorio continental colombiano, que corresponde a aproximadamente 235,198 km², es considerado como área disponible para la instalación de parques solares, mientras que el 79,4% restante tiene algún tipo de restricción. Dentro de este 20,6% de áreas disponibles, se identificaron diferentes grados de idoneidad: 12% del área disponible presenta idoneidad baja, 30,4% tiene idoneidad media, 40,7% muestra idoneidad alta, y un 16,1% tiene idoneidad muy alta. Esto equivale a aproximadamente 28,224 km² de idoneidad baja, 71,089 km² de idoneidad media, 95,671 km² de idoneidad alta, y 37,214 km² de idoneidad muy alta.

Figura 5-14 Porcentaje de Idoneidad del Área sin Restricción



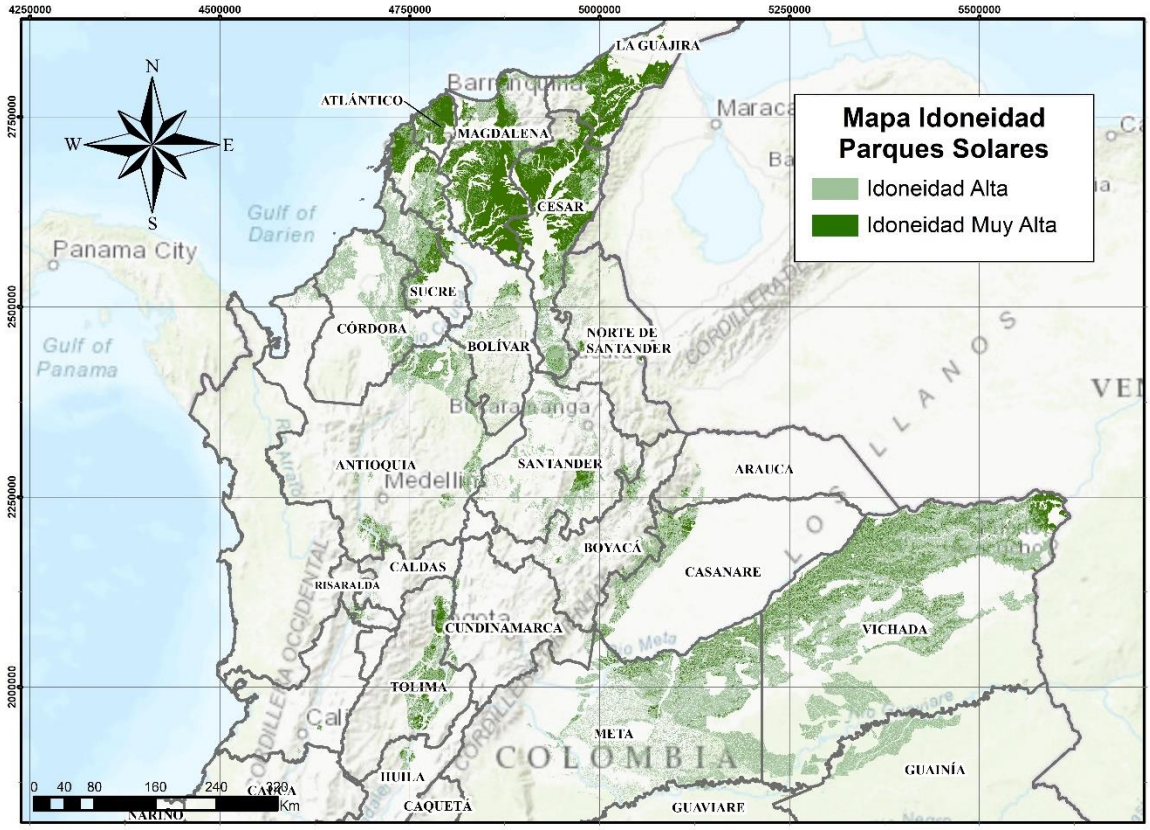
Fuente: Elaboración propia

Estos resultados destacan que, aunque una gran parte del territorio colombiano está restringido para el desarrollo de proyectos solares, las áreas disponibles cuentan con un potencial significativo, especialmente en las zonas clasificadas con idoneidad alta y muy alta. La evaluación de los criterios viabilizadores – como la radiación solar, la pendiente, la orientación del terreno, la temperatura promedio, la elevación, la cobertura de la tierra, el brillo solar y la vocación del suelo – permitió normalizar estos factores en una escala de 1 a 5, donde 5 representa idoneidad muy alta. La aplicación de estas ponderaciones, junto

con las restricciones (como áreas protegidas por el RUNAP, riesgo de inundación, territorios étnicos, ríos, páramos y áreas arqueológicas protegidas), generó un ráster final en el que las áreas con restricciones quedaron excluidas (valor cero), y las áreas sin restricción mostraron un rango de idoneidad entre 2,3 y 4,88, los cuales indican que, aunque no se encontraron áreas con todos los criterios en su máximo valor, las zonas restringidas presentan un potencial moderado a alto para proyectos solares, si bien con limitaciones que deben gestionarse.

Este análisis confirma que las áreas disponibles presentan un potencial significativo, con mayor concentración en zonas con idoneidad alta y muy alta, lo que refuerza la viabilidad de proyectos fotovoltaicos en estos lugares. Además, la ausencia de valores extremos (ni 1 ni 5) refleja que las áreas seleccionadas no presentan condiciones completamente adversas ni óptimas, sino que requieren un análisis detallado y la gestión de ciertos criterios para maximizar su potencial.

Figura 5-15 Idoneidad Alta y Muy Alta



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos indican que los departamentos del norte de Colombia, como La Guajira, Magdalena, Atlántico, Cesar y Sucre, concentran las mayores áreas con idoneidad alta y muy alta para la instalación de parques solares. Esta tendencia es coherente con los altos niveles de radiación solar que caracterizan la región Caribe, donde se registran valores superiores a los 5 kWh/m²/día, lo que la convierte en una de las zonas con mayor irradiación en el país. Además, los factores de pendiente suave y baja cobertura vegetal contribuyen a la viabilidad de estos departamentos para proyectos solares a gran escala.

Asimismo, en los departamentos del Vichada y el Meta, ubicados en la región de los Llanos Orientales, también se identifican áreas con idoneidad alta y muy alta. Estas regiones, aunque no tan privilegiadas en términos de irradiación como la costa Caribe, tienen amplias zonas de terreno plano y despejado, lo que favorece la instalación de plantas solares de gran extensión.

Departamentos como Tolima, Huila, Risaralda, Antioquia y Santander también presentan zonas con idoneidad alta y muy alta, en parte debido a su variada topografía, con regiones de menor elevación y mejor orientación para captar radiación solar. Estas zonas, aunque con menos áreas disponibles que las regiones del norte y los Llanos, cuentan con potenciales significativos en áreas específicas, favorecidas por la combinación de brillo solar, vocación del suelo y pendiente adecuada.

Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que destacan las regiones del Caribe y los Llanos Orientales como las más aptas para proyectos solares en Colombia, debido a sus condiciones climáticas y geográficas favorables. Además, las zonas intermedias en el interior del país, como el Tolima y el Huila, confirman que, aunque no cuentan con una irradiación tan alta, poseen otras características que viabilizan el desarrollo de parques fotovoltaicos.

Considerando que el área total de Colombia continental es de 1.141.748 km², el 3,3% del territorio disponible clasificado como de idoneidad muy alta para la instalación de plantas solares corresponde a aproximadamente 37.677 km². Dado que se requiere en promedio 15 km² para generar 1 GW de energía solar, estas áreas tendrían el potencial de albergar una capacidad instalada aproximada de 2.511 GW. Este resultado demuestra el inmenso potencial de Colombia para expandir su capacidad de generación de energía solar, lo que

contribuiría de manera significativa a la transición energética hacia fuentes renovables en el país.

Para poner en contexto el potencial de 2.511 GW de capacidad instalada en áreas de alta idoneidad solar en Colombia, es útil compararlo con el consumo energético actual del país y de Bogotá. Colombia tiene un consumo de energía promedio anual de aproximadamente 80 TWh (teravatios hora), con una capacidad instalada de generación eléctrica cercana a 18 GW, donde la mayor parte proviene de fuentes hídricas. Bogotá, por su parte, consume alrededor de 8 TWh anuales, lo cual representa casi el 10% del consumo nacional.

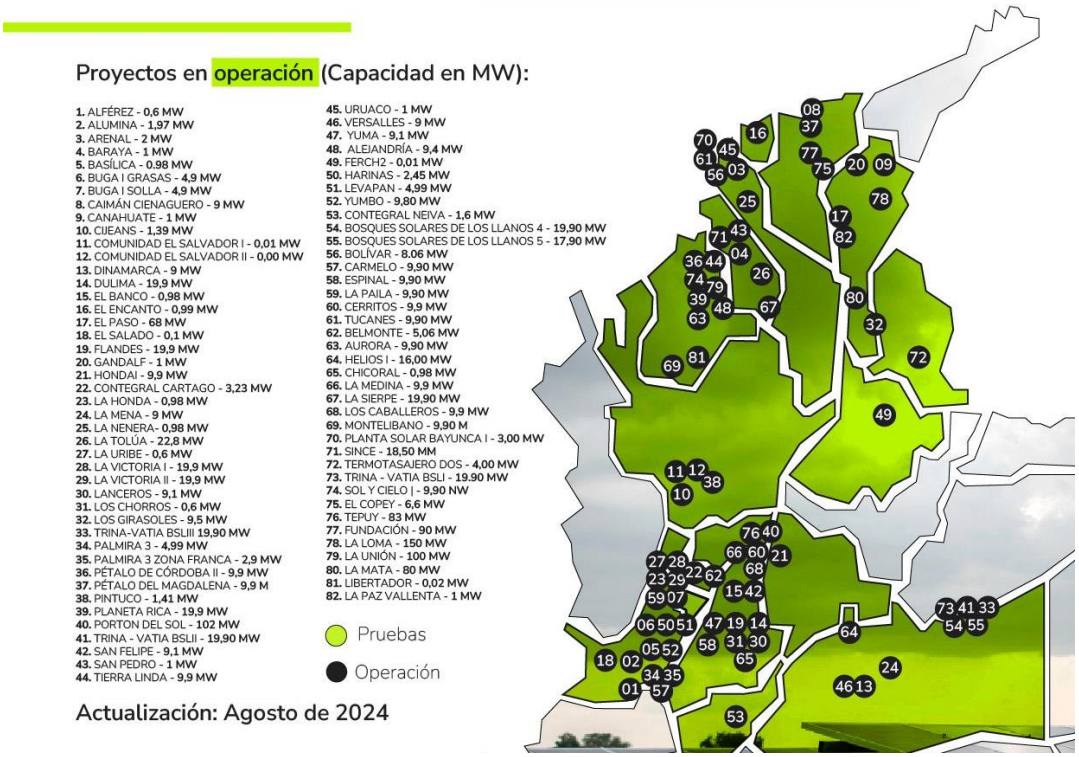
Aunque una capacidad potencial de 2.511 GW en energía solar parece alta, esta cifra se basa en la capacidad instalada teórica bajo condiciones ideales. En la práctica, la energía solar tiene un factor de capacidad de entre el 15% y el 25% debido a la variabilidad de la radiación solar, la cual solo es óptima durante horas pico y depende de la irradiancia y el clima local. Esto significa que, de los 2.511 GW instalados, solo se podría utilizar una fracción constante, equivalente al rango entre 376 GW y 628 GW efectivos, en promedio anual. Además, el uso efectivo se concentraría en las horas de mayor radiación solar, aproximadamente entre 4 a 5 horas diarias, lo que limita la disponibilidad constante para suplir la demanda. Aun así, esta capacidad instalada teórica permitiría suplir significativamente la demanda energética nacional y avanzar en la diversificación energética del país, reduciendo la dependencia de fuentes fósiles y mejorando la sostenibilidad del sistema energético colombiano.

5.3 Validación del Modelo

En este apartado se llevará a cabo una validación del modelo mediante la comparación entre los resultados obtenidos con el modelo de selección de sitios óptimos para la instalación de parques solares y la ubicación actual de los proyectos solares en Colombia, específicamente aquellos reportados por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME).Este análisis se centrará en proyectos que cuentan con una capacidad instalada de 100 MW o más, permitiendo evaluar la congruencia entre las áreas identificadas como idóneas en el modelo y las decisiones de localización adoptadas en la práctica. Al examinar esta relación, se busca no solo validar la efectividad del modelo propuesto, sino también identificar posibles discrepancias y oportunidades para optimizar la planificación de futuras

instalaciones de energía solar en el país, promoviendo así un desarrollo energético más sostenible y alineado con las necesidades territoriales y ambientales.

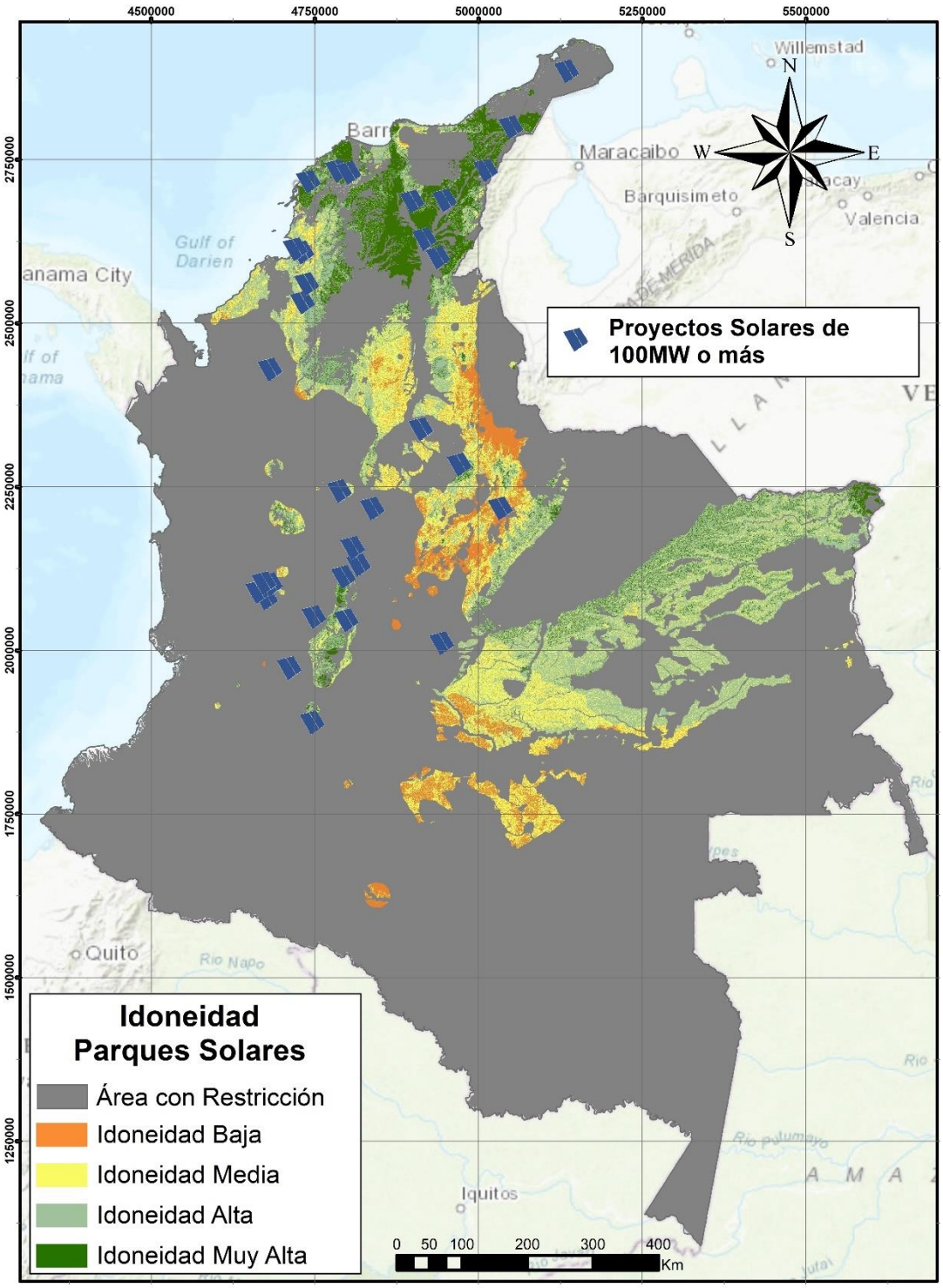
Figura 5-16 Proyectos en operación UPME



Fuente: (UPME, 2024)

De los 82 proyectos que se listan en la figura anterior, 39 tienen una capacidad instalada de 100MW o más. En la siguiente figura, se presenta el mapa del modelo final con la ubicación de los proyectos solares en Colombia con una capacidad instalada de 100 MW o más, de acuerdo con la georreferenciación de los 39 proyectos identificados. Al superponer los puntos de los proyectos sobre el modelo, se busca evaluar la efectividad del análisis multicriterio realizado.

Figura 5-17 Superposición de los proyectos solares con el modelo



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la validación del modelo y de la comparación entre la ubicación de los proyectos solares y el modelo de selección de sitios óptimos revelan que 7 de los 39 proyectos, que cuentan con una capacidad instalada de 100 MW o más, se encuentran ubicados en áreas clasificadas como restringidas según los criterios del modelo. En la siguiente tabla se analizan los proyectos en detalle para identificar las restricciones específicas que les corresponden o su respectiva clasificación de idoneidad. Los demás proyectos se distribuyen en diferentes categorías de idoneidad, lo que indica que han sido ubicados en zonas con características más favorables para la instalación de plantas solares.

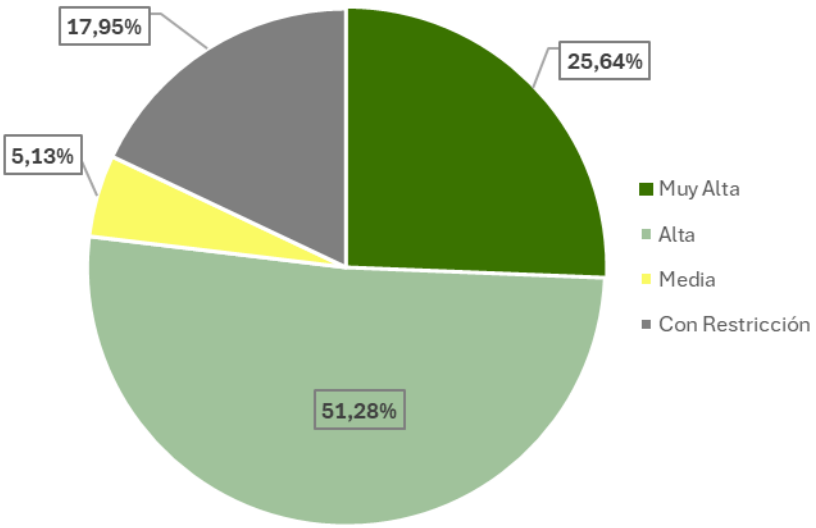
Nombre Proyecto	**Departamento**	**Municipio**	**Idoneidad**
Granja Solar Chivo Mono I	La Guajira	Albania	Alta
Parque Solar Porto 3	Valle Del Cauca	Ansermanuevo	Alta
Aes Solar 3	Tolima	Armero	Alta
Guadero	Tolima	Armero	Alta
Parque Solar Estancia 3	Risaralda	Balboa	Alta
Fotovoltaica Yariguíes	Santander	Barrancabermeja	Media
Helios Cabrera	Santander	Cabrera	Muy Alta
Parque Solar Valle Del Cauca	Valle Del Cauca	Cartago	Con Restricción por Potencial Eléctrico fotovoltaico
Mendarco	Tolima	Chaparral	Con Restricción por Potencial Eléctrico fotovoltaico
Parque Solar Malibú 1	Córdoba	Chinu	Alta
Parque Solar Delta 1	Córdoba	Chinu	Alta
Ariguaní	Cesar	Chiriguana	Alta
Parque Solar San José	Cesar	El Copey	Muy Alta
Parque Solar Delta 3	Cesar	El Copey	Muy Alta
Parque Solar Malibu 3	Cesar	El Copey	Muy Alta
Planta Fotovoltaica Solar Guardientera - Pv	La Guajira	El Molino	Muy Alta
Sc Solar San Martin	Cesar	El Paso	Muy Alta
Solar Puerta De Oro	Cundinamarca	Guaduas	Alta
Shangri-La	Tolima	Ibagué	Con Restricción por Potencial Eléctrico fotovoltaico
Amanecer	Caldas	La Dorada	Alta
Otún	Risaralda	La Virginia	Alta
San Jorge Fotovoltaico	Córdoba	Montelíbano	Con Restricción por Potencial Eléctrico fotovoltaico
Barzalosa	Cundinamarca	Nariño	Alta
Achigua	Huila	Neiva	Alta
Parque Solar Guáyelo	Atlántico	Ponedera	Alta

Nombre Proyecto	Departamento	Municipio	Idoneidad
Parque Solar Fotovoltaico Melgar	Boyacá	Puerto Boyacá	Con Restricción por Potencial Eléctrico fotovoltaico
Canario Solar	Atlántico	Sabanalarga	Muy Alta
Solar Sahagún	Córdoba	Sahagún	Alta
Corozalito	Córdoba	Sahagún	Alta
Tamarino	Antioquia	San Carlos	Alta
Parque Solar San Mateo 2	Bolívar	Santa Rosa	Muy Alta
Parque Solar San Isidro	Bolívar	Santa Rosa	Muy Alta
Helios Nueva Esperanza	Cundinamarca	Soacha	Alta
Parque Solar Malibú 2	Sucre	Tolú	Alta
Parque Solar Estancia 2	Sucre	Toluviejo	Alta
Parque Eólico Trupillo	La Guajira	Uribia	Con Restricción por Territorio Étnico, Resguardo Indígena Wayuu
Parque Solar Valledupar	Cesar	Valledupar	Muy Alta
Surinema	Meta	Villavicencio	Con Restricción por Inundación
Bosques Solares De Los Llanos 8	Meta	Villavicencio	Con Restricción por Inundación

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la UPME y el modelo.

Los resultados de la validación indican que, de los 39 proyectos solares georreferenciados, 10 se encuentran en áreas de idoneidad muy alta, 20 en idoneidad alta, 2 en idoneidad media y 7 en zonas con restricciones según el modelo. De estos 7 proyectos en áreas restringidas, 1 está afectado por la restricción de Territorio Étnico, específicamente en el Resguardo Indígena Wayuu, mientras que 2 se encuentran en áreas susceptibles de inundación. Los 4 proyectos restantes están restringidos debido al potencial eléctrico fotovoltaico, el cual fue establecido en 1200 kWh/kWp.

Figura 5-18 Idoneidad de los proyectos actuales según modelo



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la UPME y el modelo.

Estos resultados demuestran que el modelo logró una clasificación precisa y coherente, dado que la mayoría de los proyectos se encuentran en zonas de idoneidad alta y muy alta, lo que valida la robustez del análisis. En cuanto a la restricción del potencial eléctrico fotovoltaico, es importante señalar que, aunque puede limitar la eficiencia de los paneles solares en ciertas áreas, no requiere permisos adicionales. Esta restricción es gestionable, ya que se refiere más a la capacidad de los paneles para generar energía eficientemente en función de la radiación disponible, lo que significa que, con tecnologías adecuadas y estrategias de optimización, su impacto puede ser mitigado.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Los resultados obtenidos del modelo de análisis espacial multicriterio, utilizando 8 criterios que viabilizan la ubicación de proyectos solares y 7 que restringen, han proporcionado una visión clara de las áreas del país con mayor potencial para la instalación de parques solares. Se encontró que el 79,4% del territorio continental colombiano presenta algún tipo de restricción, dejando un 20,6% disponible para la instalación de plantas solares. De este porcentaje, el 16,1% tiene una idoneidad muy alta y el 40,7% una idoneidad alta. Estos hallazgos permiten visualizar claramente las oportunidades y limitaciones geográficas del país para la expansión de la energía solar.

La validación del modelo con los proyectos solares reportados por la UPME demuestra la solidez y precisión del análisis espacial realizado. De los 39 proyectos de más de 100 MW, el 82,02% se encuentra el área sin restricción, el 76,92% se encuentra en áreas de idoneidad alta o muy alta, lo que confirma que el modelo identifica con eficacia las zonas más favorables para la instalación de plantas solares en Colombia. Solo 7 proyectos quedaron ubicados en áreas con restricciones, y de estos, la mayoría se debe a la restricción del potencial eléctrico fotovoltaico, esta es una restricción gestionable mediante tecnologías adecuadas, sin que requiera permisos adicionales.

Si bien el potencial eléctrico fotovoltaico fue una de las principales restricciones encontradas para algunos proyectos reportados por la UPME, se concluye que esta no representa un impedimento insalvable, sino más bien un reto técnico, que puede ser gestionado mediante la optimización de los paneles solares instalados.

A través de la revisión bibliográfica y la consulta con expertos, se logró identificar un conjunto de criterios que viabilizan la instalación de plantas solares fotovoltaicas en Colombia, tales como la radiación solar, la pendiente, la orientación del terreno, la temperatura promedio, la elevación, la cobertura de la tierra, el brillo solar y la vocación del suelo. Así mismo, se identificaron las restricciones, como las áreas RUNAP, territorios étnicos, áreas susceptibles a inundaciones, áreas arqueológicas y zonas con bajo potencial eléctrico fotovoltaico. Estos criterios permitieron estructurar un modelo multicriterio sólido y basado en la realidad geográfica del país.

La aplicación del método AHP a través de encuestas a 11 expertos permitió ponderar de manera objetiva los criterios viabilizadores, asignando mayor peso a aquellos que impactan de manera más significativa la eficiencia y viabilidad de los proyectos solares. Los resultados de las encuestas determinaron que la radiación solar es el factor más determinante, con un peso del 24,5%, seguido por la orientación del terreno (15,9%), el brillo solar (14,9%), la vocación del suelo (11,4%), la temperatura promedio (10,5%), la cobertura del terreno (8,4%), la pendiente (7,4%) y la elevación (7,0%).

El análisis realizado resalta la capacidad de Colombia para expandir su capacidad de generación de energía solar fotovoltaica. El modelo espacial multicriterio propuesto no solo identifica áreas de alto potencial, sino que también sirve como una herramienta fundamental para la planificación sostenible y estratégica de nuevos proyectos en un contexto de creciente demanda de energías renovables.

Los diferentes criterios considerados en cada estudio reflejan la complejidad de los factores que intervienen en la selección de ubicaciones idóneas para la implementación de energía solar. Asimismo, las diferentes opciones de metodologías aplicadas revelan la necesidad de enfoques flexibles y adaptativos para abordar la heterogeneidad de los contextos geográficos y los criterios de evaluación.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda incluir en el modelo criterios económicas que consideren factores como la distancia a vías de acceso y a subestaciones eléctricas, especialmente en escalas más detalladas. La proximidad a estas infraestructuras no solo puede reducir los costos de construcción y mantenimiento de los proyectos solares, sino que también facilita la interconexión con la red eléctrica y la logística necesaria para la operación y el transporte de materiales. Incorporar estos criterios económicos en el análisis de viabilidad permitirá optimizar la selección de sitios, mejorar la rentabilidad de los proyectos y promover un desarrollo más eficiente de la energía solar en el país. Esta integración es crucial para asegurar que las decisiones tomadas no solo se basen en criterios ambientales y técnicos, sino también en la sostenibilidad económica de los proyectos a largo plazo.

Se recomienda considerar la posibilidad de gestionar algunas de las restricciones identificadas en el modelo, ya que ciertas limitaciones pueden ser manejadas a través de

diferentes procesos. Por ejemplo, en el caso de proyectos ubicados en territorios étnicos, es fundamental realizar consultas previas para asegurar el respeto de los derechos de las comunidades, sin embargo, esto podría conllevar a costos adicionales, lo cual se debe tener en cuenta, en este caso es importante validar los beneficios del proyecto hacia la comunidad. Asimismo, para áreas bajo la figura de Áreas Protegidas (RUNAP) que requieran permisos adicionales ante las autoridades ambientales, se sugiere establecer un diálogo continuo con dichas entidades para facilitar la obtención de los permisos necesarios. En el caso de las restricciones relacionadas con cuerpos de agua, es viable solicitar los permisos correspondientes como el de ocupación de cauces, siempre que se demuestre que los impactos ambientales asociados serán manejables y no significarán un deterioro de los ecosistemas. Estas acciones no solo permitirán avanzar en la implementación de proyectos solares, sino que también contribuirán a una mejor integración de estos en el contexto social y ambiental del país.

7. Bibliografía

Agencia Nacional de Tierra s (2024) 'Resguardos Indígenas, Zonas de Reserva Campesina y Consejos Comunitarios'. Colombia. Available at: https://data-agenciadetierras.opendata.arcgis.com/search.

Agyekum, E.B. *et al.* (2021) 'Optimizing photovoltaic power plant site selection using analytical hierarchy process and density-based clustering – Policy implications for transmission network expansion, Ghana', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, p. 101521. Available at: https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101521.

Akkas, O.P. *et al.* (2017) 'Optimal Site Selection for a Solar Power Plant in the Central Anatolian Region of Turkey', *International Journal of Photoenergy*, 2017(1), p. 7452715. Available at: https://doi.org/10.1155/2017/7452715.

Al Garni, H.Z. and Awasthi, A. (2018) 'Chapter 2 - Solar PV Power Plants Site Selection: A Review', in I. Yahyaoui (ed.) *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*. Elsevier, pp. 57–75. Available at: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812959-3.00002-2.

Amini, A. *et al.* (2023) 'THE PARIS AGREEMENT'S APPROACH TOWARD CLIMATE CHANGE LOSS AND DAMAGE.', *World Affairs*, 186(1), pp. 46–80. Available at: https://doi.org/10.1177/00438200221147936.

Autosolar Energía de Colombia (2021) *¿Qué orientación e inclinación tienen los paneles solares en Colombia*, *Energía Solar*. Available at: https://autosolar.co/aspectos-tecnicos/que-orientacion-e-inclinacion-tienen-los-paneles-solares-en-colombia#:~:text=En%20Colombia%2C%20la%20orientación%20de,radiación%20solar%20durante%20el%20día.

Ballesteros, E. and Rivera, A. (2023) 'Paz ambiental y gobernanza: retos para disminuir el cambio climático y la afectación del páramo "la cortadera", Boyacá, Colombia', *El Ágora USB*, pp. 399–410.

Castro, C. *et al.* (2013) 'Global solar electric potential: A review of their technical and sustainable limits', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, pp. 824–835. Available at: https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.040.

Chakraborty, S. *et al.* (2017) 'Mathematical method to find best suited PV technology for different climatic zones of India', *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 8(2), pp. 153–166. Available at: https://doi.org/10.1007/s40095-016-0227-z.

Cortés, S. and Arango Londoño, A. (2017) 'Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía', *Revista Ciencias Estratégicas*, 25(38), pp. 375–390.

Echeverry Hernández, J.P. (2019) *Aproximación metodológica para el cálculo de índices de sensibilidad costera ante erosión, Departamento de Bolívar*. Trabajo de grado - Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Available at: https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77313.

EMR (2023) *Mercado de Energía Solar en Colombia*. Available at: https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-de-energia-solar-en-colombia.

Enel Green Power (2019) *El Paso Solar, la planta fotovoltaica más grande de Colombia*, *Enel Green Power inaugura El Paso Solar, la planta fotovoltaica más grande de Colombia*. Available at: https://www.enelgreenpower.com/es/medios/news/2019/04/planta-fotovoltaica-el-paso-colombia-puesto-marcha.

Enel X (2023) *¿Qué es la eficiencia de los paneles solares?*, *La eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos*. Available at: https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/are-solar-panels-energy-efficient.

Esmaeilpour, M. and Kheirizadeh Arouq, M. (2024) 'A GIS-based catastrophe approach for optimal site selection for installation of solar power plants, East Azerbaijan province case study, Iran', *Environmental Science and Pollution Research*, 31(24), pp. 35835–35852. Available at: https://doi.org/10.1007/s11356-024-33639-6.

Estrada Gasca, C.A. (2013) 'Transición energtica, energias renovables y energía solar de potencia', *Revista Mexicana de Física*, 59(2), pp. 75–84.

Fang, H., Li, J. and Song, W. (2018) 'Sustainable site selection for photovoltaic power plant: An integrated approach based on prospect theory', *Energy Conversion and Management*, 174, pp. 755–768. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.092.

García Orrego, S. (2021) *Análisis espacial multicriterio para la ubicación de parques eólicos y granjas solares en Colombia*. Trabajo de grado - Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Available at: https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79490.

García-Olivares, A. *et al.* (2012) 'A global renewable mix with proven technologies and common materials', *Modeling Transport (Energy) Demand and Policies*, 41, pp. 561–574. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.018.

Garni, H.Z.A. and Awasthi, A. (2017) 'Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia', *Applied Energy*, 206, pp. 1225–1240. Available at: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.024.

ICANH (2019) 'Áreas Arqueológicas Protegidas'. Colombia. Available at: https://geoparques.icanh.gov.co/#/.

ICEX España (2022) *Energía solar en Colombia*. Ficha Sector Colombia. CEX España Exportación e Inversiones, p. 8. Available at: https://www.icex.es/content/dam/es/icex/oficinas/020/documentos/2022/12/fichas-sector/FS_Energía%20solar%20en%20Colombia%202022_REV.pdf.

IDEAM (2012) 'Mapa Zonas potencialmente Inundables'. Colombia. Available at: http://www.siac.gov.co/zonas-potencialmente-inundables-zpi.

IDEAM (2016) 'El Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia'. Imprenta Nacional de Colombia. Available at: https://www.andi.com.co/Uploads/RADIACION.compressed.pdf.

IDEAM (2021a) 'Cobertura de la Tierra periodo 2018'. Colombia. Available at: http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-tierra.

IDEAM (2021b) 'TEMPERATURA MEDIA PARA EL PERIODO 1991-2020 (°C)'. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (A partir de estaciones climatológicas que cumplen la directriz No 1203 del 2017 de la OMM). Available at: http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima.

IGAC (2013) 'Mapas de Clasificación de las Tierras por su Vocación de Uso'. Colombia.

IGAC (2020) 'Capa Digital Cuerpos de Agua.' Colombia. Available at: https://metadatos.icde.gov.co/geonetwork/srv/api/records/2ae17c2c-b793-4463-815c-76f36c2564de.

Kaliappan, P. and Selvan, M. (2024) 'Design and Performance Analysis of Utility Scale-Grid connected Hybrid Wind-Solar Plant in an Existing Operational Wind Farm in India', in *2024 IEEE 3rd International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)*. *2024 IEEE 3rd International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)*, pp. 1–6. Available at: https://doi.org/10.1109/ICEPES60647.2024.10653465.

Khan, A., Ali, Y. and Pamucar, D. (2023) 'Solar PV power plant site selection using a GIS-based non-linear multi-criteria optimization technique', *Environmental Science and Pollution Research*, 30(20), pp. 57378–57397. Available at: https://doi.org/10.1007/s11356-023-26540-1.

Leguizamón, L. (2019) *Áreas arqueológicas protegidas de Colombia*. Primera edición. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH).

Llano, L., Salazar, C. and Lopez, W. (2019) *Hoja de ruta para la implementación de acciones que permitan enfrentar la nueva dinámica económica, por el cambio de vocación de usos del suelo del Municipio de La Ceja del Tambo, Antioquia.* Trabajo de grado - Maestría. Universidad EAFIT. Available at: http://hdl.handle.net/10784/14616.

López, A.R. *et al.* (2020) 'Solar PV generation in Colombia - A qualitative and quantitative approach to analyze the potential of solar energy market', *Renewable Energy*, 148, pp. 1266–1279. Available at: https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.066.

MADS (2022) *Diagnóstico del Sistema Nacional de Áreas Protegidas SINAP*. Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, p. 42. Available at: https://sinap.minambiente.gov.co/images/wwwf/fases/Diagnostico/Documentos/DOCUMENTO_DIAGNOSTICO_POLITICA_SINAP_VERSION_1_21.05.2019.pdf.

Malczewski, J. and Rinner, C. (2015) 'Multiattribute Decision Analysis Methods', in J. Malczewski and C. Rinner (eds) *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 81–121. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-540-74757-4_4.

Mensour, O.N. *et al.* (2019) 'A geographical information system-based multi-criteria method for the evaluation of solar farms locations: A case study in Souss-Massa area, southern

Morocco', *Energy*, 182, pp. 900–919. Available at: https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.063.

NACIONES UNIDAS (2019) *¿Qué son las energías renovables?*, *Acción por el Clima*. Available at: https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy.

Parques Nacionales Naturales de Colombia (2023) *¿Qué es el Registro Único Nacional de Áreas Protegidas – RUNAP?* Colombia: Registro Único Nacional de Áreas Protegidas - RUNAP. Available at: https://runap.parquesnacionales.gov.co/acerca.

Parques Nacionales Naturales de Colombia (2024) 'MAPA DE ÁREAS PROTEGIDAS DE COLOMBIA'. Colombia. Available at: https://runap.parquesnacionales.gov.co/cifras.

Región Administrativa y de Planeación Especial RAP-E and Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (2020) *POTENCIAL SOLAR FOTOVOLTAICO EN LA REGIÓN CENTRAL RAP-E*. Colombia: GRUPO DE INVESTIGACION XUÉ, p. 161. Available at: https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2022/03/POTENCIAL-FOTOVOLTAICO-REGIÓN-RAP-E.pdf.

Rigo, P.D. *et al.* (2020) 'Renewable Energy Problems: Exploring the Methods to Support the Decision-Making Process', *Sustainability*, 12(23). Available at: https://doi.org/10.3390/su122310195.

Rivas, D. (2021) 'Implementación de un Sistema de Bombeo de Agua, Alimentado con Energía Solar en la Universidad de Córdoba - Colombia', *Universidad de Manizales*, 15(1), pp. 105–120.

Rodríguez, C. and Baquero, C. (2020) *Conflictos socioambientales en América Latina*. Argentina: Siglo Veintiuno Editores Argentina S.A.

Ruiz, P. *et al.* (2019) 'ENSPRESO - an open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials', *Energy Strategy Reviews*, 26, p. 100379. Available at: https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100379.

Saaty, T.L. (1980) *The Analytic Hierarchy Process.* New York: McGraw-Hill.

Sánchez-Lozano, J.M. *et al.* (2013) 'Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, pp. 544–556. Available at: https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.019.

Saraswat, S.K. *et al.* (2021) 'MCDM and GIS based modelling technique for assessment of solar and wind farm locations in India', *Renewable Energy*, 169, pp. 865–884. Available at: https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.056.

SE for all (2022) *Renewable energy - About SDG7*, *Latest on renewable energy*. Available at: https://www.seforall.org/goal-7-targets/renewable-energy.

Silva Granada, L.J. (2016) 'Evaluación de la Energía Solar Fotovoltaica para generación de Electricidad en el municipio de Uribía, La Guajira - Colombia', *Energética*, 47, pp. 65–72.

Sistema de Información Geográfica para la Planeación y el Ordenamiento Territorial – SIGOT (2018) 'Mapa Digital de Páramos Delimitados'. Colombia. Available at: https://metadatos.icde.gov.co/geonetwork/srv/api/records/6dff4429-7c73-47da-9fea-7f2c2671903e.

Skoplaki, E. and Palyvos, J.A. (2009) 'On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations', *Solar Energy*, 83(5), pp. 614–624. Available at: https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008.

Tavana, M. *et al.* (2017) 'A fuzzy multi-criteria spatial decision support system for solar farm location planning', *Energy Strategy Reviews*, 18, pp. 93–105. Available at: https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.09.003.

UPME (2015) *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. ATN/FM-12825-CO. Colombia: Unidad de Planeación Minero Energética, p. 188. Available at: https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf.

UPME (2023) *Informe de oportunidades tecnológicas del cierre de los parques solares en el Corredor Vida Cesar-Magdalena, con el objeto de facilitar su aprovechamiento comunitario en el territorio*. Colombia: Unidad de Planeación Minero Energética, p. 108. Available at: https://www1.upme.gov.co/Documents/Enfoque-territorial/Resultados_convenios/4_Oportunidades_tecnologicas_Procesos_Cierre_Parques_solares_Corredor_Vida_Cesar_Magdalena_UM_v2.pdf.

UPME, S.D.E.E. (2024) *INFORME DE AVANCE PROYECTOS DE GENERACIÓN – MARZO 2024*. Marzo 2024. Unidad de Planeación Minero Energética, p. 9. Available at: https://www1.upme.gov.co/siel/Seguimiento_proyectos_generacion/Informe_avance_proyectos_generacion_Diciembre_2023.pdf.

Uyan, M. and Dogmus, O.L. (2023) 'An Integrated GIS-Based ANP Analysis for Selecting Solar Farm Installation Locations: Case Study in Cumra Region, Turkey', *Environmental Modeling & Assessment*, 28(1), pp. 105–119. Available at: https://doi.org/10.1007/s10666-022-09870-1.

WORLD BANK GROUP, SOLARGIS and ESMAP (2020) 'Mapa de Recurso Solar Potencial Eléctrico Fotovoltaico'. Available at: https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data?locality=colombia.

Zhang, Y. *et al.* (2020) 'Solar energy potential assessment: A framework to integrate geographic, technological, and economic indices for a potential analysis', *Renewable Energy*, 149, pp. 577–586. Available at: https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.071.