

**ANÁLISIS DEL POTENCIAL SOLAR EN EL DEPARTAMENTO DE  
BOLÍVAR Y SU RELACIÓN CON POSIBLES ZONAS DE RIESGO ANTE  
EVENTOS NATURALES EXTREMOS MEDIANTE EL USO DE  
SENSORES REMOTOS**

Presentado para obtener el título de

**MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES**

Juan Diego Pérez Rincón  
Sergio Mauricio Segura Rodríguez

Dirección:  
Jordi Rafael Palacios González  
Jesús Antonio Vega Uribe

Universidad del Rosario  
Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología  
Maestría en Energías Renovables

## DEDICATORIA

ii

Juan Diego Perez Rincón.

A Dios, por ser mi guía constante, por sostenerme en cada momento de incertidumbre y por permitirme alcanzar esta meta que tantas veces soñé. Gracias por nunca soltar mi mano.

A mi madre, Yazmín Rincón, y a mi tía, Diana Rincón, por ser mi motor, mi empuje y mi refugio incondicional ante cualquier situación. Gracias por estar ahí siempre, por levantarme cuando quise rendirme, por celebrar cada pequeño avance y por creer en mí con una fuerza que me ha impulsado más allá de mis propios límites. Sus palabras, su amor y su fe han sido el sostén más firme de este camino. Sin ustedes, simplemente, no sería quien soy ni habría llegado hasta aquí.

A toda la comunidad rosarista, especialmente a mis compañeros y docentes, por acompañarme en este proceso de formación, aprendizaje y crecimiento. Cada conversación, cada clase y cada experiencia compartida han dejado una huella imborrable en este logro.

Sergio Mauricio Segura Rodríguez

A mi mamá, Sandra Rodríguez, con todo mi amor y gratitud. Gracias por enseñarme que no hay límites cuando se tiene determinación y propósito, por recordarme siempre que, si otros pueden, yo también puedo, y por impulsarme a soñar en grande y no conformarme con lo mínimo, sino crecer continuamente en lo personal, profesional y espiritual. Sin tu ejemplo, tus palabras y tu apoyo incondicional, este logro no habría sido posible.

También dedico este trabajo a mi familia y a las personas cercanas que, aunque no hayan estado directamente involucradas en este proceso, han sido parte de mi vida y mi historia. Cada paso dado, cada meta alcanzada, también la comparto con ustedes. Este logro es mío, pero también de todos aquellos que me rodean y hacen parte de mi camino.

## AGRADECIMIENTOS

iii

Agradecemos profundamente a nuestro director de tesis por su acompañamiento constante, por cada orientación brindada en las reuniones de avance y por su disposición para guiarnos con paciencia y compromiso en el desarrollo de este trabajo. Su apoyo fue clave para transformar una idea en una propuesta académica sólida.

Extendemos también nuestra gratitud a la Universidad del Rosario y a todos los docentes que, a lo largo del proceso de formación, aportaron con sus conocimientos y experiencias al crecimiento profesional y personal que hoy nos permite cerrar esta etapa con orgullo.

A nuestros compañeros y compañeras, gracias por compartir el camino, por el trabajo en equipo, por las charlas sinceras y por esa red de apoyo que se construyó más allá del aula. Sus aportes hicieron más llevadero este recorrido.

Finalmente, a nuestra familia, por su amor incondicional y su apoyo permanente. Cada palabra de aliento y cada gesto de confianza fueron fundamentales para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

## Español

Esta investigación desarrolla y aplica una metodología geoespacial para identificar áreas óptimas para proyectos solares fotovoltaicos en el departamento de Bolívar, Colombia, integrando variables técnicas, ambientales y sociales, combinando datos de teledetección con Sistemas de Información Geográfica (SIG) y un Análisis Multicriterio (AMC) mediante el método Weighted Overlay en ArcGIS, también se evaluaron cuatro factores clave como radiación solar, susceptibilidad a inundaciones, riesgo de incendios forestales y cobertura de bosques naturales, cada variable fue ponderada según su relevancia técnica y ambiental para generar un índice de idoneidad territorial, y dando como resultado que se priorizaron los municipios de Turbaco, Clemencia, Santa Rosa y Turbaná, que presentan la mejor combinación de alta irradiancia ( $>5,0$  kW/m<sup>2</sup>), baja exposición a amenazas naturales, mínimas restricciones ambientales y cercanía a infraestructura eléctrica existente.

La metodología demuestra que es posible planificar proyectos solares sostenibles cuando se evalúa de forma simultánea el potencial energético y los riesgos naturales, siendo un marco replicable que proporciona a los tomadores de decisión y desarrolladores energéticos una herramienta estratégica para guiar el despliegue seguro e inclusivo de energías renovables.

## Inglés

This research develops and applies a geospatial methodology to identify optimal areas for photovoltaic solar projects in the Bolívar department, Colombia, integrating technical, environmental, and social variables. It combines remote sensing data with Geographic Information Systems (GIS) and a Multi-Criteria Analysis (MCA) using the Weighted Overlay method in ArcGIS. Four key factors were evaluated: solar radiation, flood susceptibility, wildfire risk, and natural forest cover. Each variable was weighted according to its technical and environmental relevance to generate a territorial suitability index, resulting in the prioritization of the municipalities of Turbaco, Clemencia, Santa Rosa, and Turbaná, which present the best combination of high irradiance ( $>5.0$  kW/m<sup>2</sup>), low exposure to natural hazards, minimal environmental restrictions, and proximity to existing electrical infrastructure.

The methodology demonstrates that it is possible to plan sustainable solar projects when energy potential and natural hazards are evaluated simultaneously, serving as a replicable

framework that provides decision-makers and energy developers with a strategic tool to guide the safe and inclusive deployment of renewable energy.

## TABLA DE CONTENIDO

vi

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN .....	1
Capítulo 2 OBJETIVOS .....	3
1.1 Objetivo general.....	3
1.2 Objetivos específicos .....	3
Capítulo 3 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	4
Capítulo 4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	9
Capítulo 5 METODOLOGÍA .....	15
Capítulo 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	19
Capítulo 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	39
REFERENCIAS.....	39

## LISTA DE TABLAS

vii

Tabla 1. Comparativa de Indicadores Clave en los Municipios Seleccionados para Proyectos Solares en Bolívar. Elaboración propia. ....	28
Tabla 2. Escenarios de ponderación para análisis de sensibilidad. Elaboración propia. ....	32

Figura 1. Esquema de integración metodológica para la evaluación territorial de proyectos solares. Elaboración Propia.....	15
Figura 2. Distribución espacial de la radiación solar y las áreas vulnerables a inundaciones en el departamento de Bolívar. Elaboración propia. ....	20
Figura 3. Zonificación de amenaza por inundación en un periodo de retorno de 20 años (PR20) en el departamento de Bolívar. Tomado de: [21]. ....	21
Figura 4. Distribución espacial de la cobertura boscosa y zonas susceptibles a inundación en el departamento de Bolívar. Elaboración propia. ....	22
Figura 5. Identificación de municipios prioritarios para proyectos solares en el departamento de Bolívar. Elaboración propia. ....	23
Figura 6. Zonificación de susceptibilidad a incendios forestales en el departamento de Bolívar. Elaboración propia. ....	25
Figura 7. Pérdida de cobertura arbórea en Turbaná (2001–2024). Tomado de: [26]. ....	27
Figura 8. Pérdida de cobertura arbórea por incendios frente a otras causas para Turbaná, Turbaco, Santa Rosa y Clemencia respectivamente. Tomado de: [26]. ....	27
Figura 9. Zonas óptimas para el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos de acuerdo a la integración de variables y análisis de superposición. Elaboración propia. ....	31
Figura 10. Escenario S1: Pesos iguales (25 % cada variable). Elaboración propia. ....	33
Figura 11. Escenario S2: Riesgos prioritarios (Radiación 10 %, Inundaciones 30 %, Incendios 30 %, Bosque 30 %). Elaboración propia. ....	34
Figura 12. Municipios seleccionados a partir de análisis multicriterio. Elaboración Propia. ....	35

## Capítulo 1

### INTRODUCCIÓN

La transición energética alrededor del globo ha logrado abrir una oportunidad inédita para los países ubicados en las zonas tropicales como Colombia, donde la disponibilidad de recursos renovables es abundante, no obstante, su aprovechamiento aún se encuentra en etapas emergentes en muchas regiones. Dentro del contexto nacional, el departamento de Bolívar integra un alto potencial de radiación solar con desafíos del territorio relacionados con riesgos naturales, ambientales y sociales [1]. Este vínculo entre potencial y vulnerabilidad motivo la realización del presente trabajo de grado.

A lo largo del desarrollo de proyectos de energía solar fotovoltaica, diferentes factores como la irradiancia, disponibilidad de infraestructura y riesgos ambientales, por obligatoriedad deben ser tratados y considerados de manera integral. No obstante, en diversas ocasiones, las decisiones sobre la viabilidad técnica de los proyectos se basan en criterios aislados o generalidades del territorio sin ningún tipo de análisis espacial que incorpore de manera simultánea los componentes naturales y sociales del territorio [2]. La inexistencia de un enfoque metodológico para articular estos datos geospaciales, técnicos y ambientales dentro de un enfoque territorial integral constituye la estructura principal de este estudio.

La selección de Bolívar como área de estudio se debe a que este departamento está ubicado en el caribe colombiano el cual históricamente ha sido afectado por fenómenos climáticos extremos como inundaciones periódicas, y temporadas de sequía intensas que propician incendios forestales [3]. De igual manera, es un territorio con alta presión sobre los diferentes ecosistemas y su gran diversidad en dinámicas económicas las cuales podrían beneficiarse de esquemas energéticos descentralizados, por ende, la exploración de zonas viables para proyectos solares en este entorno no solo es técnicamente pertinente sino también social y ambientalmente determinante.

Ante este escenario, el trabajo plantea una metodología replicable que combina el análisis del potencial solar con la identificación de zonas de riesgo natural, como inundaciones, incendios forestales fortalecida con variables de cobertura de la tierra y cercanía a infraestructura eléctrica, esto, a través de herramientas SIG (Sistemas de Información

Geográfica), sensores remotos y análisis multicriterio, construyendo una zonificación preliminar del territorio que encamina la toma de decisiones en materia energética desde un enfoque territorial diferenciado.

La metodología empleada abarca las siguientes fases, recolección de información geoespacial y ambiental, análisis del potencial solar, evaluación de riesgos naturales, análisis multicriterio SIG, evaluación técnico ambiental y social y finalmente, zonificación de áreas optimas, generando una integración y articulación de estas etapas en un solo flujo de análisis que representa una innovación metodológica que puede ser útil para tomadores de decisión, empresas del sector energéticos y entidades públicas o privadas.

## **Capítulo 2**

### **OBJETIVOS**

#### **1.1 Objetivo general**

Evaluar el potencial solar en el departamento de Bolívar y su relación con zonas de riesgo ante eventos naturales extremos mediante el uso de sensores remotos, con el fin de optimizar la localización de proyectos de energía solar seguros y sostenibles.

#### **1.2 Objetivos específicos**

- Mapear la radiación solar en el departamento de Bolívar utilizando datos de sensores remotos para identificar áreas con alto potencial energético.
- Identificar zonas vulnerables a riesgos naturales extremos, como inundaciones, deslizamientos, entre otros, en el departamento de Bolívar mediante el análisis de datos históricos y geoespaciales.
- Establecer la relación entre el potencial solar y las zonas de riesgo natural en Bolívar, para delimitar áreas de alta viabilidad para proyectos solares.
- Analizar la viabilidad técnica y social de las áreas seleccionadas, evaluando conexión a la red eléctrica y beneficios para las comunidades locales.
- Diseñar un marco de referencia para la evaluación integrada de potencial solar y riesgos naturales en el contexto del departamento de Bolívar.

Cada objetivo específico contribuye directamente al cumplimiento del objetivo general y a la justificación del estudio: identificar y evaluar el recurso solar, considerar riesgos naturales, integrar ambas dimensiones para priorizar zonas, y analizar su viabilidad técnica y social, asegurando así la planificación de proyectos solares seguros y sostenibles en Bolívar.

### Capítulo 3

#### PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Colombia debido a su benéfica posición en la región ecuatorial, recibe niveles de irradiación extremadamente altos a lo largo del año, lo que lo posiciona en un panorama favorecido para el desarrollo de instalaciones solares, sin embargo, el resultado positivo de estos proyectos exige una planificación y organización estricta que incorpore riesgos naturales del territorio tales como variaciones climáticas extremas, amenazas de inundaciones o movimientos en masa con el fin de garantizar su viabilidad y maximizar su rendimiento.

Primero que nada, el país enfrenta múltiples eventos naturales extremos, como inundaciones, deslizamientos de tierra, terremotos y huracanes, que pueden afectar de manera crítica la infraestructura energética, en este sentido, la falta de investigaciones y estudios que engloben de manera conjunta y que combinen la evaluación del potencial solar con la identificación de las diferentes zonas de riesgo obstaculiza la toma de decisiones fundamentadas para la ubicación de proyectos solares. Esto puede dar lugar a inversiones inseguras y en potenciales pérdidas económicas y humanas en caso de desastres naturales. En este contexto, el Análisis Multicriterio (AMC) surge como una metodología idónea para abordar esta brecha, ya que permite evaluar simultáneamente múltiples variables técnicas, ambientales y sociales, asignando un peso relativo a cada una según su importancia en el objetivo de planificación. Su integración dentro de entornos de Sistemas de Información Geográfica (SIG) facilita la superposición de capas temáticas y la generación de índices de idoneidad espacial, lo que aporta objetividad y transparencia en la priorización territorial, [4] [5], a nivel internacional, el AMC aplicado a energías renovables ha demostrado mejorar la resiliencia y rentabilidad de los proyectos, al considerar factores de riesgo y restricciones desde etapas tempranas [6]. En el contexto colombiano, sin embargo, la aplicación de AMC en la selección de sitios para proyectos solares ha sido escasa, limitándose en la mayoría de los casos a estudios académicos aislados sin un marco operativo replicable. Esta carencia refuerza la necesidad de metodologías integrales como la propuesta en el presente trabajo, que combina AMC, SIG y datos de sensores remotos

para identificar las zonas más seguras y eficientes para el desarrollo de proyectos solares en el departamento de Bolívar.

Lo descrito anteriormente no es únicamente teórico, se evidencia de gran manera en regiones específicas del país donde la correlación entre amenazas naturales y factores sociales-ambientales han generado diversos escenarios críticos para el desarrollo energético.

La región de Colombia y en particular el departamento de Bolívar refleja los desafíos anteriormente mencionados, por ejemplo, en noviembre de 2024, las fuertes lluvias provocaron una declaratoria de calamidad pública en 24 municipios con más de 27.000 personas afectadas, sumado a esto, están los diferentes factores antrópicos como la deforestación y la minería ilegal que han acentuado la exposición a riesgos y limitando las diferentes gestiones preventivas y adaptativas en el ámbito energético [7].

Ante este escenario de vulnerabilidad y complejidad territorial, cada vez es más necesaria la incorporación de herramientas tecnológicas que permitan prever y anticipar los riesgos para dirigir con mayor precisión la toma de decisiones en el sector energético. Bajo estas condiciones la incorporación de los sistemas de información geográfica y sensores remotos son clave ya que este tipo de herramientas permiten realizar diferentes análisis integrales y precisos tanto del recurso solar disponible como de las amenazas naturales extremas presentes en el territorio. Con base a estas herramientas es posible generar diferentes tipos de mapas que orienten en la toma de decisiones facilitando el reconocimiento de áreas con alto potencial energético y bajo nivel de riesgo, lo cual contribuye a una mejor planificación y uso eficiente de las inversiones en proyectos solares.

El departamento de Bolívar resalta con una posición geográfica estratégica para la implementación de energía solar, no solamente por su alto potencial de irradiación a nivel regional, sino también por su proximidad a centros urbanos de gran importancia y su infraestructura energética ya instalada. A esto habría que sumarle el contexto de las políticas públicas regionales que favorecen la transición energética. Como es el caso de La Gobernación de Bolívar que ha promovido estrategias hacia una mayor cobertura eléctrica mediante incentivos a las Fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER). Algunas de estas estrategias coinciden con las indicadas para desarrollar en el Plan

Energético Nacional 2020-2050, promoviendo una mayor diversificación de la matriz energética en departamentos como Bolívar [8].

Además, los programas de desarrollo territorial y local juegan un papel importante en la sostenibilidad energética del departamento de Bolívar; esta combinación de potencial físico y de infraestructura territorial, apoyo institucional y gubernamental e iniciativas comunitarias constituye una base para avanzar hacia una adecuada transición energética, además, el Plan Nacional de Desarrollo y el programa "Bolívar Primero" han promovido iniciativas como las Comunidades Energéticas, que permiten a las poblaciones rurales generar y gestionar su propia energía a través de proyectos solares [9] [10]. Estas iniciativas no solo mejoran el acceso a la energía en áreas rurales apartadas o no interconectadas, sino que también promueven la inclusión ambiental, social y el desarrollo económico.

En cuanto a iniciativas de energías renovables, el departamento de Bolívar lidera la implementación de proyectos solares a gran escala en toda la región Caribe debido a su alto potencial de irradiación solar y requerimientos técnicos tenidos en cuenta al momento de desarrollar este tipo de proyectos, como por ejemplo, Parque Solar Tucanes en Santa Rosa de Lima y el parque Solar Canal del Dique en Arjona, los cuales han confirmado el potencial de la región para contribuir considerablemente el sistema eléctrico nacional [11] [12], por ende, estos proyectos no solo fortalecen la diversificación de la matriz energética sino que también apoya en la generación de empleos locales y refuerza la seguridad energética local, además, el compromiso del departamento de Bolívar con la transición energética se coordina con las metas nacionales de Colombia establecidas en el CONPES de transición energética y con los diversos compromisos internacionales del país en la lucha contra el cambio climático [13].

Además, diferentes países ubicados en la zona tropical han abordado desafíos similares a los que se enfrenta el Departamento de Bolívar y sus metodologías brindan lecciones y puntos de comparación en el desarrollo y abordaje de esta propuesta. En específico, la integración de datos geoespaciales y teledetección para mapear el potencial solar y los diferentes riesgos naturales ha sido una estrategia usada en países como Brasil, India y Filipinas.

El Atlas Solar Do Brasil permite evaluar el potencial solar a nivel nacional en Brasil mediante metodologías SIG para identificar zonas adecuadas para proyectos solares. Esta metodología considera la radiación solar, así como los riesgos naturales, como la probabilidad de inundaciones y la erosión del suelo, lo cual es relevante para el objetivo de este estudio [14], por otra parte en la India, el uso de sistemas de información geográfica (SIG) se utiliza particularmente en el análisis espacial de zonas con alto potencial de irradiación solar ya que estas herramientas son esenciales para la planificación de proyectos, particularmente en áreas susceptibles a inundaciones, así lo nombra el estudio realizado por el National Institute Of Solar Energy (NISE) que muestra cómo se combinan los diferentes datos de radiación solar con capas de vulnerabilidad a eventos naturales extremos para identificar las zonas más adecuadas para la implementación de proyectos solares [15].

Finalmente, en Filipinas, se utiliza la teledetección para mapear zonas de alto riesgo volcánico y las correspondientes áreas de máxima irradiación solar. En este caso, la integración de capas de irradiación solar y riesgos geológicos es fundamental para seleccionar el área segura para el proyecto [16]. Siendo así, este enfoque metodológico es una contribución al fortalecimiento de la planificación energética regional.

Por ende, la exploración de zonas viables para proyectos solares en este entorno no solo es técnicamente pertinente sino también social y ambientalmente determinante. A diferencia de estudios previos en el contexto colombiano, que suelen abordar el potencial solar y los riesgos naturales de forma separada o con un alcance limitado a evaluaciones descriptivas, este trabajo integra ambos componentes dentro de un marco metodológico único y replicable.

La propuesta se fundamenta en la aplicación combinada de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Análisis Multicriterio (AMC) para ponderar de forma objetiva factores técnicos, ambientales y sociales, lo que permite generar un índice de idoneidad territorial específico para el departamento de Bolívar. Esta aproximación no solo ofrece un diagnóstico más preciso del territorio, sino que también aporta un valor agregado al vincular criterios de planificación energética con variables de gestión del riesgo, optimización de recursos y participación comunitaria [17]. Con ello, se contribuye a cerrar

una brecha metodológica identificada en el país, proporcionando a tomadores de decisión y desarrolladores un insumo técnico que combina la rigurosidad científica con la aplicabilidad práctica, acorde al nivel de una investigación de maestría. En consecuencia, esta investigación no solo toma referentes internacionales, sino que los adapta críticamente al contexto colombiano mediante un enfoque replicable que combina SIG, AMC y sensores remotos para identificar zonas de alta idoneidad técnica, ambiental y social. Actualmente, en Colombia no existen estudios que integren estas variables de manera simultánea para la priorización territorial de proyectos solares, lo que posiciona este trabajo como una propuesta original y pertinente frente a la creciente necesidad de planificación energética resiliente, especialmente en regiones vulnerables como el departamento de Bolívar.

## Capítulo 4

### MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

En este apartado se integran todas las bases, fundamentos teóricos y antecedentes investigativos previos de gran relevancia con el fin de analizar el potencial solar en Colombia y su relación con los riesgos naturales extremos a través del uso de sistemas de información geográfica (SIG) y sensores remotos, además del análisis multicriterio (AMC) el cual es una metodología utilizada en la toma de decisiones con un alto grado de dificultad, particularmente en contextos donde se evalúan múltiples variables y factores de una manera integral, a su vez, en este contexto el AMC permite evaluar las distintas alternativas teniendo en cuenta de manera particular cada una de las variables, es decir, no solo el potencial energético si no también, diferentes factores clave como el riesgo de desastres naturales, eventos naturales extremos, sostenibilidad ambiental y condiciones socioeconómicas, esta fusión proporciona un marco para comprender las bases científicas, aplicaciones tecnológicas y las tendencias investigativas en el área, justificando la pertinencia del estudio.

Esta base conceptual permite enmarcar el análisis del recurso solar no solo desde su potencial técnico, sino también desde una perspectiva integral que incorpora el uso de herramientas geoespaciales y criterios múltiples de evaluación .

La energía solar es una fuente renovable obtenida a partir de la radiación solar, su conversión en electricidad se realiza principalmente mediante sistemas fotovoltaicos que emplean celdas solares fabricadas con materiales semiconductores, como el silicio para poder transformar la radiación solar directamente en electricidad a través del efecto fotovoltaico por eso mediante este proceso se genera una corriente eléctrica continua (DC), que es transformada en corriente alterna (AC) mediante inversores para así llegar a su destino final que es el consumo doméstico e industrial, además, en zonas remotas o no interconectadas se utilizan baterías para almacenar la energía y garantizar un suministro constante [18]. Adicionalmente, los sistemas híbridos que combinan la energía solar con generadores diésel permiten aumentar la resiliencia y estabilidad del suministro energético.

En el marco de esta investigación, se parte de tres conceptos metodológicos fundamentales: los Sistemas de Información Geográfica (SIG), el Análisis Multicriterio (AMC) y la teledetección. Estas herramientas permiten integrar de forma estructurada datos espaciales, variables técnicas, ambientales y sociales, y son ampliamente reconocidas en procesos de planificación energética y análisis territorial. Los SIG son plataformas computacionales que permiten capturar, almacenar, analizar y visualizar datos geoespaciales, favoreciendo la toma de decisiones basada en el territorio y tiene la capacidad de superponer múltiples capas de información convierte a los SIG en una herramienta esencial para estudios de potencial energético, accesibilidad, restricciones ambientales y exposición a amenazas naturales [4].

Por su parte, la teledetección o percepción remota facilita la obtención de información ambiental a través de sensores satelitales o aéreos, permitiendo caracterizar fenómenos como cobertura vegetal, humedad, albedo o radiación solar en áreas extensas [6], estos datos son insumo esencial para alimentar los SIG con información de alta resolución espacial y temporal.

El AMC, finalmente, se refiere a un conjunto de técnicas que permiten evaluar múltiples criterios de decisión simultáneamente. Su uso integrado con SIG permite ponderar variables y obtener mapas de idoneidad, lo que mejora la objetividad y replicabilidad en procesos de planificación territorial [19]. Esta metodología ha sido aplicada con éxito a nivel internacional en la identificación de sitios óptimos para energías renovables, combinando criterios técnicos, ambientales y sociales.

El panorama del sector energético Colombiano se distingue por su alta dependencia de las fuentes hidroeléctricas las cuales representan más del 60% del suministro energético nacional [17], como consecuencia, esta estructura ha permitido al país distinguirse en términos de sostenibilidad ambiental en la región, pero a su vez la hace vulnerable a diferentes fenómenos climáticos y meteorológicos extremos como El Niño y La Niña que impactan directamente en la generación hidroeléctrica, por ende, durante los periodos de climas extremos, la capacidad de los embalses se ve afectada generando vulnerabilidades en el suministro energético, por esta razón, la energía solar surge como una alternativa

estratégica para diversificar la matriz energética y fortalecer la resiliencia del sistema energético nacional [20] [21].

El departamento de Bolívar, ubicado en la región Caribe colombiana, presenta niveles de radiación solar que oscilan entre 4,5 y 5,5 kW/m<sup>2</sup>/día, lo que indica un potencial significativo para la generación de energía solar, la costa Caribe, incluyendo Bolívar, recibe una radiación solar anual promedio favorable para el desarrollo de proyectos solares, según el Atlas de Radiación Solar de Colombia, sin embargo, el uso de esta fuente de energía aún es limitado, representando menos del 1 % del consumo energético total del país [22]. Para promover su integración, la Ley 1715 de 2014 establece incentivos regulatorios y fiscales, incentivando proyectos tanto en zonas interconectadas como no interconectadas donde las energías renovables puedan reemplazar la generación a base de diésel [23].

Estudios internacionales han utilizado el AMC para poder establecer con claridad las áreas u zonas óptimas para proyectos solares, especialmente en zonas vulnerables a eventos climáticos extremos, por ejemplo, en Brasil el Atlas Solar do Brasil dio uso al análisis multicriterio para integrar las variables de radiación solar con el riesgo de inundaciones lo que permitió establecer la zona correcta dentro de la región amazónica para establecer el proyecto de manera adecuada [14]. Este enfoque no solo garantiza la optimización del uso de la irradiación solar sino también de las vulnerabilidades del territorio, garantizando sostenibilidad a largo plazo del proyecto. De igual manera India, donde se utilizó AMC, con el fin de analizar áreas propensas a inundaciones, combinando capas de irradiación solar e inundaciones [15]. Finalmente, Filipinas, donde se aplicó la misma metodología para la selección de áreas o lugares en regiones afectadas por tifones integrando irradiación solar con datos geológicos y de riesgo de desastre natural, dicho estudio, permitió identificar las diferentes áreas seguras para la instalación de infraestructura solar [16].

Siendo así, la incorporación de la energía solar al mix energético colombiano no solo contribuye a la diversificación de fuentes, sino que también fortalece la seguridad energética, reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y promueve el desarrollo en zonas rurales.

Estudios previos en el contexto colombiano han abordado de forma parcial la relación entre el potencial solar y los riesgos naturales, evidenciando que, aunque existe información

valiosa, esta no se ha integrado en un marco metodológico que permita su uso simultáneo para la priorización territorial. Por ejemplo, la UPME y el IDEAM publicaron el Atlas de Radiación Solar de Colombia (2005), el cual ofrece un diagnóstico exhaustivo del recurso solar en el país, pero carece de la incorporación de variables asociadas a amenazas naturales, como inundaciones o incendios forestales, que pueden comprometer la viabilidad de los proyectos [22]. De manera similar, Rueda-Bayona et al. (2021) caracterizan el potencial renovable del Caribe colombiano y describen retos socioeconómicos como la infraestructura eléctrica limitada y la necesidad de diversificar la matriz, pero sin realizar un análisis espacial detallado de riesgos ambientales [24].

Incluso en casos prácticos de gran escala, como el Parque Solar El Paso en el departamento del Cesar, la planificación inicial consideró la topografía y la radiación solar como factores principales, pero no incluyó indicadores de vulnerabilidad ambiental ni criterios de exposición a fenómenos hidrometeorológicos en la selección final del sitio [25]. Esta tendencia también se observa en evaluaciones académicas de alcance regional, donde el uso de herramientas SIG se limita a mapear el recurso solar, sin combinarlo con capas de riesgo y criterios socioeconómicos bajo un análisis multicriterio (AMC).

La ausencia de metodologías que integren de manera sistemática y ponderada variables técnicas, ambientales y sociales genera una brecha significativa en la planificación energética nacional. Esta carencia no solo limita la capacidad de optimizar la ubicación de proyectos solares en términos de eficiencia y seguridad, sino que también incrementa la probabilidad de sobrecostos, fallas operativas tempranas y conflictos socioambientales. El presente estudio se plantea como respuesta a esta brecha, proponiendo un marco metodológico replicable que combina SIG, AMC y datos de sensores remotos para identificar zonas con el mejor balance entre potencial energético y resiliencia territorial.

Además, las proyecciones indican que el costo de la tecnología solar continuará disminuyendo, aumentando su competitividad frente a las fuentes convencionales [26]. Esto posiciona a la energía solar como un pilar fundamental para alcanzar un sistema energético más sostenible, descentralizado y resiliente.

A pesar de su potencial, la planificación energética en Colombia debe considerar los riesgos asociados a fenómenos naturales extremos, como inundaciones, deslizamientos de

tierra y sequías prolongadas, que tienen un impacto directo en la infraestructura energética. Durante el fenómeno de La Niña 2010-2011, las precipitaciones excesivas generaron daños a la infraestructura energética valorados en 876.648 millones de pesos colombianos (aproximadamente 470 millones de dólares), afectando plantas generadoras y redes de transmisión, asimismo, en un escenario de aumento del nivel del mar de un metro, se estima que 4.900 km<sup>2</sup> de las costas del Caribe y Pacífico quedarían permanentemente inundados, afectando tanto a la infraestructura energética como a más de 1,4 millones de habitantes en estas regiones [27].

En este contexto, la teledetección se convierte en una herramienta clave para identificar y mapear áreas vulnerables a estos eventos extremos, esta técnica recopila datos de radiación electromagnética reflejada o emitida, facilitando el análisis de fenómenos terrestres [28], para el caso de Colombia, el acceso a bases de datos climáticas y geográficas proporcionadas por el IDEAM permite integrar información crítica sobre irradiación solar y riesgos naturales, estas bases de datos se procesan mediante plataformas como ArcGIS, que posibilitan el modelado geoespacial avanzado, donde herramientas como la superposición de capas y el análisis espacial permiten combinar datos de irradiación solar con mapas de susceptibilidad ambiental, identificando zonas seguras y óptimas para el desarrollo de proyectos solares.

Investigaciones internacionales, como las de [29], han demostrado cómo la integración de teledetección y SIG facilita la evaluación de recursos y riesgos en contextos de alta variabilidad geográfica. En Colombia, estudios como "Design of an Energy Vulnerability Index" [30], resaltan la importancia de incorporar estas herramientas en la planificación energética para mejorar la resiliencia del sistema energético frente a eventos extremos, este enfoque no solo asegura un mejor aprovechamiento del potencial solar en áreas de alta irradiación como Bolívar, sino que también contribuye a minimizar el impacto de desastres naturales en la infraestructura energética. Al diversificar el mix energético con fuentes renovables no convencionales, como la solar, se reduce la dependencia hidroeléctrica, se refuerza la resiliencia del sistema y se alinea la planificación energética con principios de sostenibilidad frente al cambio climático.

En conclusión, se han identificado vacíos significativos en Colombia en cuanto al análisis integral del potencial solar y su relación con las posibles zonas de riesgo ante eventos naturales extremos, aunque se dispone de información relevante sobre irradiación solar y amenazas ambientales, la integración de estas variables para identificar áreas seguras y óptimas para proyectos solares sigue siendo limitada. Este estudio busca contribuir a cerrar estos vacíos mediante un enfoque específico en la región Caribe, particularmente en el departamento de Bolívar, combinando herramientas avanzadas como sensores remotos y SIG para ofrecer un análisis detallado que apoye la planificación energética sostenible y resiliente en esta zona estratégica del país.

## Capítulo 5

### METODOLOGÍA

La metodología propuesta se compone de varias etapas que serán desarrolladas para cumplir con los objetivos del proyecto. Estas etapas se basan en el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), el análisis de datos geospaciales y la integración de información sobre potencial solar, riesgos naturales y características ambientales del departamento de Bolívar. A continuación, en la figura 1 se presenta el diagrama de la metodología, la cual se llevó a cabo en cuatro fases para abarcar todo el desarrollo de la presente investigación.

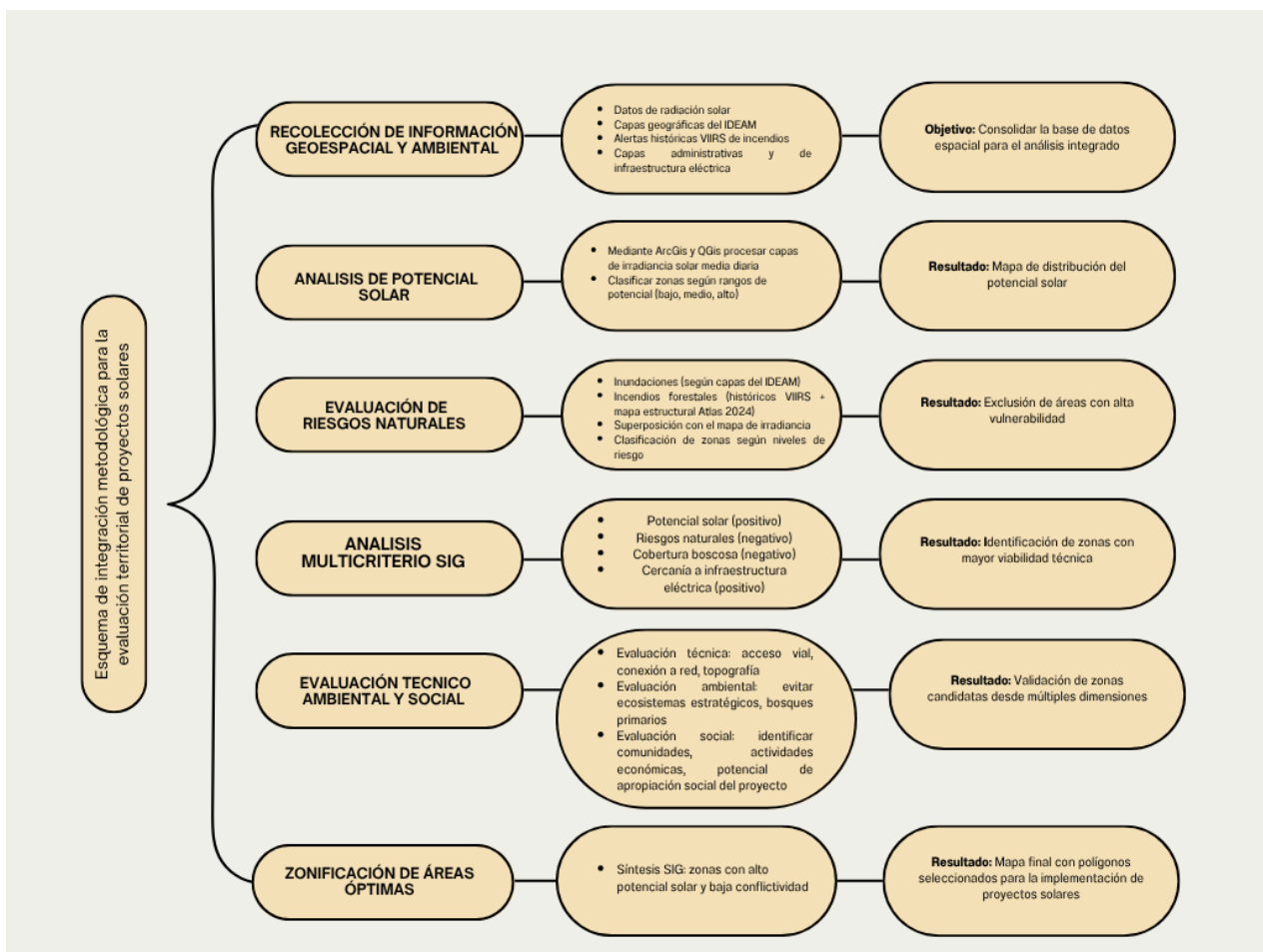


Figura 1. Esquema de integración metodológica para la evaluación territorial de proyectos solares. Elaboración Propia.

### **5.1 Análisis de radiación solar**

Inicialmente se recopiló shapefile a nivel nacional que contiene información de irradiancia solar, proveniente de fuentes confiables como el IDEAM, los cuales fueron procesados en el software ArGis para generar un mapa detallado que refleje las zonas de alto potencial solar. Se consideró categorizar la irradiancia en tres rangos principales, baja, moderada y alta, con los valores  $< 4.5 \text{ kW}/\text{m}^2$ , entre  $4.5 \text{ kW}/\text{m}^2$  y  $5.5 \text{ kW}/\text{m}^2$ , y  $> 5.5 \text{ kW}/\text{m}^2$  respectivamente, con el fin de interpretar los datos permitiendo delimitar preliminarmente las zonas con mayor potencial, que posteriormente se integrará con otras variables como el riesgo a inundaciones, cobertura ambiental, etc.

### **5.2 Análisis de riesgos naturales**

Ahora bien, se recopilaron también shapefiles a nivel nacional, pero de ahora información con parámetros ambientales de riesgo, como zonas susceptibles a inundaciones, cobertura arbórea, entre otros igualmente recolectados de datos abiertos del IDEAM, para ser procesados y visualizados en ArcGis. Para la interpretación de los datos, en el caso de inundaciones, se categorizan las zonas en tres niveles, Bajo, Moderado y Alto, con el fin de discriminar aquellas áreas donde la instalación de infraestructura solar, puede verse comprometida por afectaciones recurrentes o severas. De la misma forma, en el caso de los incendios forestales, se dividió al territorio en los mismos tres niveles de riesgo de acuerdo a la distribución de registros históricos y la presencia de los diferentes tipos de coberturas vegetales.

Este ejercicio permitió identificar las zonas menos expuestas a eventos extremos, lo cual es fundamental para asegurar la sostenibilidad técnica de los proyectos en el ámbito social. Estos resultados fueron después combinados con otras capas de información, tal es el caso de la irradiación solar, coberturas de bosques, entre otros, para llevar a cabo un análisis multicriterio más completo en etapas posteriores del análisis.

Para garantizar la claridad y transparencia del alcance espacial y temporal del estudio, se precisa que los insumos geoespaciales empleados provienen de fuentes oficiales como el IDEAM y otros repositorios de datos abiertos, correspondientes al período 2010-2023, asegurando su representatividad y vigencia. El área de estudio comprende la totalidad del departamento de Bolívar, Colombia, con una extensión aproximada de 25.978 km<sup>2</sup>.

### 5.3 Integración y análisis multicriterio

Para lograr encontrar las zonas con las áreas óptimas, inicialmente se realizó una evaluación cualitativamente con series históricas de inundaciones y focos de calor, que aportaran consistencia y contraste a los siguientes resultados donde se realizó un análisis estadístico integrado en el software ArcGIS empleando la función Weighted Overlay, que permite combinar múltiples capas raster georreferenciadas y asegurándose que todas compartan la misma resolución y extensión territorial. Siendo que los datos descargados en pasos anteriores, algunos solo cuentan con formato tipo Shapefile, en estos casos, se realizó la transformación a formato raster y su reclasificación en función de su influencia positiva o negativa sobre la viabilidad de implementación de proyectos solares.

Posteriormente, a cada variable se le asignó un peso relativo dentro del modelo, expresado en porcentaje, según su relevancia técnica y ambiental, y ahora si con la utilización de la herramienta Weighted Overlay, se suma de manera ponderada los valores pixel por pixel, generando así una capa final que representa un índice de idoneidad territorial, permitiendo integrar de forma objetiva distintos factores de decisión y facilitar la visualización espacial de las áreas más favorables. En concreto, el flujo SIG–AMC siguió los siguientes pasos:

- Armonización espacial (misma proyección, resolución y extensión) y transformación a raster
- Reclasificación de cada variable en una escala ordinal 1–5 (1 = condición desfavorable, 5 = condición favorable) según su contribución a la idoneidad
- Normalización de valores y aplicación de ponderaciones según relevancia técnica y ambiental
- Cálculo del índice de idoneidad territorial mediante Weighted Overlay
- Enmascaramiento de áreas con restricciones (Fenómenos naturales)

Se considerarán como zonas priorizadas las celdas clasificadas como ‘alta’ y ‘óptima’ ( $\geq$  percentil 80), para posteriormente, agregar el índice por límites municipales, ordenar el territorio y facilitar la toma de decisiones. Con el fin de evaluar la robustez del modelo, se realizó un análisis de sensibilidad variando las ponderaciones del AMC en dos escenarios adicionales frente al caso base (S0) y para cada escenario se recalculó el índice de

idoneidad territorial mediante Weighted Overlay y se reclasificaron los resultados con el mismo criterio del escenario base, manteniendo proyección, resolución y extensión.

#### **5.4 Evaluación técnica y social**

Luego de identificar las zonas óptimas para la instalación de proyectos solares, se añadió una evaluación en función de factores técnicos y sociales, entre estos evaluados, se encuentra la distancia a la red de distribución de energía eléctrica, así como los beneficios para comunidades vecinas. Además, se recaudó información sobre la infraestructura disponible en cada una de las zonas escogidas, a la vez que vías de acceso, junto con datos sobre impacto social, factores también determinantes para evaluar la viabilidad de un proyecto como se expondrá más adelante, teniendo en cuenta que puede beneficiar a las comunidades cercanas en términos de empleo, acceso a energía limpia y mejora de su calidad de vida.

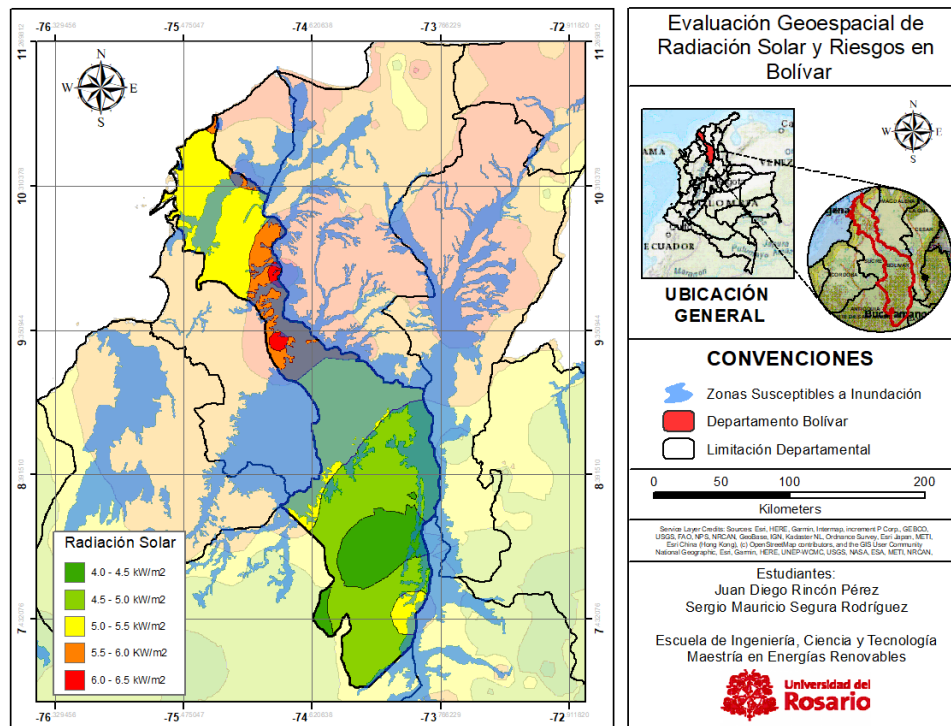
## **Capítulo 6**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el cumplimiento de los objetivos planteados en la presente investigación. Para esto fue conveniente el uso de herramientas SIG y datos geoespaciales, a los cuales se adicionaron la información de radiación solar y los respectivos riesgos naturales. El fin de este análisis es buscar identificar las zonas que sean óptimas y seguras para la instalación de proyectos solares en Bolívar.

En esta sección no solo se responde al objetivo de identificar estas zonas con viabilidad energética, sino que también se formulan alternativas para prevenir y mitigar riesgos climáticos a la vez que se brindan beneficios a la comunidad. En este sentido, la inclusión de herramientas SIG facilitó la superposición de diferentes capas de información, permitiendo analizar el territorio de manera espacial y elaborando mapas temáticos que ayudan a orientar decisiones.

## 6.1 Análisis del Potencial Solar en el Departamento de Bolívar

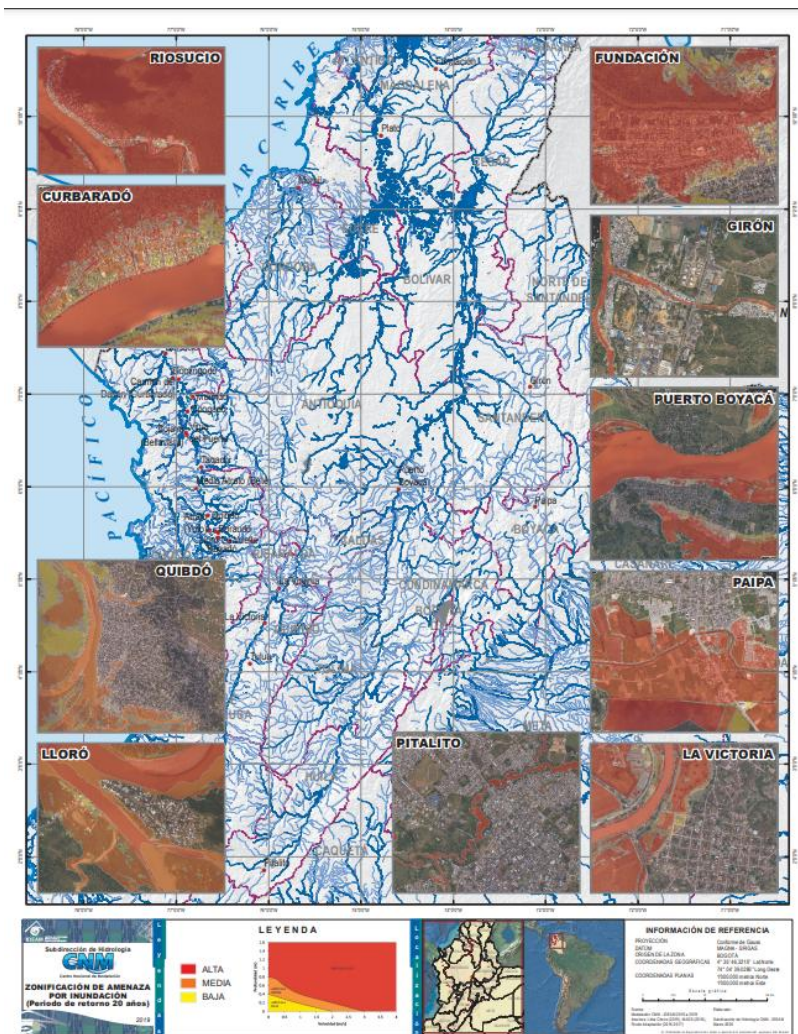


*Figura 2. Distribución espacial de la radiación solar y las áreas vulnerables a inundaciones en el departamento de Bolívar. Elaboración propia.*

En la figura 2 se muestra la inclusión de la radiación solar determinadas por una escala de colores, siendo la radiación mínima de 4.0 kW/m<sup>2</sup> y la máxima de 6.5 kW/m<sup>2</sup>, y las áreas vulnerables a inundaciones. Se evidencia que en la región norte y central se encuentran los valores máximos, estas presentan un potencial significativo para el desarrollo de proyectos solares ya que, superan los 5.5 kW/m<sup>2</sup> al día que es considerado un nivel óptimo para la implementación de los mismos, por el contrario, las zonas sur del departamento tienen niveles de irradiancia más bajos, en el rango de 4.0 a 4.5 kW/m<sup>2</sup>, lo que reduce su eficiencia energética.

Paralelamente, se realizó un análisis de las zonas susceptibles a inundaciones, los cuales fueron extraídos del IDEAM [31], evidenciando que la región central es la más propensa a inundaciones debido a que es atravesada por el río Magdalena, además de la presencia de múltiples ciénagas y sistemas hídricos interconectados que, durante eventos de lluvias intensas, incrementan el riesgo de desbordamiento [32].

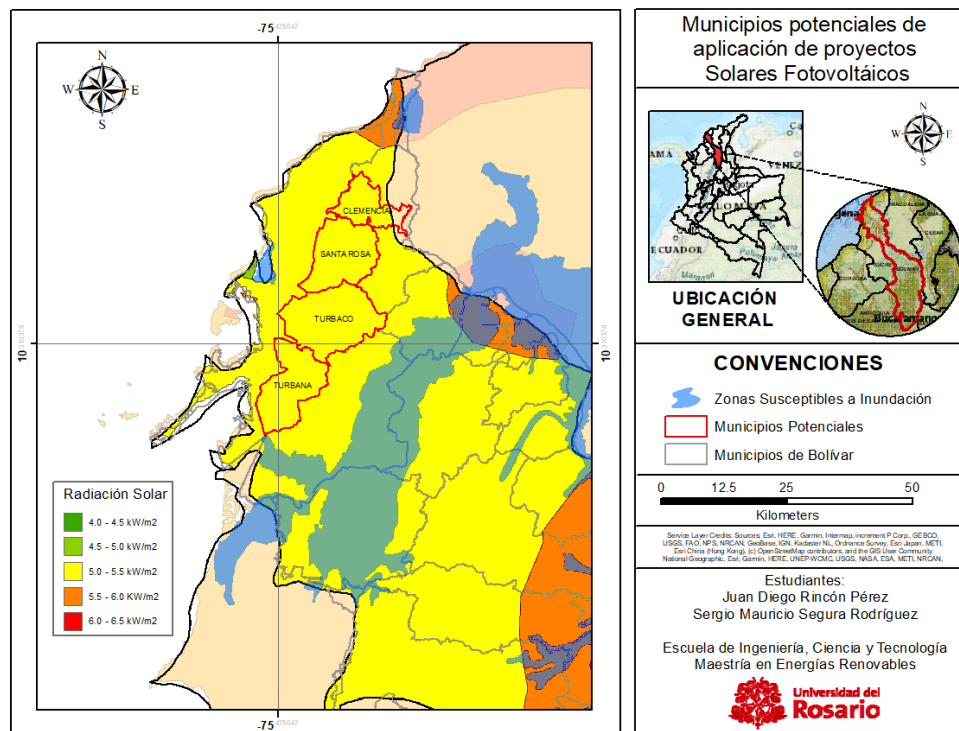
Las inundaciones en esta área representan un desafío considerable para la implementación de proyectos solares, ya que, según estudios realizados por el IDEAM en 2019 [33], y como se evidencia en la figura 3, en un periodo de retorno de 20 años, las zonas afectadas por inundaciones, seguirán concentrándose principalmente en el centro del departamento, coincidiendo además con la vida útil promedio de los paneles solares, por otro lado, la zona costera del departamento muestra una menor afectación proyectada dentro de este periodo, posicionándola como una opción más viable para el futuro de los proyectos.



*Figura 3. Zonificación de amenaza por inundación en un periodo de retorno de 20 años (PR20) en el departamento de Bolívar. Tomado de: [33].*

En contraste, la zona sur del departamento presenta una menor susceptibilidad a inundaciones, sin embargo, enfrenta limitaciones tanto por las relacionadas con eficiencia





*Figura 5. Identificación de municipios prioritarios para proyectos solares en el departamento de Bolívar. Elaboración propia.*

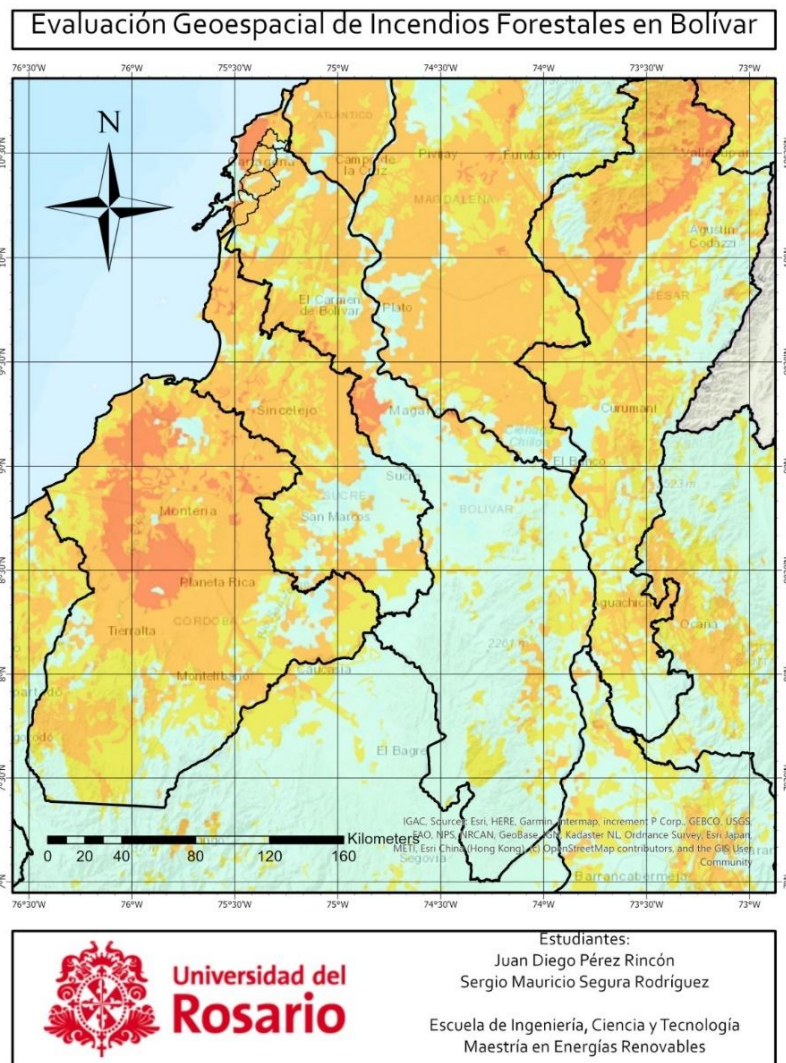
El segundo factor relevante fue el riesgo de inundaciones, basado en la capa proporcionada por el IDEAM, donde se descartan zonas con alta susceptibilidad a inundaciones, especialmente aquellas ubicadas en la región central de Bolívar, que atraviesa el río Magdalena, las cuales representan un alto riesgo para la infraestructura solar debido a la frecuencia de inundaciones, en cambio, los municipios seleccionados presentaron una menor vulnerabilidad con niveles bajos a moderados de susceptibilidad a inundaciones permitiendo una planificación más segura y sostenible.

Esta evaluación se ve respaldada por acontecimientos ocurridos en años anteriores, que corroboran lo mostrado en la figura 2 y 4, durante la temporada invernal 2010-2011, asociada al fenómeno de La Niña, las fuertes lluvias presentadas causaron el desbordamiento del río Magdalena y generaron daños significativos en infraestructura y viviendas, en municipios ribereños como Magangué y Achí [34]. Otro caso más reciente, ocurrió en el año 2020, donde también debido a fuertes lluvias y por consecuencia

inundaciones, se presentaron nuevas emergencias en municipios del sur y centro de Bolívar como Morales y Simití por la saturación de ciénagas interconectadas [35].

Otro aspecto importante fue la cobertura de bosques naturales, que sirvió como un criterio de exclusión, donde las zonas con alta densidad de bosque, especialmente en el sur de Bolívar, fueron descartadas para evitar impactos negativos en los ecosistemas locales, dando como resultado que este factor de sostenibilidad ambiental restringiera las opciones en el sur del departamento y favoreciendo áreas con menor cobertura forestal, como las ubicadas en los municipios seleccionados, donde los proyectos solares podrían desarrollarse sin comprometer la conservación de los bosques.

Adicionalmente, se debe considerar que la presencia alta de bosques, aporta a la susceptibilidad a incendios forestales, sobre todo en zonas de transición agrícola y ecosistemas de bosque seco tropical, que presentan condiciones de alta inflamabilidad durante las temporadas secas y son agravadas por el uso de fuego en prácticas agrícolas tradicionales [36]. Ahora bien, la instalación de infraestructura solar en áreas con riesgo de incendios, puede aumentar la vulnerabilidad del proyecto, tanto por el posible daño a los equipos, como por el riesgo de provocar o amplificar emergencias ambientales si no se manejan adecuadamente los combustibles vegetales [37]. Por esta razón, se propone incluir mapas de incendios y tener en cuenta datos históricos de su ocurrencia para dar prioridad a las zonas con menor frecuencia de este tipo de fenómenos.



*Figura 6. Zonificación de susceptibilidad a incendios forestales en el departamento de Bolívar. Elaboración propia.*

Como se puede observar en la figura 6, la mayor parte de las zonas que se presentan como propensas a incendios forestales, producto de características de vegetación, se concentran en el norte del departamento de Bolívar, las cuales coinciden con los municipios priorizados como potencialmente óptimos para el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos, por tanto, resulta fundamental realizar un análisis histórico detallado de esta amenaza para orientar la toma de decisiones. Para este análisis, se consideraron distintos factores de evaluación del riesgo incluyendo, el historial de alertas satelitales VIIRS, que

corresponden a detecciones de focos de calor mediante sensores satelitales, la pérdida de cobertura arbórea por incendios, y los periodos específicos de ocurrencia en el año para estos eventos. Los datos fueron obtenidos de fuentes confiables como Global Forest Watch, teniendo en cuenta los registros comprendidos entre 2001 y 2025 [38].

En relación con la frecuencia histórica de alertas VIIRS, se observa que Turbaco registra la mayor cantidad acumulada entre 2011 y 2025, con 294 alertas, seguido por Turbaná con 274, Clemencia con 237 y Santa Rosa con 222 [38]. Si bien los valores son comparables entre sí, resulta interesante de analizar que municipios más pequeños y con menor desarrollo industrial, registren esta misma recurrencia, lo cual podría estar vinculado con quemas agropecuarias tradicionales o prácticas de manejo de suelo que conllevan al uso descontrolado de fuego.

Al mismo tiempo, también se tiene en cuenta los años críticos de cada municipio, siendo que existen variaciones evidentes en la afectación por incendios. Ejemplo de esto, en Turbaná el año 2017 se caracterizó por una pérdida significativa de cobertura arbórea, alcanzando un total de 27 hectáreas afectadas y representando el 30% de la pérdida total del municipio, mientras que, en Turbaco y Santa Rosa, los picos se registraron en el año 2018 con solo pérdidas de 12 ha y 2 ha respectivamente. Por su parte, Clemencia alcanzó su mayor número de alertas en 2020, aunque sin una pérdida de cobertura forestal significativa [38].

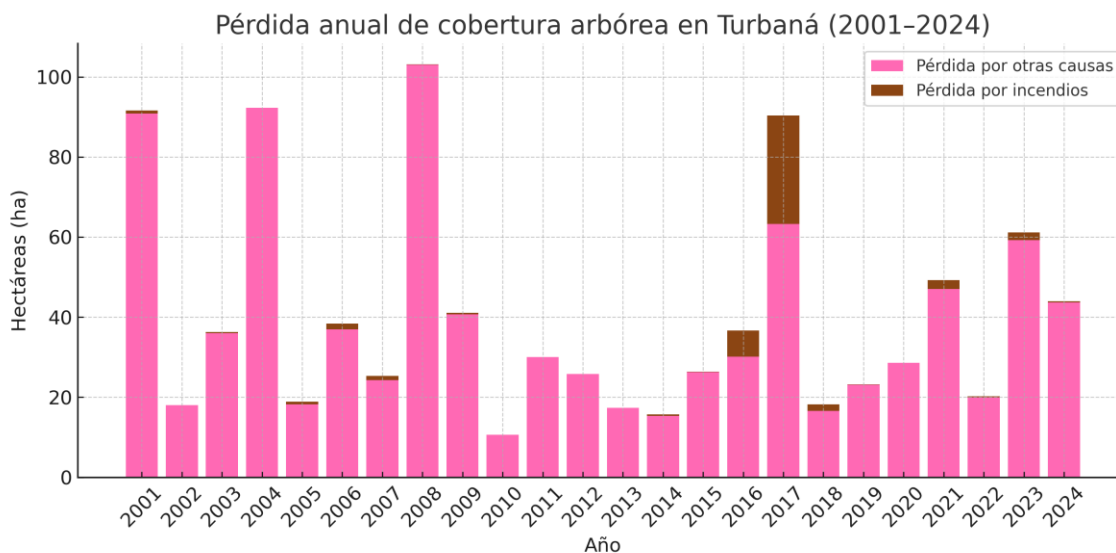


Figura 7. Pérdida de cobertura arbórea en Turbaná (2001–2024). Tomado de: [38].

No obstante, al analizar la pérdida total de cobertura arbórea en el periodo 2001 a 2024, se evidencia que los incendios forestales representan una proporción reducida de esta pérdida total, siendo el resto atribuido a factores como deforestación, expansión agrícola y urbanización. Por ejemplo, en Turbaná, solo el 4.7% de la pérdida arbórea fue causada por incendios, mientras que, en municipios como Clemencia o Santa Rosa, dicha proporción fue inferior al 1% [38].

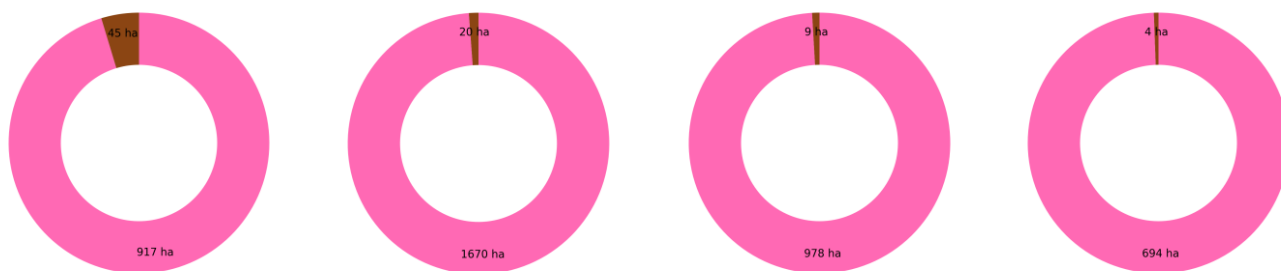


Figura 8. Pérdida de cobertura arbórea por incendios frente a otras causas para Turbaná, Turbaco, Santa Rosa y Clemencia respectivamente. Tomado de: [38].

- Hectáreas de cobertura arbórea perdidas como consecuencia directa de incendios forestales detectados mediante alertas VIIRS

- Hectáreas de cobertura arbórea perdidas por otras causas, como expansión agrícola, deforestación por actividades humanas, desarrollo urbano o degradación progresiva del suelo.

Estos hallazgos sugieren que, aunque los incendios forestales deben ser tomados en cuenta para el análisis de riesgo, para este caso en particular del departamento de Bolívar, no representan mayor amenaza para el desarrollo de proyectos solares, siendo que históricamente la causa de pérdida de cobertura no está representada por dicho fenómeno como se puede observar en la figura 8. De igual manera, deben contemplarse medidas para la prevención y mitigación y así garantizar la seguridad de la infraestructura fotovoltaica, dentro de estas medidas se encuentran:

- Implementación de zonas de amortiguación o cortafuegos (naturales o artificiales) alrededor de las plantas solares, especialmente en zonas de interfaz rural-boscosa.
- Desarrollo de programas comunitarios de sensibilización ambiental.

Adicionalmente a estas estrategias y como complemento, se debe sumar el monitoreo continuo de alertas VIIRS y mejora de la planificación territorial, lo cual permitirá minimizar el riesgo operativo de los proyectos solares y fortalecer la resiliencia ambiental en los municipios priorizados.

Para resumir esta información, a continuación, se presenta una tabla comparativa que detalla los indicadores clave considerados en los municipios seleccionados:

*Tabla 1. Comparativa de Indicadores Clave en los Municipios Seleccionados para Proyectos Solares en Bolívar. Elaboración propia.*

<b>Municipio</b>	<b>Irradiancia solar (kW/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Nivel de riesgo (inundación)</b>	<b>Nivel de riesgo (incendios)</b>	<b>Áreas protegidas</b>
<i>Clemencia</i>	<i>5.0 – 5.5</i>	<i>Baja</i>	<i>Moderado</i>	<i>Sin restricción</i>
<i>Santa Rosa</i>	<i>5.0 – 5.5</i>	<i>Baja</i>	<i>Moderado</i>	<i>Sin restricción</i>
<i>Turbaco</i>	<i>5.0 – 5.5</i>	<i>Baja</i>	<i>Moderado</i>	<i>Sin restricción</i>
<i>Turbaná</i>	<i>5.0 – 5.5</i>	<i>Baja</i>	<i>Moderado</i>	<i>Sin restricción</i>

Como se pudo observar en la tabla 1, los niveles de irradiación solar en los municipios seleccionados oscilan entre 5 a 5.5 kW/m<sup>2</sup>. Estos valores son comparables a los registrados en otras regiones del Caribe colombiano, como el departamento del Cesar, mismo donde

se encuentra el proyecto Parque Solar El paso con una capacidad instalada de 86.2 MWdc, en este departamento la irradiancia solar oscila entre los 5.5 a los 6 kW/m<sup>2</sup> [25], demostrando que los niveles de irradiancia en Bolívar son adecuados para satisfacer las necesidades energéticas de comunidades locales. También es importante destacar que cualquier intervención en el departamento debe considerar las regulaciones ambientales vigentes y la importancia de preservar los ecosistemas locales, especialmente en la región sur, donde la cobertura de bosque natural es significativa.

Esto debido a que la implementación de proyectos solares en zonas cercanas a coberturas vegetales requiere una planificación cuidadosa para evitar impactos negativos en los ecosistemas, experiencias en otros proyectos como el realizado en Puerto Gaitán, Bosques Solares Los Llanos, se enfrentaron con varios desafíos relacionados con la remoción de vegetación y la fragmentación del hábitat, lo que los llevó a la reducción significativa del área original proyectada, para poder minimizar estos impactos [39]. Ahora bien, en el caso de Bolívar, se recomienda priorizar la instalación de sistemas solares en áreas ya intervenidas o de baja sensibilidad ecológica, para evitar lo sucedido anteriormente adicionalmente de pérdidas económicas asociadas.

En cuanto a los dos principales riesgos naturales identificados en la zona de estudio (inundaciones e incendios forestales), es necesario evaluar cuál representa un mayor desafío técnico y económico para la viabilidad de los proyectos solares fotovoltaicos. En primera instancia, las inundaciones en los municipios del centro de Bolívar han sido recurrentes, especialmente en zonas adyacentes al río Magdalena y sistemas de ciénagas interconectadas, aunque en el presente estudio se descartaron estas zonas de alta susceptibilidad, sigue siendo importante destacar que las inundaciones representan un riesgo estructural de alto impacto, ya que, según [40], pueden:

- Dañar de forma permanente la infraestructura (bases de módulos, inversores, redes).
- Inhabilitar el acceso al sitio durante días o semanas.
- Generar pérdida de aislantes eléctricos por contacto con el agua o lodo.

Desde el punto de vista técnico, la mitigación de este tipo de riesgo requiere soluciones costosas como:

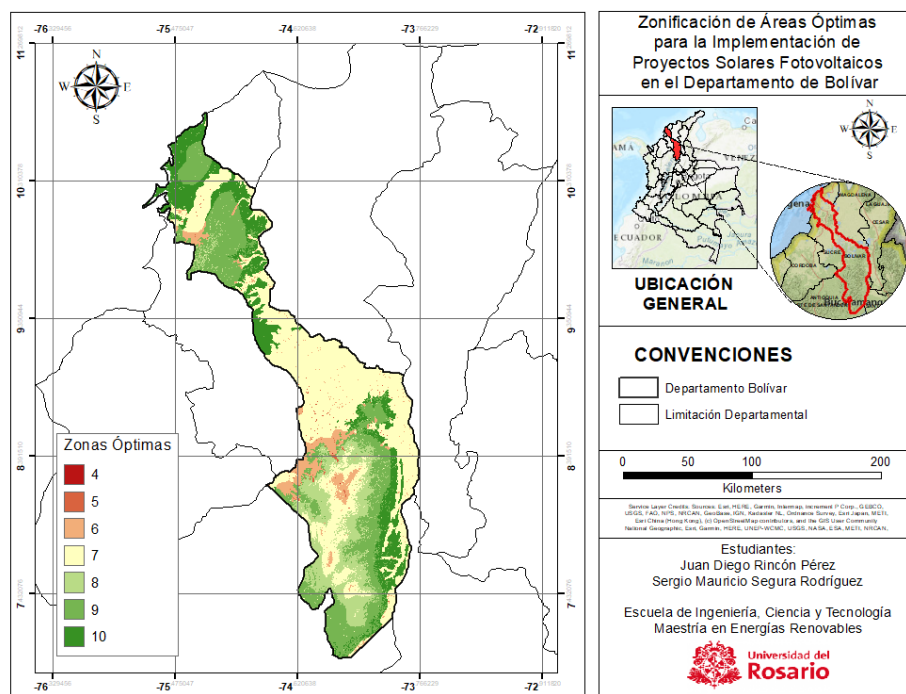
- Elevación del sistema sobre plataformas o pilotes.
- Diseño hidráulico de drenajes, zanjas perimetrales y bombeo.
- Análisis hidrológico e hidráulico detallado (curvas IDF, periodos de retorno).
- Accesos pavimentados o elevados [41].

A nivel económico, estos requerimientos pueden representar un incremento de entre 15% y 40% del CAPEX inicial dependiendo de la severidad del riesgo y la escala del sistema solar [42], esto según literatura técnica y estudios de campo en zonas húmedas tropicales. En contraste, los incendios forestales en los municipios priorizados muestran un patrón de baja intensidad, duración corta y frecuencia moderada, como se evidenció en el análisis con datos VIIRS y Global Forest Watch. Aunque representan una amenaza real para la integridad de equipos y cableado, especialmente en zonas rurales sin vigilancia, su impacto es más fácilmente prevenible y manejable si se implementan las medidas mencionadas anteriormente, adicionalmente que, desde el punto de vista económico, estas soluciones requieren a su vez baja inversión inicial. Este costo relativo de implementar una estrategia preventiva contra incendios puede representar menos del 5% del CAPEX del proyecto, y muchas de estas acciones pueden integrarse en la fase constructiva sin requerir rediseño estructural [43].

Con el fin de corroborar los resultados evaluados anteriormente, se procedió a realizar un análisis multicriterio con la ayuda de ArcGIS e integrando todas las variables (radiación, inundaciones, incendios, cobertura de bosques), para poder delimitar las zonas óptimas de implementación de proyectos solares fotovoltaicos, pero esta vez de manera estadística y espacial. Este análisis fue desarrollado utilizando funciones de ponderación de raster y superposición de capas, estableciendo los siguientes criterios de evaluación y peso relativo dentro del modelo, de acuerdo con su impacto técnico y ambiental:

- Radiación solar: 50 %
- Susceptibilidad a inundaciones: 35 %
- Riesgo de incendios forestales: 10 %
- Cobertura de bosques naturales: 5 %

La radiación solar obtuvo el mayor peso por ser el factor determinante en la generación energética, mientras que el riesgo de inundación se consideró como la amenaza más relevante en términos estructurales, por el lado de los otros fenómenos, fueron integrados como restricciones menores pero significativas en el modelo por lo expuesto anteriormente, el resultado de esto se puede evidenciar a continuación en la figura 9.



*Figura 9. Zonas óptimas para el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos de acuerdo a la integración de variables y análisis de superposición. Elaboración propia.*

Dicha figura muestra la zonificación del territorio de Bolívar según su nivel de idoneidad para la implementación de proyectos solares, donde las áreas con tonos verdes reflejan las zonas con mayor viabilidad técnica y ambiental, mientras que los tonos rojizos indican zonas con restricciones o riesgos significativos que limitan su aprovechamiento, a partir de esta premisa, se observa una alta concentración de zonas óptimas en la región norte coincidiendo con los municipios seleccionados anteriormente y respaldando dicha elección.

Con el fin de evaluar la robustez de los resultados obtenidos en este escenario base, se procedió a realizar un análisis de sensibilidad modificando las ponderaciones asignadas a

cada variable en el análisis multicriterio, este ejercicio permite identificar si la priorización territorial se mantiene consistente ante cambios razonables en la importancia relativa de los factores evaluados. Para ello, se definieron dos escenarios adicionales: uno con pesos iguales para todas las variables y otro con mayor énfasis en los riesgos naturales, reduciendo la influencia de la radiación solar, a continuación, se muestran las ponderaciones consideradas en cada escenario en la siguiente tabla.

*Tabla 2. Escenarios de ponderación para análisis de sensibilidad. Elaboración propia.*

<b>Escenario</b>	<b>Radiación Solar (%)</b>	<b>Inundaciones (%)</b>	<b>Incendios Forestales (%)</b>	<b>Cobertura de Bosques (%)</b>
<b>S0 – Base</b>	50	35	10	5
<b>S1 – Pesos Iguales</b>	25	25	25	25
<b>S2 – Riesgos Prioritarios</b>	10	30	30	30

Este análisis complementario de la tabla 2 ofrece una visión más completa de la estabilidad del modelo y de las áreas cuya priorización es más sensible a modificaciones en los criterios de evaluación, lo que resulta clave para orientar decisiones estratégicas y minimizar riesgos en la localización de futuros proyectos solares.

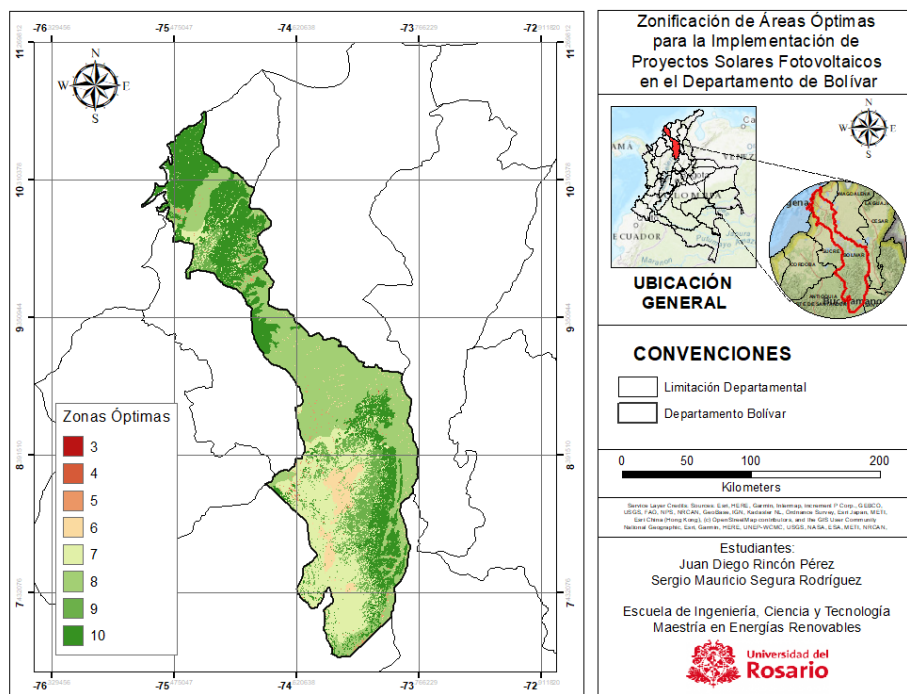
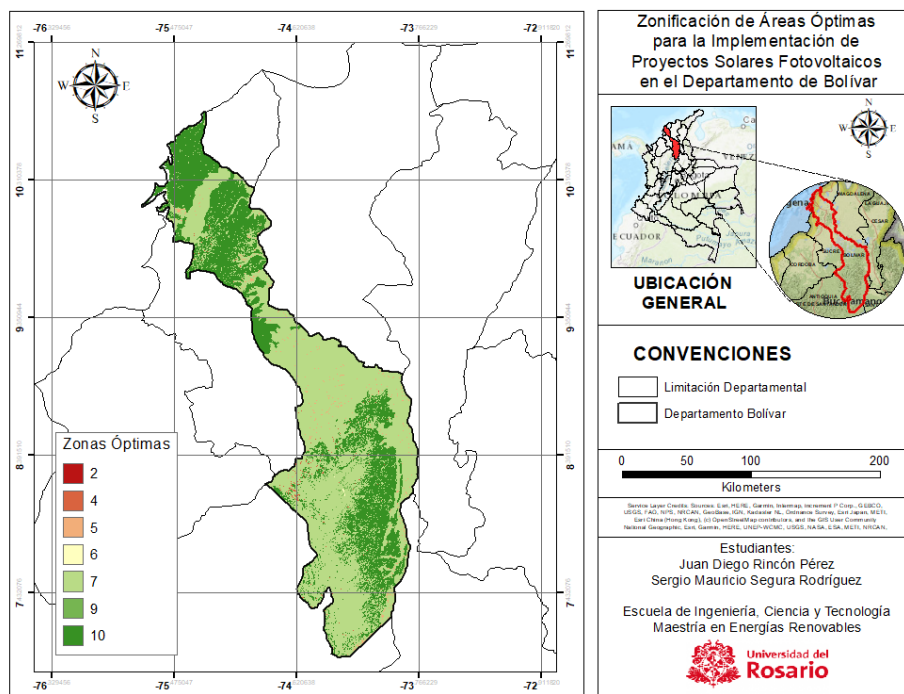


Figura 10. Escenario S1: Pesos iguales (25 % cada variable). Elaboración propia.

Al contrastar el mapa del escenario base (S0) con el escenario de pesos iguales (S1), se observan cambios notables en la distribución espacial de las áreas clasificadas como “óptimas” y “altas”. En S0, el peso predominante de la radiación solar (50 %) concentra las zonas de mayor idoneidad principalmente en el norte del departamento y en sectores puntuales del centro, donde se combinan altos niveles de irradiancia con baja exposición a inundaciones e incendios forestales, mientras que en en S1, provoca que áreas con irradiancia media pero baja susceptibilidad a inundaciones e incendios ganen relevancia en el índice final, evidenciando así una expansión de zonas clasificadas como óptimas hacia el centro y sur del departamento, especialmente en sectores que en S0 aparecían con viabilidad media.

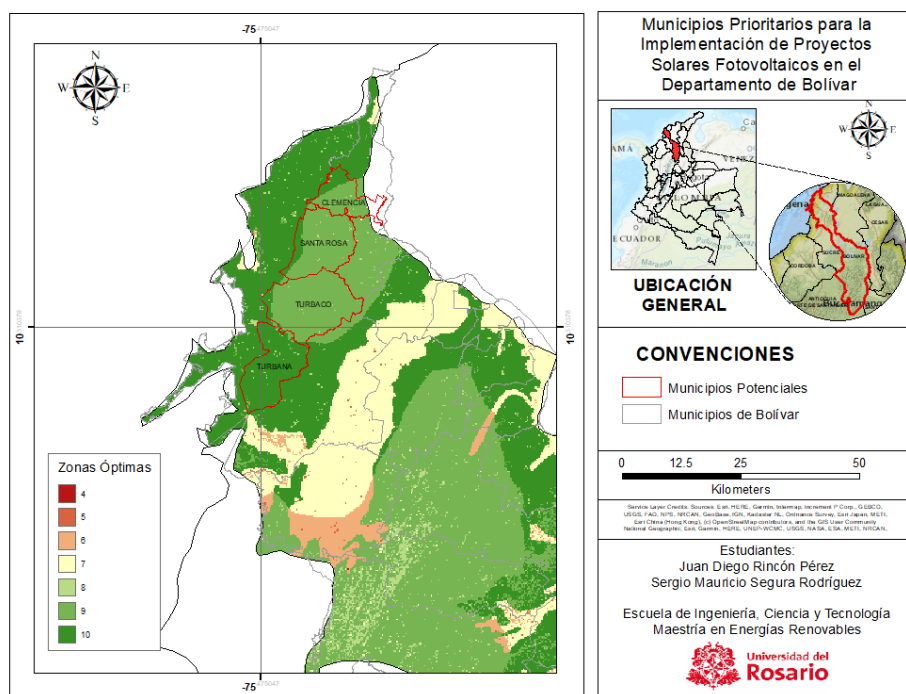


*Figura 11. Escenario S2: Riesgos prioritarios (Radiación 10 %, Inundaciones 30 %, Incendios 30 %, Bosque 30 %). Elaboración propia.*

En el escenario de riesgos prioritarios (S2), la radiación solar pierde protagonismo (10 %), esto provoca un fenómeno de compensación donde las zonas con alto riesgo en una variable tienden a presentar bajo riesgo en otra (por ejemplo, áreas con susceptibilidad a inundaciones suelen tener baja densidad de bosque, y viceversa). Este efecto de equilibrio entre amenazas reduce la capacidad discriminatoria del modelo y amplía de manera considerable la superficie clasificada como “óptima” en el mapa, abarcando gran parte del territorio departamental.

A pesar de las variaciones observadas en los escenarios alternativos, para la toma de decisiones y la discusión final de resultados se retoma el escenario base (S0), dado que refleja de forma más equilibrada la relación entre el recurso solar y las amenazas ambientales. En este escenario, la zona norte del departamento concentra las condiciones más favorables, coincidiendo con la ubicación de los municipios seleccionados, Turbaco, Clemencia, Santa Rosa y Turbaná, que reúnen el mejor balance entre alta irradiancia, baja exposición a riesgos y adecuada infraestructura de soporte, sin embargo, dentro de estos 4

municipios, también se encuentra uno con condiciones más favorables como se evidencia en la siguiente figura.



*Figura 12. Municipios seleccionados a partir de análisis multicriterio. Elaboración Propia.*

En la figura 12 se puede observar como a partir de un análisis más detallado y estadístico se puede determinar adicionalmente cual es el municipio con mejores condiciones, en este caso, Turbaco se presenta como el territorio más favorable que tiene una combinación equilibrada de todos los factores, alta irradiancia solar y baja susceptibilidad a fenómenos naturales, sin embargo, se debe realizar también el respectivo estudio tanto social como técnico en el sentido de integración de datos como cercanía a infraestructura eléctrica, vías de acceso, actividades económicas para aprovechar la energía, entre otros.

Dicho esto, la inclusión de las comunidades locales también es un componente fundamental para el desarrollo de proyectos, primero hace cumplimiento a las nuevas directrices regulatorias de Colombia, particularmente la Resolución CREG 075 de 2021, que establece las condiciones para la autogeneración y generación distribuida [44], y la más reciente Resolución CREG 101 072 de 2025, que armoniza el marco de integración de las

comunidades energéticas al Sistema Interconectado Nacional (SIN) [45]. Adicionalmente, desde el año 2022, el Ministerio de Minas y Energía (MME), en coordinación con la UPME y el apoyo de Fondo de Energías no Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE), también promovieron un programa nacional de Comunidades Energéticas, con el objetivo de empoderar a organizaciones sociales, juntas de acción comunal y asociaciones campesinas e indígenas para que se conviertan en actores activos del mercado energético [24] [46], permitiendo así, no solo el autoconsumo de energía limpia, sino también la comercialización de excedentes y la gestión colectiva del recurso.

Segundo, proyectos como el de Sol de Perijá, realizado en el corregimiento de Conejo en el municipio de Fonseca, La Guajira, han demostrado como la participación activa de las comunidades en la planificación y operación de sistemas solares, puede mejorar la calidad de vida y fortalecer la cohesión social [47], en el caso específico de Bolívar se recomienda establecer mecanismos de consulta y participación desde las etapas iniciales del proyecto, y capacitar a los miembros de la comunidad en la operación y mantenimiento de los sistemas solares.

Ahora bien, para que los proyectos solares sean viables, es importante también tener en cuenta su conexión a la red, por lo tanto, el tener infraestructura eléctrica cerca de las zonas seleccionadas es un criterio esencial a considerar. En este sentido, municipios como Clemencia, Santa Rosa, Turbaco y Turbaná, cuentan con el acceso a infraestructura existente, lo cual representa una ventaja al reducir los costos asociados a la expansión de la red, por ejemplo, en 2022 se entregó una nueva línea de transmisión de 66 km entre las subestaciones Sabanalarga y Bolívar, beneficiando a municipios como Santa Catalina, Clemencia, Villanueva y Santa Rosa [48], siendo un factor técnico determinante para corroborar la viabilidad de los proyectos en las zonas seleccionadas. Sumado a eso, los caminos terciarios y vías principales de acceso que conectan estos municipios con zonas de comercio y logística regional, también facilitan el transporte de materiales e insumos, reduciendo los costos logísticos y mejorando la eficiencia en la ejecución [49].

En cuanto al aprovechamiento de la energía generada, es importante saber cuáles son las actividades económicas de las zonas seleccionadas, para poder distribuir de manera correcta y ofrecer oportunidades a las comunidades locales. En el caso de los municipios

como Turbaco y Santa Rosa tienen un crecimiento en sectores como el comercio, el agro y el turismo rural, mientras que Clemencia y Turbaná presentan dinámicas agropecuarias [50] [51], en ambos casos, la energía generada podría ser aprovechada para sistemas de riego, almacenamiento de productos agroalimentarios, agroindustria a pequeña escala, entre otros, fortaleciendo el desarrollo productivo local y promoviendo cadenas de valor sostenibles en el territorio.

Como complemento al análisis de resultados, se consideró pertinente aplicar de manera retrospectiva la metodología desarrollada en este trabajo a casos reales de proyectos de energía renovable en el Caribe colombiano que han enfrentado dificultades técnicas, sociales o ambientales, permitiendo evidenciar cómo, si se hubiesen aplicado desde el inicio herramientas de análisis multicriterio con SIG, se habrían podido anticipar muchos de los problemas que afectaron su implementación, operación o sostenibilidad.

Un ejemplo representativo son los sistemas solares rurales implementados por el IPSE en municipios como Simití, Arenal y Morales, estos fueron concebidos para zonas no interconectadas, y los cuales enfrentaron deterioro prematuro de componentes por condiciones de humedad extrema, suelos mal drenados y una limitada apropiación por parte de las comunidades [52], de haberse aplicado una metodología como la desarrollada en este estudio, habría sido posible priorizar zonas con mayor viabilidad técnica y sostenibilidad social, reduciendo significativamente las fallas operativas y aumentando el impacto del proyecto a largo plazo.

Un segundo caso representativo es un análisis de sistemas fotovoltaicos aislados en zonas no interconectadas del país, conocido como ZNI, según [53], estos proyectos diseñados para cerrar brechas de electrificación rural, enfrentan desafíos significativos relacionados con la sostenibilidad operativa y la participación comunitaria. Su evaluación mediante un modelo FODA reveló carencias en la planificación que podrían haberse mitigado mediante criterios técnicos, ambientales y sociales integrados como los propuestos en este estudio, adicional a una falta de un análisis detallado del entorno hidrológico es un factor de riesgo que podría haberse evitado mediante proyecciones a partir de datos históricos o de por sí, proporcionados por entidades estatales como el IDEAM, tal como se propone en la metodología de este trabajo, siendo que la selección de un emplazamiento alternativo más

elevado o con mejor drenaje natural habría permitido minimizar costos de mantenimiento y reducir la exposición a eventos climáticos extremos.

El análisis desarrollado en el presente estudio ha permitido establecer una visión integral del potencial solar en el norte del departamento de Bolívar, articulando variables técnicas, ambientales, sociales y económicas, con base en los resultados obtenidos, se establece un marco metodológico replicable que puede ser utilizado por instituciones públicas, privadas y comunitarias interesadas en impulsar proyectos de generación distribuida, permitiendo reducir los riesgos asociados, optimizar recursos y maximizar beneficios locales.

## Capítulo 7

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se evidencia que el centro de Bolívar presenta niveles óptimos de irradiancia solar, siendo los más altos de todo el territorio, sin embargo, la evaluación realizada categoriza la zona como altamente susceptible a inundaciones debido a las ciénagas existentes, por otro lado, en el norte del departamento se presentan valores promedio entre 5.0 y 5.5 kW/m<sup>2</sup>, que son comparables con otras regiones del Caribe colombiano donde ya existen proyectos fotovoltaicos de gran escala, lo que lo posiciona como un territorio viable para la generación y no se ven comprometidas por niveles de riesgo altos frente amenazas naturales.
- La evaluación conjunta del potencial solar con variables de riesgo, permite identificar zonas prioritarias con condiciones seguras y baja interferencia ecológica, fortaleciendo la sostenibilidad de proyectos, no solo desde el punto de vista técnico, sino también ambiental y social.
- La metodología basada en SIG, sensores remotos y análisis multicriterio puede ser replicable en otros departamentos con características similares, como los aledaños, aportando herramientas para una planificación energética segura, debido a que la no inclusión de los mismos, conllevaría a que se tomen decisiones imprecisas que pueden terminar omitiendo factores clave para la gestión del riesgo.
- Como perspectiva para líneas futuras, se tendría en cuenta el desarrollo de modelos de simulación con análisis de sensibilidad extendidos, estimando costos y retorno de inversión en función de distintas configuraciones técnicas, a la vez que, la incorporación de criterios participativos a través de validación comunitaria o talleres participativos para ajustar ponderaciones del AMC.

### REFERENCIAS

- [1] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), IPSE, and Universidad del Atlántico, “DOCUMENTO DE OFERTA ENERGETICA, CONVENIO INTERINSTITUCIONAL,” 2022, [Online]. Available: [http://www.solarbankability.org/fileadmin/sites/www/files/documents/20161213\\_6](http://www.solarbankability.org/fileadmin/sites/www/files/documents/20161213_6)

- 49997\_Best\_Practice\_Guidelines\_for\_PV\_Cost\_Calculation\_20161213.pdf.
- [2] E. Schulte, F. Scheller, D. Sloot, and T. Bruckner, “A meta-analysis of residential PV adoption: the important role of perceived benefits, intentions and antecedents in solar energy acceptance,” *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 84, p. 102339, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102339>.
- [3] Y. C. Caicedo *et al.*, “Hydroclimatic and Land Use Drivers of Wildfire Risk in the Colombian Caribbean,” pp. 1–20, 2025.
- [4] J. Malczewski and C. Rinner, “Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science,” *Anal. methods*, no. Massam 1993, p. 331, 2015, [Online]. Available: [http://www.amazon.com/Multicriteria-Decision-Analysis-Geographic-Information/dp/3540747567/ref=sr\\_1\\_1?ie=UTF8&qid=1430864854&sr=8-1&keywords=Multicriteria+decision+analysis+in+geographic+information+science](http://www.amazon.com/Multicriteria-Decision-Analysis-Geographic-Information/dp/3540747567/ref=sr_1_1?ie=UTF8&qid=1430864854&sr=8-1&keywords=Multicriteria+decision+analysis+in+geographic+information+science).
- [5] W. Foster *et al.*, “Waste-to-energy conversion technologies in the UK: Processes and barriers – A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 135, p. 110226, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110226>.
- [6] M. Kaur, S. Sandhu, A. P. Toor, and V. Singh, “Time-dependent mechanistic insight into photo-degradation of mixed hydrophobic disperse dyes by magnetically separable nitrogen iron codoped titania under visible light using process variable optimization,” *J. Clean. Prod.*, vol. 342, p. 130940, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130940>.
- [7] ElUniversal, “Calamidad pública en Bolívar: hay más de 27 mil damnificados por las lluvias,” 2024. [Online]. Available: <https://www.eluniversal.com.co/regional/bolivar/2024/11/13/calamidad-publica-en-bolivar-hay-mas-de-28-mil-damnificados-por-las-lluvias/#:~:text=Ocio-,Calamidad pública en Bolívar%3A hay más de 27 mil damnificados,lluvias de las últimas semanas.>
- [8] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), “Plan Energético Nacional 2020-2050,” *Plan Energético Nac. 2020-2050*, p. 215, 2020, [Online]. Available: [https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN\\_2020\\_2050/Plan\\_Energetico](https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_2020_2050/Plan_Energetico)

\_Nacional\_2020\_2050.pdf.

- [9] Gobernación de Bolívar, “Bases del Plan de Desarrollo Bolívar Primero, 2020-2023,” p. 247, 2020.
- [10] El Congreso de Colombia, “Plan Nacional De Desarrollo 2022-2026,” *Plan Nac. Desarro. 2022-2026*, pp. 1–262, 2022.
- [11] H. Figueroa, “Santa Rosa, epicentro de las energías renovables en Bolívar,” 2022. [Online]. Available: [https://www.eluniversal.com.co/economica/2022/03/31/santa-rosa-epicentro-de-las-energias-renovables-en-bolivar/?utm\\_source](https://www.eluniversal.com.co/economica/2022/03/31/santa-rosa-epicentro-de-las-energias-renovables-en-bolivar/?utm_source).
- [12] J. Montaña, “Energías renovables: inauguran Parque Solar del Canal del Dique,” 2021. [Online]. Available: [https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/energias-renovables-inauguran-granja-solar-en-bolivar-627151?utm\\_source](https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/energias-renovables-inauguran-granja-solar-en-bolivar-627151?utm_source).
- [13] Departamento Nacional de Planeación *et al.*, “Conpes 4075,” *Dep. Nac. Planeación*, p. 108, 2022, [Online]. Available: [https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Conpes/CONPES\\_4075\\_DE\\_2022.pdf](https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Conpes/CONPES_4075_DE_2022.pdf).
- [14] E. B. Pereira *et al.*, “Brazilian Atlas of solar energy - 2nd Edition,” *São José dos Campos INPE*, vol. 2, p. 80, 2017, [Online]. Available: <http://doi.org/10.34024/978851700089>.
- [15] National Renewable Energy Laboratory, “India Solar Resource Data: Enhanced Data for Accelerated Deployment,” no. March, p. 80401, 2016, [Online]. Available: [www.nrel.gov](http://www.nrel.gov).
- [16] K. Michałowska and E. Sobiech, “Thermal and ground deformation monitoring for early detection of volcanic eruptions: a case study of Taal volcano, Philippines,” *Geomatics, Landmanagement Landsc.*, no. 4, pp. 157–169, 2025, doi: 10.15576/gll/194358.
- [17] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), “BALANCE ENERGÉTICO COLOMBIANO,” 2025.
- [18] B. Shahid, “Solar Photovoltaics for Design Engineers,” 2023, [Online]. Available: <https://openlibrary-repo.ecampusontario.ca/jspui/handle/123456789/1960>.

- [19] P. Thenkabail, “Remote Sensing of Global Croplands for Food Security,” 2015.
- [20] IDEAM, “SEGUIMIENTO AL CICLO ENOS El Niño – Oscilación del Sur Boletín No. 163,” no. 163, 2022, [Online]. Available: <https://www.ideam.gov.co/file-download/download/public/6454>.
- [21] IRENA, *Renewable Generation Costs in 2024*. 2025.
- [22] UPME and IDEAM, “Atlas de Radiación Solar de Colombia Atlas de Radiación Solar de Colombia,” *Ideam*, p. 166, 2005, [Online]. Available: [https://biblioteca.minminas.gov.co/pdf/Atlas de radiación solar Colombia.pdf](https://biblioteca.minminas.gov.co/pdf/Atlas%20de%20radiaci3n%20solar%20Colombia.pdf).
- [23] Congreso de Colombia, “Ley 1715 de 2014,” *D. Of.*, p. 104, 2014.
- [24] Ministerio de Minas y Energía, “METODOLOGÍA GENERAL ESTRATEGIA NACIONAL COMUNIDADES ENERGÉTICAS,” pp. 1–121, 2024.
- [25] X. Poveda, “PASANTÍA APOYO EN LA DIGITALIZACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA BASE Y PROCESAMIENTO DEL LEVANTAMIENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO Y TOPOGRÁFICO PARA EL DISEÑO Y LICENCIAMIENTO AMBIENTAL DEL PROYECTO PARQUE SOLAR SAN MARTÍN - EL PASO, CESAR,” *AT-TAWASSUTH J. Ekon. Islam*, vol. VIII, no. I, pp. 1–19, 2023.
- [26] C. Robles Algarin and O. Rodríguez Álvarez, “An overview of the renewable energy in the World, Latin America and Colombia,” *Espacios*, vol. 39, no. 34, 2018.
- [27] IDEAL, “INFRAESTRUCTURA EN EL DESARROLLO DE AMÉRICA LATINA,” p. 29, 2014, [Online]. Available: <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/748>.
- [28] S. Ecke *et al.*, “UAV-Based Forest Health Monitoring: A Systematic Review,” *Remote Sens.*, vol. 14, no. 13, pp. 1–45, 2022, doi: 10.3390/rs14133205.
- [29] C. J. Van Westen, “Remote Sensing and GIS for Natural Hazards Assessment and Disaster Risk Management,” *Treatise Geomorphol. Vol. 1-14*, vol. 1–14, pp. 259–298, 2013, doi: 10.1016/B978-0-12-374739-6.00051-8.
- [30] M. A. Guevara-Luna, L. Ramos, A. Casallas, and F. Guevara, “Design of an energy vulnerability index — spatial and temporal analysis: case of study

- Colombia,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 11, pp. 31977–31997, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-24480-w.
- [31] IDEAM, “Susceptibilidad a Inundacion 500K Año 2010.pdf.” [Online]. Available: <https://visualizador.ideam.gov.co/CatalogoObjetos/maps-gallery/search-by-group/24>.
- [32] OCHA, “Nueva afectación por inundación a mayor escala en la subregión de La Mojana,” vol. 1, no. 1, pp. 1–7, 2024, [Online]. Available: <https://reliefweb.int/report/colombia/colombia-nueva-afectacion-por-inundacion-mayor-escala-en-la-subregion-de-la-mojana-flash-update-no-1-11072024>.
- [33] I. de hidrología meteorología y estudios ambientales IDEAM, “Galería de Mapas,” 2019. <https://visualizador.ideam.gov.co/CatalogoObjetos/maps-gallery/search-by-group/23>.
- [34] BID, CEPAL, and DNP, “Valoración de daños y pérdidas. Ola invernal en Colombia 2010-2011,” *UN CEPAL web*, p. 240, 2012, [Online]. Available: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/37958-valoracion-danos-perdidas-ola-invernal-colombia-2010-2011>.
- [35] ImpactoNews, “Emergencia en el sur de Bolívar: varios municipios inundados tras el desbordamiento del río Magdalena.” [Online]. Available: <https://impactonews.co/emergencia-en-el-sur-de-bolivar-varios-municipios-inundados-tras-desbordamiento-del-rio-magdalena/#:~:text=Municipios como Simití y Morales,Piedracandela%2C Campo Alegre y Balón>.
- [36] Comisión Nacional Forestal, “Incendios forestales Guía práctica para comunicadores,” 2010.
- [37] M. D. Vaverková *et al.*, “Fire hazard associated with different types of photovoltaic power plants: Effect of vegetation management,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 162, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112491>.
- [38] Global Forest Watch, “Atlas de Incendios en Bolívar, Colombia,” 2025. <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/COL/6/43/?category=fires&map=eyJjYW5Cb3VuZCI6dHJ1ZX0%3D>.
- [39] C. A. Mendoza, “Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Solar Bosques Solares

- de los Llanos 6 (79,6 MW) y su Conexión a la Subestación Santa Helena 115 kV.” 2023, [Online]. Available:  
[https://ipt.biodiversidad.co/permisos/resource?r=2155\\_solares\\_2021&v=1.1](https://ipt.biodiversidad.co/permisos/resource?r=2155_solares_2021&v=1.1).
- [40] FEMP, “Preventing and Mitigating Flood Damage to Solar Photovoltaic Systems.” <https://www.energy.gov/femp/preventing-and-mitigating-flood-damage-solar-photovoltaic-systems>.
- [41] Harbinger, “Understanding Flood Risk Assessments for Solar Farms: An In-Depth Tutorial,” 2025. <https://blog.harbingerland.com/understanding-flood-risk-assessments-for-solar-farms-an-in-depth-tutorial/>.
- [42] K. Silva, P. Janta, and N. Chollacoop, “Points of Consideration on Climate Adaptation of Solar Power,” 2022.
- [43] C. Tjengdrawira, M. Richter, and I. T. Theologitis, “Best Practice Guidelines for PV Cost Calculation,” *Sol. Bankability Proj.*, pp. 1–72, 2016, [Online]. Available: [http://www.solarbankability.org/fileadmin/sites/www/files/documents/20161213\\_649997\\_Best\\_Practice\\_Guidelines\\_for\\_PV\\_Cost\\_Calculation\\_20161213.pdf](http://www.solarbankability.org/fileadmin/sites/www/files/documents/20161213_649997_Best_Practice_Guidelines_for_PV_Cost_Calculation_20161213.pdf).
- [44] COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS - CREG, “Resolución 075 De 2021.” p. 7, 2021.
- [45] COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS - CREG, “RESOLUCIÓN No. 101 072 DE 2025,” vol. 2025, no. 101. 2025.
- [46] FENOGE, “TÉRMINOS Y CONDICIONES CONVOCATORIA ‘EN-COMUNIDAD: UNA EMPRESA ENERGÉTICA COMUNITARIA,’” 2023.
- [47] APCColombia, “Lanzamiento del Proyecto Comunidad Energética de Paz Sol de Perijá,” 2024.  
<https://www.apccolombia.gov.co/comunicaciones/noticias/lanzamiento-del-proyecto-comunidad-energetica-de-paz-sol-de-perija>.
- [48] ISA, “ISA ENTREGA AL PAÍS NUEVO PROYECTO QUE FORTALECE EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN,” 2023. [Online]. Available:  
<https://www.isa.co/es/press/isa-entrega-al-pais-nuevo-proyecto-que-fortalece-el-sistema-de-transmision/#:~:text=ISA ENTREGA AL PAÍS NUEVO PROYECTO QUE FORTALECE EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN,-diciembre 1%2C>

2023&text=El Proyecto de Interconexión Sabanalarga,p.

- [49] C. Jiménez *et al.*, “Caracterización competitividad y productiva del departamento de Bolívar Capítulo XIV : Capítulo especial sobre Infraestructura y Logística en Bolívar,” pp. 1–58.
- [50] Agencia de Desarrollo Rural, “Informe de Gestión 2024,” 2024.
- [51] Alcaldía de Turbaco, “Diagnóstico Territorial Turbaco Pot 2021,” 2021.
- [52] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), “Habilitantes Socioambientales para el Análisis de Infraestructura Energética en los Departamentos de La Guajira, Atlántico, Magdalena, Bolívar, Sucre y Córdoba,” 2025.
- [53] A. A. Eras-Almeida, T. Vásquez-Hernández, M. J. Hurtado-Moncada, and M. A. Egido-Aguilera, “A Comprehensive Evaluation of Off-Grid Photovoltaic Experiences in Non-Interconnected Zones of Colombia: Integrating a Sustainable Perspective,” *Energies*, vol. 16, no. 5, 2023, doi: 10.3390/en16052292.