



Análisis espacial multicriterio para identificar zonas adecuadas para la construcción de plantas fotovoltaicas en la Región Caribe colombiana

Andrés Camilo Pardo Gutiérrez

Carolina Giraldo Londoño

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Asesor: Vladimir Henao Céspedes, Doctor (PhD) en Ingeniería Automática

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica
Manizales, Caldas, Colombia

2025

Cita	(Pardo & Giraldo, 2025)
Referencia	Pardo Gutiérrez, A. C. & Giraldo Londoño, C. (2025). <i>Análisis espacial multicriterio para identificar zonas adecuadas para la construcción de plantas fotovoltaicas en la Región Caribe colombiana</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica , XXXI (Carolina Giraldo¹) y II (Andrés Pardo²)

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como [ChatGPT, Grok 3, Turnitin, entre otras], de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

Fondo Editorial: <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

¹ cagilo205@gmail.com

² andrespardoG55@gmail.com

Agradecimientos

A mis padres por su apoyo y su cariño,
A Geraldine por su amor y comprensión,
A Carolina por su paciencia y dedicación.
- Andrés Pardo Gutiérrez -

A mi esposo por impulsarme a seguir creciendo
A Andrés por su dedicación y compartir sus conocimientos.
- Carolina Giraldo Londoño -

A Vladimir Henao, por su amabilidad y compromiso.

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción.....	11
1. Planteamiento del problema.....	13
2. Antecedentes	20
3. Justificación	23
4. Objetivos	25
4.1 Objetivo general	25
4.2 Objetivos específicos.....	25
5. Hipótesis	26
6. Marco teórico.....	27
6.1 Energías Renovables	27
6.2 Análisis Espacial Multicriterio.....	27
6.3 Definiciones	31
6.3.1 Radiación solar	31
6.3.2 Brillo Solar	31
6.3.3 Pendiente/Topografía.....	31
6.3.4 Proximidad a red eléctrica.....	32
6.3.5 Proximidad a vías principales	32
6.3.6 Áreas protegidas	32
6.3.7 Cobertura de suelo	33
6.3.8 Vocación/Uso del Suelo	33
6.3.9 Proximidad a Zonas de inundación	33
6.3.10 Proximidad a cuerpos de agua	33
6.3.11 Proximidad a asentamientos.....	34
6.3.12 Resguardos indígenas.....	34
6.3.13 Sitios arqueológicos y áreas protegidas arqueológicamente.....	34
7. Metodología.....	36
7.1. Definir.....	40
7.2. Derivar.....	43
7.3. Transformar	45
7.3.1 Radiación solar	46
7.3.2 Brillo Solar	47
7.3.3 Pendiente/Topografía.....	48

7.3.4 Proximidad a red eléctrica.....	49
7.3.5 Proximidad a vías principales	51
7.3.6 Áreas protegidas	51
7.3.7 Cobertura de suelo	53
7.3.8 Vocación/ uso del suelo.....	54
7.3.9 Proximidad a zonas de inundación	55
7.3.10 Proximidad a cuerpos de agua	56
7.3.11 Proximidad a asentamientos.....	57
7.3.12 Resguardos indígenas.....	58
7.3.13 Sitios arqueológicos y áreas protegidas arqueológicamente.....	59
7.4. Combinar	60
7.5. Localizar.....	62
7.6. Analizar	63
8. Resultados	64
8.4. Combinar	64
8.5. Localizar.....	67
8.6. Analizar	70
8.6.1 Estimaciones de producción	70
8.6.2 Áreas Restringidas	72
8.6.3 Análisis de áreas adecuadas.....	73
8.6.3.1 Criterio Técnico.....	74
8.6.3.2 Criterio Económico	75
8.6.3.3 Criterio Ambiental	76
8.6.3.4 Criterio Sociocultural y arqueológico.....	78
9. Discusión	80
9.1. Validación del modelo con proyectos con licencia ambiental.....	80
9.2. Validación del modelo con proyectos fotovoltaicos	82
9.3. Discusión comparativa con trabajos previos	87
9.4. Hallazgos regionales del modelo de adecuación	89
10. Conclusiones	90
11. Limitaciones.....	92
12. Recomendaciones.....	94
Referencias.....	96

Lista de tablas

Tabla 1	Procedimiento establecido para el cumplimiento de los objetivos específicos	37
Tabla 2	Lista inicial de variables descritas en la bibliografía consultada.....	40
Tabla 3	Lista inicial de restricciones encontradas en la bibliografía consultada.....	41
Tabla 4	Lista de variables consideradas para el desarrollo del trabajo.....	42
Tabla 5	Lista de restricciones consideradas para el desarrollo de este trabajo.....	43
Tabla 6	Variables y fuentes de información.....	44
Tabla 7	Parámetros de transformación para la radiación solar.....	46
Tabla 8	Parámetros de transformación para el brillo solar.....	47
Tabla 9	Parámetros de transformación para la clasificación de Coberturas de la Tierra.....	53
Tabla 10	Parámetros de transformación para la clasificación de Vocación/ usos del suelo.....	54
Tabla 11	Ponderadores establecidos para cada variable/atributo de estudio.....	61
Tabla 12	67
Tabla 13	Capacidad Instalada por unidad de área en algunos proyectos de la Región Caribe. Elaborado a partir de datos publicados por la ANLA, Minenergía, Enel Green Power y El Tiempo	70
Tabla 14	Capacidad de generación estimada por departamento según áreas encontradas	71
Tabla 15	Áreas Restringidas por departamento.....	72
Tabla 16	Proyectos solares con intersección con las áreas de mayor idoneidad	82

Lista de figuras

Figura 1 Generación de electricidad en Colombia	13
Figura 2 Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día promedio anual multianual (kWh/m ² por día).....	18
Figura 3 Estructura del análisis de decisión multicriterio	28
Figura 4 Diagrama de flujo para la implementación del modelo de adecuación	38
Figura 5 Mapa de transformación para el atributo “Radiación solar”.....	47
Figura 6 Mapa de transformación para el atributo “Brillo solar”.....	48
Figura 7 Mapa de transformación para la variable “Pendientes del terreno”	49
Figura 8 Mapa de transformación para la variable “Proximidad a las subestaciones eléctricas”.....	50
Figura 9 Mapa de transformación para la variable “Proximidad a las líneas de transmisión”	50
Figura 10 Mapa de transformación para la variable “Proximidad a las vías principales”.....	51
Figura 11 Mapa de transformación para la variable “Proximidad de áreas RUNAP”	52
Figura 12 Mapa de transformación para la variable “Proximidad a humedales RAMSAR”	52
Figura 13 Mapa de transformación para el atributo “Cobertura del suelo”.....	53
Figura 14 Mapa de transformación para el atributo “Vocación/ Uso del suelo”.....	55
Figura 15 Mapa de transformación para la variable “Proximidad a zonas de inundación”	56
Figura 16 Mapa de transformación para la variable “Proximidad a cuerpos de agua”	57
Figura 17 Mapa de transformación para la variable “Proximidad a asentamientos”	58
Figura 18 Mapa de transformación para la variable “Proximidad a los resguardos indígenas”	59
Figura 19 Mapa de transformación para la variable “Proximidad a sitios arqueológicos”	60
Figura 20 Mapa de Adecuación para la construcción de parques solares fotovoltaicos en la Región Car ..	65
Figura 21 Mapa de restricciones para la construcción de parques solares en la Región Caribe	66
Figura 22 Mapa de adecuación excluyendo áreas restringidas	68
Figura 23 Mapa de Áreas Idóneas para la construcción de parques solares fotovoltaicos en la Región ...	69
Figura 24 Mapa de restricciones significativas en el departamento de Magdalena	73
Figura 25 Zona de interés para análisis	74
Figura 26 Criterio técnico en zonas de interés	75
Figura 27 Criterio económico en zona de interés.....	76
Figura 28 Criterio ambiental en zona de interés.....	77
Figura 29 Criterio social en zona de interés	79
Figura 30 Intersección de proyectos de diferentes sectores con áreas de mayor idoneidad.....	81
Figura 31 Intersección del Parque Solar Guayepo I y II con áreas idóneas	84
Figura 32 Intersección de Parques solares en el departamento del Cesar con áreas idóneas	85
Figura 33 Intersección de Parques solares en el departamento del Cesar con áreas idóneas	86

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AMC	Análisis Multicriterio
CREG	Comisión de Regulación de Energía Eléctrica y Gas
ESRI	Environmental Systems Research Institute, Inc
FNCER	Fuentes No convencionales de Energía Renovable
GEI	Gases Efecto Invernadero
GW	Gigavatio
ICANH	Instituto Colombiano de Antropología e Historia
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IEA	Agencia Internacional de energía
kWh	Kilovatios hora
MCDM	Toma de Decisión Multicriterio
MADM	Toma de Decisión Multiatributo
MODM	Toma de Decisión Multiobjetivo
MW	Megavatio
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PIGCCT	Plan Integral de Gestión de Cambio Climático Territorial
RUNAP	Registro Único Nacional de Áreas Protegidas
SER Colombia	Asociación de Energías Renovables de Colombia
SIG	Sistemas de Información Geográfico
UPME	Unidad de Planeación Minero-Energética
ZNI	Zonas No Interconectadas

Resumen

La Región Caribe colombiana presenta altos índices de radiación y brillo solar, lo que la convierte en una zona con gran potencial para el aprovechamiento de la energía solar. En este contexto, el estudio propone integrar los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el proceso de análisis multicriterio (AMC) para la localización de áreas viables para construir plantas solares, que se aborda desde una perspectiva que considera aspectos técnicos, ambientales, sociales y arqueológicos en el análisis. El objetivo es evaluar la región y localizar las zonas más adecuadas para construir plantas fotovoltaicas a través de un modelo de adecuación representados mediante mapas.

Los resultados identificaron las áreas adecuadas de cada departamento, destacando al departamento del Cesar con las mayores áreas viables para el desarrollo de estos proyectos, mientras que el departamento del Magdalena presentó las mayores restricciones. Para la validación del modelo de adecuación se eligió una zona de referencia verificando cada uno de los criterios escogido, concluyendo que los procesos fueron adecuados. Asimismo, se verificó los resultados del modelo en comparación con proyectos solares fotovoltaicos que cuentan con licencia ambiental, se evidenció una superposición espacial con proyectos de importancia nacional. Este estudio demuestra la utilidad de los SIG para realizar análisis de evaluación espacial y la zonificación de adecuación constituye una herramienta valiosa para priorizar áreas viables, identificar limitaciones y ayudar a la planificación territorial en el sector energético.

Palabras clave: Energía solar, plantas fotovoltaicas, análisis multicriterio, SIG, caribe, adecuación, localización.

Abstract

Colombian Caribbean Region has high levels of solar radiation and brightness, which makes it a zone with great solar energy exploitation potential. In this context, this study propose to integrate Geographic Information Systems (GIS) with Multicriteria Decision Making (MCDM), to locate suitable areas to developing solar farm projects through a perspective that considers technical, environmental, social and archaeological aspects. The main objective is to evaluate the whole region and locate which zones are more suitable for construction of photovoltaic solar plants by using a suitability model represented by maps.

The results identified suitable areas in each department, highlighting Cesar as one with the largest suitable areas to develop these projects, while Magdalena presented the largest restricted areas. To validate the suitability model, it was chosen a reference zone to verify each criterion used in the model, finding that the process was adequate. The resulting areas were also compared to other photovoltaic solar projects which have environmental license, showing that there was an overlapping between the founded areas and some national importance solar projects. This study shows the usefulness of GIS in MCDM and its relevance to find suitable areas, identify limitations and assist with territorial planning in the energy sector.

Keywords: Solar Energy, photovoltaic plants, MCDM, GIS, non-conventional renewable energy, site selection, suitability.

Introducción

En Colombia, a través de distintas políticas y planes gubernamentales se ha venido impulsando el uso de Energías Renovables No Convencionales (FNCER), como la solar, con el objetivo de reducir emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir la dependencia de fuentes hidroeléctricas o no renovables. Estos proyectos apoyan el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y las metas del sector eléctrico.

En este sentido, el presente trabajo tiene como propósito identificar las zonas más adecuadas para el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos en la parte continental de la Región Caribe colombiana, comprendida entre los departamentos de: Atlántico, Bolívar, Cesar, Córdoba, La Guajira, Magdalena y Sucre. Para ello, se emplean los Sistemas de Información geográfica (SIG) combinados con el análisis multicriterio (AMC). Este enfoque busca cumplir con criterios técnicos y las normativas y restricciones ambientales, sociales y arqueológicas.

El trabajo se enmarca en el enfoque de investigación cuantitativa y utiliza el “modelador de adecuación” desarrollado por ESRI, complementado con otras herramientas del software ArcGIS Pro. El modelo resulta útil para generar mapas de adecuación y restricción de la zona, permitiendo identificar las áreas con mayor potencial.

La estructura del trabajo se organiza de la siguiente manera:

En los Capítulos 1 al 4: Se presenta el planteamiento del problema, los antecedentes, la justificación, los objetivos de investigación y la hipótesis del estudio.

En el capítulo 5: Se desarrolla el marco teórico, abordando los conceptos y los antecedentes que sustentan el trabajo.

El capítulo 6: Se describe el enfoque metodológico detallando las fases y actividades desarrolladas para alcanzar los objetivos planteados.

El capítulo 7: Se presentan los resultados del estudio, organizados según las seis actividades metodológicas: definir, derivar, transformar, combinar, localizar y analizar.

En el capítulo 8 y 9: Se expone la discusión y las conclusiones, analizando los hallazgos a la luz de los objetivos planteados y destacando la utilidad de los análisis espaciales.

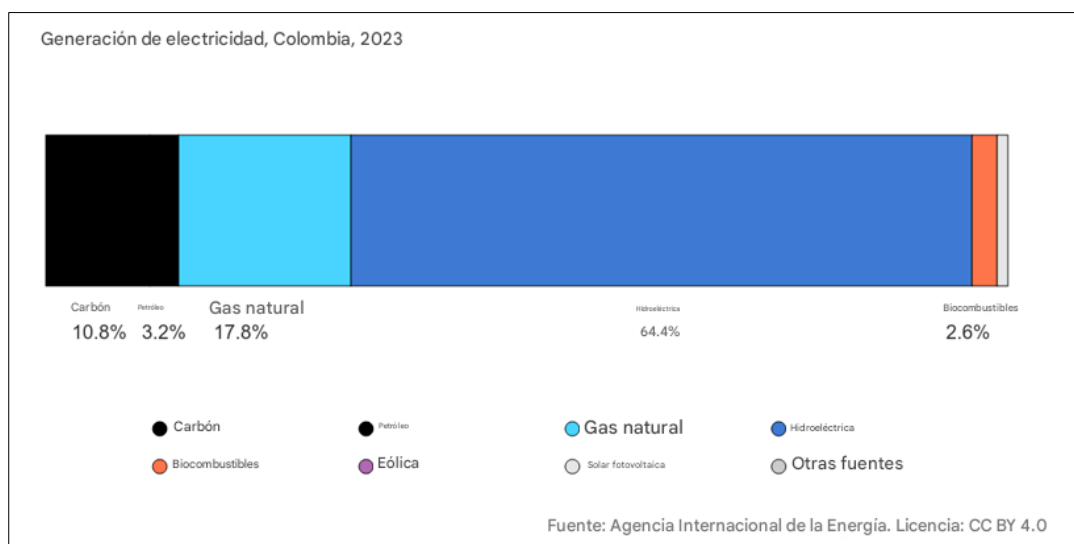
Finalmente, en el capítulo 10 y 11: Se identifican las limitaciones encontradas en el desarrollo del trabajo y se proponen una serie de recomendaciones para mejorar investigaciones futuras, así como se posibles líneas de trabajo a desarrollar.

1. Planteamiento del problema

En Colombia, desde el gobierno nacional, se está impulsando la transición a energías renovables de fuentes no convencionales (FNCER), buscando reducir las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), cuyo objetivo es alcanzar cero emisiones netas para el año 2050, con una meta intermedia del 51% de reducción de emisiones para el 2030 (Foro Económico Mundial, 2024, p. 3). Sin embargo, aún existe mucho recorrido para lograr una generación eléctrica sostenible, según datos de la Agencia internacional de energía [IEA por sus siglas en inglés], para el año 2023, alrededor del 64.8% de la generación eléctrica de Colombia provino de fuentes hidroeléctricas, un 30.4% de combustibles fósiles como el carbón, el gas y el petróleo, dejando poco menos del 5% a fuentes como los biocombustibles y la energía solar, representando esta última con menos del 2% del total de la generación eléctrica en estos años (ver **Figura 1**)

Figura 1

Generación de electricidad en Colombia



Nota. Fuente (Agencia Internacional de la Energía [IEA], 2023).

Si bien en Colombia, la principal fuente de generación eléctrica en el país son las centrales hidroeléctricas, contando así con un sector eléctrico bajo en emisiones de carbono, este sector ha incrementado sus esfuerzos para diversificar la matriz energética, por un lado atendiendo las políticas de transición energética, por otro lado, por los riesgos asociados a la dependencia de

fuentes de energía hidroeléctrica (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2015), entre los que se incluye la vulnerabilidad a las sequías lo que limita la capacidad de responder a la demanda (García, 2021) o precios elevados en tiempos de escasez (UPME, 2015). En un informe realizado por Fededesarrollo (2024) se resalta que los fenómenos naturales como El Niño puede afectar la oferta de la energía al ocasionar desabastecimientos de agua y aumentar el precio en la bolsa de la energía eléctrica, lo que repercute en efectos negativos en las tarifas que afectan al consumidor final.

Entre las FNCER, se encuentra la energía solar fotovoltaica, que, a través de tecnología de paneles con celdas solares, convierte la luz solar en energía eléctrica (Organización de las Naciones Unidas, s.f). En Colombia, los proyectos de generación de energía eléctrica que utilizan esta tecnología han aumentado considerablemente, pasando de 325 proyectos de energía solar registrados entre el 2016 -2018 (UPME, 2018) a 1.101 proyectos registrados entre 2020- 2024 (UPME, 2025a). Si bien el aumento ha sido progresivo, aun se siguen presentando retos a la hora de la implementación, ya que no todos los proyectos que se registran logran ser desarrollados (UPME, 2025b).

En un informe presentado por el Foro Económico Mundial (2024) se menciona que uno de los problemas asociados al desarrollo de los proyectos de energías renovables, tiene que ver con el entorno social donde se ubican, algunas veces localizados en inmediaciones de población indígena, como sucede en el caso del departamento de La Guajira (Arbeláez et al., 2023; Garzón, 2025). Según La Asociación de Energías Renovables de Colombia – *SER Colombia (2024)* “cuando los proyectos se localizan en zonas con presencia de comunidades étnicas, se estima un tiempo adicional para la consulta previa en promedio de 18 meses” (p. 8). Otra de las razones señalada por la asociación respecto al retraso de estos proyectos es que los tiempos de respuesta para el otorgamiento de permisos y trámites legales, principalmente ambientales, sobrepasan el límite de respuesta que tienen previsto, lo que implica la ralentización en la entrada de los proyectos ya que tienen que gestionar nuevos trámites y realizar modificaciones en el cronograma.

El permiso ambiental principal para este tipo de proyectos suele ser la Licencia Ambiental, cuyo trámite requiere de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA), donde es crucial realizar un

diagnóstico integral del área influenciada por el proyecto, donde se evalúan impactos al medio abiótico, biótico y socioeconómico (Minambiente, 2015), también se puede requerir la elaboración de un Programa de Arqueología Preventiva para definir el potencial arqueológico del área y proponer las medidas de manejo (ICANH, 2021). Según SER Colombia (2024), para el desarrollo de los proyectos FNCER es necesario realizar seis fases:

- **Fase I:** Interconexión (estudios de conexión y trámites ante la UPME)
- **Fase II:** Estudios básicos (ingeniería, meteorología, topografía, geotecnia, estudios ambientales)
- **Fase III:** Social y ambiental (consulta previa, Plan de manejo arqueológicos ante el ICANH, Licencia o permisos ambientales)
- **Fase IV** Autorizaciones municipales (licencia de construcción y permisos de intervención del suelo)
- **Fase V** Línea (gestiones prediales, aprobación de interconexión, construcción de la línea)
- **Fase VI** Construcción (pruebas y energización del parque)

Como se puede evidenciar los estudios sociales y permisos ambientales se desarrollan en la fase III, posterior a los tramites ante la UPME y los estudios básicos. Esta manera de ejecutar los proyectos muchas veces propicia el ambiente para retrasar o incluso detener permanentemente la operación de los mismos, algunos ejemplos son (1) la suspensión del parque eólico Windpeshi en La Guajira en el año 2023 (UPME, s.f) el cual desde el año 2021 presentó inconvenientes con la comunidad Wayuu, y dos años después se lograron acuerdos para levantar las protestas de la comunidad (Minenergía, 2023), generando un atraso de más de 1700 días con respecto a la fecha de puesta en operación declarada originalmente ante la Comisión de Regulación de Energía y Gas – CREG (UPME, 2024); (2) otros casos notables fueron los proyectos Paipa 1 – PSR3 y Paipa 2 – PSR4, cuyas licencias ambientales fueron negadas en septiembre de 2022 por Corpoboyacá tras fuertes desacuerdos con la comunidad, en el Acta de la Audiencia Pública del proyecto, se evidenciaron argumentos claves con relación a la ubicación de la planta en un área de 200 hectáreas de páramo, lo que comprometería la producción de 10.000 litros diarios de agua por hectárea, afectando directamente a las captaciones de los acueductos de los municipios de Paipa y Sotaquirá.

En ocasiones también las áreas seleccionadas para construir los proyectos se pueden ubicar en zonas de alto potencial arqueológico como el caso de la subestación eléctrica de Nueva esperanza en Soacha, que debido a los hallazgos arqueológicos fue necesario rediseñar las obras civiles (ICANH, 2023), o en lugares donde es necesario realizar consulta previa (UPME, s.f), también pueden existir especies de fauna o flora de alta importancia ecológica o incluidas en la categoría de vulnerabilidad o donde es necesario intervenir las rondas hídricas, entre otros problemas que, se pueden evitar utilizando las consideraciones necesarias para la selección de la ubicación del proyecto.

Es por lo anterior que según Wang et al. (2024) el proceso de definir la localización antes de construir no debe ser menospreciado, y, por el contrario, es crucial, pues no solo reduce los costos de operar un proyecto, sino que aumenta la eficiencia de este, tratándose de un paso crítico para garantizar el éxito de los objetivos y metas establecidas.

Durante el proceso de selección de localización del proyecto, los analistas se enfrentan a numerosos factores o variables que influyen, que pueden ser contradictorios, por ejemplo. Una zona puede ser adecuada en cuanto a radiación solar, pero estar dentro de un área protegida o en un asentamiento indígena; lo que implica que frecuentemente existirán una serie de posibles ventajas y desventajas propias de la ubicación. Dado que la naturaleza de mucha de la información utilizada para la toma de decisiones es esencialmente espacial, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se convierten en una herramienta poderosa para el proceso de análisis, proporcionando funciones de captura, almacenado, ordenamiento, análisis, visualización y procesamiento de información geográfica (Rikalovic et al., 2014). Una de las áreas de estudio dentro de los SIG es la conocida como “Análisis espacial multicriterio” que, a un nivel muy básico, involucra un grupo de alternativas geográficamente definidas (eventos) de los cuales se evalúa el orden de preferencia entre ellas con respecto a un grupo dado de criterios de evaluación (Malczewski, 1999).

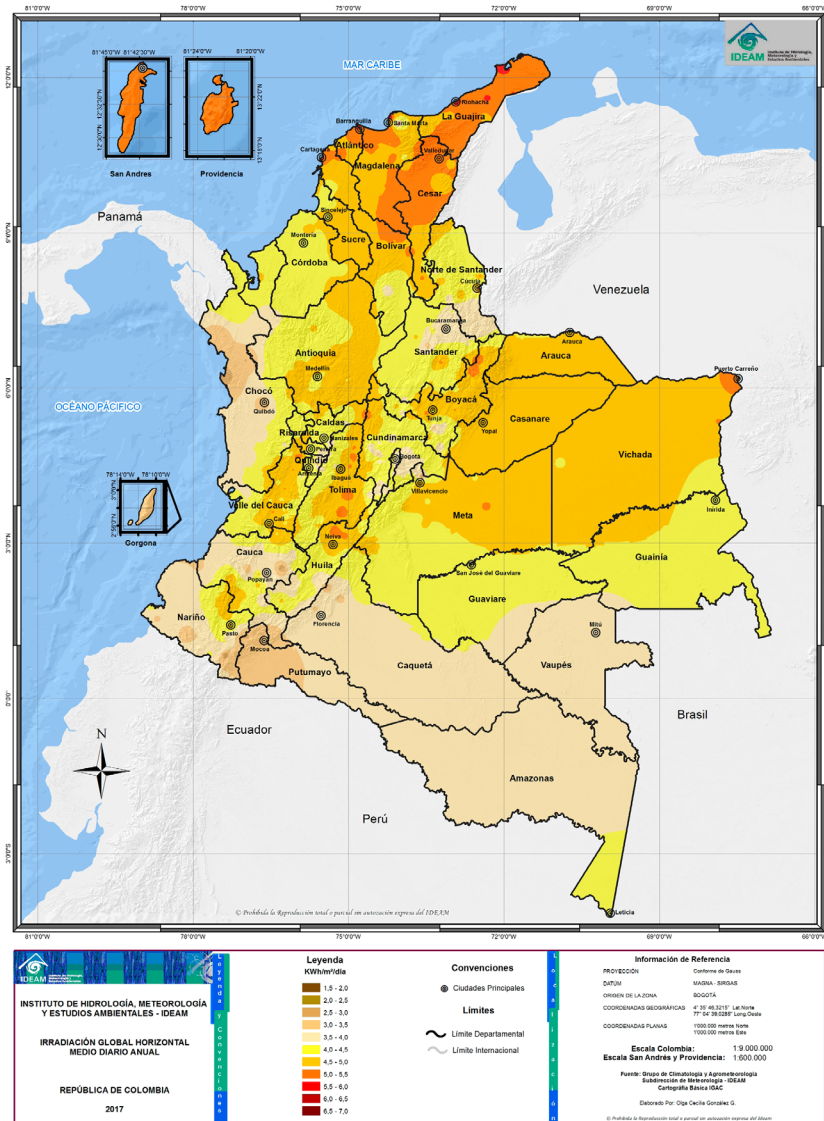
Dentro del sector energético, está bien documentada la implementación de análisis multicriterio (MCDM o GIS-MCDM) para la localización de plantas fotovoltaicas y granjas de viento o parques eólicos (Digalwara et al., 2021). Encontrando metodologías que integran las

restricciones propias de los marcos legales y variables que buscan reducir impactos ambientales y garantizar la participación comunitaria desde perspectivas culturales y sociales. (Sánchez-Lozano et al., 2013).

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), junto a la UPME, han realizado el atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia (ver **Figura 2**), con el objetivo de identificar las oportunidades de generación de energía solar fotovoltaica en el país, encontrando que la Región Caribe presenta un promedio muy alto de horas pico de Sol al día, con valores entre 7 y 9 horas diarias, donde destacan amplios sectores de La Guajira, el norte del Cesar y parte del departamento de Magdalena. Además, se consideró esta región como favorecida en cuanto a recursos solares, pues se presentaron datos de radiación solar superiores a los 4.5 kWh/m² por día.

Figura 2

Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día promedio anual multianual (kWh/m^2 por día)



Nota. Fuente: IDEAM (2017). Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia

Adicionalmente, dentro de los Planes de Desarrollo Departamental de la Región Caribe, está incluido el Programa de Acción Frente al Cambio Climático (Gobernación del Magdalena, 2024), en el caso del departamento del Cesar se presentan un índice de pobreza energética, proponiendo como alternativas desarrollar proyectos de energías limpias (Gobernación del Cesar, 2024) al igual que el departamento del Atlántico (Gobernación del Atlántico, 2024).

De manera que, existen muchas oportunidades de optimizar los recursos económicos y en tiempo de los proyectos de generación de energía fotovoltaica, en especial si se consideran desde las etapas tempranas de la selección del sitio factores ambientales, sociales y arqueológicos, pudiendo evitar retrasos o negativas de parte de las autoridades pertinentes, los SIG y el análisis multicriterio pueden contribuir positivamente a que en Colombia se presenten propuestas de proyectos más competitivas que contribuyan a retener las inversiones en energías renovables.

Por lo expuesto anteriormente, se configura la pregunta de investigación: ¿Cuáles son las zonas más idóneas para construir parques solares fotovoltaicos en la Región Caribe colombiana considerando un enfoque de análisis espacial multicriterio desde una perspectiva multidisciplinaria (ambiental, social y arqueológica)?

2. Antecedentes

Durante la revisión documental se hallaron distintos trabajos que buscan identificar lugares ideales para distintos objetos de estudio como: áreas con potencial de explotación minera (Rodríguez, 2012), instalación de plantas de tratamiento de residuos peligrosos (Villalba & López, 2023), rellenos sanitarios (Bello & Vásquez, 2023; Montero, 2017), zonas con potencial urbanizable (Gualdrón et al., 2020) entre otros. En los cuales, si bien no comparten el objeto de aplicación del presente estudio, tienen como elemento común un enfoque multicriterio para el establecimiento de la metodología o etapas de “descartes” considerando las restricciones normativas, por lo tanto, se consideran referentes útiles. En general, los análisis multicriterio están ampliamente documentados y existen varios referentes para el desarrollo de este trabajo.

Comenzando con proyectos de energía solar en Colombia, se encuentra el trabajo de Serrano-Guzmán et al. (2017) en el que abordan una serie de impactos negativos en el ámbito ambiental y a pesar de que concluyen que es viable el uso de la energía solar, proponen una serie de estrategias de mitigación por los daños causados. Otro estudio analiza los impactos de los incentivos económicos de los proyectos de energía solar fotovoltaica, donde se examina el potencial que tiene el mercado eléctrico colombiano en la inclusión de este tipo de energía (Castaño & García, 2020), otros investigadores realizan caracterizaciones económicas para la inversión de plantas de fuentes de energía solar y eólica (Buendía, 2014) o alternativas FNCER en zonas rurales (Muñoz-Sarria & Bueno- López, 2022), proyectos que sirven como referentes en el abordaje de las energías limpias.

Enfocado en proyectos que integren el componente SIG, el análisis multicriterio y las energías renovables, se encuentra el trabajo realizado por Jaimes (2024), en el que la autora representa una metodología que integra los sistemas de información geográfica (SIG) con los métodos de decisión multicriterio (MCDM), y a partir de ponderar variables físicas, reducir impactos ambientales, minimizar costos y tener en cuenta variables sociales y arqueológicas, (basado en un proceso de análisis jerárquico -AHP) busca identificar los sitios de alto potencial para ubicar granjas solares en Colombia.

Con una metodología similar pero enfocado a la ubicación de municipios idóneos para instalar sistemas de energía solar térmica se encuentra el trabajo realizado por Marín-Quiroga et al. (2023); para parques eólicos y granjas solares en Colombia se encuentra el de García (2021); en región caribe para identificar las zonas con mayor potencial eólico en la Guajira se cuenta con el trabajo realizado por Guerrero et al. (2019) y en el departamento del Atlántico el trabajo realizado por Obando (2017). Estos trabajos permitieron tener una idea más clara de las fuentes de información disponible para Colombia, además de describir muy bien factores clave para considerar en el análisis, como a través de la descripción de los territorios indígenas colombianos y la relación que han tenido con el desarrollo de proyectos en sus territorios. De igual forma, las metodologías aplicadas en estos trabajos son muy similares a las desarrolladas en la literatura internacional, por lo que es coherente considerar a estos autores como relevantes para este trabajo.

En la literatura científica internacional, se encontraron publicaciones como la de Sánchez-Lozano et al. (2013), en la que se evalúan sitios potenciales en España para localizar una planta solar utilizando criterios geomorfológicos, ambientales, climáticos y de distancia. Mientras que Gutiérrez (2018), presenta para la Isla de Tenerife, España, una metodología basada en un enfoque multicriterio con el mismo objetivo. En ambos trabajos se menciona el AHP aplicado a la localización de plantas solares, donde se observa una fuerte preferencia de los expertos por factores como la radiación solar y la distancia a líneas de transmisión de energía.

Otro estudio de interés es el publicado por Digalwar et al. (2021) donde se establecieron criterios técnicos, socioambientales y económicos para identificar áreas adecuadas para instalar granjas solares y eólicas, al igual que los de Rikalovic et al. (2014) y Salih et al. (2024), donde se describen algunas preferencias como las relacionadas al uso del suelo y cobertura, o las pendientes del terreno, así como algunas definiciones relevantes para el desarrollo de este trabajo.

También se encuentra el trabajo de Azevêdo et al. (2017), donde estudiaron en Pernambuco, Brasil, un modelo de adecuación para identificar áreas idóneas para una planta térmica solar, donde consideraron indicadores positivos y negativos como distancias a fuentes de agua, áreas urbanas y carreteras, así como restricciones en unidades de conservación, territorios indígenas, entre otros.

Un estudio particular de Barzehkar et al. (2021), realizan la ponderación (importancia relativa de los criterios para la priorización de las áreas), con base a la perspectiva de un gran número de expertos, considerando sus respuestas para asignar los pesos relativos a cada variable.

Otro trabajo de referencia para esta propuesta es el desarrollado por Nguyen et al. en el 2022 en la zona sur-central de Vietnam, donde las condiciones de temperatura y precipitaciones (alrededor de 28°C y 1000 mm) resultan similares a algunas de las zonas de la Región Caribe. De manera similar, Rane et al. (2024) estudiaron el área de Nashik, India, donde las condiciones de altitud, precipitaciones y temperaturas también pueden ser comparables, y se consideraron factores como la velocidad del viento, humedad relativa, vegetación y las pendientes del terreno.

Finalmente, algunos estudios de selección de sitios muestran a profundidad la implementación de la metodología de Proceso Analítico jerárquico (AHP), resaltando su amplia preferencia dentro de las técnicas de selección de locaciones, algunos de ellos fueron los realizados por Rasaei et al. (2025) en Irán, Demir et al. (2023) en Turquía, o Ríos y Duarte (2021) en Perú, donde resaltan la utilidad de la metodología AHP aprovechando las herramientas y conceptos de la Toma de Decisiones Multicriterio (MCDM). En estos trabajos se identifica de manera muy clara variables y restricciones para la construcción de plantas solares fotovoltaicas que pueden ser aplicables en el contexto colombiano, así como entender mejor cómo abordar el factor de las áreas protegidas en el proceso de transformación.

3. Justificación

El consumo de la energía aumenta a medida que una sociedad es más compleja y desarrollada, haciendo difícil imaginar la vida diaria sin su uso. Para el año 2040 se espera que la demanda de energía incremente en un 60%; asimismo se pronostica que las emisiones de gases invernadero alcancen al final del siglo un aumento del calentamiento global entre un 1.4 y 5.8 grados Celsius, por lo cual las economías y ecosistemas sufrirán grandes consecuencias de no tomarse las medidas necesarias para mitigar esta problemática (World Bank, 2013, citado Robles & Rodriguez, 2018, p. 1).

Debido a los efectos negativos del cambio climático, diferentes países del mundo establecieron metas energéticas, incluido el objetivo de Cero Emisiones Netas en 2050, que busca que el calentamiento global se limite a 1,5 °C (International Energy Agency, 2021).

A nivel mundial China, Alemania, España y Estados Unidos, se consolidan como pioneros en el desarrollo de aprovechamiento de energías renovables para la generación de energía eléctrica, donde Alemania, China e Italia lideraron los mercados en energía solar (UPME, 2015). Actualmente China es el mayor emisor de gases efecto invernadero, pero también se destacó como el país que represento la mayor capacidad renovable (International Energy Agency, 2025).

En Colombia se han implementado distintas herramientas para afrontar el cambio climático, como el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático Territorial el cual se convierte en “un instrumento orientador que permite generar el conocimiento y las herramientas para incorporar el cambio climático en la gestión del desarrollo, creando una acción articulada y eficaz para la consolidación de territorios más sostenibles, adaptados y resilientes a este evento” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo, 2015, p. 1).

A estas estrategias se suman las establecidas en la Agenda 2030 por la ONU, que entre sus objetivos se destaca el 7: “Energía asequible y no contaminante” que pretende garantizar el acceso a una energía limpia y asequible, clave para el desarrollo de la agricultura, las empresas, las comunicaciones, la educación, la sanidad y el transporte (Organización de las Naciones Unidas, s.f). Asimismo, se encuentra el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 de Colombia, que tiene

como uno de sus ejes la “Transformación Productiva, Internacionalización y Acción Climática”, que establece entre sus metas agregar 2000 MW de capacidad de generación eléctrica a partir de fuentes no convencionales de energía renovable, de modo que el desarrollo de este tipo de proyectos se ven impulsados desde las metas sectoriales del país.

A pesar de la riqueza del recurso solar en Colombia, Davies & Saygin (2023) señalaron que existe un gran potencial en este sector sin explotar en zonas no interconectadas del país, como lo serían Las Islas de San Andrés y Providencia o La Guajira, con una capacidad instalada menor a 100 MW de energía solar fotovoltaica. En comparación, España, que recibe en promedio entre 3 y 3.5 kWh/m² por día de radiación solar, tuvo una capacidad instalada de 11GW para este tipo de energía en el 2019. De este modo, aún existen muchas oportunidades de generación de energía en las zonas no interconectadas (ZNI) del país, donde se ha estimado un potencial de 18 GW en otras fuentes de energía renovable como la eólica.

En este contexto, el desarrollo de estudios para la localización de un área adecuada para el desarrollo de proyectos de generación de energía solar supone un aporte al desarrollo de este sector y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para Colombia, así como a las metas de transición energética establecidas.

La innovación del presente proyecto radica en darle una relevancia a la incorporación de los componentes normativos y restricciones ambientales, sociales y arqueológicas a un modelo de Análisis Espacial Multicriterio (GIS-MCDM) aplicados a esta región, de tal manera que se puedan identificar y evaluar áreas viables con alto nivel de detalle. La incorporación de estos componentes podría ser útiles para los formuladores de proyectos, tanto del sector público como privados para la ejecución de proyectos de generación de energía fotovoltaica en la Región Caribe, pues contribuye a localizar zonas minimizando impactos sociales, arqueológicos y ambientales, pero asegurando la viabilidad técnica del área seleccionada. Otro aspecto innovador de este proyecto es la posibilidad de definir de manera (semi-automática) a través de la herramienta “Modelador de Adecuación” de ArcGIS Pro las transformaciones de acuerdo con los criterios ingresados y así localizar las mejores áreas para el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Evaluar la Región Caribe Colombiana para localizar zonas idóneas para construir parques solares fotovoltaicos aplicando técnicas de análisis espacial multicriterio desde una perspectiva multidisciplinar (componente Social, Ambiental y Arqueológico).

4.2 Objetivos específicos

- Definir los criterios espaciales (objetivos/atributos) necesarios para evaluar la adecuación de áreas para la construcción de plantas fotovoltaicas, incluyendo restricciones técnicas y legales.
- Generar los mapas de evaluación por cada variable a nivel regional y de restricciones acorde a lo definido, llevando los valores a una escala estandarizada.
- Identificar las zonas en la Región Caribe Colombiana con mayor valor de adecuación para la construcción de parques solares fotovoltaicos.
- Analizar las áreas encontradas con relación al cumplimiento de los requisitos establecidos; estudios similares en Colombia y los proyectos solares fotovoltaicos instalados en la región.

5. Hipótesis

Se espera que las zonas identificadas con mayor idoneidad para localizar plantas fotovoltaicas cumplan con lo establecido en las variables técnicas fundamentales como radiación solar, brillo solar, pendientes y proximidad a líneas de transmisión y que al incorporar en el modelo de adecuación criterios ambientales, sociales y arqueológicas en el análisis, la cantidad de áreas adecuadas sea reducida en comparación a la región de estudio. Asimismo, se espera que aquellas zonas cercanas a elementos restringidos como zonas inundables, áreas protegidas o resguardos indígenas tengan menores puntajes de idoneidad.

Adicionalmente, se espera que las zonas identificadas como idóneas mediante el análisis espacial multicriterio no se superpongan espacialmente con muchos proyectos solares existentes, esto se fundamenta en antecedentes donde se han presentado problemas como retrasos o cancelaciones, lo que sugiere que son pocos los proyectos que consideran restricciones y áreas adecuadas de manera integral al momento de seleccionar la ubicación de las plantas solares fotovoltaicas.

6. Marco teórico

6.1 Energías Renovables

Las energías renovables se originan de fuentes naturales como la luz solar, el viento, entre otras, cuya característica es que se renuevan de manera continua y están presentes en distintos entornos. En contraste los combustibles fósiles, como el petróleo, el carbón y el gas son fuentes que requieren de varios años para formarse (Jaimes, 2024).

Por su parte, la Energía Solar Fotovoltaica “es la conversión de la radiación solar en energía eléctrica mediante el denominado efecto fotovoltaico, la producción de energía eléctrica obtenida en una instalación tipo será proporcional a la cantidad de radiación solar incidente” (Gutiérrez, 2018, p.3)

6.2 Análisis Espacial Multicriterio

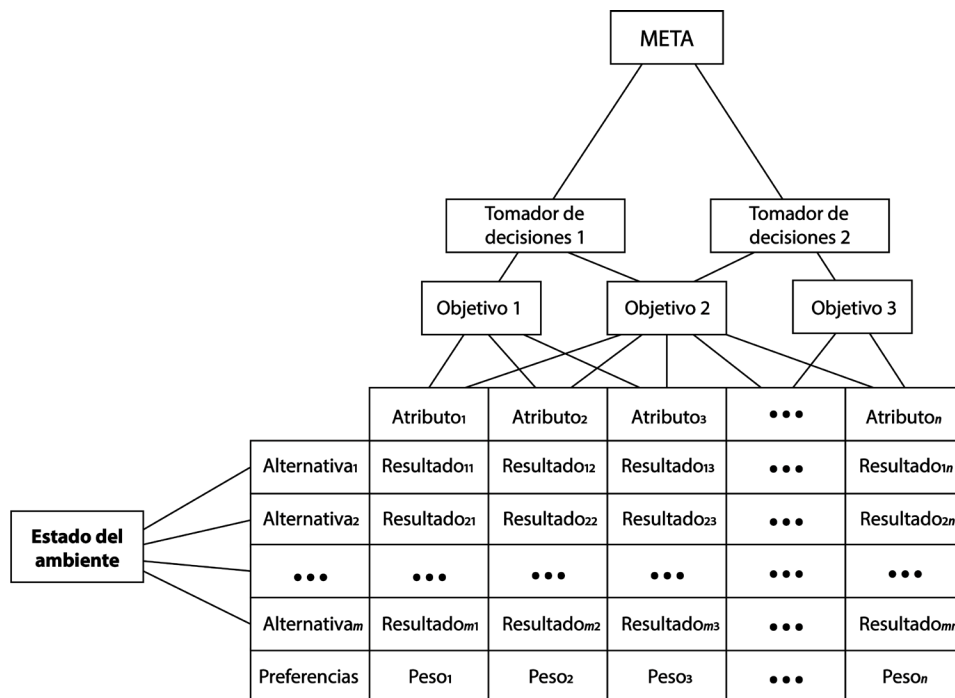
Según uno de los principales exponentes del Análisis Espacial Multicriterio, Jacek Malczewski (1999), la toma de decisiones multicriterio (MCDM por sus siglas en inglés) se utiliza de manera intercambiable con el término MCDA (análisis de decisión multicriterio), e involucra una serie de alternativas que son evaluadas en base criterios conflictivos e inconmensurables, entendiendo como “criterios” a un término general que incluye los conceptos de *atributo* y *objetivo*. De acuerdo con esta distinción, existen dos clases de MCDM principales: MADM (toma de decisiones multiatributo) y MODM (toma de decisiones multiobjetivo).

Independientemente de su clasificación, los problemas MCDM involucran, en general, seis componentes: (1) la *meta* o grupo de metas a las que el grupo de trabajo intentan alcanzar; (2) los *tomadores de decisiones* o el individuo/grupo involucrados en el proceso de evaluación junto a sus preferencias con respecto a los *criterios de evaluación*; (3) los *criterios* (objetivos y/o atributos) que serán la base de los tomadores de decisiones para evaluar las diferentes alternativas; (4) las posibles decisiones *alternativas*, que son las varias acciones que pueden tomarse (ej. Elegir un departamento u otro para el desarrollo de un proyecto); (5) el conjunto de variables incontrolables

o *estado natural* (ambiente de decisión); y (6) el conjunto de *resultados* asociados al análisis de cada alternativa. La relación entre estos elementos se ilustra de la siguiente manera:

Figura 3

Estructura del análisis de decisión multicriterio



Nota. Fuente: adaptado de Jacek Malczewski (1999)

Esta estructura jerárquica representa los diferentes niveles del proceso de los tomadores de decisiones, sus preferencias, y criterios de evaluación. En el contexto de este trabajo, la *meta* representa el objetivo de investigación: encontrar un área adecuada para el desarrollo de un proyecto solar fotovoltaico; el grupo de tomadores de decisiones está conformado por los investigadores que proponen el trabajo de grado, los cuales dados sus conocimientos y experiencias en diferentes áreas, reflejarán una importancia relativa de los criterios de evaluación según sus preferencias a través de “pesos relativos” asignados a los mismo, siendo los criterios una regla o estándar para la medición de qué tan deseable es una alternativa. Estos criterios pueden ser traducidos a un conjunto de objetivos o atributos (o ambos).

La propuesta de este trabajo se incluye en los antes mencionados MODM (toma de decisiones multiobjetivo), dado que no existen atributos (propiedad/es de un sistema geográfico real) con una relación directa con la “Localización adecuada para desarrollar un proyecto solar fotovoltaico”, en otras palabras, no existe una medida directa cuantitativa o cualitativa que permita relacionar la *meta* con un único atributo, por lo que se debe recurrir a definir objetivos (una declaración del estado deseado del sistema), que están compuestos por una serie de atributos que pueden ser necesarios para proporcionar una evaluación completa del grado de cumplimiento alcanzado. En este caso, por ejemplo, se podría hablar de “minimizar los impactos ambientales potenciales en la zona seleccionada”, objetivo para el cual podríamos usar atributos como “distancia a cuerpos de agua superficiales”, y “distancia a ecosistemas protegidos por PNN”.

La definición de los *criterios de evaluación*, entonces, es un proceso que implica especificar una serie de objetivos integrados que reflejen los aspectos importantes del problema previamente identificado, así como unas medidas del cumplimiento de los objetivos, que serán llamadas atributos, para los cuales se debe establecer una escala, ya que serán la base para comparar los diferentes escenarios/alternativas (Rikalovic et al., 2014).

En términos de SIG, los criterios están asociados con entidades geográficas y relaciones entre entidades, y por lo tanto pueden ser representados a través de mapas, que pueden ser de dos tipos: un mapa de evaluación de criterios, que contiene un único atributo y puede ser usado para evaluar el desempeño o adecuación de una alternativa, también son conocidos de manera general como mapas de atributos, mapas temáticos o capas de datos; o un mapa de restricciones, que muestra las limitaciones de los valores que pueden tomar los atributos (ej. Si para la operación se requiere específicamente una pendiente menor al 8%, este mapa mostrará las áreas que cumplen/no cumplen esta condición).

Por otro lado, cuando se habla del *peso* de los criterios, se hace referencia a una etapa que involucra las preferencias de los tomadores de decisiones y la incorporación de estas al modelo construido. Por lo general se expresa en términos de un factor relativo de un criterio frente a otro (Rasaei et al., 2025).

El resultado de combinar estos conceptos (metas, criterios de evaluación y pesos) es una estructura jerárquica, en la que se ubica en lo más alto los objetivos más generales y que difícilmente podrían ser cuantificables y que pueden medirse a través de objetivos más específicos, y en el nivel más bajo se ubican los atributos, como indicadores medibles de la medida en que sus objetivos específicos asociados se alcanzan.

Para entender mejor esto, se puede revisar el trabajo de Wang et al. (2024), donde se establece para el objetivo general de evaluar “Sistemas que afectan la selección del sitio para estaciones de almacenamiento de energía solar híbridas eólico-fotovoltaicas” cuatro criterios principales: factor económico, factor ambiental, factor social y factor recursos que, como se puede intuir, no existe un parámetro directo que pueda medir dichos criterios, por lo cual se formularon varios sub-criterios (ej. Para el factor recursos se plantearon “generación de energía eólica y fotovoltaica local” y “suministro de agua”) que si bien son menos abstractos que los criterios generales, siguen pudiéndose expresar en términos de un geoprocesamiento de diferentes capas de datos (atributos) en caso de que no se cuente con un indicador directo para el sub-criterio.

Para el proceso de elección de los atributos, así como el conjunto de estos (objetivos/criterios), se utilizan algunas características guía como la *cohesión*, que sería el nivel de asociación entre el atributo, el objetivo para el cual se está asociando y la relevancia para la toma de decisiones (; otra característica importante de un atributo es que sea *medible*, que se cumple si (1) es práctico asignar valores numéricos para cada alternativa planteada y si (2) se puede evaluar las preferencias de los tomadores de decisiones a través de él (Manglik, 2024).

Finalmente, Malczewski (1999) establece que un conjunto de atributos se considera *completo* si cubre todos los aspectos relevantes del problema u objetivo planteado, esta propiedad está asociada al concepto de *cohesión*. Ahora bien, se considera *operacional* al conjunto si puede ser utilizado de manera significativa en el proceso de decisión, lo que implica que sea entendible y transmita información relevante. Si el conjunto de atributos puede ser simplificado en subconjuntos más pequeños que los haga más coherentes o fáciles de evaluar se le llama *descomponible*; finalmente, un conjunto de atributos es *no redundante* si ninguno de sus componentes es considerado más de una vez, un ejemplo claro sería un conjunto de atributos que contenga “niveles

de contaminación del aire” y “emisiones de CO”, en este caso el conjunto es redundante porque el segundo atributo puede ser y está contenido en el primero.

Todas estas características del conjunto de atributos involucrado en un proceso de toma de decisiones serán consideradas para el proceso de definición de variables y restricciones que se mostrará a detalle en la sección *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*, donde se encontraron 13 variables relevantes para el proceso de definición del sitio adecuado para la construcción de parques solares fotovoltaicos, las definiciones conceptuales de cada variable y sus características consideradas en este trabajo se presentan a continuación:

6.3 Definiciones

6.3.1 Radiación solar

La actividad solar, medida como Irradiación Solar Horizontal, determina la cantidad de energía solar que alcanza la superficie de la tierra. Es el factor más crítico para la operación de una planta solar fotovoltaica. Unos valores más altos de actividad solar aseguran una gran cantidad de energía disponible para ser captada por los paneles solares, permitiendo una mayor capacidad de generación eléctrica (Drozd, & Kussul, 2024).

6.3.2 Brillo Solar

Hace referencia a términos como "horas de Sol al día", "horas de Sol efectivo en el día" u "horas de insolación diaria" (IDEAM, s.f). Es un criterio clave para el diseño de plantas solares, considerando que entre mayor sea la cantidad de horas diarias de sol, se garantiza una producción de energía estable y eficiente (Jaimes, 2024).

6.3.3 Pendiente/Topografía

La pendiente del terreno donde se instale la planta solar recibe su aceptabilidad acorde al impacto que esta tenga sobre los costos de preparación y aplanamiento del suelo. El lugar ideal debe ser tan plano como sea posible (Azevêdo et al., 2017).

6.3.4 Proximidad a red eléctrica

Una planta de generación eléctrica solar requiere acceso a las líneas de transmisión, los altos costos asociados a la construcción de estas significan que la proximidad entre el proyecto y las líneas existentes representan un menor costo de construcción y menores pérdidas de energía en la transmisión (Barzehkar, 2020). Según García (2021) se suele contemplar 20 km o 25 km como valor máximo de distanciamiento con respecto a la línea de transmisión más cercana o el punto de conexión a la subestación.

6.3.5 Proximidad a vías principales

La construcción de una planta solar cerca de vías de primer orden permite el ahorro de costos de transporte de materiales de construcción, equipos, y en el desarrollo de infraestructura, así como mitigar impactos ambientales. De esta manera, entre más corta sea esta distancia, mayor potencial para el desarrollo de estos proyectos (Nguyen et al., 2022). Se debe considerar que para esta variable se establece una restricción, que varía entre autores, Nguyen et al. (2022) establecen un buffer de 100 m como áreas inviables para este propósito; Demir et al. (2023), por su parte, establecen una restricción de apenas 25 m; mientras que Rios & Duarte (2021) establecen 1 km de restricción para este atributo, esta última es la distancia de referencia para este estudio, dado que el área de estudio se encuentra en el contexto de Perú, un país más cercano en normatividad, contexto político y cultural que Vietnam o Turquía.

6.3.6 Áreas protegidas

La distancia a las áreas protegidas es de alta importancia debido a la necesidad de resguardar la biodiversidad y reducir los impactos ambientales. Las especies que habitan estas áreas algunas veces se mueven por sus alrededores, por lo que distancias menores a 5 km se suelen considerar poco adecuadas, y distancias entre 10 - 15 km se consideran seguras o con pocos impactos en estos ecosistemas (Rasaei et al., 2025). Para este trabajo, se consideró como restricción el buffer de 1 km alrededor de las áreas del Registro Único Nacional de Áreas Protegidas – RUNAP, así como los Humedales RAMSAR, Bosque Seco Tropical y Páramos.

6.3.7 Cobertura de suelo

Para la instalación de proyectos solares, se prefieren zonas despejadas para la instalación de los paneles, las áreas cubiertas con vegetación densa o cultivos requieren deforestación o modificación de uso del suelo, lo que puede tener implicaciones a nivel ambiental y generar costos adicionales (Jaimes, 2024).

6.3.8 Vocación/Uso del Suelo

Este atributo define los usos permitidos y recomendados del suelo según sus características geológicas, climáticas, ambientales, entre otras. Para proyectos solares, es preferible identificar terrenos que no compitan con actividades agrícolas intensivas ni con áreas urbanas de expansión (Jaimes, 2024). Además, las áreas con potencial para la protección/conservación de recursos naturales tampoco son preferidas, mientras que se priorizan suelos sin usos claros o que no tienen grandes limitaciones para ser aprovechados (Nguyen et al., 2022).

6.3.9 Proximidad a Zonas de inundación

Esta variable no está documentada dentro de bibliografía internacional consultada, sin embargo, dentro del contexto colombiano, existen zonas con alta probabilidad de que el terreno se inunde durante algunas temporadas del año debido a las características del suelo, cercanía a ríos y baja altitud, lo que pondría en riesgo la operación y mantenimiento de un parque solar (Jaimes, 2024), y por lo tanto estas son zonas consideradas restringidas para este trabajo.

6.3.10 Proximidad a cuerpos de agua

Para la operación de un proyecto de esta naturaleza es clave el acceso al recurso hídrico, la captación puede destinarse al enfriamiento de equipos, consumo humano para el personal operativo, disposición de vertimientos, limpieza de espejos y paneles, etc. (Azevêdo et al., 2017).

Considerando que en la normativa colombiana se establecen distancias mínimas que se deben respetar hasta el cauce de un cuerpo de agua, que normalmente es de 30 m, aunque puede variar según legislación local o directrices de las autoridades ambientales, etc., se estableció una distancia de restricción de 100 m a partir de los cuales se considera viable la construcción de infraestructura.

6.3.11 Proximidad a asentamientos

La proximidad de una planta solar a áreas pobladas impacta en factores como el ambiente, la seguridad o la contaminación auditiva durante el proceso de construcción (Nguyen et al., 2022). De igual manera, se deben establecer distancias que no obstaculicen los procesos de expansión de estos centros poblados (García, 2021). Mantener una distancia apropiada de estas áreas minimiza los efectos adversos sobre la calidad de vida local, en general, distancias menores a 2 km se pueden considerar inadecuadas, mientras que distancias entre 5 – 10 km son preferidas para este objetivo (Rasaei et al., 2025) sin perjudicar otros factores como el acceso del personal de trabajo y la movilidad y seguridad de equipos.

6.3.12 Resguardos indígenas

Dada su naturaleza jurídica los resguardos tienen derechos sobre la gestión y uso del territorio, autores como Jaimes (2024) han decidido restringir estas zonas por su condición, sin embargo, otros autores como García (2021) han decidido incluir algunas áreas por la permisividad que han demostrado algunos grupos indígenas para permitir el desarrollo de proyectos de generación de energía eólica dentro de su territorio.

6.3.13 Sitios arqueológicos y áreas protegidas arqueológicamente

Un sitio arqueológico es un área donde existe evidencia de patrimonio arqueológico definido según el artículo 3 de la ley 1185 como aquellos “vestigios producto de actividad humana y restos orgánicos e inorgánicos que, mediante métodos y técnicas propios de la arqueología y otras ciencias sociales, permiten reconstruir y dar a conocer los orígenes y las trayectorias socioculturales pasadas” (Congreso de Colombia, 2008).

Por otro lado, los parques arqueológicos son una “figura administrativa de manejo y gestión protegida, donde la conservación y excepcionalidad de los bienes arqueológicos que albergan y sus características físicas, museables y socioculturales propician la visita regular de público para su puesta en valor, apropiación social y disfrute” (ICANH, 2025). Dada su condición, están a cargo del ICANH para su administración y gestión y son áreas restringidas para cualquier tipo de actividad.

Según García (2021) las áreas protegidas deben ser restringidas y los sitios arqueológicos que pueden tener asociado un Programa de Arqueología Preventiva deben considerarse con criticidad.

7. Metodología

Este trabajo se encuentra dentro del enfoque de investigación cuantitativa, dada la necesidad de evaluar y comparar zonas de la Región Caribe según unos criterios que, como se mencionó anteriormente, deben ser medibles a través de capas de datos de información geográfica. Otros elementos de la investigación cuantitativa utilizados en esta propuesta son la importancia de la relación entre variables (entidades espaciales), así como la posibilidad de replicar el estudio si se cuenta con la información de los datos espaciales. En general, se trata de un proceso verificable que busca contrastar zonas que cumplan con unos criterios establecidos a través de una escala estandarizada.

Este enfoque permite diseñar una metodología secuencial, separada en fases claramente definidas y con un conjunto de actividades dentro de ellas que permiten cumplir con los objetivos específicos planteados. Una vez revisados los antecedentes y realizada la búsqueda bibliográfica, se identificaron tres fases comunes en los trabajos; las actividades se establecieron siguiendo el flujo de trabajo sugerido por ESRI para modelos de adecuación en ArcGIS Pro 3.4 en los cursos “*Suitability Modeling: Introduction*” (Modelado de Idoneidad: Introducción), “*Suitability Modeling: Creating a Simple Suitability Model*” (Modelado de Idoneidad: creación de un modelo de idoneidad simple) y “*Suitability Modeling: Creating a Weighted Suitability Model*” (Modelado de Idoneidad: creación de un modelo de idoneidad ponderado), sintetizando el procedimiento general de la siguiente manera:

Tabla 1

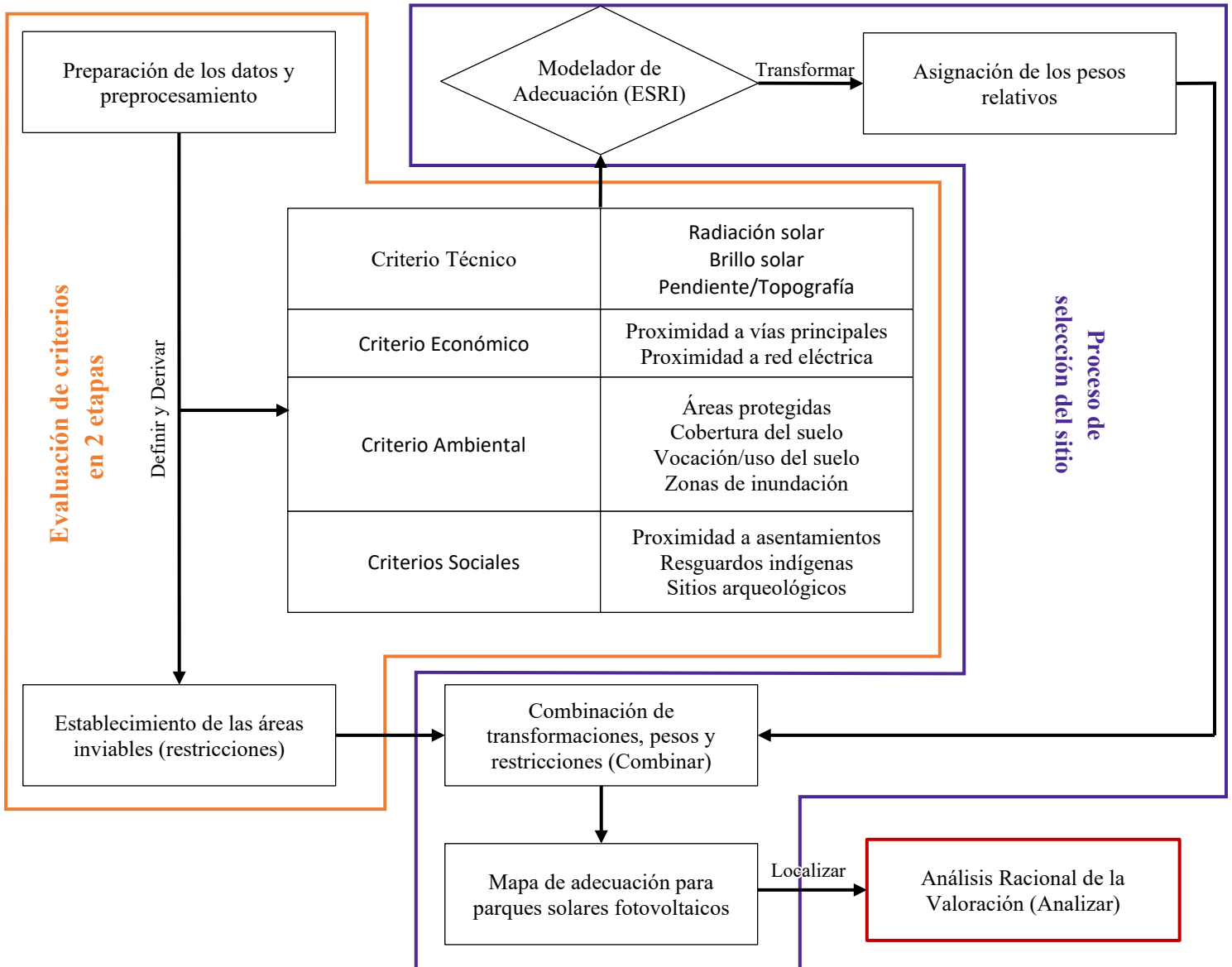
Procedimiento establecido para el cumplimiento de los objetivos específicos

Fase	Objetivo Específico	Actividad	Descripción
Evaluación de criterios en 2 etapas	Definir los criterios espaciales (objetivos/atributos) necesarios para evaluar la adecuación de las áreas para la construcción de plantas fotovoltaicas incluyendo restricciones técnicas y legales	Definir	Establecer los criterios necesarios y relevantes para evaluar el potencial de generación de energía solar de manera competitiva y sostenible que puedan ser representados en capas de información geográfica
		Derivar	Consultar las fuentes de la información y de ser necesario se procesan las capas para obtener la información a evaluar
Proceso de selección del sitio	Generar los mapas de evaluación de evaluación por cada criterio a nivel regional y de restricciones acorde a lo definido, llevando los valores a una escala estandarizada	Transformar	Se llevan las diferentes capas a evaluar a una escala común y se establece el tipo de preferencia
	Identificar las zonas en la Región Caribe Colombiana con mayor valor de adecuación para la construcción de parques solares fotovoltaicos	Combinar	Se integran los atributos a los objetivos y estos a los criterios generales, también se considera el peso relativo asignado a cada variable y criterio y se genera el ráster de idoneidad
		Localizar	Utilización de herramientas de extracción de datos para encontrar las áreas que mejor se adecúen a lo deseado según el valor de adecuación de las celdas encontradas
Análisis Racional de la Valoración	Analizar las zonas más idóneas con relación al cumplimiento de los requisitos establecidos, estudios similares en Colombia y los proyectos solares fotovoltaicos instalados en la región	Analizar	Contrastar resultados con estudios previos en Colombia, entendiendo la validez del método y sugiriendo ajustes metodológicos.

El flujo de trabajo que se desprende de este procedimiento para la identificación de áreas adecuadas se ilustra a continuación:

Figura 4

Diagrama de flujo para la implementación del modelo de adecuación



Como se mencionó, esta investigación se llevó a cabo en tres fases para la toma de decisiones respecto a la localización de plantas solares fotovoltaicas de manera similar a la señalada por Linnan et al. (2024), a continuación, se detalla cada una de ellas:

1. Evaluación de criterios en dos etapas: consiste en la definición de dos tipos de variable: por un lado, aquellas que restringen la operación por completo y se constituyen como un impedimento ya sea legal o técnico, y que, por lo tanto, las áreas que cumplan con el criterio

establecido deberán ser descartadas para la priorización y análisis. Por otro lado, se encuentran los criterios de evaluación que se consideren necesarios, clasificados como “positivo” o “negativo” según su preferencia, por ejemplo, clima, economía, usos del suelo, distancias a puntos de interés, etc. También se establecen las fuentes de la información y si esta requerirá algún tipo de procesamiento antes de ser utilizada para la toma de decisiones. Esta etapa abarca las actividades de Definir y Derivar.

2. Proceso de selección del sitio: es la parte “operativa” del trabajo, donde se recopila la información necesaria según los criterios definidos a través de capas de información geográfica, además, se lleva esta información a las escalas de trabajo, por ejemplo, las variables restrictivas se llevan a un modelo Booleano, donde las celdas se les asigna un valor 0 o 1 si la celda cuenta con alguna restricción o no; para las variables evaluativas, se llevarán, según sea conveniente, a las escalas estandarizadas para estos modelos (de 0 a 1, de 1 a 5, o de 1 a 10, dependiendo de la complejidad y conveniencia). Aquí se incluyen actividades como la combinación de capas y se utilizan herramientas SIG como calculadora ráster, y para el caso de este trabajo, las transformaciones se harán a través de herramientas específicas como el “Modelador de adecuación” de ESRI. Se incluyen las actividades de Transformar, Combinar y Localizar.

3. Análisis Racional de la Valoración: esta etapa hace referencia al proceso de validación del modelo de adecuación mediante el análisis de las áreas idóneas encontradas. Para ello se selecciona una zona aleatoria del ráster de idoneidad resultante, con el fin de evaluar cómo se comporta en cuanto al cumplimiento de los requisitos y valoraciones establecidos en las etapas previas del trabajo, es decir, qué tanto se ajustan las áreas encontradas al criterio técnico, económico, ambiental, y sociocultural y arqueológico.

Por consiguiente, para implementar el modelo de idoneidad, cumplir con las fases del proceso y alcanzar los objetivos específicos planteados, se desarrollaron seis actividades esenciales, las cuales se describen en detalle a continuación:

Objetivo específico 1: Definir los criterios espaciales (objetivos/atributos) necesarios para evaluar la adecuación de las áreas para la construcción de plantas fotovoltaicas incluyendo restricciones técnicas y legales.

7.1. Definir

Se refiere a entender las metas que se quieren alcanzar e identificar qué tipo de criterios (que puedan ser representados en datos espaciales) se utilizarán para ello, en este caso, se reconocieron cuatro criterios: Técnico, Económico, Ambiental y Social/arqueológico, así que esta etapa consistió en evaluar las variables que se deben considerar (ej. Distancia desde las vías, ecosistemas estratégicos, etc.), para este propósito, se consultaron los trabajos de García (2021); Jaimes (2024); Obando (2017); Azevêdo et al. (2017); Demir et al. (2023); y Rios & Duarte (2021); revisando tanto las variables que se tuvieron en cuenta para jerarquizar las áreas de análisis así como las diferentes restricciones propuestas en estos documentos, estableciendo la siguiente lista inicial de variables:

Tabla 2

Lista inicial de variables descritas en la bibliografía consultada

Categoría	Variable	Autor/es
Técnicas	Radiación solar	Jaimes (2024); Azevêdo et al. (2017); Demir et al. (2023); Rios & Duarte (2021)
	Brillo Solar	Jaimes (2024); Demir et al. (2023)
	Pendiente/Topografía	García (2021); Jaimes (2024); Obando (2017); Azevêdo et al. (2017); Rios & Duarte (2021)
	Dirección de exposición al sol	Jaimes (2024); Rios & Duarte (2021)
	Altitud	Jaimes (2024)
Económicas	Proximidad a red eléctrica	García (2021); Azevêdo et al. (2017); Demir et al. (2023); Rios & Duarte (2021)
	Proximidad a vías principales	García (2021); Obando (2017); Azevêdo et al. (2017); Demir et al. (2023); Rios & Duarte (2021)
	Costo de terreno	Demir et al. (2023)
Ambientales	Temperatura promedio	García (2021); Jaimes (2024)
	Áreas protegidas	García (2021)
	Cobertura de suelo	García (2021); Jaimes (2024); Obando (2017)
	Vocación/Uso del Suelo	Jaimes (2024); Azevêdo et al. (2017); Demir et al. (2023); Rios & Duarte (2021)
	Proximidad a cuerpos de agua	Obando (2017); Azevêdo et al. (2017)
	Humedad Relativa	García (2021)
	Impacto Visual	García (2021)
Sociales	Hábitats	García (2021)
	Proximidad a asentamientos	García (2021); Obando (2017); Azevêdo et al. (2017);

Categoría	Variable	Autor/es
		Rios & Duarte. (2021)
	Distancia a Puertos	García (2021)
	Otros Proyectos	Obando (2017)
Arqueológicas/Culturales	Resguardos indígenas	Obando (2017)

Además, como se maneja en trabajos como el de Sánchez-Lozano et al. (2013); Ortiz (2021) o el de Obando (2017), también se establecieron las restricciones normativas que se puedan analizar mediante información geográfica, de acuerdo con lo considerado por los autores mencionados en la revisión de variables, se construye la siguiente lista de restricciones:

Tabla 3

Lista inicial de restricciones encontradas en la bibliografía consultada

Categoría	Variable	Autor/es
Técnicas	Potencial Eléctrico Fotovoltaico	García (2021)
	Temperatura Promedio	
	Área Disponible	
	Elevación	Demir et al. (2023)
	Pendientes	
	Proximidad a vías principales	
Ambientales	Humedales	García (2021); Obando (2017); Rios & Duarte (2021)
	Páramos	Jaimés (2024); Obando (2017)
	Áreas protegidas	García (2021); Jaimés (2024); Obando (2017); Azevêdo et al. (2017); Demir et al. (2023); Rios & Duarte (2021)
	Riesgo de inundación	Jaimés (2024)
	Hábitats	García (2021)
	Cuerpos de agua	García (2021); Jaimés (2024); Obando (2017); Azevêdo et al. (2017); Demir et al. (2023); Rios & Duarte (2021)
	Zonificación POMCA	Obando (2017)
Sociales	Centros Poblados	García (2021); Obando (2017); Azevêdo et al. (2017); Demir et al. (2023)
	Aeropuertos	García (2021); Rios & Duarte (2021)
	Facilidades	Rios & Duarte (2021)
	Sitios de Interés	García (2021); Demir et al. (2023)
Arqueológicas/Culturales	Sitios arqueológicos	Jaimés (2024); Rios & Duarte (2021)
	Resguardos indígenas	Jaimés (2024); Obando (2017); Azevêdo et al. (2017); Rios & Duarte (2021)
	Patrimonio cultural	Rios & Duarte (2021)

Luego, se aceptaron o descartaron variables y restricciones con base a la búsqueda de información disponible para los 7 departamentos considerados en este estudio (Atlántico, Bolívar, Cesar, Córdoba, La Guajira, Magdalena y Sucre), y la naturaleza de la región, por ejemplo, en los datos disponibles en el sistema de Información para la Gestión de Datos Hidrológicos y

Meteorológicos DHIME del IDEAM, se observó que la temperatura promedio de la región es muy homogénea, por lo que no se consideró relevante como variable. Finalmente, se establecieron las listas finales de variables y restricciones de la siguiente manera:

Tabla 4

Lista de variables consideradas para el desarrollo del trabajo

Categoría	Variable/Atributo	Descripción
Técnicas	Radiación solar	Se mide a través de la exposición radiante, en la cual la irradiancia es integrada en el tiempo y cuya unidad de medida es el kWh/m ² por día (IDEAM, SF)
	Brillo Solar	La magnitud física de la duración del brillo solar o insolación es el tiempo. La unidad que se emplea generalmente es la hora. Con fines climatológicos, se utilizan expresiones tales como: "horas de Sol al día", "horas de Sol efectivo en el día" u "horas de insolación diaria". (IDEAM, SF)
	Pendiente/Topografía	Parámetro morfométrico que expresa la inclinación del terreno respecto del plano horizontal. Es una condición topográfica que corresponde a la diferencia de la elevación en metros por cada cien metros horizontales; se expresa en términos de porcentaje y se mide corrientemente por medio del nivel Abney. (Servicio Geológico de Colombia, 2023).
Económicas	Proximidad a red eléctrica	Distancia de cualquier punto de la Región Caribe hasta la subestación eléctrica y línea de transmisión más cercana.
	Proximidad a vías principales	Distancia de cualquier punto de la Región Caribe hasta la vía de Primer Orden más cercana
Ambientales	Áreas protegidas	Distancia de cualquier punto de la Región Caribe hasta las áreas pertenecientes al Registro Único Nacional de Áreas Protegidas, así como los Humedales RAMSAR, Bosque Seco Tropical y Páramos
	Cobertura de suelo	Clasificación de las coberturas de la tierra según la metodología Corine Land Cover, agrupando sus clasificaciones según su conveniencia para el desarrollo de proyectos solares.
	Vocación/Uso del Suelo	Usos recomendados para el aprovechamiento del suelo colombiano en base a sus características físicas, limitaciones, requerimientos de inversión, etc.
	Proximidad a Zonas de inundación	Distancia de cualquier punto de la Región Caribe hasta Zona de Inundación identificada en el mapa de capacidades de uso de la tierra, donde se busca establecer las restricciones y potencialidades biofísicas de las tierras.
	Proximidad a cuerpos de agua	Incluye Embalses, Canales Sencillos, Drenajes Sencillos, Pantanos, Lagunas, Manglares, Ciénagas, Madre viejas, Drenajes dobles, Líneas Costeras, Jagüeyes, Bancos de Arena y Humedales.
Sociales	Proximidad a asentamientos	Distancia de cualquier punto de la Región Caribe hasta el centro poblado más cercano catalogado como Tejido Urbano Continuo.
Arqueológica/culturales	Resguardos indígenas	Distancia de cualquier punto de la Región Caribe hasta el Resguardo Indígena legalizado más cercano.
	Áreas arqueológicas protegidas	Distancia de cualquier punto de la Región Caribe hasta el área arqueológica protegida
	Sitios arqueológicos	Distancia de cualquier punto de la Región Caribe hasta el sitio arqueológico

Tabla 5

Lista de restricciones consideradas para el desarrollo de este trabajo

Categoría	Variable/Atributo	Restricción
Técnico	Pendientes	>8%
	Proximidad a vías principales	< 1 km
Ambiental	Áreas protegidas	< 1 km
	Riesgo de inundación	< 1 km
	Cuerpos de agua	< 100 m
Sociales	Centros Poblados	< 1 km
	Sitios de Interés	Se establece una restricción de 2.5 km alrededor de los aeropuertos, 60 m de las vías férreas y 1 km de puertos fluviales.
Arqueológicas/culturales	Territorio Ancestral	1 kilómetro a partir de la Delimitación del territorio ancestral de los pueblos indígenas Arhuaco, Kogui, Wiwa y Kankuamo de la Sierra Nevada de Santa Marta, conformado por el área terrestre y el área marítima; conforme al artículo 11 del Decreto 1500 de 2018.
	Áreas arqueológicas protegidas	< 1 km

7.2. Derivar

Consistió en identificar las fuentes de información disponibles, la utilidad de estas, y si requieren algún tipo de procesamiento para ser utilizadas, en esta etapa se realizó un inventario cartográfico, similar al utilizado en Valencia et al. (2013), donde se relacionen las capas de información disponibles con su posible utilidad para el estudio y variable específica. Las fuentes utilizadas fueron aquellas disponibles de manera gratuita en los diferentes servicios de mapas del estado, como los catálogos de mapas del Sistema de Información Ambiental de Colombia – SIAC, los portales geográficos de la ANLA, etc. Los enlaces recopilados se relacionan a continuación:

Tabla 6
Variables y fuentes de información

Categoría	Variable	Procesamiento Requerido	Enlace a los datos
Técnicas	Radiación solar	Ninguno	https://visualizador.ideam.gov.co/gisserver/services/Clima_Potencial_Energetico/MapServer/WFSServer
	Brillo Solar	Ninguno	https://visualizador.ideam.gov.co/gisserver/services/Quimica_Atmosfera/MapServer/WFSServer
	Pendiente/Topografía	Generación del DEM a partir de curvas de nivel, luego generar mapa de pendientes con "Parámetros de Superficie"	https://mapas.igac.gov.co/server/rest/services/carto/carto100000curvasdenivel/MapServer/0
Económicas	Proximidad a red eléctrica	Acumulación de Distancia	https://sig.upme.gov.co/portal/apps/experiencebuilder/experience/?id=76068f01ad1d40cdf2e7d7cf84de86b
	Proximidad a vías principales	Acumulación de Distancia/Buffer	https://mapas.igac.gov.co/server/rest/services/infraestructura/infraestructurabasica/MapServer
Ambientales	Humedales	Acumulación de Distancia/Buffer	https://siac-datosabiertos-mads.hub.arcgis.com/datasets/145a8d9eb8bf41ec9650a7f9d69a9638/about
	Páramos	Acumulación de Distancia/Buffer	https://pnnc.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=2fb3250f7f494b209a300c3fb027211e
	Áreas protegidas	Acumulación de Distancia/Buffer	
	Riesgo de inundación	Seleccionar por Atributos/Buffer	https://mapas.igac.gov.co/server/rest/services/agrologia/capacidaddeusodelastierrasmultiescalar/MapServer/0
	Cobertura de suelo	Reclasificar	https://visualizador.ideam.gov.co/gisserver/rest/services/Estado_Cobertura_Tierra/MapServer/3
	Vocación/Usos del Suelo	Reclasificar	https://mapas.igac.gov.co/server/rest/services/agrologia/capacidaddeusodelastierrasmultiescalar/MapServer/0
	Cuerpos de agua	Acumulación de Distancia/Buffer	https://mapas2.igac.gov.co/server/rest/services/carto/carto100000colombia2019/MapServer
Sociales	Centros Poblados	Acumulación de Distancia/Buffer	https://geoportal.dane.gov.co/servicios/descarga-y-metadatos/datos-geoestadisticos/
	Sitios de Interés	Buffer	https://mapas2.igac.gov.co/server/rest/services/carto/carto100000colombia2019/MapServer
	Otros Proyectos	Ninguno	https://portalsig.anla.gov.co/publico/rest/services/PROYECTOS_ANLA/ProyectosANLA/FeatureServer
Arqueológicos/culturales	Resguardos indígenas	Acumulación de Distancia/Buffer	https://sigi.cntindigena.org:8443/sigindigena/
	Áreas protegidas y sitios arqueológicos	Acumulación de Distancia/Buffer	Información suministrada por el ICANH

Nota: La capa "Otros Proyectos" no se mencionó en la lista de variables y restricciones, pues no hace parte del proceso de jerarquización del que trata el trabajo, sino que fue necesaria para comparar las áreas óptimas encontradas contra la localización de los diferentes proyectos licenciados en la región.

Objetivo específico 2: Generar los mapas de evaluación de criterios y de restricciones acorde a lo definido, llevando los valores a una escala estandarizada

7.3. Transformar

Consiste en llevar las diferentes variables a una escala de clasificación común, esta actividad es constante en todos los trabajos revisados ya que hace parte integral del análisis multicriterio. Aquí es necesario preguntarse qué es más preferible que suceda para asignar el tipo de preferencia (¿Es mejor que esté más cerca o más lejos de una carretera principal? ¿Debe ser un terreno con pendientes más planas o inclinadas?) como la escala (¿Cuál es el mejor o peor escenario para esta variable?).

Este proceso debe entenderse, como la transformación de variables (ej. Distancia a vías) a través de una función, en el caso de este trabajo, con apoyo del panel “Transformación” que viene integrado en la herramienta “Modelador de Adecuación” en ArcGIS Pro. Algunas de las funciones utilizadas fueron la Lineal, que transforma los valores del ráster de entrada entre un umbral mínimo y máximo; por default la herramienta establece un rango entre 0 hasta el valor máximo del ráster de entrada para estos umbrales, pero en algunos casos se modificaron estos valores según la naturaleza de cada variable (ej. Ver sección ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.); la MSSmall, que se utiliza cuando los valores más pequeños tienen mucha más preferencia que los grandes; la función Grande, que da preferencia a los valores más grandes del ráster de entrada (ej. Si se prefiere estar más alejados de los resguardos indígenas), entre otras.

En este caso, se tomó como escala de referencia las preferencias numeradas del 1 al 10, donde 1 es el valor de las celdas del ráster que menos se adecúan a lo solicitado según el tipo de función y 10 aquellas que cumplen muy bien con esto, continuando con el ejemplo de los resguardos indígenas, en ese caso, se esperaría que las celdas de distancia con valores más altos tengan un valor de 10, pues se prefieren zonas alejadas de estos; y que aquellos valores cercanos a 0, es decir, los lugares inmediatamente cercanos a los resguardos, tengan un valor de 1, pues es el escenario menos favorable.

Algunos atributos como el brillo y radiación solar, la cobertura del suelo o la capacidad de uso del suelo no pueden ser transformados con estas funciones, pues no se tratan de datos continuos sino discretos, áreas con unas características particulares que los convierten en más o menos favorables, en estos casos, se utilizó la opción de integrar clases dentro del panel de transformación, en esencia esto funciona como un proceso de “reclasificar”, donde algunas clases son más preferidas que otras.

El proceso de transformación específico y los parámetros considerados para cada una de las variables, así como los mapas ilustrativos del resultado de la transformación se presenta a continuación:

7.3.1 Radiación solar

Para esta variable se utilizó la herramienta de clases del panel de transformación del modelador de adecuación para agrupar rangos de radiación solar de acuerdo con su preferencia, teniendo los siguientes parámetros de transformación:

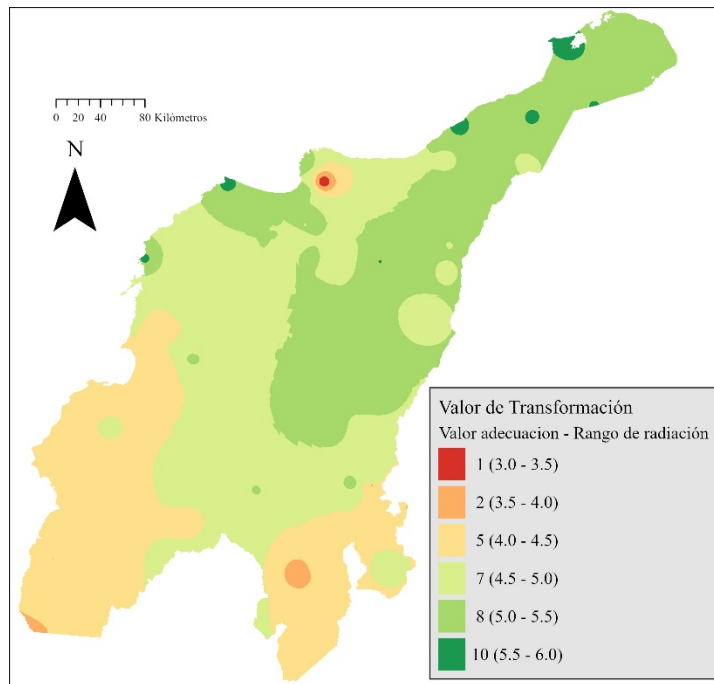
Tabla 7
Parámetros de transformación para la radiación solar

Radiación Solar (kWh/m ² por día)	Valoración
3.0 - 3.5	1
3.5 - 4.0	2
4.0 - 4.5	5
4.5 - 5.0	7
5.0 - 5.5	8
5.5 - 6.0	10

El resultado de la transformación se puede observar en la **Figura 5**

Figura 5

Mapa de transformación para el atributo “Radiación solar”



7.3.2 Brillo Solar

De manera similar a la Radiación Solar, para esta variable se agruparon las valoraciones de acuerdo con la cantidad de horas de sol recibidas por la superficie de la región. Los parámetros de transformación para esta variable fueron:

Tabla 8

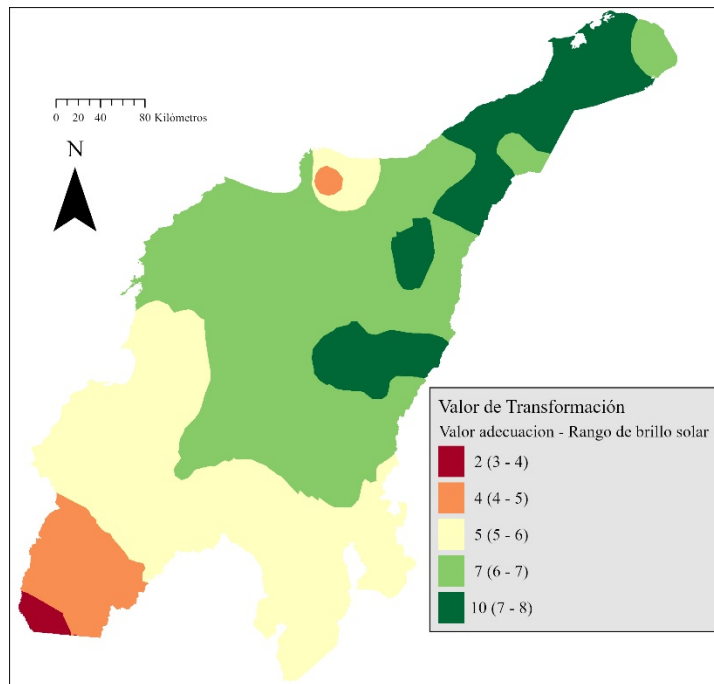
Parámetros de transformación para el brillo solar

Brillo Solar Medio Diario (horas)	Valoración
3 - 4	2
4 - 5	4
5 - 6	5
6 - 7	7
7 - 8	10

El resultado de la transformación se puede observar en la **Figura 6**

Figura 6

Mapa de transformación para el atributo “Brillo solar”

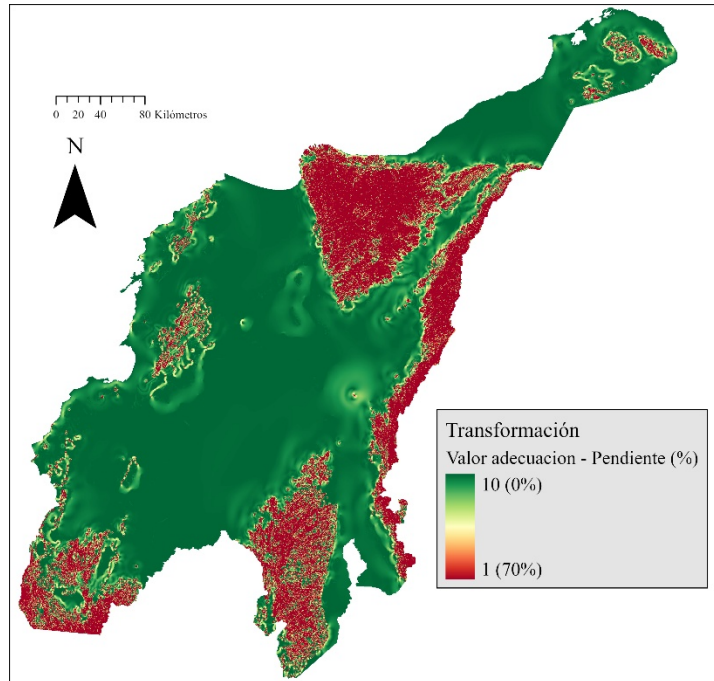
**7.3.3 Pendiente/Topografía**

Para esta variable se seleccionó la función “MSSmall”, pues se tiene mucha más preferencia por aquellos lugares con pendientes pequeñas. Además, como se mencionó en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se considera una restricción de aquellas pendientes superiores al 8%.

El resultado de la transformación se puede observar en la **Figura 7**

Figura 7

Mapa de transformación para la variable “Pendientes del terreno”

**7.3.4 Proximidad a red eléctrica**

Para esta variable se realizó la transformación a través de la función “MSSmall”, dando mucha más preferencia a lugares cercanos a la red eléctrica existente. Para los parámetros se estableció un umbral superior de 50 km y un punto medio de 25 km, es decir, los valores menores a 25 km tendrán mucha más preferencia hasta alcanzar las líneas de transmisión, y disminuirán rápidamente hasta alcanzar la preferencia más baja en los 50 km. Estos parámetros se consideraron tanto para las líneas de transmisión como para las subestaciones eléctricas.

El resultado de la transformación se puede observar en las **Figuras 8 y 9**

Figura 8

Mapa de transformación para la variable “Proximidad a las subestaciones eléctricas”

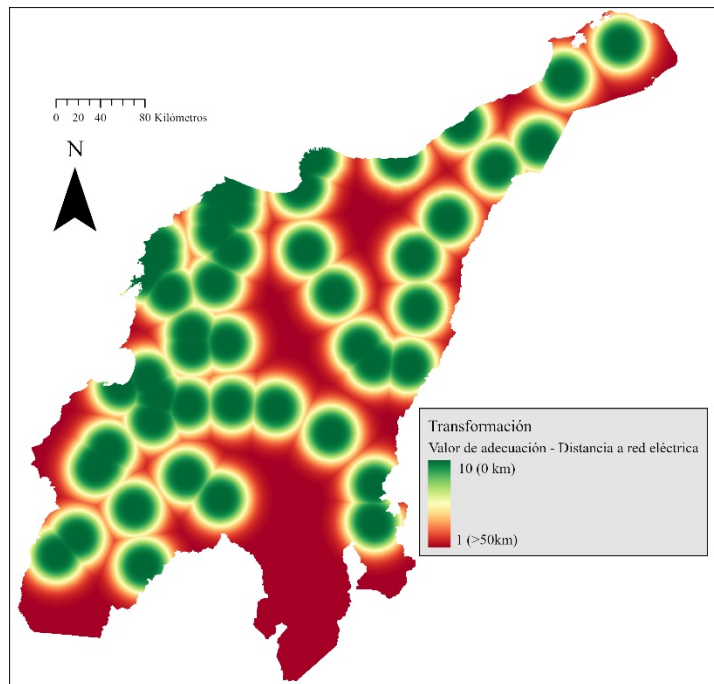
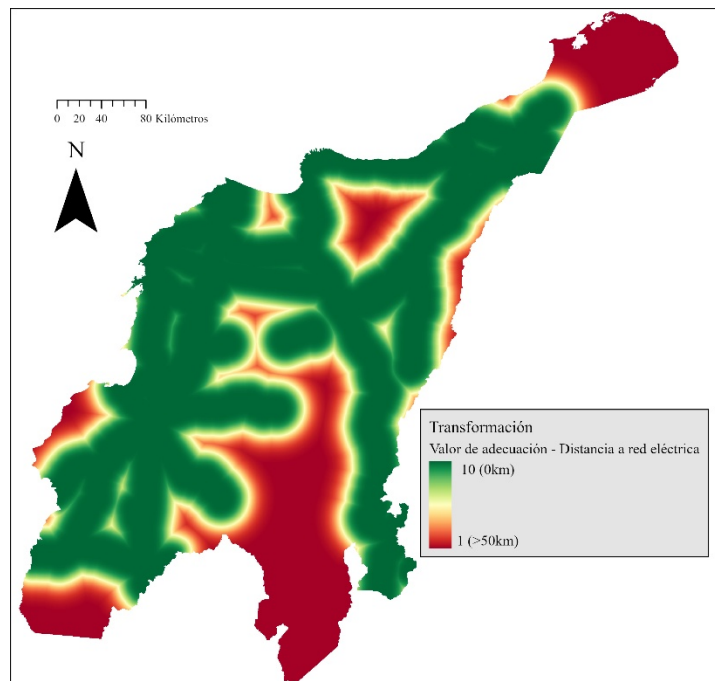


Figura 9

Mapa de transformación para la variable “Proximidad a las líneas de transmisión”

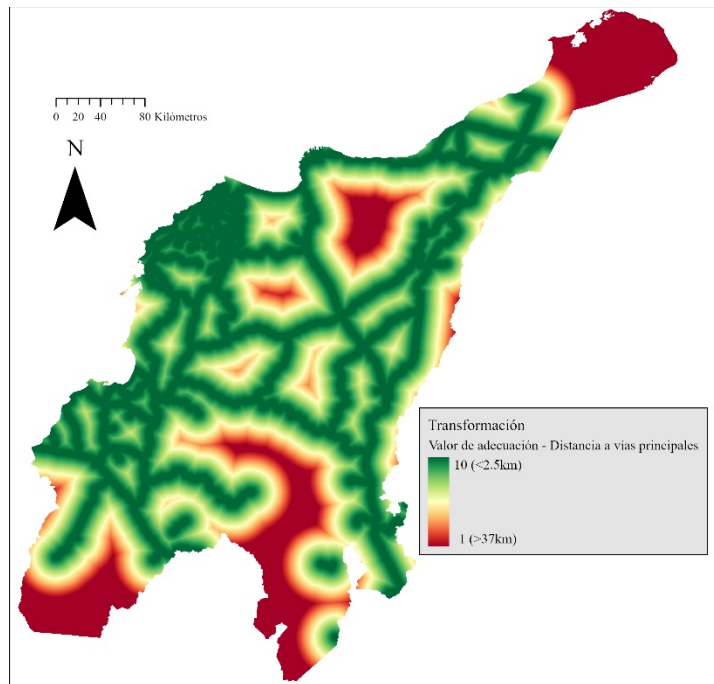


7.3.5 Proximidad a vías principales

Para esta variable se eligió la función Lineal invertida para la transformación, dando prioridad a las celdas más cercanas a las vías principales, estableciendo un umbral inferior de 2.5 km, y un umbral superior de 37 km, es decir, que aquellas celdas con distancias menores a 2.5 km obtendrán una valoración de 10, e irán disminuyendo linealmente hasta los 37 km, distancia desde la cual todas las celdas tendrán un valor de 1 en preferencia. El resultado de la transformación se observa a continuación:

Figura 10

Mapa de transformación para la variable “Proximidad a las vías principales”



7.3.6 Áreas protegidas

De esta manera, se estableció la transformación a través de la función Grande, para dar prioridad a los lugares más alejados de las áreas protegidas, con un umbral inferior de 6 km, es decir, 5 km alrededor de la restricción establecida, distancias menores se consideran de poca preferencia; y un umbral superior de 15 km. Las capas de RUNAP y humedales RAMSAR se transformaron con los mismos parámetros.

Los resultados de estas transformaciones se presentan en las **Figuras 11 y 12**.

Figura 11

Mapa de transformación para la variable “Proximidad de áreas RUNAP”

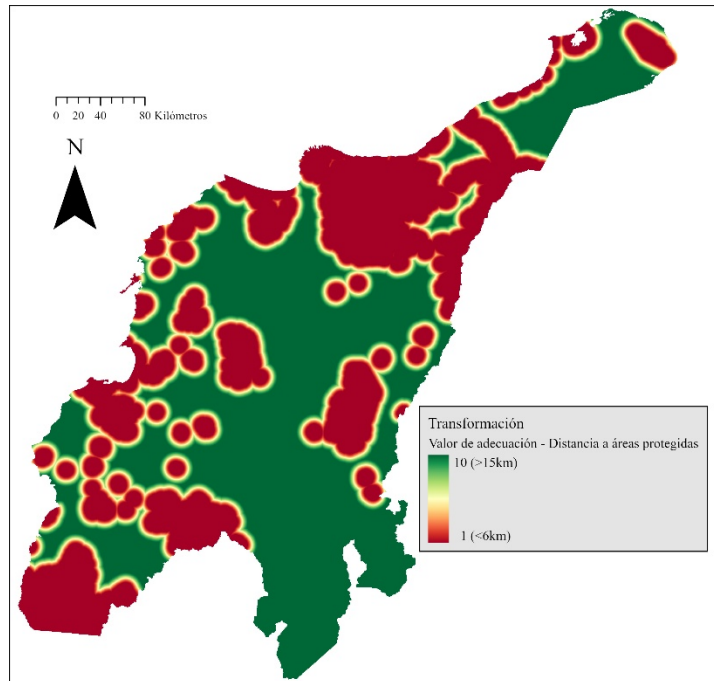
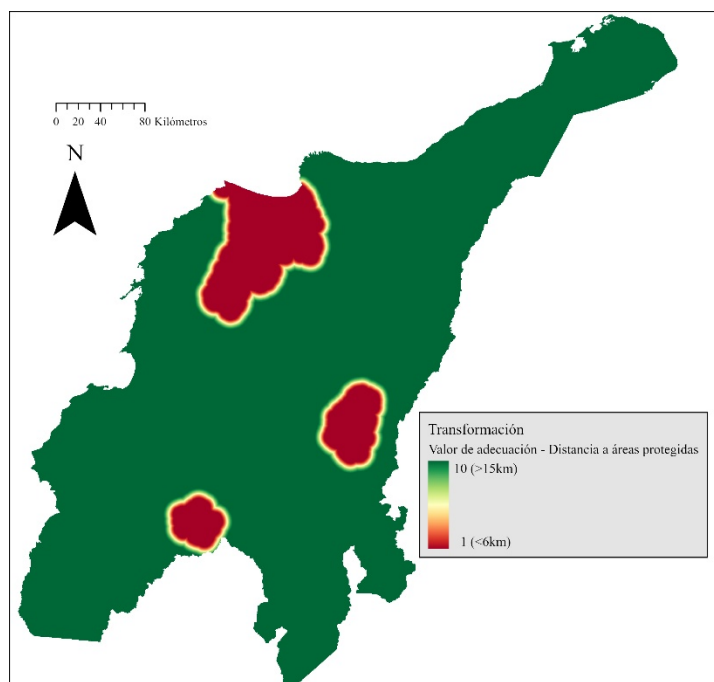


Figura 12

Mapa de transformación para la variable “Proximidad a humedales RAMSAR”



7.3.7 Cobertura de suelo

Para esta variable se tuvo en cuenta la clasificación de Corine Land Cover adaptada para Colombia (IDEAM, 2010) para la interpretación del Mapa de Coberturas de la Tierra del 2020 en escala 1:100.000, agrupando las coberturas según su preferencia de la siguiente manera:

Tabla 9

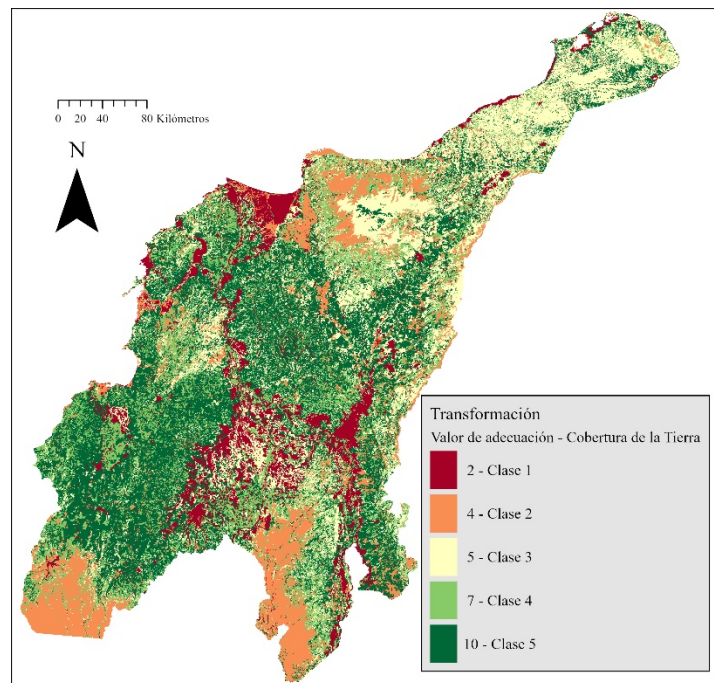
Parámetros de transformación para la clasificación de Coberturas de la Tierra

Clase	Clasificación coberturas de la tierra según Corine Land Cover	Valoración
1	1. Territorios artificializados, 4. áreas húmedas, 5. superficies de agua	2
2	2.2 Cultivos permanentes, 3.1 bosques	4
3	3.2 Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	5
4	2.4 Áreas agrícolas heterogéneas, 2.1 Cultivos transitorios	7
5	2.3 Pastos y 3.3 Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	10

El resultado de la transformación se puede observar en la **Figura 13**

Figura 13

Mapa de transformación para el atributo “Cobertura del suelo”



7.3.8 Vocación/ uso del suelo

Para la transformación de este atributo, se agrupó en cuatro categorías los usos potenciales del suelo según su conveniencia para el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos, de la siguiente manera:

Tabla 10

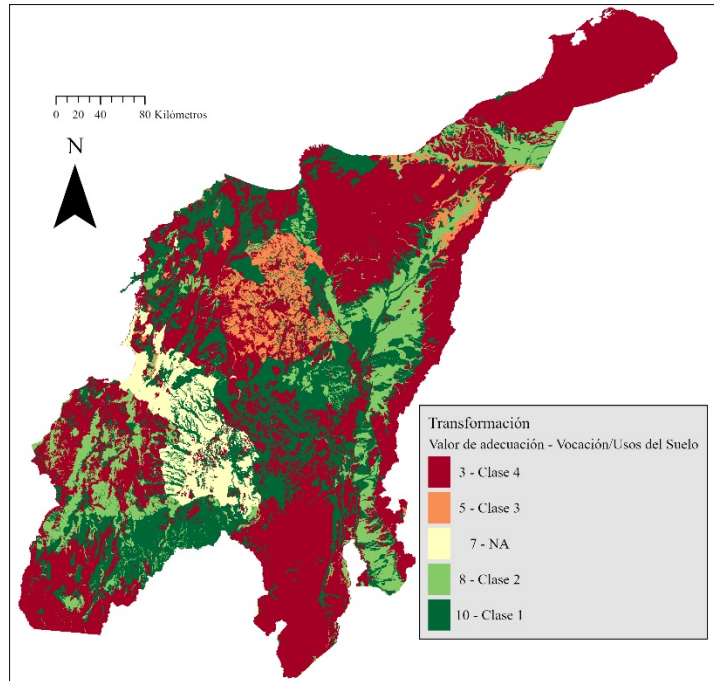
Parámetros de transformación para la clasificación de Vocación/ usos del suelo

Clase	Vocación del suelo	Valor
1	Se incluyen zonas con potencial para cultivos, agricultura, actividad agronómica, ganadería, pastoreo, saladares y silvicultura. Además, se adicionan zonas con limitaciones para desarrollar la tierra; que deben presentar estudios de impacto ambiental; áreas sin usos agrícolas; o que no son aptas para el desarrollo agrícola. No se incluyen zonas aptas para ganadería/cultivos extensivos, la protección de los recursos o para la conservación.	10
2	Se incluye toda actividad agrícola semi intensiva, pero no extensiva.	8
3	Zonas con potencial para ganadería/cultivos extensivos o intensivos, menos aquellas que presenten dificultades o limitaciones para su desarrollo o requieran estudios de impactos.	5
4	Zonas con potencial para la protección de los recursos naturales, conservación, cuerpos de agua, potencial minero, zonas urbanas. No se incluyen las tierras que para desarrollar estas actividades requieran de una gran inversión o presenten dificultades para su desarrollo, tampoco se incluyen los terrenos sin uso agrícola o no aptas para esto.	3

El resultado de la transformación se puede observar en la **Figura 14**

Figura 14

Mapa de transformación para el atributo “Vocación/ Uso del suelo”



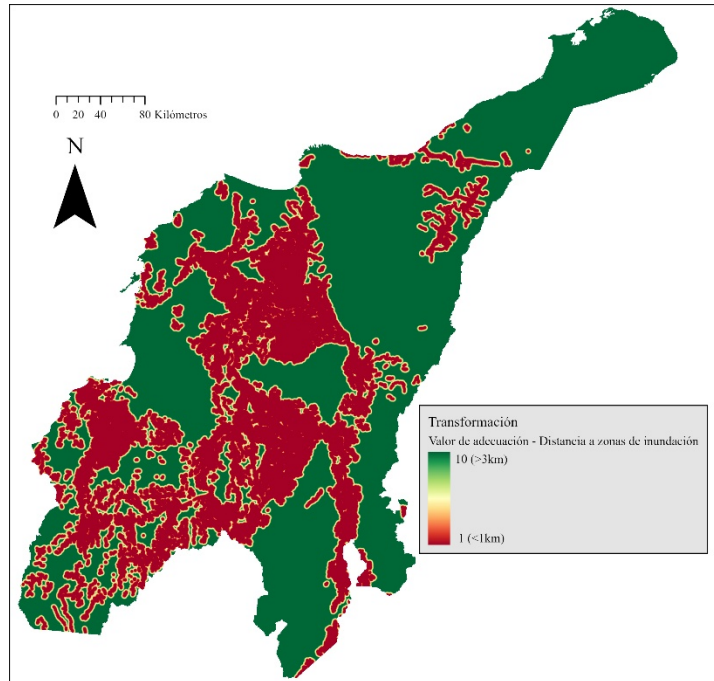
7.3.9 Proximidad a zonas de inundación

A pesar de establecer 1 km alrededor de las zonas de inundación como restricción para la ubicación de estos proyectos, comprendiendo las bases del principio de proximidad, se decidió implementar la variable “Proximidad a zonas de inundación”, para dar preferencia a áreas alejadas de estos terrenos con características desfavorables, transformando los datos a través de la Función Lineal, con un umbral inferior de 1km y uno superior de 3 km, de este modo, las áreas más allá de 2 km después de la distancia de restricción se consideran totalmente viables, y disminuyen su valoración a medida que se aproximan al límite de la restricción, así:

El resultado de la transformación se puede observar en la **Figura 15**

Figura 15

Mapa de transformación para la variable “Proximidad a zonas de inundación”

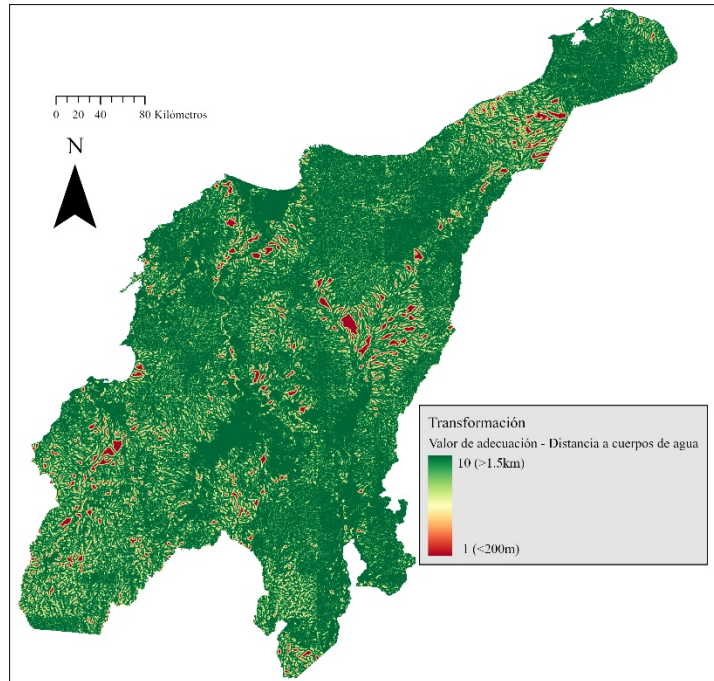
**7.3.10 Proximidad a cuerpos de agua**

Así, se estableció una transformación a través de la función Lineal invertida para dar prioridad a las distancias cercanas a este límite, estableciendo un umbral inferior de 200 m, que disminuirá su valoración hasta llegar al umbral superior de 1.5 km, más allá de esa distancia, se considera poco adecuado el acceso al recurso hídrico para abastecer el proyecto.

El resultado de la transformación se puede observar en la **Figura 16**

Figura 16

Mapa de transformación para la variable “Proximidad a cuerpos de agua”

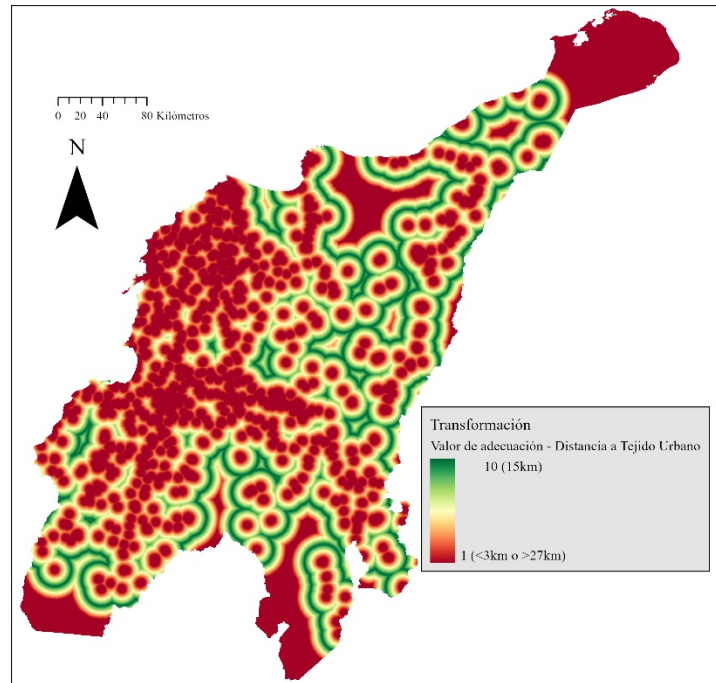
**7.3.11 Proximidad a asentamientos**

Para cumplir con este criterio, la transformación de esta variable se hace por medio de la función *SimetricLinear*, que se utiliza cuando existe un punto de preferencia específico, este caso, alrededor de los 15 km, a partir del cual disminuirá la preferencia de manera simétrica a medida que las distancias se alejen de este valor, alcanzando las mínimas preferencias en 3 y 27 km, es decir, por debajo de 3 km el valor asignado será de 1 al igual que por encima de los 27 km, asegurando un punto medio entre conveniencia e impactos mitigados.

El resultado de la transformación se puede observar en la **Figura 17**

Figura 17

Mapa de transformación para la variable “Proximidad a asentamientos”

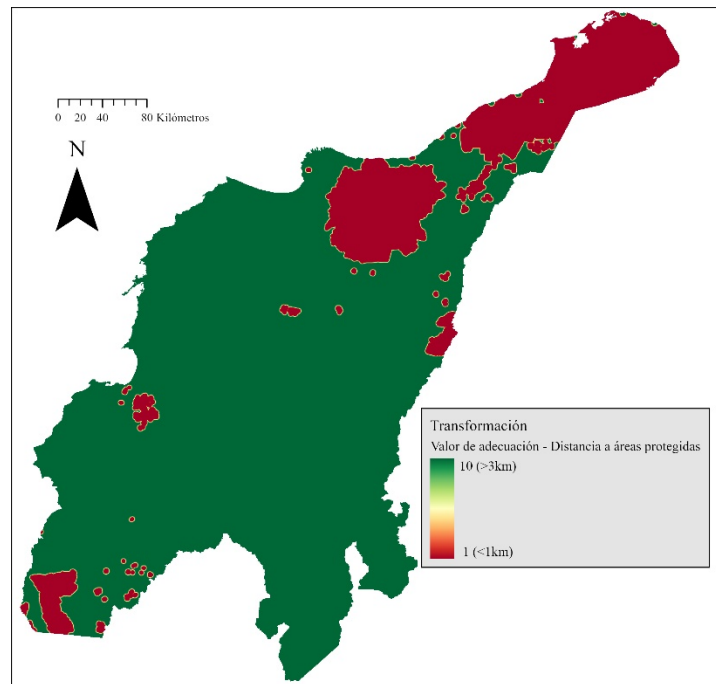
**7.3.12 Resguardos indígenas**

Debido a que se han presentado casos de suspensión en la ejecución de proyectos de energías renovables principalmente en La Guajira debido a conflictos con estas comunidades (UPME, s.f), se decidió establecer una transformación de la distancia a los resguardos a través de la función lineal, con un umbral inferior de 1 km y uno superior de 3 km, entendiendo que esta distancia es suficiente para no interferir con el desarrollo normal de estas comunidades.

El resultado de la transformación se puede observar en la **Figura 18**

Figura 18

Mapa de transformación para la variable “Proximidad a los resguardos indígenas”

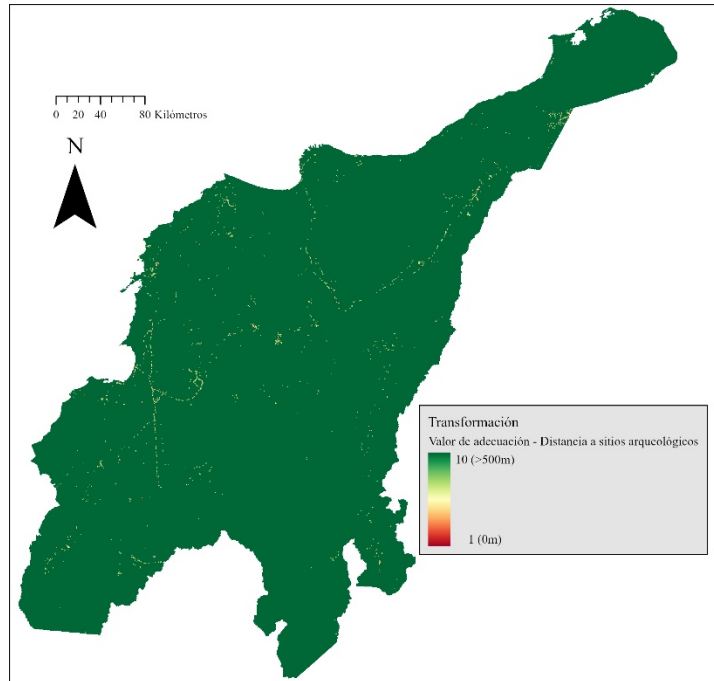
**7.3.13 Sitios arqueológicos y áreas protegidas arqueológicamente**

Para esta variable se realizó una transformación “Grande” para priorizar las celdas alejadas de estos lugares, estableciendo un umbral superior de 500 metros de los sitios reportados.

El resultado de la transformación se puede observar en la **Figura 19**

Figura 19

Mapa de transformación para la variable “Proximidad a sitios arqueológicos”



Objetivo específico 3: Identificar las zonas en la Región Caribe Colombiana con mayor potencial para localizar parques solares fotovoltaicos

Con todas las variables evaluadas y transformadas a una escala del 1 al 10, es necesario integrarlas en un único ráster, asignando la importancia de cada una a través de un ponderador/multiplicador, luego, para la localización de las áreas, se eliminan las zonas con restricciones y se mantienen únicamente aquellas zonas con los valores más altos de adecuación luego de estos procesos.

7.4. Combinar

En esta actividad se establecieron los “Pesos ponderados” de cada una de las variables, de modo que, según su relevancia o impacto para nuestro objeto de estudio, tendrá también un impacto igual sobre los resultados del ráster de idoneidad.

En esta etapa, como se mencionará más adelante en las recomendaciones, se requiere que el equipo, como analistas, discutan concienzudamente sobre la importancia de los criterios, es

decir, según las consecuencias probables para el desarrollo del proyecto, idealmente se debería contar con el apoyo de expertos en el área, en este caso, del sector de las energías renovables.

Tabla 11

Ponderadores establecidos para cada variable/atributo de estudio

Categoría	Variable/Atributo	Ponderador (multiplicador)	
Técnicas	Radiación solar	5	
	Brillo Solar	5	
	Pendiente/Topografía	2	
Económicas	Proximidad a red eléctrica	Subestaciones	4
		Líneas de Transmisión	4
	Proximidad a vías principales	4	
Ambientales	Áreas protegidas	RUNAP	3
		Humedales RAMSAR	2
	Cobertura de suelo	2	
	Vocación/Usos del Suelo	2	
	Zonas de inundación	2	
	Proximidad a cuerpos de agua	2	
Sociales	Proximidad a asentamientos	3	
	Sitios Arqueológicos	2	
	Resguardos indígenas	3	

Una vez decidido esto, se unifican las capas procesadas en un único ráster de idoneidad, esencialmente en un proceso de cálculo de rásteres, donde el valor de cada celda es igual a la sumatoria de la valoración de cada variable para dicha celda, multiplicada por el ponderador específico para esa variable, de manera que, en el caso ideal de que exista un área del ráster que cumpla completamente con los criterios ingresados, esta debería obtener un valor de adecuación de 450. Los resultados de esta actividad se pueden observar en la **Figura 20**.

7.5. Localizar

Para encontrar las áreas más adecuadas para desarrollar proyectos solares fotovoltaicos, una vez obtenido el ráster de adecuación, se debe establecer, en primer lugar, las áreas viables (ver **Figura 22**) considerando las áreas restringidas según lo establecido en el proceso de definición (ver **Figura 21**), luego, se debe incluir un criterio de calidad sobre las áreas encontradas, en este caso, se eligieron aquellas celdas que cumplieran con un puntaje mínimo de 365, esto después de realizar las estadísticas de la capa con ayuda del software ArcGIS Pro y seleccionar los grupos más altos de dos criterios, por un lado, la clase más alta al dividir los resultados de la capa en grupos del tamaño de dos desviaciones estándar; y por otro, la clase más alta al dividir las celdas en 10 cuantiles, en el primer caso el valor mínimo de la clase fue de 360 y en el segundo caso 370, por lo que estos valores se consideraron de referencia para lo que sería una adecuación idónea.

Con este resultado (ver **Figura 23**), se realiza el conteo de celdas utilizando la herramienta “resumir ráster de categorías” y para los polígonos de los departamentos de estudio, obteniendo las áreas idóneas por departamento multiplicando el número de celdas por su tamaño individual (ver **Tabla 12**) y se realiza la conversión a polígonos del ráster para su uso en la sección **8.6. Analizar**.

Objetivo específico 4: Analizar las diferentes alternativas encontradas con relación a la literatura existente y los proyectos solares fotovoltaicos instalados en la región.

Finalmente, para dar cumplimiento al último objetivo específico es necesario realizar un proceso de validación de las áreas encontradas, por un lado, en la sección **8.6.3 Análisis de áreas adecuadas** se aborda cómo se comportan las áreas identificadas como "idóneas" frente a las diferentes variables individuales contempladas para la evaluación de idoneidad, y por el otro, en la **discusión** se explora si las áreas encontradas coinciden con los proyectos licenciados desarrollados en la Región Caribe, en especial aquellos de generación eléctrica solar fotovoltaica.

7.6. Analizar

Esta es una actividad que no suele discutirse a profundidad en otros trabajos, sin embargo, considerando los criterios contemplados en este trabajo, se presentan las condiciones para que las áreas puedan tener criterios contradictorios (un área puede ser adecuada ambientalmente pero no arqueológicamente o técnicamente), de este modo, se considera útil que una vez localizadas las áreas, se analice desde cada perspectiva las condiciones de esta y discutir el nivel de satisfacción del modelo respecto a las metas establecidas inicialmente.

Al tratarse de un área tan grande como la Región Caribe, y contar con una cantidad de variables significativa, se tomó un área aleatoria del ráster final como referencia para comprobar su comportamiento frente a los diferentes criterios seleccionados (técnico, económico, ambiental y social). Los resultados del análisis se presentan en la sección **8.6.3 Análisis de áreas adecuadas**.

8. Resultados

8.4. Combinar

Los mapas resultantes del proceso de combinación se observan en las figuras 20 y 21, donde se muestra el mapa de adecuación completo para toda la región, las zonas restringidas y finalmente las áreas idóneas para el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos.

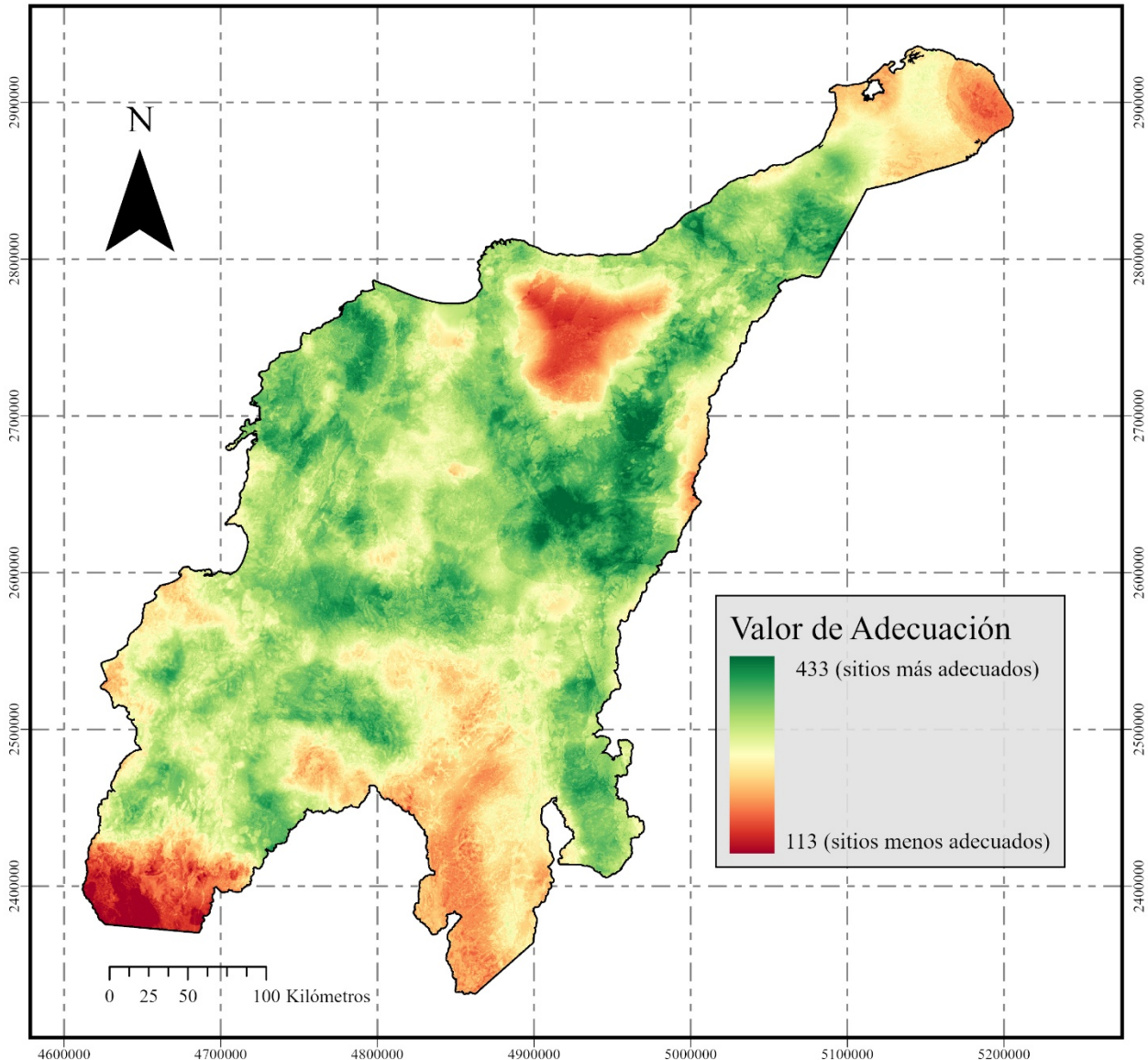
En la **Figura 20** se presenta el mapa inicial de adecuación, donde se integraron las valoraciones y ponderaciones de cada uno de los atributos incluidos en el modelo de adecuación, donde se observa que los valores de adecuación más bajos se encuentran hacia el sur de los departamentos de Córdoba y Bolívar, así como en las zonas ubicadas al noreste de los departamentos de Magdalena y La Guajira. Por el contrario, se puede apreciar los valores más altos de adecuación en gran parte de la superficie de los departamentos de César, Atlántico y Sucre, por lo que se esperaría que alguno de estos departamentos presente mayor cantidad de áreas idóneas para la construcción de proyectos de generación eléctrica fotovoltaica.

Por otro lado, el resultado de unificar las restricciones presentadas en la **Tabla 5** Lista de restricciones consideradas para el desarrollo de este trabajo se presenta en la **Figura 21**, donde se puede apreciar que las mayores extensiones de áreas restringidas se ubican en la parte norte de la región, principalmente en los departamentos del Magdalena y Atlántico, así como parte de los departamentos de La Guajira y Cesar, posiblemente debido a la presencia del territorio ancestral en la Sierra Nevada de Santa Marta, así como de varios ecosistemas protegidos en estos departamentos, esto será ampliado más adelante en **8.6.2 Áreas Restringidas**.

Los detalles sobre las áreas más adecuadas, departamentos con mayor adecuación según los criterios considerados en este trabajo, entre otros temas serán desarrollados en la sección **8.6. Analizar**.

Figura 20

Mapa de Adecuación para la construcción de parques solares fotovoltaicos en la Región Caribe



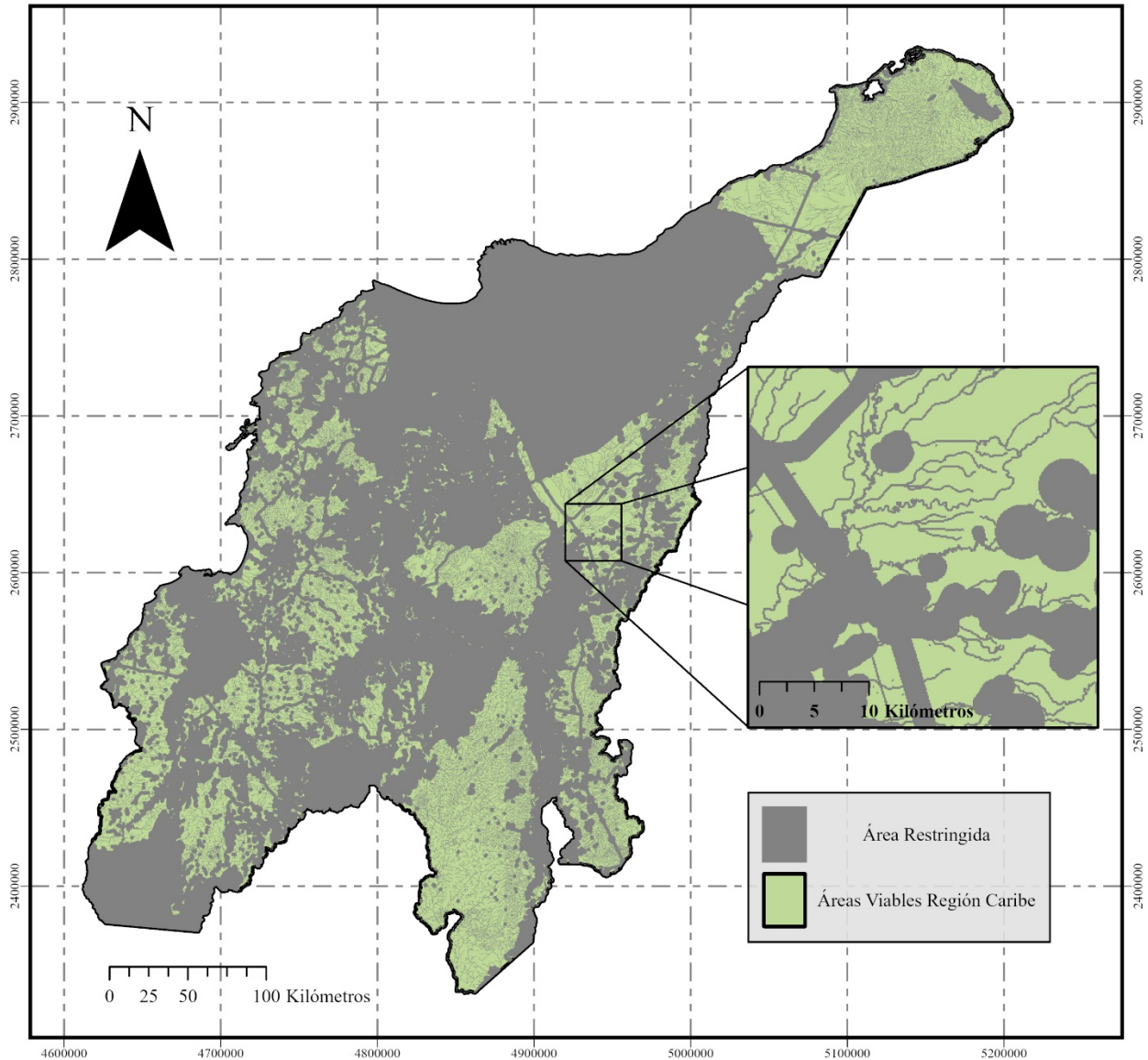
Mapa de Adecuación para la instalación de parques solares fotovoltaicos en la Región Caribe

Mapa Elaborado por Andrés Camilo Pardo Gutiérrez
Ingeniero Ambiental y Sanitario

Referencia espacial
Nombre: MAGNA-SIRGAS 2018 Origen-Nacional
Datum: Marco Geocentrico Nacional de Referencia 2018
Proyección: Transverse Mercator
Meridiano central: -73.0000
Latitud de origen: 4.0000
Falso este: 5,000,000.0000
Falso norte: 2,000,000.0000
Factor de escala: 0.9992
Unidades de mapa: Meter
Autoridad: EPSG
WKID: 9377
Escala de visualización: 1:3,400,000



Figura 21
 Mapa de restricciones para la construcción de parques solares en la Región Caribe



Mapa de Restricciones para la instalación de parques solares fotovoltaicos en la Región Caribe

Mapa Elaborado por Andrés Camilo Pardo Gutiérrez
 Ingeniero Ambiental y Sanitario

Referencia espacial
 Nombre: MAGNA-SIRGAS 2018 Origen-Nacional
 Datum: Marco Geocentrico Nacional de Referencia 2018
 Proyección: Transverse Mercator
 Meridiano central: -73.0000
 Latitud de origen: 4.0000
 Falso este: 5,000,000.0000
 Falso norte: 2,000,000.0000
 Factor de escala: 0.9992
 Unidades de mapa: Meter
 Autoridad: EPSG
 WKID: 9377
 Escala de visualización: 1:3,400,000




8.5. Localizar

Los mapas resultantes del proceso de localización se observan en las figuras 22 y 23, donde se muestran los mapas de áreas viables para la construcción de parques solares (zonas sin restricción), y las áreas idóneas para el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos, es decir, aquellas con valores de adecuación que las clasifican como “adecuadas” o “muy adecuadas”.

Como resultado del conteo de celdas idóneas por cada departamento, se encontraron 5558.9775 km² de áreas adecuadas para la construcción de parques solares, donde el departamento que cuenta con mayor cantidad de área idónea para el desarrollo de estos proyectos es el Cesar, concentrando cerca del 50% de todas las áreas idóneas encontradas en la Región Caribe, que representa cerca de 2680 km² de áreas idóneas, seguido de los departamentos de La Guajira (12.75%) y Sucre (11.62%).

Por otro lado, los departamentos que presentaron menor cantidad de superficie adecuada fueron Córdoba (2.85%), con un área de aproximada de 158 km² de superficie adecuada, seguido de los departamentos del Atlántico (5.96%) y Magdalena (8.92%).

Los resultados para cada departamento se presentan en la **Tabla 12** y se pueden observar en la **Figura 23**.

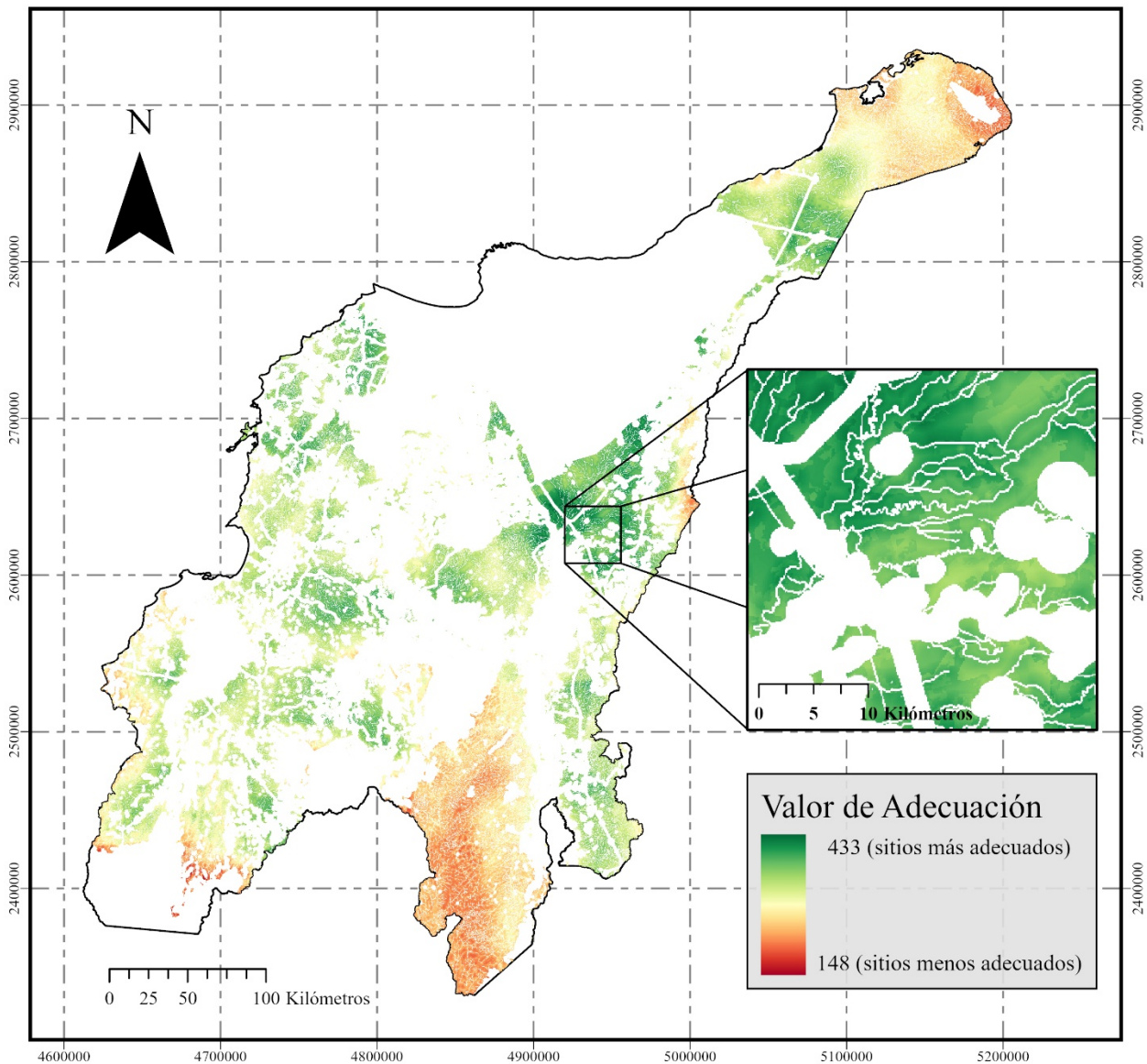
Tabla 12

Áreas Idóneas encontradas por departamento en la Región Caribe colombiana

Departamento	Celdas idóneas	Área (km ²)	Área Idónea (%)
Atlántico	29528	331.5622	5.96
Bolívar	47914	538.0137	9.68
Cesar	238710	2680.412	48.22
Córdoba	14131	158.6733	2.85
La Guajira	63127	708.8365	12.75
Magdalena	44148	495.7263	8.92
Sucre	57509	645.7535	11.62
Total	495067	5558.9775	100

Figura 22

Mapa de adecuación excluyendo áreas restringidas



Mapa de Adecuación sin áreas restringidas para la construcción de parques solares fotovoltaicos en la Región Caribe

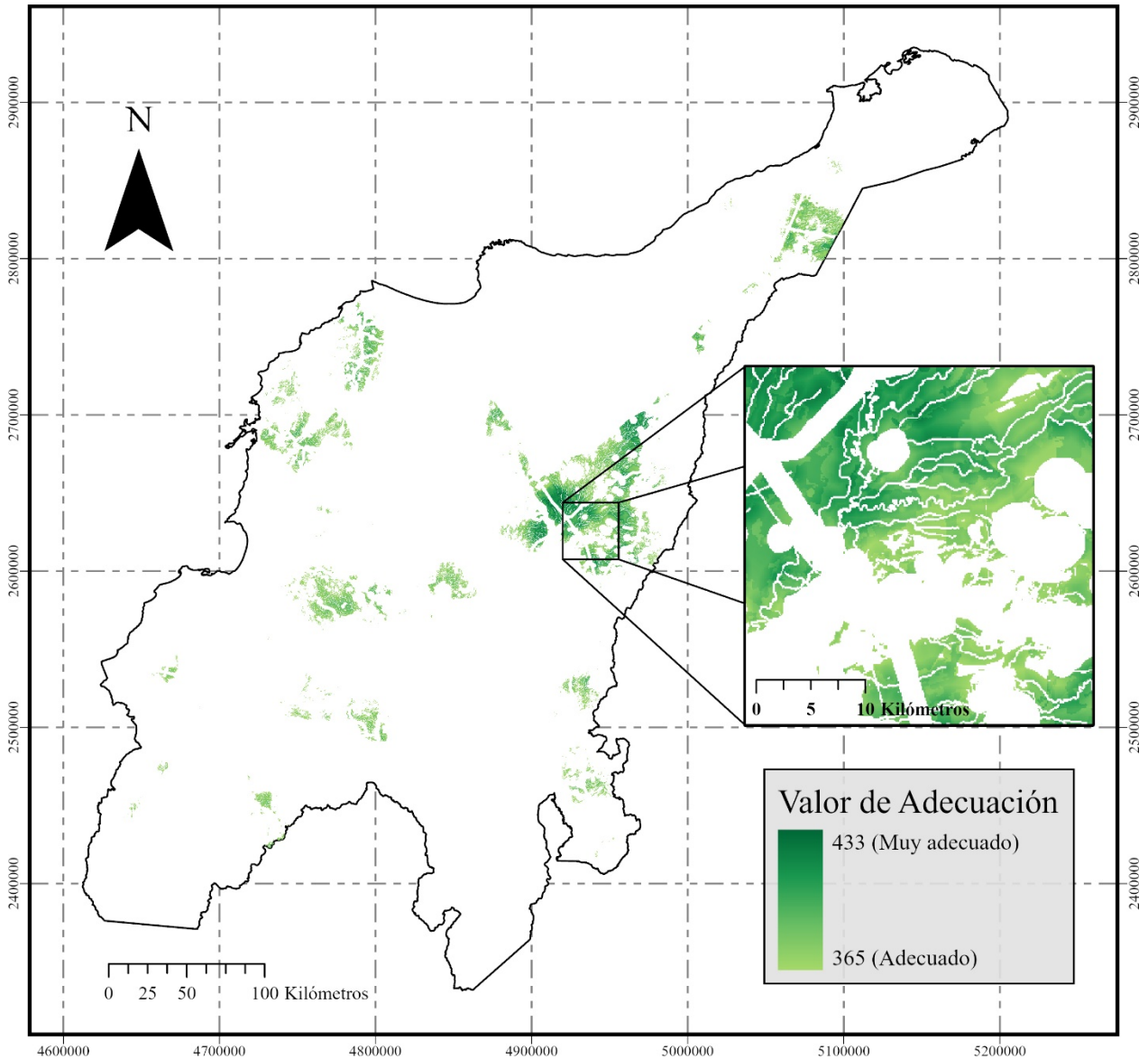
Mapa Elaborado por Andrés Camilo Pardo Gutiérrez
Ingeniero Ambiental y Sanitario

Referencia espacial
Nombre: MAGNA-SIRGAS 2018 Origen-Nacional
Datum: Marco Geocentrico Nacional de Referencia 2018
Proyección: Transverse Mercator
Meridiano central: -73.0000
Latitud de origen: 4.0000
Falso este: 5,000,000.0000
Falso norte: 2,000,000.0000
Factor de escala: 0.9992
Unidades de mapa: Meter
Autoridad: EPSG
WKID: 9377
Escala de visualización: 1:3,400,000



Figura 23


Mapa de Áreas Idóneas para la construcción de parques solares fotovoltaicos en la Región Caribe



Mapa de Áreas Idóneas para la construcción de parques solares fotovoltaicos en la Región Caribe

Mapa Elaborado por Andrés Camilo Pardo Gutiérrez
Ingeniero Ambiental y Sanitario

Referencia espacial
 Nombre: MAGNA-SIRGAS 2018 Origen-Nacional
 Datum: Marco Geocentrico Nacional de Referencia 2018
 Proyección: Transverse Mercator
 Meridiano central: -73.0000
 Latitud de origen: 4.0000
 Falso este: 5,000,000.0000
 Falso norte: 2,000,000.0000
 Factor de escala: 0.9992
 Unidades de mapa: Meter
 Autoridad: EPSG
 WKID: 9377
 Escala de visualización: 1:3,400,000




8.6. Analizar

8.6.1 Estimaciones de producción

Luego del proceso de vectorización del ráster de áreas idóneas, se identificaron 309 polígonos con áreas entre 300 y 16700 hectáreas, considerando un requerimiento de uso del suelo de 0.018 km²/MW propuesto por Rios & Duarte (2021), estas áreas podrían generar alrededor de entre 167 MW y 9.3 GW por polígono si se destinaran únicamente a la generación de energía solar fotovoltaica. Sin embargo, para realizar estimaciones más ajustadas a la realidad de la región, se consultaron los datos de algunos proyectos solares fotovoltaicos instalados en la zona (Ver **Tabla 13**), con el objetivo de obtener un aproximado entre capacidad instalada y área intervenida, para poder escalar las estimaciones según las áreas adecuadas encontradas para cada departamento.

Tabla 13

Capacidad Instalada por unidad de área en algunos proyectos de la Región Caribe. Elaborado a partir de datos publicados por la ANLA, Minenergía, Enel Green Power y El Tiempo

Proyecto	Capacidad instalada (MW)	Área (hectáreas)	Celdas Solares	MW/Hectárea
Parque Solar El Espino	200	538	521397	0.371747212
Parque Fotovoltaico La Orquídea	200	414	345000	0.483091787
Parque Solar Fotovoltaico La Unión	100	230	221000	0.434782609
Parque Solar Fundación	132	237	244800	0.556962025
Parque solar La Loma	150	387	400000	0.387596899
Total	782	1806	Promedio =	0.446836107

Tomando estos proyectos como referencia, y entendiendo que el área requerida no es el único factor relevante para determinar la capacidad instalada de un parque, teniendo variables como la cantidad de celdas solares a instalar y su tecnología, se tomará este valor de referencia aproximado de 0.447 MW/Hectárea y un error de alrededor del 3%, con este estimador, los polígonos calculados anteriormente (entre 300 y 16700 hectáreas de área), tendrían producciones de energía de entre 130 - 138 MW y 7.2 – 7.7 GW, un comportamiento más ajustado a lo observado en los proyectos desarrollados en la zona y no muy alejado de lo descrito en la literatura.

Con base a esta información, junto con las áreas adecuadas totales encontradas para cada departamento de la región, se elaboró la siguiente tabla de capacidad estimada por departamento:

Tabla 14

Capacidad de generación estimada por departamento según áreas encontradas

Departamento	Área Idónea (km ²)	Capacidad Estimada (MW)	
		Min	Max
Atlántico	331.56	14356.58	15274.01
Bolívar	538.01	23295.89	24784.57
Cesar	2680.41	116062.05	123478.74
Córdoba	158.67	6870.43	7309.47
La Guajira	708.84	30692.85	32654.21
Magdalena	495.73	21465.16	22836.85
Sucre	645.75	27961.05	29747.84
	Total Capacidad =	240704.02	256085.69

Como se observa en la **Tabla 12**, se encontró para la Región Caribe un aproximado de 5558.98 km² que cumplen con lo establecido como áreas idóneas (aquellas que superaron una valoración de 365 puntos), realizando la estimación de capacidad instalada potencial, se calculó que la Región Caribe podría generar entre 240 y 256 GW de energía solar fotovoltaica si estas áreas se destinaran a proyectos con características similares a los que se han venido desarrollando en la zona. Se destaca al departamento del Cesar como una región con gran potencial para el desarrollo de estos proyectos, con una capacidad estimada de entre 116 y 123 GW, lo que corresponde con el hecho de que es una de las regiones donde se han desarrollado un mayor número de proyectos de esta naturaleza.

8.6.2 Áreas Restringidas

Una vez obtenido el ráster de restricciones (ver **Figura 21**), se calcularon las áreas restringidas por departamento:

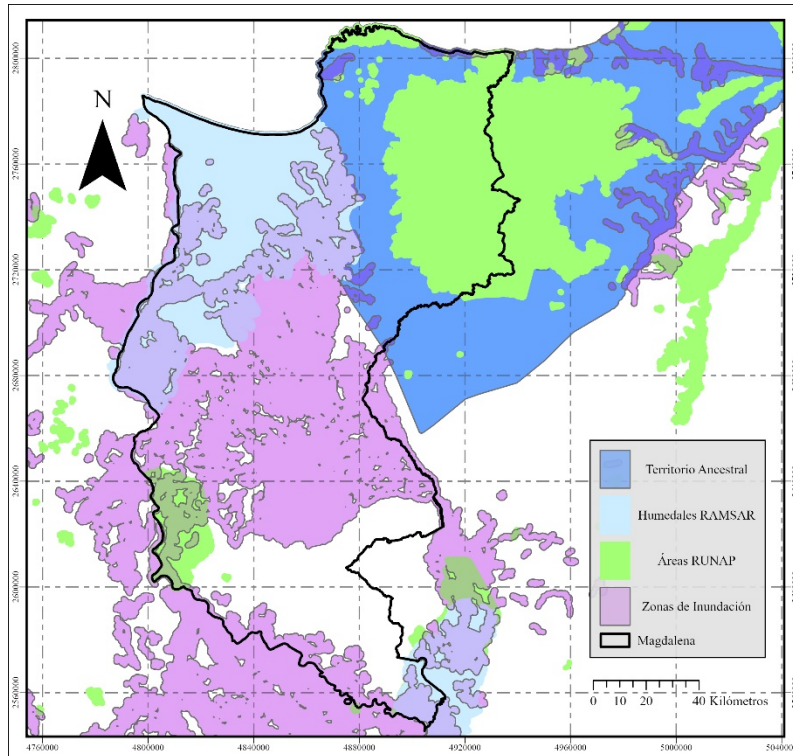
Tabla 15
Áreas Restringidas por departamento

Departamento	Área Restringida (km ²)	Área departamento (km ²)	Área del departamento Restringida (%)
Atlántico	2656.21	3313.38	80.17
Bolívar	16798.49	26662.78	63.00
Cesar	15751.87	22499.99	70.01
Córdoba	19039.30	25083.75	75.90
La Guajira	12619.32	20572.75	61.34
Magdalena	20771.17	23109.48	89.88
Sucre	6968.00	10584.84	65.83
Total Restringido =	94604.36	131826.98	71.76

Como se puede observar, la mayoría de los departamentos mantienen una relación similar entre su superficie y el porcentaje de esta que es no apta para el desarrollo de estos proyectos, sin embargo, se destaca el Magdalena como un departamento poco favorecido para esto, con casi un 90% de su superficie restringida, esto se puede explicar por algunos factores como la presencia de muchas zonas de inundación alrededor de las áreas húmedas del Magdalena medio, la presencia de grandes zonas de protección ambiental como lo es el Sistema Delta Estuarino del Río Magdalena, Ciénaga Grande de Santa Marta (Humedal RAMSAR), el Parque Nacional Natural Sierra Nevada de Santa Marta, el Parque Nacional Natural Tayrona, o el Complejo Cenagoso de Zarate Malibú y Velade; así como la presencia de territorio ancestral de los pueblos indígenas Arhuaco, Kogui, Wiwa y Kankuamo de la Sierra Nevada de Santa Marta.

Figura 24

Mapa de restricciones significativas en el departamento de Magdalena

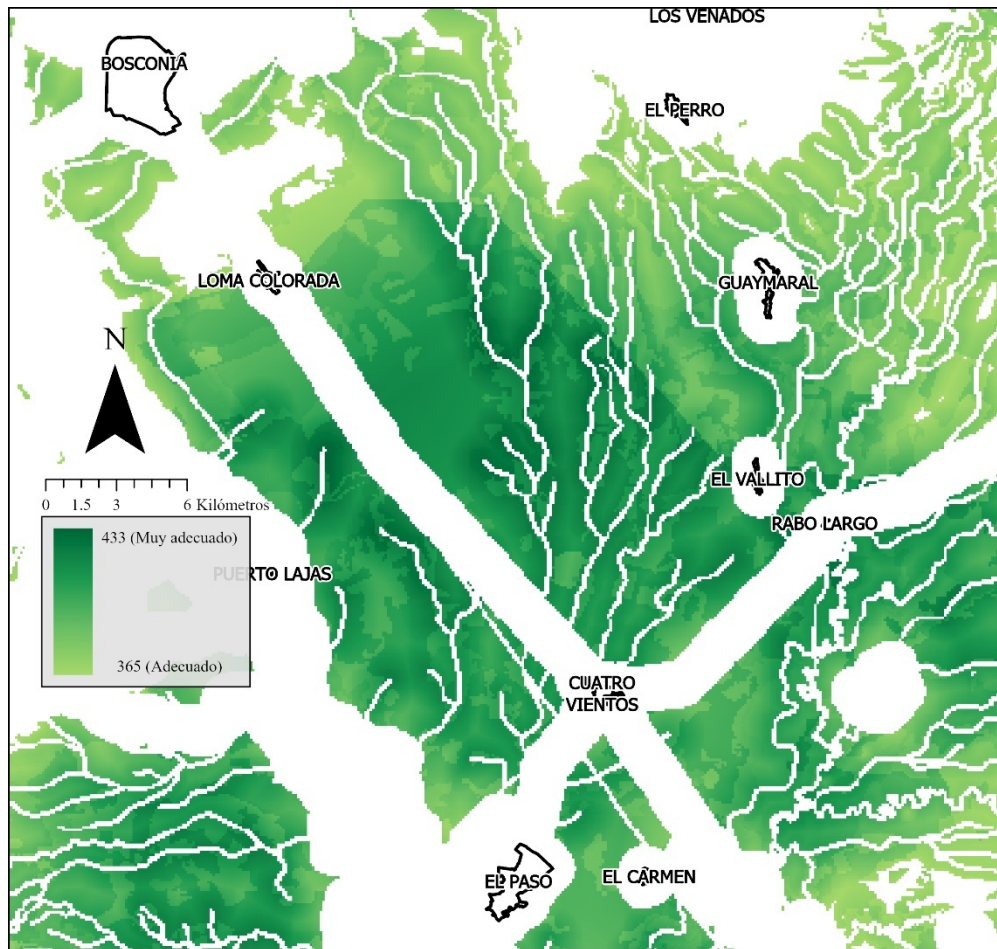


8.6.3 Análisis de áreas adecuadas

Una vez fueron identificadas las áreas que cumplen satisfactoriamente los criterios, se realizó una primera validación de una zona aleatoria del ráster para comprobar su comportamiento frente los criterios seleccionados.

La zona seleccionada para el análisis se presenta en la figura 25, una región ubicada entre los municipios de El Paso y Bosconia, un área cercana al municipio de La Loma, sobre esta zona actualmente se desarrollan algunos proyectos de energía solar fotovoltaica y resultan zonas de interés para la verificación de criterios.

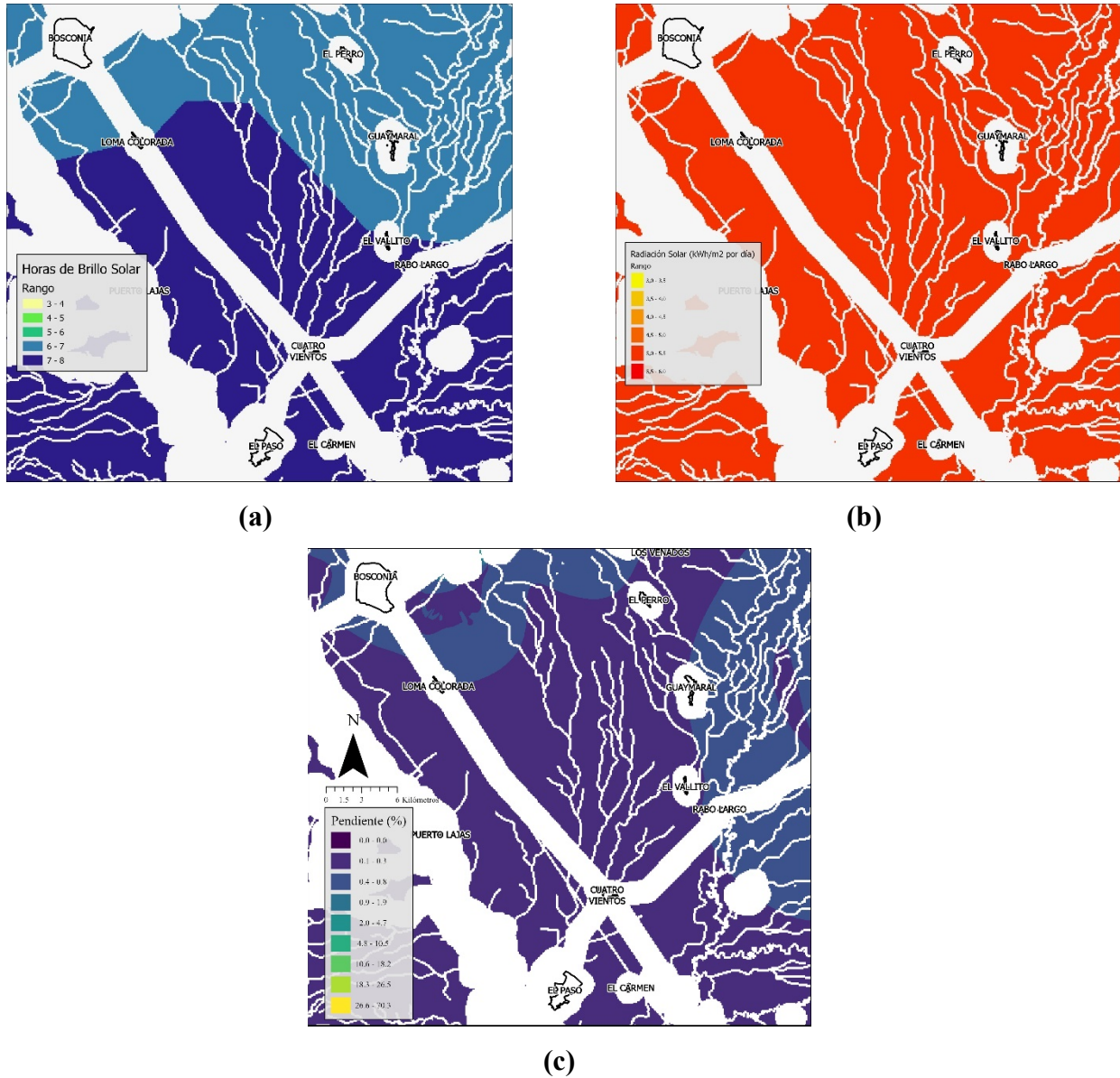
Figura 25
Zona de interés para análisis



8.6.3.1 Criterio Técnico

Con respecto a las variables técnicas, se observa que el área adecuada seleccionada presenta una cantidad de brillo solar muy alta, con regiones únicamente con valores de 6 – 7 horas de sol o de 7 – 8 horas de sol diarias (ver figura 26.a); asimismo, la cantidad de radiación solar recibida en toda la zona es bastante alta, con valores entre 5 – 5.5 kWh/m² por día (ver figura 26.b); finalmente, las pendientes del terreno son en su mayoría muy suaves, ninguna superando el 2% (ver figura 26.c).

Figura 26
Criterio técnico en zonas de interés

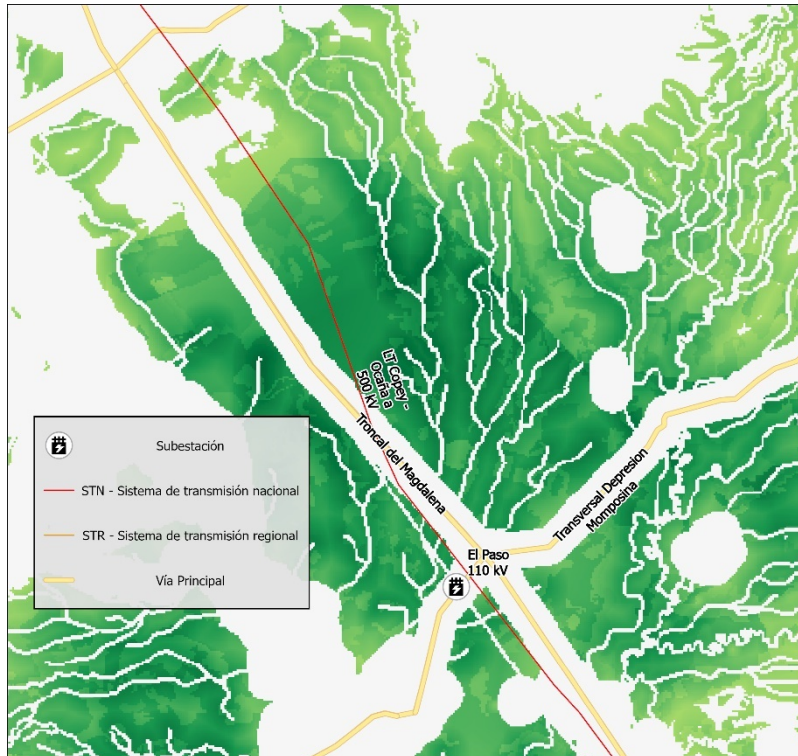


8.6.3.2 Criterio Económico

Con respecto a las variables económicas, la zona encontrada está ubicada muy cerca tanto de vías principales, en este caso, la Troncal del Magdalena y la Transversal Depresión Momposina; como de la subestación eléctrica El Paso 110kV; y de la línea de transmisión nacional LT Copey - Ocaña a 500 kV, como se aprecia en la figura 27.

Figura 27

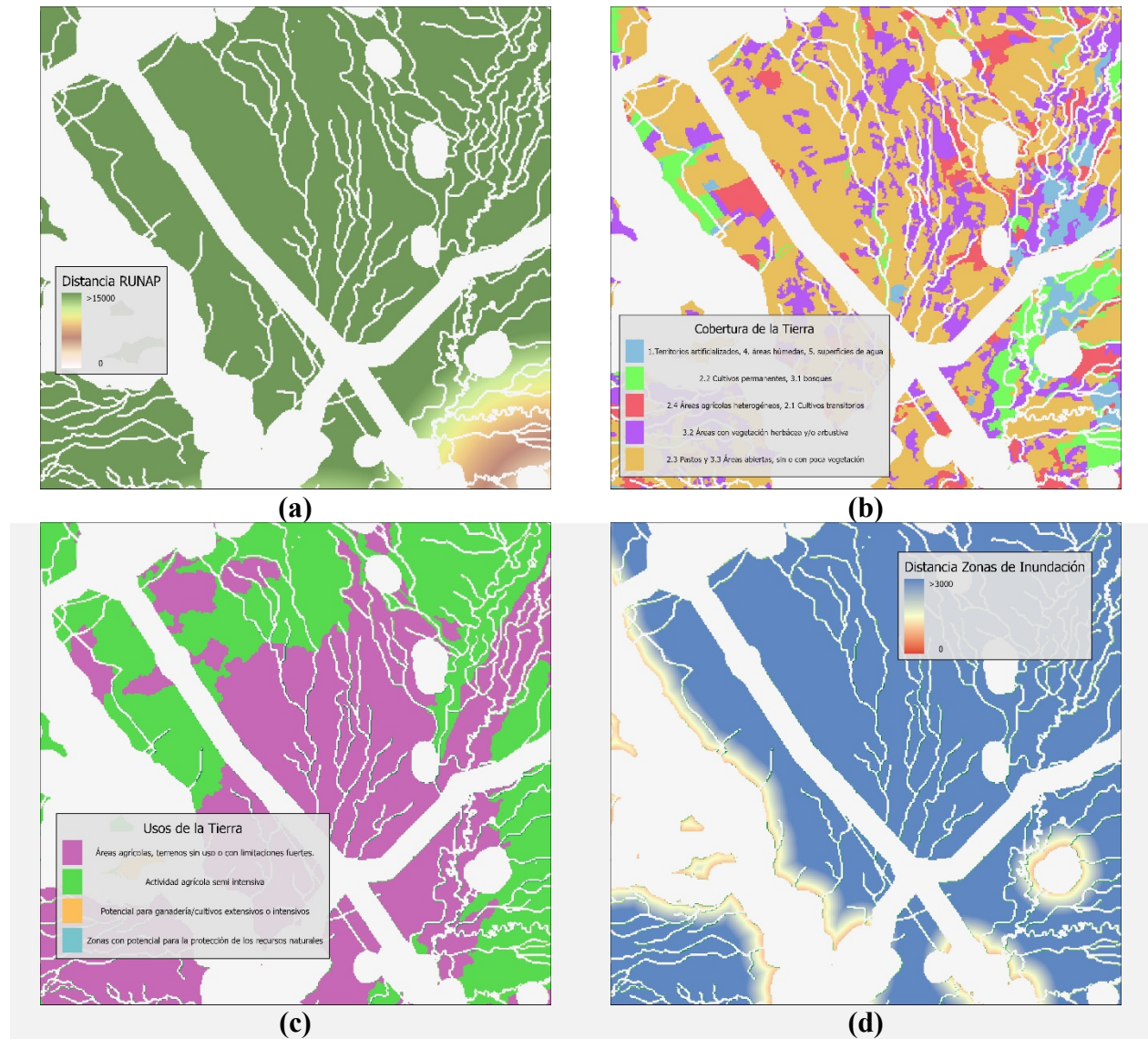
Criterio económico en zona de interés

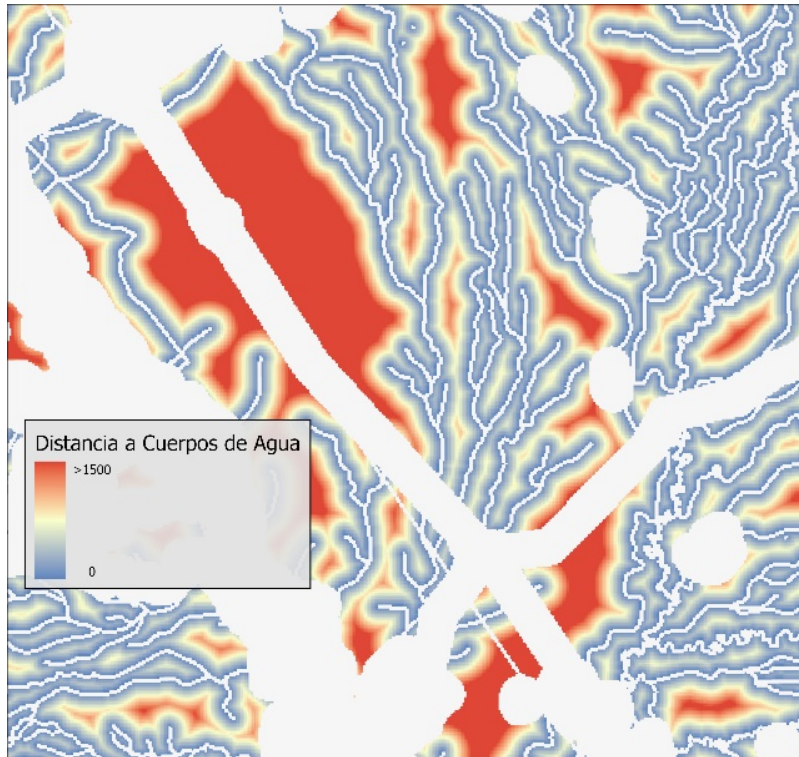


8.6.3.3 Criterio Ambiental

Con respecto a las variables ambientales, se encontró que, por un lado, la zona elegida se encuentra debidamente alejada de áreas protegidas, el Humedal RAMSAR más cercano, el Complejo Cenagoso de Zapatosa, se encuentra a unos 15 km de esta zona, por lo que algunas celdas se ven afectadas por esta cercanía (ver figura 28.a), sin embargo, la mayoría de área no cuenta con esta condición. Con respecto a las coberturas y usos de la tierra, la mayoría del terreno está clasificado como pastos y áreas abiertas, sin o con poca vegetación, y en su gran mayoría los usos del suelo recomendado son actividades agrícolas, o agrícolas semi intensivas. Finalmente, con respecto al apartado hidrológico, algunas de las áreas adecuadas encontradas se encuentran a menos de 3 km de zonas que se consideran con peligro de inundación, y algunas otras tienen un acceso al recurso hídrico a más de 1.5 km, lo que puede suponer alguna dificultad para la captación y acceso al agua, sin embargo, la mayoría del área no cuenta con estas características.

Figura 28
Criterio ambiental en zona de interés



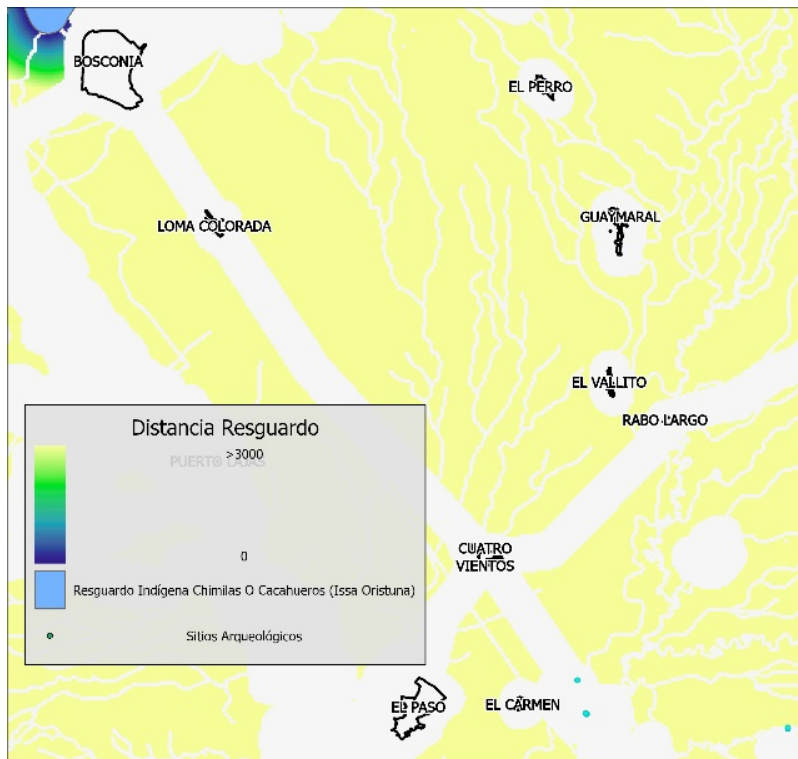


(e)

8.6.3.4 Criterio Sociocultural y arqueológico

Con respecto a las variables sociales, el área cuenta con el acceso a varios municipios cercanos como Bosconia, El Paso, La Loma, entre otros, sin entrar en contacto con sus zonas de influencia o donde pudieran expandirse. Cerca de la zona observada se encuentra el Resguardo Indígena Chimilas O Cacahueros (Issa Oristuna), como se puede ver en la figura 29, sin embargo, la mayoría del área observada se encuentra a más de 3 km de este, por lo que los riesgos de conflicto son bajos, además, se encuentra en la zona sies sitios arqueológicos reportados asociados a la construcción de las líneas de transmisión, y no suponen ningún inconveniente para la idoneidad del área.

Figura 29
Criterio social en zona de interés



9. Discusión

Para continuar con el proceso de validación, se planteó comparar las áreas obtenidas contra la ubicación de otros proyectos que cuentan con licencia ambiental otorgada por la ANLA - información actualizada en diciembre de 2024-.

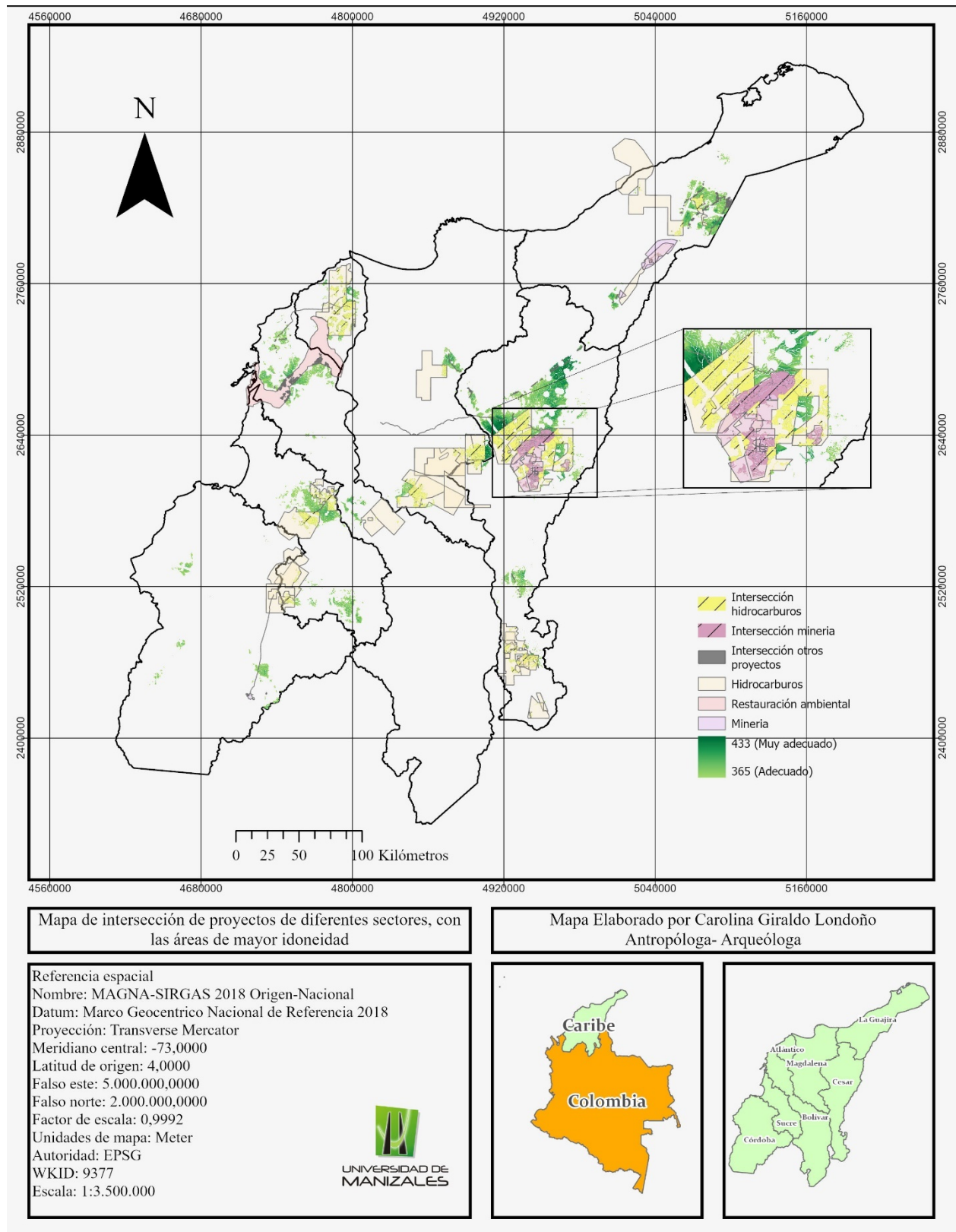
9.1. Validación del modelo con proyectos con licencia ambiental

Inicialmente se identificaron que 141 proyectos se superponen con alguna zona de la superficie idónea (ver **Figura 30**), representando un área total de 300581 ha intersecada entre las áreas encontradas y proyectos licenciados. Este hallazgo es significativo, ya que sugiere que proyectos de diversa naturaleza han identificado estas áreas como adecuadas para su desarrollo, no obstante, hay una predominancia de proyectos que pertenecen al sector de los hidrocarburos, con 62 proyectos intersecados; y de explotación minera con 35 proyectos, los cuales en conjunto ocupan 286599 ha, esto significa que un 95% del área de intersección está siendo utilizada para proyectos de extracción minera o de hidrocarburos.

El solapamiento observado podría deberse a que los criterios ambientales, sociales y arqueológicos aplicados en el modelo, reflejan restricciones legales que afectan a todos los sectores, no únicamente al energético. Así pues, es posible que diferentes sectores productivos seleccionen las mismas zonas porque cumplen con estas condiciones, aunque por razones técnicas distintas.

Este hallazgo plantea conflictos relacionados con el uso suelo por la superposición espacial con otros proyectos que ya cuentan con licenciamiento ambiental. Ya que si bien, en el modelo desarrollado en el presente trabajo las variables técnicas fueron las que mayor relevancia tuvieron (radiación solar, brillo solar, topografía/pendiente), como se puede observar en la **figura 30**, son las zonas que se han priorizado para labores extractivas; y desconociendo qué condiciones técnicas requiere este tipo de proyectos, es claro que, desde una perspectiva integral, terminan coincidiendo con las áreas consideradas con mayor idoneidad a nivel fotovoltaico, lo que termina reduciendo la disponibilidad de terrenos para proyectos solares.

Figura 30
Intersección de proyectos de diferentes sectores con áreas de mayor idoneidad



9.2. Validación del modelo con proyectos fotovoltaicos

Con relación al sector energético, se localizaron 37 proyectos con los cuales las áreas encontradas se intersecan espacialmente, varios de ellos asociados a líneas de transmisión, por lo que se excluyeron al ser variables incluidas previamente a la hora de establecer preferencias de idoneidad. En el caso específico de los parques solares fotovoltaicos, se identificaron siete proyectos con los cuales se intersecan en mayor o menor medida con las áreas de idoneidad, a continuación, se detallan cada uno:

Tabla 16

Proyectos solares con intersección con las áreas de mayor idoneidad

Departamento	Proyecto Solar
Atlántico	Parque Solar Fotovoltaico Guayepo 400 MW, su línea de Evacuación 500 KV y Bahía de Conexión
	Parque Solar Fotovoltaico Guayepo 200 MW y su línea de Evacuación 500KV
Bolívar	Parque Fotovoltaico La Orquídea 200 MW
César	Parque Solar Fotovoltaico Cañahuate 240 MW
	Parque Fotovoltaico La Loma 150 MW y su línea de conexión a la subestación La Loma
	Parque Solar Fotovoltaico El Copey 200 MW y su línea de transmisión 220 KV
Córdoba	San Jorge Fotovoltaico (135 MW) y su Conexión a la Subestación Cerromatoso 110 Kv

Estos resultados contradicen parcialmente la hipótesis inicial, que proponía que debido a las problemáticas asociadas a la implementación de proyectos solares, posiblemente las empresas encargadas de construir los parques fotovoltaicos no consideraban factores ambientales, sociales y arqueológicos a la hora de seleccionar los sitios, sin embargo, el análisis reveló coincidencia entre las áreas identificadas como idóneas por el modelo multicriterio —basado precisamente en estos factores— y las ubicaciones de los proyectos solares que ya cuentan con licenciamiento ambiental. Esto sugiere que, aunque estas variables no siempre sean explícitamente reconocidas como determinantes en el proceso de selección, en la práctica están siendo tenidas en cuenta, posiblemente debido al cumplimiento obligatorio de normativas y restricciones impuestas por el marco legal vigente colombiano.

Como casos que resaltan de esta intersección, se encuentran los proyectos Guayepo I y II (ver **Figura 31**) desarrollados por la compañía Enel Colombia, los cuales se posicionan como los parques solares más grandes de Colombia y uno de los mayores de Sudamérica, con aproximadamente 1110 ha y cerca de 1.30 GWh/año (Paísminero, 2024). Este hallazgo plantea que la localización de los sitios podría estar relacionado con el perfil de las empresas, en este caso la compañía Enel Colombia es una multinacional que posiblemente cuenta con mayores capacidades técnicas para identificar áreas adecuadas y así disminuir los riesgos asociados a la inversión de tiempo y capital.

Por otra parte, en el Cesar se identificaron tres parques Fotovoltaicos en las zonas idóneas encontradas (ver **Figura 32**), entre ellos la Loma que fue considerado el parque solar más grande antes de entrar en operación Guayepo I y II y operado por la misma compañía (Paísminero, 2024).

Esta información permite validar parcialmente el modelo ya que evidencia una correlación entre las áreas identificadas y proyectos fotovoltaicos en ejecución, lo que es un indicativo de que las variables elegidas fueron adecuadas, sin embargo, es importante destacar que las zonas donde se intersecan no coinciden con las áreas con mayor puntuación o idoneidad en el modelo. Esto sugiere en estos proyectos pueden haber considerado otras variables para su localización o como se expuso en apartados anteriores, es posible que en las áreas más adecuadas se ubican otros proyectos licenciados, no obstante, la cercanía con los proyectos desarrollados y las áreas encontradas en este trabajo es muy relevante.

Por otro lado, se compararon las zonas con los proyectos que aún se encuentran en evaluación para la obtención de la licencia ambiental y se presentó una situación diferente. Se reportaron dos proyectos en el sector fotovoltaico: los parques solares —Aries y Toluviejo— cuyas localizaciones no coinciden con las zonas clasificadas con mayor puntuación de idoneidad en el modelo (ver **Figura 33**), esto podría indicar una menor consideración de los factores analizados. Como resultado, estos proyectos podrían enfrentar mayores trámites para su desarrollo o construcción, lo que resalta la importancia de incorporar análisis multicriterio en las etapas tempranas de planificación.

Figura 31
Intersección del Parque Solar Guayepo I y II con áreas idóneas

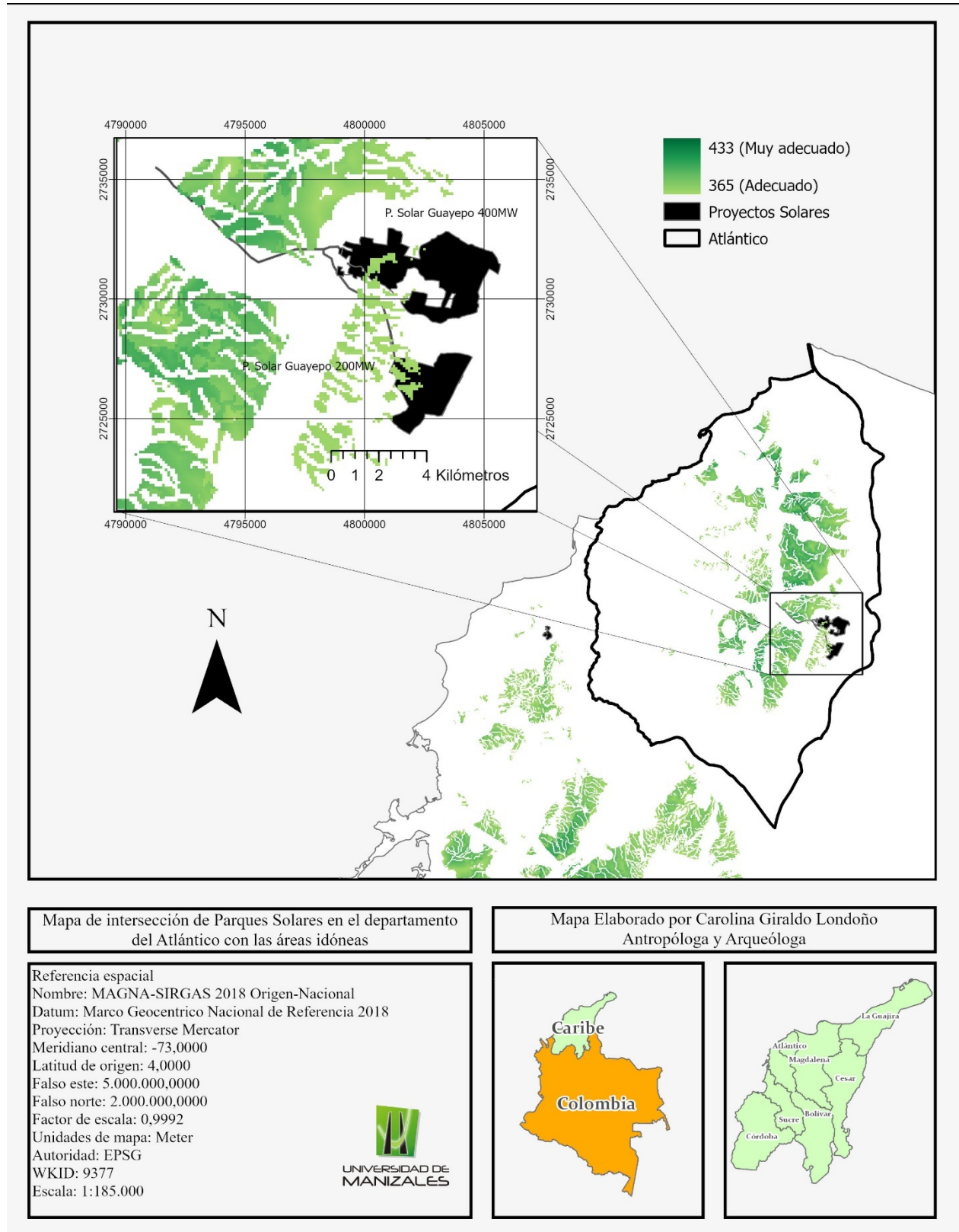


Figura 32
Intersección de Parques solares en el departamento del Cesar con áreas idóneas

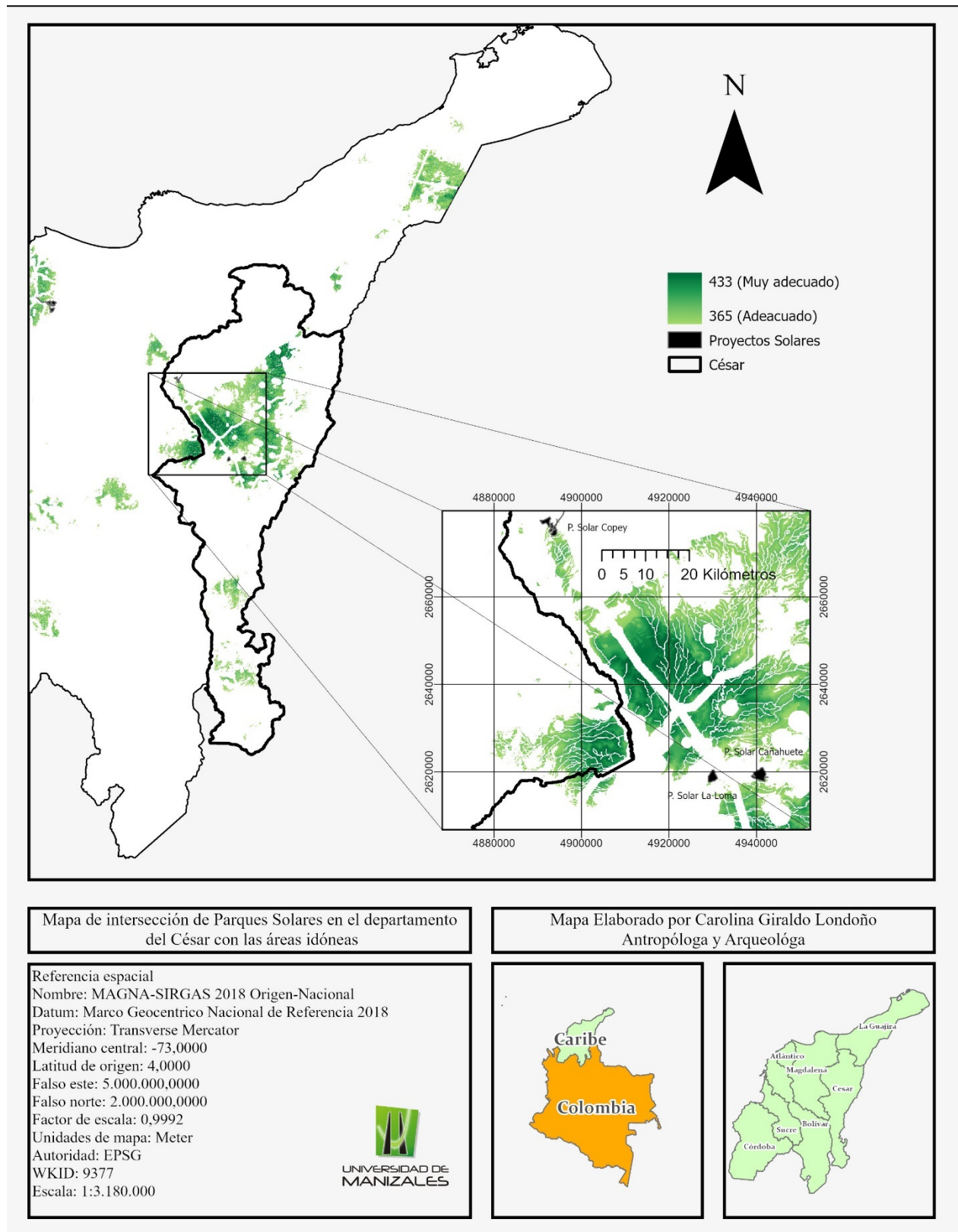
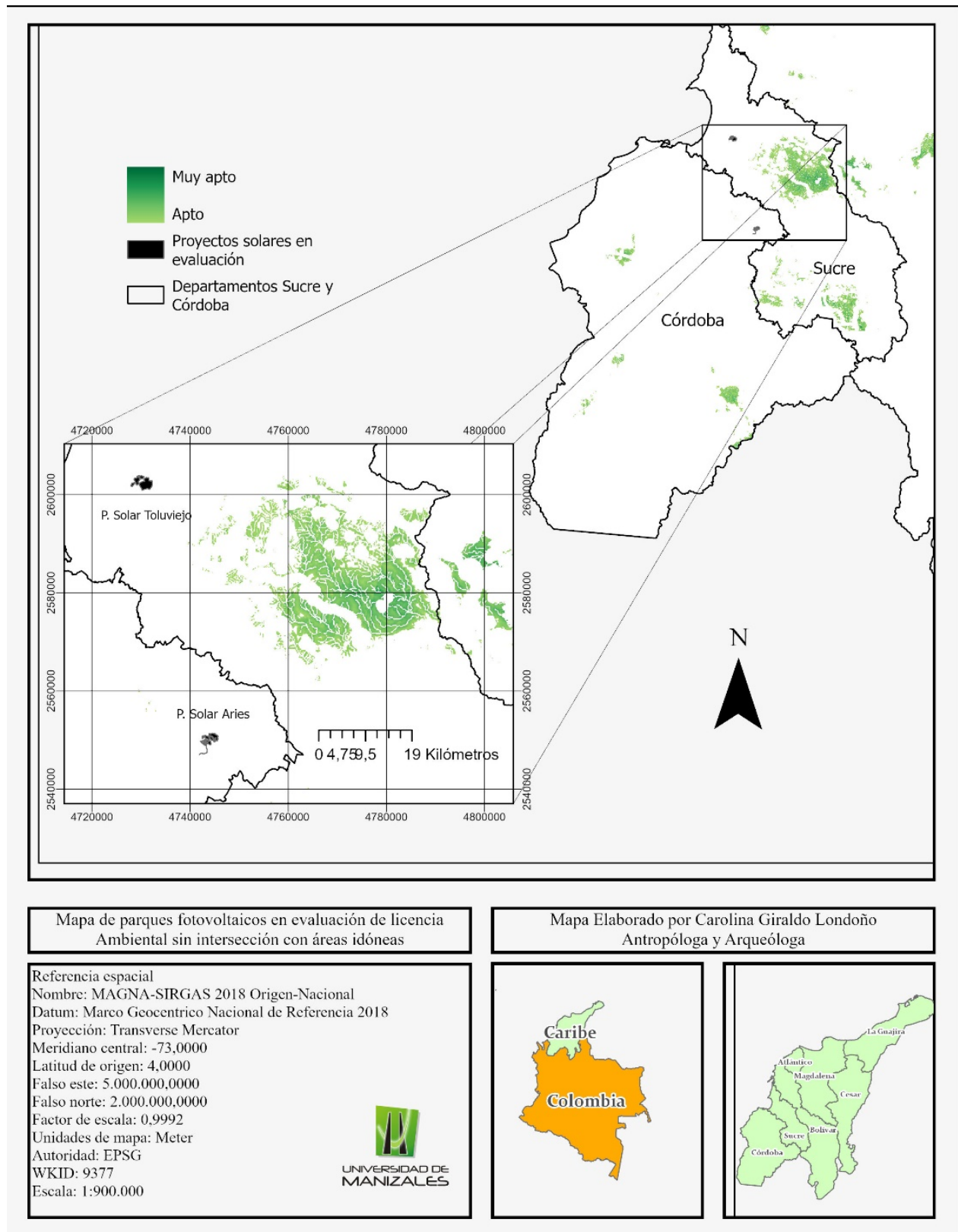


Figura 33
Intersección de Parques solares en el departamento del Cesar con áreas idóneas



9.3. Discusión comparativa con trabajos previos

Al comparar los resultados de este estudio con investigaciones que aplicaron análisis multicriterio para identificar zonas idóneas para construir parques solares en Colombia, se evidenciaron diferencias significativas tanto en la **escala de análisis** como en los **criterios metodológicos** utilizados. Los estudios consultados se enfocaron en una perspectiva nacional, destacando que la región caribe es una de las zonas del país con mayor potencial para desarrollar proyectos solares (García, 2021; International Renewable Energy Agency [IRENA], 2025; Jaimes, 2024). En contraste, el presente estudio se centró en la región caribe continental.

Esta delimitación territorial responde precisamente al potencial identificado en la región; a factores como la disponibilidad y calidad de la información espacial, así como la capacidad de procesamiento de los equipos de cómputo utilizados. Dichos aspectos influyeron directamente en la viabilidad y el nivel de detalle del análisis, permitiendo una delimitación más precisa a escala regional.

En cuanto a las **herramientas utilizadas**, también se identificaron diferencias técnicas significativas. Este estudio utilizó la herramienta “modelador de adecuación” de ArcGIS Pro para transformar y procesar las variables mediante funciones matemáticas, mientras que García (2021) empleó la herramienta Model Builder en ArcMap 10.4, implementando herramientas como reclasificación y suma ponderada para el proceso análogo a la transformación y combinación. Estas diferencias no solo reflejan una evolución tecnológica, sino también una mejora en las funcionalidades y capacidades analíticas de los softwares empleados en los SIG, además de permitir un mayor nivel de detalle al poder tratar variables como las distancias de manera continua a través de funciones en lugar de rangos de distancias. El uso de estas herramientas favorece la replicabilidad del estudio, permitiendo que otros investigadores puedan implementar metodologías similares si cuentan con los datos espaciales.

Respecto a los **criterios de selección y restricción**, se identifican varias discrepancias entre los estudios revisado. Aunque existe similitud en el concepto de **restricciones** -entendidas como condiciones legales o físicas que impiden la instalación de proyectos solares y reducen las áreas aprovechables-, las condiciones específicas aplicadas por cada autor varían. Por ejemplo, en este

estudio se estableció una pendiente del terreno máxima del 8% como umbral restrictivo, en el de García (2021) se estableció un límite del 10%, mientras que Jaimes (2024) no considero este factor como una restricción. Esta diferencia responde a una mayor exigencia técnica en el presente trabajo para garantizar la viabilidad constructiva y operativa de los proyectos, sin embargo, también evidencia como la variación en los criterios influye directamente en áreas consideradas como idóneas.

En términos de variables **incluidas en el modelo**, García (2021) incorporó el potencial eléctrico fotovoltaico, el área mínima requerida para la instalación, zonas de cultivos ilícitos y áreas del programa “Espacios Territoriales de Capacitación y Reincorporación” (ETRC). Además, tanto García (2021) como IRENA (2025) realizaron un análisis de costo nivelado de energía (LCOE, por sus siglas en ingles). Aunque estas variables no se incorporaron en el presente trabajo, por el alcance de la investigación y baja recurrencia en la bibliografía consultada, se reconoce su relevancia en el contexto del análisis.

A diferencia del estudio de Jaimes (2024), en el presente trabajo se asignó alta relevancia a factores como la proximidad a las vías principales, subestaciones y líneas de transmisión eléctricas, consideradas como una ventaja económica para la ubicación de proyectos de energías renovables (IRENA, 2025). Dichos factores, aunque mencionados como relevantes por Jaimes (2024), no fueron incluidos en su modelo durante la etapa de análisis.

En lo referente a los **métodos de ponderación**, se evidencian enfoques distintos. García (2021) utilizó entrevistas a expertos y métodos cuantitativos para determinar el peso de cada variable. IRENA (2025) utilizó el método AHP (Proceso de Jerarquía Analítica) mediante encuestas, al igual Jaimes (2024), sin embargo, esta autora lo unifico a través de algebra de mapas (Weighted overlay). El estudio actual también utilizó una superposición ponderada, pero asignó pesos mediante una revisión bibliográfica sistemática, combinada con criterios técnicos basados en normativa nacional vigente. Esta estrategia se debió a la disponibilidad de los recursos y alcance de la investigación (ver recomendaciones). Sin embargo, demostró ser efectiva al generar resultados coherentes con estudios previos y al ser validada por comparación espacial con proyectos.

En cuanto a la escala de adecuación, García (2021) empleó nueve categorías agrupadas en tres niveles (alto, medio y bajo), por su parte Jaimes (2024) utilizó cinco categorías que iban desde “muy baja” a “muy alta” idoneidad. IRENA (2025), en cambio, utilizó una escala porcentual de 0 a 100%, donde los valores más altos representaban los mejores emplazamientos. Este estudio, en cambio aplicó un análisis estadístico de celdas para identificar las zonas “muy adecuadas” considerando aquellas con las puntuaciones más altas (433) y clasificando como “aptas” las que superaban un umbral de 365 (ver mapa 23). Esta metodología permitió una delimitación más precisa por departamento (ver tabla 12), lo cual aporta mayor detalle espacial y utilidad para toma de decisiones a nivel regional.

A pesar de que los estudios consultados coinciden en identificar a la región caribe colombiana como una de las zonas con mayor potencial para el desarrollo de proyectos solares, la diferencia de escalas de adecuación, la selección de variables y los métodos de ponderación, dificultan la comparación entre las áreas identificadas como adecuadas entre proyectos. No obstante, evidenciar estas diferencias permite comprender mejor los alcances y limitaciones del análisis multicriterio y su incidencia en la identificación de áreas idóneas.

9.4. Hallazgos regionales del modelo de adecuación

El departamento del Cesar fue el que presentó los mayores porcentajes de áreas adecuadas con respecto al total zonas encontradas (48.22%) y concentró las puntuaciones más altas de idoneidad para el desarrollo de parques solares fotovoltaicos. Este resultado adquiere mayor relevancia si se considera que este departamento es catalogado como un territorio con condiciones desfavorables a nivel energético; un estudio realizado por la ICESI en el 2023 reportó que “el Cesar tiene el 42,7 % de su población en pobreza energética” (Gobernación del Cesar, 2024). La combinación de estos dos factores -alto potencial solar y condiciones desfavorables de este recurso- convierte al departamento en una zona estratégica para la instalación de plantas fotovoltaicas. En este sentido concentrar las oportunidades en el departamento contribuiría a cerrar brechas de acceso a la energía.

10. Conclusiones

Se definieron los criterios (objetivos/atributos) necesarios para la construcción de una planta fotovoltaica, considerando tanto los requerimientos técnicos como el componente ambiental, social y arqueológico. Se validaron todas las variables elegidas de un área aleatoria, asegurando cumplir con todos los criterios. Al validar el modelo propuesto con proyectos solares con licencia ambientales -algunos de los cuales ya están construidos y en operación-, se concluye que las variables elegidas fueron adecuadas.

Se obtuvieron mapas temáticos individuales de la transformación de cada uno de los criterios y limitaciones, los parámetros establecidos, se basaron principalmente en la bibliografía consultada y fueron considerados para diferentes contextos territoriales, lo que generó cierta incertidumbre al aplicarse en el contexto del Caribe colombiano. A través de la validación, se encontró un buen nivel de aproximación con proyectos previamente establecidos, sin embargo, el solapamiento fue parcial en la mayoría de los casos, lo que deja en evidencia que se deben ajustar los valores de la transformación para mejorar el nivel de precisión en las áreas identificadas.

La unión entre el mapa de adecuación y la exclusión de las áreas restringidas permitió zonificar el potencial de idoneidad de la región caribe colombiana y localizar las zonas con mayor puntaje de idoneidad para construir plantas fotovoltaicas. Se encontraron en total un área de 5558.98 km² distribuidos entre los 7 departamentos de la zona de estudio, destacando el Cesar, con un área idónea de 2680.412 km², equivalentes al 48.22% de toda el área idónea identificada. Por otro lado, se encontraron 94604.36 km² de áreas restringidas en toda la región, donde el Magdalena fue el departamento menos favorecido para el desarrollo de este tipo de proyectos, con aproximadamente el 90% de su superficie restringida.

Para la validación del modelo, se concluye que las áreas idóneas identificadas tienen un cumplimiento favorable de las consideraciones establecidas a través de los criterios y restricciones, por lo que se concluye que el modelo es válido y funcional desde el punto de vista de los procesos ejecutados y los resultados esperados. Por otro lado, al comparar las zonas encontradas con proyectos licenciados por la ANLA, se encontraron siete parques solares fotovoltaicos ubicados dentro de estas, en su mayoría proyectos de gran importancia a nivel nacional, por lo que se

concluye que las zonas encontradas se ajustan de manera satisfactoria con el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos.

Esta zonificación es una herramienta que contribuye a priorizar zonas adecuadas para el despliegue de energía solar fotovoltaica, donde finalmente esta investigación demuestra la capacidad de realizar análisis de evaluación espaciales, aun así, las posibilidades de complementar y mejorar el modelo son muy reales, con una mayor disponibilidad de recursos, se podría articular con expertos del sector de las energías renovables, así como con actores clave como autoridades ambientales, permitiendo llevar el modelo a un nivel de complejidad mayor dentro del análisis multicriterio como a un proceso analítico jerárquico (AHP), a través de encuestas y diálogos con estos expertos que permitan ponderar más correctamente la importancia de cada variable y cuáles restricciones locales y nacionales más se deberían incluir. Por lo tanto, este trabajo deja abierta la posibilidad de continuar en la línea de investigación del análisis espacial multicriterio para la toma de decisiones clave en cuanto al manejo del territorio y el futuro de la transición energética.

La comparación con estudios previos reveló que, aunque existe consenso en torno al alto potencial solar de la región Caribe colombiana, las diferencias metodológicas —en términos de escala de análisis, selección de variables, criterios de restricción, métodos de ponderación y niveles de adecuación— impide realizar una comparación directa entre los resultados.

En conjunto, estos hallazgos refuerzan la utilidad de los modelos de evaluación espacial como herramientas para identificar áreas idóneas, anticipar conflictos potenciales y ayudar a la planificación territorial. Este modelo contribuye a evidenciar los recursos energéticos propios de cada departamento de la región caribe colombiana, con el fin de que sean aprovechados al máximo por cada territorio.

11. Limitaciones

Fuentes de información y datos

1. La información secundaria es la limitación principal, algunas zonas presentan información completa, mientras que otros departamentos tienen ausencia de datos como los POMCAS, por lo cual incluir estas variables en el modelo de datos presentaría sesgos ante la falta de información.
2. Los datos disponibles en distintas entidades son de carácter informativo, por lo cual existe información como geovisores, que no permiten la descarga de información; esta situación hace que se tome la decisión de excluirlos en algunos casos, sin embargo, el componente arqueológico se consideró una variable importante en el trabajo, por lo que fue necesario solicitar la información de manera oficial ante la entidad ICANH.
3. La información disponible no está actualizada, algunas capas tienen más de 5 años de creación, por lo que la información no refleja la situación al momento de la consulta, como es el caso de los precios catastrales del terreno, de manera que no fue una variable para tener en cuenta para la toma de decisión.

Metodología multicriterio (Ponderación)

4. Se utilizó la asignación de pesos a cada categoría y variable teniendo en cuenta la bibliografía consultada y la experiencia de los profesionales, de manera que puede ser considerada en cierta medida como subjetiva.

Aplicativo (Modelador de idoneidad)

5. Al utilizar la herramienta, el procesamiento fue lento y requirió unas condiciones de capacidad del computador.
6. Presentó problemas al utilizar ráster con una resolución espacial relativamente grande (100 m en este caso), de manera que fue necesario trabajar de manera independiente cada transformación, dado que al procesar de manera conjunta todas las capas se bloqueaba y cerraba el programa.

7. Al transformar las capas y cerrar el modelador, fue necesario reiniciar todo el procedimiento, dado que la herramienta no permite editar de nuevo una vez se cierra el aplicativo.

Análisis

8. En este trabajo se restringieron todas las variables elegidas de acuerdo con la legislación vigente, por lo que no se tuvo en cuenta que algunos procesos pueden ser solucionadas con tramites o permisos menores, de manera que varias zonas podrían pasar de restringidas a adecuadas si se consideran permisos o concesiones que se puedan tramitar. Por lo tanto, puede que las restricciones elegidas puedan ser replanteadas o reducidas en una siguiente implementación del modelo.

12. Recomendaciones

Los resultados de este trabajo pueden mejorar en la medida que se tenga información completa para toda la zona de estudio, que la información este actualizada y que sea disponible. A continuación, se detallan las principales recomendaciones dadas las limitaciones que se presentaron:

Fuentes de información y datos

1. Contar con toda la información para la zona de estudio, solo de esa manera es posible incluir la variable en el modelo de datos.
2. Hay información que no cuenta con descarga pública o datos abiertos, por lo que se debe contar con un tiempo adicional para realizar solicitudes formales ante distintas entidades y está sujeta a la información que la entidad entregue.
3. Cerciorarse que la información este vigente, en caso de que la capa de creación sea de años anteriores y no haya presentado actualizaciones, asegurarse que la información que se requiera no tenga limitaciones.

En general, se considera que para la implementación real de la metodología en el contexto de la toma de decisiones es completamente necesario trabajar de la mano con entidades territoriales de orden local y regional.

Metodología multicriterio (Ponderación)

4. Para responder a las necesidades reales de un proyecto, se recomienda implementar herramientas como encuestas a expertos para poder comprender qué variables son consideradas más relevantes en la ejecución de proyectos y por tanto cuales deberían tener una mayor ponderación en el modelo, permitiendo la implementación de un modelo de análisis multicriterio de mayor complejidad y más confiable como el método AHP.

Aplicativo (Modelador de idoneidad)

5. La herramienta "Modelador de adecuación", si bien es muy útil, aun presenta errores que dificultan su utilización como: datos ráster de alta resolución espacial, procesar gran cantidad de datos, por lo que se puede complementar con otras herramientas como álgebra de mapas, superposición ponderada, suma ponderada y reclasificar para realizar los procesos de transformación y combinación.

Análisis

6. Se recomienda gestionar las restricciones, ya que algunas limitaciones pueden ser manejadas a través de tramites menores, lo que puede ampliar las zonas aptas para construir plantas fotovoltaicas.
7. Los criterios considerados en el estudio pueden ser perfeccionados con información más específica por lo que las transformaciones pueden tener un mayor nivel de detalle.

Referencias

- Agencia Nacional de Licencias Ambientales - ANLA. (16 diciembre 2024). Parque Solar El Espino de 200 MW en el departamento de Córdoba, obtiene licencia ambiental por parte de la ANLA. Noticias ANLA. disponible en <https://www.anla.gov.co/noticias-anla/parque-solar-el-espino-de-200-mw-en-el-departamento-de-cordoba-obtiene-licencia-ambiental-por-parte-de-la-anla>
- Agencia Nacional de Licencias Ambientales - ANLA. (31 marzo 2025). Parque Fotovoltaico La Orquídea 200MW en el departamento de Bolívar, obtuvo licencia ambiental por parte de ANLA. Noticias ANLA. disponible en <https://www.anla.gov.co/noticias-anla/parque-fotovoltaico-la-orquidea-200mw-en-el-departamento-de-bolivar-obtuvo-licencia-ambiental-por-parte-de-anla?highlight=WyJwYXJxdWUiLCJzb2xhciJd>
- Arbelaez, N., Garzón, A. C., & Villota, J. F. (28 de mayo de 2023). La Guerra entre clanes Wayuu por la transición energética. Obtenido de La Silla Vacía: <https://www.lasillavacia.com/silla-nacional/la-guerra-entre-clanes-wayuu-por-la-transicion-energetica/>
- Azevêdo, V. W. B., Candeias, A. L. B., & Tiba, C. (2017). Location Study of Solar Thermal Power Plant in the State of Pernambuco Using Geoprocessing Technologies and Multiple-Criteria Analysis. *Energies*, 10(7), 1042. <https://doi.org/10.3390/en10071042>
- Barzehkar, M., Parnell, K.E., Mobarghaee Dinan, N., Brodie, G. (2021). Decision support tools for wind and solar farm site selection in Isfahan Province, Iran. *Clean Techn Environ Policy* 23, 1179–1195. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01978-w>
- Bello, J & Vásquez, E. (2023). Metodología Multicriterio para la Identificación de Áreas Potenciales en la Ubicación de Rellenos Sanitarios en jurisdicción de Cardique Integrando Herramientas SIG. Universidad de Manizales. Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- Buendía Yáñez, A. P. (2014). Caracterización y evaluación económica para la inversión en plantas menores a 20 MW conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN) de Colombia a partir de fuentes de energía renovables eólicas y solar. Universidad Nacional de Colombia.
- Castaño Gómez, M., & García Rendon, J. J. (2020). Análisis de los incentivos económicos en la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en Colombia. *Lecturas de Economía-No* 93, 23-64.

- Congreso de Colombia. (2008). Ley 1185 de 2008, por la cual se modifica y adiciona la Ley 397 de 1997 - Ley General de Cultura.
- Corpoboyacá. (17 de diciembre de 2021). Acta de audiencia pública ambiental adelantada dentro del proceso de licenciamiento ambiental contenidos en el expediente administrativo No. OOLA-0004/19. Disponible en <https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2021/12/ACTA-AUDIENCIA-PUBLICA-PSR3.pdf>
- Davies, L. and D. Saygin (2023). “Energía renovable distribuida en Colombia: Desbloqueando la inversión privada para zonas no-interconectadas”, No. 213, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/58322dd6-es>.
- Demir, A., Ersin, A., Yılmaz, K. (2023). A novel method for the site selection of large-scale PV farms by using AHP and GIS: A case study in İzmir, Türkiye. *Solar Energy*, Vol 259. Pages 235-245. ISSN 0038-092X. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.05.031>.
- Digalwar, A., Saraswat, S.K., Yadav, S.S., Kumar, G. (2021). MCDM and GIS based modelling technique for assessment of solar and wind farm locations in India. *Renewable Energy*. Vol 169.
- Drozd, S., & Kussul, N. (2024). Solar energy potential mapping in Ukraine through integration of GIS, remote sensing, and fuzzy logic. *European Journal of Remote Sensing*, 57(1). <https://doi.org/10.1080/22797254.2024.2362390>
- ELTIEMPO. (24 de junio de 2024). Dos megaparques solares en Cesar y Magdalena comenzaron a enviar energía eléctrica a la red nacional. Noticia. Disponible en <https://www.eltiempo.com/economia/empresas/dos-megaparques-solares-en-cesar-y-magdalena-comenzaron-a-enviar-energia-electrica-a-la-red-nacional-3355700>
- Enel Green Power. (23 de agosto de 2023). EL PARQUE SOLAR FUNDACIÓN, CONSTRUIDO POR ENEL GREEN POWER EN EL DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA, INICIA SU ETAPA DE PRUEBAS. Oficina de prensa Enel Colombia. Disponible en <https://www.enelgreenpower.com/es/medios/press/2023/09/egp-colombia-inicio-etapa-de-pruebas-parque-solar-fundacion>
- Fededesarrollo. (2024). Tendencia económica. Determinantes recientes del tipo de cambio en Colombia. Bogotá, D.C: Panorama actual y riesgo de mediano plazo en el sector energético.
- Foro Económico Mundial. (2024). Movilización de la inversión en energías limpias en Colombia: soluciones para acelerar la financiación.

- García Orrego, S. (2021). Análisis espacial multicriterio para la ubicación de parques eólicos y granjas solares en Colombia. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Garzón, C. A. (15 de enero de 2025). La transición energética de Petro se queda sin aire con las eólicas. Obtenido de La Silla Vacía: <https://www.lasillavacia.com/silla-nacional/la-transicion-energetica-de-petro-se-queda-sin-aire-con-las-eolicas/>
- Gobernación del Atlántico. (2024). Atlántico para el mundo. Plan de desarrollo Departamental 2024-2027.
- Gobernación del Cesar. (2024). Plan de Desarrollo Departamental "Gobernando El Cesar Imparable" 2024-2027.
- Gobernación del Magdalena. (2024). Plan de Desarrollo Departamental del Magdalena 2024-2027. Santa Marta, Magdalena.
- Gualdrón Alfonso, D. F., Reyes Medina, P. S., & Villate Corredor, J. J. (2020). Aplicación de sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la determinación de zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Guerrero Hoyos, B. G., Vélez Macías, F. d., & Morales Quintero, D. E. (2019). Energía eólica y territorio: sistemas de información geográfica y método de decisión multicriterio en la Guajira (Colombia). *Ambiente y desarrollo* Vol. 23 Núm. 44, 1-20.
- Gutiérrez, J. (2018). Metodología para la localización óptima de instalaciones de energía solar fotovoltaica en la Isla de Tenerife, España. *Rumbo* 20.30 (págs. 1-30). Conama 2018 Congreso Nacional del Medio Ambiente.
- ICANH. (2021). Términos de referencia para los Programas de Arqueología Preventiva. Bogotá D.C.
- ICANH. (2023). A un salto del pasado en Nueva Esperanza: múltiples miradas al acontecer de una comunidad prehispánica. Vol.III. Fondo Editorial ICANH.
- ICANH. (30 de junio de 2025). ICANH. Obtenido de ICANH: <https://www.icanh.gov.co/parques-icanh/que-son-los-parques-arqueologicos>
- IDEAM. (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Bogotá, D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

- IDEAM. (2017). Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia. Imprenta Nacional de Colombia. ISSN: 978 958 8067 94 0
- IDEAM. (s.f). Características de la Radiación Solar. Consultado en <http://archivo.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/caracteristicas-de-la-radiacion-solar>
- International Energy Agency – IEA. (15 de enero de 2025). World Energy Outlook 2024 - Resumen ejecutivo-. Obtenido de https://iea.blob.core.windows.net/assets/2f7d8ae7-d25c-4a37-a8e2-e92f31194384/WEO2024_Executivesummary_Spanish.pdf
- International Energy Agency – IEA. (2021), Net Zero by 2050. Paris. Disponible en <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>, Licence: CC BY 4.0
- International Energy Agency – IEA. (2023). Electricity generation sources. Disponible en <https://www.iea.org/countries/colombia>
- IRENA. (2025). Oportunidades de inversion en energía solar y eólica a gran escala: Colombia, Agencia Internacional de Energías Renovables, Abu Dhabi.
- Jaimes Martínez, L. D. (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. Universidad Nacional de Colombia, 1-68.
- Linnan, T., Yu, L., Yuchun, P., Yanmin, R., Lan, Y., Xiaolan, L. (2024). Optimizing solar photovoltaic plant siting in Liangshan Prefecture, China: A policy-integrated, multi-criteria spatial planning framework. Solar Energy, Volume 283, 113012, ISSN 0038-092X. doi.org/10.1016/j.solener.2024.113012.
- Malczewski, J. (1999). GIS and multicriteria decision analysis. 1st ed. John Wiley & Sons, Inc. pp 90
- Manglik, R. (2024). Spatial Analysis and Modelling. EduGorilla Publication.
- Marín-Quiroga, F., Solís-Cháves, J. S., & Medina-Gamba, A. F. (2023). Geolocalización de municipios idóneos en Colombia para instalar calentadores solares de agua por medio de un análisis multicriterio sustentable.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo – Minambiente. (2015). Plan Integral de Gestión del cambio climático Territorial del Magdalena 2040. Bogotá D.C: Colombia.
- Ministerio de Minas y Energía - Minenergía. (10 de mayo de 2023). Se reactiva construcción del Parque Eólico Windpeshi en La Guajira gracias a diálogos con comunidades. disponible en

- <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/se-reactiva-construcci%C3%B3n-del-parque-e%C3%B3lico-windpeshi-en-la-guajira-gracias-a-di%C3%A1logos-con-comunidades/>
- Ministerio de Minas y Energía - Minenergía. (27 de septiembre de 2024). Gobierno del Cambio inaugura parque solar fotovoltaico en La Unión, Córdoba. Histórico Noticias. disponible en <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/gobierno-del-cambio-inaugura-parque-solar-fotovoltaico-en-la-uni%C3%B3n-c%C3%B3rdoba/>
- Montero, J. (2017). Estudio de localización de un relleno sanitario regional para el norte del departamento del Valle del Cauca – Colombia. Universidad de Manizales. Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- Muñoz-Sarria, F., & Bueno- López, M. (2022). Metodologías para la selección de tecnologías en proyectos de energización rural. *Revista UIS Ingenierías*. Vol. 21, No. 3, 85-100.
- Nguyen, DT., Truong, MH. & Phan, DT. Gis-based simulation for solar farm site selection in south-central Vietnam. *GeoJournal* 87, 3685–3699 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10708-021-10454-x>
- Obando, M. (2017). Identificación del lugar óptimo de instalación de un parque eólico en el departamento del Atlántico. Universidad de Manizales. Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- Organización de las Naciones Unidas – ONU. (s.f). Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna. Disponible en <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- Ortiz, G. (2021). Identificación de áreas idóneas para el desarrollo urbano mediante el uso de análisis multicriterio AHP y herramientas geoinformáticas. Universidad de Manizales. Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- Paísminero. (8 de diciembre de 2024). Guayepo: El parque solar más grande del país y uno de los mayores de Suramérica, ya está en operación comercial. Consultado en: <https://www.paisminero.com/medioambiente/ambiental/28529-guayepo-el-parque-solar-mas-grande-del-pais-y-uno-de-los-mayores-de-suramerica-ya-esta-en-operacion-comercial>
- Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026. (2023) Colombia, Potencia Mundial de la Vida.
- Rane, N.L., Günen, M.A., Mallick, S.K., Rane, J., Pande, C.B., Giduturi, M., Bhutto, J.K., Yadav, K.K., Tolche, A.D., & Alreshidi, M.A. (2024). GIS-based multi-influencing factor (MIF)

- application for optimal site selection of solar photovoltaic power plant in Nashik, India. *Environ Sci Eur* 36, 5. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00832-2>
- Rasaei, F., Yousefi, H., Razeghi, M., Naseri, A., Abdoos, M., Ghasempour, R. (2025). Optimal selection of CSP site for desalination system using GIS and AHP method in Hormozgan province, Iran. *Energy Reports*. Vol 13, Pages 2255-2268. ISSN 2352-4847. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.01.082>.
- Rikalovic, A., Cosic, I. & Lazarevic, D. (2014). GIS Based Multi-criteria Analysis for Industrial Site Selection. *Procedia Engineering* Vol 69.
- Rios, R. & Duarte, S. (2021). Selection of ideal sites for the development of large-scale solar photovoltaic projects through Analytical Hierarchical Process – Geographic information systems (AHP-GIS) in Peru. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 149. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111310>.
- Robles, C., & Rodríguez, O. (2018). Un panorama de las energías renovables en el mundo, Latinoamérica y Colombia. *Revista Espacios* Vol. 39 (No. 34), 1-10.
- Rodríguez, S. (2012). Localización de áreas de potencial explotación minera que no afecten la dinámica ambiental y territorial del municipio de Marmato, utilizando sistemas de información geográfica. Universidad de Manizales. Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- Salih, A., Hassaballa, A., Eltawil, M. (2024). Integrating spatial data and multi-criteria analysis for wind farm suitability mapping in eastern Saudi Arabia. *Energy*. Vol 301.
- Sánchez-Lozano, J., Teruel-Solano, J., Soto-Elvira, P., García-Cascales, M. (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*. Volume 24.
- SER Colombia. (10 de octubre de 2024). SER Colombia. Obtenido de SER Colombia: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ser-colombia.org/wp-content/uploads/2024/01/PORTAFOLIO_2024.pdf
- Serrano-Guzmán, M. F., Pérez-Ruiz, D. D., Galvis-Martínez, J. F., Rodríguez-Sierra, M. L., & Correa-Torres, S. N. (2017). Análisis prospectivo del uso de energía solar: Caso Colombia. *Investigación y Ciencia de La Universidad Autónoma de Aguascalientes* 25 Número 71, 85-93.

Servicio Geológico de Colombia. (2023). Glosario. Consultado en

<https://www2.sgc.gov.co/atencionalciudadano/paginas/glosario.aspx>

UPME. (03 de abril de 2025b). Transición energética justa y generación de empleo en Colombia.

Obtenido de UPME:

https://docs.upme.gov.co/SalaPrensa/ComunicadosPrensa/Paper_empleos_FNCER_03ABR25.pdf

UPME. (07 abril de 2025a). Boletín Estadístico 2020-2024 S1. Obtenido de:

https://docs.upme.gov.co/SIMEC/Boletin-estadistico/Boletin_Estadistico_2020-2024_S1VF_Abril_VFD-07abr25.pdf

UPME. (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Bogotá.

UPME. (2024 b). Informe de avance proyectos de generación. Subdirección de Energía Eléctrica – Grupo de generación. Consultado en

https://www1.upme.gov.co/siel/Seguimiento_proyectos_generacion/Informe_avance_proyectos_generacion_Diciembre_2024.pdf

UPME. (noviembre de 2018). Boletín estadístico minas y energía 2018. Obtenido de

https://www1.upme.gov.co/PromocionSector/SeccionesInteres/Documents/Boletines/Boletin_Estadistico_2018.pdf

UPME. (s.f). Monografía sobre el caso de conflictividad social generada por la construcción del parque eólico Windpeshi. Obtenido de UPME:

https://www1.upme.gov.co/Documents/Enfoque-territorial/Resultados_convenios/3_Monografia_sobre_caso_parque_eolico_windpeshi_PARES_v2.pdf

Valencia, F., Ángel, F., Hernández, R. (2013). Construcción de un modelo de zonificación ambiental para estudios ambientales de proyectos de exploración sísmica terrestre. Universidad de Manizales. Facultad de Ciencias e Ingeniería.

Villalba, M & López, M. (2023). Localización potencial para una planta de tratamiento de residuos peligrosos a través del uso de herramientas SIG en el municipio de Dosquebradas, Risaralda. Universidad de Manizales. Facultad de Ciencias e Ingeniería.

Wang, Y., Gao, J., Guo, F & Chen, J. (2024). A two-stage decision framework for GIS-based site selection of wind-photovoltaic-hybrid energy storage project using LSGDM method. *Renewable Energy*, Vol 222