

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS CENTRALES ELÉCTRICAS CON LAS ENERGÍAS RENOVABLES EÓLICA Y/O SOLAR EN EL VALLE DEL CAUCA

Lemos García, Natalia
natalia.lemos00@usc.edu.co

Rojas Carvajal, Sharon Andrea
Sharon.rojas00@usc.edu.co

Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de Sistemas de Información Geográfica (1)
Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de Sistemas de Información Geográfica (2)

Resumen

Este estudio se centra en realizar un análisis de factibilidad para determinar la ubicación adecuada de centrales solares y eólicas en el Valle del Cauca. La metodología empleada integró Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Análisis Multicriterio, resaltando la importancia de ponderar variables críticas en el proceso de identificación de ubicaciones óptimas. La metodología incluyó la definición y ponderación de criterios de selección y restricción específicos para cada tipo de central. La aplicación de álgebra de mapas facilitó la identificación de las zonas ideales para la instalación de centrales eléctricas que utilizan el recurso solar o eólico, estableciendo un límite de igual o mayor a 0,9, para determinar las áreas óptimas. Este recurso reveló las áreas idóneas para situar centrales solares en la región norte-centro del departamento. También, se identificó que en el Valle de Cauca se carece de las condiciones necesarias para la instalación de parques eólicos a gran escala. Este estudio destaca la viabilidad de aprovechar fuentes renovables, especialmente la solar, en áreas específicas identificadas. Sin embargo, resalta los desafíos y limitaciones asociados con la ubicación óptima para parques eólicos a gran escala en la región, enfatizando la necesidad de considerar tanto el potencial de generación de energía como las restricciones geográficas y los criterios de infraestructura al planificar proyectos de energía renovable en el Valle del Cauca.

Palabras Clave: Energías Renovables, Factibilidad, Sistemas de Información Geográfica.

Abstract

This study focuses on conducting a feasibility analysis to determine the suitable location for solar and wind power plants in the Valle del Cauca region. The methodology employed integrated Geographic Information Systems (GIS) and Multicriteria Analysis, highlighting the importance of weighting critical variables in the process of identifying optimal locations. The methodology involved defining and weighting specific selection and restriction criteria for each type of power plant. The application of map algebra facilitated the identification of ideal zones for the installation of power plants utilizing solar or wind resources, establishing a threshold of equal to or greater than 0.9 to determine optimal areas. This approach revealed that the ideal areas for solar power plants are in the north-central region of the department. Additionally, it was identified that the Valle del Cauca lacks the necessary conditions for the installation of large-scale wind farms. This study underscores the viability of harnessing renewable sources, particularly solar energy, in identified specific areas. However, it highlights the challenges and limitations associated with optimal location for large-scale wind farms in the region, emphasizing the need to consider both the energy generation potential and the geographic restrictions and infrastructure criteria when planning renewable energy projects in the Valle del Cauca.

Keywords: Renewable Energies, Feasibility, Geographic Information Systems.

1. INTRODUCCIÓN

En el Departamento del Valle del Cauca, persisten desafíos significativos. Según Julián Vivas (2023), aún existen comunidades en la región carecen de acceso a la electricidad, dependiendo en gran medida de fuentes de energía basadas

en combustibles fósiles. Este escenario no solo revela una brecha en el suministro eléctrico, sino también una alta dependencia de métodos poco sostenibles y costosos.

José Fernando Gómez, en una conferencia en la Universidad Autónoma de Occidente en noviembre de 2020, destacó que, aunque representa el 11 % del consumo nacional de electricidad, el Valle del Cauca enfrenta una gran oportunidad de pensar en el cambio de los recursos utilizados para la generación de energía.

La generación de energía actual mediante Diesel resulta costosa, especialmente en comunidades con ingresos mínimos o nulos. Además, el avance tecnológico y el consiguiente aumento en la demanda de electricidad plantean desafíos adicionales, ya que las fuentes no renovables contribuyen significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero. Según un artículo en *El Tiempo*, (2020), alrededor de 60,000 personas en el Valle del Cauca carecen de acceso a energía eléctrica.

En concordancia, la transición hacia fuentes de energía renovable se ha convertido en un imperativo global. La conciencia sobre la limitación de recursos no renovables y su creciente escasez ha elevado exponencialmente su valor. Las fuentes energéticas renovables como la solar y eólica, ofrecen una solución efectiva debido a su diversidad, su capacidad para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y su disponibilidad global.

Por lo anterior, la Agencia Internacional de Energía (AIE) destacó el cambio climático como uno de los principales desafíos. El informe del Ministerio de Minas y Energía, (2021) subraya la importancia de las fuentes no convencionales de energía renovable para la transición hacia un modelo energético más sostenible y limpio en Colombia. Sin embargo, las estadísticas de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) indican que, en 2020, solo el 3% de la matriz energética colombiana provino de fuentes renovables no convencionales, mientras que la hidroelectricidad representó aproximadamente el 70%.

Ahora bien, en la región del Pacífico colombiano, incluyendo Chocó, Valle del Cauca, Cauca y Nariño, se presentó un desafío adicional al ser una Zona No Interconectada (ZNI), con un alarmante 10.98% de viviendas sin servicio eléctrico en 2019 (García et al. 2021). A pesar de esto, el Valle del Cauca posee un gran potencial para la generación de energía renovable, especialmente solar y eólica, según la UPME (2021). No obstante, la falta de políticas e incentivos ha obstaculizado el desarrollo de nuevos proyectos (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

A pesar de lo anterior, la legislación colombiana, como la Ley 1715 de 2014, regula la integración de centrales de fuentes renovables al sistema energético nacional. Diversas resoluciones y decretos, como la resolución 40701 de 2018 y el decreto 348 de 2019, establecen condiciones para la conexión de centrales de generación de energías renovables a la red eléctrica existente. Sin embargo, a pesar de estos marcos legales, el Valle del Cauca carece de iniciativas sólidas que impulsen la inversión en energías renovables.

En este contexto, se identificó una imperiosa necesidad de cambiar las fuentes energéticas convencionales en el Valle del Cauca. La falta de información detallada y análisis de datos existentes en la región dificulta la identificación de zonas potenciales para la instalación de centrales de energías renovables solares y eólicas.

Por lo que este proyecto, estudió diversas experiencias similares en otras regiones. Estrategias como la estratificación rural mediante SIG, basada en el análisis de recursos solares y eólicos, la demanda eléctrica, la distribución espacial y la ubicación de redes existentes, se han aplicado con éxito, como se evidencia en estudios realizados en Murcia, España.

Para la evaluación del potencial bioenergético utilizó modelos de mapeo de potencial energético basados en criterios como límites políticos, redes viales, sistemas de transporte y distribución eléctrica, proporciona un marco sólido para identificar áreas con un alto potencial para energía renovable, como se observa en estudios realizados en Córdoba, Argentina por Guido, et al (2020).

El caso de Ucrania, según Ostapenko et al., (2022), destacó el uso de datos estadísticos y SIG para evaluar el potencial de fuentes de energías renovables. Variables como calidad de los recursos, distancia a las redes de transmisión, densidad de la población, terreno y áreas protegidas, que se utilizó para definir zonas adecuadas para el desarrollo de energías renovables.

El análisis multicriterio se presentó como una herramienta eficaz en la selección óptima de ubicaciones para centrales de energía renovable. Autores como Ordoñez et al. (2020), Lázaro et al. (2021), y Gandullo et al. (2021), Gutiérrez (2018), Change et al. (2021), Balas (2020), Hung González (2011), Sánchez Lozano et al., (2012), y Ríos y Duarte (2021) para centrales de energía solar, utilizaron esta metodología para asignar pesos a criterios como pendiente, radiación solar, distancias a redes eléctricas y zonas protegidas. Este análisis proporcionó mapas de idoneidad, resaltando las localizaciones más propicias.

En el caso de parques eólicos, diversos autores (Guerrero Hoyos et al., 2020; Luz et al., 2005; Obando Chaparro, 2017; Orrego, 2021; Pérez Escalona, 2021; Rentería Mena, 2021; Szurek et al., 2014; Vaca Aldas, 2018), combinaron métodos de análisis multicriterio y SIG. Variables como distancia a vías principales, centros poblados, fuentes de agua, puertos, redes eléctricas y velocidades de viento se usaron para determinar zonas óptimas. El proceso implicó la conversión de datos vectoriales a ráster, la suma ponderada de ráster y la vectorización de resultados, destacando áreas con mayor idoneidad.

Con lo anteriormente enunciado, se impulsa la necesidad de analizar la ubicación para una central eléctrica con recurso solar y/o eólica en el departamento del Valle del Cauca. Para ello, se definió criterios de selección y restricciones que influyen en la instalación de este tipo de centrales. Posteriormente, se analizó cada criterio creando zonas de influencia de acuerdo con distancias establecidas mediante los Sistemas de Información Geográfica. Por último, por medio de un álgebra de mapas, se usan todos los criterios estudiados para obtener las zonas con mayor potencial para cada tipo de central eléctrica con fuentes de recursos renovables solar y/o eólico.

2. METODOLOGÍA

La metodología aplicada para evaluar la factibilidad y determinación de la ubicación óptima de centrales solares y eólicas en el Valle del Cauca es de tipo mixta. Esta metodología integra tanto enfoques cualitativos como cuantitativos. Por un lado, se realizan procesos estadísticos con diferentes cifras de los criterios estudiados, lo que proporciona un análisis cuantitativo de los datos. Por otro lado, se incorporan datos ambientales y técnicos que permiten analizar el proyecto de manera descriptiva, lo que constituye un enfoque cualitativo. Esta combinación de métodos permite una evaluación más completa del tema de estudio, aprovechando tanto la profundidad como la amplitud de la información recopilada. Esta metodología se concibió con técnicas avanzadas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y análisis multicriterio. Esta metodología fue elegida porque permite integrar diferentes parámetros, ya que considera una amplia gama de variables que son relevantes para la toma de decisiones, al combinar la información de diversas fuentes y tipos de datos espaciales donde se puede tener una visión más amplia, completa y precisa del tema.

Para identificar las zonas propicias y así implementar infraestructuras destinadas a la generación de energía renovable como la solar y la eólica, se establecieron criterios específicos de selección y restricción. Estos criterios, abarcan desde la radiación solar y la velocidad del viento hasta restricciones ambientales y geográficas, que fueron sometidos a procesos de normalización y ponderación para reflejar su importancia contextual. A continuación, en la Figura 1 se encuentra detallada el flujograma que se usó de guía visual del enfoque seguido en el análisis.

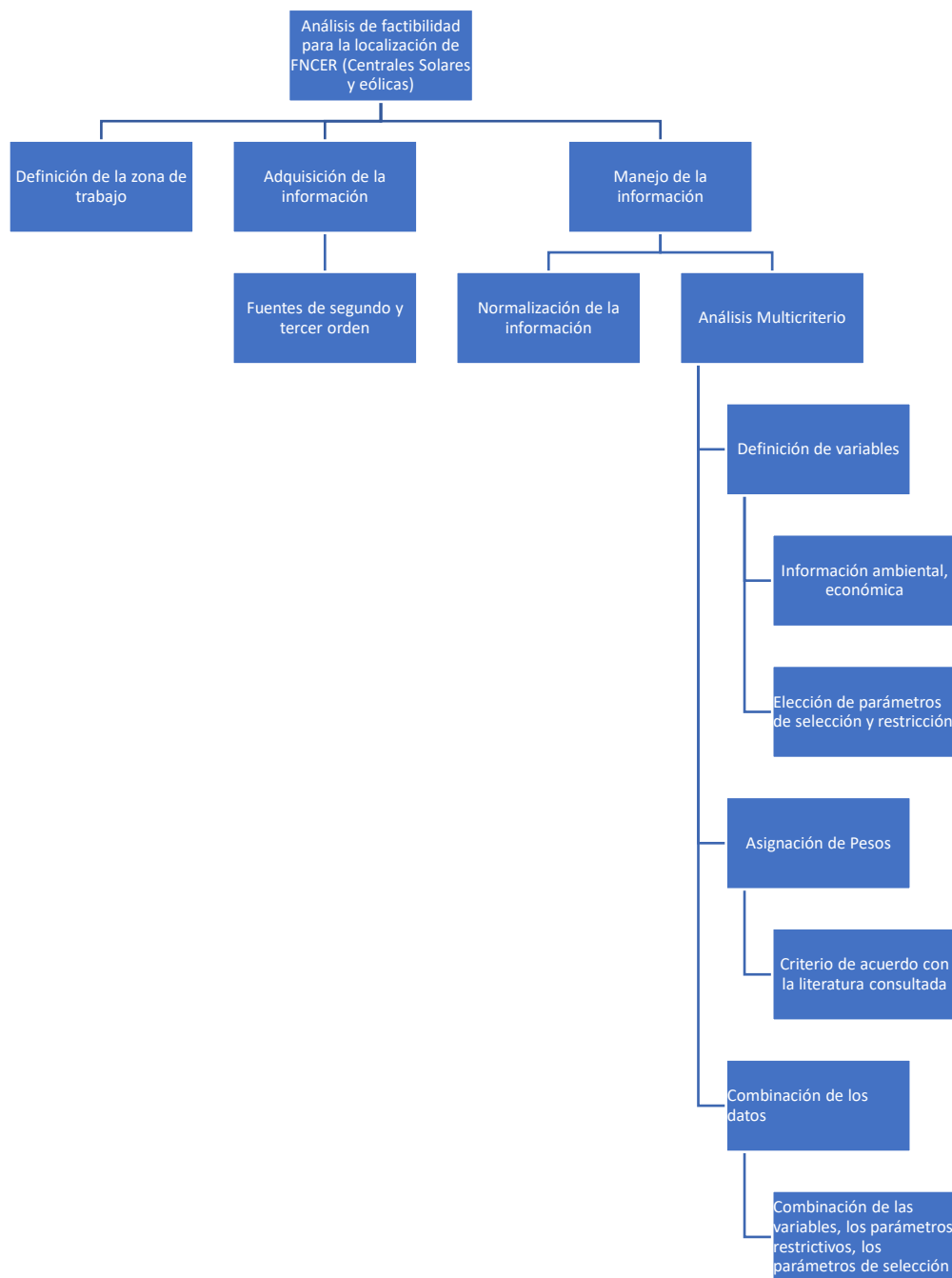


Figura 1: Flujo de trabajo

Fuente. Elaboración propia, (2023).

Como se visualiza en la figura 1, la metodología inicia recopilando información y finaliza con la identificación de las áreas para construir una central eléctrica con el recurso solar y/o una central eléctrica con el recurso eólico. Esto en correlación con lo expuesto por Gandullo en el 2022, Pérez Escalona, en el 2021 y Szurek et al., en el 2014, quienes aplicaron una metodología basada en el análisis multicriterio, el cual facilita la toma de decisiones mediante la identificación de datos que restringen o seleccionan el área ideal para la ubicación de las centrales eléctricas. Esta investigación es de tipo descriptiva y aplicada, debido a que se requirió un estudio preliminar de la zona, y la aplicación de estos conocimientos para establecer las áreas más óptimas. Basándonos en los artículos analizados, se determinaron los siguientes criterios, con los que se identificó la zona ideal para la instalación de las centrales eólicas y solares, además, de criterios excluyentes que restringieron las zonas en donde no es posible construir este tipo de centrales, las cuales se enunciarán a continuación:

Criterios de Selección

- **Pendiente:** Es un criterio técnico que, si llega a ser muy alta la pendiente, no permitiría construir una central eléctrica ni con el recurso solar, ni con el recurso eólico. Puesto que estas centrales requieren una gran área, adecuar un terreno para conseguir la pendiente adecuada generaría un aumento en los costos de instalación de estas centrales.
- **Radiación KWh/m:** Es un criterio técnico cuyo valor influye directamente con la cantidad de energía que se logrará generar. Esto ligado con la cantidad de radiación solar que recibe la zona durante todo el día.
- **Velocidad del viento km/h:** Al igual que la radiación, este es un criterio técnico, pero para una central con recurso eólico, que a mayor sea la velocidad del viento, mayor cantidad de energía generará la central.
- **Red Vial:** Es un criterio de tipo económico, puesto que un mayor desplazamiento influye en un costo de tiempo y dinero, sin embargo, también se debe tener en cuenta una distancia en la que estas centrales deben estar retiradas a las vías por seguridad.
- **Redes Eléctricas:** Es un criterio económico, por lo que su distancia influye en la conexión y distribución de la energía.

Criterios de Restricción

- **Áreas Protegidas:** Es un criterio ambiental, puesto que estas áreas buscan impedir cualquier tipo de construcción a zonas que tienen un alto valor ambiental y ecológico. Además, la instalación de estas centrales de recursos solares o eólicas, por su tamaño, impactarían de manera negativa a la flora y fauna de estas zonas.
- **Áreas Urbanas:** Es un criterio ambiental, puesto que estas centrales pueden generar afectación visual y ambiental, lo que provocaría una disminución en la calidad de vida tener estas centrales eléctricas muy cercanas.
- **Recurso Hídrico:** Es un criterio ambiental y económico, ya que deben estar sujetas a los cambios naturales que suceden en cualquier río o quebrada, los cuales pueden afectar a las instalaciones de las centrales de este tipo, por otro lado, la central puede generar un impacto negativo a los recursos hídricos.

Normalización de la información

Una vez establecidos los criterios a considerar en este análisis, se normalizaron los datos para analizarlos en una misma escala. En los softwares GIS existe una herramienta de reclasificación de ráster, por lo que se requirió convertir los datos que se encuentra en formato shape a ráster y así darles un valor entre 0 y 10, siendo el 10 las zonas óptimas para la instalación de estas centrales y 0 las zonas donde no es posible instalarla.

Asignación de pesos

Con los datos normalizados, se analizó espacialmente mediante el software GIS, con esto se pudo identificar las distancias que se tienen con respecto a cada criterio, utilizando diferentes herramientas del software como lo es el buffer. Después, según los estudios que estimaron científicos o expertos en proyectos similares, se asignó un peso a cada criterio. Debido a que los diferentes autores tienen variaciones en estos valores, se realizó una media ponderada entre los valores estimados por estos autores, como se muestra en la Tabla 1 y 2, donde se observan criterios binarios, como son: las áreas protegidas, la cercanía con los núcleos urbanos y los recursos hídricos, lo que indica que en estas zonas no es posible realizar una instalación de una central con recurso eólico o solar. **Por otro lado, los criterios de radiación solar o velocidad del viento, proximidad a redes eléctricas, proximidad a la red vial y la pendiente, se les estableció un valor entre 0 y 10.** Ya que el recurso solar y el recurso eólico tienen diferentes criterios de selección. A continuación, se muestra cada peso que se le asignó a los criterios de acuerdo con el tipo de central:

Pesos Central Fotovoltaica:

Tabla 1: Pesos de cada criterio para la ubicación ideal de la Central Eléctrica con Recurso Solar.

Criterio	Radiación Solar	Proximidad a redes eléctricas	Proximidad a la red vial	Pendiente del terreno	Áreas Protegidas	Cercanía núcleos urbanos	Recursos Hídricos
Peso *	4,10	2,40	2,40	1,10	0/1	0/1	0/1
Peso **	3,63	2,65	1,5	2,22	0/1	0/1	0/1
Peso Ponderado	3,87	2,53	1,95	1,66	0/1	0/1	0/1

*: (Quinteros & Morales, 2020).

**:(Gutiérrez Velayos, 2018).

Pesos Central Eólica:

Tabla 2: Pesos de cada criterio para la ubicación ideal de la Central Eléctrica con Recurso Eólico.

Criterio	Velocidad del Viento	Proximidad a redes eléctricas	Proximidad a vías de comunicación	Pendiente del terreno***	Áreas Protegidas	Cercanía núcleos urbanos	Recursos Hídricos
Peso *	3.89	2.77	1.44	1.9	0	0	0
Peso **	4.7	2.49	0.56	2.25	0	0	0
Peso Ponderado	4.3	2.63	1	2.07	0	0	0

*: Moradi et al., (2020)

**: Pérez Escalona, (2021)

***: Fuente: El Autor

Análisis Multicriterio

Posteriormente a la asignación de los pesos de cada criterio, se realizó un algebra de mapas, que consistió en el uso del software GIS una sumatoria de las multiplicaciones de cada criterio de selección por su respectivo peso. Como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Y = \sum X_i \times W_i$$

Donde,

Y = los valores obtenidos

X_i = Cada criterio de selección

W_i = El respectivo peso de cada criterio

Utilizando los resultados obtenidos de la ecuación mencionada, se procedió a multiplicarlos por cada criterio de restricción previamente reclasificado en valores de 1 y 0. Las zonas clasificadas como 0 representan áreas no aptas para la instalación de centrales eléctricas, mientras que las zonas clasificadas como 1 indican la idoneidad para la instalación de centrales eléctricas con energía solar o eólica. Después, se generó un mapa que refleja los valores resultantes del proceso. Por último, se estableció un umbral para identificar espacialmente las zonas más adecuadas para la instalación de centrales que aprovechen los recursos eólicos o solares disponibles en el área de estudio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Definición de la zona de estudio:

En el primer paso de la metodología se delimitó la zona de estudio para la identificación de las zonas viables para la instalación de centrales eléctricas con recursos solar y/o eólico. La zona seleccionada estará ubicada en el departamento del Valle del Cauca, ubicado en el Suroccidente Colombiano, con coordenadas (3°56'00"N 76°31'00"O), como se muestra en la Figura 2

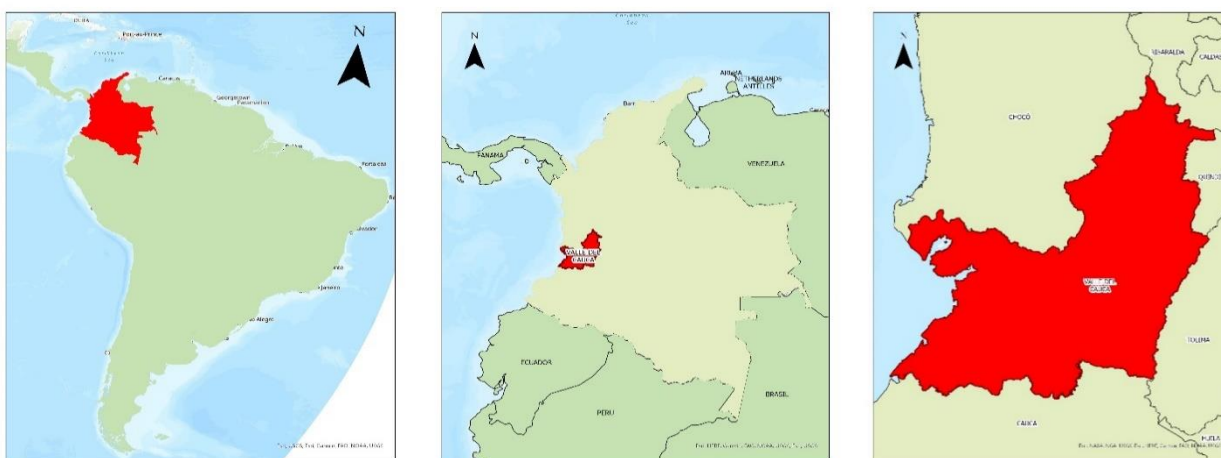


Figura 2: Ubicación del Valle del Cauca

Fuente: Elaboración Propia

El departamento del Valle del Cauca tiene 42 municipios, donde aproximadamente el 2 % de su territorio corresponde a zonas urbanas, mientras que el 98 % se distribuye en áreas rurales (Figura 3). Entre los municipios con mayor demanda eléctrica se encuentran Cali, Palmira y Yumbo, que presentan un alto consumo de energía eléctrica. Por otro lado, las zonas rurales son las que tienen menor acceso a la conexión eléctrica, lo que indica una disparidad en la distribución y acceso a la energía en la región. Según la UPME, 2022 el Valle del Cauca, tiene una demanda energética distribuida de la siguiente manera: En el sector industrial, tiene un 40-50% de demanda energética; el sector residencial un 25-35% de la demanda energética; el sector comercial un 15-20% de la demanda energética; el sector de transporte un 10-15%; el sector agrícola tiene un 5-10% de la demanda energética. A continuación, se muestra la figura 2, que resalta las zonas del departamento que son rurales y urbanas con sus municipios, y las zonas hídricas del mismo.

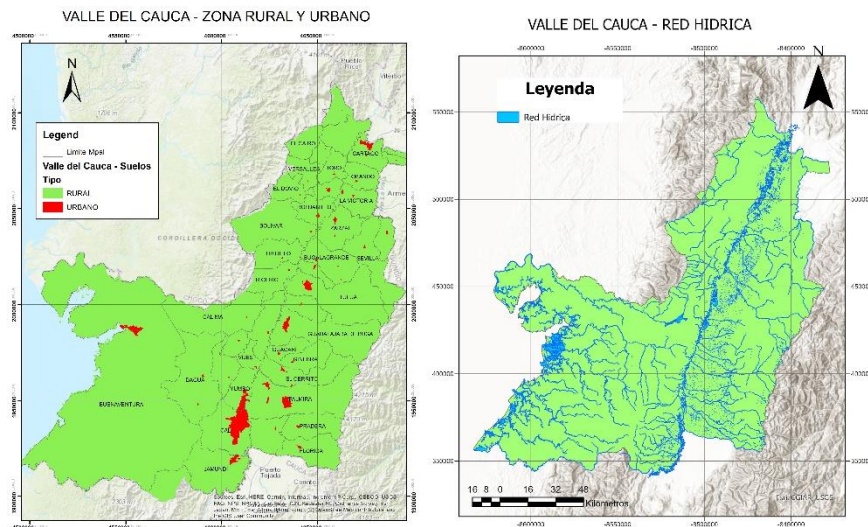


Figura 3: Información política e hídrica del departamento del Valle del Cauca.

Fuente: Elaboración Propia

El departamento tiene alta actividad industrial por su producción de alimentos, la manufactura, la química, entre otras, requiere de mayor cantidad de energía para sus procesos productivos. A medida que la población y la actividad económica continúan creciendo en el Valle del Cauca, se espera que la demanda de energía siga aumentando, para esto, es importante considerar fuentes de energías sostenibles y eficientes para garantizar un suministro de energía confiable y respetuoso con el medio ambiente.

Adquisición de Información:

Según los autores estudiados, es importante obtener la información espacial del departamento relevante para este proyecto, que sería además de información geográfica de la zona de estudio, serían los criterios necesarios para identificar la ubicación de las centrales eléctricas con recursos eólico o solar. Esta información se clasifica en primer, segundo y tercer orden, según la forma en que se captura. Para este trabajo se utilizaron las siguientes fuentes de trabajo:

Fuente de Información de Segundo Orden: Son los datos de tipo espacial, que permitieron la creación del SIG, como lo son las capas espaciales de los municipios, de las vías, de las redes eléctricas existentes, etc.

Fuente de Información de Tercer Orden: datos obtenidos con bases de datos abiertos como los datos espaciales de diferentes entidades en el país. Para el presente proyecto se utilizó este tipo de información para obtener los recursos potenciales que proporciona el departamento y establecer los criterios para analizar la ubicación de las centrales.

Según lo señalado por varios autores (Gandullo (2022), Gózales (2020), Orrego, (2021)), los parámetros más empleados para identificar áreas óptimas para situar centrales solares y eólicas fueron los siguientes, pues son claves en cuestiones ambientales, económicas y técnicos para situar estos tipos de centrales eléctricas.

Los datos adquiridos son los siguientes:

- **Vías:** La capa de la red vial se obtuvo en formato shape, esta red comprende 8230 km de las que 735.18 km son vías nacionales. Esta
- **Núcleos Urbanos:** Se obtuvo la capa de núcleos urbanos en formato shape, estas zonas urbanas abarcan un 2% del total del territorio del departamento del Valle del Cauca.
- **Velocidad del viento:** La capa de la velocidad del viento se obtuvo en formato shape, se muestran en diferentes

rangos en todo el departamento para el año 2010.

- **Redes Eléctricas:** La capa de la red eléctrica se obtuvo en formato shape, esta red abarca un
- **Áreas Protegidas:** La capa de las áreas protegidas se obtuvieron en formato shape, estas áreas actualmente equivalen a un 25% del territorio del departamento.
- **Cuerpos de Agua:** La capa de la red hídrica se obtuvo en formato shape, esta red equivale a un 0.4% del total del departamento.
- **Limite Departamental Valle del Cauca:** La capa del límite departamental se obtuvo en formato shape, el área total del departamento es de 2'214.540 hectáreas.
- **Modelo Digital de Elevación:** Este dato se obtuvo en formato ráster de todo el territorio nacional, se utilizó solo la información dentro del límite del departamento del Valle del Cauca.
- **Radiación Wh/m2:** La capa de radiación se obtuvo en formato ráster, este se extrajo del año 2010, con una medición de 1 hora.

En la siguiente tabla, se muestra la fuente donde se adquirieron los criterios mencionados:

Tabla 3. Fuentes de la información utilizada.

Nombre	Fuente	Nombre	Fuente
Vías	Colombia en mapas	Modelo Digital de Elevación	Colombia en mapas
Centros Poblados	Colombia en mapas	Radiación Wh/m2	ArcGIS Pro (Radiación Solar)
Velocidad del viento	IDEAM		
Redes Eléctricas	UPME		
Áreas protegidas	Colombia en mapas		
Cuerpos de agua	Datos abiertos (IGAC)		
Limite Departamental	Colombia en mapas		

Fuente. Elaboración propia, 2023.

A continuación, se presentan los resultados claves obtenidos mediante la ponderación de las diversas variables usadas. Estos resultados ofrecieron una perspectiva cuantitativa de los lugares factibles donde es apto la instalación de una central eléctrica solar y una eólica.

Inicialmente se obtuvo el ráster del modelo digital de elevación con el que se procesó en un software GIS para calcular así la pendiente mediante la herramienta “pendiente”, se configuró para que los resultados se muestren en porcentajes, con los que se procedió a reclasificar para normalizarlos, dejando valores entre 0 y 10, dando el siguiente resultado (Figura 4):

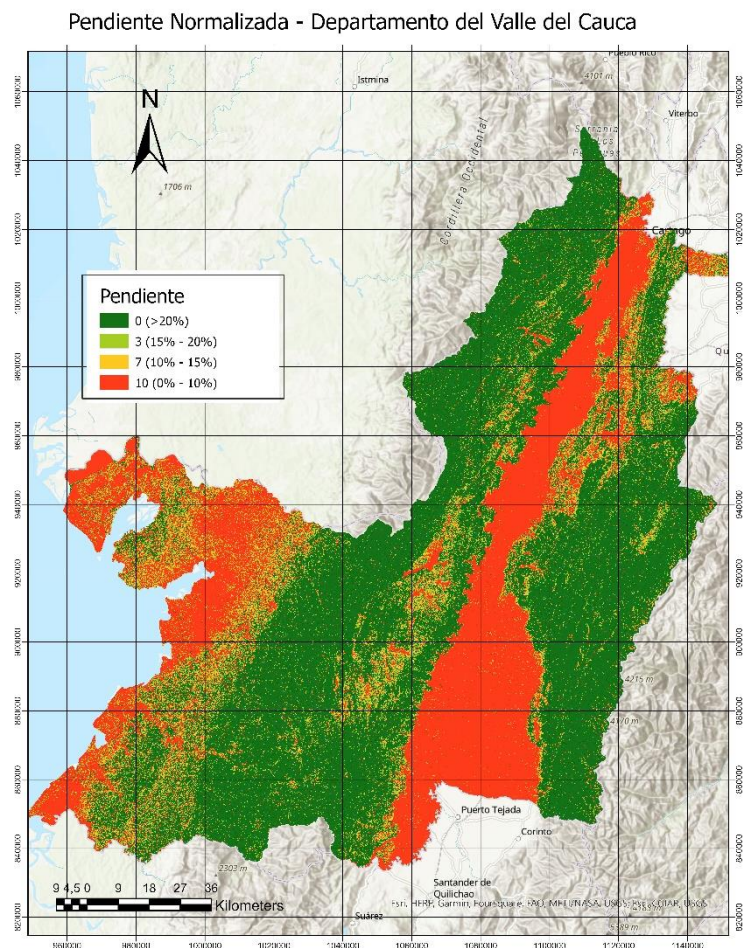


Figura 4: Pendiente Normalizada

Fuente. Elaboración propia, 2023.

En la Figura 3, se muestran las áreas con distintos rangos de pendiente del terreno. Las zonas en color verde indican pendientes superiores al 20 %, mientras que las zonas en color rojo representan pendientes entre el 0 % y el 10 %. Se considera que las zonas rojas presentan pendientes óptimas para la instalación de centrales eléctricas que aprovechan recursos eólicos o solares.

Se han examinado los criterios de restricción aplicados en áreas específicas del departamento del Valle del Cauca. Las áreas protegidas, con una delimitación legal predefinida, cubren aproximadamente el 25% del territorio del departamento. Se consideró la red hídrica del departamento, para la que se estableció un área de influencia de 500 metros aplicando un buffer a la capa correspondiente, cubriendo aproximadamente un 3% del territorio. Los núcleos urbanos, que representaron aproximadamente el 7% del territorio, son criterios de restricción, a los que se les asignó un área de influencia de 500 metros mediante la herramienta buffer. Estos criterios de restricción se convirtieron en ráster y se reclasificaron, asignando el valor 0 a los datos dentro del área de influencia designada y el valor 1 al resto del territorio para cada capa, como se muestra en la Figura 5. En esta representación, los valores 0 se han marcado en color morado, indicando las zonas con restricción por el criterio, mientras que los valores 1 se han representado en color verde, señalando las zonas sin restricción por el criterio.

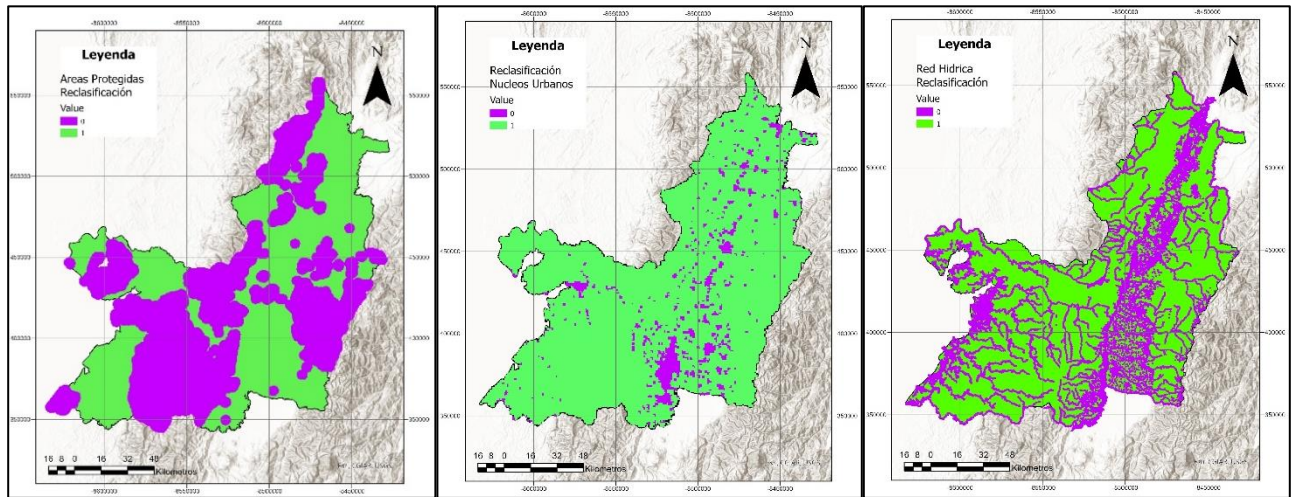


Figura 5: Criterios de restricción utilizados

Fuente. Elaboración propia, 2023.

Para la central eléctrica con recurso solar se tuvo como principal criterio de selección la radiación solar. Para obtener el dato de radiación solar se utilizó la herramienta Radiación Solar de Áreas del software GIS, con la que se calculó la cantidad de radiación solar en la zona de estudio, considerando el año y cuánto tiempo se mide, que para este caso se tomó la radiación del 2010, con intervalos de 1 hora. Una vez obtenido el ráster de radiación, se procedió a dividirlo sobre mil para tener la medida de kWh/m². Posteriormente, se realizó una reclasificación donde se indica que las zonas de mayor radiación son cercanas a 10 y las de menor radiación solar son cercanas a 0, como se muestra en la Figura 6. En esta figura se observa que en las zonas donde hay pendientes más bajas, la radiación solar es mayor, esto se puede deber a la poca vegetación que se presenta a esta altura. Por otro lado, en las zonas cercanas a la cordillera occidental y a la zona costera, se presentó una menor radiación solar, esto indica la alta presencia de la vegetación boscosa la cual absorbe mayor cantidad de radiación.

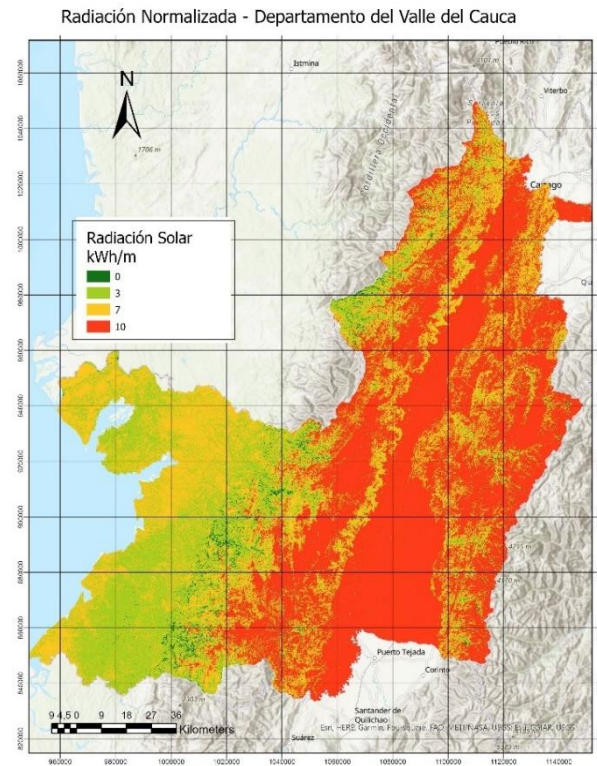


Figura 6: Radiación Solar Reclasificada

Fuente. Elaboración propia, 2023

Ahora bien, para la central eléctrica con recurso eólico, el criterio principal para ella es la velocidad del viento en una determinada área. Para ello, se utilizó la información del IDEAM de Velocidad del Viento Media en el periodo comprendido del 2000 al 2010, esta se representa como se muestra en la Figura 7. Donde la velocidad del viento 2-3 es la más baja y mayor a 13 es la más alta. Para las centrales eléctricas con recurso eólico se consideró que las velocidades óptimas para generar esta energía son de 5 a 9 metros por segundo (m/s), porque las turbinas producen energía significativa en esas velocidades.

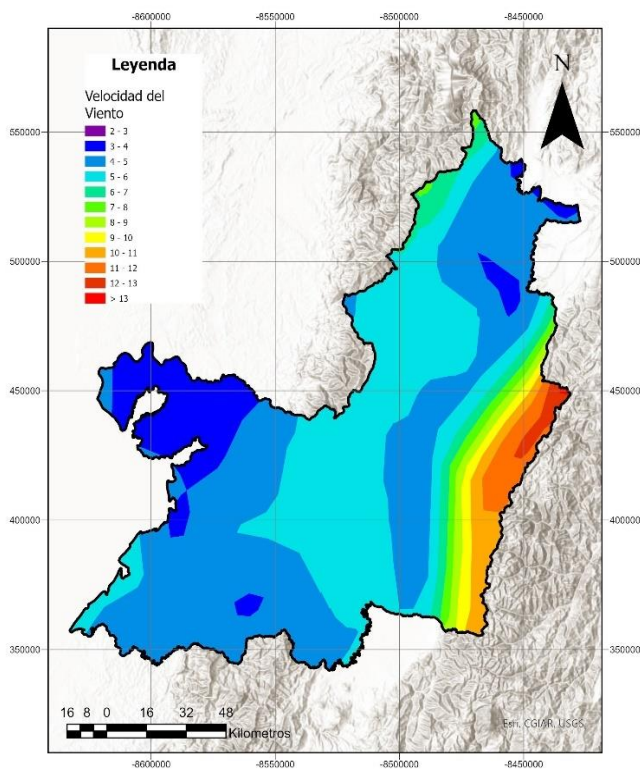


Figura 7: Velocidad del Viento en el Valle del Cauca (2000-2010)

Fuente: Elaboración propia

Información: IDEAM, Velocidad del Viento 2000-2010

Según lo expuesto, se analizó los criterios de selección. Cabe destacar que se adoptaron parámetros distintos para cada central eléctrica, adaptándolos a las condiciones específicas de cada recurso (eólico y solar). Para la central eléctrica con recurso solar, se emplearon los parámetros detallados en la Tabla 4, mientras que, para la central eléctrica con recurso eólico, se hicieron uso de los parámetros consignados en la Tabla 5. Este enfoque diferenciado permitió una evaluación más precisa y ajustada a las características particulares de cada fuente de energía.

Tabla 4: Rango de parámetros utilizados para la Central Eléctrica con recurso Solar

Parametro	Rangos			
	0 -10	10-15	15-20	>20
pendiente (%)	0 -10	10-15	15-20	>20
radiación (kWh/m)	10 – 1523,98	1523,99 – 1776,68	1776,69 – 1945,51	1945,52 – 2604,26
distancia a Vias (m)	0 - 240	240 – 3500	3500 - 6000	6000 - 10000
distancia a Redes Electricas (m)	0 - 300	300 – 6500	6500 - 10000	10000 - 20000
distancia a cuerpos de agua (m)	0 – 500		>500	
distancia a nucleos urbanos (m)	0 – 500		>500	

Tabla 5: Rango de parámetros utilizados para la Central Eléctrica con recurso Eólico

Parametro	Rangos		
	Distancia a vías	0m - 300m	300m - 500m
Distancia a redes electricas	0m- 500m	500m - 800m	> 800m
Pendiente	0% - 10%	10% - 20%	> 20%
Distancia a nucleos urbanos	0m - 500m	> 500m	
Distancia a Cuerpos de agua	0m - 500m	> 500m	
Velocidad del Viento	2-4m/s	5-10m/s	>10m/s

Al realizar los buffers según los rangos previamente especificados, se determinó que, para la central eléctrica con recurso solar, la ubicación óptima se encuentra en distancias a las redes eléctricas que oscilan entre 300 y 6500 metros. No es recomendable la instalación a distancias de 0 a 300 metros de estas infraestructuras. En lo que respecta a las vías, se estableció que la instalación de estas centrales es apta a distancias de 240 a 3500 metros de las vías de comunicación, y no se aconseja la instalación a distancias de 0 a 240 metros.

Para la central eléctrica con recurso eólico, se identificó que la distancia aceptable entre esta central y las redes eléctricas debe ser de 500 a 800 metros, y no es aceptable la instalación de la central a distancias de 0 a 500 metros respecto a las redes eléctricas. En relación con las vías, se determinó que la instalación de la central eléctrica debe mantenerse a una distancia de 300 a 500 metros de las vías, y no se recomienda la instalación a distancias de 0 a 300 metros de las vías.

Con respecto a estas distancias, fundamentadas en investigaciones previas, respaldan la propuesta para identificar las ubicaciones más propicias para las centrales eléctricas con energías renovables en el departamento. Posteriormente, estos resultados se convirtieron en datos ráster, normalizándose y asignándoles valores en una escala de 10 a 0, donde 10 representa áreas idóneas para la instalación y 0 indica restricciones para su ubicación.

Realizadas estas operaciones de cada criterio seleccionado, se empleó la ecuación descrita, donde se suman las multiplicaciones de los criterios de selección por el peso asociado a cada uno, según lo establecido en las tablas 1 y 2. Para luego, multiplicarlo con cada criterio de restricción eliminando las zonas donde no es posible instalar centrales eléctricas con recurso solar o eólico.

Finalmente, con los valores resultantes entre 0 y 1, de los mapas se estableció un umbral de 0,9 donde las zonas con valor igual o mayor a este umbral serían la zona ideal para instalar estas centrales, las cuales se observan de color rojo, por otra parte, las zonas con menos de 0,9 no son aptas, que se observan de color amarillo (Figura 8).

Esta figura mostró que las zonas donde tiene mejores resultados para la instalación de la central eléctrica con recurso solar, son las que se caracterizan por ser valles, es decir, con pendientes más bajas, además, de acuerdo al IDEAM en su artículo de la *VARIACIÓN ESPACIO TEMPORAL*, se mencionó que los promedios más altos de radiación solar se encontraron en amplios sectores de la región Caribe, la Orinoquía y los Valles Interandinos, mientras que los menores promedios de radiación solar se encontraron en la zona del pacifico, lo cual concuerda con los resultados obtenidos, puesto que las zonas ideales para la instalación de estas centrales solares, son cercanas al norte, centro y sur-oriental del departamento, en los municipios de Cartago, Tuluá, Buga, Yumbo, Cali y Jamundí, siendo estos municipios los que en gran parte del año reciben mayor cantidad de radiación solar, según el artículo mencionado del IDEAM. Las zonas que son óptimas para ubicar este

tipo de central corresponden a 33959,63 hectáreas, es decir, un 2% del área del departamento del Valle del Cauca.

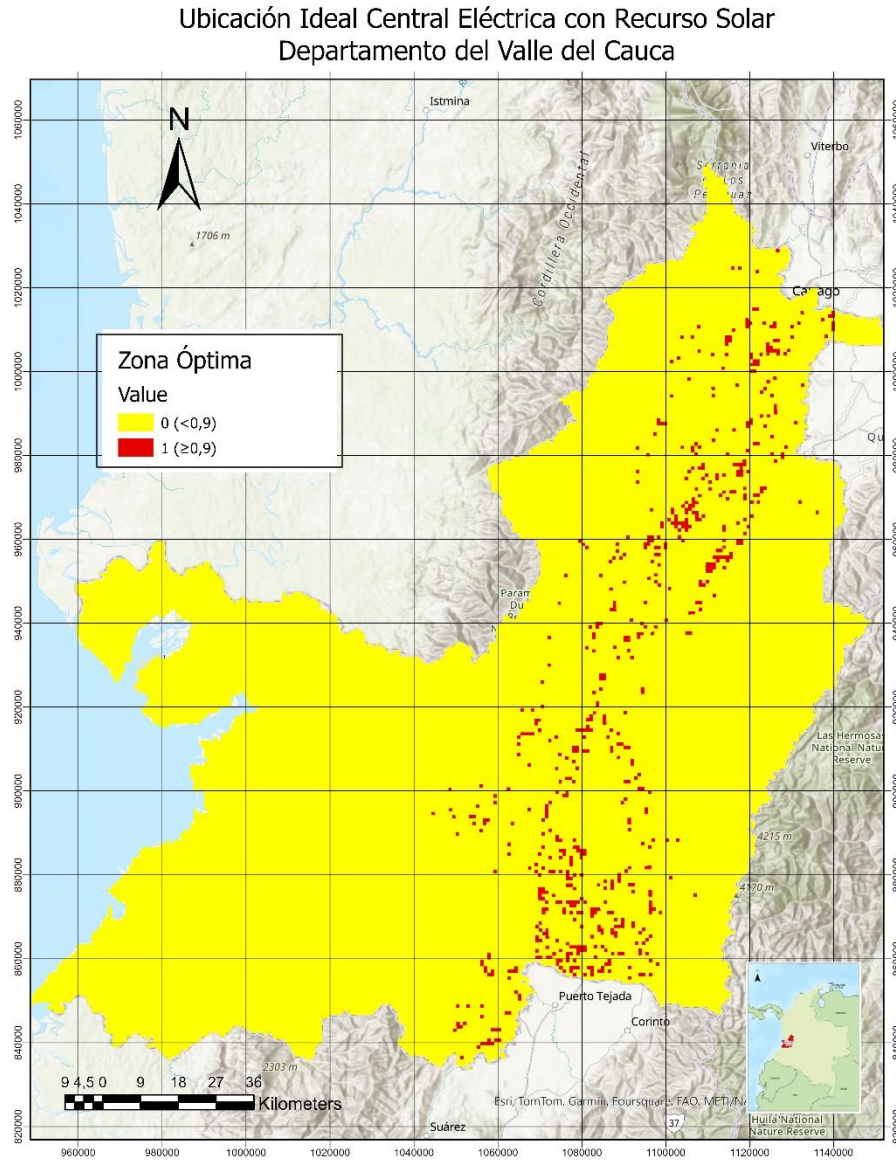


Figura 8: Ubicación ideal para la instalación de una central eléctrica con recurso solar.

Fuente. Elaboración propia, 2023.

Por otro lado, los resultados del parque eólico se presentan en la Figura 9, donde se estableció un umbral de 0,9. Este umbral indica que las zonas con valores superiores a 0,9 son consideradas como lugares ideales para la instalación del parque eólico. Según lo obtenido en la Figura 9, en el Valle del Cauca hay 600 hectáreas, equivalentes a un 0.03 % aproximadamente del Departamento, donde se puede instalar un parque eólico.

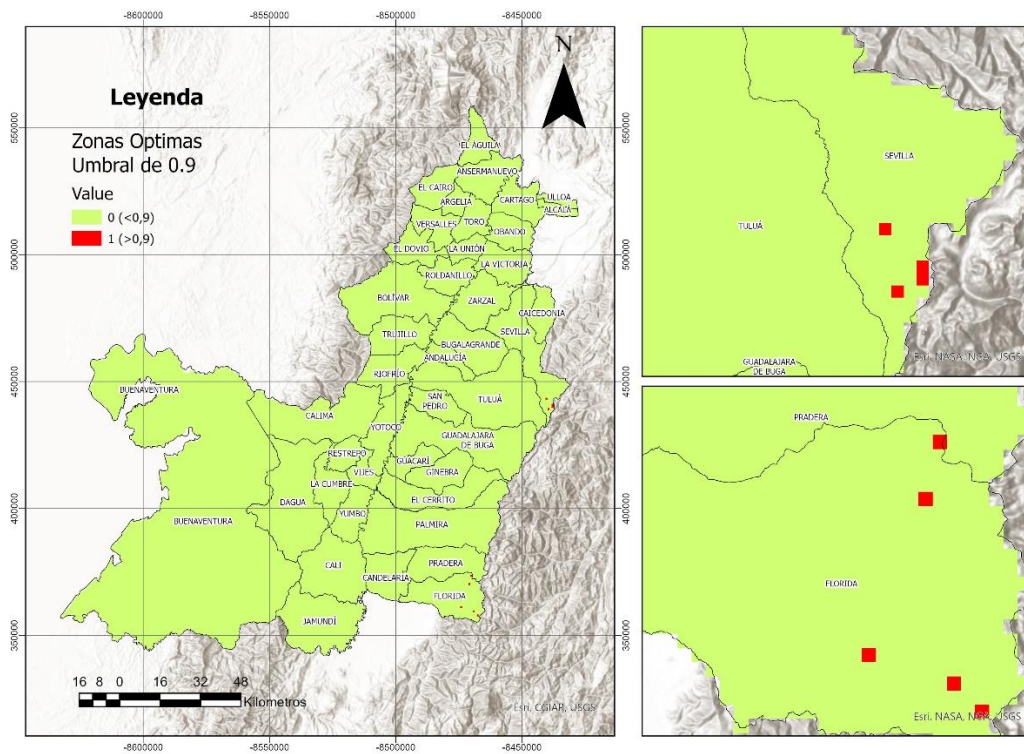


Figura 9: Ubicación ideal para la instalación de una central eléctrica con recurso eólico en el Departamento del Valle del Cauca.

Fuente. Elaboración propia, 2023.

Según la investigación y la metodología empleada para identificar la ubicación óptima para la instalación de centrales eléctricas con recurso solar, mediante los sistemas de información geográfica, fueron en áreas entre las cordilleras occidental y la central en el departamento, que cuentan con las características necesarias para que una central de este tipo pueda brindar suficiente energía para abastecer poblaciones aledañas. Además, se muestran las zonas donde no se pueden instalar estas centrales, como las zonas sobre la cordillera occidental o cerca hacia la costa pacífica, debido a las áreas protegidas del departamento, ya que en su mayoría se encuentran en la zona selvática que recubre el municipio de Buenaventura.

Para parques eólicos, las zonas aledañas al municipio de Florida se identificaron como una localidad que satisface los parámetros técnicos, económicos y ambientales, ya que él estudio mostró 185 hectáreas aproximadamente disponibles para instalar parques eólicos lo que equivale a un 0,5 % del municipio. Sin embargo, es importante tener en cuenta que para que un parque eólico sea viable desde el punto de vista de la generación de energía, se requiere una capacidad mínima de producción de 50 megavatios (MW). Esto implica que se necesitaría un área mucho más extensa de al menos 9 kilómetros cuadrados para albergar la infraestructura necesaria y cumplir con los objetivos de generación de energía establecidos. Para el Parque Eólico en el Valle del Cauca, al restringir su ubicación a un área mínima necesaria para generar al menos 50MW, actualmente no se identifica ninguna zona que cumpla con el requisito del área óptima para su instalación.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de la ubicación apta para la central con recurso solar mostró que un 2 % del territorio del departamento es apto, aproximadamente 34.000 hectáreas. Estas zonas se encuentran cercanas a municipios de Cartago, Tuluá, Buga, entre otros, siendo estos reconocidos por su alta temperatura. Esto se debe a su ubicación geográfica, ya que están a una menor altitud, además, de que se caracteriza por tener menos vegetación alta en comparación de zonas como las del

municipio de Dagua. Por lo tanto, se incrementa la temperatura anual.

Con lo anterior, se evidencia la necesidad de analizar la relación entre este tipo de instalaciones y las características de las zonas seleccionadas, por lo que subraya la importancia de realizar análisis detallados y específicos para el recurso solar. Este resultado también resalta la relevancia de considerar factores como la radiación solar, la topografía y las restricciones ambientales en el proceso de selección de ubicaciones para proyectos de energía solar, ya que la cantidad de radiación solar que recibe por hora del día en un área determinada es equivalente a la cantidad de energía que generaría la central eléctrica, además, de que se requiere de una pendiente muy específica para que la instalación de los paneles solares tengan un mayor aprovechamiento de captación de la radiación solar durante el día.

A diferencia de la central eléctrica con recurso solar, los desafíos para la instalación de centrales eólicas en el Valle del Cauca son evidentes, dado que el requisito mínimo de área para la instalación de turbinas eólicas es de aproximadamente 9 km² para generar 50 MW, lo que representa un factor determinante. Según datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) de Colombia, en 2019, el consumo promedio de energía eléctrica por persona fue de alrededor de 1,300 kWh por año, lo que abastecería a aproximadamente 337,000 personas al año. No obstante, los resultados de este análisis evidencian que solo el 0.03%, es decir, 1.85 km² del departamento es adecuado para este propósito. A pesar de una evaluación exhaustiva que consideró criterios como la velocidad del viento, la topografía, las restricciones ambientales y la geografía.

En ese contexto, la implementación de parques eólicos de gran tamaño en el Valle del Cauca no es factible. Esto se debe a una variedad de factores técnicos, incluida la disponibilidad y calidad del recurso eólico, la topografía del terreno, la estabilidad del suelo y la infraestructura disponible. Sin embargo, aunque los parques eólicos a gran escala tienen limitaciones para su instalación, existe la posibilidad de generar energía con recurso eólico con turbinas de menor capacidad, como las de 10KW, que podrían ser una alternativa viable en ciertas áreas de la región, ya que estas requieren un área aproximada de 0.01 km² y pueden abastecer a un máximo de 15-30 personas cada una

Por lo anterior, es necesario reconocer que la evaluación de proyectos eólicos va más allá de considerar únicamente aspectos ambientales y sociales; también implica evaluar la capacidad del área para generar la energía prevista. Ante esta realidad, se hace necesario realizar un análisis más exhaustivo que incorpore una variedad más amplia de criterios. En este sentido, se requiere una revisión integral de los criterios utilizados, explorando ajustar los umbrales de áreas mínimas requeridas y la cantidad de energía a producir. Esto permitiría una evaluación más precisa y adaptable a las características específicas del Valle del Cauca. La ampliación del conjunto de criterios considerados, junto con el ajuste de los umbrales según las particularidades regionales, proporcionaría información valiosa para identificar oportunidades de ubicación viables y optimizar la generación de energía eólica en la zona.

Por otra parte, la idea de normalizar los criterios de selección sirve para tener una medida estándar de cada parámetro, así que permite estudiarlos mejor y analizarlos, pero fue necesario establecer desde un inicio los rangos de influencia de cada criterio, para no generar reprocesos. De igual manera, establecer los pesos a cada criterio es importante, para indicar cuáles son los parámetros que tienen mayor incidencia en la instalación de una central eléctrica con recurso solar o eólico.

Por lo anterior, el proceso de evaluación de la viabilidad de localización de centrales eléctricas con recursos solar o eólico, mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y análisis multicriterio ha proporcionado valiosas perspectivas, aunque no exentas de desafíos. Las dificultades encontradas, como limitaciones en el acceso a información crucial, han evidenciado tanto las posibilidades como las limitaciones de estas herramientas. La efectividad del análisis depende de la disponibilidad y la calidad de la información inicial, el superar las limitaciones e identificar las oportunidades amplia el potencial de localizar zonas factibles para la instalación de centrales eléctricas con recursos solar o eólico.

En conclusión, el uso de la metodología de Análisis Multicriterio mediante los SIG es útil para tomar esta decisión;

visualizar criterios de selección y restricción, simplifican el trabajo para medir con qué condiciones es ideal esta instalación. Además, que de manera gráfica se pueden eliminar las zonas de restricción para que se descarten por completo, como lo son las áreas protegidas o las redes hídricas. Por lo tanto, la identificación de áreas óptimas para parques solares en el Valle del Cauca proporciona una base sólida para la planificación e implementación de infraestructuras sostenibles de generación de energía en la región, contribuyendo positivamente a la diversificación de la matriz energética y a la reducción de la dependencia de fuentes no renovables.

REFERENCIAS

1. De la Paz Blanco, C. (2011). Trabajo fin de máster metodologías para la localización óptima de centrales de biomasa y minihidráulica como recursos energéticos renovables.
2. El Tiempo. (2020). Los lugares que aún viven sin energía eléctrica en Colombia. [Online] Available at: <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/los-lugares-que-aun-viven-sin-energia-electrica-en-colombia-325892> [Accessed 23 March 2023].
3. Eslava, J., & López, L. (2017). Estrategias de control de calidad de energía en microrredes rurales. [Online] Available at: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/5746/6943> [Accessed 22 March 2023].
4. Fuentes No Convencionales de Energía Renovable - FNCER. (n.d.). [Online] Available at: <https://minenergia.gov.co/es/misional/fuentes-no-convencionales-de-energ%C3%ADa-renovable-fncer/> [Accessed 22 March 2023].
5. García, N. A., et al. (2021). Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.
6. Guerrero Hoyos, B. G., Vélez Macías, F. D. J., & Morales Quintero, D. E. (2020). Energía eólica y territorio: sistemas de información geográfica y métodos de decisión multicriterio en La Guajira (Colombia). *Ambiente y Desarrollo*, 23(44), DOI 10.11144/javeriana.ayd23-44.eets.
7. Gutiérrez Velayos, J. (2018). Metodología para la localización óptima de instalaciones de energía solar fotovoltaica en la isla de Tenerife. Universidad Católica de Ávila.
8. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (s.f.). Colombia en mapas. Recuperado de <https://www.colombiaenmapas.gov.co/>
9. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (s.f.). Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/>
10. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (s.f.). Datos abiertos - IGAC. Recuperado de <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-igac>
11. Luz, M., Serrano, T., & Molina Ruiz, J. (2005). Municipio de la región de Murcia.
12. Ministerio de Minas y Energía. (2021). Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia. [Online] Available at: www.laimprentaeditores.com
13. Moradi, S., et al. (2020). Multi-criteria decision support system for wind farm site selection and sensitivity analysis: Case study of Alborz Province, Iran. *Energy Strategy Reviews*, 29, DOI 10.1016/j.esr.2020.100478.
14. Obando Chaparro, M. F. (2017). Identificación del lugar óptimo de instalación de un parque eólico en el departamento del Atlántico.
15. Orrego, S. G. (2021). Análisis espacial multicriterio para la ubicación de parques eólicos y granjas solares en Colombia.
16. Ostapenko, O., et al. (2022). Application of Geoinformation Systems for Assessment of Effective Integration of Renewable Energy Technologies in the Energy Sector of Ukraine. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(2), DOI 10.3390/app12020592.
17. Pérez Escalona, L. M. (2021). Leandro Miguel Pérez Escalona, SIG y APH. Universidad de Holguín.
18. Quintero & Morales (2018). METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE INSTALACIONES DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN LA ISLA DE TENERIFE,

- ESPAÑA. Congreso Nacional del Medio Ambiente. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/rns/v3n2/2631-2654-rns-3-02-00047.pdf
19. Rentería Mena, L. F. (2021). ANÁLISIS ESPACIAL MULTICRITERIO PARA LA UBICACIÓN DE PARQUES EÓLICOS OFFSHORE EN LA REGIÓN CARIBE COLOMBIANA.
 20. Szurek, M., et al. (2014). GIS-Based method for wind farm location multi-criteria analysis. *Mining Science*, 21, 65–81, DOI 10.5277/ms142106.
 21. Sánchez Lozano, J. M., et al (2012). Selection of optimal locations of solar photovoltaic systems in the northwest of the Region of Murcia through SIG and ELECTRE-TRI.
 22. UPME. (2021). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. [Online] Available at: <http://www1.upme.gov.co/sgic/>
 23. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (s.f). Recuperado de <https://www1.upme.gov.co/>
 24. Vaca Aldas, F. (2018). Análisis y determinación de las zonas óptimas para la instalación de un proyecto eólico en Ecuador a través de métodos de toma de decisión multicriterio. Universidad Politécnica de Cartagena.
 25. VARIACIÓN ESPACIO TEMPORAL - IDEAM. (n.d.). Retrieved November 28, 2023, from <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/variacion-espacio-temporal1>