

Evaluación de los potenciales de fuentes no convencionales de energía renovable para el aprovechamiento de recursos en el municipio de Charalá, Santander

Camilo Esteban Delgado Diaz y Karol Vanesa Medina Salcedo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Químico

Trabajo de investigación

Director

Duban Fabián García Navas

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

Primeramente, agradezco a Dios por darme la oportunidad y la fortaleza para hacer posible este proyecto. A mis padres, Humberto Delgado y Olga Diaz, por su amor, apoyo incondicional y confianza, así como a mi familia por su ánimo y motivación. A mis compañeros de estudio, con quienes compartí esfuerzos y aprendizajes a lo largo de la carrera. Finalmente, a todas las personas que de una u otra forma contribuyeron con su apoyo y guía en la culminación de este logro tan importante en mi vida.

Camilo Esteban Delgado Diaz.

Este trabajo está dedicado a mi mamá, Gloria Salcedo, por su paciencia, compañía y apoyo en cada etapa, por inspirarme a soñar con un mundo nuevo; a mi abuela, Lucila Martínez, por su aliento y fortaleza en los momentos de duda. A Bruno, mi perro, por su compañía en las noches de estudio; y a mis queridos amigos, por ser certeza en medio de la incertidumbre, familia en los domingos solitarios, y compañeros de aprendizaje y crecimiento.

Karol Vanesa Medina Salcedo.

### **Agradecimientos**

A la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Ingeniería Química y a sus docentes por la formación brindada durante la carrera profesional y por los conocimientos compartidos a lo largo de este proceso.

Al profesor Duban Fabián García Navas, director de este trabajo, por su orientación, acompañamiento y apoyo en el desarrollo de la investigación.

A nuestros compañeros de carrera, quienes con sus aportes y discusiones enriquecieron nuestra formación académica. Y de manera especial, a nuestras familias, por su apoyo incondicional, confianza y motivación constante para alcanzar este logro.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	14
1. Objetivos .....	15
1.1 Objetivo General .....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Marco teórico .....	16
2.1 Energía solar .....	16
2.2 Energía eólica.....	16
2.3 Energía a partir del recurso hídrico.....	17
2.4 Energía a partir de biomasa.....	17
2.5 Energía geotérmica .....	18
3. Estado del arte.....	19
4. Metodología .....	21
4.1 Bases de datos .....	21
4.2 Modelos de potenciales.....	22
4.3 Análisis multicriterio.....	26
5. Resultados y Análisis .....	27
5.1 Evaluación del recurso .....	27
5.1.1 Solar .....	27
5.1.2 Eólico .....	29
5.1.3 Hidroelectricidad.....	31

5.1.4 Biomasa .....	32
5.1.5 Geotermia .....	34
5.2 Potenciales energéticos .....	34
5.2.1 Solar .....	34
5.2.2 Eólico .....	36
5.2.3 Hidroelectricidad.....	39
5.2.4 Biomasa .....	41
5.2.5 Comparación de potenciales .....	43
5.3 Análisis multicriterio.....	44
6. Conclusiones .....	48
7. Recomendaciones.....	50
Referencias bibliográficas.....	51
Apéndices.....	60

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Comparación del error de la radiación solar entre POWER-NASA y ERA5 respecto al IDEAM.</i> .....	28
Tabla 2 <i>Caudal promedio en los puntos meteorológicos en Nemizaque y Puente Llano.</i> .....	31
Tabla 3 <i>Potencial solar teórico anual en función del área disponible.</i> .....	35
Tabla 4 <i>Configuración y AEP estimada para sistemas fotovoltaicos según potencia instalada.</i>	36
Tabla 5 <i>Parámetros utilizados y resultado del cálculo del potencial eólico teórico.</i> .....	37
Tabla 6 <i>Distribución del AEP neto por rangos de velocidad del viento.</i> .....	38
Tabla 7 <i>Energía entregada a partir de RSOU.</i> .....	43
Tabla 8 <i>Ponderación y tipo de criterio de evaluación.</i> .....	46

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Mapa de calor de la irradiancia global por hora y mes</i> .....	29
Figura 2 <i>Mapa de calor de la velocidad del viento por hora y mes.</i> .....	30
Figura 3 <i>Distribución del caudal entre 2000–2024 del Río Pienta (izquierda) y Río Táquiza (derecha).</i> .....	31
Figura 4 <i>Distribución promedio de la masa seca residual por cultivo para el periodo 2019–2023, con base en datos de las Evaluaciones Agropecuarias Municipales (UPRA)</i> .....	33
Figura 5 <i>Consulta de áreas geotérmicas en Charalá a partir de la Servicio Geológico Colombiano</i> .....	34
Figura 6 <i>Curva de duración de caudal.</i> .....	39
Figura 7 <i>Potencial hidroenergético en Charalá para el Río Pienta y Táquiza.</i> .....	40
Figura 8 <i>Potencial energético biomasa residual a partir de cultivos.</i> .....	42
Figura 9 <i>Indicadores específicos de potencial energético solar, eólico y biomasa e Hidroeléctrico</i> .....	44
Figura 10 <i>Resultados evaluación multicriterio a) solar, b) eólica, c) hidroelectricidad d) biomasa</i> .....	47
Figura 11 <i>Utilidad de cada tecnología</i> .....	48

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A Datos de los recursos energéticos del municipio de Charalá.....	60
Apéndice B Energía producida por sistemas eólicos en Charalá.....	63
Apéndice C Evaluación multicriterio de tecnologías renovables .....	64

## Glosario

**AEP (Annual Energy Production):** Cantidad total de energía eléctrica que un sistema de generación produce en un año, considerando las condiciones de recurso disponibles y las características técnicas del sistema.

**Área de barrido:** Superficie circular definida por el movimiento de las palas de un aerogenerador, directamente relacionada con la cantidad de energía captada del viento.

**Biomasa:** Materia orgánica de origen vegetal, animal o derivada de residuos que puede ser utilizada como recurso energético a través de procesos de conversión térmica, química o biológica.

**Caída hidráulica:** Se usa el símbolo  $\Delta H$  y representa la diferencia de altura entre dos puntos de un curso de agua, que determina la energía potencial disponible para su aprovechamiento hidroeléctrico.

**Caudal Q95:** Caudal de un río que es igualado o superado el 95 % del tiempo durante un periodo de observación, empleado como indicador de la disponibilidad hídrica confiable.

**Eficiencia del sistema:** Relación entre la cantidad de recurso energético captado por una tecnología y la fracción de este que logra transformarse efectivamente en energía útil.

**Fuentes No Convencionales de Energía Renovables (FNCER):** Recursos de energía renovable ambientalmente sostenibles que en Colombia tienen un uso limitado o marginal. Incluyen la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la energía eólica, la geotérmica, la solar, la mareomotriz, así como el hidrógeno verde y azul. Esta definición se ajusta a la Ley 1715 de 2014, que regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.

**GHI (Global Horizontal Irradiance):** Magnitud que representa la energía solar incidente por unidad de área horizontal en un periodo de tiempo determinado.

**LCOE (Levelized Cost of Energy):** Indicador económico que expresa el costo promedio de generar una unidad de electricidad durante la vida útil de una planta, considerando inversión inicial, operación, mantenimiento y depreciación.

**Masa seca:** Fracción de la biomasa que permanece una vez eliminado su contenido de agua mediante procesos de secado.

**MCDM (Multicriteria Decision Making):** Conjunto de técnicas empleadas para evaluar y seleccionar alternativas cuando intervienen múltiples criterios, ampliamente aplicadas en la planificación energética.

**PCI (Poder Calorífico Inferior):** Cantidad de energía que puede liberarse en la combustión completa de un combustible por unidad de masa, sin recuperar el calor contenido en el vapor de agua de los gases de combustión.

**PCH (Pequeña Central Hidroeléctrica):** Instalación hidroeléctrica de baja capacidad, generalmente inferior a 20 MW, que aprovecha caudales y caídas hidráulicas de ríos medianos o pequeños para generar electricidad.

**Potencial teórico:** Cantidad máxima de energía que podría obtenerse de un recurso en condiciones ideales, sin considerar limitaciones técnicas ni pérdidas.

**RSOU (Residuos Sólidos Orgánicos Urbanos):** Fracción de los residuos municipales compuesta por restos de alimentos, residuos de plazas de mercado y otros materiales biodegradables, con potencial de aprovechamiento energético.

**Sistema fotovoltaico:** Conjunto de paneles solares y equipos auxiliares que convierten la energía solar en electricidad.

**Velocidad de corte:** Velocidad mínima de viento necesaria para que una turbina comience a generar energía.

## Resumen

**Título:** Evaluación de los potenciales de fuentes no convencionales de energía renovable para el aprovechamiento de recursos en el municipio de Charalá, Santander<sup>1\*</sup>

**Autores:** Camilo Esteban Delgado Diaz, Karol Vanesa Medina Salcedo<sup>2\*\*</sup>

**Palabras Clave:** Energías renovables, Evaluación de potenciales energéticos, Viabilidad tecnológica, Método de decisión multicriterio.

**Descripción:** En Colombia, el aprovechamiento de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) se ha convertido en una alternativa estratégica para diversificar la matriz energética y promover un suministro más sostenible en municipios con limitaciones de cobertura eléctrica. En este contexto, se evaluó el potencial energético de Charalá, Santander, a partir de tecnologías consideradas por la Ley 1715 de 2014 como FNCER: solar, eólica, pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) y biomasa. La metodología se basó en la recopilación y validación de datos históricos de irradiancia, viento, caudales y biomasa, utilizando fuentes internacionales como POWER NASA y ERA5, junto con registros nacionales del IDEAM y la UPME. Posteriormente, se calcularon los potenciales teóricos mediante modelos específicos, se plantearon diferentes escenarios de aprovechamiento, y se implementó el método de decisión multicriterio MAUT, formulado a partir de funciones de utilidad considerando criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales. Como resultado de este estudio se determinó que la energía solar representa la alternativa más competitiva en Charalá por la consistencia y estabilidad del recurso solar, mostrando un crecimiento lineal entre el área instalada y la energía generada. La biomasa y las PCH evidenciaron un potencial intermedio, condicionado por la disponibilidad de residuos y la variabilidad hídrica, respectivamente, mientras que la energía eólica mostró un rendimiento limitado debido a la escasa intensidad de los vientos en la zona.

---

<sup>1\*</sup> Trabajo de Grado

<sup>2\*\*</sup> Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

Director: Duban Fabián García Navas. Doctor en Ingeniería Química.

### Abstract

**Title:** Evaluation of the potential of non-conventional renewable energy sources for the use of resources in the municipality of Charalá, Santander<sup>3\*</sup>

**Authors:** Camilo Esteban Delgado Diaz, Karol Vanesa Medina Salcedo<sup>4</sup>

**Key Words:** Renewable energies, Energy potential assessment, Technological feasibility, multi-criteria decision method.

**Description:** In Colombia, the use of non-conventional renewable energy sources (FNCER) has become a strategic alternative for diversifying the energy matrix and promoting a more sustainable supply in municipalities with limited electricity coverage. In this context, the energy potential of Charalá, Santander, was evaluated based on technologies considered by Law 1715 of 2014 as NURE: solar, wind, small hydroelectric plants (SHP), and biomass. The methodology was based on the collection and validation of historical data on irradiance, wind, flow rates, and biomass, using international sources such as POWER NASA and ERA5, together with national records from IDEAM and UPME. Subsequently, theoretical potentials were calculated using specific models, different utilization scenarios were proposed, and the MAUT multi-criteria decision method was implemented, formulated from utility functions considering technical, economic, environmental, and social criteria. As a result of this study, it was determined that solar energy represents the most competitive alternative in Charalá due to the consistency and stability of the solar resource, showing linear growth between the installed area and the energy generated. Biomass and small hydroelectric plants showed intermediate potential, conditioned by the availability of waste and water variability, respectively, while wind energy showed limited performance due to the low wind intensity in the area.

---

<sup>3\*</sup> Degree Work

<sup>4</sup>Physical-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering. Director: Duban Fabián García Navas. Doctor of Chemical Engineering.

## Introducción

En Colombia, la energía eléctrica depende principalmente de la generación hidroeléctrica, una fuente renovable pero vulnerable a fenómenos como El Niño, lo que obliga a recurrir a fuentes no renovables e incrementa tanto las emisiones de gases de efecto invernadero como los costos energéticos (Borrero Morales et al., 2023). Por ello, líderes energéticos y organizaciones internacionales destacan la urgencia de diversificar la matriz, especialmente a partir de recursos renovables (World Energy Council, 2024). Ante el impacto del cambio climático, estas fuentes representan una alternativa para reducir la dependencia de recursos limitados y avanzar hacia una transición más justa y sostenible. En este marco, la Ley 1715 de 2014 fomenta el uso de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), impulsando hacia un sistema más autónomo y sostenible (Congreso de Colombia, 2014).

Charalá comparte esta necesidad y, a través de su Plan Territorial de Desarrollo (PTD) “Charalá para todos” (2024-2027), refleja el compromiso con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el objetivo 7: garantizar energía asequible y limpia (Alcaldía Municipal de Charalá - Santander, 2024). Sin embargo, depende de fuentes externas, lo que lo hace vulnerable a interrupciones climáticas que afectan la calidad de vida y el desarrollo económico (Vanguardia, 2024). Para promover un crecimiento verde, el municipio apuesta por las FNCER como estrategia de resiliencia y autosuficiencia, siendo este estudio un primer paso hacia la diversificación de su matriz. Aunque las FNCER han tomado fuerza en Colombia, Charalá aún no ha explorado su potencial, lo que evidencia desconocimiento sobre sus beneficios. Por ello, es esencial identificar y evaluar las fuentes renovables disponibles, con el fin de consolidar un inventario de recursos que respalde su aprovechamiento energético.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Evaluar los potenciales energéticos de las fuentes no convencionales de energía renovable para el aprovechamiento de recursos en el municipio de Charalá, Santander.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Implementar una metodología para la estimación de los potenciales energéticos de las fuentes no convencionales renovables disponibles en el área de interés.

Determinar los potenciales energéticos de las fuentes no convencionales renovables en el área de interés utilizando información actualizada.

Comparar la viabilidad de las diferentes tecnologías de aprovechamiento de recursos renovables en el área de interés mediante un análisis multicriterio.

## **2. Marco teórico**

### **2.1 Energía solar**

La energía solar se origina a partir de las reacciones de fusión nuclear que ocurren en el núcleo del sol, las cuales liberan radiación que se propaga a través del espacio y alcanza la Tierra (Entrena González, 2016). La evaluación de este recurso, según el Atlas de radiación solar (IDEAM, Ministerio de Medio Ambiente & UPME, 2005), requiere analizar variables como la radiación global, compuesta por la suma de radiación directa y difusa, así como el brillo solar, considerado un indicador más accesible por la simplicidad y menor costo de medición frente a la instrumentación requerida para medir la radiación de forma directa.

Entre las tecnologías que permiten el aprovechamiento de la energía solar, la generación fotovoltaica destaca por su eficiencia. Estos sistemas transforman la irradiación solar en energía eléctrica sin necesidad de combustibles, lo que los hace bastante sostenibles y adaptables a diferentes escalas (Rodríguez-Urrego & Rodríguez-Urrego, 2018). Por ello, la energía solar fotovoltaica representa una alternativa viable para garantizar el suministro eléctrico en distintas regiones, incluidas aquellas con acceso limitado a las redes de distribución (López et al., 2019).

### **2.2 Energía eólica**

El viento surge del movimiento de las masas de aire en la atmósfera, que se genera por las diferencias de temperatura y presión causadas por la radiación solar. En este sentido, la energía eólica se considera una forma indirecta de la energía solar. Como resultado, la velocidad y dirección del viento en una región dependen de diferentes factores como la ubicación geográfica, las condiciones climáticas locales y la altura sobre el nivel del suelo. Por esta razón, para evaluar

el recurso eólico, es necesario analizar su variabilidad temporal, desde cambios diarios hasta variaciones estacionales y anuales (Talayero Navales & Telmo Martínez, 2011).

La energía contenida en el viento se encuentra en forma cinética, y para su aprovechamiento se emplean aerogeneradores que la transforman en electricidad. La cantidad de energía eólica aprovechable depende tanto de la frecuencia con que se registran ciertas velocidades de viento como de la potencia generada por la turbina en esos rangos. En este sentido, la caracterización del viento es fundamental para optimizar la implementación de aerogeneradores, ya que permite identificar ubicaciones estratégicas, y estimar la producción energética esperada (ICB, 2012).

### **2.3 Energía a partir del recurso hídrico**

Es la energía producida por el movimiento del agua, la cual, al pasar por una turbina acoplada a un generador, transforma su energía cinética en energía mecánica. Las hidroeléctricas permiten aprovechar el agua en movimiento que circula por los ríos. De acuerdo con la capacidad instalada, se clasifica en picocentrales, microcentrales, minicentrales, pequeñas hidroeléctricas (PCH), incluidas entre las FNCER y centrales hidroeléctricas (CH). El potencial de este recurso se cuantifica teniendo en cuenta el caudal aprovechable, la caída hidráulica —siendo esta la diferencia de altura entre el lugar de captación del agua y el sistema de turbinas— y la eficiencia de las distintas tecnologías de aprovechamiento (Elger et al., 2020).

### **2.4 Energía a partir de biomasa**

La biomasa se refiere a cualquier recurso renovable proveniente de materia orgánica de origen vegetal o animal, ya sea de forma natural o como resultado de actividades humanas o animales, incluyendo subproductos de procesos agrícolas e industriales (Ferreira et al., 2018). Al

provenir de fuentes tan variables, su composición es diversa, pero en general presenta alto contenido de carbono, hidrógeno y oxígeno, lo que le otorga una cantidad significativa de energía liberada, cuantificada mediante el poder calorífico inferior (PCI) (Junfeng et al., 2005).

Las tecnologías para su aprovechamiento se dividen en térmicas y biológicas, y su selección depende del costo de inversión y las dificultades del pretratamiento. De forma general, los modelos para calcular el potencial energético de la biomasa parten de la premisa de que el contenido de energía es proporcional a la masa seca, la cual puede estimarse a partir de características intrínsecas como el valor calorífico, el contenido de humedad, la composición elemental, las propiedades de las cenizas, entre otras (Sheng & Azevedo, 2005).

## 2.5 Energía geotérmica

La energía geotérmica proviene del calor interno de la tierra, generado por la descomposición radiogénica de elementos en la corteza y por el calor residual del proceso de formación del planeta (Akrami et al., 2017). Dependiendo de la temperatura y la proporción de vapor en el fluido hidrotermal, se clasifica en distintos rangos de entalpía, que definen su viabilidad para diferentes aplicaciones. El calor se transmite a través del magma y las rocas calientes, lo que permite su extracción y transformación en electricidad de manera estable (Dickson & Fanelli, 2004).

El aprovechamiento de este recurso inicia con la perforación de pozos profundos que alcanzan reservorios de agua subterránea expuestos al calor terrestre. Allí, con el aumento de la temperatura, el agua se transforma en vapor, el cual asciende bajo presión a través de tuberías hasta las turbinas, donde su energía térmica impulsa los generadores eléctricos y permite la producción final de electricidad (Santiago & Sebastián, 2024).

### 3. Estado del arte

La promulgación de la Ley 1715 de 2014 marcó un avance significativo en la promoción de energías renovables en Colombia, al establecer el marco regulatorio para la integración de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) al sistema eléctrico nacional, abarcando tecnologías como la solar, eólica, biomasa, geotérmica y PCH. Desde entonces, se han impulsado proyectos clave orientados a la sostenibilidad y la seguridad energética del país.

Si bien se han logrado progresos notables en proyectos solares en regiones como La Guajira y Cesar, el país aún enfrenta retos importantes para ampliar la adopción de las FNCER. En este sentido, tanto el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 (Departamento Nacional de Planeación - Colombia, 2022) como el Plan Energético Nacional 2020-2050 (UPME, 2020) destacan la integración de estas fuentes como eje central de la transición energética, proyectando la expansión de la capacidad solar y eólica, que en 2022 apenas representaban el 1,5 % y el 0,1 % de la capacidad instalada, respectivamente (Araújo & Cabré, 2023). En este escenario resaltan los 39 proyectos solares en operación, con 2375 MW de capacidad conjunta, entre ellos el parque El Paso (86 MW) en Cesar. Asimismo, en la Guajira, varios parques eólicos buscan aprovechar los fuertes y constantes vientos de la región (Rincón-Montenegro et al., 2024).

Otras fuentes renovables aún no alcanzan una participación destacada, aunque se han promovido iniciativas relevantes como la elaboración de atlas energéticos de biomasa, identificación de potenciales hidrológicos y estudios de gradientes geotérmicos. El análisis del potencial de recursos resulta esencial para el dimensionamiento y evaluación de la viabilidad de proyectos que los aprovechen (Rey et al., 2013), pero muchas investigaciones no consideran restricciones locales.

La metodología predominante en estudios de energías renovables combina el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Modelos de Decisión Multicriterio (MDMC), integrando factores técnicos, ambientales y regulatorios. En trabajos como el de Muñoz et al. (2014) se ha evaluado la viabilidad técnica y económica de sistemas híbridos solares y eólicos en diferentes regiones del país, mientras que Delgado y Aristizábal (2017) han realizado estudios sobre variables críticas de sistemas fotovoltaicos para analizar la producción energética en zonas específicas. Estas investigaciones destacan la importancia del análisis regional detallado.

En cuanto a los estudios sobre energía solar, investigaciones como la de Hernández et al. (2014) han modelado diferentes tecnologías fotovoltaicas en ciudades colombianas, lo que ha permitido realizar proyecciones más precisas sobre el potencial de esta tecnología, aunque los estudios se concentran en áreas urbanas, dejando un vacío significativo en pequeñas ciudades. En cuanto a la energía eólica, González et al. (2012) analizaron la dinámica de los vientos en diferentes regiones del país, identificando regiones con alto potencial eólico, especialmente en la Guajira, pero con enfoque preliminar, que no siempre considera factores clave que podrían afectar el desarrollo de los proyectos a nivel local.

Por su parte, entidades públicas como el IDEAM han desarrollado herramientas como los Atlas de Vientos y de Radiación Solar (IDEAM, UPME, 2017), que reportan para Santander una irradiación de 3.5–4.5 kWh/m<sup>2</sup>/día y velocidades de viento entre 1.5–2.5 m/s. un estudio integral en sitios específicos del departamento de Santander, y que abarque todos los potenciales de las FNCER. En este contexto, la presente investigación aporta un análisis adaptado a Charalá, ofreciendo nuevas perspectivas que contribuyan a una futura integración de energías renovables a través de la evaluación de los potenciales energéticos disponibles.

## 4. Metodología

### 4.1 Bases de datos

La caracterización de los recursos renovables en el municipio de Charalá se basó en el análisis de bases de datos nacionales e internacionales, priorizando la confiabilidad y representatividad de la información. En el caso del recurso solar, se consultaron tres fuentes principales de información: Global Solar Atlas, POWER NASA y la base de datos ERA5 de Copernicus. Estas dos últimas proporcionaron series temporales con resoluciones horaria, diaria y mensual para un periodo de tiempo comprendido entre 2004 y 2023. Asimismo, también se solicitó al IDEAM la base de datos del Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono De Colombia (IDEAM, UPME, 2017), que contiene promedios mensuales obtenidos mediante modelamiento numérico, basados en datos del periodo 1984-2012. Esta información se tomó como referente nacional, debido al respaldo institucional que representa, y se utilizó para validar la precisión de las fuentes internacionales mediante un análisis del error relativo, cuya expresión se presenta en la Ec. 1:

$$E_R = \frac{BD - IDEAM}{IDEAM} \quad (\text{Ec. 1})$$

La evaluación del recurso eólico siguió una metodología similar a partir de la información del Global Wind Atlas, POWER NASA y ERA5. De las bases de datos POWER NASA y ERA5 se obtuvieron series de tiempo detalladas de la velocidad del viento, con resoluciones horaria, diaria y mensual para el periodo 2004-2016. Con el propósito de mantener los mismos lineamientos aplicados al recurso solar, se realizó una validación frente a los datos del IDEAM, calculando igualmente el error relativo con el fin de evaluar la precisión de las fuentes internacionales.

La evaluación del recurso hídrico se basó en la región hidrográfica del Magdalena–Cauca, con apoyo del Atlas de Potencial Hidroenergético de Colombia (UPME, 2015). Posteriormente, se identificaron las estaciones hidrometeorológicas ubicadas en los ríos que atraviesan el municipio y se solicitó al IDEAM la información correspondiente. Esta base de datos proporciona registros desde 1965 hasta 2023 de caudales mínimos, medios y máximos en escalas diaria, mensual y anual.

Para la biomasa, inicialmente se consultó el Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia (UPME, 2009), cuyos mapas y cuantificaciones presentan un nivel de detalle general. Posteriormente, se consultaron las Evaluaciones Agropecuarias Municipales, publicadas por la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria, disponibles en línea para el periodo 2019–2023 (UPRA, 2023). En el caso de los residuos sólidos orgánicos de origen urbano (RSOU), los datos utilizados fueron suministrados por la Unidad de Servicios Públicos y Domiciliarios de Charalá. La información contempló principalmente los residuos de origen doméstico, de la plaza de mercado y de pequeños establecimientos comerciales.

Finalmente, para la energía geotérmica se usó la Estimación Preliminar del Potencial Geotérmico de Colombia (Alfaro et al., 2020), la cual incluye un tablero dinámico con información por áreas geotérmicas del país, principalmente asociadas a zonas volcánicas y a yacimientos hidrotermales.

#### 4.2 Modelos de potenciales

Para estimar el potencial de cada fuente no convencional de energía renovable se utilizaron modelos específicos que permitieron cuantificar la energía aprovechable a partir de los datos recolectados. Estos modelos se seleccionaron con base en su aplicación en estudios previos y se ajustaron al contexto geográfico del municipio. En el caso de la energía solar, el potencial solar

teórico de una zona se define como la cantidad total de energía solar que incide sobre una superficie en un periodo determinado, asumiendo un aprovechamiento del 100 % de la radiación disponible. El cálculo considera únicamente la magnitud de la radiación y el área disponible, sin considerar factores técnicos o de conversión que limiten su aprovechamiento (González et al., 2009). Así, el potencial solar teórico se expresa mediante la Ec. 2:

$$P_s = GHI * A \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde, *GHI* corresponde a la irradiación global horizontal que se mide normalmente en  $W/m^2$  o  $kWh/m^2.dia$  y *A* a la superficie que se puede ocupar con paneles solares. Para obtener una estimación más realista de la producción energética, se calcula la Producción Anual de Energía (Annual Energy Production – AEP) que integra las características técnicas del sistema y las pérdidas propias de su operación. Este cálculo se realiza mediante la Ec. 3:

$$AEP = A \times r \times H \times PR \quad (\text{Ec. 3})$$

donde, *E* representa la energía generada (kWh), *A* el área total de los paneles ( $m^2$ ), *r* la eficiencia del panel solar (%), *H* la radiación promedio anual y *PR* el coeficiente que representa las pérdidas globales del sistema (Saur News Bureau, 2016). Para este cálculo, el performance ratio (*PR*) se establece en 0.75, ampliamente utilizado como referencia en sistemas solares. En cuanto a la eficiencia y el área de captación, se toma como referencia el SunPower Maxeon 6, uno de los módulos fotovoltaicos más eficientes disponibles en el mercado, compuesto por 72 celdas monocristalinas, con una potencia nominal de 440 W, eficiencia del 20,7 % y un área de  $2,126 m^2$  (Maxeon Solar Technologies, 2024).

Respecto a la energía eólica, su aprovechamiento se fundamenta en la energía cinética del viento, expresada como una potencia teórica al multiplicar la densidad del aire, la velocidad del viento al cubo y el área transversal atravesada, como se indica en la Ec. 4:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (\text{Ec. 4})$$

El cálculo de la energía disponible en el viento bajo diferentes regímenes de velocidad requiere considerar el promedio del cubo de la velocidad del viento (Ehrlich, 2013). Este promedio se obtiene a partir de un enfoque probabilístico, donde cada velocidad  $v_i$  se pondera según su probabilidad de ocurrencia  $f(v_i)$  como lo muestra la Ec. 5:

$$\overline{v^3} = \sum_i v_i^3 \cdot f(v_i) \quad (\text{Ec. 5})$$

De esta manera, la potencia teórica del viento considerando diferentes regímenes de velocidad y un conjunto de N registros de velocidad del viento se representa con la Ec 6:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho A \frac{1}{N} \sum_i v_i^3 \quad (\text{Ec. 6})$$

En cuanto al recurso hidroenergético, el potencial corresponde a aprovechamientos a filo de agua determinado mediante la Ec. 7:

$$P = \gamma * Q * \Delta H * \mu \quad (\text{Ec. 7})$$

donde,  $\gamma$  corresponde al peso específico del agua,  $\Delta H$  a la caída hidráulica y  $\mu$  a la eficiencia del sistema. Q corresponde al caudal disponible en época seca, por lo que se considera como caudal aprovechable aquel correspondiente a una probabilidad de excedencia del 95 % ( $Q_{95}$ ), esto garantiza un caudal confiable en épocas secas sin afectar el caudal ecológico (UNIDO, 2019).

Por último, para el caso de la biomasa el potencial energético (PE) es proporcional a la masa seca disponible y a la energía contenida en ella, expresada como poder calorífico inferior (PCI) (Junfeng et al., 2005). La masa seca se determinó a partir de variables como el tipo de residuo ( $M_{rs}$ ), el rendimiento del cultivo ( $R_c$ ), la masa de residuo generada por cultivo ( $M_{rg}$ ) y la fracción de residuo seco ( $Y_{rs}$ ). En el caso de los residuos agrícolas, los procesos termoquímicos son el método de aprovechamiento más adecuado, y el cálculo se obtuvo mediante la Ec. 8:

$$PE = A * R_c * \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m M_{rgki} * Y_{rski} * PCI_{ki} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde k representa la clasificación de la biomasa y el subíndice i los distintos tipos de residuos dentro de esa clasificación. Posteriormente, se aplicó un factor de corrección, el cual permite estimar la fracción de energía teórica que es técnicamente aprovechable en forma de electricidad, considerando que el aprovechamiento de la biomasa generalmente ocurre mediante sistemas de cogeneración (CHP), donde se produce simultáneamente electricidad y calor útil (Ahmadi et al., 2020). Por otro lado, el modelo empleado para calcular el potencial energético a partir de los residuos sólidos orgánicos urbanos (RSOU) se basó en la cantidad de metano generado y su respectivo poder calorífico inferior (El Baz et al., 2020). Se empleo la Ec. 9:

$$PE_{RSOU} = M_{RSOU} * FO * FCB * FCM * \frac{16}{12} * PCI_{CH_4} \quad (\text{Ec. 9})$$

En esta ecuación, MRSOU corresponde a la masa de residuos sólidos orgánicos urbanos, FO a la fracción orgánica de los residuos con rápida degradación, FCB a la fracción de carbono presente en los residuos y FCM a la fracción de carbono transformado en metano por biodegradación. El factor 16/12 proviene del balance estequiométrico entre el carbono presente y el metano generado.

### 4.3 Análisis multicriterio

La evaluación de tecnologías de energía renovable requiere considerar simultáneamente factores ambientales, técnicos, económicos y sociales. En este contexto, los métodos de decisión multicriterio (MCDM) permiten integrar criterios bajo un enfoque estructurado facilitando la toma de decisiones ajustadas al contexto local (Maxim, 2013). De esta manera, se seleccionó la Teoría de Utilidad Multiatributo (MAUT) por su capacidad de representar las preferencias asociadas a cada criterio y ofrecer una comparación cuantitativamente entre tecnologías (Kumar et al., 2016).

Seguidamente, se definieron diez criterios agrupados en cuatro dimensiones: social (creación de empleo y aceptabilidad social), económica (LCOE), ambiental (emisiones, uso del suelo y consumo de agua) y técnica (eficiencia, factor de capacidad, disponibilidad y variabilidad del recurso). La elección de estos criterios se fundamenta en estudios previos que resaltan la importancia de evaluar tecnologías energéticas desde un enfoque integral, garantizando resultados más completos y realistas (Maxim, 2013). Los valores de cada indicador se transformaron en escalas de utilidad y se ponderaron según la importancia relativa de los criterios según lo propuesto por (Wang et al., 2009). Finalmente, las utilidades ponderadas se agregaron para obtener un valor de utilidad total por tecnología, lo que permitió establecer una jerarquía entre estas.

La variabilidad del recurso se estimó mediante el coeficiente de variación, definido como la relación entre la desviación estándar y el promedio de los datos. Para los recursos solar y eólico, se emplearon registros diarios de 2021 a 2023 se determinaron los promedios anuales y sus desviaciones estándar, reduciendo así la incertidumbre. En el caso del recurso hidroeléctrico, el análisis se realizó con datos de 2019 a 2022, promediando posteriormente los resultados para ambas fuentes hídricas. Para la biomasa con valores anuales de masa seca reportados entre 2019 y

2023 se determinaron los coeficientes de variación de tres cultivos principales (plátano, café y caña) y, con base en su participación relativa, se obtuvo un coeficiente global del recurso.

Por su parte, la disponibilidad se evaluó en una escala cualitativa de siete niveles (1: Muy bajo – 7: Sobresaliente). Para los recursos solar y eólico, se emplearon clasificaciones previamente establecidas en la literatura (Právālie et al., 2018; PNL & NREL, 1986). En el caso hidroeléctrico, se estimó el caudal requerido para 20 MW, correspondiente al límite de una PCH, bajo dos escenarios con longitudes de conducción de 0,2 km y 1 km, ubicando el Q95 dentro de la escala, empleando como criterio final el promedio de las dos estaciones. En biomasa, la estimación se realizó considerando el área cultivada en los municipios de Santander y la producción registrada en las evaluaciones agrícolas anuales para 2023. Con esta información se calculó un parámetro de producción por hectárea, lo que permitió ubicar a Charalá en relación con el resto de los municipios del departamento dentro de la misma escala de siete niveles.

## **5. Resultados y Análisis**

### **5.1 Evaluación del recurso**

A partir de la información recopilada en las bases de datos seleccionadas y siguiendo el procedimiento descrito en la metodología, se procesaron y analizaron los registros disponibles para cada recurso. Este proceso permitió generar estimaciones consistentes y comparables, además de identificar patrones y variaciones temporales de interés para la evaluación del recurso.

#### **5.1.1 Solar**

Debido a que las series temporales abarcaron varios años, la información se consolidó en promedios mensuales para sintetizar el nivel medio de radiación y su variación anual, facilitando la interpretación y comparación entre fuentes. Dado que el Global Solar Atlas no ofreció datos

históricos representativos, el análisis se centró en POWER NASA y ERA5, cuyos resultados se presentan en el Apéndice A (Tabla A1).

El análisis reveló que los valores del IDEAM son considerablemente menores que los de fuentes internacionales, posiblemente por diferencias en periodos de referencia, metodologías de modelamiento y resolución espacial. Si bien el IDEAM cuenta con respaldo institucional, carece de registros históricos suficientes para un análisis temporal detallado, por lo que se utilizó solo como referente para contrastar las demás fuentes en los rangos de tiempo correspondientes. El error relativo calculado respecto a esta fuente de referencia se presenta en la Tabla 1.

La comparación evidenció que el error relativo de POWER NASA y ERA5 respecto al IDEAM difiere en menos de dos puntos porcentuales, lo que sugiere que ambas fuentes ofrecen estimaciones confiables del recurso. No obstante, se seleccionó POWER NASA como fuente principal, no solo por presentar menor error relativo, sino también por la facilidad de acceso a datos históricos para futuros análisis.

**Tabla 1**

*Comparación del error de la radiación solar entre POWER-NASA y ERA5 respecto al IDEAM.*

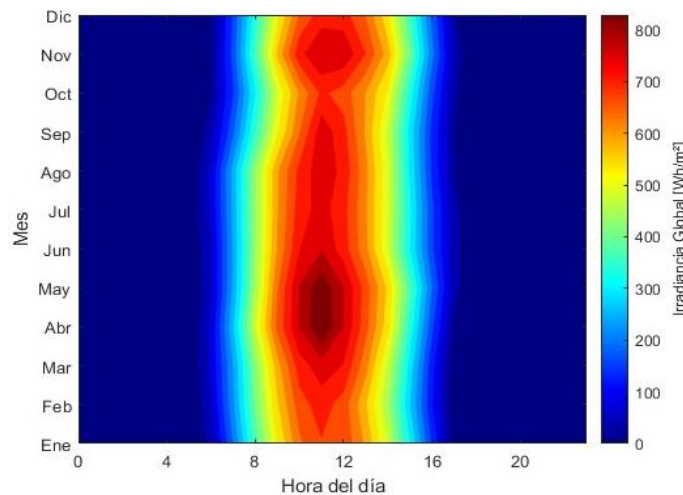
<b>Fuente de datos</b>	<b>GHI promedio (kWh/m<sup>2</sup>·día)</b>	<b>Error relativo respecto al IDEAM (%)</b>
IDEAM	4,101	-
POWER NASA	5,072	23,675
ERA5	5,159	25,809

Tras seleccionar la base de datos POWER NASA, se caracterizó el recurso solar con mayor detalle mediante un mapa de calor en MATLAB, construido con registros de 2023, por ser el año más reciente con datos completos y consistentes. Este resultado presentado en la Figura 1, permite visualizar la distribución temporal de la irradiancia a lo largo del día durante todo el año.

El mapa de calor evidencia una ventana útil de alta irradiancia entre las 08:00 y las 16:00 h, equivalente a 5-7 horas de sol al día. El máximo de irradiancia se concentra alrededor del mediodía, generando un perfil diario simétrico, con un aumento rápido en la mañana y un descenso en la tarde. Asimismo, tanto la intensidad como la duración de esta ventana aumenta durante los meses centrales del año y disminuye en los extremos; correspondiente a un comportamiento monomodal, tal como indica el Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono De Colombia (UPME, 2017). Este patrón indica que, aunque la hora del pico de irradiancia es estable a lo largo del año, la energía diaria disponible presenta variaciones estacionales.

**Figura 1**

*Mapa de calor de la irradiancia global por hora y mes*



**5.1.2 Eólico**

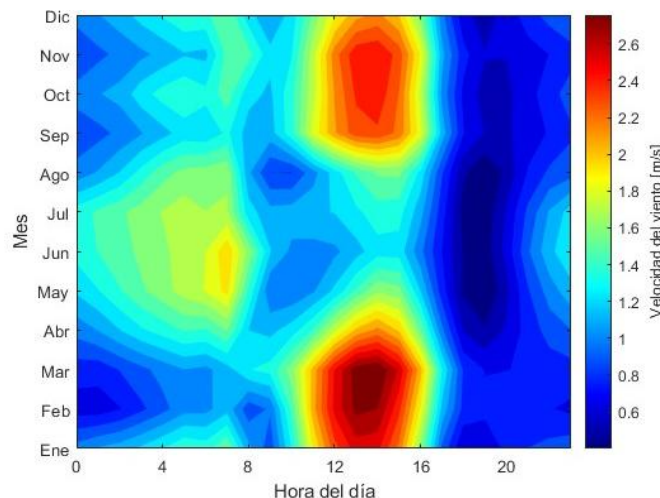
La información del recurso eólico se organizó en promedios mensuales, evaluando principalmente las bases POWER NASA y ERA5, dado que el Global Wind Atlas no ofrecía datos representativos. Como la estación del IDEAM en Charalá no cuenta con equipos para medir la velocidad del viento, se usaron los registros de la Universidad Industrial de Santander, reportados

en el Atlas de Viento de Colombia (IDEAM–UPME, 2017). Esta elección es pertinente, ya que dicha estación presenta valores dentro del rango esperado para Charalá, entre 1 y 2 m/s a una altura de 10 m. Con esta aclaración, los resultados de cada fuente consultada se presentan en el Apéndice A (Tabla 10).

Los resultados evidencian que ERA5 reporta velocidades de viento menores frente al IDEAM y POWER NASA, debido a su modelo de estimación bajo la suposición de estratificación neutra, lo que genera una subestimación en condiciones estables (Copernicus Climate Change Service [C3S], 2018). En contraste, los valores de IDEAM y POWER NASA son más cercanos entre sí, lo que respalda su consistencia frente al desfase de ERA5. Por esta razón se seleccionó la base POWER NASA como la más adecuada, con un error relativo de 8,1%. Con esta base, se caracterizó el recurso eólico mediante un mapa de calor en MATLAB que integra registros horarios y mensuales de 2023. La Figura 2 muestra la variación de la velocidad del viento a 10 m de altura a lo largo del día y del año, permitiendo identificar las horas y meses de mayor o menor intensidad.

**Figura 2**

*Mapa de calor de la velocidad del viento por hora y mes.*



**5.1.3 Hidroelectricidad**

El análisis del recurso hídrico en Charalá se centró en los puntos de medición de Nemizaque y Puente Llano, correspondientes a los ríos Pienta y Táquiza, respectivamente, seleccionados por ser los principales afluentes del municipio y por contar con estaciones hidrométricas activas del IDEAM, que registran series históricas de caudales. Para el modelado del recurso en el Atlas (UPME, 2015), se utilizaron los caudales medios mensuales disponibles en el periodo 1965–2024. Por otra parte, el análisis del presente estudio se restringió a los años 2000–2023, excluyendo aquellos con registros incompletos. El promedio de estos valores se presenta en la Tabla 2, la cual dimensiona de manera general los caudales característicos de ambos ríos.

**Tabla 2**

*Caudal promedio en los puntos meteorológicos en Nemizaque y Puente Llano.*

<b>Caudal (<math>m^3/s</math>)</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
<b>Río Pienta</b>	17	18	32	40	37	21	13	13	17	34	45	27
<b>Río Táquiza</b>	17	16	26	37	37	24	17	15	19	32	41	27

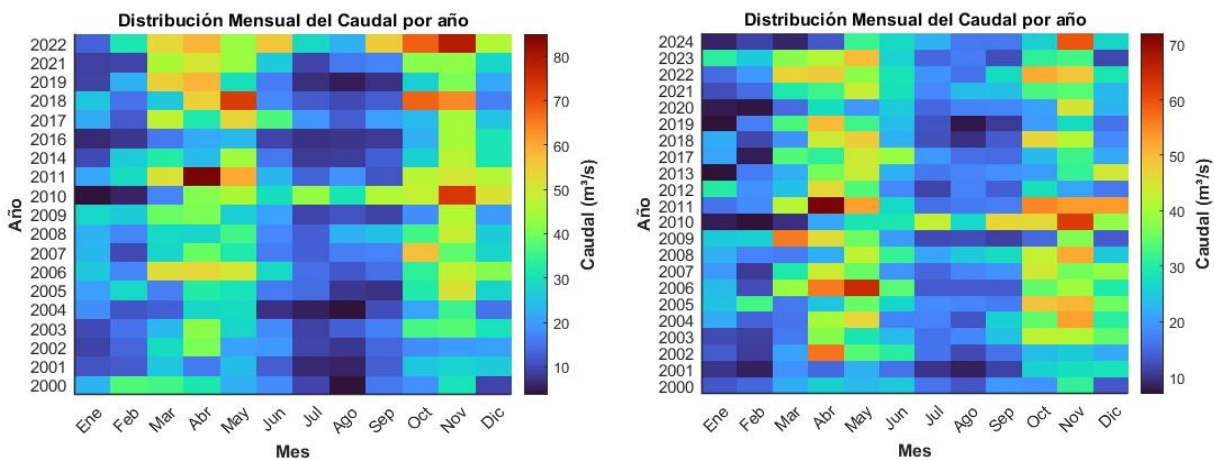
Dado que los promedios no reflejan por sí solos la variabilidad temporal del recurso, se complementó este análisis con la Figura 3, un mapa de calor elaborado en MATLAB que representa la distribución mensual de los caudales durante el periodo de estudio. Esta representación es clave porque permite identificar en qué meses habría más o menos disponibilidad de agua para un posible aprovechamiento hidroenergético en Charalá.

Los resultados evidencian una distribución relativamente uniforme de los caudales, coherente con los patrones de precipitación característicos de la región andina colombiana. Estos, aunque modulados por variaciones climáticas de alcance global, conservan tendencias bien definidas. En Santander, el régimen hídrico es de tipo bimodal, con dos periodos secos y dos

lluviosos alternados, tal como lo reporta el *Atlas Climatológico* (IDEAM, 2017). Las temporadas secas se registran a comienzos y a mitad de año, con caudales que descienden por debajo de los 30 m<sup>3</sup>/s; en contraste, las lluviosas se concentran entre marzo y comienzos de junio, y posteriormente entre septiembre e inicios de diciembre, alcanzando valores entre 40 y 80 m<sup>3</sup>/s. Sin embargo, como es común en sistemas hidrológicos, no todos los años reproducen este esquema de manera exacta, presentándose periodos de sequía más pronunciados en los que los caudales pueden reducirse a rangos de 4–9 m<sup>3</sup>/s. Este comportamiento altamente variable, influenciado por factores externos, justifica la necesidad de evaluar el recurso desde una perspectiva probabilística.

**Figura 3**

*Distribución del caudal entre 2000–2024 del Río Pienta (izquierda) y Río Táquiza (derecha).*



**5.1.4 Biomasa**

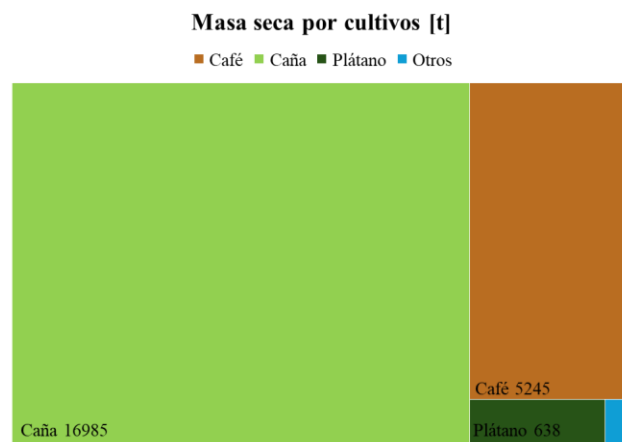
A partir de los registros anuales de las Evaluaciones Agropecuarias Municipales, se identificaron 18 cultivos en la zona de estudio. De este total, se seleccionaron siete por sus volúmenes de producción representativos. Entre ellos, la caña panelera y el café sobresalieron como los de mayor participación, seguidos por el plátano, mientras que el banano, el limón, la

naranja y la yuca se agruparon en la categoría “otros” por su menor relevancia productiva. Para cada cultivo se aplicaron factores de generación de residuo y valores de humedad característicos reportados en estudios previos (Proyecto Nexos, 2024), lo que permitió estimar la masa seca residual generada anualmente. Los resultados obtenidos se presentan en el Apéndice A (Tabla 11).

De manera complementaria, la Figura 4 evidencia que la biomasa residual agrícola del municipio está dominada por la caña panelera y el café. Este patrón implica que la disponibilidad de biomasa depende en gran medida de la estabilidad productiva de estos dos cultivos, mientras que los demás aportan de forma secundaria y no alteran de manera significativa el balance general.

**Figura 4**

*Distribución promedio de la masa seca residual por cultivo para el periodo 2019–2023, con base en datos de las Evaluaciones Agropecuarias Municipales (UPRA)*



En cuanto al recurso proveniente de residuos sólidos orgánicos de origen urbano (RSOU), los registros disponibles señalan que en Charalá se recolectan entre 25 y 30 toneladas semanales, principalmente provenientes de plazas municipales. A partir de este rango se establecieron dos escenarios para el análisis posterior: uno conservador (25 t/semana) y otro optimista (30 t/semana).

### 5.1.5 Geotermia

Se examinó la información disponible en la herramienta del Servicio Geológico Colombiano (Alfaro et al., 2020), donde no se identificaron áreas geotérmicas en el municipio de Charalá, lo que implica la ausencia de condiciones favorables para el aprovechamiento de este recurso en la región. La Figura 5 muestra la búsqueda realizada.

#### Figura 5

*Consulta de áreas geotérmicas en Charalá a partir de la Servicio Geológico Colombiano*



## 5.2 Potenciales energéticos

Los potenciales energéticos a partir de cada recurso se establecieron mediante el potencial teórico, sobre el cual se realizaron análisis complementarios para estimar la energía aprovechable considerando ciertas condiciones técnicas propias de cada la tecnología.

### 5.2.1 Solar

Para estimar el potencial solar teórico se aplicó la Ec. 2 con base en la irradiación promedio de POWER NASA, de  $5,074 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{día}$  ( $1852,025 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$ ). El área representa la superficie disponible para instalar paneles, por lo que el potencial depende directamente del espacio destinado a este fin. La Tabla 3 muestra las estimaciones para superficies entre  $5.000$  y  $25.000 \text{ m}^2$ ,

intervalo respaldado por el NREL, que establece 20.000 m<sup>2</sup>/MW (0,25–1,75 MW), y por estudios europeos que modelaron áreas de 5.000 a 20.000 m<sup>2</sup> para analizar cómo varía la energía generada con el aumento de superficie instalada (Ong et al., 2013; Jensen, 2014).

Los resultados confirman la relación lineal entre área disponible y potencial solar bajo condiciones ideales, donde se asume un aprovechamiento completo de la radiación. Sin embargo, este valor no corresponde a la energía efectivamente generada, ya que factores como eficiencia, sombreado o acumulación de suciedad reducen el aprovechamiento real (González et al., 2009).

**Tabla 3**

*Potencial solar teórico anual en función del área disponible.*

<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Potencial solar (kWh/año)</b>
<b>5000</b>	9260126
<b>10000</b>	18520252
<b>15000</b>	27780378
<b>20000</b>	37040504
<b>25000</b>	46300630

Con base en lo anterior, se calculó la AEP para un panel de referencia mediante la Ec. 3, con un valor de 611,53 kWh/año. Para aproximar el análisis a un escenario real, se definió un sistema fotovoltaico con diferentes potencias instaladas dentro del rango reportado por la UPME (2023). En cada escenario de potencia, se estableció la configuración del arreglo fotovoltaico, especificando el número de paneles, su disposición en columnas y filas, y la separación entre estas. Con esta información se calculó el área ocupada solo por los paneles y el área total requerida considerando las distancias de separación. Finalmente, se estimó el potencial solar teórico anual y la AEP correspondiente a cada potencia instalada, cuyos resultados se presentan en la Tabla 4.

Los arreglos fotovoltaicos considerados tienen una configuración matricial, en la que los paneles se disponen de forma horizontal, sin inclinación y con una separación entre filas de 0,5 m, valor recomendado para facilitar las labores de operación y mantenimiento. En todos los escenarios la producción anual fue menor que el potencial solar teórico, lo cual se atribuye a las pérdidas inherentes al funcionamiento real del sistema.

**Tabla 4**

*Configuración y AEP estimada para sistemas fotovoltaicos según potencia instalada.*

Potencia Inst. (kW)	No paneles	No filas	No columnas	Sep filas (m)	Área paneles (m <sup>2</sup> )	Área total (m <sup>2</sup> )	P. teórico (GWh/año)	AEP (GWh/año)
1000	2272	22	100	0,50	4833	7057	8,95	1,39
2000	4545	45	100	0,50	9667	14217	17,90	2,78
3000	6818	68	100	0,50	14501	21377	26,86	4,17
4000	9090	90	100	0,50	19334	28537	35,81	5,56
5000	11363	113	100	0,50	24168	35696	44,76	6,95
6000	13636	136	100	0,50	29002	42856	53,71	8,34
7000	15909	159	100	0,50	33835	50016	62,67	9,73
8000	18181	181	100	0,50	38669	57176	71,62	11,12
9000	20454	204	100	0,50	43503	64336	80,57	12,51
10000	22727	227	100	0,50	48337	71496	89,52	13,90

**5.2.2 Eólico**

Para estimar el potencial eólico teórico de la zona, se aplicó la Ec. 6, empleando la serie horaria de velocidades del viento reportada por la base POWER NASA para el año 2023. Para ello, fue necesario contar con el área de barrido del rotor, lo que llevó a seleccionar una turbina acorde con las condiciones del municipio. Dado que la velocidad promedio fue de 1,5 m/s y la mayoría de las turbinas comerciales requieren más de 2 m/s para operar, se eligió el modelo Honeywell WT6500, con velocidad de corte de 0,2 m/s y un área de barrido de 2,55 m<sup>2</sup> (Honeywell

Store - Thermostats, Air Purifiers, Fans & More, s. f.-b). Asimismo, se promediaron los datos de presión atmosférica y temperatura del aire de la misma base de datos para calcular la densidad del aire. Los parámetros utilizados y el resultado obtenido para el potencial eólico teórico se presentan en la Tabla 5.

El potencial eólico teórico obtenido, equivalente a 53,12 kWh/año, refleja la baja disponibilidad de este recurso energético en el municipio de Charalá. Al contrastarlo con los potenciales calculados para el recurso solar (ver Tabla 3), se observa una diferencia de varios órdenes de magnitud, explicada por las bajas velocidades de viento y los altos niveles de radiación registrados en la zona, los cuales influyen directamente en la producción de energía.

**Tabla 5**

*Parámetros utilizados y resultado del cálculo del potencial eólico teórico.*

Presión (kPa)	82,75
Temperatura (°C)	19,24
R (J/kg.K)	286,8
$\rho$ (kg/ m)	0,99
$\bar{v}^3$ (m <sup>3</sup> /s)	4,82
A de barrido (m <sup>2</sup> )	2,55
Potencial eólico (kWh/año)	53,12

El cálculo del AEP se realizó a partir de la curva de potencia de la turbina seleccionada, aplicando interpolación lineal entre los puntos identificados para cada velocidad horaria del 2023. Luego, se integró la serie de potencias horarias para obtener la energía anual y se elaboró una distribución por intervalos de velocidad (bins), lo que permitió analizar la contribución de cada rango de velocidad a la generación total. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 6.

Este análisis muestra que durante el 82% de las horas del año, el viento se mantiene por debajo de 2 m/s, lo que aporta cerca del 45% de la energía anual generada, mientras que los intervalos entre 2 y 5 m/s representan el porcentaje restante. Por su parte, el AEP obtenido fue de 56,94 kWh/año, muy cercano al potencial eólico teórico de 53,12 kWh/año, con una diferencia del 7%. Esta diferencia se debe a que el AEP se calculó con la curva real de la turbina, considerando su velocidad de corte y potencias horarias, mientras que el potencial teórico se basó en un cálculo idealizado con el promedio del cubo de las velocidades. En consecuencia, se tomó el AEP como valor de referencia, al considerarse más representativo de la energía que efectivamente podría generarse en Charalá.

**Tabla 6**

*Distribución del AEP neto por rangos de velocidad del viento.*

<b>Bin</b>	<b>Horas</b>	<b>AEP (kWh)</b>
<b>[0,1)</b>	3610	7,82
<b>[1,2)</b>	3605	17,76
<b>[2,3)</b>	1258	17,54
<b>[3,4)</b>	273	12,54
<b>[4,5)</b>	14	1,29
<b>AEP (kWh/año)</b>		<b>56,94</b>

Siguiendo un enfoque similar al recurso solar, se evaluaron distintos escenarios de potencia para el recurso eólico, estimando el número de aerogeneradores y el área requerida. No obstante, la potencia media en el municipio fue de apenas 6,5 W por turbina, lo que hacía inviable alcanzar potencias significativas. Para superar esta limitación, se ajustaron los escenarios al área equivalente al análisis solar, determinando el número de turbinas, la capacidad instalada y la AEP asociada en cada escenario, cuyos resultados se presentan en el Apéndice B (Tabla 12).

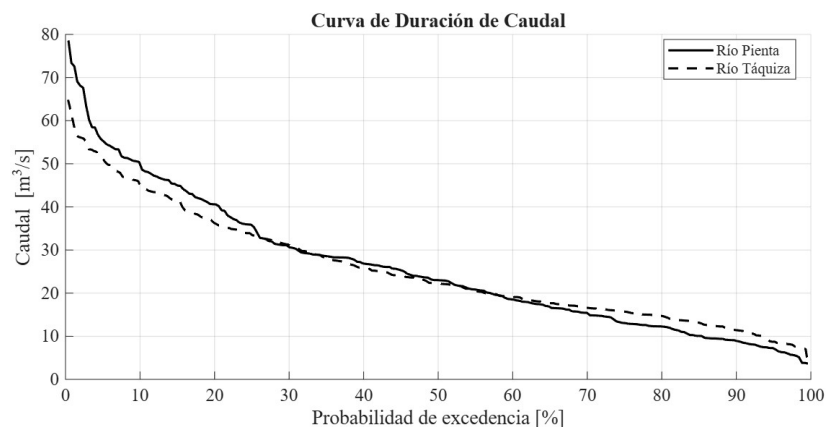
Los resultados muestran que, aun bajo condiciones de superficie equivalente a las del recurso solar, tanto el potencial teórico como la AEP estimada para el recurso eólico son considerablemente inferiores. Esto confirma que la energía eólica en Charalá no es competitiva frente al recurso solar y que, a nivel local, su aprovechamiento carece de viabilidad técnica.

### 5.2.3 Hidroelectricidad

Para estimar el potencial hidroeléctrico en la zona de estudio, el primer paso consistió en calcular el caudal Q95, entendido como el caudal que se mantiene o supera el 95% del tiempo y constituye una referencia clave para dimensionar proyectos hidroenergéticos. El cálculo se realizó a partir de los registros de caudales medios mensuales, cuya representación se muestra en la Figura 6 mediante las curvas de duración de caudales de los ríos Pienta y Táquiza. En ambos casos, el valor de Q95 resultó inferior a 10 m<sup>3</sup>/s. De acuerdo con la escala previamente definida, esta condición sitúa al recurso en una clasificación baja para una longitud de conducción de 0,2 km y moderadamente baja para 1 km, lo que refleja una disponibilidad limitada en el contexto local.

**Figura 6**

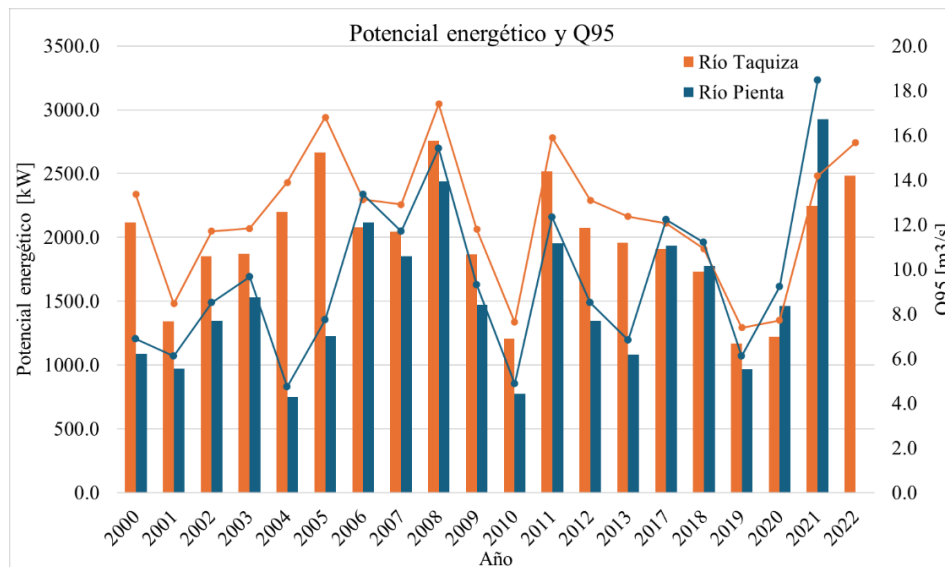
*Curva de duración de caudal.*



Además del caudal disponible, un parámetro clave para estimar el potencial hidroeléctrico es la caída hidráulica ( $\Delta H$ ), entendida como la diferencia de altura entre el punto de captación del agua y la ubicación de la turbina. En este caso, el Atlas de Potencial Hidroenergético de Colombia (UPME, 2015), a partir de un modelo digital del terreno, proporciona valores de ( $\Delta H$ ) para diferentes longitudes horizontales ( $L_c$ ), establecidas en 0.2, 1 y 5 km. Ante la ausencia de información específica para la zona de interés, se utilizaron estas caídas hidráulicas medias reportadas para la cuenca hidrográfica a la que pertenece Charalá, bajo el supuesto de que estas condiciones reflejan razonablemente el comportamiento de la región. El cálculo del potencial energético se realizó con la Ec. 5, considerando una eficiencia del 85%, correspondiente al valor mínimo típico de una turbina Pelton. Los resultados se presentan en la Figura 7 para una longitud de conducción de 0.2 km y una caída hidráulica de 19m.

**Figura 7**

*Potencial hidroenergético en Charalá para el Rio Pienta y Táquiza.*



Los resultados revelan que el río Taquiza presenta consistentemente un mayor potencial energético frente al río Pienta, debido a sus características hidrológicas y a la magnitud de sus caudales. No obstante, ambos ríos exhiben un patrón de variación semejante, coherente con el hecho de encontrarse en la misma región y, por tanto, estar sujetos a las mismas condiciones climáticas. Los máximos de potencial se registran en 2008, 2011 y 2021, coincidiendo con periodos de intensas precipitaciones asociadas al Fenómeno de La Niña, mientras que los descensos más notorios ocurrieron entre 2014 y 2016, etapa influenciada por El Niño (Gobierno de Colombia et al., 2023). En general, el potencial energético oscila entre valores cercanos a 1000 kW en los periodos de menor disponibilidad hídrica y hasta más de 3000 kW en los años de mayor abundancia de caudal. Este comportamiento confirma la relación directa entre el potencial energético y la variabilidad climática interanual, destacando que, bajo todos los escenarios de caída hidráulica considerados, el río Taquiza mantiene una ventaja relativa sobre el río Pienta.

#### 5.2.4 *Biomasa*

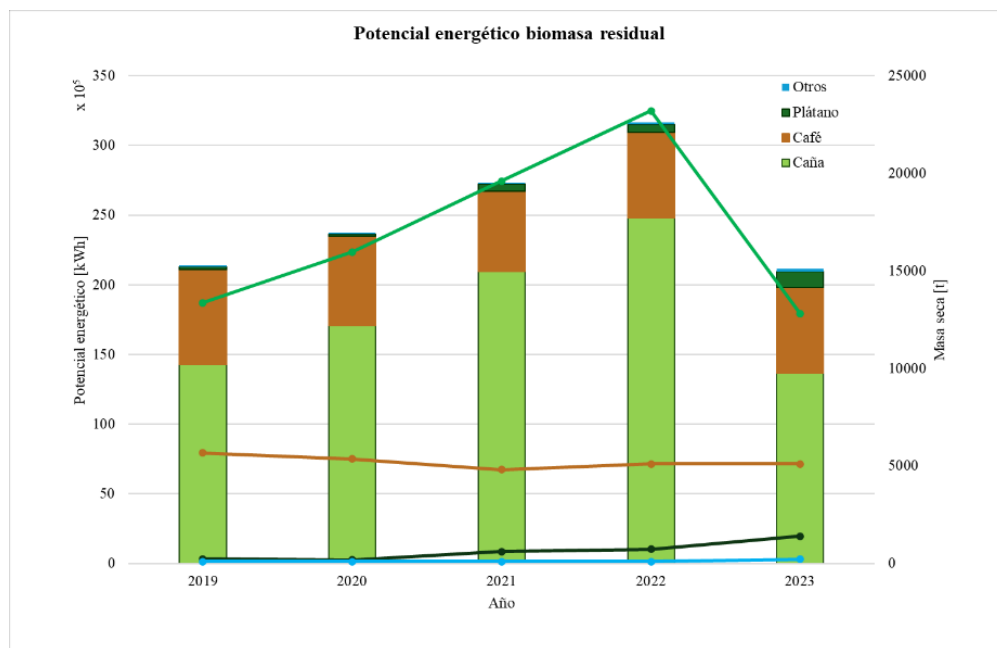
Para la estimación del potencial energético a partir de biomasa residual de cultivos, se tomó el poder calorífico inferior (PCI) de cada residuo y se aplicó la Ec. 6. Este valor permitió calcular la energía potencialmente disponible mediante procesos termoquímicos, en los cuales una fracción se transforma en calor y otra en electricidad, bajo esquemas de cogeneración. La eficiencia de conversión depende de la tecnología empleada; en el caso de residuos agrícolas, una de las más utilizadas es la pirólisis acoplada a un motor de combustión interna (Thamarai et al., 2025), donde se proyecta una eficiencia total del 74 %, de la cual el 24 % corresponde a generación eléctrica (Ahmadi et al., 2020). En la Figura 8 se presenta la participación de cada cultivo en el potencial

energético teórico. Tal como se observó en la evaluación del recurso, la caña panelera fue el cultivo más predominante, y, por ende, el de mayor contribución al potencial energético.

Este resultado cobra especial relevancia porque, dentro del proceso de producción de panela, el uso de calor resulta fundamental en etapas como la evaporación y la concentración (CIMPA, 1992). Diversos estudios han señalado que la eficiencia del proceso depende en gran medida de la optimización en el uso de la energía (Velásquez, Janna, & Agudelo, 2006). En este sentido, la biomasa residual de la caña panelera representa una alternativa viable para generar energía térmica destinada al mismo proceso productivo, mientras que la electricidad producida podría emplearse en otras operaciones de la unidad productiva, ofreciendo así una fuente energética descentralizada.

**Figura 8**

*Potencial energético biomasa residual a partir de cultivos.*



En el caso del potencial energético a partir de residuos sólidos orgánicos de origen urbano (RSOU), la estimación se realizó mediante la Ec. 7, considerando su aprovechamiento a través de digestión anaeróbica. Los resultados, presentados en la Tabla 7 muestran que el potencial se mantiene relevante incluso en el escenario conservador y, bajo un escenario optimista, prácticamente duplica la oferta energética. Además, el hecho de que en el municipio los residuos ya se encuentren separados en la fuente constituye una ventaja estratégica, pues reduce los requerimientos logísticos y facilita la implementación de sistemas de aprovechamiento energético.

**Tabla 7**

*Energía entregada a partir de RSOU.*

Masa residuo [t/año]	Energía entregada [GWh/año]
1300	0,994
1560	2,178

### 5.2.5 Comparación de potenciales

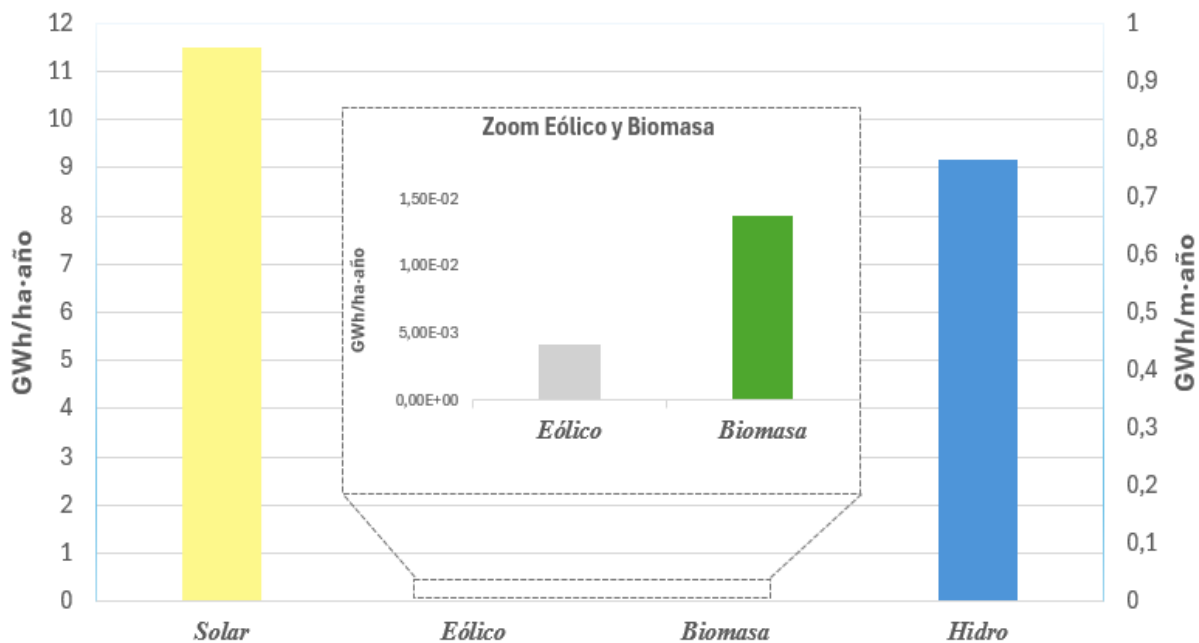
Para comparar los potenciales obtenidos fue necesario definir un criterio que permitiera homogeneizarlos, ya que cada uno se estimó a partir de metodologías diferentes. En el caso del recurso solar, eólico y de biomasa se empleó un indicador expresado como la energía anual generada por unidad de área (GWh/ha·año). Sin embargo, el recurso hidroenergético no es función del área sino de la altura de caída, por lo que se adoptó un indicador alternativo basado en la energía anual por unidad de  $\Delta H$  (GWh/m·año). De esta forma, los indicadores reflejan la densidad energética propia de cada fuente, facilitando la comparación presentada en la Figura 9.

Esta comparativa permite evidenciar que el recurso solar alcanza la mayor densidad energética por superficie (11,48 GWh/ha·año), superando en varios órdenes de magnitud a la biomasa (1,38E-2 GWh/ha·año) y al viento (4,10E-3 GWh/ha·año), lo que la posiciona como la

alternativa más competitiva en el municipio. Por su parte, el hidroeléctrico presenta una densidad muy alta por metro de caída (0,76 GWh/m·año), lo que confirma su alto potencial, aunque este se encuentra limitado a puntos concretos donde coinciden caudal suficiente y desnivel adecuado.

**Figura 9**

*Indicadores específicos de potencial energético solar, eólico y biomasa e Hidroeléctrico*



**5.3 Análisis multicriterio**

Una vez aplicados los criterios definidos, se recopilieron los valores correspondientes a cada indicador de las tecnologías consideradas. Estos resultados sirvieron como base para la construcción de las funciones de utilidad y la posterior asignación de ponderaciones. Los resultados obtenidos para cada tecnología, junto con sus referencias, se presentan en el Apéndice C (Tabla C1). Cabe resaltar que, si bien la mayoría de los criterios se tomaron de fuentes

bibliográficas, los de disponibilidad y variabilidad del recurso se calcularon a partir de los datos obtenidos en este estudio.

Para la ponderación, los pesos relativos se definieron mediante un enfoque subjetivo, priorizando los objetivos de la investigación. Se dio mayor relevancia a la disponibilidad y la variabilidad del recurso, al tratarse de variables directamente caracterizadas del área de estudio. De igual forma, se otorgó importancia al uso del suelo, ya que la extensión requerida condiciona tanto la viabilidad técnica como la aceptación social (Gross, 2020). Por su parte, el LCOE ocupó un papel central al reflejar la competitividad económica y la sostenibilidad financiera de las alternativas (Maxim, 2013). En términos generales, los criterios técnicos concentraron la mayor ponderación, seguidos por los ambientales, los económicos y, finalmente, los sociales, lo que permitió un balance integral, coherente con las ponderaciones reportadas en estudios previos (Shatnawi et al., 2021).

Adicionalmente, se definió si cada criterio debía ser maximizado o minimizado, lo cual fue esencial para la normalización. De esta manera, se establecieron como criterios a minimizar aquellos en los que un valor menor implica un mejor desempeño, mientras que los que reflejan un resultado más favorable con un valor alto debían maximizarse. La Tabla 8 resume los pesos asignados, junto con el tipo de optimización de cada criterio.

**Tabla 8**

*Ponderación y tipo de criterio de evaluación*

<b>Criterio</b>	<b>Peso ajustado</b>	<b>Tipo de criterio</b>
Emisiones	0,09	Minimizar
Uso del suelo	0,12	Minimizar
Consumo de agua	0,04	Minimizar
LCOE	0,12	Minimizar
Factor de capacidad	0,07	Maximizar
Eficiencia	0,06	Maximizar
Variabilidad del recurso	0,14	Minimizar
Disponibilidad del recurso	0,25	Maximizar
Creación de empleo	0,06	Maximizar
Aceptabilidad social	0,05	Maximizar

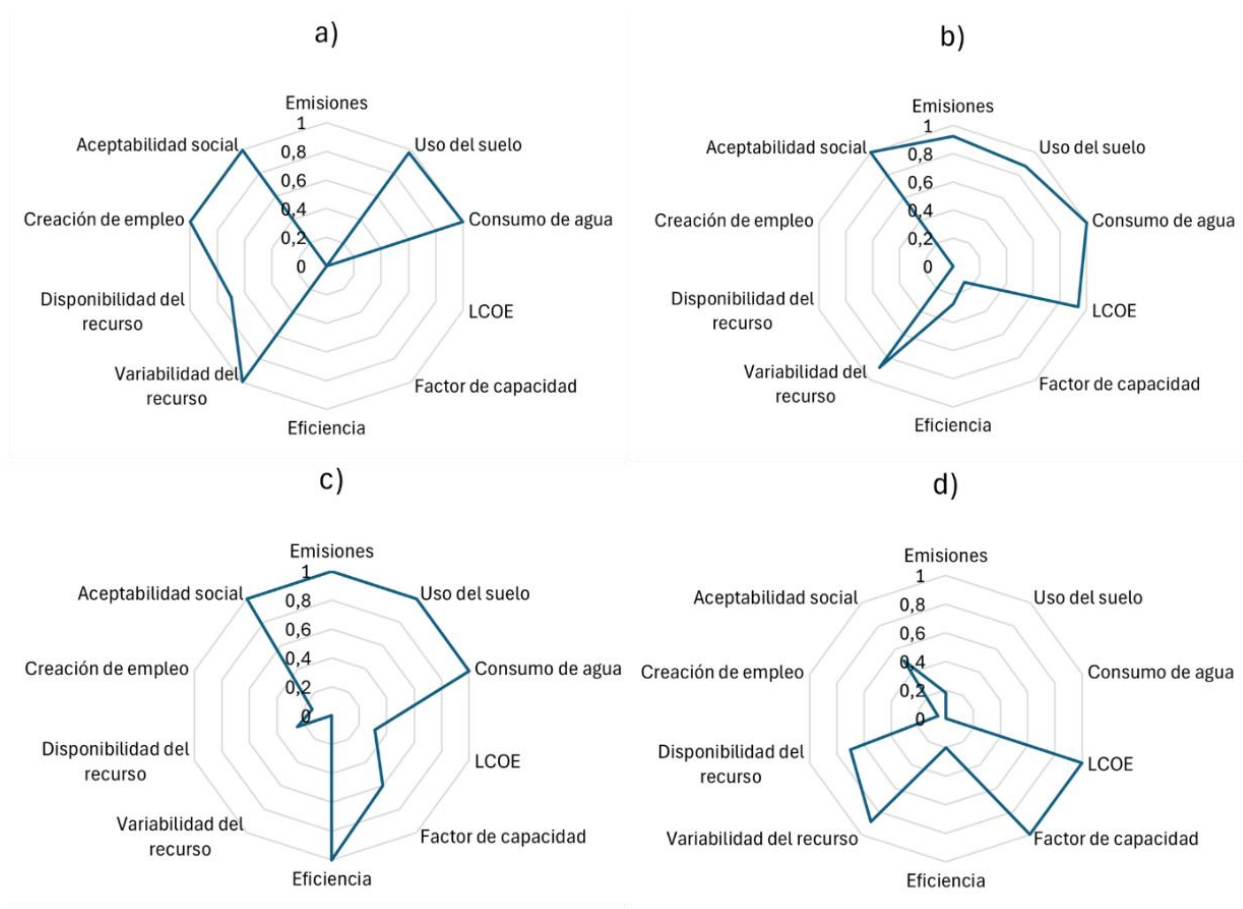
Una vez normalizados, todos los indicadores se llevaron a una misma escala. Los resultados se muestran en la Figura 10, donde se visualiza de forma comparativa el desempeño de cada tecnología evaluada. En el caso de la energía solar, se observó un comportamiento favorable en cuanto a disponibilidad y variabilidad del recurso, dado el patrón monomodal y estable de radiación en Charalá. No obstante, sus limitaciones se concentran en eficiencia y en los altos costos de instalación, lo que restringe su competitividad.

La energía eólica destacó en los criterios ambientales, de aceptabilidad social y variabilidad, propios de la tecnología. Sin embargo, la baja disponibilidad local del recurso limitó considerablemente su valoración técnica. En cuanto a las PCH, estas mostraron fortalezas en eficiencia y desempeño ambiental, coherentes con su madurez tecnológica, aunque su implementación en Charalá se ve restringida por la variabilidad del recurso hídrico y los elevados costos de instalación. Finalmente, la biomasa obtuvo resultados bajos en el componente ambiental,

debido a la percepción global de que su aprovechamiento implica cultivos energéticos; no obstante, al enfocarse en biomasa residual, se reconocieron ventajas en el factor de capacidad y en la facilidad de implementación. Asimismo, la disponibilidad del recurso se considera favorable en el contexto regional, lo que refuerza su potencial como alternativa energética.

**Figura 10**

*Resultados evaluación multicriterio a) solar, b) eólica, c) hidroelectricidad d) biomasa*

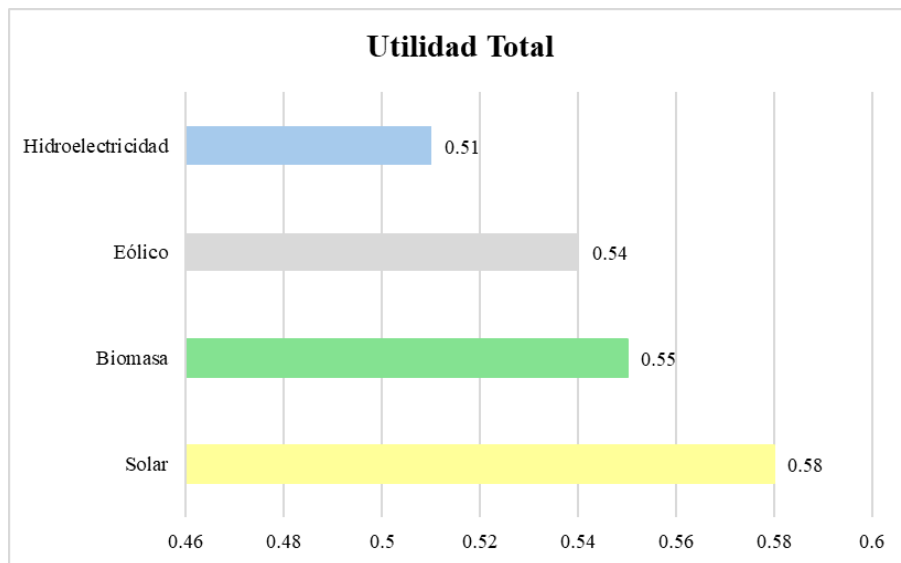


Por su parte, en la Figura 11 se observa que la energía solar alcanza la mayor utilidad total, lo cual es consistente con la estabilidad y disponibilidad del recurso en Charalá. La biomasa ocupa la segunda posición con un desempeño competitivo, respaldado por la disponibilidad de residuos,

aunque condicionado por percepciones ambientales y sociales que limitan su aceptación. La energía eólica registra una utilidad cercana a la biomasa, pero su viabilidad se ve restringida por la baja intensidad del viento en la zona, lo que plantea barreras técnicas para su desarrollo. Por último, las PCH obtienen la menor utilidad, principalmente por la reducida disponibilidad hídrica y la marcada variabilidad estacional, factores que restringen su potencial en el municipio.

**Figura 11**

*Utilidad de cada tecnología*



**6. Conclusiones**

La metodología propuesta se planteó bajo un enfoque práctico, sencillo y replicable, lo que permitió integrar información de bases de datos internacionales (como POWER NASA y ERA5) con registros nacionales del IDEAM. El proceso incluyó la depuración y el tratamiento de series temporales, así como la caracterización detallada del comportamiento de cada recurso en la zona de estudio. De esta manera, este esquema metodológico se proyecta como una herramienta útil para la evaluación de recursos en otros territorios del país.

El estudio evidenció que en Charalá existe un potencial relevante de FNCER, aunque con un nivel de aprovechamiento diferente según el recurso. En el caso solar, se elaboraron escenarios que relacionan el área disponible con la potencia instalada. El caso eólico, en cambio, mostró limitaciones por la baja velocidad del viento. Para la biomasa, la evaluación de residuos agrícolas y urbanos reveló un aporte significativo mediante esquemas de cogeneración y digestión anaerobia. Para el recurso hídrico, la consideración de distintas caídas hidráulicas y longitudes de conducción permitió estimar escenarios acordes a la realidad hidrográfica local. El recurso geotérmico parece ser despreciable en la región. En conjunto, estos resultados permiten estimar densidades energéticas comparativas, ofreciendo una visión integral del potencial de cada fuente.

Por su parte, el análisis multicriterio indicó que la energía solar es la alternativa más favorable para Charalá, gracias a la estabilidad y disponibilidad de la radiación, lo que le permite alcanzar la mayor utilidad en comparación con las demás tecnologías. Asimismo, la biomasa se perfila como un recurso complementario con gran capacidad para diversificar la matriz energética local. Por su parte, las PCH también presentan un potencial relevante, condicionado por la variabilidad de los caudales. En contraste, la energía eólica mostró una baja viabilidad técnica debido a la escasa intensidad de los vientos en la zona, quedando en desventaja frente a las demás.

Este ejercicio constituye un primer acercamiento al ordenamiento de tecnologías renovables en el municipio para orientar estudios de prefactibilidad, así como para guiar la toma de decisiones hacia un suministro eléctrico más sostenible. No obstante, la extrapolación de estas conclusiones hacia decisiones de implementación deberá abordarse con cautela y acompañarse de investigaciones adicionales que profundicen en las condiciones específicas de cada recurso y tecnología de aprovechamiento.

## 7. Recomendaciones

En fases más avanzadas de investigación, especialmente en proyectos solares, será necesario definir con precisión el área disponible para la instalación de sistemas fotovoltaicos, mientras que para el recurso hidroeléctrico se requerirá información detallada de los cauces y de las caídas hidráulicas específicas, de modo que los cálculos de potencial energético se ajusten mejor a condiciones reales de implementación.

Para el recurso de biomasa, conviene realizar estudios que identifiquen con mayor detalle la disponibilidad, localización y caracterización de la materia, considerando tanto su variación temporal como las condiciones logísticas de aprovechamiento, lo que permitirá plantear escenarios más realistas y aplicables a nivel local.

A la hora de evaluar proyectos específicos será indispensable realizar estudios de prefactibilidad técnica y económica que incluyan un análisis de sensibilidad, de manera que se consideren distintos escenarios de implementación y se fortalezcan las bases para orientar decisiones de planificación y ejecución.

### Referencias bibliográficas

- Ahmadi, L., Kannangara, M., & Bensebaa, F. (2020). Cost-effectiveness of small scale biomass supply chain and bioenergy production systems in carbon credit markets: A life cycle perspective. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100627. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100627>
- Akrami, E., Chitsaz, A., Nami, H., & Mahmoudi, S. (2017). Energetic and exergoeconomic assessment of a multi-generation energy system based on indirect use of geothermal energy. *Energy*, 124, 625–639. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.006>
- Alcaldía Municipal de Charalá - Santander. (2024). *Plan de Desarrollo 2024-2027: "Charalá para todos"*. Alcaldía Municipal de Charalá - Santander.
- Alfaro, C. M., Rueda Gutiérrez, J. B., Casallas, Y. P., Rodríguez, G. Z., & Malo, J. E. (2020). *Estimación preliminar del potencial geotérmico de Colombia*. Servicio Geológico Colombiano.
- Araújo, J. V., & Cabré, M. M. (2023). Solar and wind power in Colombia: 2022 policy overview. <https://doi.org/10.51414/sei2023.015>
- Barrera-Zapata, M., Zuñiga-Cortes, F., & Caicedo-Bravo, E. (2023). A Framework for Evaluating Renewable Energy for Decision-Making Integrating a Hybrid FAHP-TOPSIS Approach: A Case Study in Valle del Cauca, Colombia. *Data*, 8(9), 137. <https://doi.org/10.3390/data8090137>
- Borrero Morales, N., Criado, J., & Solano, M. A. (2023). *Narrar la transición energética justa: Guía periodística*. Transforma.

- CIMPA. (1992). *Manual para la elaboración de panela y otros derivados de la caña*. Barbosa, Colombia.
- Congreso de Colombia. (2014, mayo 13). *Ley 1715 de 2014: Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional*.
- Copernicus Climate Change Service (C3S). (2018). *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present* (Data set). Copernicus Climate Data Store. <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>
- Delgado, L., & Aristizábal, A. J. (2017). A method for modelling photovoltaic modules under non-standard conditions of solar radiation and ambient temperature in Quibdó, Colombia. *International Journal Of Ambient Energy*, 39(5), 441–445. <https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1318781>
- Departamento Nacional de Planeación - Colombia. (2022). *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026*.
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2004). *¿Qué es la Energía Geotérmica?* International Geothermal Association. <https://www.virtualpro.co/biblioteca/-que-es-la-energia-geotermica->
- Ehrlich, R. (2013). *Renewable energy: A first course* (1st ed.). CRC Press.
- El Baz, F., Arjidal, S., Bakrim, M., Mediouni, T., & Faska, N. (2020). Methanisation of Agadir urban solid waste: Theoretical evaluation of the energy production potential. *Materials Today: Proceedings*, 22, 97–99.
- Elger, D. F., LeBret, B. A., Crowe, C. T., & Roberson, J. A. (2020). *Engineering fluid mechanics*. John Wiley & Sons.

Entrena González, F. J. (2016). *Determinación del potencial solar*. ENAC0108. IC Editorial.

Ferreira, L. R. A., Otto, R. B., Silva, F. P., De Souza, S. N. M., De Souza, S. S., & Junior, O. A. (2018). Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 440–455.

Gobierno de Colombia, Fondo Adaptación, Departamento Nacional de Planeación, & Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2023). *Evaluación de daños, pérdidas e impactos asociados a la ocurrencia del Fenómeno de La Niña 2021–2023 (Decreto 2113 de 2022)*.

González, J. A. C., Pérez, R. C., Santos, A. C., & Gil, M.-A. C. (2009). *Centrales de energías renovables: Generación eléctrica con energías renovables*. Pearson Educación.

González, L., Rojas, A., & Varela, L. (2012). ¿Pueden aprovecharse las bajas velocidades de viento en Colombia para abastecimiento eléctrico? Un ejemplo hipotético. *Virtualpro*, 123.

Gross, S. (2020, enero). *Renewables, land use, and local opposition in the United States* (Brookings Foreign Policy Report). Brookings Institution.

Hernandez, J., Arredondo, C. A., & Vallejo, W. (2014). Technical potential of some Colombian cities for the development of grid connected PV systems through virtual instrumentation. *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 1430–1435. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2014.6925185>

*Honeywell Store - thermostats, air purifiers, fans & more.* (s. f.-b). <https://www.honeywellstore.com/>

IDEAM. (2017). *Atlas climatológico de Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) & Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2017). *Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia*.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) & Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2017). *Atlas de viento de Colombia*.

Jensen, L. L. (PlanEnergi). (2014, October). *Solar calculations for the Raseiniai district heating plant* (Technical report). PlanEnergi.  
[https://www.solarthermalworld.org/sites/default/files/news/file/2017-08-03/sdh\\_calculations\\_for\\_raseiniai\\_planenergi\\_october2014.pdf](https://www.solarthermalworld.org/sites/default/files/news/file/2017-08-03/sdh_calculations_for_raseiniai_planenergi_october2014.pdf)

Junfeng, L., Runqing, H., Yanqin, S., Jingli, S., Bhattacharya, S. C., & Salam, P. A. (2005). Evaluación del potencial energético sostenible de los recursos de biomasa no provenientes de plantaciones en China. *Biomasa y Bioenergía*, 29(3), 167–177.

Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., & Bansal, R. (2016). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 69, 596–609.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191>

*Life Cycle Assessment Harmonization | Energy Systems Analysis | NREL*. (s. f.).  
<https://www.nrel.gov/analysis/life-cycle-assessment>

- López, A. R., Krumm, A., Schattenhofer, L., Burandt, T., Montoya, F. C., Oberländer, N., & Oei, P. (2019). Solar PV generation in Colombia - A qualitative and quantitative approach to analyze the potential of solar energy market. *Renewable Energy*, *148*, 1266–1279. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.066>
- Maxeon Solar Technologies. (2024). *SunPower Maxeon 6 SPR-MAX6-440-COM: Commercial solar panel datasheet (Rev. B)*. <https://sunpower.maxeon.com>
- Maxim, A. (2013). Sustainability assessment of electricity generation technologies using weighted multi-criteria decision analysis. *Energy Policy*, *65*, 284-297. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.09.059>
- Muñoz, Y., Guerrero, J., & Ospino, A. (2014). Evaluation of a hybrid system of renewable electricity generation for a remote area of Colombia using homer software. *TECCIENCIA*, *9(17)*, 57–67. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2014.17.6>
- National Renewable Energy Laboratory. (2021). *Life cycle greenhouse gas emissions from electricity generation: Update* (NREL Fact Sheet). U.S. Department of Energy.
- Ong, S., Campbell, C., Denholm, P., Margolis, R., & Heath, G. (2013). *Land-use requirements for solar power plants in the United States* (NREL Technical Report No. NREL/TP-6A20-56290). National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56290.pdf>
- Pacific Northwest Laboratory (PNL), & National Renewable Energy Laboratory (NREL). (1986). *Wind energy resource atlas of the United States*. Solar Technical Information Program,

- Solar Energy Research Institute. Golden, CO. Recuperado de [http://rredc.nrel.gov/wind/pubs/atlas/atlas\\_index.html](http://rredc.nrel.gov/wind/pubs/atlas/atlas_index.html)
- Práválie, R., Patriche, C., & Bandoc, G. (2018). Spatial assessment of solar energy potential at global scale. A geographical approach. *Journal Of Cleaner Production*, 209, 692-721. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.239>
- Proyecto Nexos. (2024). *Guía metodológica para el cálculo del potencial energético de la biomasa residual departamental*. Nexos Colombia. <https://nexocolombia.com/wp-content/uploads/2025/05/Metodologia-para-el-calculo-del-potencial-energetico-de-la-biomasa-residual-departamental.pdf>
- Rey, J., Vergara, P., Osma, G., & Ordóñez, G. (2013). Analysis of the inclusion of smart grids technology in the Colombian electric power system. *2013 International Symposium on Power Quality (SICEL)*.
- Rincón Montenegro, A., Carmona, M., Sanjuan, M., Ramirez, A., & Portnoy, I. (2024). Multi-criteria assessment of transition scenarios for a novel hybrid power and hydrogen generation system. *Energy Conversion And Management*, 313, 118552. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118552>
- Rodríguez-Urrego, D., & Rodríguez-Urrego, L. (2018). Photovoltaic energy in Colombia: Current status, inventory, policies and future prospects. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 92, 160–170. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.065>

- Santiago, E. P. D., & Sebastian, M. A. J. (2024, septiembre 11). Revisión de literatura de Proyectos Energéticos basados en Energía Geotérmica. <http://repositorio.unicesmag.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/1210>
- Saur News Bureau. (2016, 31 marzo). Here is how you can calculate the annual solar energy output of a photovoltaic system. *Saur Energy*. <https://www.saurenergy.com/solar-energy-blog/here-is-how-you-can-calculate-the-annual-solar-energy-output-of-a-photovoltaic-system>
- Shatnawi, N., Abu-Qdais, H., & Qdais, F. A. (2021). Selecting renewable energy options: an application of multi-criteria decision making for Jordan. *Sustainability Science Practice And Policy*, 17(1), 209-219. <https://doi.org/10.1080/15487733.2021.1930715>
- Sheng, C., & Azevedo, J. L. T. (2005). Estimación del poder calorífico superior de los combustibles de biomasa a partir de datos de análisis básicos. *Biomasa y bioenergía*, 28(5), 499–507.
- (Sin autor). (2012). *Gestión de proyectos de montaje de instalaciones de energía eólica*. Editores del ICB. <https://www-digitaliapublishing-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/a/109387>
- Talayero Navales, A., & Telmo Martínez, E. (2011). *Energía eólica (Serie Energías renovables)*. Prensas Universitarias de Zaragoza. <https://www-digitaliapublishing-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/a/55545>
- Thamarai, P., Kamalesh, R., Shaji, A., Saravanan, A., Yaashikaa, P. R., & Vickram, A. S. (2025). Advanced conversion technologies for resource recovery from waste biomass: Applications and emerging trends. *Chemosphere*, 384, 144515.

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2019). *Atlas de Radiación Solar de Colombia*.

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2020). *Plan Energético Nacional 2020-2050: La transformación energética que habilita el desarrollo sostenible*. UPME.

Unidad de Planeación Minero Energética. (2023, diciembre). *Informe de avance proyectos de generación*.

[https://www1.upme.gov.co/siel/Seguimiento\\_proyectos\\_generacion/Informe\\_avance\\_proyectos\\_generacion\\_Diciembre\\_2023.pdf](https://www1.upme.gov.co/siel/Seguimiento_proyectos_generacion/Informe_avance_proyectos_generacion_Diciembre_2023.pdf)

Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, Colciencias, & Pontificia Universidad Javeriana. (2015). *Atlas del Potencial Hidroenergético de Colombia*. UPME.

<https://www1.upme.gov.co/Paginas/Primer-Atlas-hidroenergetico-revela-gran-potencial-en-Colombia.aspx>

Unidad de Planificación Rural Agropecuaria – UPRA. (2023). *Evaluaciones Agropecuarias Municipales – EVA*. <https://upra.gov.co/es-co/evaluaciones-agropecuarias-municipales-eva>

United Nations Industrial Development Organization. (2019). *Technical guidelines for the development of small hydropower plants – Design. Part 1: Site selection planning (SHP/TG 002-1: 2019)*. UNIDO. [https://www.unido.org/sites/default/files/files/2020-01/P1\\_DES\\_002-1.pdf](https://www.unido.org/sites/default/files/files/2020-01/P1_DES_002-1.pdf)

Vanguardia. (2024, mayo 8). Charalá sufre los primeros daños por las lluvias. *Región*. Recuperado de [www.vanguardia.com](http://www.vanguardia.com)

- Velásquez, H. I., Janna, F. C., & Agudelo, A. F. (2006). Diagnóstico exerético de los procesos productivos de la panela en Colombia. *Energética*, (35), 15-22.
- Wang, J., Jing, Y., Zhang, C., & Zhao, J. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2263-2278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021>
- World Energy Council. (2024). *World Energy Issues Monitor 2024: Redesigning Energy in 5D – Regional Perspectives Prepared by the Future Energy Leaders*.
- XM Compañía de Expertos en Mercados S.A.* (2024). *Históricos – Sinergox*. <https://sinergox.xm.com.co/dmnd/Paginas/Historicos/Historicos.aspx>

## Apéndices

### Apéndice A. Datos de los recursos energéticos del municipio de Charalá

**Tabla A1.** *Radiación solar promedio en Charalá a partir de las fuentes de datos consultadas.*

<b>Mes</b>	<b>GHI IDEAM (kWh/m<sup>2</sup>·día)</b>	<b>GHI POWER NASA (kWh/m<sup>2</sup>·día)</b>	<b>GHI ERA5 (kWh/m<sup>2</sup>·día)</b>
Ene	4,347	5,173	5,287
Feb	4,413	5,286	5,520
Mar	4,250	4,978	5,377
Abr	3,952	4,860	5,000
May	3,912	4,991	4,737
Jun	3,861	5,025	4,956
Jul	4,090	5,160	5,098
Ago	4,130	5,295	5,422
Sep	4,095	5,335	5,557
Oct	4,085	5,038	5,073
Nov	3,987	4,815	4,800
Dic	4,086	4,902	5,082

**Tabla A2.** *Velocidad del viento promedio en Charalá a partir de las fuentes de datos consultadas.*

<b>Mes</b>	<b>Vel. viento IDEAM (m/s)</b>	<b>Vel. viento POWER NASA (m/s)</b>	<b>Vel. viento ERA5 (m/s)</b>
<b>Ene</b>	1,5	1,4	0,3
<b>Feb</b>	1,6	1,4	0,3
<b>Mar</b>	1,6	1,4	0,2
<b>Abr</b>	1,6	1,3	0,2
<b>May</b>	1,6	1,2	0,1
<b>Jun</b>	1,6	1,2	0,1
<b>Jul</b>	1,7	1,2	0,1
<b>Ago</b>	1,7	1,2	0,1
<b>Sep</b>	1,8	1,2	0,1
<b>Oct</b>	1,7	1,3	0,2
<b>Nov</b>	1,4	1,4	0,3
<b>Dic</b>	1,6	1,4	0,3

**Tabla A3.** *Masa seca producida por los cultivos principales años 2019-2023.*

<b>Año</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Masa seca [t]</b>
<b>2019</b>	Caña	13367
	Café	5666
	Plátano	238
	Otros	104
<b>2020</b>	Caña	15960
	Café	5357
	Plátano	178
	Otros	106
<b>2021</b>	Caña	19600
	Café	4807
	Plátano	622
	Otros	92
<b>2022</b>	Caña	23205
	Café	5298
	Plátano	741
	Otros	100
<b>2023</b>	Caña	12793
	Café	5095
	Plátano	1410
	Otros	226

**Apéndice B** Energía producida por sistemas eólicos en Charalá**Tabla B1.** Configuración y AEP estimada para sistemas eólicos según potencia instalada

<b>Potencia Inst. (kW)</b>	<b>No Turbinas</b>	<b>No filas</b>	<b>No columnas</b>	<b>Área total (m<sup>2</sup>)</b>	<b>P. teórico (GWh/año)</b>	<b>AEP (GWh/año)</b>
0,35	54,5	5,4	10	7057	2,89E-03	3,10E-03
0,71	109,7	11,0	10	14217	5,83E-03	6,25E-03
1,07	164,9	16,5	10	21377	8,76E-03	9,39E-03
1,43	220,2	22,0	10	28537	1,17E-02	1,25E-02
1,79	275,4	27,5	10	35696	1,46E-02	1,57E-02
2,15	330,7	33,1	10	42856	1,76E-02	1,88E-02
2,51	385,9	38,6	10	50016	2,05E-02	2,20E-02
2,87	441,2	44,1	10	57176	2,34E-02	2,51E-02
3,23	496,4	49,6	10	64336	2,64E-02	2,83E-02
3,59	551,7	55,2	10	71496	2,93E-02	3,14E-02

**Apéndice C** Evaluación multicriterio de tecnologías renovables

A continuación, se presenta el anexo técnico del análisis multicriterio basado en los criterios ambientales, técnicos y socioeconómicos. En cada caso, se presentan los valores asignados a cada tecnología, según la tabla de referencia, junto con su fuente bibliográfica y una justificación sintetizada que respalda la elección de dichos valores.

**Tabla C1.** Criterios de evaluación de las tecnologías.

<i>Criterio</i>	<i>Solar</i>	<i>Eólico</i>	<i>PCH</i>	<i>Biomasa</i>	<i>Unidad</i>	<i>Referencia</i>
Emisiones	0,047	0,011	0,008	0,04	KgCO <sub>2e</sub> /KWh	(NREL, 2021)
Uso del suelo	0,33	1,57	0,02	12,65	m <sup>2</sup> /MWh	(Maxim, 2013)
Consumo de agua	0,001	5,4E-05	8,9E-06	1,5	m <sup>3</sup> /MWh	(Barrera-Zapata et al., 2023)
LCOE	301,9	109,61	237,55	97,1	USD/MWh	(Maxim, 2013)
Factor de capacidad	20	27	50	70	%	(Maxim, 2013)
Eficiencia	15	35	89	30	%	(Restrepo-Garcés et al., 2017)
Variabilidad del recurso	15,1	21,33	72,47	21,38	%	(IDEAM, UPME, 2017)
Disponibilidad del recurso	Muy alto	Muy bajo	Muy bajo	Muy alto	--	(Právělie et al., 2018; PNL & NREL, 1986)
Creación de empleo	0,87	0,17	0,27	0,21	años-trabajo/GWh	(Maxim, 2013)
Aceptabilidad social	Alta	Alta	Alta	Media	--	(Maxim, 2013)

**Emisiones (kg CO<sub>2</sub>/kWh):** Las diferencias en emisiones entre tecnologías renovables se explican por los procesos de fabricación, instalación y operación. En el caso de la energía solar fotovoltaica, las emisiones de ciclo de vida se sitúan entre 0,040 y 0,050 kgCO<sub>2</sub>/kWh, producto principalmente de la energía utilizada en la producción de módulos, estructuras y equipos auxiliares. La energía eólica muestra valores mucho menores (0,011 kgCO<sub>2</sub>/kWh) porque, una vez construidos los aerogeneradores, su operación requiere poco mantenimiento y casi no genera emisiones adicionales. Las PCH registran aún menos emisiones (0,008 kgCO<sub>2</sub>/kWh), ya que no utilizan combustibles fósiles y las emisiones derivadas de la construcción se distribuyen a lo largo de una extensa vida útil. En contraste, la biomasa presenta aproximadamente 0,040 kgCO<sub>2</sub>/kWh, ya que, aunque la combustión libera CO<sub>2</sub>, parte de este se compensa con el carbono absorbido durante el crecimiento de la materia orgánica.

**Uso del suelo (m<sup>2</sup>/MWh):** El impacto territorial de las tecnologías varía considerablemente. La solar fotovoltaica requiere alrededor de 0,33 m<sup>2</sup>/MWh, debido a la superficie que ocupan los paneles en sistemas de suelo fijo. En el caso de la energía eólica, la ocupación estimada es de 1,6 m<sup>2</sup>/MWh, resultado de la separación entre turbinas y las áreas de seguridad que deben mantenerse libres. Las PCH tienen una huella espacial mínima (0,02 m<sup>2</sup>/MWh), ya que utilizan cauces naturales y no demandan grandes superficies adicionales. En contraste, la biomasa presenta el uso de suelo más elevado (12,65 m<sup>2</sup>/MWh), pues necesita amplias extensiones para el cultivo y procesamiento de la materia prima.

**Consumo de agua (m<sup>3</sup>/MWh):** El agua requerida para generación eléctrica depende del recurso. Para la energía solar el consumo es muy bajo (0,001 m<sup>3</sup>/MWh), limitado al agua de limpieza de paneles y construcción. La energía eólica registra consumo casi nulo

( $5,4 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{MWh}$ ), pues no requiere refrigeración ni riego. Las PCH tradicionales consumen cantidades insignificantes ( $8,9 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{MWh}$ ), pues el agua utilizada en las turbinas retorna al cauce sin pérdidas apreciables. En cambio, la biomasa explota intensamente el agua ( $1,5 \text{ m}^3/\text{MWh}$ ) debido a los procesos de combustión/vapor.

**Costo Nivelado de Energía (LCOE, USD\$/MWh):** Los valores empleados en este análisis son de 301,9 USD/MWh para la energía solar, 109,61 USD/MWh para la eólica, 237,55 USD/MWh para la PCH y 97,1 USD/MWh para la biomasa. Las tecnologías eólicas y de biomasa resultan más competitivas porque pueden operar más horas al año, reduciendo el costo unitario por energía generada. En cambio, la solar fotovoltaica presenta el costo más alto debido a su dependencia del recurso diurno y a la inversión inicial en equipos. La PCH, aunque estable en operación, requiere obras civiles de alto costo que incrementan su LCOE.

**Factor de capacidad (%):** En promedio, la solar fotovoltaica opera entre 15 y 25 %, limitada por la disponibilidad diaria de radiación; la eólica, entre 25 y 35 %, dependiendo de la constancia del viento; las PCH alcanzan alrededor del 50 %, aprovechando el flujo hídrico en la mayor parte del año; y la biomasa puede superar el 70 %, ya que su producción depende del suministro continuo de materia prima y no de factores climáticos.

**Eficiencia (%):** La eficiencia energética varía según el principio de transformación. Los paneles solares convierten aproximadamente un 15 % de la radiación en electricidad útil debido a las pérdidas por reflexión y resistencia eléctrica. Las turbinas eólicas alcanzan una eficiencia del 35 %, limitada por la fracción de energía cinética que las palas pueden capturar. Las PCH son las más eficientes ( $\approx 89 \%$ ) gracias a la conversión casi total de la energía del agua en energía mecánica

y eléctrica. En cambio, la biomasa muestra una eficiencia intermedia (30–40 %) por las pérdidas térmicas en los procesos de combustión o gasificación.

**Variabilidad del recurso:** En el análisis, la energía solar presenta una baja variabilidad (15,1 %), ya que la radiación solar sigue un patrón predecible diario y estacional. En cambio, la energía eólica (21,33 %) exhibe una mayor variabilidad debido a las fluctuaciones de velocidad, que dependen de condiciones meteorológicas locales y son menos regulares que la radiación solar. Las PCH mostraron una alta variabilidad (72,47 %), atribuida a los cambios estacionales en los caudales de los ríos, especialmente en regiones como Charalá con marcadas épocas de lluvia y sequía. Finalmente, la biomasa, con 21,38 %, mantiene una variabilidad baja-moderada, ya que la disponibilidad de materia prima puede controlarse mediante almacenamiento y planificación agrícola.

**Disponibilidad del recurso:** En este análisis, la energía solar se clasificó con muy alta disponibilidad, ya que la radiación está presente casi todos los días, aunque restringida a las horas de luz solar (entre 5 y 7 h diarias). La eólica obtuvo una disponibilidad muy baja, consecuencia de las bajas velocidades promedio registradas en la zona de estudio. Las PCH también fueron calificadas con disponibilidad baja, debido a que los caudales locales no alcanzan de forma constante los niveles necesarios para generar a alta carga. Por último, la biomasa presenta una disponibilidad muy alta, respaldada por la abundante actividad agrícola y la generación continua de residuos orgánicos que pueden emplearse como combustible.

**Creación de empleo:** La energía solar fotovoltaica es la más intensiva en mano de obra (0,87 años-trabajo/GWh), debido al trabajo requerido en la fabricación, montaje y mantenimiento de los módulos. La energía eólica genera menos empleo directo (0,17 años-trabajo/GWh) porque

sus sistemas están altamente automatizados y tienen largos periodos entre mantenimientos. Las PCH aportan 0,27 años-trabajo/GWh, un valor medio que refleja la necesidad de personal durante la construcción y operación local. Por su parte, la biomasa genera aproximadamente 0,21 años-trabajo/GWh, producto del empleo vinculado a la cadena agrícola y forestal.

**Aceptabilidad social:** Las percepciones sociales hacia las energías renovables difieren según su interacción con el entorno. La energía eólica y la solar fotovoltaica son generalmente bien valoradas por su bajo impacto ambiental y visual, así como por el beneficio local que aportan. En contraste, la biomasa puede generar reservas en las comunidades debido al uso intensivo de tierra, emisiones por combustión o cambios en prácticas agrícolas. Las PCH, por su parte, gozan de buena aceptación cuando su escala es reducida y no altera significativamente el cauce natural.

La asignación de los pesos para cada criterio se realizó considerando su importancia dentro del análisis multicriterio, siguiendo los lineamientos planteados por diversos autores como Maxim (2014), Barrera-Zapata et al. (2023) y Restrepo-Garcés et al. (2017). Estos estudios coinciden en que la evaluación de fuentes de energía renovable debe integrar una perspectiva equilibrada entre aspectos ambientales, técnicos, económicos y sociales, de modo que los resultados reflejen una visión integral de sostenibilidad.

El peso más alto correspondió a la disponibilidad del recurso (0,25), debido a que este parámetro determina la posibilidad real de generación energética a lo largo del año, aspecto considerado esencial por Maxim (2014) y Barrera-Zapata et al. (2023) para asegurar la confiabilidad del suministro. De forma complementaria, la variabilidad (0,14) también recibió una ponderación elevada, pues refleja la estabilidad temporal del recurso y su capacidad de mantener una producción constante, elemento clave para el desempeño técnico de los sistemas renovables.

Los criterios ambientales, como el uso del suelo (0,12) y el LCOE (0,12), ocuparon posiciones intermedias dentro de la jerarquía, en coherencia con estudios previos (Restrepo-Garcés et al., 2017; Maxim, 2014) que evidencian su influencia directa en la viabilidad ambiental y económica de los proyectos. En contraste, el consumo de agua (0,04) fue ponderado con un valor menor, dado que su impacto resulta limitado frente a otras variables, especialmente en tecnologías como la eólica o las PCH, cuyo uso hídrico es prácticamente nulo.

Por último, los criterios técnicos y sociales, representados por la eficiencia (0,06), la generación de empleo (0,06) y la aceptabilidad social (0,05), mantuvieron pesos moderados. Esta decisión se sustenta en que, si bien estos factores influyen positivamente en la percepción y el desarrollo local, su efecto no es determinante en la sostenibilidad global del recurso, sino complementario dentro del conjunto de indicadores evaluados.