

# Geolocalización de municipios idóneos en Colombia para instalar calentadores solares de agua por medio de un análisis multicriterio sustentable

## Geolocation of suitable municipalities in Colombia to install solar water heaters based on a sustainable multicriteria analysis

Francisco Marín-Quiroga<sup>1a</sup>, Juan Sebastián Solís-Chávez<sup>1b</sup>, Andrés Felipe Medina-Gamba<sup>1c</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía (GIATME), Ingeniería Mecatrónica, Universidad ECCI, Colombia.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2689-1895> <sup>a</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-3211-3398> <sup>b</sup>,  
Correos electrónicos: [fmarinq@ecci.edu.co](mailto:fmarinq@ecci.edu.co) <sup>a</sup>, [jsolisc@ecci.edu.co](mailto:jsolisc@ecci.edu.co) <sup>b</sup>, [andresf.medinag@ecci.edu.co](mailto:andresf.medinag@ecci.edu.co) <sup>c</sup>

Recibido: 09/07/2023. Aceptado: 22/08/2023. Versión final: 15/09/2023

### Resumen

Un factor que ha llevado a un aumento en el uso de fuentes energéticas basadas en la utilización del sol, el viento, el agua o la biomasa (denominadas fuentes de energía renovables) es la necesidad de minimizar la aceleración del calentamiento. Con esta preocupación ambiental se han establecido diferentes estrategias enmarcadas dentro del enfoque del Desarrollo Sustentable haciendo necesaria una evaluación adecuada de los sitios idóneos para la utilización óptima de estos recursos. El presente se enmarca en la temática de las Fuentes No Convencionales de Energía Sustentable, proponiendo una revisión y simulación, teniendo en cuenta diferentes fuentes de información estadística para la identificación y determinación de los municipios idóneos en Colombia para el aprovechamiento del calor solar con el fin de instalar sistemas de energía solar térmica en función de las perspectivas técnicas, económicas y socioambientales (perspectivas del desarrollo sustentable). El estudio se realiza con el uso combinado de Sistemas de Información Geográfica y la Toma de Decisiones MultiCriterio. En particular, se aplica uno de los métodos estadísticos multicriterio, concretamente el Proceso de Jerarquía Analítica (Analytic Hierarchy Process - AHP) y la técnica de las Sumas Ponderadas (Rank Sum) con la estrategia de evaluación conocida como Combinación Lineal Ponderada (Weighted Linear Combination -WLC). En el análisis se considera el modelo digital de elevación para descartar municipios de clima cálido-templado en Colombia.

**Palabras clave:** Agua Caliente Sanitaria (ACS), Análisis Multicriterio, Desarrollo Sustentable, Colector Solar para Calentamiento de Agua (CSCA), Combinación Lineal Ponderada (WLC), Energía Solar Térmica, Energías Renovables, Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCR), Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS),

Como citar: F. Marín-Quiroga, J. S. Solís-Chávez, A. F. Medina-Gamba “Geolocalización de municipios idóneos en Colombia para instalar calentadores solares de agua por medio de un análisis multicriterio sustentable” in *XI Simposio Internacional de Calidad de la Energía Eléctrica*, Valledupar: Universidad Nacional de Colombia, Nov. 2023. doi: <https://doi.org/10.15446/sicel.v11.110050>

Planos de Información, Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), Sistema de Información Geográfica (SIG), Sumas Ponderadas, Toma de Decisiones MultiCriterio (MCDM).

## Abstract

One factor that has led to an increase in the use of energy sources based on the use of the sun, wind, water or biomass (called renewable energy sources) is the need to minimize the acceleration of global warming. With this environmental concern, different strategies have been established within the framework of the Sustainable Development approach, making necessary an adequate evaluation of the ideal sites for the optimal use of these resources. The present paper is framed within the theme of Non-Conventional Sources of Sustainable Energy, proposing a review and simulation, taking into account different sources of statistical information for the identification and determination of the ideal municipalities in Colombia for the use of solar heat with in order to install solar thermal energy systems based on technical, economic and socio-environmental perspectives (sustainable development perspectives). The study is carried out with the combined use of Geographic Information Systems and Multi-Criteria Decision Making. In particular, one of the multicriteria statistical methods is applied, specifically the Analytic Hierarchy Process and the Rank Sum technique with the evaluation strategy known as Weighted Linear Combination. In the analysis, the digital elevation model is considered to rule out municipalities with a warm-temperate climate in Colombia.

**Keywords:** Domestic Hot Water (DHW), Multicriteria Analysis, Sustainable Development, Flat Plane Solar Collectors (FPSC), Weighted Linear Combination (WLC), Solar Thermal Energy, Renewable Energies, Unconventional Sources of Renewable Energy, Sustainable Development Goals (SDG), Information Plans, Analytic Hierarchy Process (AHP), Geographic Information System (GIS), Rank Sum, Multi-Criteria Decision Making (MCDM).

## 1. Introducción

En Colombia, las fuentes renovables de energía, han comenzado a despertar interés debido a la preocupación por el cambio climático. Las energías renovables buscan mejorar las condiciones de vida de las personas que habitan regiones con algunas condiciones particulares, entre otras: regiones apartadas, sin acceso a la energía eléctrica proveniente del Sistema de Transmisión Nacional y que deben utilizar combustibles fósiles para solventar la falta de electricidad. Por lo tanto, existen diferentes métodos para la obtención de energía limpia basados en Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), precisamente este artículo se basa en la importancia que tienen los ejes de la Sustentabilidad, teniendo como principal motivación resolver los ODS (Objetivos del Desarrollo Sustentable) para un proyecto de uso de FNCER en Colombia.

Uno de los proyectos o metas del ser humano al 2030 es mejorar su calidad de vida; por esta razón nacen los ODS o también conocidos como los objetivos mundiales propuestos por la ONU [1], estos objetivos buscan que todas las naciones preserven la vida del planeta y de nosotros mismos.

En Colombia la demanda energética es cada vez mayor, está por el orden de 208.000 MWh-día [2], pues existe un gran crecimiento poblacional e industrial, necesitando un consumo energético que equivale a 26.208 TonCO<sub>2eq</sub>

que se emiten al medio ambiente [3 y 4], trayendo consigo problemas económicos, sociales y ambientales.

La sustentabilidad genera estrategias para mitigar los impactos negativos del hombre sobre el medio ambiente. En su primer eje contempla el crecimiento económico del desarrollo sostenible, el segundo eje contempla la equidad social como fin del desarrollo sostenible y el tercer eje considera la dimensión ambiental como condición para el desarrollo sostenible, gráficamente esto está representado por la Figura 1.

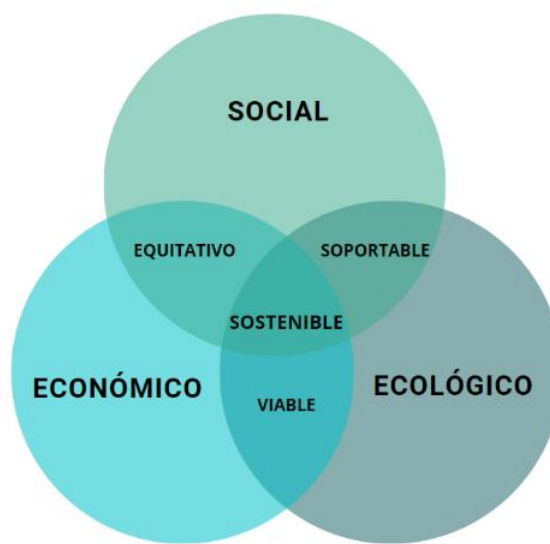


Figura 1. Ejes Sustentables, Fuente: Propia

En el presente artículo se realiza una Toma de Decisiones Multicriterio (MCDM) y el uso de software libre para el procesamiento de información proveniente del Sistema Información Geográfica (SIG) para la ubicación de municipios considerados idóneos con el fin de instalar sistemas de energía solar térmica. El reto más apremiante que se tiene en este artículo es el de ayudar a mitigar los efectos adversos propios del cambio climático, y para ello tenemos que limitar y reducir las emisiones de carbono; por ejemplo, uno de los electrodomésticos que más consume energía eléctrica es la ducha eléctrica (105 kWh/mes) [5], la instalación de una fuente de energía sostenible (colector solar, por ejemplo) evitaría la emisión de 13,23 KgCO<sub>2</sub>/mes al medio ambiente [3].

Una de las formas en la que se puede aprovechar la energía solar térmica es el uso de colectores solares planos para la generación de Agua Caliente Sanitaria (ACS) [6]. El ACS es empleada principalmente para satisfacer las necesidades de baño, consumo, manejo y preparación de alimentos, en electrodomésticos, limpieza (desinfección, esterilización), entre otros; es por esta razón que un colector solar contribuye significativamente a suplir la demanda de energía en las viviendas. Un uso adecuado y eficaz del ACS a partir de los colectores solares planos brinda facilidad de acceso a este recurso de una forma eficiente, económica y ecológicamente sustentable ya que permite ahorrar costos en la factura del gas o electricidad y disminuye el impacto en el medio ambiente [7].

Los colectores solares pueden definirse como intercambiadores de calor que aprovechan la radiación solar global (directa y difusa) para calentar un fluido usualmente a bajas temperaturas y una de sus principales aplicaciones es el calentamiento de agua [8, 9]. Un esquema de un Colector Solar para Calentamiento de Agua (CSCA) de tubos planos y de su instalación complementaria para uso doméstico se presenta en la Figura 2.



Figura 2. Esquema de funcionamiento de un CSCA, Fuente: [10]

Un CSCA funciona gracias a un sistema de termosifón, cuando la radiación solar incide sobre el colector solar, el agua que se encuentra en los captadores solares aumenta

de temperatura y como resultado cambia ligeramente la densidad del flujo. Esta variación es suficiente para que el fluido circule a través del circuito primarios hasta el acumulador que puede ser de 100 a 300 litros. El fluido frío es más denso y tiende a bajar, del mismo modo, el fluido caliente tiende a subir. Una vez el fluido está en el acumulador se realiza un intercambio de calor mediante un proceso termodinámico de convección. El diseño y montaje de este equipo es muy sencillo [11], su costo está por el orden de 1,5 SMMLV [12]; un CSCA puede disminuir el consumo energético utilizado para calentar agua hasta en un 75%, en promedio. Un estudio detallado sobre la factibilidad técnica y económica de los colectores solares en Colombia se presenta en (Ávila-Carranza et al., 2021) [13] considerando un modelo comercial disponible en el país.

Para la instalación de estos sistemas de energía solar térmica es necesario evaluar algunos criterios, con el objetivo de promover el desarrollo de los municipios de Colombia donde exista el potencial solar, la necesidad de agua caliente y que sea técnica y económicamente viable implementarlos. En Colombia se han realizado estudios aplicando el MCDM a las Energías Renovables y el Desarrollo Sustentable, en fuentes energéticas basadas en la utilización de la energía solar fotovoltaica, eólica, biomasa, pero no en sistemas de energía solar térmica. Es por esto que, en primer lugar, se realiza una revisión bibliográfica con el fin de determinar qué indicadores se han establecido para el desarrollo sostenible del sector energético. La Tabla 1 presenta un resumen de las categorías y número de indicadores que reflejan la interacción entre el sector energético, las necesidades sociales, las condiciones ambientales y el crecimiento económico. así como los principales autores a nivel mundial que hacen parte de la revisión bibliográfica [31, 32, 33, 34]. La Tabla 2 presenta la misma información que la Tabla 1, con los principales autores en Colombia que hacen parte de la revisión bibliográfica.

De igual manera, entre los trabajos precedentes que utilizan el análisis multicriterio como herramienta de decisión aplicada a las energías renovables y el desarrollo sustentable, pueden citarse: En Brasil aplicado a Energía Eólica en el año 2017 [14], en el 2021, dos (2) trabajos de maestría de la UECCI: [15] Energía Solar Fotovoltaica y [16] Sistemas de Microgeneración Eólica en Colombia y más recientemente, utilizando la Biomasa en Colombia [17], entre otros. Estos autores han utilizado software de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el método de análisis multicriterio para la integración del desarrollo sostenible.

Tabla 1. Relación de indicadores de desarrollo sostenible propuestos para el sector energético, organizado por autor.

Autor	Año	Título del Estudio	Propósito/Objetivo	Criterios e Indicadores	Energía Renovable	Método de Optimización MCDM	
Sánchez-Lozano Juan Miguel, Ramos-Escudero Adela, Gil-García Isabel C., García-Cascales María Socorro, Molina-García Angel	2022	A GIS-based offshore wind site selection model using fuzzy multi-criteria decision-making with application to the case of the Gulf of Maine	Selección óptima de la ubicación	Velocidad media del viento (m/s) Batimetría (m) Calidad del agua (concentración de oxígeno) Distancia a subestaciones (m) Distancia a la costa (m) Distancia a los puertos (m) Gastos de capital (CAPEX) Gastos operativos (OPEX) Gastos de desmantelamiento (DECEX)	Vientos de la costa	AHP, SIG	[31]
Shao Meng, Zhao Yuanxu, Sun Jinwei, Han Zhixin, Shao Zhuxiao	2023	A decision framework for tidal current power plant site selection based on GIS-MCDM: A case study in China	Áreas marinas potenciales Selección óptima del sitio	Línea Roja Ecológica Marina Profundidad del agua (m) Densidad de potencia de corriente de marea (W/m <sup>2</sup> ) Distancia desde la orilla (km) Distancia al Puerto (DP) (km) Distancia a la Red Eléctrica (DPG) (km) Distancia desde el Fairway (DF) (km) Distancia desde Áreas Turísticas Costeras (DCTA) (km) Población atendida (PS)	Marea	Fuzzy Group decision making AHP (FGAHP) CRiteria Importance Through Interriteria Correlation (CRITIC)	[32]
[Susiati Heni, Dede Moh., Widiawaty Millary Agung, Ismail Arif, Udiyani Pande Made	2022	Site suitability-based spatial-weighted multicriteria analysis for nuclear power plants in Indonesia	Idoneidad del sitio	Fisiográfico Pendiente del terreno Agua subterránea Suelos Lluvia Clima Uso del suelo y cobertura del suelo Sistema terrestre Distancia desde el asentamiento Accesibilidad Distrito Central de negocios Infraestructuras vitales y peligrosas Estructuras geológicas Riesgo de desastre	Nuclear	AHP, BWM (Best Worst Method)	[33]
Elboshy Bahaa, Alwetaishi Mamdooh, Aly Reda M. H., Zalhaf Amr S.	2022	A suitability mapping for the PV solar farms in Egypt based on GIS-AHP to optimize multi-criteria feasibility	Mapecto de idoneidad	Radiación solar Promedio anual de días nublados Elevación Pendiente Textura de la tierra Temperatura media anual Distancia de las áreas urbanas Tasa de destello de los relámpagos Distancia desde las líneas de transmisión de energía Distancia de las carreteras principales Velocidad media del viento Distancia a las líneas eléctricas Distancia a las carreteras distancia a las áreas de asentamiento	Solar Fotovoltaica	AHP	[34]
Albraheem Lamy, AlAwlaqi Lama	2023	Geospatial analysis of wind energy plant in Saudi Arabia using a GIS-AHP technique	Ubicaciones adecuadas	pendiente Cuerpos de agua y humedales Uso del suelo y áreas protegidas Áreas importantes para las aves Aeropuertos y aeródromos	Viento en la orilla	AHP	[35]

Tabla 2. Relación de trabajos realizados en Colombia, se presentan los indicadores de desarrollo sostenible propuestos para el sector energético, organizado por autor.

Autor	Año	Título del Estudio	Propósito/Objetivo	Criterios e Indicadores	Energía Renovable	Método de Optimización MCDM	
Costa Yasel, Duarte Alexandra, Sarache William	2017	A decisional simulation-optimization framework for sustainable facility location of a biodiesel plant in Colombia	Ubicación de instalaciones sostenibles	Instalar. costos, factores económicos, sociales, ambientales, tecnológicos, mercado y clientes, disponibilidad de mano de obra	Biodiesel	Supply Chain Network Design (SCND) Diseño de red de cadena de suministro (SCND)	[36]
Henao Felipe, Cherni Judith A., Jaramillo Patricia, Dyne Isaac	2012	A multicriteria approach to sustainable energy supply for the rural poor	Suministro de energía sostenible	Físico Financiero Humano Social Natural	Micro hidro Fotovoltaica solar Biomasa Híbrido: Diésel + biomasa Diésel + solar fotovoltaico Diésel + microhidro Viento	Sustainable Livelihoods Approach (SLA), VIKOR, Compromise Programming (CP)	[37]
R. Quijano H., S. Botero B., J. Domínguez B.	2012	MODERGIS application: Integrated simulation platform to promote and develop renewable sustainable energy plans, Colombian case study	Planes de energías renovables sostenibles	Energía Anual Inversión por potencia instalada Tiempo de implementación Vida útil CO2 no emitido Uso del suelo	Solar térmica fotovoltaica Dendroenergía Biomasa Co-combustión/ Biomasa	AHP VIKOR	[38]
Angel-Sanint Enrique, García-Orrego Simon, Ortega Santiago	2023	Refining wind and solar potential maps through spatial multicriteria assessment. Case study: Colombia	Mapas de potencial solar y eólico	Físico biótico Económico Cultural Político	Energía solar fotovoltaica eólica	Spatial multi-criteria decision-making	[39]

El uso de métodos multicriterio de toma de decisiones (MCDM) que consideran propiedades características y criterios cualitativos para asignar importancia a cada alternativa tiene el fin de seleccionar la mejor opción. La elección de la metodología multicriterio se adapta a todas las restricciones establecidas en la modelización del problema y el resultado final depende de la combinación que mejor satisfaga la decisión final y es un resultado apenas dado como válido en el contexto del problema.

El presente artículo parte de un análisis de información referente a las aplicaciones del MCDM a las Energías Renovables y el Desarrollo Sustentable, presentando un panorama nacional e internacional de los trabajos relevantes, luego se determinan los planos de información suministrados por las diferentes entidades gubernamentales (estos planos de información están enfocados en los ejes de la sustentabilidad) para hacer la simulación en el software QGIS® y optimizar la información y datos adecuados para el análisis estadístico multicriterio. Luego se aplica la metodología multicriterio utilizada en este tipo de análisis estadístico con el fin de obtener el emplazamiento idóneo de

sistemas de energía solar térmica, por último, se plantean dos escenarios de simulación en QGIS®, enfocados en los tres ejes de la sustentabilidad para tener como resultado la ubicación de municipios considerados idóneos con el fin de instalar sistemas de energía solar térmica.

## 2. Aplicación de la Metodología Multicriterio

La metodología utilizada para este artículo está distribuida en varias etapas y subetapas según se describen en la Fig. 3. Esta metodología se basó fundamentalmente en el estudio realizado por De Lima [14] que permite desarrollar un tratamiento de información minucioso y ordenado comenzando por el levantamiento, recolección y compilación de datos; luego se procesan y se refina la información; se realiza un análisis multicriterio basado en el proceso de análisis jerárquico y la técnica de la combinación lineal ponderada. Por último, se obtiene la función de idoneidad y se presentan en tablas y mapas de geolocalización los resultados para los municipios colombianos.

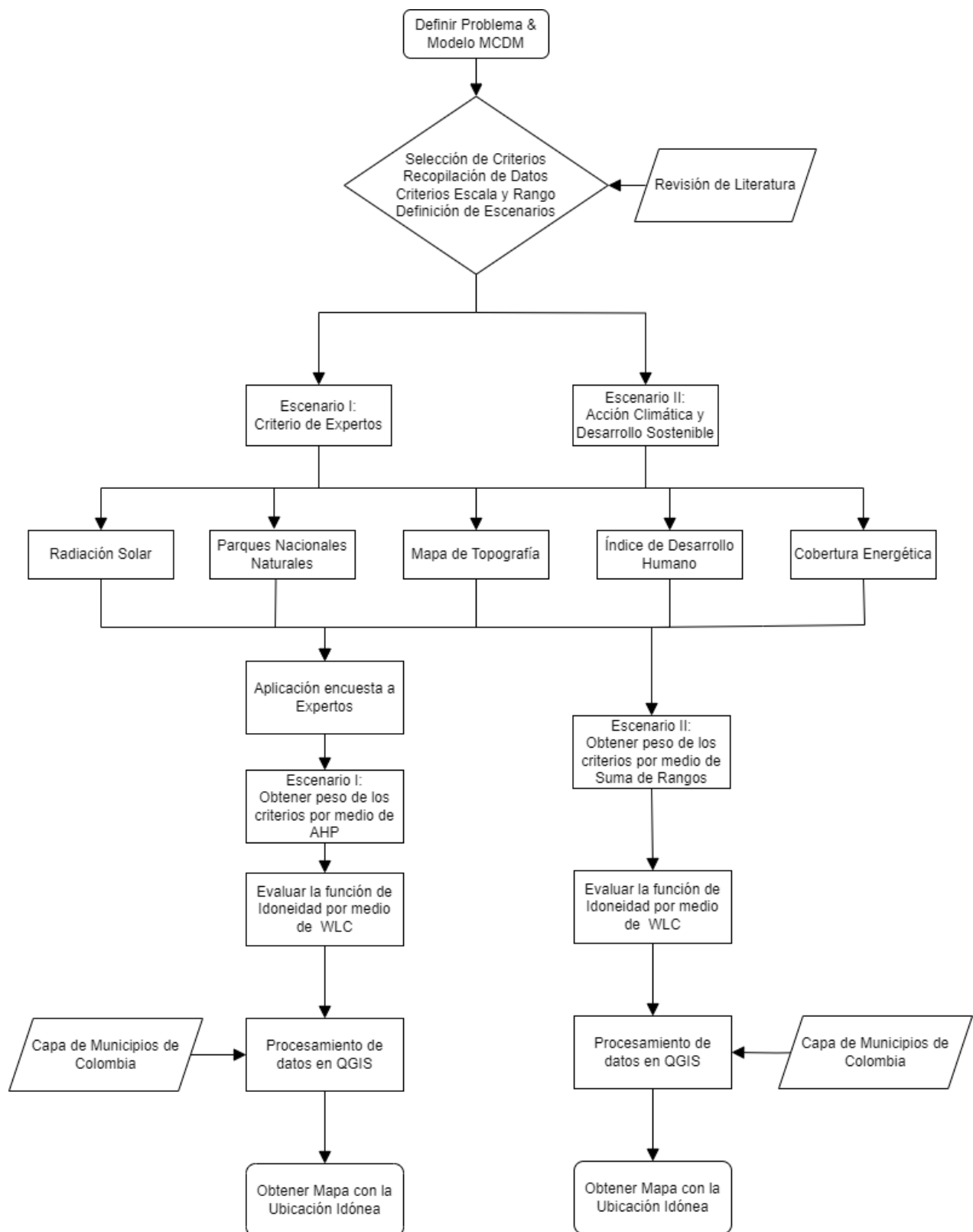


Figura 3. Flujograma del algoritmo MCDM utilizado. Fuente: elaboración propia.



De forma detallada en el flujograma (Figura 3) se muestra como se desarrollan los niveles o pasos, que describimos a continuación:

Paso 1: Inicialmente se establece el fin y el objetivo del presente artículo, se define el problema y se define el modelo MCDM.

Paso 2: Se realiza una extensa revisión de la literatura, selección de criterios de evaluación y recopilación de datos de fuentes abiertas y Planos de Información (PIs) provenientes de agencias gubernamentales. En este paso se exploran temas ambientales, basados en los ODS.

Paso 3: Se definen los escenarios y el MCDM con el enfoque se utiliza para ponderar y clasificar las alternativas energéticas.

Paso 4: Se definen los Planos de Información (PIs) y se usa el software QGIS® para la digitalización, conversión, análisis y visualización del espacio datos.

Paso 5: En cada escenario se normalizan los criterios y se asignan las escalas de idoneidad.

Paso 6: Se clasifican los resultados con el método WLC.

Paso 7: Se obtienen los municipios considerados idóneos con el fin de instalar sistemas de energía solar térmica.

## 2.1. Campo de Estudio

Colombia es un país ubicado en el noroeste de América del Sur. Tiene una superficie continental de 1'141.748 km<sup>2</sup> y 988.000 km<sup>2</sup> de territorio marítimo. Está conformado por 32 departamentos y 1.122 municipios incluyendo el Distrito Capital de Bogotá. La población estimada en 2022 fue de 51'609.474 habitantes.

Este artículo tiene como finalidad analizar estadísticamente la viabilidad en la instalación de sistemas de aprovechamiento de energía solar térmica en Colombia, tomando como base Planos de Información (mapas) oficiales de Radiación Solar y priorizando la instalación de sistemas de energía solar térmica para mejorar las condiciones de vida de las personas que habitan regiones apartadas, de clima frío, con baja cobertura energética que deben utilizar combustibles fósiles para solventar la falta de electricidad.

Al desarrollar el procedimiento metodológico, el objetivo principal del presente artículo es analizar estadísticamente la viabilidad en la instalación sistemas de energía solar térmica, tomando como referencia información geoestadística gubernamental relacionada

con los ejes de la sustentabilidad también conocidos como Planos de Información (PIs).

Estos diferentes PIs pueden integrarse y priorizarse utilizando metodologías como el Análisis Multicriterio para la toma de decisiones, que consiste en dar jerarquía a los PIs mediante la normalización de criterios por medio de la técnica que brinda el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) que (ordena y pondera los criterios) divide el problema en niveles jerárquicos y genera una medida global a cada alternativa y las clasifica en orden de preferencia.

Se organiza la información en formato vectorial y se normalizan los datos recopilados para cada indicador seleccionado. Se usa como herramienta de análisis de viabilidad o de factibilidad, métodos de la estadística multivariada, usando un primer método, conocido como la técnica de Rank Sum o Sumas Ponderadas, en el cual la idea es otorgar la importancia relativa entre diferentes escalas, ya con las escalas relativas obtenidas, se procede a dar una jerarquía a los Planos de Información, mediante la normalización de los criterios, esto se realiza por medio del método Analytic Hierarchy Process (AHP) [18 y 19], y por último se aplica la regla de decisión combinando los métodos anteriores, obteniéndose como resultado un valor numérico que permite clasificar los resultados, a este método se le conoce como método de Combinación Lineal Ponderada (Weighted Linear Combination – WLC), partiendo de los Planos de Información para determinar qué municipios de Colombia son aptos para el aprovechamiento del calor solar con la instalación de colectores solares para el calentamiento de agua de uso residencial.

## 2.2. Selección de variables para el modelo geoestadístico y Planos de información (PIs)

Se realiza una revisión de la literatura para seleccionar indicadores de sostenibilidad para el sector energético (Tabla 1 y Tabla 2).

La selección de indicadores tiene en cuenta la disponibilidad de información actual para cada municipio (Planos de Información - PIs); para este artículo se consideran los siguientes:

- A. Radiación Solar
- B. Cobertura Energética
- C. Unidades de Conservación (Parques Nacionales Naturales - PNN)
- D. Modelo Digital de Elevación (Altura sobre el nivel del Mar)
- E. Índice de Desarrollo Humano

Después de definir los PIs, se obtiene una serie de datos e información recopilados de fuentes públicas oficiales (bases georreferenciadas) relacionados con los ejes de la sustentabilidad, esta información es la siguiente:

- Nivel Municipal de Colombia (se usa para generar el mapa de localización idónea), suministrado y tomado del Instituto Agustín Codazzi [20]
- Modelo Digital de Elevación (Altura sobre el nivel del Mar), suministrado y tomado del Instituto Agustín Codazzi [21]
- Ubicación y delimitación de Parques Nacionales Naturales (Zonas de Conservación), suministrado y adoptado del sistema nacional de parques nacionales naturales [22]
- Planos de radiación solar, suministrado y tomado del IDEAM [23]
- Plano de la cobertura de energía suministrado y tomado de la UPME [24]
- Plano del Índice de desarrollo humano suministrado y tomado del DANE [25]

Se establece al menos un factor (criterio) para cada una de las dimensiones del desarrollo sostenible (Ambiental, Social y Económico), Tabla 3.

Cada uno de los factores se organiza y se adapta en un plano de información (PI) en formato de archivo de forma (\*.shp) generada mediante el software QGIS®. Los indicadores se ingresan en hojas de cálculo (\*.xlsx), luego se organizan y se convierten en datos separados por comas (\*.CSV); finalmente se convierte en formato .shp. Los PIs se construyen utilizando la proyección cartográfica nacional.

### 2.3. Clasificación de factores como factor y/o exclusor y planteamiento de escenarios de utilización de energía solar

Luego de determinar los factores (criterios) que se incluyen en el modelo, es necesario clasificar cada uno como criterio factorial o criterio de exclusión. Un criterio de factor es una variable en el que la idoneidad de la alternativa aumenta o disminuye en una escala continua de acuerdo con el análisis; es decir, tiene mayor o menor valor dentro del escenario propuesto. Por otro lado, un criterio de exclusión es una variable bajo el cual la alternativa propuesta es adecuada (1) o no adecuada (0), es decir, conduce a una respuesta binaria bajo lógica booleana. Es posible que un indicador sea un factor criterio y un criterio de exclusión simultáneamente si la variable tiene límites estipulados basados en umbrales normativos o técnicos [26, 27].

Tabla 3. Factores adoptados para cada una de las dimensiones del desarrollo sostenible.

Dimensión	Factor	Criterio
Ambiental	Unidades de Conservación	Exclusión
	Modelo Digital de Elevación (Altura sobre el nivel del Mar)	Exclusión
Social	Índice de Desarrollo Humano	Factor
Económico	Radiación Solar	Factor y Exclusión
	Cobertura Energética	Factor

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se proponen dos escenarios bajo los cuales determinar el uso de la energía solar con el fin de instalar colectores solares para el calentamiento de agua en los municipios colombianos:

#### 2.3.1. Escenario I: Encuestas Realizadas a la Comunidad ECCI – Percepción profesional/experto:

Este escenario se basa en la metodología Analytic Hierarchy Process (AHP), cuenta con la opinión de expertos en el área de energías renovables y desarrollo sustentable y con la opinión de la comunidad en la matriz global final.

#### 2.3.2. Escenario II: Perspectiva de Desarrollo Sustentable - Acción climática y desarrollo sostenible:

El planteamiento de este escenario se basa en las necesidades de desarrollo actuales, en el que se define el cambio climático como el principal problema ambiental a mitigar mediante una adecuada gestión de los recursos y la producción de energía limpia.

Este Escenario de Desarrollo Sustentable se basa en los tres ejes de la sustentabilidad (ambiental, social y económico). A este escenario, se le aplica el cálculo del Rank-Sum y así se obtienen dichos pesos finales. De los 17 ODS (Objetivos del Desarrollo Sustentable) los que están involucrados directamente en este escenario son:

1. Agua limpia y Saneamiento (ODS 6).
2. Energía asequible y No contaminante (ODS 7).
3. Reducción de las desigualdades (ODS 10).
4. Ciudades y Comunidades Sostenibles (ODS 11).
5. Acción por el Clima (ODS 13).



### 3. Análisis Multicriterio

Luego de definir los criterios relevantes y sus respectivos Planos de Información (PIs), éstos se combinan. En QGIS® la evaluación multicriterio se realiza mediante la inserción de fórmulas, a partir de la Calculadora de Campo, permite procesar variables donde los resultados se presentan a través de mapas temáticos.

Debido a que los datos originales de los criterios presentan diferentes unidades de medida, se hace necesario normalizarlos. A continuación, se describen las técnicas MCDM (Multi-Criteria Decision Making) utilizadas y se muestra el desarrollo de las mismas.

#### 3.1. Técnica Rank – Sum

Esta técnica indica que se deben de seguir ciertos pasos, teniendo en cuenta los siguiente:

1. Definir bien los criterios con sus respectivas restricciones.
2. Definir los tipos de variables.
3. Modelamiento de las preferencias.
4. Definir si se usan modelos determinísticos.
5. Definir los métodos de agregación.

#### 3.2. Análisis Multicriterio Aplicado a la Idoneidad

El análisis multicriterio es un instrumento que apoya a la toma de decisiones, se usa para poder realizar una comparación entre distinta información, pero basada en una evaluación en un conjunto de datos. Los métodos de la toma de decisiones pueden ser clasificados de manera individual o en un grupo [14]. A partir del modelo, es necesario definir los objetivos para poder dar solución a la pregunta planteada en un principio, con esto se tiene la necesidad de utilizar técnicas de decisión multicriterio [28]. La toma de decisiones implica realizar comparaciones de acuerdo a las necesidades que se les pueda aplicar a los criterios, todo esto para poder aplicar una jerarquización y establecer la prioridad entre ellos.

Para dar la jerarquía se debe tener la claridad de los problemas de decisión, siguiendo la siguiente estructura:

1. Conocer los elementos que van a ser evaluados, entre ellos tenemos:

- Objetivos.
- Criterios.
- Actores.
- Juicios de valor.
- Conocimiento experimental.
- Intuición.
- Alternativas.

2. Se debe llevar el proceso de acuerdo al tomador de decisiones:

- Jerarquización.
- Priorización.
- Selección.

3. Por último, se obtienen los resultados necesarios y se puede tomar una decisión.

Ahora bien, en el presente artículo, y siguiendo el Flujograma de la Figura 2., se aplica el análisis multicriterio y se integran los factores seleccionados en los escenarios propuestos normalizando primero las capas de información mediante la función lineal creciente dado que toma el 1 como el valor de más importancia o decreciente dado que toma el 0 como el valor de menos importancia (Tabla 4), o por el método booleano dependiendo de la clasificación de la variable como factor y/o criterio de exclusión (Tabla 3). Para el escenario I, se utiliza el método de ponderación subjetiva del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP); para el escenario II se utiliza el método Rank-Sum.

Tabla 4. Criterios de Normalización.

Criterio	Escala Normalizada	Descripción	Tipo de Normalización
Radiación Solar	1	Alta Radiación	Creciente
	0	Baja Radiación	
Unidades de Conservación (PNN)	1	No es PNN	Decreciente
	0	Es PNN	
Altura sobre el nivel del Mar (Curvas de Nivel)	1	Alto Valor m s. n. m.	Creciente
	0	Bajo Valor m s. n. m.	
Índice de Desarrollo Humano	1	Alto %	Creciente
	0	Bajo %	
Cobertura Energética	1	No hay cobertura	Decreciente
	0	Si hay cobertura	

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se utiliza la Combinación Lineal Ponderada (WLC), que permite compensar los indicadores utilizados para cada uno de los escenarios y definir los municipios apropiados cuya ponderación es  $> 0.75$  [6, 17].

El análisis se realiza siguiendo los siguientes pasos:

### 3.2.1. Estandarización de los Planos de Información (PIs)

Se estandarizan las capas de información que contienen los factores para convertir todos los factores en la misma escala, esto permite realizar una comparación directa y la verificación cruzada de los datos. Para ello se utiliza una función lineal creciente (ecuación (1)); donde se priorizan los valores más altos asignando el valor 1- adecuado) y una función lineal decreciente (ecuación (2)); en la que se priorizan los valores más bajos normalizando con 0 – no adecuado). Esta normalización se realiza para cada PI en el software QGIS®, utilizando el módulo de calculadora de campo e insertando la ecuación correspondiente, obteniendo así una nueva columna en la tabla de atributos, ver Tabla 4.

$$\mu_c = \left( \frac{x_i - x_{máx}}{x_{máx} - x_{mín}} \right) \quad (1)$$

$$\mu_d = \left( \frac{x_{máx} - x_i}{x_{máx} - x_{mín}} \right) \quad (2)$$

Donde:

$\mu_c$ : Normalización de criterio creciente

$\mu_d$ : Normalización de criterio decreciente

$x_i$ : Valor a ser normalizado

$x_{mín}$ : Valor mínimo de los criterios

$x_{máx}$ : Valor máximo de los criterios

### 3.2.2. Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para el Escenario I

El proceso de análisis jerárquico (Analytic Hierarchy Process), fue desarrollado por Thomas L. Saaty [25], el cual fue diseñado con el fin de resolver problemas de criterio múltiple, el resultado del AHP es dar una jerarquía con prioridades donde se evidencia la preferencia global para cada una de las alternativas de la decisión. El AHP se basa en:

- Dar una estructura del modelo.
- Priorizar los elementos del modelo jerárquico.
- Comparaciones binarias entre los elementos.
- Evaluar los elementos mediante asignaciones de pesos.
- Ranking de las alternativas de acuerdo con los pesos dados.
- Da un análisis de sensibilidad.

Siguiendo la metodología de Saaty [25], Teknomo et al. [26], y De Lima [14], para la aplicación del método AHP,

los indicadores se ponderan de acuerdo a la escala de importancia presentada en la Tabla 5.

Tabla 5. Escala de importancia relativa para determinar los pesos de los indicadores en el Escenario I

MENOS IMPORTANTE				IGUAL	MÁS IMPORTANTE			
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Absoluta	Muy grande	Grande	Pequeña	Igual	Pequeña	Grande	Muy grande	Absoluta

Fuente: elaboración propia.

El puntaje otorgado por los encuestados se organiza en una matriz de ponderación de factores consolidados (matriz cuadrada), expresando la importancia del indicador (fila i) en relación al criterio (columna j). La diagonal principal de esta matriz tiene un valor de uno (1), ya que se compara el mismo indicador. La diagonal inferior se calcula como el inverso multiplicativo de la diagonal superior correspondiente a los valores dados por los participantes. Luego de tabular los resultados de las encuestas, se calcula el vector propio para indicar la ponderación de los criterios de comparación. Este método selecciona los criterios jerárquicos que suelen estar en conflicto entre sí. Posteriormente, se calcula el índice de consistencia, que indica la coherencia entre las respuestas obtenidas y el índice de consistencia, que debe ser inferior al 10%. Esto se logra siguiendo los siguientes pasos:

**Paso 1. Análisis de reciprocidad:** Se construye la matriz de ponderación de criterios consolidados globales utilizando el método de la media geométrica de las filas, utilizando la ecuación (3), que determina el valor de reciprocidad.

$$r = \exp \left[ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \ln (a_{ij}) \right] = \left( \prod_{i=1}^N a_{ij} \right)^{\frac{1}{N}} \quad (3)$$

Donde:

$r$ : Valor consolidado de la reciprocidad

$N$ : Número total de encuestas aplicadas

$a_{ij}$ : Elemento de toma de decisiones

**Paso 2. Análisis de Homogeneidad:** Se realiza mediante la normalización de la matriz de ponderación de criterios global consolidada, construida a partir de  $r$  (ecuación (3)), utilizando la ecuación (4). La suma de las columnas de la matriz global consolidada debe ser igual a 1.

$$p = \frac{r}{\sum_i^N r_j} \quad (4)$$

Donde:

$p$ : Valor normalizado

$r$ : Valor consolidado de la reciprocidad

$N$ : Número de encuestas

**Paso 3. Cálculo del Vector propio:** se calcula aplicando la ecuación (5), que se utiliza para determinar la contribución de cada indicador al escenario propuesto.

$$w = \frac{\sum p_j}{n} \quad (5)$$

Donde:

$w$ : Vector propio de la matriz normalizada

$p_j$ : Valor Normalizado

$n$ : Número total de criterios de decisión

**Paso 4. Cálculo de la tasa de consistencia:** Es la que cuantifica la coherencia de la información. Para una matriz que contenga >5 criterios, la tasa de consistencia debe tener un valor máximo del 10% [25]. La tasa de consistencia se determina con el vector propio de la matriz expresado como  $\lambda_{máx}$  (ecuación (6)) y el índice de consistencia (ecuación (7)) y finalmente aplicar la ecuación (8).

$$\lambda_{máx} = \sum (w_i * \sum r_j) \quad (6)$$

Donde:

$\lambda_{máx}$ : Vector propio de la matriz normalizada

$w_i$ : Vector propio de la matriz normalizada

$r_j$ : Valor consolidado de la reciprocidad

$$C_I = \frac{(\lambda_{máx} - n)}{(n-1)} \quad (7)$$

Donde:

$C_I$ : Índice de Consistencia

$\lambda_{máx}$ : Vector propio de la matriz normalizada

$n$ : Número total de criterios de decisión

$$C_R = \frac{C_I}{R_I} \quad (8)$$

Donde:

$C_R$ : Razón de consistencia

$C_I$ : Índice de Consistencia

$R_I$ : Índice de consistencia aleatoria (para matrices de tamaño 5=1,12)

### 3.2.3. Técnica Rank Sum para el Escenario II

El método Rank-Sum se basa en ordenar los indicadores en un ranking establecido por el decisor o formulador del escenario a evaluar. En el ranking se asigna un valor igual a 1 al criterio más importante, 2 al segundo criterio más relevante y así sucesivamente, hasta dar un ranking a cada uno de los indicadores establecidos [14]. Luego de asignar los rangos, se establece la jerarquía aplicando la ecuación (9).

$$W_j = \frac{(n-r_j+1)}{\sum_k (n-r_j+1)} \quad (9)$$

Donde:

$W_j$ : Peso normalizado del atributo j

$r_j$ : Valor de reciprocidad consolidado n

$n$ : Número de indicadores

### 3.2.4. Método de Combinación Lineal Ponderada (WLC)

Se usa el método WLC para balancear las variables para calcular la idoneidad general (S) del resultado utilizando la ecuación (10). Los municipios que tuvieron un valor de S mayor a 0,75 [6, 17] fueron considerados aptos para el aprovechamiento del calor solar con la instalación de colectores solares para el calentamiento de agua de uso residencial.

$$S = \sum_{i=1}^n w_i * x_i * \prod_{j=1}^k c_j \quad (10)$$

Donde:

$S$ : Idoneidad

$w_i$ : Peso del factor i (con i=1,...,k)

$n$ : Número de factores

$x_i$ : Puntuación del factor j

$c_j$ : Puntuación del criterio de restricción j (con j=1,...,k)

$k$ : Número de criterios de exclusión

## 4. Resultados y discusión

A continuación, se presenta la aplicación y descripción de cada uno de los métodos utilizados, junto con la discusión de los resultados obtenidos durante el desarrollo del artículo, manteniendo el orden en que se presentó la metodología utilizada.

#### 4.1 Planos de Información (PIs)

Dada la naturaleza del presente artículo y la importancia del resultado obtenido para las energías renovables y el desarrollo sustentable, se van a utilizar una serie de planos de información oficiales, emitidos por diferentes Instituciones públicas, todos en concordancia con los ejes de sustentabilidad. Estos PIs permiten hacer el análisis mediante dos herramientas distintas, la primera el uso del software QGIS®, con el cual se puede hacer una procesamiento vectorial en diferentes capas, unificando la proyección de los PIs y obtener así un único plano de información final y la segunda, las herramientas de análisis de modelo multivariado, método por el cual aplicamos los criterios resaltando las mejores características de cada plano de información, obteniendo un resultado numérico, esto con el fin de lograr obtener como resultado la idoneidad en cada municipio una vez se ha aplicado el método de estadística multivariado a los campos de información geográfica que se obtiene de cada PI.

En cada PI se definen los criterios para obtener la información idónea y así filtrar los municipios idóneos. En la Tabla 6 se detallan dichos criterios.

Tabla 6. Parámetros adoptados para la clasificación de Municipios Elegibles.

Eje Sustentable	Factor	Parámetro
Ambiental - Técnico	Radiación Solar	>4.5 kWh/m <sup>2</sup>
	Unidades de Conservación (PNN)	No es PNN
	Mapa de Topografía	>2000 m.s.n.m.
Social - Económico	Índice de Desarrollo Humano	Bajo %
Económico - Social	Cobertura Energética	No hay

Fuente: elaboración propia.

##### 4.1.1 División Política Municipal (Nivel 3) de Colombia.

Este PI es necesario utilizarlo, dado que brinda la información necesaria como el código y el nombre de cada municipio; el fin de este PI es realizar una unión con todos los otros PI y así obtener la información que es requerida para cada municipio.

#### 4.1.2 Radiación Solar

El mapa de radiación solar, es construido por medio de modelos de predicción de radiación solar, de los promedios mensuales de las distintas mediciones hechas por medio de los Piranómetros que están a cargo de diferentes entidades estatales (tales como: IDEAM, CENICANA, CENICAFE, CAR, IPSE, FEDEARROZ, entre otros), con este PI se apunta al eje económico, todo con el fin de mejorar la calidad de vida de la sociedad.

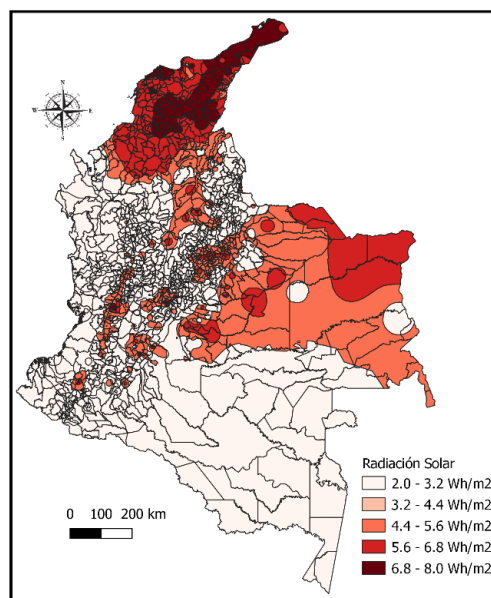


Figura 4-1.: Plano de información Radiación Solar. Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.3 Unidades de Conservación (Parques Nacionales Naturales - PNN)

Para la creación de este PI, se tiene en cuenta la información registrada por el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP), el cual está compuesto por 58 áreas con una extensión de 14'254.142,56 hectáreas, estando conformado por 42 Parques Nacionales Naturales, 12 Santuarios de Fauna y Flora, 2 Reservas Nacionales Naturales, 1 Vía Parque y 1 Área Natural Única; este PI sirve para fortalecer el eje ambiental, la creación de este PI se tiene como información el registro realizado por la entidad PARQUES NATURALES DE COLOMBIA

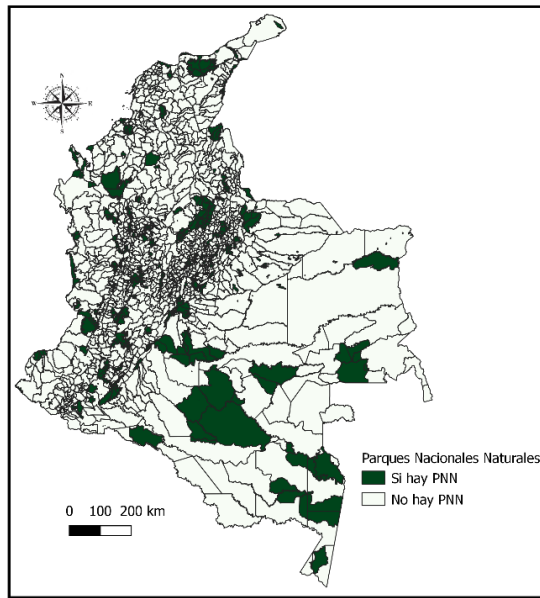


Figura 4-2.: Plano de información Unidades de Conservación (Parques Nacionales Naturales – PNN). Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.4 Índice de Desarrollo Humano

El IDH se creó para enfatizar que las personas y sus capacidades deberían ser el criterio último para evaluar el desarrollo de un país, no solo el crecimiento económico. Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), el IDH busca medir 3 componentes importantes dentro del desarrollo de una persona, la esperanza de vida, el nivel educativo y el monto de los ingresos siendo el IDH la media geométrica de cada uno de los indicadores [29]. Este índice refleja las necesidades de inversión social y económica en el territorio nacional para mejorar la calidad de vida de los habitantes. El IDH muestra que existe un bajo nivel de desarrollo humano en los municipios ubicados en las periferias del país, lo que evidencia la falta de descentralización de los recursos administrativos y económicos.

El Índice De Desarrollo Humano municipal (IDHm) es importante porque mide las condiciones socioeconómicas considerando el índice de salud, el índice de educación y el índice de ingreso, promediándose para determinar si el municipio se encuentra en la posición muy alto, alto, .... Para el diseño de políticas gubernamentales. El IDHm se calcula periódicamente, lo que garantiza su continuidad en el tiempo. Además, genera información que es muy útil para los municipios pequeños, donde puede ser el único indicador para hacer seguimiento al nivel desarrollo al contrario de las ciudades capitales [30].

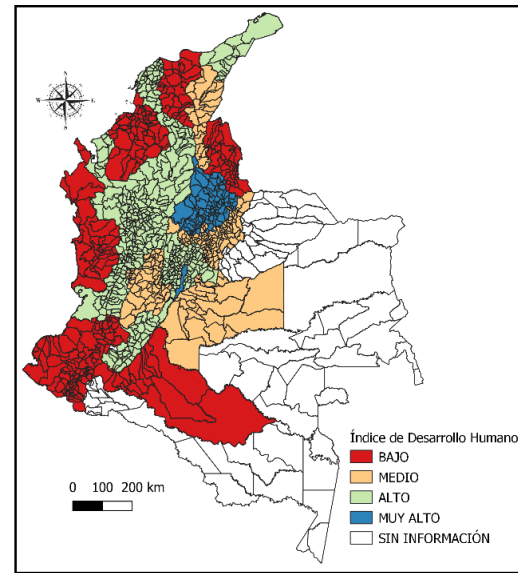


Figura 4-3.: Plano de información Índice de Desarrollo Humano. Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.5 Cobertura Energética

El mapa de cobertura rural de energía fue realizado con la información brindada por los operadores de red contratados para el estudio, el instituto de planificación y promoción de soluciones energéticas (IPSE), validación de la información por entes territoriales y el departamento administrativo nacional de estadística.

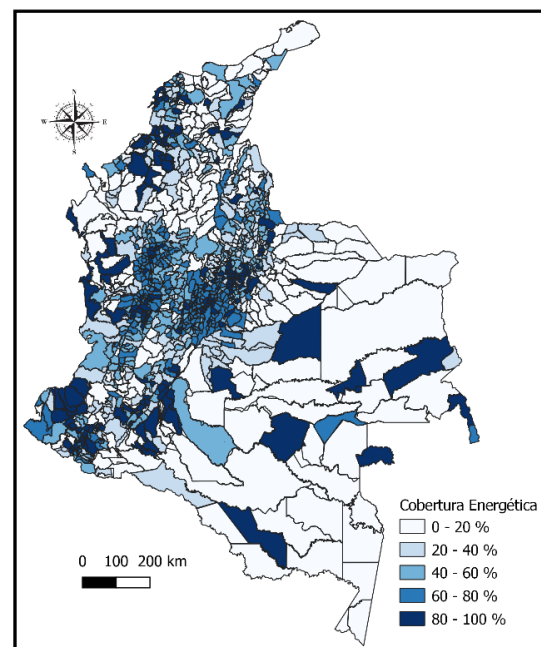


Figura 4-4.: Plano de información Cobertura Energética. Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.6 Altura Sobre el Nivel del Mar

En este mapa (Modelo Digital de Elevación) se descartan los municipios de clima cálido-templado en Colombia, para esto se han filtrado los municipios con altura mayor a 2000 m s. n. m., esto nos permite identificar aquellas regiones que tienen un clima frío, en donde es muy importante el uso de energía solar térmica para el calentamiento de agua de uso sanitario.

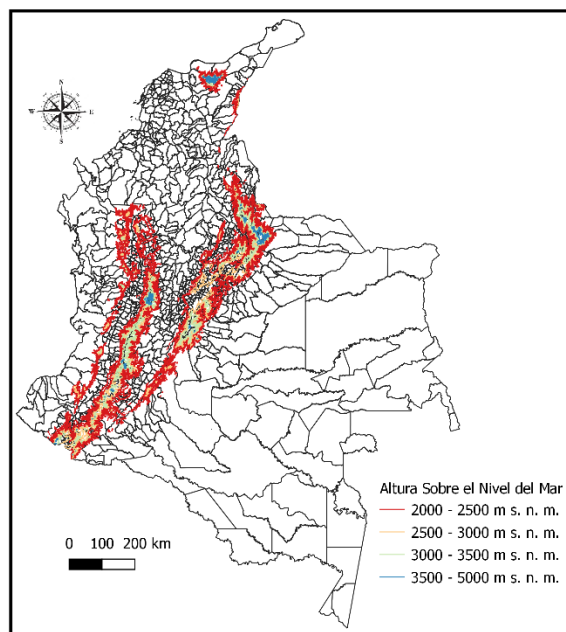


Figura 4-5.: Plano de información Altura Sobre el Nivel del Mar. Fuente: elaboración propia.

#### 4.2 Análisis Multicriterio

Luego de hacer uso de los métodos multicriterio antes descritos, se llega a los siguientes resultados:

##### 4.2.1 Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para el Escenario I

La Tabla 7 muestra los resultados de las encuestas y la aplicación del modelo AHP. Inicialmente se muestra la matriz global consolidada, que presenta los datos obtenidos de las encuestas consolidadas por el método de la media geométrica y el cálculo de la diagonal inferior a partir del recíproco multiplicativo de la diagonal superior de la ecuación (3). Esta matriz está construida bajo el concepto que por cada plano de información se debe tener 5 respuestas, es por tanto que se realizaron 25 encuestas, las cuales fueron realizadas a personas relacionadas con el sector de la ingeniería, con bastantes conocimientos en relación a las energías renovables.

Tabla 7. Resultado de la aplicación del método AHP bajo el Escenario I. Matriz Global.

	Unidades de Conservación (km <sup>2</sup> )	Radiación Solar (W/m <sup>2</sup> )	Cobertura Energética (%)	Mapa de Topografía (m s. n. m.)	Índice de Desarrollo Humano
Unidades de Conservación (km <sup>2</sup> )	1,0000	1,8083	1,9145	2,4844	1,6015
Radiación Solar (W/m <sup>2</sup> )	0,5530	1,0000	2,0694	1,0661	1,4563
Cobertura Energética (%)	0,5223	0,4832	1,0000	1,0315	2,0073
Mapa de Topografía (m s. n. m.)	0,4025	0,9380	0,9695	1,0000	1,5368
Índice de Desarrollo Humano	0,6244	0,6867	0,4982	0,6507	1,0000

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 8, se muestra la matriz que se obtiene al aplicar el método de la ecuación (4), esta es la matriz de datos consolidada global normalizada cuyas columnas suman 1.

Tabla 8. Matriz Global Normalizada.

	Unidades de Conservación (Km <sup>2</sup> )	Radiación Solar (W/m <sup>2</sup> )	Cobertura Energética (%)	Mapa de Topografía (m s. n. m.)	Índice de Desarrollo Humano
Unidades de Conservación (Km <sup>2</sup> )	0,322342	0,367823	0,296744	0,398608	0,210666
Radiación Solar (W/m <sup>2</sup> )	0,178260	0,203412	0,320764	0,171057	0,191569
Cobertura Energética (%)	0,168371	0,098293	0,155000	0,165492	0,264054
Mapa de Topografía (m s. n. m.)	0,129746	0,190792	0,150273	0,160444	0,202164
Índice de Desarrollo Humano	0,201280	0,139679	0,077218	0,104400	0,131547
Suma	1	1	1	1	1

Fuente: elaboración propia.



Con la matriz global normalizada, se obtiene el vector propio de la ecuación (5), cuyo resultado se muestra en la (Tabla 9) que establece la jerarquía de las variables según la importancia otorgada por los expertos.

Tabla 9. Valor Propio para cada plano de información.

	W
Unidades de Conservación (km <sup>2</sup> )	0,31923657
Radiación Solar (W/m <sup>2</sup> )	0,21301248
Cobertura Energética (%)	0,17024213
Mapa de Topografía (m s. n. m.)	0,16668401
Índice De Desarrollo Humano	0,13082481
Suma	1

Fuente: elaboración propia.

Para realizar la comprobación de los pesos realizados en el vector propio, es necesario realizar el cálculo de la tasa de consistencia, en donde se obtienen los siguientes resultados:

**Valor Propio (ecuación 6):**

$$\lambda_{m\acute{a}x} = 5,16929997$$

**Índice de Consistencia (ecuación 7):**

$$C_I = 0,042324992$$

**Tasa de Consistencia (ecuación 8):**

$$C_R = 0,037790172$$

$$C_R = 3,7790172\% < 10\% \text{ Es aceptable}$$

El valor de la Tasa de Consistencia indica que la relación que se obtuvo de las encuestas en relación a los 5 planos de información está bien formulada y respondida de forma adecuada por los expertos que hicieron parte de dicha encuesta.

#### 4.3 Resultados Aplicación Método de Combinación Lineal Ponderada WLC

Se utiliza la técnica de combinación lineal ponderada WLC; de la ecuación (10) se obtiene la Tabla 10 para el escenario de las encuestas y de la ecuación (9) se obtiene la Tabla 11 para el escenario de desarrollo sustentable; en estas Tablas se observa la jerarquización que se obtiene según los pesos relativos.

Tabla 10. Escenario Encuestas.

ESCENARIO 1 - ENCUESTAS	CATEGORÍA	WLC
UNIDADES DE CONSERVACIÓN (km <sup>2</sup> )	1	0,319236567
RADIACIÓN SOLAR (W/m <sup>2</sup> )	2	0,213012481
COBERTURA ENERGÉTICA (%)	3	0,170242131
MAPA DE TOPOGRAFÍA (m. s. n. m.)	4	0,166684009
ÍNDICE DE DESARROLLO HUMANO	5	0,130824813
SUMA PESOS IMPORTANCIA RELATIVA		1,000000000

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11. Escenario Desarrollo Sustentable.

ESCENARIO 2 - Desarrollo Sustentable	CATEGORÍA	WLC
UNIDADES DE CONSERVACIÓN (km <sup>2</sup> )	2	0,266667
RADIACIÓN SOLAR (W/m <sup>2</sup> )	3	0,200000
COBERTURA ENERGÉTICA (%)	5	0,066667
MAPA DE TOPOGRAFÍA (m. s. n. m.)	1	0,333333
ÍNDICE DE DESARROLLO HUMANO	4	0,133333
SUMA PESOS IMPORTANCIA RELATIVA		1,0000000

Fuente: elaboración propia.

Luego de la aplicación del método WLC se utiliza el software QGIS® para relacionar los PIs y con esta información se filtran los municipios idóneos dentro de estos escenarios; los municipios idóneos son aquellos que tienen un valor más cercano a 1 al obtener el valor final de WLC (mejor alternativa de implementación de la propuesta); con estos datos se eligen los municipios cuyos valores estén desde 0,75 [6, 17] y superiores para ser los más adecuados. En la Figura 4-6 se observa el resultado de la aplicación de la técnica de WLC para el escenario de las encuestas y en la tabla 12 se observan los nombres de dichos municipios.



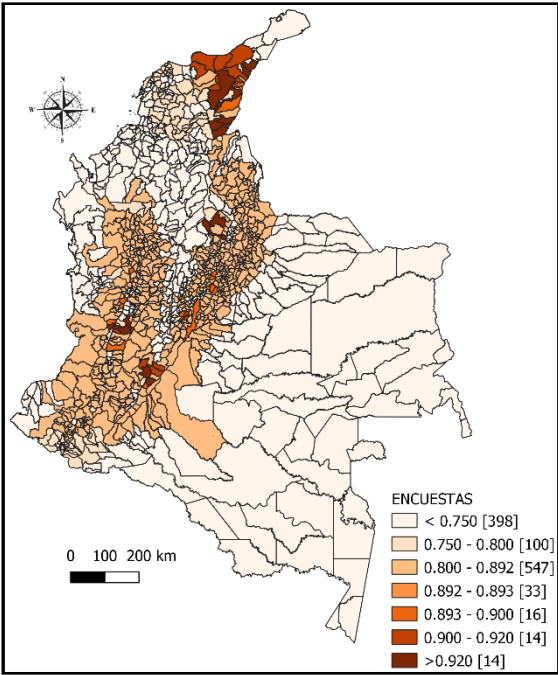


Figura 4-6.: Plano de información Idoneidad Escenario 1: Encuesta a Expertos. Fuente: elaboración propia.

Tabla 12. Municipios Idóneos- Escenario Encuestas

Municipio Idóneo	Código Municipal	WLC
Sevilla	1700760736	0,9245
Tuluá	1700760834	0,9244
Riofrio	1700760616	0,9244
Palermo	1700410524	0,9243
Campoalegre	1700410132	0,9243
Barrancas	1700440078	0,9240
Fonseca	1700440279	0,9240
San Vicente de Chucuri	1700680689	0,9234
Simacota	1700680745	0,9234
Valledupar	1700200001	0,9230

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4-7 se observa el resultado de la aplicación de la técnica de WLC para el escenario del Desarrollo Sustentable y en la tabla 13 se observan los nombres de dichos municipios.

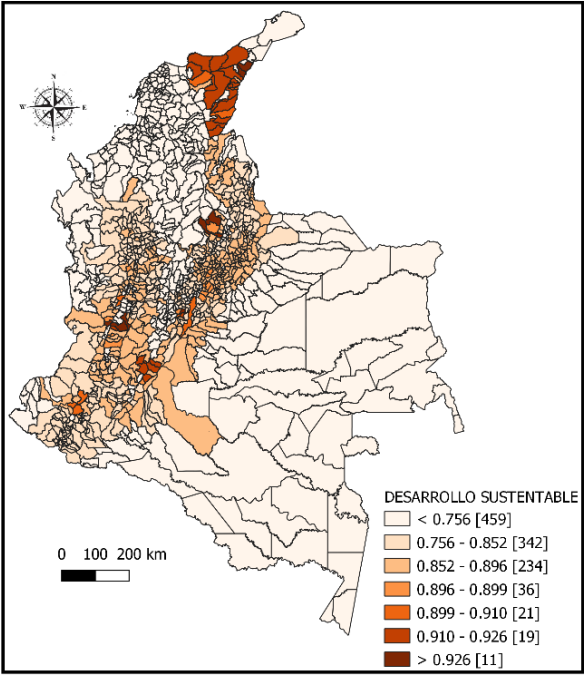


Figura 4-7.: Plano de información Idoneidad Escenario 2: Desarrollo Sustentable. Fuente: elaboración propia.

Tabla 13. Municipios Idóneos- Escenario Desarrollo Sustentable

Municipio Idóneo	Código Municipal	WLC
San Vicente De Chucuri	1700680689	0,92861
Simacota	1700680745	0,92861
Sevilla	1700760736	0,92823
Tuluá	1700760834	0,92818
Riofrio	1700760616	0,92818
Barrancas	1700440078	0,92721
Fonseca	1700440279	0,92721
Silvania	1700250743	0,92705
Fusagasugá	1700250290	0,92689
Palermo	1700410524	0,92648

Fuente: elaboración propia.

Al verificar los resultados de la aplicación de la técnica WLC, se evidencia que se tienen municipios en común, esto quiere decir que son aptos para los dos escenarios.

Por último, en la Figura 4-8 se observan estos municipios que aparecen aptos en los dos escenarios y en la tabla 14 se observan los nombres de dichos municipios.

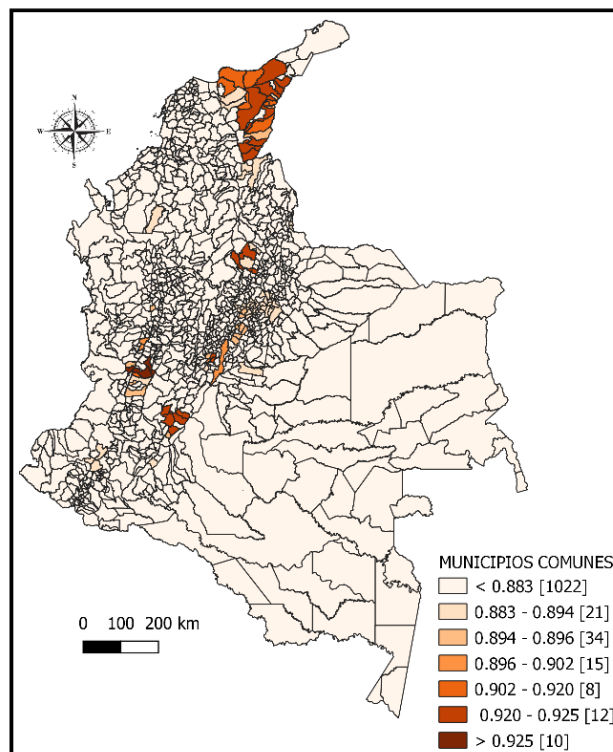


Figura 4-8.: Plano de información Idoneidad Escenario 1 y 2: Municipios idóneos comunes. Fuente: elaboración propia.

Tabla 14. Municipios Idóneos en común para ambos escenarios.

Municipio Idóneo	Código Municipal	WLC (Encuestas)	WLC (Desarrollo Sustentable)
Sevilla	1700760736	0,9245	0,9282
Tuluá	1700760834	0,9244	0,9282
Riofrío	1700760616	0,9244	0,9282
San Vicente de Chucuri	1700680689	0,9234	0,9286
Simacota	1700680745	0,9234	0,9286
Barrancas	1700440078	0,9240	0,9272
Fonseca	1700440279	0,9240	0,9272
Palermo	1700410524	0,9243	0,9265
Campoalegre	1700410132	0,9243	0,9265

Fuente: elaboración propia.

Los tres municipios más idóneos en Colombia se encuentran en el departamento del Valle del Cauca: **Sevilla**, ubicado en la subregión Oriente; **Tuluá**, ubicado en la región Central del departamento entre las cordilleras Occidental y Central y **Riofrío**, situado a en la subregión del Centro correspondiente a la vertiente oriental de la Cordillera Occidental.

## 5. Conclusiones

Este artículo tuvo como fin el identificar los municipios idóneos en Colombia con el fin de instalar sistemas de energía solar térmica, en particular, colectores solares para calentamiento de agua doméstica (CSCA) y así contribuir al desarrollo regional usando la perspectiva del desarrollo sustentable. Para lograr este propósito se aplicó una metodología basada en el análisis multicriterio y la aplicación de sistemas de información geográfica, mediante la incorporación de criterios de sustentabilidad en la toma de decisiones.

La aplicación del método multicriterio (MCMD) para la toma de decisiones permitió combinar criterios técnicos, socioambientales y económicos, la opinión de expertos y la combinación del mapeo con la ayuda de los sistemas de información geográfica (SIG); los valores de idoneidad obtenidos con la aplicación del método combinación lineal ponderada (WLC) permitieron la identificación de municipios aptos en Colombia con el fin de instalar sistemas de energía solar térmica para la obtención de agua caliente sanitaria (ACS).

El tener presente los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el conocimiento sobre los ejes sustentables permitió generar un criterio adecuado para el cálculo de la idoneidad, en donde se establecieron prioridades para el desarrollo de proyectos de ingeniería logrando un impacto Ambiental, Social y Económico; esto permitió seleccionar dos (2) indicadores técnico-ambientales: Unidades de Conservación (Parques Nacionales Naturales) y Modelo Digital de Elevación (Altura sobre el nivel del Mar); un (1) indicador social: Índice de Desarrollo Humano (IDH) y dos (2) indicadores económicos: Radiación Solar y Cobertura Energética. También se establecieron dos (2) escenarios diferentes: criterio de expertos (por medio de encuestas) y perspectiva de desarrollo sustentable (acción climática y desarrollo sostenible).

Se realizó una extensa revisión de la literatura acerca de sistemas de energía renovable que permitió definir la metodología, luego para el escenario I se diseñó y aplicó una encuesta a expertos en el área energética; esto permitió determinar la importancia/peso relativo de cada criterio, con esta información se consolidaron los pesos dados por los encuestados utilizando el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP). Para el escenario II se utilizó el método de Sumas Ponderadas (Rank-Sum).

El resultado nos permitió identificar los municipios idóneos para la instalación de sistemas de energía solar térmica en Colombia, estos son (en su orden): Sevilla, Tuluá, Riofrío (Valle del Cauca) y San Vicente de

Chucurí (Santander). Aunque estos municipios se encuentran a una altura sobre el nivel del mar menor a 2000 m, es importante indicar que sus tierras se distribuyen en diferentes pisos térmicos (medio, frío y páramo) ya que son montañosos y su relieve corresponde a la vertiente de alguna de las Cordillera de los Andes.

Finalmente, se observa que la metodología adoptada puede y debe ser una herramienta utilizada en los estudios y análisis para la elección de los lugares adecuados para instalación de sistemas de energía basados en fuentes de energía renovables, contribuyendo de forma sostenible al desarrollo de proyectos desde la perspectiva del desarrollo sustentable.

## 6. Recomendaciones

Teniendo en cuenta los resultados de este artículo y la perspectivas de optimización del proceso de toma de decisiones, aplicando los métodos multicriterio emplazamiento de sistemas de generación de energía renovable y sustentable en Colombia se deberían incluir nuevos criterios para ampliar y mejorar la geolocalización de municipios aptos, así como tener acceso a datos e información reciente de fuentes públicas oficiales (bases georreferenciadas) para poder extender este tipo de análisis a otras fuentes no convencionales de energías renovables y así contribuir al desarrollo energético sustentable del país.

## Financiación

Esta investigación no recibió financiación externa.

## Contribuciones de los autores

F. Marín-Quiroga: Investigación; Metodología; Curación de datos; Análisis formal; Software; Visualización; Escritura – borrador original.

J. S. Solís-Chávez: Conceptualización, Administración del artículo; Supervisión; Investigación; Redacción; revisión y edición.

A. F. Medina-Gamba: Software; Curación de datos; Validación; Visualización; Análisis formal.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

## Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

## Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

## Declaración de consentimiento informado

No aplica.

## Referencias

- [1] Girón, “Objetivos del desarrollo sostenible y la agenda 2030: Frente a las políticas públicas y los cambios de gobierno en américa latina,” *Problemas del Desarrollo*, vol. 47, no. 186, pp. 3 – 8, 2016.
- [2] Asociación Colombiana De Grandes Consumidores De Energía Industriales Y Comerciales, “Informe Sectorial No.25”, ASOENERGÍA, Bogotá, Abril de 2022. Energía Para La Competitividad [https://www.asoenergia.com/sites/default/files/2022-05/Informe%20sectorial%20Asoenergi%CC%81a%20N.o.%2025%20-%20Abril%202022\\_0.pdf](https://www.asoenergia.com/sites/default/files/2022-05/Informe%20sectorial%20Asoenergi%CC%81a%20N.o.%2025%20-%20Abril%202022_0.pdf)
- [3] Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, “Información Energética”, 2023. Disponible en: [http://www.upme.gov.co/calculadora\\_emisiones/aplicacion/calculadora.html](http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html) [Accedido: 13-Jun-2023]
- [4] Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos – EPA, “Calculadora de equivalencias de gases de efecto invernadero - Cálculos y referencias”, 2023. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculadora-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero-calculos> [Accedido: 13-Jun-2023]
- [5] “Primer balance de Energía Útil para Colombia y Cuantificación de las Perdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética - Resumen Ejecutivo BEU Sector Residencial y Terciario”, Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, Bogotá y Karlsruhe, Abril 2019. Disponible en: [https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Balance\\_energia\\_util/BEU-Residencial.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Balance_energia_util/BEU-Residencial.pdf)
- [6] F. Sierra, F. Mejía y E. Caro, *Tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2008.
- [7] Alarcón Villamil, A., Hortúa, J. E., & López, A. (2013). Comparison of thermal solar collector technologies and their applications. *TECCIENCIA*, 8(15), 26–35. Disponible en: <https://revistas.ecci.edu.co/index.php/TECCIENCIA/article/view/91/63> [Accedido: 13-Sep-2023]
- [8] G.N. Tiwari., Tiwary, A., Shyam., *Handbook of Solar Energy - Theory, Analysis and Applications*. Cap. 5.

- [9] A. Jamar, Z. Majid, W. Azmi, M. Norhafana, and A. Razak, "A review of water heating system for solar energy applications", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.76, pp.178–187, 2016. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S073519331630166X?via%3Dihub> [Accedido: 13-Sep-2023]
- [10] H. Rodríguez, *Instalaciones termosolares para la producción de agua caliente sanitaria (ACS)*. 2020. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn188.html> [Accedido: 13-Sep-2023]
- [11] Burbano J., J. C., Restrepo, Á. H., & Sabogal F., O. J., "Diseño y Construcción de un Calentador Solar de Agua Operando por Termosifón", *Scientia Et Technica*, XII (31), 85-90, (2006). Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84911639016> [Accedido: 13-Sep-2023]
- [12] ECOLED (empresa Colombiana dedicada a la comercialización y distribución de energías sustentables) Disponible en: <https://ecoled.com.co/products/colector-solar-placa-plana> [Accedido: 13-Sep-2023]
- [13] J. A. Ávila-Carranza, C. M. Rocha-Osorio & J. S. Solís-Chaves, "Perfiles de Consumo de Agua Caliente Residencial Aplicados a un Colector Tubular Plano para el Calentamiento Solar de Agua en Bogotá", *TECCIENCIA*, Vol.16, No.31, 29-52, 2021. Disponible en: <https://revistas.ecci.edu.co/index.php/TECCIENCIA/article/view/627/104> [Accedido: 13-Sep-2023]
- [14] De Lima, Camila, "Análise Multicritério E Aplicação SIG Para Localização Do Potencial Eólico, Visando O Desenvolvimento Sustentável", Tesis de Maestría en Energía, Programa de Pós-Graduação em Energia, Santo André, Brasil: Universidade Federal do ABC, 2017.
- [15] Medina, F., "Panorama de Micro Generación de Energía Fotovoltaica en Colombia", Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica. Bogotá, Colombia: Universidad ECCI, 2020.
- [16] Ospina, J., "Emplazamiento Sustentable de Sistemas de Microgeneración Eólica en Colombia desde la Perspectiva del Desarrollo Sustentable", Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica. Bogotá, Colombia: Universidad ECCI, 2020.
- [17] Calvo-Saad M., Solís-Chaves J., Murillo-Arango W., "Suitable municipalities for biomass energy use in Colombia based on a multicriteria analysis from a sustainable development perspective" *Heliyon*, 2023. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19874> [Accedido: 13-Sep-2023]
- [18] Saaty, T., Vargas L., *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Springer Science+Business Media, New York, 2012.
- [19] Teknomo, K., *Analytic Hierarchy Process (AHP) Tutorial*. 2017.
- [20] "Nivel municipal de Colombia" Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, Bogotá, 2023. Disponible en: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/mapas-nacionales> [Accedido: 13-Jun-2023]
- [21] "Datos Abiertos Cartografía y Geografía" Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, Bogotá, 2023. Disponible en: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia> [Accedido: 13-Jun-2023]
- [22] Parques Nacionales Naturales de Colombia - P. N. N. D. COLOMBIA, "Parques nacionales naturales", Bogotá, 2023. Disponible en: <https://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/servicio-al-ciudadano/datos-abiertos/> [Accedido: 13-Jun-2023]
- [23] IDEAM, "Radiación solar", Bogotá, 2023. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar> [Accedido: 13-Jun-2023]
- [24] UPME, "Cobertura de energía en Colombia", Bogotá, 2023. Disponible en: <http://sig.simec.gov.co/GeoPortal/Mapas/Mapas> [Accedido: 13-Jun-2023]
- [25] DANE, "Índice de desarrollo humano.", Bogotá, 2023. Disponible en: <https://geoportal.dane.gov.co/servicios/descarga-y-metadatos/visor-descarga-geovisores/> [Accedido: 13-Jun-2023]
- [26] G.S. Cardoso De Lima, P.T. Leite, B.C. Canesso, K.L. Zambon, "Location of distributed generation by the perspective of sustainable development", *IYCE 2015 - Proceedings: 2015, 5th International Youth Conference on Energy*. (2015) 1–6. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/IYCE.2015.7180819> [Accedido: 13-Jun-2023]

- [27] P.C. de Oliveira Campos, T. da Silva Rocha Paz, L. Lenz, Y. Qiu, C.N. Alves, A.P.R. Simoni, J.C.C. Amorim, G.B.A. Lima, M.P. Rangel, I. Paz, “Método de decisão multicritério para a gestão sustentável de cursos de água em áreas urbanas”, *Sustainability* (Switzerland). 12 (2020). Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85089799819&doi=10.3390%2Fsu12166493&partnerID=40&md5=980ceae1860066a9f877c071b357f77e> [Accedido: 13-Jun-2023]
- [28] K. L. Zambon, A. A. d. F. M. Carneiro, A. N. R. d. Silva, and J. C. Negri, “Análise de decisão multicritério na localização de usinas termelétricas utilizando SIG”, *Pesquisa Operacional*, vol. 25, no. 2, pp. 183–199, 2005.
- [29] PNUD. Informes de desarrollo humano, Índice de Desarrollo Humano (IDH), (2023). Disponible en: <https://hdr.undp.org/data-center/human-development-index#/indicies/HDI> [Accedido: 12-Sep-2023]
- [30] Duque, H y Garizado, P. (2020). Colombia: medición del Índice de Desarrollo Humano Municipal. *Revista de Economía & Administración*. Vol. 17 No. 2. Disponible en: <https://revistas.uao.edu.co/ojs/index.php/REYA/article/view/322> [Accedido: 12-Sep-2023]
- [31] Sánchez-Lozano J., Ramos-Escudero A., Gil-García I., García-Cascales M., Molina-García A., “A GIS-based offshore wind site selection model using fuzzy multicriteria decision-making with application to the case of the Gulf of Maine”, *Expert Systems with Applications*, Volume 210, 2022. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417422014853> [Accedido: 12-Sep-2023]
- [32] Meng Shao, Yuanxu Zhao, Jinwei Sun, Zhixin Han, Zhuxiao Shao, “A decision framework for tidal current power plant site selection based on GIS-MCDM: A case study in China”, *Energy*, Volume 262, Part B, 2023. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544222023581> [Accedido: 12-Sep-2023]
- [33] Heni Susiati, Moh. Dede, Millary Agung Widiawaty, Arif Ismail, Pande Made Udiyani, “Site suitability-based spatial-weighted multicriteria analysis for nuclear power plants in Indonesia”, *Heliyon*, Volume 8, Issue 3, 2022. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844022003760> [Accedido: 12-Sep-2023]
- [34] Bahaa Elboshy, Mamdooh Alwetaishi, Reda M. H. Aly, Amr S. Zalhaf, “A suitability mapping for the PV solar farms in Egypt based on GIS-AHP to optimize multi-criteria feasibility”, *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 13, Issue 3, 2022. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209044792100383X> [Accedido: 12-Sep-2023]
- [35] Lamy Albraheem, Lama AlAwlaqi, “Geospatial analysis of wind energy plant in Saudi Arabia using a GIS-AHP technique”, *Energy Reports*, Volume 9, 2023. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723007746> [Accedido: 12-Sep-2023]
- [36] Costa Y., Duarte A., Sarache W., “A decisional simulation-optimization framework for sustainable facility location of a biodiesel plant in Colombia”, *Journal of Cleaner Production*, Volume 167, 2017, P 174-191. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617318450> [Accedido: 12-Sep-2023]
- [37] Henao F., Cherni J., Jaramillo P., Dyner I., “A multicriteria approach to sustainable energy supply for the rural poor”, *European Journal of Operational Research*, Volume 218, Issue 3, 2012, P 801-809. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221711010423> [Accedido: 12-Sep-2023]
- [38] Quijano R., Botero S., Domínguez J., “MODERGIS application: Integrated simulation platform to promote and develop renewable sustainable energy plans, Colombian case study”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 16, Issue 7, 2012, P. 5176-5187. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112003346> [Accedido: 12-Sep-2023]
- [39] Ángel-Sanint E., García-Orrego S., Ortega S., “Refining wind and solar potential maps through spatial multicriteria assessment. Case study: Colombia”, *Energy for Sustainable Development*, Volume 73, 2023, P. 152-164. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082623000297> [Accedido: 12-Sep-2023]