

# Priorización estratégica de proyectos energéticos bajo criterios multidimensionales: caso estudio Central Hidroeléctrica de Caldas Grupo EPM

 Juan David Sánchez-Arredondo\*

 Jaime Andrés Vieira-Salazar\*\*

**Fecha de recepción:** 10 de noviembre de 2025

**Fecha de aceptación:** 18 de junio de 2026

**Para citar este artículo:** Sánchez-Arredondo, J. D., & Vieira-Salazar, J. A. (2026). Priorización estratégica de proyectos energéticos bajo criterios multidimensionales: Caso estudio Central Hidroeléctrica de Caldas Grupo EPM. *Universidad y Empresa*, 28(52), 1-36. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/empresa/a.15963>

## Resumen

La priorización de proyectos en el sector eléctrico exige herramientas metodológicas que combinen criterios técnicos, económicos, ambientales, sociales y de gobernanza. El artículo presenta el diseño de un modelo de toma de decisiones multicriterio que integra de manera efectiva criterios de sostenibilidad, garantizando una priorización alineada con la estrategia organizacional de la Central Hidroeléctrica de Caldas S.A. E.S.P. BIC. **Metodología:** se desarrolló un diseño exploratorio-descriptivo basado en un estudio de caso. Combina una revisión sistemática de la literatura, entrevistas semiestructuradas y la técnica Delphi para consensuar y validar los criterios. **Resultados principales:** el modelo se implementa con el proceso analítico jerárquico AHP para ponderar y jerarquizar los criterios y se valida conceptualmente con profesionales de la organización. **Conclusiones:** el modelo resultante se alinea con los objetivos

\* MBA, Universidad Nacional de Colombia (sede Manizales); especialista en Gerencia Estratégica de Proyectos, Universidad Nacional de Colombia (sede Manizales); especialista en Consultoría Ambiental, Universidad Internacional Iberoamericana de México; ingeniero ambiental, Universidad Católica de Manizales (Colombia). Profesional 2, equipo estrategia y planeación (área sostenibilidad empresarial) Central Hidroeléctrica de Caldas. Correo electrónico: [jsanchezarr@unal.edu.co](mailto:jsanchezarr@unal.edu.co)

\*\* Doctor en Ciencias de Gestión, Université de Rouen (Francia); magister en Administración, Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá); master in Development Administration, University of Birmingham (Inglaterra). Profesor titular de la Universidad Nacional de Colombia (sede Manizales). Correo electrónico: [javieras@unal.edu.co](mailto:javieras@unal.edu.co)

corporativos y las regulaciones del sector, para mejorar la transparencia, la trazabilidad y la sostenibilidad en las decisiones estratégicas.

**Palabra clave:** sostenibilidad energética; priorización de proyectos; metodología multicriterio; proceso analítico jerárquico; gobernanza corporativa.

## *Strategic Prioritization of Energy Projects Under Multidimensional Criteria: Case Study of Central Hidroeléctrica de Caldas, EPM Group*

### **Abstract**

Project prioritization in the electricity sector requires methodological tools that combine technical, economic, environmental, social, and governance criteria. This article presents the design of a multicriteria decision-making model that effectively integrates sustainability criteria, ensuring prioritization aligned with the organizational strategy of Central Hidroeléctrica de Caldas S.A. E.S.P. BIC. **Methodology:** An exploratory-descriptive design was developed based on a case study. It combines a systematic literature review, semi-structured interviews, and the Delphi technique to reach consensus and validate the criteria. **Main results:** The model is implemented using the Analytic Hierarchy Process to weight and rank the criteria and is conceptually validated with professionals from the organization. **Conclusions:** The resulting model aligns with corporate objectives and sector regulations, enhancing transparency, traceability, and sustainability in strategic decision-making.

**Keywords:** energy sustainability; project prioritization; multicriteria methodology; analytic hierarchy process (AHP); corporate governance.

## *Priorização estratégica de projetos de energia sob critérios multidimensionais: estudo de caso da Central Hidroeléctrica de Caldas Grupo EPM*

### **Resumo**

A priorização de projetos no setor elétrico exige ferramentas metodológicas que combinem critérios técnicos, econômicos, ambientais, sociais e de governança. Este artigo apresenta o desenvolvimento de um modelo de tomada de decisão multicritério que integra efetivamente critérios de sustentabilidade, garantindo a priorização alinhada à estratégia organizacional da Central Hidroeléctrica de Caldas S.A. E.S.P. BIC. **Metodologia:** foi desenvolvido um modelo exploratório-descritivo baseado em um estudo de caso. Ele combina uma revisão sistemática da literatura, entrevistas semiestruturadas e a técnica Delphi para alcançar consenso e validar os critérios. **Principais resultados:** o modelo foi implementado utilizando o processo analítico hierárquico AHP para ponderar e classificar os critérios e foi validado conceitualmente junto a profissionais da organização. **Conclusões:** o modelo resultante está alinhado aos objetivos corporativos e às regulamentações do setor para melhorar a transparência, a rastreabilidade e a sustentabilidade nas decisões estratégicas.

**Palavras-chave:** sustentabilidade energética; priorização de projetos; metodologia multicritério; processo analítico hierárquico; governança corporativa.

# Introducción

La priorización de proyectos en el sector energético no es solo un ejercicio técnico, sino un proceso multidisciplinario con implicaciones económicas, sociales y ambientales (Kumar et al., 2017; Hendiani et al., 2025). La provisión de energía es fundamental para la competitividad de la economía y el bienestar de la población y, en consecuencia, la formulación y selección de proyectos debe alinearse con criterios de eficiencia y sostenibilidad, ya que la transición energética es indispensable para cumplir los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y garantizar un suministro energético asequible (Skiba et al., 2023; Zhang y Sadiq, 2026). En la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC), la gestión eficiente de proyectos es esencial para garantizar la continuidad operativa y la sostenibilidad financiera; sin embargo, los sistemas actuales de asignación de recursos evidencian falencias: los mecanismos tradicionales no logran optimizar entre objetivos de sostenibilidad, resultando en decisiones ineficientes debido a la ausencia de métricas claras de evaluación (CHEC, 2024; Rodrigues et al., 2024; Blohm & Dettner, 2023). Pese a un consenso creciente sobre la necesidad de incorporar criterios ambientales, sociales y de gobernanza en las decisiones (Jamwal et al., 2025; Hendiani et al., 2025), la planificación energética moderna debe integrar criterios económicos, sociales, ambientales, técnicos e institucionales porque los enfoques de objetivo único ya no son adecuados (Kumar et al., 2017). Este sesgo puede producir resultados inestables (Garfan et al., 2025), al no reflejar la complejidad de los problemas contemporáneos (Ćirović & Pamučar, 2022).

En la literatura sobre toma de decisiones, los métodos multicriterio se han consolidado como herramientas para evaluar alternativas cuando existen múltiples objetivos en conflicto (Keeney & Raiffa, 1976; Belton & Stewart, 2002). La teoría reconoce que, en ausencia de preferencias explícitas, la selección de un único proyecto puede resultar arbitraria; entonces, el decisor debe emplear métodos objetivos (Ehrgott, 2005). Sin embargo, la adopción de estos métodos en contextos empresariales ha sido limitada, debido a su complejidad operativa y a la percepción de rigidez al aplicar escalas de comparación, como la propuesta por Saaty en el proceso de análisis jerárquico (*analytic hierarchy process*, [AHP]) (Asadabadi et al., 2019). Investigaciones advierten que la ponderación de criterios sin un soporte metodológico sólido puede generar resultados inconsistentes o manipulables (Mukhametzyanov, 2021). Por ello, se han explorado técnicas complementarias para

lograr ponderaciones más objetivas, como la aplicación de AHP con apoyo de expertos o métodos basados en teoría de juegos, a fin de equilibrar los pesos de forma imparcial (Khan et al., 2022; Janmontree et al., 2025); sin embargo, muchos modelos actuales de decisión dependen de métodos multicriterio convencionales con limitada capacidad para manejar la incertidumbre y juicios imprecisos (Zhang & Sadiq, 2026). Esta disyuntiva se manifiesta en la práctica, esto es, en la ausencia de un marco estructurado y la falta de criterios estandarizados para evaluar riesgos y beneficios derivan en asignaciones de recursos ineficientes y socialmente cuestionables, lo que dificulta la toma de decisiones informadas y puede conducir a la selección de iniciativas subóptimas (Badhon et al., 2025; Garfan et al., 2025).

En la organización objeto de estudio se identificaron proyectos que, a pesar de mostrar rentabilidad positiva en sus etapas iniciales, carecieron de un análisis integral que incorporara múltiples variables. Como consecuencia, dichas iniciativas se vieron gravemente afectadas por la ocurrencia de desastres naturales y conflictos sociales, lo que ha incrementado los costos operativos y reducido el retorno esperado de la inversión (CHEC, 2025). Experiencias como estas resaltan que no basta evaluar los proyectos solo desde la óptica financiera; es imprescindible integrar criterios ambientales, sociales y de gobernanza desde etapas tempranas del proyecto (Seo et al., 2025; Ika y Donnelly, 2017). La insuficiencia de enfoques holísticos compromete la legitimidad social de las decisiones, perpetúa prácticas de planificación que no responden a los retos del desarrollo sostenible y limita la sostenibilidad a largo plazo de los proyectos (Khan et al., 2022; Asadabadi et al., 2019). Esta situación dificulta alinear la planificación con compromisos globales como el Acuerdo de París y los ODS (Wang et al., 2025).

La literatura ha puesto en evidencia la necesidad de modelos de decisión que equilibren múltiples dimensiones y de adaptar las metodologías a contextos específicos mediante estudios de caso (Mardani et al., 2015; Yin, 1994). No obstante, persisten vacíos metodológicos, como la débil consistencia de los modelos frente a la incertidumbre y la limitada capacidad para incorporar juicios imprecisos en el análisis (Danesh et al., 2018). En efecto, en la priorización de proyectos energéticos se carece de herramientas ampliamente aceptadas para definir y ponderar criterios relevantes desde etapas tempranas del ciclo de vida (Ugwu et al., 2006).

El aporte de este estudio se fundamenta en la integración de métodos cuantitativos y cualitativos para desarrollar un modelo de priorización adaptable al contexto energético colombiano. En primer lugar, se hizo una revisión sistemática de la literatura para identificar el estado del arte en métodos multicriterio aplicados a la gestión de proyectos y seleccionar criterios de evaluación. En segundo lugar, se llevaron a cabo entrevistas semiestructuradas con directivos y se aplica la técnica Delphi para consensuar y validar con expertos internos y externos la relevancia de dichos criterios en el contexto organizacional. El uso del Delphi permite anonimizar las opiniones y fomentar la convergencia de los juicios, superando sesgos individuales (Danesh et al., 2018). En tercer lugar, se empleó el AHP para establecer una jerarquía de objetivos, criterios y subcriterios y derivar ponderaciones a partir de comparaciones por pares (Saaty, 1980). Esta combinación metodológica, junto con un análisis de consistencia, permite proponer un modelo estructurado, transparente y alineado con la estrategia corporativa.

Al integrar estas herramientas, la investigación responde a un problema real de asignación eficiente y sostenible en el sector energético colombiano. La propuesta metodológica trasciende la teoría al considerar la gestión institucional de proyectos, las dinámicas del mercado eléctrico colombiano y los compromisos de sostenibilidad con comunidades y entes reguladores. Así, el estudio contribuye a cerrar la brecha entre teoría y práctica, al ofrecer un instrumento de decisión que puede replicarse en otras empresas o sectores, con las adaptaciones contextuales necesarias. Se proponen líneas de investigación para incorporar análisis de sensibilidad, métodos alternativos e inteligencia artificial que complementen el enfoque multicriterio en entornos dinámicos (Ćirović & Pamučar, 2022).

## Revisión de la literatura

### *Teoría económica de la decisión y la asignación de recursos*

La toma de decisiones multicriterio (*multiple criteria decision making* [MCDM]) es una disciplina de la investigación de operaciones y las ciencias de la decisión que surgió para apoyar elecciones racionales en escenarios donde es necesario considerar múltiples objetivos o

criterios simultáneamente. A diferencia de los modelos tradicionales de decisión con un solo criterio, como minimizar costos o maximizar ganancias, el enfoque multicriterio reconoce que en problemas reales a menudo existen objetivos conflictivos, como los criterios económicos, ambientales y sociales en proyectos de inversión sostenible, que deben equilibrarse cuidadosamente (Keeney & Raiffa, 1976; Munda, 2005).

En contextos complejos no es posible optimizar un solo criterio sin sacrificar el desempeño en otros. Por ello, el propósito de la MCDM es proporcionar herramientas formales para incorporar las preferencias del decisor y lograr soluciones de compromiso informadas (Keeney & Raiffa, 1976; Belton & Stewart, 2002). Esta perspectiva se vincula directamente con la teoría de la utilidad multiatributo, que modela matemáticamente las compensaciones entre criterios, representando la satisfacción del decisor frente a distintos niveles de desempeño y permite comparar alternativas en escenarios donde cualquier mejora en un criterio implica un deterioro en otro (Ehrgott, 2005).

En la práctica, la ausencia de mecanismos estructurados para captar y aplicar dichas preferencias genera ineficiencias en la asignación de recursos y puede derivar en decisiones subóptimas. En organizaciones del sector energético, esta situación puede acarrear impactos económicos significativos, como sobrecostos por eventos no previstos o conflictos sociales que retrasan la ejecución y afectan la rentabilidad (Asadabadi, 2019).

La teoría económica reconoce la existencia de fallas de mercado y de información en inversiones energéticas. En este tipo de proyectos, las externalidades ambientales y sociales no siempre se internalizan en las decisiones de inversión, lo que conduce a una subinversión en alternativas sostenibles. La MCDM se presenta como un marco idóneo para corregir estas fallas al incorporar criterios no financieros en la evaluación y priorización de proyectos (United Nations, 1992).

De esta manera, el vínculo entre la teoría de la utilidad y las herramientas MCDM constituye la base conceptual para abordar problemas de asignación eficiente de recursos bajo múltiples objetivos, buscando no solo la optimización económica; también la sostenibilidad socioambiental y la legitimidad social de las decisiones.

## ***Sostenibilidad y responsabilidad social empresarial***

La sostenibilidad se concibe como la integración equilibrada de las dimensiones económica, social y ambiental en los procesos de desarrollo, según la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (Naciones Unidas, 1992). En la CHEC, esta visión constituye un pilar de su responsabilidad social y orienta la gestión de proyectos, la cual incorpora, además, criterios técnicos y de gobernanza. Esta integración reconoce que la viabilidad de las iniciativas depende de su coherencia con principios éticos, regulatorios y de eficiencia operativa (Grupo EPM, 2023).

En la dimensión técnica, los criterios se asocian con la factibilidad de ejecución, la calidad de los diseños y la capacidad de la infraestructura para cumplir con los estándares operativos establecidos. La dimensión económica incorpora indicadores de rentabilidad, como el valor presente neto y la tasa interna de retorno, junto con la optimización del uso de recursos y la reducción de costos operativos.

La dimensión ambiental contempla aspectos como la eficiencia energética, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la protección de la biodiversidad y la gestión responsable de los recursos naturales. La dimensión social incluye la aceptación comunitaria, la equidad en la distribución de beneficios y la mitigación de impactos negativos sobre las poblaciones del área de influencia. Finalmente, la dimensión de gobernanza abarca la transparencia en la gestión, el cumplimiento normativo y la coherencia con los objetivos estratégicos de la organización.

La incorporación de estas dimensiones en la priorización de proyectos responde tanto a obligaciones regulatorias, como a un compromiso corporativo más amplio con el desarrollo sostenible y la responsabilidad social, especialmente relevante para empresas como la CHEC.

## ***Métodos multicriterio en economía***

Los métodos de decisión multicriterio se clasifican principalmente en compensatorios y no compensatorios. Los métodos compensatorios, como AHP, proceso analítico en red (*analytic network process*) y técnica para ordenar preferencias mediante similitud con

la solución ideal (*technique for order preference by similarity to ideal solution* [TOPSIS]), permiten que un bajo desempeño en un criterio se compense con un alto desempeño en otro, generando un puntaje global (Keeney & Raiffa, 1976; Saaty, 1980; Hwang & Yoon, 1981). Por su parte, los métodos no compensatorios, como eliminación y elección traduciendo la realidad (*Élimination et Choix Traduisant la Réalité* [ÉLECTRE]) y preferencia por ordenación de enriquecimiento de evaluaciones (*Préférence pour l'Ordonnancement Méthodique des Évaluations* [PROMETHEE]), limitan la compensación total y utilizan relaciones de preferencia parciales para proteger el cumplimiento de mínimos en criterios críticos (Roy, 1991; Brans et al., 1986).

El AHP, propuesto por Saaty (1980), es uno de los métodos más difundidos por su simplicidad conceptual y capacidad para capturar juicios subjetivos de manera consistente, ya que estructura el problema en niveles jerárquicos y utiliza comparaciones por pares para calcular pesos relativos. Su validación del índice de consistencia (*consistency ratio* [CR]) ( $CR < 0.10$ ) aporta rigor y transparencia al proceso. En contextos de sostenibilidad, se valora su flexibilidad para integrar criterios cuantitativos y cualitativos, así como su trazabilidad.

La selección de AHP en este estudio responde a su capacidad para descomponer la decisión en jerarquías claras y facilitar la participación de expertos en la asignación de pesos, condiciones que se ajustan a la necesidad de CHEC de integrar múltiples dimensiones de sostenibilidad en un modelo formal y transparente.

## Estudios previos en el sector eléctrico y sostenibilidad

La MCDM ha demostrado amplia aplicabilidad en el sector energético, particularmente en la selección y priorización de tecnologías y proyectos con criterios de sostenibilidad. Şahin (2020) aplicó una combinación de AHP, ÉLECTRE III, TOPSIS y PROMETHEE II para evaluar tecnologías de generación eléctrica, destacando la complementariedad de métodos en escenarios de incertidumbre. Hosouli y Hassani (2024) emplearon el proceso analítico jerárquico difuso para seleccionar sitios óptimos para plantas solares, mostrando ventajas frente al AHP clásico en la representación de la incertidumbre.

En contextos de planificación energética sostenible, ANP y DEMATEL (*Decision Making Trial and Evaluation Laboratory*) se han utilizado para combinar atributos técnicos,

económicos, políticos y sociales en un modelo de evaluación de recursos de energía renovable (Büyüközkan & Güler, 2016; Schulze-González et al., 2021). En la gestión de infraestructura eléctrica, AHP y TOPSIS difuso se han aplicado en procesos de licitación pública para mejorar la transparencia y objetividad (Mayor & González, 2016).

Estos antecedentes evidencian que los métodos MCDM, particularmente el AHP, ofrecen un marco robusto para la priorización estratégica de proyectos en el sector eléctrico, combinando rigor metodológico con adaptabilidad a contextos institucionales y regulatorios específicos.

## Contexto institucional y económico de la Central Hidroeléctrica de Caldas

### *Panorama del mercado eléctrico colombiano*

La CHEC es una filial del Grupo EPM dedicada a la generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica, con autonomía administrativa, patrimonial y presupuestal, sujeta al régimen general de los servicios públicos domiciliarios y a la regulación específica del sector eléctrico (Plan de Empresa CHEC, 2024). Su operación comprende desde intervenciones en infraestructura y mantenimiento de redes hasta programas de eficiencia energética, sostenibilidad ambiental e innovación empresarial (CHEC, 2024).

En este contexto, la empresa enfrenta el desafío de asignar recursos a proyectos que garanticen continuidad operativa, rentabilidad y sostenibilidad. El estudio identifica que la ausencia de un esquema de priorización formal ha generado ineficiencias y conflictos sociales no previstos, afectando la ejecución y el impacto de las inversiones (CHEC, 2024). Por ello, el entorno de la CHEC exige decisiones estratégicas que integren criterios técnicos, económicos, ambientales, sociales y de gobernanza de manera equilibrada, respondiendo a las demandas del sector y a los compromisos corporativos.

## ***Estructura organizacional y gestión de proyectos en la CHEC***

La CHEC dispone de una estructura organizacional que integra áreas especializadas en planificación, ingeniería, finanzas, medio ambiente y responsabilidad social, lo que permite abordar la formulación de proyectos desde un enfoque multidisciplinario (CHEC, 2021b). Si bien aplica lineamientos del Project Management Institute adaptados al contexto energético para orientar el ciclo de vida de los proyectos, desde su concepción hasta la evaluación final, estos no responden a un proceso normado o formalmente establecido en la organización. El diagnóstico del estudio evidencia que la priorización carece de un tratamiento sistemático, predominando el juicio experto y las evaluaciones cualitativas sobre el uso de métodos cuantitativos, lo que restringe la trazabilidad y la comparabilidad de las decisiones (CHEC, 2024).

### ***Motivación de la intervención***

La propuesta metodológica buscaba responder a estas limitaciones mediante un modelo de toma de decisiones multicriterio basado en el AHP, complementado con la técnica Delphi para validar y consensuar criterios. El objetivo era integrar de forma equilibrada las dimensiones técnica, económica, ambiental, social y de gobernanza, alineando las inversiones con la estrategia corporativa, las obligaciones regulatorias y los compromisos de sostenibilidad (Grupo EPM, 2023; Naciones Unidas, 1992).

El AHP se elige por su capacidad para estructurar problemas complejos en jerarquías y calcular ponderaciones a partir de comparaciones por pares de forma consistente (Saaty, 1980). El uso de Delphi añade un componente participativo y de consenso, reduciendo sesgos individuales y aumentando la validez de los resultados. Con ello, la CHEC puede fortalecer la transparencia y legitimidad de su proceso de priorización, optimizando la asignación de recursos y reforzando su relación con comunidades y autoridades.

# Metodología

## *Diseño de investigación*

El estudio se estructuró como un caso único instrumental, centrado en la CHEC, a fin de comprender a profundidad la problemática de priorización de proyectos y diseñar una herramienta que responda a las condiciones reales de la organización. La selección de este enfoque se fundamenta en que la CHEC presenta un marco operativo, regulatorio y estratégico que exige la alineación simultánea de dimensiones técnicas, económicas, ambientales, sociales y de gobernanza, pero carece de un método formal que articule estas variables de manera cuantitativa.

El alcance exploratorio-descriptivo permitió, en una primera fase, identificar y caracterizar el contexto institucional, los procesos vigentes de priorización y los criterios utilizados de manera implícita o explícita. A su vez, la naturaleza descriptiva se orientó a documentar, con base en evidencias, los flujos de información, los actores involucrados y las interacciones que determinan la decisión final sobre un proyecto. Finalmente, la elección del paradigma constructivista responde a que la generación del modelo requería la interpretación consensuada de criterios por parte de los expertos internos y externos, integrando su experiencia y conocimiento sectorial para adaptar metodologías MCDM a la realidad operativa de la CHEC.

En términos estratégicos, esta configuración metodológica permitió diseñar un proceso que generará tanto un modelo funcional como el fortalecimiento de capacidades internas para la aplicación y actualización futura del mismo.

## *Recolección de información*

La obtención de insumos para el modelo se desarrolló en tres fases integradas y secuenciales:

La primera consistió en una revisión sistemática de literatura, orientada a identificar criterios de sostenibilidad y metodologías de priorización aplicables a contextos empresariales

del sector eléctrico. Este ejercicio no se limitó a extraer listados de criterios, sino que analizó la forma en que otras organizaciones estructuran sus modelos y la frecuencia relativa de cada dimensión en las decisiones de inversión.

La segunda correspondió a entrevistas semiestructuradas aplicadas a líderes de proyectos, planificadores, especialistas ambientales y directivos de la CHEC. Estas entrevistas siguieron una estructura con ejes definidos y permitieron flexibilidad para profundizar en ejemplos concretos de decisiones pasadas, cuellos de botella y factores que suelen influir en la priorización. El análisis de estas respuestas evidenció que, aunque las diversas áreas de la organización manejan información relevante, la consolidación para la toma de decisiones es asimétrica y depende del estilo de gestión de cada unidad.

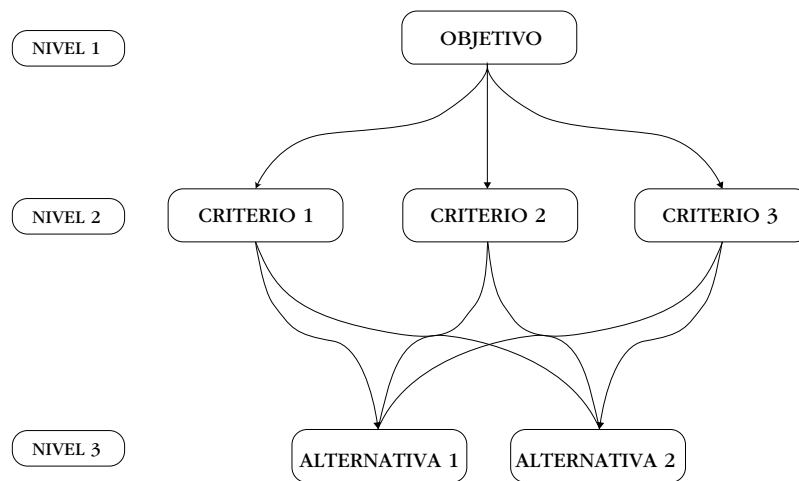
En la tercera fase se implementó la técnica Delphi con un panel de veintiún expertos distribuidos en las dimensiones técnica, ambiental, social, económica y de gobernanza, seleccionados por su experiencia temática, trayectoria en gestión de proyectos del sector y conocimiento del entorno decisional de la CHEC, con perfiles que abarcan ingeniería eléctrica, ingeniería ambiental, psicología, trabajo social, economía, administración, derecho corporativo y regulación energética, con rangos de experiencia entre dos y veintidós años. El proceso comprendió dos rondas híbridas de noventa minutos por categoría, gestionadas mediante Microsoft Forms: la primera depuró y contextualizó los criterios extraídos de la revisión bibliográfica y la segunda ejecutó las comparaciones pareadas con la escala fundamental de Saaty, estableciendo un umbral mínimo de consenso del 70 % para aceptar cada juicio y resolviendo las divergencias mediante conversación estructurada y retroalimentación inmediata con agregación anónima. La validación posterior, mediante cuestionario Likert de 1 a 10, arrojó calificaciones promedio entre 8 y 10 en todas las categorías y una sesión estratégica con directivos de la CHEC otorgó un 90 % de aprobación a la estructura y ponderaciones del modelo, consolidando su versión definitiva.

## ***Construcción del proceso analítico jerárquico***

El AHP se construyó siguiendo los lineamientos propuestos por Saaty (1980), considerando que el AHP es un método de toma de decisiones multicriterio diseñado para estructurar problemas complejos de forma jerárquica, que permite descomponerlos y analizarlos de manera racional. Este enfoque aprovecha la capacidad cognitiva del ser humano para

realizar comparaciones por pares con mayor consistencia y precisión que evaluaciones globales.

Los propósitos centrales de este modelo son reducir sesgos subjetivos y fortalecer la objetividad y trazabilidad en la priorización de alternativas. Para ello, la estructura jerárquica se compone de tres niveles principales: 1) el objetivo general de la decisión, 2) los criterios que representan los factores clave que se van a evaluar y 3) las alternativas disponibles. Esta organización se ilustra en la figura 1.



**Figura 1.** Estructura conceptual del proceso analítico jerárquico

**Fuente:** elaboración propia.

La construcción del modelo partió de dos principios clave. El primero consiste en la comparación por pares de elementos situados en el mismo nivel jerárquico, utilizando la escala fundamental de Saaty, que refleja el grado de preferencia o importancia relativa de un elemento respecto a otro (tabla 1). El segundo principio corresponde a la consistencia de los juicios, verificada mediante el cálculo de la  $CR$ , cuyo valor debe ser inferior a 0.10 para considerar aceptables y coherentes las comparaciones.

**Tabla 1.** Escala de comparación de Saaty

| Valor | Interpretación         |
|-------|------------------------|
| 1     | Igual importancia      |
| 3     | Importancia moderada   |
| 5     | Importancia fuerte     |
| 7     | Importancia muy fuerte |
| 9     | Importancia extrema    |

Nota: los valores impares de la escala se fundamentaron en Saaty (1980) y constituyen los niveles principales de preferencia con interpretación lingüística explícita. Los valores pares funcionan como ajustes intermedios cuando el juicio se ubica entre dos niveles contiguos, sin modificar la estructura de la escala. En la aplicación, el panel Delphi empleó los valores impares como anclajes y recurrió a los pares solo ante posiciones intermedias explícitas.

**Fuente:** elaboración propia a partir de Saaty (1980).

El modelo integra herramientas matemáticas como el uso de matrices, vectores propios y procesos de normalización que permiten calcular con precisión los pesos relativos de los criterios y de las alternativas. Estos resultados facilitan una síntesis global del análisis a partir del cual es posible identificar y jerarquizar las opciones más convenientes en función del objetivo definido.

Para asegurar la validez de los juicios emitidos, las matrices de comparación por pares deben cumplir con ciertas propiedades matemáticas fundamentales, las cuales, junto con los componentes que conforman este procedimiento, se describen a continuación.

Reciprocidad: si un elemento  $i$  es  $x$  veces más importante que otro elemento  $j$ , entonces el valor de la comparación se representa como  $a_{ij} = X$ . Así, la comparación inversa debe cumplir:

$$a_{ji} = \frac{1}{X}$$

Esta relación asegura simetría inversa y coherencia en los juicios de preferencia.

Homogeneidad: cuando dos elementos  $i$  y  $j$  se consideran igualmente importantes, debe cumplirse:

$$a_{ij} = A_{ji} = 1$$

Asimismo, todo elemento es igualmente importante respecto a sí mismo, por lo que:

$$a_{ij} = 1 \text{ para todo } i$$

Consistencia: se refiere a que las comparaciones deben seguir una lógica transitiva. Si  $i$  es más importante que  $k$ , y  $k$  es más importante que  $j$ , entonces se espera que la relación entre  $i$  y  $j$  cumpla:

$$a_{ij} = a_{ik} * a_{kj}$$

Debido a que esta condición no siempre se cumple estrictamente en la práctica, Saaty propone el índice de consistencia (CI) como medida de desviación respecto a la consistencia perfecta. Se calcula así:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

### **Ecuación 1.** Índice de consistencia AHP

Donde:

$CI$ : índice de consistencia

$\lambda_{max}$ : valor propio máximo de la matriz

$n$ : número de criterios

Siendo:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A * W)_i}{W_i}$$

Ecuación 2. Valor propio máximo de la matriz AHP

Donde:

- A: matriz de comparación por pares
- W: vector de pesos normalizados
- $W_i$ : peso correspondiente al criterio i
- n: número de criterios

Para evaluar la aceptabilidad del nivel de inconsistencia, se utiliza la CR:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Ecuación 3. Razón de consistencia

Donde:

- CR: razón de consistencia
- CI: índice de consistencia
- RI: índice aleatorio

El índice aleatorio depende exclusivamente del número de elementos comparados *n*, y ha sido estimado empíricamente por Saaty (1980) a partir de simulaciones realizadas sobre matrices de comparación por pares generadas aleatoriamente. En la tabla 2 se presentan los valores del índice aleatorio, correspondientes a diferentes tamaños de matriz.

Tabla 2. Índice aleatorio para AHP de Saaty

| n  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| RI | 0.00 | 0.00 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 |

Fuente: elaboración propia a partir de Saaty (1980).

Finalmente, el valor del  $CR$  permite determinar si el nivel de inconsistencia es aceptable. Un  $CR < 0.10$  se considera adecuado, lo cual indica que los juicios son suficientemente consistentes para tomar decisiones confiables. Si el valor excede dicho umbral, es necesario revisar los juicios, pues la matriz podría contener contradicciones lógicas importantes (Saaty, 1980).

## ***Aplicación del proceso analítico jerárquico a los criterios definidos***

La aplicación del AHP se desarrolló en Microsoft Excel, integrando las matrices de comparación pareada, el proceso de normalización, el cálculo del vector propio, la verificación del índice y razón de consistencia para cada una de las cinco dimensiones del modelo. Las valoraciones fueron emitidas por los 21 expertos del panel Delphi, distribuidos por categoría temática según su experticia (véase el apartado de metodología). La aplicación se desarrolló de forma independiente para cada dimensión, construyendo una matriz de comparación pareada, por categoría, con base en las valoraciones de sus respectivos expertos: dimensión técnica (7 criterios, 3 expertos), ambiental (5 criterios, 7 expertos), social (7 criterios, 4 expertos), económica (6 criterios, 4 expertos) y gobernanza (6 criterios, 3 expertos).

Para cada categoría, la matriz de comparaciones se normalizó dividiendo cada elemento por la suma de su respectiva columna; los pesos relativos ( $w$ ) se obtuvieron como el promedio aritmético de cada fila normalizada. El valor propio máximo ( $\lambda_{max}$ ) se estimó mediante el producto matricial entre la matriz original y el vector de pesos, aplicando posteriormente las ecuaciones 1, 2 y 3 para obtener  $CI$  y  $CR$ . En la tabla 3 se esquematiza el proceso de sistematización de los datos para la categoría técnica.

**Tabla 3.** Matriz de comparación pareada de los criterios técnicos (AHP)

| Criterios                                             | C1   | C2   | C3   | C4   | C5   | C6   | C7   |
|-------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| C1. Capacidad de integración con el sistema eléctrico | 1    | 0.50 | 6.00 | 2.00 | 0.33 | 0.50 | 4.00 |
| C2. Atención a nueva demanda y respaldo energético    | 2.00 | 1    | 5.00 | 1.50 | 1.50 | 1.50 | 2.00 |
| C3. Tiempo de ejecución del proyecto                  | 0.17 | 0.20 | 1    | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.33 |
| C4. Nivel de madurez tecnológica requerida            | 0.50 | 0.67 | 4.00 | 1    | 0.33 | 0.25 | 0.33 |
| C5. Criticidad de los activos involucrados            | 3.00 | 0.67 | 4.00 | 3.00 | 1    | 2.00 | 4.00 |
| C6. Potencial de generación de valor                  | 2.00 | 0.67 | 5.00 | 4.00 | 0.50 | 1    | 4.00 |
| C7. Compatibilidad de condiciones operativas          | 0.25 | 0.50 | 3.00 | 3.00 | 0.25 | 0.25 | 1    |

**Fuente:** elaboración propia.

Aplicando el procedimiento descrito a la matriz de la dimensión técnica, se obtuvieron pesos relativos: C5 = 24%; C2 = 21%; C6 = 20%; C1 = 14%; C4 = 9%; C7 = 9% y C3 = 3%. El valor propio máximo resultó en  $\lambda_{\max} = 7.780$ , con un CI = 0.130 y una CR = 0.098 (RI = 1.32 para n = 7), valor inferior al umbral de 0.10 que valida la coherencia de los juicios del panel. El mismo procedimiento se aplicó a las cinco dimensiones del modelo. Los resultados consolidados se presentan en la tabla 4.

**Tabla 4.** Resumen del análisis de consistencia AHP por dimensión

| Dimensión  | Núm. criterios | CI    | RI   | CR    |
|------------|----------------|-------|------|-------|
| Técnica    | 7              | 0.130 | 1.32 | 0.098 |
| Ambiental  | 5              | 0.103 | 1.12 | 0.092 |
| Social     | 7              | 0.164 | 1.32 | 0.125 |
| Económica  | 6              | 0.108 | 1.24 | 0.083 |
| Gobernanza | 6              | 0.113 | 1.24 | 0.091 |

CI: índice de consistencia; RI: índice aleatorio; CR: razón de consistencia.

**Fuente:** elaboración propia.

El análisis de consistencia mostró razones (CR) dentro del umbral aceptable (<0.10) en cuatro categorías: técnica, ambiental, económica y gobernanza. La dimensión social registró un CR = 0.125, ligeramente superior al umbral estándar; diferencia que fue aceptada por

el panel por tratarse de criterios con fuerte componente cualitativo y valorativo, y por situarse a apenas 0.025 del límite de tolerancia metodológica. El resultado consolidado confirma la solidez matemática del procedimiento AHP aplicado y la coherencia de los juicios emitidos por los 21 expertos del panel Delphi.

## Resultados y discusión

### *Definición de criterios por categoría para la priorización de proyectos*

Los criterios priorizados en la dimensión técnica reflejan una orientación clara hacia la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico (tabla 5). La atención se concentra en la infraestructura crítica y en la capacidad de respuesta frente a nuevas demandas, lo que evidencia una gestión orientada al aseguramiento del servicio como eje central. La importancia atribuida al valor que puede generar un proyecto dentro del sistema muestra una visión estratégica que combina solidez operativa con criterios de eficiencia y sostenibilidad.

**Tabla 5.** Criterios técnicos definidos para la priorización de proyectos

| Criterio                                       | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Ponderación (%) |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Criticidad de los activos involucrados         | Analiza si el proyecto interviene infraestructura crítica para la operación del sistema eléctrico, considerando implicaciones en seguridad operativa, salud laboral, continuidad del servicio, ambiente y riesgo económico. Este criterio permite determinar el grado de afectación sobre activos estratégicos cuya intervención condiciona la estabilidad y confiabilidad del sistema.                                                   | 24              |
| Atención a nueva demanda y respaldo energético | Evalúa la capacidad del proyecto para cubrir el crecimiento proyectado de nueva demanda, considerando la atención a nuevos usuarios, desarrollos urbanísticos y expansiones industriales. Incluye la inyección de energía desde nuevas plantas de generación y el respaldo a la demanda existente, garantizando disponibilidad suficiente en kilovatios para soportar el aumento de consumo sin comprometer la confiabilidad del sistema. | 21              |
| Potencial de generación de valor               | Evalúa la capacidad del proyecto para generar valor técnico y operativo mediante la mejora en la calidad del servicio, la reducción de pérdidas y el aumento de la confiabilidad en la entrega al sistema. Considera, además, el impacto sobre indicadores clave y la percepción del usuario final respecto a la continuidad, disponibilidad y desempeño del servicio prestado.                                                           | 20              |

*Continúa*

| Criterio                                          | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Ponderación (%) |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Capacidad de integración con el sistema eléctrico | Evalúa si el proyecto puede integrarse técnica y funcionalmente al sistema eléctrico existente, considerando su compatibilidad con infraestructuras como subestaciones, redes y plataformas. Incluye el análisis de cortocircuito, la capacidad de recepción de energía y la viabilidad para entregar energía de forma segura y estable, garantizando continuidad operativa, escalabilidad tecnológica y sostenibilidad del sistema a largo plazo. | 14              |
| Afinidad de condiciones operativas                | Evalúa las condiciones físicas, logísticas y ambientales del sitio (accesos, servicios, geología, clima, pesos, caudales), así como la capacidad de la empresa para ejecutarlo. Incluye disponibilidad de recursos internos, soporte técnico, logístico y organizacional, importaciones y mano de obra especializada. Determina si el entorno y las capacidades empresariales permiten desarrollar la infraestructura proyectada.                  | 9               |
| Nivel de madurez tecnológica requerida            | Evalúa si la tecnología necesaria para el proyecto cuenta con un nivel de desarrollo suficiente para operar de forma estable en condiciones reales. Considera su validación técnica, grado de implementación en el sector y los riesgos asociados a su funcionamiento. Incluye tanto tecnologías convencionales como soluciones innovadoras o basadas en fuentes de energía renovable, valorando su confiabilidad y desempeño comprobado.          | 9               |
| Tiempo de ejecución del proyecto                  | Evalúa el tiempo estimado necesario para ejecutar el proyecto desde su inicio hasta su finalización, considerando fases técnicas, administrativas y operativas, así como posibles contingencias que afecten la programación general.                                                                                                                                                                                                               | 3               |

**Fuente:** elaboración propia.

Más allá del cumplimiento técnico, se destaca una preocupación por la coherencia entre los proyectos y las condiciones reales del sistema. Esto se traduce en una selección de criterios que buscan garantizar una adecuada articulación con las capacidades instaladas, las condiciones logísticas y la posibilidad real de implementación. Aunque aspectos como el tiempo de ejecución o el grado de madurez tecnológica fueron menos relevantes, su inclusión sugiere que la organización valora la innovación y está dispuesta a asumir retos técnicos siempre que se integren a una visión estructurada del sistema.

En otro ámbito de análisis, la evaluación ambiental (tabla 6) revela una institucionalidad que ha internalizado el cumplimiento normativo como un pilar de su gestión. Los proyectos deben alinearse tanto con los estándares legales como con los lineamientos internos del Grupo EPM, lo cual refleja una cultura organizacional que no concibe el componente ambiental como una exigencia externa, sino como una parte esencial de la estrategia.

**Tabla 6.** Criterios ambientales definidos para la priorización de proyectos

| Criterio                                                              | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Ponderación (%) |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Identificación de requisitos y estándares ambientales                 | Se identifican las condiciones ambientales aplicables al proyecto, tanto legales como voluntarias. Las primeras corresponden a permisos y licencias exigidas por la normativa vigente; las segundas, a compromisos asumidos por la organización, incluyendo el Sistema de Gestión Ambiental. En ambos casos, se deben considerar las implicaciones en auditorías, monitoreo, controles técnicos y certificaciones, con el fin de asegurar el cumplimiento normativo y el desempeño ambiental del proyecto. | 34              |
| Alineación con los planes estratégicos ambientales de la organización | Evalúa el nivel de articulación del proyecto con la estrategia ambiental corporativa, considerando planes, políticas y mecanismos de despliegue estratégico que viabilizan la implementación de los temas materiales definidos por los grupos de interés. Esta alineación también debe considerar los compromisos asumidos por la empresa y la contribución a los ODS prioritarios para la organización.                                                                                                   | 31              |
| Compatibilidad territorial y ambiental del proyecto                   | Evalúa la articulación del proyecto con el entorno territorial y ambiental, teniendo en cuenta el uso del suelo, ecosistemas estratégicos, zonas de interés ambiental y potenciales conflictos socioambientales que puedan comprometer su viabilidad, sostenibilidad o aceptación por comunidades y autoridades. La evaluación debe incorporar la identificación y gestión de los riesgos vinculados a estos aspectos.                                                                                     | 16              |
| Incorporación de tecnologías limpias y energías renovables            | Evalúa la capacidad del proyecto para integrar tecnologías limpias, como el ecodiseño, la bioingeniería o la autogeneración con fuentes renovables, orientadas a mejorar el desempeño ambiental, reducir emisiones y fortalecer su contribución a la sostenibilidad. Se deben considerar las condiciones regulatorias que puedan influir en la viabilidad e implementación de dichas tecnologías.                                                                                                          | 14              |
| Análisis ambiental del ciclo de vida de los activos                   | Analiza las implicaciones ambientales de los activos involucrados en el proyecto, considerando los efectos desde la adquisición hasta la disposición final. Se deben considerar criterios de eficiencia, reciclaje y sostenibilidad, así como los posibles pasivos ambientales asociados a cada fase del ciclo de vida del proyecto.                                                                                                                                                                       | 5               |

**Fuente:** elaboración propia.

Además del enfoque regulatorio, se observa una preocupación por asegurar la compatibilidad de los proyectos con el entorno físico y ecológico. Este criterio, aunque con menor peso, permite anticipar posibles conflictos territoriales y ambientales, fortaleciendo la gestión preventiva. Si bien el análisis del ciclo de vida tiene aún una representación baja, su presencia en el modelo indica una intención de evolucionar hacia herramientas más integrales y de largo plazo, especialmente útiles para proyectos con implicaciones acumulativas.

Otro aspecto evaluado corresponde a una categoría social (tabla 7) muestran una organización que reconoce el territorio como un actor central en la toma de decisiones. La relación entre los proyectos y los instrumentos de planificación local no es solo un requisito técnico, sino una condición estratégica para su viabilidad. De igual forma, la incorporación de elementos culturales y patrimoniales refleja una sensibilidad creciente hacia el contexto social, entendiendo que la sostenibilidad también depende del reconocimiento de las dinámicas comunitarias.

**Tabla 7.** Criterios sociales definidos para la priorización de proyectos

| Criterio                                                        | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Ponderación (%) |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Alineación con el ordenamiento territorial                      | Evalúa la coherencia del proyecto con los instrumentos de planificación territorial, como planes de ordenamiento territorial, planes de desarrollo y planes de ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas, considerando el uso del suelo permitido y su compatibilidad con variables ambientales, sociales, económicas y técnicas.                                                                                                                                                 | 25              |
| Valoración de aspectos culturales y patrimoniales               | Se identifican, reconocen y consideran las costumbres locales, presencia de comunidades étnicas (indígenas, afrodescendientes, otras), territorios ancestrales, resguardos, territorios colectivos, consejos comunitarios, organizaciones étnico-territoriales y zonas de hallazgos o alto potencial arqueológicos. El proyecto promueve una intervención que respete la diversidad cultural, fomente la inclusión social y se desarrolle en cumplimiento del marco normativo vigente. | 20              |
| Potencial para la generación de impactos sociales positivos     | Se analiza la capacidad del proyecto para generar impactos positivos en el acceso a servicios básicos, la empleabilidad, la seguridad territorial, los aportes educativos, la cohesión social y la participación comunitaria y demás aspectos que permitan el mejoramiento de la calidad de vida.                                                                                                                                                                                      | 17              |
| Generación de valor territorial                                 | Se identifica el aporte del proyecto al desarrollo socioeconómico del territorio, considerando su contribución a los sectores productivos, el impulso a las actividades económicas, el cumplimiento de obligaciones tributarias, el mejoramiento de la infraestructura vial y las acciones orientadas a la protección ambiental. En este sentido, se valora la contribución al fortalecimiento de procesos de gobernanza y empoderamiento territorial.                                 | 13              |
| Identificación y gestión predial                                | Evalúa los procesos de gestión predial desde un enfoque de debida diligencia, integrando de manera articulada los componentes sociales, ambientales, técnicos, financieros y legales, con el fin de garantizar la viabilidad territorial del proyecto.                                                                                                                                                                                                                                 | 12              |
| Comunicación y relacionamiento para la creación de valor social | Analiza los mecanismos de comunicación y relacionamiento con los grupos de interés, orientados a la construcción de confianza, la transparencia y la corresponsabilidad, con el objetivo de fortalecer las relaciones sociales en el corto y largo plazo.                                                                                                                                                                                                                              | 8               |

*Continúa*

| Criterio                                | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Ponderación (%) |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Legitimidad institucional y comunitaria | Identifica la legitimidad institucional y el reconocimiento comunitario como factores clave para la viabilidad del proyecto. Se considera cómo el proyecto permite la generación de confianza e identidad colectiva, así como su contribución a la construcción de licencia social, imagen pública, reputación institucional y posicionamiento de marca. | 5               |

**Fuente:** elaboración propia.

Desde la perspectiva social se evidencia que la empresa busca reducir impactos negativos, así como generar beneficios concretos en las zonas de intervención. La identificación de oportunidades de valor territorial y la gestión predial, vistas en conjunto, indican una mirada que trasciende lo procedimental para abordar lo social desde la planificación misma. Aunque el relacionamiento y la legitimidad comunitaria tuvieron una ponderación menor, su presencia en el modelo sugiere que existe una base sobre la cual se pueden fortalecer los vínculos de confianza y cooperación en el largo plazo.

Siguiendo con la identificación de los criterios, los aspectos económicos (tabla 8) plantean elementos que privilegia el análisis financiero riguroso como punto de partida. Sin embargo, se complementa con una mirada estratégica que considera el valor futuro de los proyectos y su contribución al desempeño general de la empresa. Esta articulación entre rentabilidad y alineación con objetivos corporativos permite evaluar cada iniciativa tanto por sus resultados individuales como por su capacidad para fortalecer el portafolio institucional.

**Tabla 8.** Criterios económicos definidos para la priorización de proyectos

| Criterio                                                            | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Ponderación (%) |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Evaluación financiera mediante indicadores de rentabilidad y riesgo | Integra herramientas como el valor presente neto, la tasa interna de retorno y la relación costo-beneficio, que permiten cuantificar la rentabilidad esperada y los niveles de riesgo financiero, facilitando decisiones de inversión fundamentadas en criterios objetivos y comparables.                                                                                                                      | 30              |
| Potencial estratégico de generación de valor                        | Evalúa la capacidad intrínseca del proyecto para generar valor económico a futuro, considerando su alineación con oportunidades estratégicas, posicionamiento en el mercado o ventajas competitivas proyectadas. Refleja una expectativa fundamentada de aporte económico, aún sin resultados financieros inmediatos, pero con indicios claros de viabilidad o proyección sólida dentro del entorno económico. | 22              |

*Continúa*

| Criterio                                                          | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Ponderación (%) |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Contribución estratégica al desempeño económico organizacional    | Analiza el impacto del proyecto en indicadores clave del desempeño organizacional, como el beneficio antes de intereses, impuestos, depreciaciones y amortizaciones, la utilidad neta y los márgenes financieros, en relación con el cuadro de mando integral. Se valora su alineación con los objetivos corporativos y su aporte a la sostenibilidad financiera de la organización. | 20              |
| Valor económico estimado del proyecto (CAPEX)                     | Considera el valor total del proyecto en su fase de inversión (CAPEX), expresado en unidades de construcción o pesos colombianos, sustentado en presupuestos técnicos, análisis de mercado o estudios preliminares. Este valor permite dimensionar su impacto económico para efectos de planificación, priorización y asignación de recursos.                                        | 11              |
| Requerimientos financieros para operación y mantenimiento (OPEX)  | Examina los costos operativos y de mantenimiento durante el ciclo de vida del proyecto, incluyendo gastos en personal, energía, insumos y servicios. Estos requerimientos financieros son determinantes para evaluar la eficiencia, sostenibilidad operativa y carga presupuestal a largo plazo del proyecto.                                                                        | 10              |
| Acceso a incentivos financieros y mecanismos de fomento económico | Evalúa la disponibilidad de mecanismos tributarios y financieros que mejoren la viabilidad económica del proyecto, tales como subsidios, cooperación nacional e internacional, exenciones fiscales u otros instrumentos de fomento que incentiven la inversión sostenible y fortalezcan la rentabilidad desde el inicio de su estructuración.                                        | 7               |

**Fuente:** elaboración propia.

Los resultados económicos también consideran la sostenibilidad financiera a lo largo del ciclo de vida, incorporando criterios relacionados con los costos de operación y mantenimiento. Aunque los incentivos externos tienen un peso menor, su inclusión sugiere que si bien no son decisivos, pueden representar un valor agregado. Esta dimensión muestra una gestión responsable, que no se limita a la eficiencia inmediata, sino que busca estabilidad, proyección y consistencia financiera.

Finalmente, la gobernanza (tabla 9) aparece como una dimensión clave para garantizar la coherencia institucional. La alta valoración de la alineación con políticas y estructuras del Grupo EPM confirma que las decisiones de inversión deben ajustarse a marcos definidos, lo que otorga solidez al modelo y facilita la articulación entre los niveles de la organización. Esta alineación interna no es solo normativa, sino estratégica, ya que permite una gestión unificada y coordinada.

**Tabla 9.** Criterios de gobernanza definidos para la priorización de proyectos

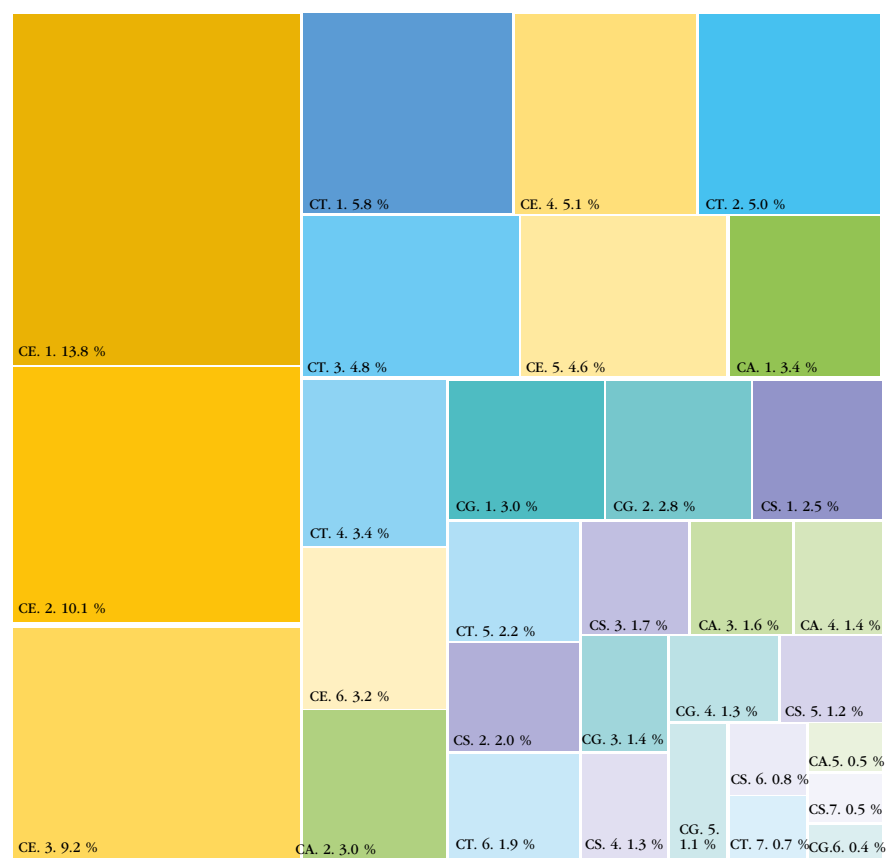
| Criterio                                                       | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Ponderación (%) |
|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Alineación con políticas y regulaciones sectoriales            | Determina si el proyecto responde a mandatos regulatorios de cumplimiento obligatorio, como normas técnicas, resoluciones o decisiones de autoridades, cuya omisión puede generar sanciones, riesgos financieros, jurídicos, reputacionales y afectaciones al servicio.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 30              |
| Alineación con el sistema de gobernanza del Grupo EPM          | Evalúa si el proyecto se ajusta a las reglas, principios, ética y transparencia que definen la actuación del Grupo EPM para la generación de valor y aprovechamiento sinergias, de acuerdo con el nivel de involucramiento del núcleo corporativo, las misiones clave, el liderazgo y control estratégico, garantizando el cumplimiento de las condiciones estatutarias y las directrices definidas por el núcleo corporativo. Incluye la adopción de metodologías institucionales para la formulación de proyectos. Hay prevalencia del interés de grupo para garantizar la unidad de propósito y dirección. La toma de decisiones en esta instancia se apoya en la asamblea de accionistas y la junta directiva. | 28              |
| Gestión eficiente de la información para la toma de decisiones | Se garantiza la entrega de información completa, suficiente y oportuna para la toma de decisiones informadas por parte de los diferentes órganos de gobierno para actuar con transparencia, responsabilidad y equidad, garantizando la rendición de cuentas para todos los grupos de interés. Además, verifica su alineación con marcos éticos, normativos y voluntarios, reduciendo riesgos de corrupción y fortaleciendo la confianza pública.                                                                                                                                                                                                                                                                   | 14              |
| Gestión integral de riesgos y control                          | Identifica, gestiona y mitiga los riesgos que puedan afectar el logro del direccionamiento estratégico. Incluye el seguimiento y monitoreo de la gestión integral de riesgos, así como el control oportuno y adecuado para asegurar y asesorar en los procesos de gobierno, riesgo y control.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 13              |
| Articulación institucional interna                             | Analiza la capacidad de la organización para orientar estratégicamente los proyectos, asegurando su coherencia con el portafolio y los objetivos institucionales. Se consideran las capacidades técnicas, económicas, sociales y ambientales requeridas para su aprobación, conforme a los mecanismos formales de gobernanza. La toma de decisiones en esta instancia se apoya en el comité de gerencia.                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 11              |
| Compromisos interinstitucionales y gobernanza colaborativa     | Considera si el proyecto requiere la participación de actores públicos, privados y comunitarios, para fomentar el desarrollo territorial, la competitividad, la innovación y la sostenibilidad, mediante la unión de capacidades y recursos. Esto fortalece la legitimidad institucional y mitiga el riesgo de sanciones.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 4               |

**Fuente:** elaboración propia.

Dentro de esta categoría se reconoce la importancia de la información para la toma de decisiones y el control de riesgos, lo que evidencia una estructura organizacional que combina autonomía operativa con mecanismos sólidos de supervisión. Si bien los aspectos relacionados con la articulación externa tuvieron menor ponderación, su inclusión en el modelo abre la posibilidad de avanzar hacia esquemas más colaborativos, especialmente en proyectos donde la interacción con actores externos es determinante.

## Pesos y relevancia de las dimensiones

La aplicación combinada del método Delphi y el AHP permitió obtener las ponderaciones definitivas para las cinco dimensiones estratégicas definidas en el modelo, así como para los criterios que las componen. El resultado refleja un orden de importancia encabezado por la dimensión económica con el 46% del peso total, seguida de la técnica con un 24%. Las dimensiones ambiental, social y de gobernanza obtuvieron, cada una, un 10% (ver figura 2). Esta jerarquía evidencia una orientación predominante hacia la rentabilidad y viabilidad técnica de los proyectos, sin excluir variables de sostenibilidad y legitimidad que, aunque con menor peso relativo, tienen un rol estratégico en la operación de la CHEC como empresa BIC.



**Figura 2.** Representación porcentual consolidada de criterios del modelo AHP para la priorización de proyectos en CHEC

Nota: la figura 2 utiliza abreviaturas por categoría (CT, CA, CS, CE y CG), correspondientes a los criterios técnico, ambiental, social, económico y de gobernanza, respectivamente. La numeración asignada a cada criterio obedece al orden de representatividad ponderada dentro de su categoría, y no al orden utilizado en las matrices de comparación pareada.

**Fuente:** elaboración propia.

El análisis global de la matriz consolidada permite identificar un patrón decisional claro: la CHEC prioriza proyectos que articulen viabilidad económica, sustentación técnica y alineación institucional. La concentración de representatividad en los criterios económicos y técnicos refleja un enfoque orientado a asegurar la rentabilidad, la eficiencia operativa y la continuidad del sistema eléctrico. Sin embargo, esta lógica no responde solo a parámetros financieros o de infraestructura, sino que se complementa con la incorporación de elementos sociales, ambientales y de gobernanza, lo cual demuestra una visión más integral y consistente con los principios de sostenibilidad.

El planteamiento propone que la priorización de proyectos en la CHEC responde a una estructura de decisión integrada, en la que los aspectos económicos, técnicos, ambientales, sociales y de gobernanza se interrelacionan para asegurar viabilidad y sostenibilidad en el largo plazo. En lo económico, la rentabilidad, el costo de oportunidad y el desempeño financiero global actúan como filtros iniciales que garantizan estabilidad presupuestal y retorno estratégico, pero su efectividad depende de que los proyectos cumplan con los requerimientos técnicos de continuidad, confiabilidad y eficiencia operativa. A su vez, estos factores técnicos no pueden disociarse de las condiciones ambientales y territoriales, dado que el cumplimiento normativo, la compatibilidad con el ordenamiento y la planificación ambiental son determinantes para evitar riesgos regulatorios y garantizar aceptación institucional. En el plano social, la alineación con el desarrollo local y la valoración de aspectos culturales amplían la legitimidad de las inversiones, favoreciendo su ejecución en entornos con múltiples actores y posibles tensiones. Finalmente, los criterios de gobernanza aseguran que la viabilidad económica, técnica, ambiental y social se traduzca en proyectos ejecutables dentro de un marco organizacional sólido, alineado con la estrategia del Grupo EPM y con estructuras claras de responsabilidad. Esta articulación revela que el modelo pondera criterios aislados y estructura un proceso en el que cada dimensión refuerza a las demás, generando una matriz de decisión coherente con el perfil de un prestador de servicios públicos que busca optimizar recursos, minimizar riesgos y maximizar valor para sus grupos de interés.

## Discusión

Los resultados de esta investigación evidencian un avance sustancial en la consolidación de un modelo de priorización de proyectos fundamentado en criterios de sostenibilidad, que integra de manera equilibrada dimensiones económicas, técnicas, sociales, ambientales y de gobernanza. Esta integración representa un cambio de enfoque dentro de la CHEC, al pasar de decisiones fragmentadas y altamente dependientes del juicio experto hacia un marco formal, participativo y trazable que facilita la coherencia entre los objetivos estratégicos y la ejecución operativa. Sin embargo, la efectividad del modelo dependerá de su transición desde la fase conceptual a una implementación operativa, respaldada por procesos institucionales estandarizados y adaptativos.

En términos prácticos, uno de los principales retos identificados es la necesidad de profundizar en la definición operativa de los criterios. Pese a que la investigación estableció un marco común para todas las dimensiones, cada tipo de proyecto, de acuerdo con su naturaleza técnica, alcance territorial y fase de desarrollo, requiere particularidades que condicionan la aplicabilidad de los criterios. La falta de esta especificidad podría derivar en evaluaciones poco precisas o inconsistentes entre proyectos. Por tanto, se propone desarrollar descripciones detalladas que definan el alcance de cada criterio y, además, las condiciones específicas bajo las cuales debe ser aplicado, de manera que se preserve su pertinencia en diversos contextos internos.

Asimismo, el análisis revela que muchos de los criterios actuales contienen subcriterios implícitos que, de no ser identificados y medidos de forma independiente, pueden diluir información clave para la priorización. La desagregación formal de estos subcomponentes permitiría capturar con mayor precisión el desempeño esperado, diseñando indicadores técnicos y operativos bajo principios de claridad, relevancia y aplicabilidad. Esta precisión metodológica mejoraría la objetividad del proceso, y, al mismo tiempo, facilitaría el seguimiento y la retroalimentación continua, fortaleciendo la trazabilidad de las decisiones y su legitimidad frente a actores internos y externos.

Otro aspecto crítico es que los criterios y subcriterios no permanecen estáticos a lo largo del ciclo de vida del proyecto. La relevancia de cada dimensión varía según la etapa:

en la identificación, destacan las condiciones habilitantes como gobernanza, viabilidad normativa y alineación territorial; en la formulación, los criterios técnicos y económicos cobran mayor peso gracias a los estudios de prefactibilidad y factibilidad. En la ejecución, la atención se desplaza hacia el cumplimiento de cronogramas, control de costos, gestión ambiental y relacionamiento comunitario. En el cierre, se prioriza el cumplimiento de metas y la consolidación de indicadores de impacto. Finalmente, en la evaluación *ex post*, los aprendizajes y buenas prácticas se convierten en insumos estratégicos para fortalecer el portafolio futuro. Este comportamiento dinámico implica que un modelo uniforme e invariable resultaría insuficiente.

En este sentido, el modelo debe concebirse como un sistema modular y adaptable, capaz de ajustar ponderaciones, criterios y subcriterios en función de la fase del proyecto, el tipo de intervención y las prioridades estratégicas vigentes. Esta flexibilidad preserva su relevancia en el tiempo, ya que lo convierte en una herramienta resiliente frente a cambios regulatorios, tecnológicos o socioeconómicos, condición indispensable para un sector como el energético.

En el plano institucional, la adopción del modelo debería formalizarse como una política transversal de priorización de inversiones, respaldada por una guía técnica y un programa de formación interna. Esto garantizaría su apropiación por parte de todas las áreas involucradas y reduciría el riesgo de que su aplicación dependa de la voluntad individual de ciertos equipos. En la misma línea, institucionalizar el modelo fortalecería la gobernanza de los proyectos, incrementaría la transparencia en la toma de decisiones y consolidaría una cultura organizacional orientada a la eficiencia, la trazabilidad y la sostenibilidad.

No obstante, el estudio presenta limitaciones que deben considerarse en la discusión. La dependencia del juicio experto introduce sesgos potenciales, especialmente cuando el número de comparaciones en el AHP crece y aumenta el riesgo de inconsistencias. A su vez, el alcance local del análisis limita la generalización de los resultados, por lo que su aplicación en otros contextos requerirá ajustes metodológicos y una validación específica.

En términos de implicaciones, el modelo desarrollado optimiza la asignación de recursos en la CHEC y, a la par, ofrece una referencia para otros actores del sector energético

y de servicios públicos que busquen integrar sostenibilidad, eficiencia y legitimidad en sus decisiones de inversión. Su carácter modular, sustentado en criterios consensuados y en metodologías participativas lo convierte en una herramienta transferible, siempre que se preserve el rigor en la definición de indicadores y en la validación contextual.

La discusión central apunta a que la verdadera fortaleza del modelo no reside únicamente en su capacidad técnica para jerarquizar proyectos, sino en su potencial para transformar la cultura institucional de toma de decisiones, consolidando un equilibrio sostenible entre viabilidad económica, desempeño técnico, responsabilidad social y protección ambiental. La implementación plena de este enfoque permitiría a la CHEC avanzar hacia un esquema de gestión de inversiones que sea, a la vez, más estratégico, más transparente y alineado con los desafíos de sostenibilidad que enfrenta el sector energético.

## Conclusiones

La investigación confirma que la implementación de un modelo formal de toma de decisiones multicriterio en la CHEC, construido sobre AHP con apoyo de la técnica Delphi, fortalece la capacidad de la organización para priorizar inversiones de forma objetiva, transparente y alineada con la sostenibilidad corporativa. La revisión de metodologías y el análisis comparativo de experiencias en el sector eléctrico permitieron configurar un enfoque híbrido y participativo que traduce las prioridades estratégicas de la empresa en criterios operativos medibles, abarcando las dimensiones técnica, económica, ambiental, social y de gobernanza.

En el plano empresarial, el modelo aporta una estructura categorial clara, con pesos y métricas definidas, que facilita la integración de la priorización con la planeación estratégica y financiera. Su aplicación como una herramienta accesible permite simular escenarios y validar su consistencia, lo que demuestra su adaptabilidad a distintos contextos internos. Además, fomenta la articulación entre áreas técnicas, de planeación y de gestión social, reduciendo asimetrías de información y acelerando acuerdos en la asignación de recursos.

Desde la perspectiva social, la inclusión de criterios como aceptación comunitaria, compatibilidad territorial y cumplimiento ambiental en la etapa inicial de evaluación refuerza la legitimidad de los proyectos, previene conflictos y vincula las inversiones con el desarrollo territorial sostenible. Esta visión integral posiciona a la CHEC no solo como proveedor de energía, sino como actor clave en la articulación de valor social y ambiental en la región.

Se recomienda a la CHEC institucionalizar este modelo dentro de su ciclo de planeación, incorporando procesos de actualización periódica de criterios, escalas de evaluación flexibles y mecanismos de retroalimentación continua. Para el ámbito regulatorio, los hallazgos sugieren la conveniencia de exigir la inclusión explícita de criterios socioeconómicos y ambientales en las evaluaciones de proyectos energéticos, reforzando la transparencia y la rendición de cuentas en el sector. La transferibilidad del modelo a otros sectores intensivos en capital es factible, siempre que se adapten los criterios al contexto operativo y se preserve la participación de expertos en el proceso.

El modelo de priorización propuesto contribuye específicamente a la meta 7.b de los ODS, orientada a ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles. Al articular criterios técnicos con criterios económicos, que evalúan rentabilidad y sostenibilidad financiera del ciclo de vida, el modelo asegura que las inversiones respondan simultáneamente a la expansión de capacidad instalada y a la modernización tecnológica del sistema. De manera complementaria, la incorporación transversal de criterios ambientales, sociales y de gobernanza aporta a la meta 9.1, infraestructura fiable, sostenible, resiliente y de calidad, al favorecer la planificación preventiva de conflictos territoriales, el cumplimiento normativo ambiental y la coherencia con el marco de gobernanza corporativa del Grupo EPM en las decisiones de inversión del sector eléctrico colombiano. Como líneas de trabajo futuro, se plantea incorporar el tratamiento explícito de la incertidumbre en las valoraciones, realizar análisis comparativos con otros métodos MCDM y evaluar el desempeño real de los proyectos priorizados, retroalimentando el modelo con evidencia empírica. En síntesis, este trabajo demuestra que la priorización de proyectos, cuando se sustenta en criterios multidimensionales validados y por medio de metodologías participativas, optimiza la asignación de recursos, y actúa como motor de transformación organizacional y de fortalecimiento de la sostenibilidad empresarial y social simultáneamente.

## Declaración de conflicto de intereses y autoría

Los autores declaran que el presente trabajo es una obra inédita y original, que han seguido las normas éticas en la realización de esta investigación y han evaluado cuidadosamente cualquier conflicto de intereses potencial que pudiera influir en la integridad y validez de los resultados presentados en esta publicación. De igual forma, garantizan la integridad de los datos, exactitud en los análisis y veracidad en las fuentes citadas.

Asimismo, declaran no haber recibido ningún apoyo financiero que pueda haber influido en el diseño del estudio, la recopilación de datos, el análisis de resultados, ni en la redacción.

Todos los autores de esta obra contribuyeron significativamente a la investigación y redacción del manuscrito y cumplen con los criterios de autoría. No existen conflictos de autoría o disputas en relación con la realización de este artículo. La contribución de los autores se resume en la declaración a continuación:

## Declaración de contribución de autoría (CRedit)

**Juan David Sánchez-Arredondo:** redacción: revisión y edición, redacción del borrador original, visualización, supervisión, administración del proyecto, metodología, análisis formal y curación de datos.

**Jaime Andrés Vieira-Salazar:** redacción: revisión y edición, redacción del borrador original, visualización, supervisión, administración del proyecto, metodología, análisis formal y curación de datos.

# Referencias

- Asadabadi, M. R., Chang, E., & Saberi, M. (2019). Are MCDM methods useful? A critical review of Analytic Hierarchy Process (AHP) and Analytic Network Process (ANP). *Cogent Engineering*, 6(1), 1623153. <https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1623153>
- Badhon, B., Chakraborty, R. K., Anavatti, S. G., & Vanhoucke, M. (2025). IRAF-BRB: An explainable ai framework for enhanced interpretability in project risk assessment. *Expert Systems with Applications*, 285, 127979. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.127979>
- Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple criteria decision analysis: An integrated approach*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4>
- Blohm, M., & Dettner, F. (2023). Green hydrogen production: Integrating environmental and social criteria to ensure sustainability. *Smart Energy*, 11, 100112. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2023.100112>
- Brans, J. P., Vincke, P., & Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research*, 24(2), 228-238. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90044-5)
- Büyükoçkan, G., & Güleriyüz, S. (2016). An integrated DEMATEL-ANP approach for renewable energy resources selection in Turkey. *International Journal of Production Economics*, 182, 435-448. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.09.015>
- Central Hidroeléctrica de Caldas S.A. E.S.P. (CHEC). (2021). *Informe de gestión ambiental y social 2021*.
- Central Hidroeléctrica de Caldas S.A. E.S.P. (CHEC). (2024). *Plan de Empresa CHEC 2024*.
- Central Hidroeléctrica de Caldas S.A. E.S.P. (CHEC). (2025, 11 de marzo). *Informe de sostenibilidad CHEC 2024 (Unificado)*.
- Ćirović, G., & Pamučar, D. (2022). *Multiple-criteria decision making*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-2816-8>
- Danesh, D., Ryan, M. J., & Abbasi, A. (2018). Multi-criteria decision-making methods for project portfolio management: A literature review. *International Journal of Management and Decision Making*, 17(1), 75. <https://doi.org/10.1504/ijmdm.2018.088813>
- Ehrgott, M. (2005). *Multicriteria optimization*. Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-27659-9>
- Garfan, S., Alamoodi, A. H., Sulaiman, S., Albahri, O. S., Albahri, A. S., & Sharaf, I. M. (2025). Multicriteria decision-making framework for robust energy management AI solutions. *Sustainable Futures*, 10, 100822. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100822>

- Grupo EPM. (2023). *Informe de sostenibilidad 2023*. Grupo Empresas Públicas de Medellín. <https://www.grupo-epm.com/content/dam/Grupo-Epm/aguas-nacionales/nuestra-gestion/informes-de-sostenibilidad/informe-sostenibilidad-2023.pdf>
- Hendiani, S., Torkayesh, A. E., Venghaus, S., & Walther, G. (2025). Leading the green charge: A novel type-2 fuzzy VIKOR method applied to eco-conscious freight transport. *Expert Systems with Applications*, 285, 128082. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128082>
- Hosouli, S., & Hassani, R. A. (2024). Application of multi-criteria decision making (MCDM) model for solar plant location selection. *Results in Engineering*, 24(103162), 103162. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103162>
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
- Ika, L. A., & Donnelly, J. (2017). Erratum to “Success conditions for international development capacity building projects”. *International Journal of Project Management*, 35(8), 1022-1023. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2017.04.007>
- Jamwal, A., Palit, N., Kumari, S., Agrawal, R., & Sharma, M. (2025). A decision framework for smes to address sustainability issues with Industry 4.0 technologies. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-025-06560-5>
- Janmontree, J., Shinde, A., Zadek, H., Trojahn, S., & Ransikarbum, K. (2025). A strategic hydrogen supplier assessment using a hybrid MCDA framework with a game theory-driven criteria analysis. *Energies*, 18(13), 3508. <https://doi.org/10.3390/en18133508>
- Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1976). *Decisions with multiple objectives: Preferences and value trade-offs*. Wiley. <https://books.google.com/books?id=GPE6ZAqGrnoC>
- Khan, K., Szopik-Depczyńska, K., Dembińska, I., & Ioppolo, G. (2022). Most relevant sustainability criteria for urban infrastructure projects—AHP analysis for the Gulf States. *Sustainability*, 14(22), 14717. <https://doi.org/10.3390/su142214717>
- Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., & Bansal, R. C. (2017). 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>
- Mardani, A., Jusoh, A., Nor, K. M. D., Khalifah, Z., Zakwan, N., & Valipour, A. (2015). Multiple criteria decision-making techniques and their applications - A review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 28(1), 516-571. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2015.1075139>

- Mayor, J., Botero, S., & González-Ruiz, J. D. (2016). Modelo de decisión multicriterio difuso para la selección de contratistas en proyectos de infraestructura: caso Colombia. *Obras y Proyectos*, 20, 56-74. <https://doi.org/10.4067/s0718-28132016000200005>
- Mukhametzyanov, I. (2021). Specific character of objective methods for determining weights of criteria in MCDM problems: Entropy, CRITIC and SD. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 4(2), 76-105. <https://doi.org/10.31181/dmame210402076i>
- Munda, G. (2005). Multiple criteria decision analysis and sustainable development. En J. Figueira, S. Greco, & M. Ehrgott (Eds.), *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys* (pp. 953-986). Springer. [https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5\\_23](https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5_23)
- Naciones Unidas. (1992). *Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. <https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/riodeclaration.htm>
- Roy, B. (1991). The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. *Theory and Decision*, 31(1), 49-73. <https://doi.org/10.1007/BF00134132>
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill. [https://openlibrary.org/works/OL15145472W/The\\_analytic\\_hierarchy\\_process](https://openlibrary.org/works/OL15145472W/The_analytic_hierarchy_process)
- Şahin, M. (2020). A comparative analysis of multi-criteria decision-making methods in the selection of electricity generation technologies. *Energy*, 213, 118815. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118815>
- Seo, S., Kim, G., Park, J.-B., Kim, J., Park, Y.-B., & Chung, M. (2025). Leveraging data-driven machine learning techniques to enhance bearing capacity estimation in prebored and precast piles. *Expert Systems with Applications*, 285, 128070. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128070>
- Skiba, M., Mrówczyńska, M., Sztubecka, M., Maciejko, A., & Rzeszowska, N. (2023). The European Union's Energy Policy Efforts Regarding Emission Reduction in Cities—A Method Proposal. *Energies*, 16, 6123. <https://doi.org/10.3390/en16176123>
- Ugwu, O. O., Kumaraswamy, M. M., Wong, A., & Ng, S. T. (2006). Sustainability appraisal in infrastructure projects (SUSAIP) Part 1: Development of indicators and computational methods. *Automation in Construction*, 15(2), 239-251. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2005.05.006>
- United Nations. (1992). *Rio Declaration on Environment and Development*. United Nations Conference on Environment and Development. [https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A\\_CONF.151\\_26\\_Vol.I\\_Declaration.pdf](https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_CONF.151_26_Vol.I_Declaration.pdf)
- Wang, C.-N., Chung, Y.-C., Wibowo, F. D., Dang, T.-T., & Nguyen, N.-A.-T. (2025). The planning of best site selection for wind energy in Indonesia: A synergistic approach using

data envelopment analysis and fuzzy multi-criteria decision-making. *Energies*, 18, 4176. <https://doi.org/10.3390/en18154176>

Yin, R. K. (1994). *Case study research: Design and methods* (2.<sup>a</sup> ed.). Sage. <https://books.google.com/books?id=AvYOAQAAMAAJ>

Zhang, X., & Sadiq, K. (2026). Evaluating economic, geographic, and strategic drivers of China's renewable energy investments: Insights from BRI and institutional perspectives. *Renewable Energy*, 256, 123848. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123848>