

DOI: 10.35319/acta-nova.20239

ACTA NOVA

Revista de Ciencias y Tecnología

Universidad Católica Boliviana "San Pablo" sede Cochabamba, Calle M. Márquez esquina Parque Jorge Trigo Andía. Cochabamba, Bolivia.

Correspondencia:
Estela Herbas Baeny
eherbas@ucb.edu.bo

Análisis multicriterio para la evaluación integrada de impactos sociales y ambientales en proyectos hidroeléctricos en Bolivia: bases conceptuales y metodológicas

Multicriteria Analysis for Comprehensive Assessment of Social and Environmental Impacts in Hydropower Projects in Bolivia: Conceptual and Methodological Foundations

Estela Herbas Baeny, Camila del Rosario Linera Canedo

Resumen: Este artículo establece las bases teóricas y metodológicas para un modelo de Análisis Multicriterio (AMC) en la Evaluación Integrada de Impactos Sociales y Ambientales (EISA) en proyectos hidroeléctricos en Bolivia. Frente a la complejidad de los impactos ambientales, se destaca el AMC como un enfoque integrado, considerando criterios sociales, económicos y ambientales sin reducirlos a una sola métrica. La falta de una metodología estandarizada para evaluar proyectos hidroeléctricos en Bolivia se aborda mediante la revisión de la literatura y la consulta a expertos, identificando modelos como AHP, PROMETEE, ELECTRE y TOPSIS. Se destacan criterios clave como la biodiversidad, uso del suelo, ruido, reducción de gases de efecto invernadero, área de influencia, consulta previa y pueblos indígenas. La metodología se basa en la revisión bibliográfica, entrevistas a expertos y talleres colaborativos. El enfoque AMC proporciona una herramienta adaptable y estructurada para evaluar proyectos hidroeléctricos, considerando su viabilidad económica, impacto ambiental y aceptación social.

Palabras clave: Análisis multicriterio (AMC), Análisis de Decisiones Multicriterio (MCDM), métodos de evaluación integrada, criterios de evaluación, hidroeléctricas

1 Introducción

La energía hidroeléctrica se destaca como una de las principales fuentes de energía renovable, contribuyendo significativamente, representando aproximadamente el 16%, a la producción global de electricidad (IEA, 2019). A pesar de su carácter renovable, la generación de energía hidroeléctrica no está exenta de causar alteraciones significativas en los ecosistemas acuáticos. Estas alteraciones involucran cambios en la morfología de los ríos y en los caudales de agua, lo que a su vez desencadena una serie de impactos tanto físicos como morfológicos, afectando también la biodiversidad de la biota acuática (Poff et al., 2007; Arthington et al., 2010).

Abstract: This article establishes the theoretical and methodological foundations for a Multicriteria Analysis (MCA) model in the Integrated Assessment of Social and Environmental Impacts (EISA) in hydroelectric projects in Bolivia. Confronting the intricacies of environmental impacts, MCA emerges as a holistic approach, incorporating social, economic, and environmental criteria without reducing them to a singular metric. Addressing the absence of a standardized methodology for evaluating hydroelectric projects in Bolivia, the study conducts a thorough literature review and expert consultations, identifying models such as AHP, PROMETEE, ELECTRE, and TOPSIS. Key criteria, including biodiversity, land use, noise, greenhouse gas reduction, area of influence, prior consultation, and indigenous peoples, are emphasized. The methodology is grounded in a bibliographic review, expert interviews, and collaborative workshops. The MCA approach furnishes an adaptable and structured tool for appraising hydropower projects, encompassing considerations of economic viability, environmental impact, and social acceptance.

Key words: Multicriteria analysis (MCA), Using Multi-Criteria Decision-Making Method (MCDM), integrated evaluation methods, evaluation criteria, hydroelectric.

Es importante señalar que estos impactos negativos no se limitan a los grandes proyectos hidroeléctricos, ya que las pequeñas centrales hidroeléctricas también pueden generar efectos acumulativos que afectan múltiples tramos de río (Vassoney et al., 2019; Zarghami y Szidarovszky, 2011b). A lo largo de los años, se han empleado diversas metodologías para evaluar los impactos de los proyectos hidroeléctricos. No obstante, la mayoría de estas metodologías buscaban una unificación de los criterios de evaluación en una única unidad de medición, lo que resultaba en una simplificación excesiva que no reflejaba de manera integrada los diversos aspectos sociales, ambientales y ecológicos involucrados (Harder et al., 2015).

En respuesta a esta complejidad, ha surgido una nueva metodología que ha cobrado relevancia: el Análisis de Decisiones Multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés) (Zarghami y Szidarovszky, 2011b). El MCDM es un enfoque que permite considerar múltiples criterios y objetivos en la toma de decisiones, sin reducirlos a una única métrica, y se adapta especialmente bien a situaciones en las que se deben sopesar aspectos sociales, económicos y ambientales de manera equitativa (Roy, 1996).

A pesar de la proliferación de investigaciones y aplicaciones del análisis multicriterio en el ámbito de la evaluación de impacto ambiental (EIA), no se ha logrado formalizar una metodología fácilmente aplicable a proyectos medioambientales en lugares contaminados y alterados, donde la evaluación de riesgos y la participación de las partes interesadas son de vital importancia (Bana e Costa et al., 2008).

Hasta el momento, no se ha desarrollado una metodología estandarizada que permita llevar a cabo de forma continua la evaluación integrada de impactos ambientales en proyectos hidroeléctricos, especialmente teniendo en cuenta las particularidades de las regiones biogeográficas de Bolivia. El contexto de estas regiones es crucial para dicha evaluación, ya que posibilita la consideración de la diversidad de ecosistemas, la preservación de especies endémicas, la vulnerabilidad ambiental y la interconexión de los ecosistemas. Estos aspectos son fundamentales para asegurar la sostenibilidad y conservación del entorno natural en la ejecución de estos proyectos.

El objetivo de este trabajo es sentar las bases teóricas y metodológicas para desarrollar un modelo de evaluación multicriterio para la Evaluación Integrada de Impactos Sociales y Ambientales (EISA) en proyectos hidroeléctricos en Bolivia para una aplicación extendida en Bolivia. Con base en ese propósito, este artículo presenta una revisión de la literatura disponible sobre la aplicación de los diversos análisis multicriterio (AMC) en proyectos hidroeléctricos. A partir de esta revisión, se busca determinar: (i) la integridad de los AMC; (ii) la aplicación de modelos multicriterio en diversos proyectos hidroeléctricos; (iii) los criterios e indicadores socioambientales más relevantes para la construcción de un sistema de evaluación integrada socioambiental para este tipo de proyectos, con la finalidad de contribuir a la conservación de la diversidad biológica e integridad ecológica en Bolivia.

2 Planteamiento del problema

La generación de energía hidroeléctrica (HP) representa una fuente vital de energía renovable, contribuyendo aproximadamente con el 16% a la producción global de electricidad (IEA, 2019). Sin embargo, esta fuente de energía no está exenta de desencadenar impactos

ambientales significativos, que incluyen cambios en la morfología de los ríos, alteraciones en los caudales de agua y consecuentes impactos físicos, morfológicos, así como la afectación de la biodiversidad acuática (Poff et al., 2007; Arthington et al., 2010).

A lo largo del tiempo, se han empleado diversas metodologías para evaluar los impactos de los proyectos hidroeléctricos. No obstante, muchas de estas metodologías buscaban simplificar la diversidad de criterios de evaluación en una única unidad monetaria, lo que resultaba en una simplificación excesiva que no reflejaba de manera integrada los diversos aspectos sociales, ambientales y ecológicos involucrados (Harder et al., 2015).

Como respuesta a esta complejidad, ha surgido el Análisis Multicriterio (AMC), un enfoque que permite considerar múltiples criterios y objetivos en la toma de decisiones sin reducirlos a una sola métrica (Roy, 1996). A pesar de la creciente aplicación del análisis multicriterio en la evaluación de impacto ambiental, no se ha logrado desarrollar una metodología que sea fácilmente aplicable a proyectos medioambientales en lugares contaminados y alterados, donde la evaluación de riesgos y la participación de las partes interesadas son fundamentales (Bana e Costa et al., 2008). Además, no se ha establecido un método específico y estandarizado para evaluar la explotación de energía en instalaciones hidroeléctricas (Vassoney et al., 2017). La falta de una metodología sólida y estandarizada representa un desafío importante en la Evaluación Integrada de Impactos Ambientales en Proyectos Hidroeléctricos en Bolivia, donde la conservación de la biodiversidad, la adaptación al cambio climático, la erradicación de la pobreza, la participación ciudadana y la sostenibilidad económica, social y ambiental son consideraciones cruciales en el desarrollo de proyectos hidroeléctricos en el país.

3 Sustento teórico

3.1 Evaluación Ambiental y Técnicas Aplicadas

La evaluación ambiental, fundamental para el desarrollo sostenible, emplea diversas técnicas que permiten evaluar los costos, beneficios y posibles impactos ambientales de proyectos (Gazzola, 2011; Hammond y Winnett, 2006). Estas técnicas, basadas en una amplia revisión bibliográfica (Munier N., 2004; Teshome et al., 2014; Zarghami y Szidarovszky, 2011), incluyen métodos como la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), Análisis Costo-Beneficio (ACB), Análisis de Entrada-Salida, Sistemas de Información Geográfica (SIG), Análisis de Procesos Jerárquicos, Evaluación de Riesgos y Análisis Multicriterio. A continuación, se presenta una síntesis de sus características y ventajas/desventajas

Tabla 1. Comparación de técnicas de evaluación ambiental

Técnica	Características principales	Ventajas	Desventajas
Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)	Ofrece la estructura y datos fundamentales para todas las demás técnicas, permitiendo así la evaluación de los impactos ambientales de una actividad	Proporciona una relación sistemática de los impactos ambientales relevantes	No proporciona información sobre efectos acumulativos
Análisis Costo-Beneficio (ACB)	Estima las consecuencias sociales de un proyecto al evaluar tanto la disposición a pagar por sus beneficios como la disposición a aceptar una compensación	Es fácil de utilizar y calcular, ya que compara las ganancias resultantes de reducir el daño medioambiental con el costo total necesario para llevar a cabo dicha reducción	No todos los criterios del sistema se pueden expresar en unidades monetarias
Análisis Costo-Efectividad (ACE)	Utilizado cuando el objetivo no puede ser valorado directamente, pero puede ser claramente definido, este enfoque busca alcanzar dicho objetivo al menor costo posible	Facilita la combinación del desarrollo económico con los objetivos de desarrollo ambiental	No considera efectos secundarios
Análisis del Ciclo de Vida (ACV)	Cuantifica las entradas de un proyecto dentro la cadena de suministro durante toda su vida	Es útil para identificar los componentes y acciones involucrados en un proyecto, y sus resultados no dependen del costo del proyecto	Requiere una gran cantidad de datos y detalles sobre la cadena de suministro, pero no aborda problemas sociales como la pérdida de servicios y puede ser difícil de delimitar
Análisis de Entrada-Salida	Para un proyecto dado, identifica los insumos acumulativos necesarios o la contaminación acumulativa que genera. Esto resulta útil para evaluar y proporcionar información sobre los impactos acumulativo	Toma en cuenta la economía a nivel país lo que implica tomar en cuenta los impactos directos e indirectos producidos por el proyecto	Necesita amplios conjuntos de datos y no admite desglose, lo que puede derivar en resultados inexactos, además, presupone una relación lineal en la cadena de suministro
Sistemas de Información Geográficos (SIG)	Proporciona información espacial de distintos problemas, lo que permite sobreponer los efectos e impactos	Muy útil para indicar las relaciones y los efectos interrelacionales	Representa una opción costosa que, para evaluar los efectos temporales, demanda procedimientos complejos
Análisis de procesos jerárquicos	Ayuda a la toma de decisiones proporcionando un valor a cada criterio y alternativa	Ofrece una sólida variedad de opciones para quienes toman decisiones y es de comprensión sencilla.	La base matemática carece de confiabilidad. Además, no es adecuado para abordar un gran número de alternativas

Programación matemática	Facilita la toma de decisiones al elegir alternativas y asignar valores no subjetivos a los criterios. Ofrece una selección óptima de opciones considerando diversos criterios y objetivos.	Permite la automatización de la categorización de criterios. Complementa eficazmente otros métodos de análisis. Es adecuado para manejar un amplio conjunto de alternativas.	La utilización de una matriz algebraica dificulta su comprensión. No hay un software específico para la evaluación de impactos ambientales
Evaluación de riesgos	Estima probabilidades y grados de vulnerabilidad para el ser humano y el ambiente	Establece relaciones causa-efecto	La determinación de los valores de riesgo es compleja y su replicación en campo puede variar. Además, se requiere el conocimiento de la desviación estándar del valor promedio.
Análisis Multicriterio	Permite tomar decisiones a partir de problemas complejos con múltiples criterios que incluyen aspectos cualitativos y/o cuantitativos	Afronta limitaciones de recursos, combina múltiples criterios, evita costos de oportunidad debido a demoras en la toma de decisiones, resuelve conflictos entre partes interesadas y facilita la gestión de proyectos.	No se puede comparar entre objetivos, está sujeto a subjetividad y resulta complicado de integrar en una dimensión de tiempo.

En resumen, el análisis de entrada-salida y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas clave para evaluar proyectos, cada una con sus ventajas y limitaciones. Mientras que el análisis de entrada-salida permite determinar insumos acumulativos y la contaminación producida, su principal limitación radica en la incapacidad para desagregar información, lo que puede llevar a resultados inexactos. Por otro lado, los SIG ofrecen información espacial valiosa para identificar relaciones complejas, aunque su implementación puede resultar costosa y la consideración de efectos temporales depende de la calidad de los datos. El análisis de procesos jerárquicos facilita la toma de decisiones al asignar valores a criterios y alternativas, pero su base matemática no es infalible y puede resultar complicada para quienes no son expertos en matemáticas. La evaluación de riesgos establece relaciones causa-efecto, sin embargo, determinar valores de riesgo es complejo y su replicación en campo puede variar. Por último, el análisis multicriterio permite abordar problemas complejos, pero su subjetividad y la dificultad para incorporarlo en una dimensión temporal son desafíos a tener en cuenta.

3.2 Análisis Multicriterio (AMC)

El análisis multicriterio, una herramienta de toma de decisiones, resuelve problemas complejos que involucran aspectos cualitativos y/o cuantitativos, mediante la clasificación o puntuación de alternativas según múltiples criterios (S. Hajkowicz, 2007; S. A. Hajkowicz et al., 2000; Teshome et al., 2014). Este enfoque permite que cada

tomador de decisiones introduzca sus propios criterios o participe en la calificación de estos, facilitando la generación de conclusiones conjuntas (Mendoza et al., 1999). Además, el análisis multicriterio destaca por su capacidad para abordar la multiplicidad y heterogeneidad de objetivos, así como por la participación de múltiples tomadores de decisiones, lo que enriquece el proceso de evaluación (Seo y Sakawa, 2012).

Por otro lado, el AMC se basa en la evaluación de criterios para analizar diversas alternativas. Los criterios abarcan aspectos como el medio ambiente, lo social, lo económico y lo técnico, mientras que las alternativas representan distintas opciones, como ubicaciones o enfoques de diseño. Una matriz de evaluación es esencial para relacionar alternativas y criterios, asignando valores que indican la contribución de cada alternativa a cada criterio, con valores cualitativos o cuantitativos que pueden provenir de expertos o datos recolectados.

Otro factor significativo al momento de utilizar esta técnica para la evaluación ambiental son los componentes de este, ya que, dependiendo de su origen, se definirá el tipo de análisis multicriterio más adecuado para el estudio. Los componentes de este análisis son principalmente tres: (1) Tomador de decisión, (2) Alternativas y (3) Criterio. La clasificación de cualquier problema de Análisis de Decisiones Multicriterio depende de las características de cada uno de estos elementos (Zarghami y Szidarovszky, 2011b).

Para determinar la importancia relativa de los criterios, se asignan ponderaciones que reflejan las preferencias de los tomadores de decisiones, variando según el contexto. Los métodos de agregación combinan valores de criterios y ponderaciones, basados en criterios técnicos de expertos o información de campo, para obtener una puntuación global. La sensibilidad y robustez son fundamentales en el Análisis Multicriterio (AMC) para evaluar cómo cambios en ponderaciones o valores de criterios afectan los resultados. Esto facilita la toma de decisiones a pesar de posibles conflictos entre partes interesadas y criterios.

3.3 Clasificación de los métodos más utilizados en el análisis multicriterio

Debido a la rapidez con la que se desarrollan los métodos de análisis multicriterio en los últimos años, existen distintas clasificaciones. A lo largo del tiempo, distintos científicos intentaron organizarlas, tal es el ejemplo de Belton y Stewart, (2002); Linkov y Moberg, (2012); Zarghami y Szidarovszky, (2011b); Munier, (2004). Así mismo, Dean y Hickman, (2018), desarrollaron una clasificación sencilla, tomando en cuenta los métodos más utilizados en el análisis multicriterio.

La clasificación propuesta, trata de agrupar los métodos en 2 categorías: (1) Métodos formales y (2) Métodos simplificados.

Dentro de los métodos formales están los métodos continuos y métodos discretos. Los métodos continuos se caracterizan por el manejo de variables continuas y una cantidad finita de alternativas, siendo apropiados para problemas técnicos de diseño y optimización, usualmente abordados por expertos en matemáticas. Este enfoque incluye modelos como la programación lineal y la programación por objetivos (Dean, 2020; S. Hajkowicz y Collins, 2007). Por otro lado, los métodos discretos se aplican cuando el espacio de decisión es finito y su construcción es factible debido a una cantidad limitada y definida de alternativas, siendo relevantes en problemas de planificación política. Dentro de esta categoría, se distinguen dos corrientes principales: métodos de agregación completa y métodos de agregación parcial (Dean, 2020; Zarghami y Szidarovszky, 2011b).

Los métodos de agregación completa, como la Teoría de la Utilidad Multiatributo (MAUT), la Técnica Simple de Clasificación Multiatributo (SMART), la Técnica Simple de Clasificación Multiatributo que Explora Rangos (SMARTER), el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y el método Mejor-Peor, buscan sintetizar la valoración de alternativas en una puntuación única y global. Por otro lado, los métodos de agregación parcial, como el Método de Organización de la Clasificación de Preferencias para la Evaluación del Enriquecimiento (PROMETHEE),

Eliminación y Elección que Traduce la Realidad (ELECTRE), Regime y EVAMIX, cuestionan la existencia de un sistema de preferencias completo y rechazan la agregación completa de las puntuaciones individuales debido a la heterogeneidad de objetivos y criterios, proporcionando una relación jerárquica en lugar de un valor global para cada opción (Dean, 2020; Munier, 2004).

La categoría de métodos simplificados en el análisis multicriterio se centra en facilitar el proceso, siendo ampliamente populares por su practicidad. Estos métodos se destacan por su capacidad de ejecución sin requerir un tiempo, recursos o conocimientos extensos para resolver sistemas de ecuaciones complejas, evaluar funciones de utilidad o llevar a cabo comparaciones prolongadas. Entre los métodos incluidos en esta clasificación se encuentran las tablas, checklists, resúmenes y el enfoque lexicográfico básico, entre otros (Dean, 2020).

3.4 Evaluación de Impactos Ambientales en Proyectos Hidroeléctricos

Los proyectos hidroeléctricos tienen un impacto significativo en el medio ambiente y las comunidades circundantes. La evaluación de impactos ambientales en proyectos hidroeléctricos es fundamental para mitigar los efectos negativos y garantizar que se tomen decisiones informadas, así tradicionalmente son cuatro los aspectos principales a evaluar. Los Impactos Ecológicos que afectan la biodiversidad y los ecosistemas acuáticos y terrestres, mientras que los Impactos Sociales que involucran la reubicación de comunidades locales y cambios en la calidad de vida, de igual manera los Impactos Hidrológicos que alteran los patrones de flujo de agua, afectando el acceso al agua para riego y otros fines. Por último, los Impactos Económicos consideran costos y beneficios, como la generación de energía y la inversión en empleo y turismo.

3.5 Desafíos Específicos de la evaluación ambiental en Proyectos Hidroeléctricos

La evaluación de impactos ambientales en proyectos hidroeléctricos enfrenta desafíos únicos debido a la complejidad inherente. La construcción de presas y embalses puede alterar significativamente los ecosistemas acuáticos y las comunidades circundantes, planteando desafíos éticos y logísticos en la reubicación de comunidades afectadas. Además, garantizar la sostenibilidad hídrica es crucial, especialmente en áreas donde el agua es escasa, donde encontrar un equilibrio entre la generación de energía, la preservación de ecosistemas y el suministro de agua para otros usos es un verdadero desafío. Por tanto, cumplir con normativas

locales debería ser imprescindible para obtener la aprobación de los organismos reguladores.

Por consiguiente, para la evaluación de impactos ambientales en proyectos hidroeléctricos, es necesario adoptar un enfoque integrado que no solo considere una variedad de criterios, sino que también utilice herramientas de análisis multicriterio para abordar la complejidad de los desafíos. El objetivo es lograr un equilibrio adecuado entre la generación de energía y la protección del medio ambiente y las comunidades afectadas. Este enfoque es fundamental para promover un desarrollo hidroeléctrico sostenible y responsable.

4 Metodología

4.1 Diseño

Este estudio se basó en una metodología de revisión y análisis de la literatura científica y técnica, seguida de un proceso de adaptación y validación a través de entrevistas a expertos en evaluación ambiental de proyectos hidroeléctricos y tres talleres con especialistas en el campo. El diseño de la investigación se centró en el análisis y síntesis de enfoques de evaluación ambiental y la posterior adaptación de un modelo multicriterio para la Evaluación Integrada de Impactos Ambientales (EIA) en proyectos hidroeléctricos en Bolivia.

4.2 Población:

La población de estudio para la revisión de la literatura se compuso de 45 artículos científicos relacionados con la evaluación ambiental en proyectos hidroeléctricos, publicados desde el año 2015-2021 y más de 25 libros especializados en la temática, los mismos fueron revisados e investigados en diferentes bases de datos y en revistas de alto rango como Google escolar, Perish, Scopus, ProQuest, Science direct con el fin de obtener la mejor comprensión del método AMC. Estas fuentes bibliográficas proporcionaron una amplia base de conocimiento sobre los métodos y enfoques de evaluación ambiental utilizados a nivel global.

La adaptación y validación de un modelo multicriterio para la EIA integrada se realizó en un entorno colaborativo con expertos en evaluación ambiental y proyectos hidroeléctricos, incluyendo entrevistas a 16 especialistas en el campo. Estas entrevistas permitieron recopilar retroalimentación experta y ajustar el modelo de acuerdo con las necesidades y desafíos específicos de Bolivia.

4.3 Entorno

La revisión de la literatura y la caracterización de los principales métodos de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) se llevaron a cabo en un entorno de investigación y

documentación, utilizando bases de datos científicos, bibliotecas académicas y recursos en línea especializados en el tema. La adaptación y validación del modelo multicriterio se realizó en un entorno colaborativo y participativo, con especialistas que aportaron su experiencia y conocimiento.

4.4 Intervenciones

Revisión de la literatura: Se recopiló y analizó un extenso conjunto de publicaciones científicas y libros especializados relacionados con la evaluación ambiental en proyectos hidroeléctricos. Estos documentos proporcionaron información relevante sobre los métodos existentes y los enfoques utilizados en todo el mundo.

4.5 Caracterización de métodos de EIA

Se llevó a cabo una caracterización detallada de los principales métodos de Evaluación de Impacto Ambiental, con un enfoque en la identificación de indicadores sinérgicos utilizados en proyectos hidroeléctricos. Se evaluó la aplicabilidad técnica de estos métodos en el contexto boliviano, considerando las particularidades geográficas y ambientales del país.

4.6 Determinación de criterios e indicadores más relevantes para la construcción de un sistema de evaluación integrada socioambiental para proyectos hidroeléctricos

Para establecer los criterios socioambientales más relevantes para la evaluación integrada de proyectos hidroeléctricos se partió de un enfoque sistemático con dos procesos consecutivos

Primero se identificaron los índices más recurrentes en la evaluación integrada de proyectos hidroeléctricos mediante el análisis multicriterio (AMC) a partir de la selección de 11 estudios publicados internacionalmente en un periodo de 13 años (2009-2022) relacionados con la temática (Tabla 2). Posteriormente estos indicadores fueron clasificados siguiendo cinco criterios: ambiental, social, técnico, económico y político. Posteriormente, se evaluó la recurrencia de estos indicadores en los estudios revisados, asignando valores de frecuencia: "1" para baja frecuencia (menos del 30% de los estudios), "2" para frecuencia media (menos del 60% de los estudios) y "3" para alta frecuencia (más del 60% de los estudios), entendiendo la recurrencia como la frecuencia de uso de cada indicador en relación con los 11 estudios analizados.

Se complementó el modelo teórico propuesto a partir de la sistematización de los resultados de entrevistas a 16 especialistas en diferentes ámbitos de la evaluación ambiental en proyectos hidroeléctricos, y el desarrollo de

dos talleres con especialistas. Estas interacciones permitieron recopilar retroalimentación experta y ajustar el conjunto de indicadores socioambientales que pueden aplicarse a las necesidades y desafíos específicos de Bolivia.

5 Resultados y discusión

5.1 Condiciones y requerimientos de análisis multicriterio (AMC)

A partir de una exhaustiva revisión y análisis de la literatura científica y técnica disponible, se identificaron las condiciones óptimas que hacen a la aplicación del AMC.

5.2 Capacidad de integración en el análisis multicriterio

El análisis multicriterio permite abordar problemas con múltiples alternativas y criterios (Jankowski et al., 2001). Este enfoque considera los criterios de varios tomadores de decisiones y puede trabajar con diversos aspectos sociales, económicos y ambientales, tanto cualitativos como cuantitativos. Al minimizar discusiones y conflictos, desempeña un papel clave en la resolución de problemas complejos (Temel, 2015). Por su capacidad de agregar estructura, auditabilidad, transparencia y rigor al proceso decisional, los análisis multicriterio promueven la integridad del análisis (Šantl y Steinman, 2015).

Entre las ventajas de este método se encuentran: (1) La capacidad de ser abierto y explícito, lo que permite un mejor análisis de resultados; (2) Puede ser modificado por los tomadores de decisiones, ya sea a nivel de los objetivos o bien los criterios a analizar; (3) Los cálculos que se realizan en esta metodología están sujetos a cambios, en el caso de que el proyecto lo requiera, (4) El procedimiento es sencillo y está debidamente definidos, por lo que su aplicación por distintos tipos de tomadores de decisión no afectará el resultado final, lo que minimiza la subjetividad del mismo (Temel, 2015).

Si bien muchos autores indican que los análisis multicriterio favorecen la integralidad de los análisis, otros como Vassoney et al., (2017) y Šantl y Steinman, (2015), consideran que aún es necesaria una metodología específica para la evaluación integrada de impactos ambientales en proyectos hidroeléctricos. La razón de esto es debido a que, al no existir una metodología estandarizada para los proyectos, los resultados dependiendo el tipo de modelo multicriterio que se utilicen pueden llegar a ser variables. Así mismo, consideran que es necesario analizar la aplicabilidad de los análisis multicriterio a gran escala, para apoyar la idoneidad de los proyectos hidroeléctricos.

5.2.1 Aplicación de análisis multicriterio en proyectos hidroeléctricos

En la literatura existe una gran cantidad de estudios que aplican el análisis multicriterio en proyectos hidroeléctricos. Dentro de estos estudios se pudo evidenciar que existen distintos procedimientos que suelen utilizarse para este tipo de proyectos. De la misma manera, otros estudios aplican no solo un método multicriterio sino varios. A continuación, presentamos algunos de los estudios que se llevaron a cabo utilizando este tipo de análisis.

Algunos autores como Akash et al., (1999); Al Garni et al., (2016); Fuentes-Bargues y Ferrer-Gisbert, (2015); Kumar y Katoch, (2015); Singh y Nachtnebel, (2016); Supriyasilp et al., (2009) aplicaron el modelo del Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Entre las principales funciones que se desarrollaron con ayuda de este modelo fue la determinación de la mejor alternativa para la instalación de un proyecto hidroeléctrico en países como Nepal y España. Así mismo, ayudo a comparar la producción de energía en distintas plantas hidroeléctricas. El modelo AHP, es el método más popular al momento de aplicar un análisis multicriterio. Suele ser seleccionado por los tomadores de decisión debido a su facilidad de uso y comprensión (Supriyasilp et al., 2009a).

Sin embargo, otros autores como Greening y Bernow, (2004); Løken, (2007), consideran que, la cantidad de tiempo que requiere es bastante alto cuando se trata con grandes cantidades de alternativas o criterios. Así mismo, este método no trata el riesgo o la incertidumbre que pueda existir en el proyecto. Otro problema, es la capacidad de conversión de juicios verbales a numéricos, ya que tiende a sobreestimar las diferencias de preferencias cuando existe una gran cantidad de alternativas.

Diversos autores aplicaron otros métodos multicriterio como la Técnica para ordenar las Preferencias por Similitud con la Solución Ociosa TOPSIS (Wang et al., 2014), para evaluar la eficiencia de plantas hidroeléctricas ubicadas en cinco provincias canadienses. Así mismo, Chien et al., (2020) aplicó el método para determinar la ubicación óptima para una hidroeléctrica en Vietnam. De la misma manera, Opricović y Tzeng, (2008) aplicaron el método VIKOR para la elaboración de un proyecto hidroeléctrico en el río Drina en la antigua Yugoslavia, mientras que Vučijak et al., (2013), sugirió la aplicación de este método para el desarrollo de proyectos hidroeléctricos a los tomadores de decisión. Estudios como los realizados por Stevović et al., (2014) aplicaron el método de Eliminación y Elección que Traduce la Realidad (ELECTRE), para seleccionar el sistema más adecuado para una planta hidroeléctrica en Montenegro. Saracoglu,

(2015), aplicó la misma metodología para calificar cinco alternativas de inversión para una planta hidroeléctrica en Turquía. Finalmente, algunos otros estudios aplicaron el Método de Organización de la Clasificación de Preferencias para la Evaluación del Enriquecimiento, (PROMETHEE) para evaluar y clasificar seis proyectos hidroeléctricos en Nepal (Nachtnebel y Singh, 2016).

Debido a la diversidad de métodos aplicados a proyectos hidroeléctricos, no se puede determinar el método más adecuado. Es debido a esto que algunos autores proponen la combinación de varios métodos como una alternativa. Entre las ventajas de aplicar varios métodos multicriterio en un mismo proyecto está el hecho de poder aprovechar las ventajas de ambos métodos, o bien en paralelo para obtener una base de decisión más amplia para el tomador de decisión (Løken, 2007).

Estudios como los de Shaktawat y Vadhera, (2021), buscan clasificar la sustentabilidad de proyectos hidroeléctricos en India aplicando varios modelos multicriterio: AHP, TOPSIS, PROMETHEE y ELECTRE. Urošević y Marinović, (2021), decidieron aplicar los métodos PROMETHEE y AHP para clasificar la construcción de pequeñas plantas hidroeléctricas. En este caso, aplicaron el método PROMETHEE para clasificar los proyectos y el método AHP para determinar el peso de cada uno de los criterios. Finalmente, Majumder et al., (2020), buscaron seleccionar las características para el análisis de la fiabilidad del rendimiento en centrales hidroeléctricas aplicando tres métodos distintos: Proceso de Jerarquía Analítica Difusa (fuzzy AHP), Proceso de Red Analítica Difusa (fuzzy ANP) y el Modelo de Suma Ponderada Difusa (WSM).

5.2.2 Criterios relevantes del análisis multicriterio aplicado para proyectos hidroeléctricos

Al tratarse de estudios con contextos diferentes, los indicadores utilizados para la evaluación de impactos ambientales son distintos. En la Tabla 2, se puede apreciar los distintos estudios analizados y los criterios utilizados.

La diversidad de métodos y enfoques de análisis multicriterio aplicados en los estudios nos permite identificar que estos modelos, se utilizan ampliamente en problemas de uso y gestión de la energía hidroeléctrica. En concreto, los principales propósitos para los que se aplica el análisis multicriterio dentro de la muestra pueden referirse a las siguientes categorías:

Establecer un ranking de diferentes proyectos hidroeléctricos (Rosso et al., 2014; Urošević y Marinović, 2021).

Selección del mejor modelo hidroeléctrico (Cowan et al., 2010; Grilli et al., 2017; Supriyasilp et al., 2009a; Vassoney et al., 2020).

Aplicación de criterios de desarrollo sostenible en proyectos hidroeléctricos (Gomez et al., 2019; Grilli et al., 2017; Lenarczyk et al., 2022; Morimoto, 2013)

Evaluación de riesgos y viabilidad de proyectos hidroeléctricos (Alberti et al., s/f; F. Fernández et al., 2016)

Una vez analizados y clasificados, se procedió a evaluar los diversos criterios e indicadores que se aplicaban en los diversos estudios. El número de criterios fue muy variable, pero se pudo observar que existe una tendencia a aplicar los 5 criterios sugeridos por normas internacionales (ambiental, técnico, económico, social y político) (Pazmiño, 2019). Siendo los criterios más recurrentes fueron los tres criterios básicos de sustentabilidad (ambiental, económico y social).

Tabla 2. Proyectos hidroeléctricos y los respectivos criterios adoptados en su MCDM.

Publicación	Autor	Criterio				
		ambiental	técnico	económico	social	político
Ranking construction of small hydro power plants using multi-criteria decision analysis	(Urošević y Marinović, 2021)	<input checked="" type="checkbox"/>				
Determinación de las Ponderaciones de los Criterios de Sustentabilidad Hidroeléctrica Mediante la Combinación de los Métodos AHP y GP Extendido	(Gomez et al., 2019)	<input checked="" type="checkbox"/>				

Análisis multicriterio sobre la valoración de la energía eléctrica de Itaipu en el mercado eléctrico brasileño	(F. Fernández et al., 2016)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			
Un metodo multi criterio per la stima della portata di progetto di centrali idroelettriche ad acqua fluente	(Alberti et al., s/f)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Integrating multicriteria evaluation and stakeholders' analysis for assessing hydropower projects	(Rosso et al., 2014)	<input checked="" type="checkbox"/>				
The Application of a Multi-Criteria Decision-Making for Indication of Directions of the Development of Renewable Energy Sources in the Context of Energy Policy	(Lenarczyk et al., 2022)	<input checked="" type="checkbox"/>				
Hydropower development priority using MCDM method	(Supriyasilp et al., 2009b)	<input checked="" type="checkbox"/>				
A multi-criteria framework to assess the sustainability of renewable energy development in the Alps	(Grilli et al., 2017)	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Multicriteria Analysis for the Assessment of Flow Release Scenarios from a Hydropower Plant in the Alpine Region	(Vassoney et al., 2020)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Exploring the impact of technology development and adoption for sustainable hydroelectric power and storage technologies in the Pacific Northwest United States	(Cowan et al., 2010)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Incorporating socio-environmental considerations into project assessment models using multi-criteria analysis: A case study of Sri Lankan hydropower projects	(Morimoto, 2013)	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

5.3 Bases del modelo multicriterio para la evaluación integrada de impactos socio ambiental en proyectos hidroeléctricos

En el contexto de la evaluación integrada de impactos ambientales en proyectos hidroeléctricos, es fundamental establecer un modelo multicriterio sólido que permita considerar aspectos sociales, técnico - económicos y ambientales de manera equitativa. Este enfoque

integrado busca abordar la complejidad de los impactos ambientales generados por este tipo de proyectos, teniendo en cuenta la diversidad de factores involucrados.

Para construir un modelo multicriterio efectivo para la evaluación de impactos ambientales en proyectos hidroeléctricos, es esencial identificar criterios y subcriterios relevantes, como calidad y caudal del agua, patrón de flujo, sedimentación, integridad del hábitat y biodiversidad, entre otros. La validación de estos criterios

mediante la consulta a especialistas en evaluación ambiental es crucial. Métodos como AHP, PROMETEE, ELECTRE y/o TOPSIS pueden ser útiles para priorizar indicadores y establecer un marco de evaluación integrada.

El modelo multicriterio debe ser adaptable y estructurado, permitiendo evaluar equilibradamente la viabilidad económica, el impacto ambiental y la aceptación social. Su desarrollo se basa en la revisión bibliográfica, entrevistas a expertos y talleres colaborativos para garantizar la participación de diferentes actores involucrados en la evaluación.

Para llevar a cabo un análisis multicriterio efectivo en proyectos hidroeléctricos, se recomienda seguir un proceso estructurado en diez pasos. Esto incluye definir claramente los objetivos de la evaluación, identificar criterios relevantes, seleccionar métodos adecuados, ponderar los criterios, aplicar el modelo, realizar análisis de sensibilidad y validar los resultados con expertos. La interpretación de los resultados permite identificar impactos significativos y posibles medidas de mitigación, facilitando una toma de decisiones informada y equilibrada. (Figura 1)

Paso 1 Definición de Objetivos	Identificar claramente los objetivos de la evaluación ambiental integral en el proyecto hidroeléctrico, considerando aspectos ambientales, sociales y técnico/ económicos.
Paso 2 Identificación de Criterios Relevantes	Determinar los criterios y subcriterios que serán utilizados en la evaluación, teniendo en cuenta la literatura existente, la consulta a expertos y las particularidades del proyecto.
Paso 3 Recopilación de Datos	Recolectar la información necesaria para evaluar cada uno de los criterios identificados, incluyendo datos ambientales, sociales y económicos relevantes para el proyecto.
Paso 4 Normalización de Datos	Es importante normalizar los datos recopilados para que puedan ser comparables y utilizados de manera efectiva en el análisis multicriterio.
Paso 5 Selección de Métodos Multicriterio	Elegir el método o métodos de análisis multicriterio más adecuados para la evaluación integral en proyectos hidroeléctricos, como AHP, PROMETEE, ELECTRE y/o TOPSIS
Paso 6 Selección y ponderación de criterios	Seleccionar y asignar pesos a los diferentes criterios en función de su importancia relativa en la evaluación, considerando la retroalimentación de expertos y partes interesadas.
Paso 7 Aplicación del Modelo Multicriterio	Implementar el modelo multicriterio desarrollado para evaluar los impactos ambientales de manera integral, considerando la interacción entre los diferentes criterios.
Paso 8 Análisis de Sensibilidad Integral	Realizar análisis de sensibilidad integral para evaluar cómo varían los resultados ante cambios en los pesos asignados a los criterios o en los datos de entrada.
Paso 9 Validación del Modelo	Validar el modelo con expertos en evaluación ambiental y en proyectos hidroeléctricos para asegurar su robustez y relevancia en el contexto específico del proyecto.
Paso 10 Interpretación de Resultados	Interpretar los resultados del análisis multicriterio para identificar impactos ambientales significativos, áreas de mejora y posibles medidas de mitigación.

Figura 1. Pasos procedimentales propuestos para el desarrollo del Análisis de Decisiones Multicriterio (MCDM) en la evaluación ambiental integrada en proyectos hidroeléctricos.

Siguiendo estos pasos de manera sistemática y rigurosa, se puede construir un análisis multicriterio efectivo y útil para la evaluación ambiental integrada en proyectos hidroeléctricos, permitiendo una toma de decisiones informada y equilibrada. Sin embargo, la selección y ponderación de criterios para este tipo de proyectos en función de la diversidad biogeográfica boliviana puede ser el factor más sensible de esta propuesta. Por lo tanto, este tópico fue más desarrollado en esta investigación

5.4 Determinación de índices e indicadores prioritarios para la evaluación integrada de impactos socio ambiental

5.4.1 Índices recurrentes de evaluación de proyectos hidroeléctricos aplicados en AMC

Considerando la revisión de los mismo 11 proyectos internacionales publicados en un periodo de 13 años (desde 2009 hasta 2022) que aplicaron MCMD (Tabla 2), se identificaron los índices e indicadores que aplicaron en cada uno de los criterios analizados y su recurrencia en los mismos.

Por tanto, a partir de las publicaciones revisadas y desde un enfoque (criterio) AMBIENTAL, se identificaron 26 índices y/o indicadores aplicados en los proyectos estudiados (Tabla 3), siendo la calidad y caudal del agua, el patrón de flujo, la sedimentación y la integridad del hábitat los indicadores las frecuentemente usados. Destaca la presencia de 5 indicadores que tienen un alcance más integrado, por su demanda de análisis social y ambiental, estos son: pérdida de hábitat y utilización del suelo, servicios de aprovisionamiento de productos agrícolas y forestales, distancia media a asentamientos humanos, distancia media a zonas naturales protegidas y mitigación de impactos

Los indicadores relacionados a la biodiversidad incluyen aspectos especies invasoras, el impacto en la población animal, los valores estimados del índice de biodiversidad por año y la perturbación de la fauna local, no habiéndose observado en ninguno de los casos que incluyen especies endémica o en peligro de extinción, muy probablemente no eran proyectos desarrollados en América latina.

Por otro lado, una tercera parte de los indicadores observados están relacionados con el factor agua, natural en proyectos hidroeléctricos, que contiene la calidad del agua, el caudal (anual, medio y máximo) o cantidad de agua, el patrón de flujo y cantidad de flujo de agua o variación del régimen de flujo aguas abajo, el riesgo hidrológico y la sedimentación.

Los factores observados incluyen la calidad del aire y las emisiones, abordando la emisión de ruido y polvo (PM10), la tasa de emisión de carbono y gases de efecto invernadero (GEIs), así como la disminución de las emisiones de dióxido de carbono. Además, se consideran cuestiones relacionadas con el suelo, como la erosión y sedimentación, y se evalúan una amplia gama de aspectos relacionados con los ecosistemas y el paisaje, incluyendo áreas protegidas, calidad del hábitat, colapso de la ribera de un río, estética del paisaje, impacto ecológico, integridad del hábitat, nivel de protección del paisaje y variación del volumen del hábitat.

Por último, resaltan algunos indicadores que tiene un enfoque que depende de la relación social y ambiental por tanto integrados, estos son la pérdida de hábitat y utilización del suelo, servicios de aprovisionamiento de productos agrícolas y forestales, distancia media a asentamientos humanos, distancia media a zonas naturales protegidas y medidas de mitigación de impactos.

Tabla 3. Índices e indicadores aplicados en EEIA de proyectos internacionales desde el criterio AMBIENTAL en proyectos que han aplicado AMC.

Criterio ambiental				
Aspecto	Factor	No	Indicador / Índice	Recurrencia
Biofísico	Factor biodiversidad	1	Biodiversidad y especies invasoras	2
		2	Impacto o perturbaciones en la población animal	2
		3	Valores estimados del índice de biodiversidad por año	1
	Factor agua	4	Calidad de agua	3
		5	Caudal (anual, medio y máximo) o cantidad de agua	3
		6	Patrón de flujo y cantidad de flujo de agua o variación del régimen de flujo aguas abajo	3
		7	Riesgo hidrológico	1

	8	Sedimentación	3
Factor aire	9	Emisión de ruido y polvo (PM10) durante la construcción de la obra	1
	10	Tasa de emisión de carbono o gases de efecto invernadero (GEIs)	2
	11	Disminución de las emisiones de dióxido de carbono	2
Factor suelo	12	Erosión y sedimentación	1
Factor ecosistema / paisaje	13	Áreas protegidas	1
	14	Calidad del hábitat	2
	15	Colapso de la ribera de un río	1
	16	Estética del paisaje	1
	17	Impacto ecológico o impacto en el ecosistema	2
	18	Impacto en el paisaje	1
	19	Integridad del hábitat	3
	20	Nivel de protección del paisaje	1
	21	Variación del volumen del hábitat	1
Socio-ambiental (integrado)	22	Pérdida de hábitat y utilización del suelo	1
	23	Servicios de aprovisionamiento de productos agrícolas y forestales	2
	24	Distancia media a asentamientos humanos	2
	25	Distancia media a zonas naturales protegidas	2
	26	Mitigación de impactos	1

Con relación a los índices e indicadores destacados en los proyectos estudiados agrupados bajo el criterio SOCIAL, destacan los relacionados con la aceptación social y la conformidad pública, que incluyen la relación con las autoridades locales en relación con la inversión, el apoyo de las autoridades locales y la conformidad con las políticas locales. También se considera la participación pública en la gestión de los recursos naturales. Resaltan también los indicadores relacionados con los conflictos con los recursos hídricos, el uso del suelo, cuestiones sociales y la seguridad en el área donde se lleva a cabo el proyecto. Siendo los índices afines a las características de la población y la comunidad que podrían verse afectadas por el proyecto: población indígena o caracterización social y territorial, comunidades locales, medios de sustento, condiciones laborales, salud pública, patrimonio

cultural, y la disponibilidad de infraestructura y servicios. Por último, incluyen también las medidas de compensación para mitigar los impactos negativos, esto incluye el reasentamiento de personas, la tasa de compensación por habitante o ingreso y las actividades de las empresas locales relacionadas con el proyecto (Tabla 4).

Destaca la clasificación el "área marginal", que se refiere a la zona que rodea el proyecto y que también puede verse afectada, como un factor social que obviamente tiene una relación directa con las características y estado de conservación del entorno, por lo que podría ser más bien considerado como un indicador social y ambiental (integrado)

Tabla 4. Índices e indicadores aplicados en EEIA de proyectos internacionales desde el criterio SOCIAL en proyectos que han aplicado AMC.

Criterio social			
Aspecto	No	Indicador / Índice	Recurrencia
Aceptación social y conformidad pública	1	Aceptación social percibida	3
	2	Favor de las autoridades locales a la inversión o apoyo público a la inversión	1

	3	Conformidad de la inversión con las políticas locales	1
	4	Aumento de la participación pública en la gestión de los recursos naturales	1
Conflictos	5	Conflictos con relación a los recursos hídricos	2
	6	Conflictos por el uso de suelo	1
	7	Conflictos sociales	3
	8	Seguridad del área	1
Características sociales	9	Población indígena o caracterización social y territorial	3
	10	Comunidades y medios de sustento	2
	11	Condiciones laborales y empleo local	1
	12	Salud pública	1
	13	Patrimonio cultural	2
	14	Infraestructura y servicios disponibles	1
Relación y compensación	15	Reasentamiento (Número de personas reasentadas al año)	2
	16	Tasa de compensación/ habitante / ingreso	2
	17	Actividades de las empresas locales	2
Social y ambiental (integrado)	18	Área marginal	3

En cuanto al criterio TECNICO los proyectos internacionales analizados, se extienden ampliamente, habiéndose logrado identificar 31 índices o indicadores en este, siendo los más usados en común la capacidad instalada, la producción anual de energía o electricidad, el ciclo de vida de la operación y el tiempo de utilización de la capacidad instalada. En el aspecto técnico ambiental (integrado) destacan los indicadores asociados al impacto visual de la obra (Tabla 5).

Por su complejidad se procuró organizar los indicadores técnicos en cuatro grupos: aceptación social y conformidad pública, conflictos, características sociales, de compensación y los de carácter integrado. Bajo el

primero, se consideran aspectos relacionados con el emplazamiento y tecnología del proyecto, que incluyen elementos como la alineación del canal, la capacidad de almacenamiento, la ubicación de la fuente en relación con la red eléctrica y la planificación del embalse, entre otros. Además, el criterio técnico ambiental abarca aspectos naturales, como la longitud del río, el caudal anual y la pendiente del canal, junto con cuestiones relacionadas con el impacto visual de las obras y su impacto en el nivel de tensión de la red eléctrica. Estos indicadores y criterios son fundamentales para evaluar y tomar decisiones informadas sobre proyectos internacionales desde una perspectiva técnica y ambiental.

Tabla 5. Índices e indicadores aplicados en EEIA de proyectos internacionales desde el criterio TÉCNICO en proyectos que han aplicado AMC.

Criterio técnico			
Aspecto	No	Indicador / Índice	Recurrencia
Emplazamiento y tecnología	1	Alineación del canal	1
	2	Altitud de la toma	1
	3	Capacidad de almacenamiento	2
	4	Ciclo de vida de la operación	3
	5	Disponibilidad de materias primas	1
	6	Factor y/o tipo de planta	2
	7	Nivel de tensión de la red eléctrica en el punto de conexión de la fuente	1

	8	Periodo de desarrollo previsto	1
	9	Ubicación de la fuente en relación con la red eléctrica	2
	10	Volumen de la estructura	2
	11	Longitud de líneas de transmisión	1
	12	Planificación del embalse	2
Eficiencia, seguridad y riesgos	13	Capacidad instalada, Potencia instalada o Funcionamiento a plena potencia	3
	14	Producción anual de energía o electricidad	3
	15	Confiabilidad o Suministro firme de carga	2
	16	Eficiencia de la operación o Productividad neta esperada	2
	17	Eficiencia energética o Índice energético	2
	18	Energía renovable producida	1
	19	Escasez de electricidad	1
	20	Flexibilidad operativa	1
	21	Necesidad de ampliar la red eléctrica	1
	22	Previsibilidad de la producción de energía	1
	23	Seguridad de la infraestructura	2
	24	Seguridad de la inversión	2
	25	Tiempo de utilización de la capacidad instalada	3
	Técnico ambiental (integrado)	26	Longitud del río
27		Caudal anual	1
28		Pendiente del canal	1
29		Accesibilidad al lugar del proyecto	1
30		Impacto en el nivel de tensión de la red eléctrica	1
31		Impacto visual de las nuevas obras	1

La evaluación de 11 proyectos internacionales de este estudio, se identificaron indicadores en múltiples criterios, incluyendo los económicos y políticos. Bajo el criterio económico, se evalúan aspectos como el costo de inversión, los beneficios anuales promedio, la tasa interna de rendimiento y la viabilidad financiera. Estos indicadores son fundamentales para determinar la rentabilidad y la viabilidad económica de un proyecto. Por otro lado, el

criterio político incluye elementos relacionados con el apoyo gubernamental y la regulación, como el apoyo a la tecnología en la política energética, la gestión integrada del proyecto y la disponibilidad de sistemas de subvención de la inversión. Estos indicadores reflejan la importancia de factores políticos y regulatorios en la toma de decisiones sobre proyectos energéticos y su impacto en la comunidad. (Tabla 6)

Tabla 6. Índices e indicadores aplicados en EEIA de proyectos internacionales desde los criterios ECONOMICO Y POLITICO en proyectos que han aplicado AMC.

No	Criterio Económico	
	Indicador / Índice	Recurrencia
1	Adquisición	1
2	Beneficio anual promedio	1
3	Beneficio económico para la comunidad	2
4	Beneficio multipropósito del proyecto	2
5	Costo de inversión	3
6	Costo de operación	3

7	Costo de producción	1
8	Costo del proyecto	2
9	Costos de compensación	1
10	Empleo	2
11	Ganancia anual promedio	1
12	Gastos de inversión unitarios	1
13	Gastos unitarios de conexión a la red eléctrica	1
14	Incentivos	2
15	Ingreso económico de la comunidad, con incentivos	1
16	Ingreso económico de la comunidad, sin incentivos	1
17	Periodo de amortización	3
18	Servicios para la comunidad	2
19	Tasa interna de rendimiento	2
20	Tasa interna de rentabilidad	3
21	Tasa interna de retorno	3
No	Criterio Político	
Indicador / Índice		Recurrencia
1	Apoyo a la tecnología en la política energética facilitando la inversión	3
2	Cobertura de la tecnología con el sistema de certificados de origen	1
3	Cobertura de la tecnología con licitaciones periódicas para el suministro de energía	1
4	Comunicaciones y consultas	2
5	Disponibilidad de sistemas de subvención de la inversión	1
6	Evaluación del impacto ambiental	3
7	Gestión integrada del proyecto	2
8	Gobernanza	3
9	Necesidad demostrada y ajuste estratégico	3
10	Obstáculos legales	3
11	Posibilidad de utilizar el precio fijo de la energía	1
12	Preferencias directas de las partes interesadas	1

Resumiendo, si bien los indicadores e índices empleados en estos proyectos son muy diversos y asociados a criterios ambientales, técnicos y económicos, destacan por ser los más frecuentes en estos proyectos los siguientes: afectación del hábitat, caudal y flujo de agua, erosión y sedimentación, gases de efecto invernadero, costos de inversión, costos de compensación, viabilidad económica, etc.

5.4.2 Validación de criterios de AMC y priorización de indicadores de evaluación integrada en una AMC

Una vez identificados los principales criterios e indicadores para la evaluación de impactos en hidroeléctricas, se consultó a 16 especialistas en evaluación ambiental sobre

la aplicabilidad de los modelos multicriterio en proyectos hidroeléctricos a nivel nacional. Del análisis se desprende que el 80% de los especialistas conocen estos métodos, siendo el AHP el más reconocido con un 50%, seguido por MAUT con un 30%, PROMETHEE y TOPSIS con un 20%, y ELECTRE con un 10%. Aunque conocidos, estos métodos aún no se aplican de manera generalizada en proyectos hidroeléctricos en Bolivia. Proyectos como el de Geodata Engineering (2016) para el proyecto hidroeléctrico El Bala son excepciones.

Dada la importancia de estos proyectos en Bolivia, es necesario contar con un modelo de evaluación que respalde su construcción. Además, es crucial considerar criterios e indicadores relevantes, ya que estos

determinarán la viabilidad del proyecto. En la siguiente etapa de la investigación, se consultó a especialistas sobre los indicadores prioritarios para evaluar los impactos de las hidroeléctricas en Bolivia. La biodiversidad fue mencionada en tres ocasiones, seguida por el uso del suelo, la contaminación acústica, los gases de efecto invernadero, el área de influencia, la consulta previa y las consideraciones sobre las comunidades indígenas, citados al menos dos veces cada uno.

Estudios como el de Fernández y Martínez (2020) resaltan la importancia del monitoreo de gases de efecto invernadero debido a la inundación de zonas aguas abajo, que puede aumentar la producción de estos gases. La potencia instalada también es un indicador relevante para la toma de decisiones. Es esencial analizar independientemente los indicadores obtenidos de la revisión bibliográfica y los proporcionados por los especialistas para cada región biogeográfica de Bolivia. Esto permitirá identificar con mayor precisión los posibles impactos y priorizar las categorías de indicadores en futuras etapas del proyecto.

En tanto y a manera de discusión, es importante destacar que, según lo expuesto en este artículo, la evaluación integrada de impactos ambientales en proyectos hidroeléctricos en Bolivia se enfrenta a la falta de una metodología estandarizada que considere las particularidades de las regiones biogeográficas del país. Esta carencia resalta la necesidad de desarrollar enfoques más adaptados a la diversidad de ecosistemas presentes en Bolivia, así como a la preservación de especies endémicas y la vulnerabilidad ambiental. En este sentido, el Análisis Multicriterio (AMC) se posiciona como una herramienta clave para abordar estos desafíos, permitiendo una evaluación más integrada y equitativa de los impactos ambientales en proyectos hidroeléctricos.

Una diferencia fundamental entre el AMC y métodos tradicionales como Leopold o Conesa radica en la capacidad del AMC para considerar múltiples criterios de manera simultánea y ponderarlos de acuerdo con la importancia asignada por los expertos y las partes interesadas. Mientras que los enfoques tradicionales a menudo se centran en métricas específicas o en la evaluación de impactos de forma aislada, el AMC permite una evaluación más holística al integrar aspectos sociales, económicos y ambientales de manera equitativa. Esta capacidad de integración y ponderación de múltiples criterios es fundamental para abordar la complejidad de los impactos ambientales en proyectos hidroeléctricos, especialmente en contextos como el de Bolivia, donde la diversidad de ecosistemas y la vulnerabilidad ambiental requieren un enfoque integrado.

Además, es importante destacar la relevancia de integrar observaciones y datos de campo en el Análisis

Multicriterio. La información recopilada en el terreno proporciona datos concretos y contextualizados que enriquecen la evaluación de impactos ambientales, permitiendo una mayor precisión en la identificación y valoración de los criterios relevantes. La combinación de datos de campo con el enfoque estructurado y transparente del AMC brinda una base sólida para la toma de decisiones informadas en la planificación y ejecución de proyectos hidroeléctricos, contribuyendo a una evaluación más completa y efectiva de los impactos ambientales en estos proyectos.

Sin embargo, el análisis multicriterio no carece de limitaciones que incluyen subjetividad, dificultades en la comparación de objetivos y en la incorporación de la dimensión temporal, la calidad y cantidad de datos y la complejidad computacional.

6 Conclusión

A partir de una revisión bibliográfica exhaustiva, se pudo determinar que los análisis multicriterio permiten integrar las diversas dimensiones que presenta un proyecto hidroeléctrico. Esto se debe principalmente a la capacidad de añadir estructura, auditabilidad, transparencia y rigor al proceso. Debido a su capacidad de adaptabilidad, los modelos multicriterio, son capaces de ser aplicados en diversos proyectos, tanto a nivel nacional como internacional. Así mismo, permiten un nivel de análisis por parte de los tomadores de decisiones.

Los principales modelos utilizados en estudios hidroeléctricos son: AHP, PROMETEE, ELECTRE y TOPSIS. Sin embargo, muchos estudios sugieren la aplicación de diversos modelos multicriterio en un mismo proyecto, ya que esto permite fortalecer algún área de análisis que algún otro modelo no haya tomado en cuenta.

A partir de una extensa revisión bibliográfica de estudios realizados con la aplicación de AMC y con el apoyo de especialistas en evaluación ambiental, se pudieron identificar indicadores primordiales al momento de evaluar impactos en hidroeléctricas a partir del cual se destacan una serie de indicadores que tienen un alcance más integrado por su demanda de análisis social y ambiental, estos son: la calidad y caudal del agua, el patrón de flujo, la sedimentación y la integridad del hábitat los indicadores (como los indicadores más recurrentes en la EIA de proyectos hidroeléctricos). A estos se los indicadores más frecuentes de dimensión social como la aceptación social y la conformidad pública, que incluyen la relación con las autoridades locales en relación con la inversión, el apoyo de las autoridades locales, así como son la pérdida de hábitat y utilización del suelo, servicios de aprovisionamiento de productos agrícolas y forestales.

A partir de estas conclusiones resta trabajar en el desarrollo de un esquema metodológico de aplicación del AMC para la evaluación integrada de estudios sociales y ambientales en proyectos hidroeléctricos, que prioritariamente adapte el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) como método para determinar el peso de cada uno de los criterios e indicadores en base a la ponderación de expertos o especialistas en cada área.

Referencias bibliográficas

- Akash, B. A., Mamlook, R., & Mohsen, M. S. (1999). Multi-criteria selection of electric power plants using analytical hierarchy process. *Electric Power Systems Research*, 7, (3), 393-404.
- Al Garni, H., Kassem, A., Awasthi, A., Komljenovic, D., & Al-Haddad, K. (2016). A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 16, 137–150. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.05.006>
- Arthington, A. H., Bunn, S. E., Poff, N. L., & Naiman, R. J. (2010). The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems. *Ecological Applications*, 20 (11), 2783. <https://doi.org/10.3390/en13112783>
- Bana e Costa, C. A., Ensslin, L., & Corrêa, E. C. (2008). Decision support systems in action: Integrated application in a multicriteria decision aid process. *European Journal of Operational Research*, 159 (12), 4771–4779. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.013>
- Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4> (Vol. 6, pp. 165–224). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.atpp.2020.07.001>
- Chien, F., Wang, C.-N., Nguyen, V. T., Nguyen, V. T., & Chau, K. Y. (2020). An Evaluation Model of Quantitative and Qualitative Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Approach for Hydroelectric Plant Location Selection. *Energies*, 13 (AHP): A case study of Miño-Sil river basin, Spain. *Ecological Engineering*, 85, 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.10.020>
- Cowan, K., Daim, T., & Anderson, T. (2010). Exploring the impact of technology development and adoption for sustainable hydroelectric power and storage technologies in the Pacific Northwest United States. *Energy*, 35 (9), 1189–1208. <https://doi.org/10.1080/09640568.2011.562074>
- Dean, M. (2020). Multi-criteria analysis. En *Advances in Transport Policy and Planning* (6), 721–735. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.08.017>
- Fuentes-Bargues, J. L., & Ferrer-Gisbert, P. S. (2015). Selecting a small run-of-river hydropower plant by the analytic hierarchy process (3), 117–130. <https://doi.org/10.1680/warm.2006.159.3.117>
- Gazzola, P. (2011). Can environmental appraisal be truly interdisciplinary? *Journal of Environmental Planning and Management*, 54
- Greening, L. A., & Bernow, S. (2004). Design of coordinated energy and environmental policies: Use of multi-criteria decision-making. *Energy Policy*, 32
- Hammond, G. P., & Winnett, A. B. (2006). Interdisciplinary perspectives on environmental appraisal and valuation techniques. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*, 159 (2), 101–127. <https://doi.org/10.1080/13658810010005525>
- Harder, M. K., Potting, J., & Van der Sluijs, J. P. (2015). Assessing uncertainties in impacts of hydropower dams on fish in the context of environmental flow assessments. *Journal of Environmental Management*, 149, 93-103. (RoR) hydropower projects using analytical hierarchy process.
- IEA. (2019). *Global energy & CO2 status report*. International Energy Agency.
- Jankowski, P., Andrienko, N., & Andrienko, G. (2001). Map-centred exploratory approach to multiple criteria spatial decision making. *International Journal of Geographical Information Science*, 15 (7), 1584–1595. <https://doi.org/10.1016/j.jrser.2005.11.005>
- Kumar, D., & Katoch, S. S. (2015). Sustainability assessment and ranking of run of the river (1–3), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.03.023>
- Linkov, I., & Moberg, E. (2012). *Multi-Criteria Decision Analysis*. 198. (Power Electronics and Power Systems). Kluwer Academic Publishers.
- Loken, E. (2007). Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11
- Mendoza, G. A., & Martins, H. (2006). Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms. *Forest Ecology and Management*, 230 (2), 514-529.
- Munier, N. (2004). *Multicriteria Environmental Assessment A Practical Guide (ELOHA): A new framework for developing regional environmental flow standards*. *Freshwater Biology*, 55
- Nachtnebel, H., & Singh, R. P. (2016). Decision aid for hydropower project prioritisation in Nepal by applying Visual PROMETHEE. *International Journal of Multicriteria Decision Making*, 6, 316. <https://doi.org/10.1504/IJMCDM.2016.10002238>
- Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2008). Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. *European Journal of Operational Research*, 178 (Vol. 105). Springer Science & Business Media.
- Poff, N. L., Richter, B. D., Arthington, A. H., Bunn, S. E., Naiman, R. J., Kendy, E., ... & Warner, A. (2010). The ecological limits of hydrologic alteration (1), 109–123. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0830-9>

- Rosso, M., Bottero, M., Pomarico, S., La Ferlita, S., & Comino, E. (2014). Integrating multicriteria evaluation and stakeholders' analysis for assessing hydropower projects. *Energy Policy*, 67, 870–881. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.12.007>
- Roy, B. (1996). *Multicriteria methodology for decision aiding*
- Šantl, S., & Steinman, F. (2015). Hydropower Suitability Analysis on a Large-Scale Level: Inclusion of a Calibration Phase to Support Determination of Model Parameters. *Water Resources Management*, 29
- Saracoglu, B. O. (2015). An Experimental Research Study on the Solution of a Private Small Hydropower Plant Investments Selection Problem by ELECTRE III/IV, Shannon's Entropy, and Saaty's Subjective Criteria Weighting. *Advances in Decision Sciences*, 2015, e548460. <https://doi.org/10.1155/2015/548460>
- Temel, P. (2015). Evaluation of potential run-of river hydropower plant sites using multi-criteria decision making in terms of environmental and social aspects. *Middle East Technical University*. (2), 637–651. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02459-6>
- Teshome, A., Graaff, J., & Stroosnijder, L. (2014). Evaluation of soil and water conservation practices in the north-western Ethiopian highlands using multi-criteria analysis. *Front. Environ. Sci.* <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00060>
- Vassoney, E., Mammoliti Mochet, A., & Comoglio, C. (2017). Use of multicriteria analysis (MCA) for sustainable hydropower planning and management. *Journal of Environmental Management*, 196, 48–55. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.067>
- Vassoney, E., Mammoliti Mochet, A., & Comoglio, C. (2020). Multicriteria Analysis for the Assessment of Flow Release Scenarios from a Hydropower Plant in the Alpine Region. *Water Resources Management*, 34 (7), 1336–1349. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1070.0838>
- Vassoney, E., Mochet, A. M., Rocco, R., Maddalena, R., Vezza, P., & Comoglio, C. (2019). Integrating Meso-Scale Habitat Modelling in the Multicriteria Analysis
- Vučijak, B., Kupusović, T., Midžić-Kurtagić, S., & Čerić, A. (2013). Applicability of multicriteria decision aid to sustainable hydropower. *Applied Energy*, 101, 261–267. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.024>
- Wallenius, J., Dyer, J. S., Fishburn, P. C., Steuer, R. E., Zionts, S., & Deb, K. (2008). Multiple Criteria Decision Making, Multiattribute Utility Theory: Recent Accomplishments and What Lies Ahead. *Management Science*, 54
- Wang, B., Nistor, I., Murty, T., & Wei, Y.-M. (2014). Efficiency assessment of hydroelectric power plants in Canada: A multi criteria decision making approach. *Energy Economics*, 46, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.09.001>
- Zarghami, M., & Szidarovszky, F. (2011). *Multicriteria Analysis Applications to Water and Environment Management*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-17937-2>