



INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y
CIENCIAS DEL AGUA

**“EVALUACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DE
MICROCENTRALES HIDROELÉCTRICAS MEDIANTE UN
ENFOQUE DE EMERGY ACCOUNTING”**

TESIS

**PARA OBTENER EL TITULO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA**

Presenta:

Ing. Fabiola Ivonne Gordillo Bartolo

Tutor Académico:

Dr. Carlos Roberto Fonseca Ortiz

Tutores Adjuntos:

Dr. Miguel Angel Zamora Juárez

Dr. Boris Miguel López Rebollar

Toluca, Estado de México
noviembre, 2025

Índice

Abstract _____	1
Resumen _____	3
Introducción _____	5
Justificación _____	7
Hipótesis _____	9
Objetivos _____	9
Objetivo general _____	9
Objetivos específicos _____	9
Capítulo 1. Antecedentes _____	10
1.1. Clasificación de las centrales hidroeléctricas _____	10
1.1.1. Generación de energía hidroeléctrica en microcentrales _____	11
1.1.2. Tipos de turbinas _____	14
1.2. Relación entre <i>emergy accounting</i> (EA) y análisis de ciclo de vida (ACV)_	15
1.2.1. Etapas del análisis de ciclo de vida _____	15
1.2.2. Análisis del inventario del análisis de ciclo de vida _____	16
1.2.3. Aplicaciones de <i>emergy accounting</i> (EA) y análisis de ciclo de vida (ACV) _____	17
Capítulo 2. Materiales y métodos _____	18
2.1. Etapa 1: Contextualización _____	20
2.1.1. Elementos de análisis de ciclo de vida (ACV) en microcentrales hidroeléctricas _____	20
2.1.2. Base de datos _____	20
2.2. Etapa 2: Concepción del modelo _____	20

2.2.1. Representación gráfica de las relaciones causales de variables en el inventario	20
2.2.2. <i>Unit energy value</i>	21
2.3. Etapa 3: Aplicación	22
2.3.1. Descripción de la zona de estudio	22
2.3.2. Recopilación de información de la zona de estudio (Cuenca del Río Amacuzac)	24
2.3.3. Aplicación del modelo	25
2.3.4. Evaluación de la sustentabilidad	28
Capítulo 3. Resultados y discusión	29
3.1. Etapa 1: Contextualización	29
3.1.2. Inventario análisis de ciclo de vida de una microcentral hidroeléctrica	32
3.2. Etapa 2: Concepción del modelo	33
3.2.1. Modelo conceptual bajo un enfoque de <i>energy accounting</i> de una microcentral hidroeléctrica	33
3.3. Etapa 3: Aplicación	39
3.3.1. Recursos hídricos en la Cuenca del Río Amacuzac	39
3.3.2. Aplicación del modelo	44
3.3.3. Obtención de los flujos y los <i>unit energy value</i>	46
3.3.4. Evaluación de sustentabilidad	53
Conclusiones y recomendaciones	58
Referencias	60
Anexos	64

Índice de figuras

Figura 1. Clasificación de las centrales hidroeléctricas _____	10
Figura 2. Etapas del análisis de ciclo de vida _____	16
Figura 3. Diagrama metodológico _____	19
Figura 4. Ubicación de la Cuenca del Río Amacuzac _____	22
Figura 5. Elevaciones Cuenca Río Amacuzac _____	24
Figura 6. Diagrama general de la concepción del fenómeno para microcentrales hidroeléctricas _____	29
Figura 7. Modelos conceptuales: a) Instalación/adecuación de infraestructura, b) Instalación de equipo y c) Generación de energía eléctrica _____	35
Figura 8. Modelo conceptual implementación de microcentrales hidroeléctricas _____	38
Figura 9. Estaciones hidrométricas de la Cuenca del Río Amacuzac _____	39
Figura 10. Estaciones climatológicas de la Cuenca del Río Amacuzac _____	40
Figura 11. Registros de las estaciones hidrométricas _____	42
Figura 12. Registros de las estaciones climatológicas _____	44
Figura 13. Estación hidrométrica seleccionada _____	45
Figura 14. Diagrama para el caso de la turbina tipo Pelton _____	47
Figura 15. Diagrama para el caso de la turbina tipo Vortex _____	48
Figura 16. Diagrama UML microcentral hidroeléctrica con turbina Pelton _____	49
Figura 17. Diagrama UML microcentral hidroeléctrica con turbina Vortex _____	50
Figura 18. Diagrama ternario microcentrales hidroeléctricas _____	56

Índice de tablas

Tabla 1. Características de una microcentral hidroeléctrica _____	11
Tabla 2. Formato de tabla de evaluación emergética _____	22
Tabla 3. Índices emergéticos _____	27
Tabla 4. Fases de ACV _____	31
Tabla 5. Procesos y materiales generales dentro de la construcción de una microcentral hidroeléctrica _____	33
Tabla 6. Registros de estaciones hidrométricas _____	41
Tabla 7. Precipitación media anual de las estaciones climatológicas _____	43
Tabla 8. Características de operación de las turbinas "tipo" _____	45
Tabla 9. Tabla emergética microcentrales _____	51
Tabla 10. Indicadores emergéticos para microcentrales hidroeléctricas _____	53
Tabla 11. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18089 _____	64
Tabla 12. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18175 _____	66
Tabla 13. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18193 _____	68
Tabla 14. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18200 _____	70
Tabla 15. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18223 _____	72
Tabla 16. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18225 _____	74
Tabla 17. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18232 _____	75
Tabla 18. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18264 _____	77
Tabla 19. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18269 _____	78
Tabla 20. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18271 _____	79
Tabla 21. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18291 _____	81
Tabla 22. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18294 _____	82
Tabla 23. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18295 _____	83
Tabla 24. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18316 _____	84
Tabla 25. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18372 _____	86
Tabla 26. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18406 _____	87
Tabla 27. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18437 _____	89
Tabla 28. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18557 _____	91
Tabla 29. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18572 _____	92

Simbología y Nomenclatura

Nombre	Descripción	Unidades
EA	<i>emergy accounting</i>	-
ACV	análisis de ciclo de vida	-
LCA	life cycle assessment	-
SIG	sistemas de información geográfica	-
seJ	emjoules solares	-
UEV	<i>unit emergy value</i>	seJ/J
SCALL	sistema de captación de agua de lluvia	-
RPM	revoluciones por minuto	rev/min
TW	teravatios	-
ESHA	Por sus siglas en inglés <i>European Small Hydropower Association</i>	-
PCH	pequeñas centrales hidroeléctricas	-
R	recursos renovables	seJ/año
N	Recursos no renovables	seJ/año
F	Recursos del sistema socioeconómico	seJ/año
ISAER	International Society for the Advancement of Emergy Research	
BANDAS	Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales	-
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía	-
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad	-
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua	-
Y	rendimiento total de emergía del sistema	seJ/J
EYR	rendimiento en emergía (por sus siglas en inglés <i>emergy yield ratio</i>)	adimensional
ELR	índice de carga ambiental (por sus siglas en inglés <i>environmental loading ratio</i>)	adimensional
ESI	índice de sostenibilidad (por sus siglas en inglés <i>emergy sustainability index</i>)	adimensional

%R	renovabilidad o el porcentaje de recursos	%
SIH	Sistema de Información Hidrológica	-
ILCD	International Reference Life Cycle Data System	-
SCADA	paneles de control (por sus siglas en ingles Supervisory Control and Data Acquisition)	-
ISO	International Organization Standardization	-
PVC	policloruro de vinilo	-
PLA	ácido poliláctico	-
PLC	policaprolactona	-
Rxy	volumen anual actual comprometido	Mm ³
V	volumen	m ³ /s
DOF	Diario Oficial de la Federación	-
UML	Unified Modeling Language	-

Abstract

Large-scale hydroelectric generation faces limitations associated with climate change, the reduced availability of profitable sites, and the environmental impacts it produces. In consequence, there is a growing need to develop smaller-scale, sustainable alternatives that efficiently utilize the available water resources. Micro-hydropower plants, especially those operating with Pelton and Vortex turbines, represent a viable option; nevertheless, their design and assessment must consider hydrological, infrastructural, and construction factors, as well as methodologies that integrate not only technical and economic feasibility but also sustainability.

Hydropower is one of the most important renewable energy sources worldwide. In Mexico, the geographic, topographic, and climatic conditions favor the use of this resource, particularly at small scales. Micro-hydropower plants stand out for their low environmental impact and their potential to contribute to energy diversification. Nevertheless, studies on hydroelectric generation often focus solely on the construction and operation phases, which can underestimate environmental impacts and hidden costs. For this reason, the integration of methodologies such as *emergy accounting* (EA) and *life cycle assessment* (LCA) enables a more comprehensive evaluation by including all energy, material, and ecosystem flows involved, offering a more robust view of project sustainability.

The main objective of this research was to develop a conceptual model based on an *emergy accounting* (EA) approach associated with micro-scale electricity generation using Pelton and Vortex turbines, in order to assess the sustainability of hydroelectric projects under different hydrological, infrastructural, and construction conditions within the Amacuzac River Basin. To achieve this, the operational variables and conditions of both turbines were defined through a life cycle assessment inventory (LCA), identifying the system's input and output flows. Subsequently, a conceptual model was constructed to relate mass, energy, and monetary flows, allowing sustainability to be evaluated through emergy indicators. In addition, a geodatabase of the Amacuzac River Basin was developed with climatological and hydrometric information, and the emergy yield ratio (EYR), environmental loading ratio (ELR), and emergy sustainability index (ESI) index were calculated for both technologies.

The emergy index results showed the performance of the analyzed turbines under their respective operating conditions. For the Pelton turbine, the values obtained were: EYR = 1.93, ELR = 1.08, ESI = 1.79, and %R = 48%; while for the Vortex turbine, the results were: EYR = 2.24, ELR = 0.80, ESI = 2.79, and %R = 55%.

The Vortex turbine results demonstrated good emergy performance and high environmental sustainability due to the constancy of the renewable resource associated with river runoff. Likewise, the Pelton turbine results indicated lower utilization of the renewable resource and a higher relative environmental load, as it mainly depends on rainwater collected from a limited surface area.

The emergy analysis demonstrated that the water resource identified for hydrometric station 18175, the condition analyzed in the Amacuzac River Basin for a micro-hydropower plant operating with a Vortex turbine under the specific characteristics studied in this thesis, presents optimal and sustainable conditions.

For the Pelton turbine, although the climatological station 12030 showed favorable precipitation conditions, it is necessary to optimize the collection or storage of captured water to improve its performance and sustainability under the conditions of the turbine type selected for this thesis study.

In conclusion, the combined application of emergy accounting and life cycle assessment inventory represents an integrated tool for the evaluation and planning of micro-scale hydroelectric projects. This approach allows the identification of not only their technical and economic feasibility but also their environmental impact through emergy indices, thereby promoting a long-term vision oriented toward the sustainability of micro-hydropower generation projects.

Keywords: *emergy accounting, life cycle assessment, micro-hydropower, Pelton turbine, Vortex turbine.*

Resumen

La generación hidroeléctrica a gran escala enfrenta limitaciones asociadas al cambio climático, la disponibilidad reducida de sitios rentables y los impactos ambientales que produce. Ante ello, surge la necesidad de desarrollar alternativas sustentables a menor escala que aprovechen de manera eficiente los recursos hídricos disponibles. Las microcentrales hidroeléctricas, especialmente aquellas que operan con turbinas Pelton y Vortex, representan una opción viable; sin embargo, su diseño y evaluación requieren considerar factores hidrológicos, de infraestructura y constructivos, así como metodologías que integren no solo la viabilidad técnica y económica, sino también la sustentabilidad.

La energía hidráulica es una de las fuentes renovables más importantes a nivel mundial, en México, las condiciones geográficas, topográficas y climáticas favorecen el aprovechamiento de este recurso, especialmente a pequeña escala. Las microcentrales se destacan por su bajo impacto ambiental y su potencial para contribuir a la diversificación energética. No obstante, los estudios sobre generación hidroeléctrica suelen centrarse únicamente en las fases de construcción y operación, lo que puede subestimar los impactos ambientales y los costos ocultos. Por esta razón, la integración de metodologías como el *emergy accounting* (EA) y el análisis de ciclo de vida (ACV) permite una evaluación más integral al incluir todos los flujos energéticos, de materiales y ecosistémicos involucrados, ofreciendo una visión más robusta de la sustentabilidad de estos proyectos.

El objetivo principal de esta investigación fue desarrollar un modelo conceptual bajo un enfoque de *emergy accounting* (EA) asociado con la generación de energía eléctrica a microescala con turbinas Pelton y Vortex, con el fin de evaluar la sustentabilidad de proyectos hidroeléctricos bajo diferentes condiciones hidrológicas, de infraestructura y constructivas en la Cuenca del Río Amacuzac. Para ello, se definieron las variables y condiciones operativas de ambas turbinas a través de un inventario de análisis de ciclo de vida (ACV), identificando los flujos de entrada y salida del sistema. Posteriormente, se construyó un modelo conceptual que relaciona flujos de masa, energía y monetarios, lo cual permitió evaluar la sustentabilidad mediante indicadores emergéticos. Además, se elaboró una geobase de la cuenca del Río Amacuzac con información climatológica e hidrométrica, y se calcularon los índices rendimiento en emergía (EYR), índice de carga ambiental (ELR) y índice de sostenibilidad (ESI) para ambas tecnologías.

Los resultados de los índices emergéticos mostraron el desempeño de las turbinas analizadas bajo sus propias condiciones dadas. Para la turbina Pelton se obtuvieron los valores: EYR = 1.93, ELR = 1.08, ESI = 1.79 y %R = 48 %, mientras que para la turbina Vortex los resultados fueron: EYR = 2.24, ELR = 0.80, ESI = 2.79 y %R = 55 %.

Los resultados de la turbina Vortex presentaron un buen desempeño emergético y gran sustentabilidad ambiental, debido a la constancia del recurso renovable asociado al escurrimiento del río. Así mismo los resultados de la turbina Pelton se traducen en un menor aprovechamiento del recurso renovable y una mayor carga ambiental relativa, ya que depende principalmente del agua de lluvia captada en una superficie limitada.

El análisis emergético demostró que el recurso hídrico identificado para la estación hidrométrica 18175, condición analizada en la Cuenca del Río Amacuzac para una microcentral hidroeléctrica que opere con la turbina Vortex bajo las características específicas analizadas en este trabajo de Tesis tiene condiciones óptimas y sustentables.

Para la turbina Pelton, aunque tiene condiciones de precipitación favorables de la estación climatológica 12030, se requiere optimizar la captación o almacenamiento de agua captada para mejorar su rendimiento y sustentabilidad para las condiciones de la turbina tipo elegida para este estudio.

Concluyendo que la aplicación conjunta del *emergy accounting* y el uso del inventario de análisis de ciclo de vida constituye una herramienta integral para la evaluación y planificación de proyectos hidroeléctricos a microescala, permitiendo identificar no solo su viabilidad técnica y económica, sino también su impacto ambiental por medio de los índices emergéticos, por lo que esta aproximación promueve una visión de largo plazo orientada hacia la sustentabilidad de proyectos de microcentrales hidroeléctricas para la generación de energía.

Palabras clave: *emergy accounting, análisis de ciclo de vida, microcentrales hidroeléctricas, turbina Pelton, turbina Vortex.*

Introducción

La energía hidráulica es generada por el aprovechamiento de la energía cinética y potencial del agua. El uso que se le dio inicialmente fue para accionar dispositivos mecánicos. Actualmente, el uso más común de la energía hidráulica es la generación de energía eléctrica mediante la creación de centrales hidroeléctricas que funcionan por medio de turbinas hidráulicas. Las centrales hidroeléctricas a pequeña escala se suelen clasificar en función de diferentes parámetros, uno de ellos es su potencia instalada. En este sentido, se clasifican en pequeña central ($1 \leq MW < 30$), minicentral ($100 < kW < 1,000$) y microcentral ($\leq 100kW$) (Secretaría de Energía, 2012).

Una alternativa para centrales hidroeléctricas a pequeña escala son las construidas como centrales al hilo del agua debido a que su impacto ambiental es mínimo en comparación con las grandes centrales. En efecto éstas se caracterizan por generar energía en todo momento, y aunque tienen una carga constante con una adaptación limitada de la demanda de energía, no permiten regular inundaciones ni las variaciones del flujo en el río (Meza-Prieto y Aparicio, 2018).

Los sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) se definen como infraestructuras que permiten interceptar y recolectar el agua pluvial a partir de superficies naturales o artificiales. Estos sistemas destacan por ser una alternativa de bajo costo, con un nivel de instalación dependiendo de la complejidad del sistema requerido que va de lo sencillo a lo más elaborado y con un gran potencial para incrementar la disponibilidad de agua destinada para diversos usos. En este sentido, su aprovechamiento abre la posibilidad de emplearlos como fuente complementaria para la generación de energía eléctrica. Esta opción resulta especialmente valiosa dado que, durante su operación, no genera impactos ambientales significativos y puede integrarse como un insumo hídrico en microcentrales hidroeléctricas de baja escala (Zamora-Juárez et al., 2021).

No obstante, para el diseño e implementación de un sistema de esta naturaleza, es fundamental realizar un análisis previo de los regímenes de precipitación de la zona de estudio o lugar determinado, con el fin de estimar la disponibilidad hídrica anual. Asimismo, se deben considerar factores clave como la infraestructura existente, la selección y diseño de la turbina, así como los componentes y accesorios necesarios para garantizar su funcionamiento eficiente y sostenible.

Una forma de impulsar proyectos de centrales hidroeléctricas a pequeña escala es determinando lugares viables de instalación y cantidad de energía que pudiera ser aprovechada. Este potencial de microcentrales ha sido evaluado en países como Estados Unidos y Brasil, en México existen algunas

barreras como la estrategia energética basada en la evaluación de la energía renovable a corto plazo y no a largo plazo (Meza-Prieto y Aparicio, 2018).

Por otro lado, la *emergy* es la cantidad de energía de un tipo (solar) que se requiere directa o indirectamente para proporcionar un determinado flujo y su unidad de medición es el emjoule solar (seJ). El *emergy accounting* (EA) toma en cuenta los servicios ambientales que sustentan el proceso de un sistema o producto por medio de transformaciones de los flujos de energía y materia, a este tipo de transformación se le conoce como unit *emergy value* (UEV) y su unidad es seJ/J, es el indicador que expresa cuántos joules de energía solar se requieren para generar un joule de energía de otro tipo (Brown y Ulgiati, 2004).

El objetivo general de la presente investigación es proporcionar un modelo para la evaluación de la sustentabilidad bajo un enfoque de *emergy accounting* (EA) asociado con la generación de energía eléctrica a microescala generada por turbinas Pelton y Vortex bajo diferentes condiciones hidrológicas, de infraestructura y constructivas. Para ello en la Cuenca del Río Amacuzac por medio de un inventario de análisis de ciclo de vida (ACV) con el fin de determinar un método para la evaluación de la sustentabilidad en microcentrales hidroeléctricas.

Justificación

La energía hidráulica constituye una de las energías renovables más importantes del planeta. En teoría el potencial energético de energía hidráulica aprovechable en la Tierra se estima de 2 y 3 teravatios (TW) (González et al., 2009).

La generación de energía hidroeléctrica a gran escala tiene un número limitado de sitios aprovechables y poco rentables a largo plazo debido al cambio climático. Por ello, para la producción de energía hidroeléctrica en el futuro, es conveniente realizar una planeación de los recursos a largo plazo. Una opción viable es considerar la generación de energía hidroeléctrica a pequeña escala, estas instalaciones tienen un impacto ambiental mínimo comparado con las grandes centrales hidroeléctricas (Meza-Prieto y Aparicio, 2018).

Estudios como Du et al. (2022) han integrado dos metodologías utilizadas para la evaluación de sustentabilidad en proyectos, como lo son el *emergy accounting* y el análisis de ciclo de vida (ACV), ya que usualmente los estudios aplicados en el campo de la energía hidroeléctrica se han centrado únicamente en la construcción y operación de centrales hidroeléctricas (Brown y McClanahan, 1996; Kang y Park, 2002; Tassinari et al., 2016; Fang et al., 2015; Ren y Feng, 2021) lo que puede subestimar impactos ambientales, costos ocultos y oportunidades de mejora en el uso de los recursos.

El *emergy accounting* permite abordar esta limitación al considerar todos los flujos de energía y recursos involucrados en el sistema, incluyendo aquellos que no son evidentes en términos económicos o técnicos, como los servicios ecosistémicos y los insumos naturales. Por su parte, el análisis de ciclo de vida aporta una estructura sistemática para evaluar los impactos ambientales desde la extracción de materias primas hasta el fin de vida del proyecto. Al combinar ambas metodologías, se logra una evaluación más robusta y multidimensional de la sustentabilidad, que no sólo contempla la viabilidad técnica y económica, sino también la sostenibilidad ecológica y la eficiencia sistémica del proyecto

En México uno de los recursos renovables que más le favorece por su geografía, topografía y relieve es el hídrico (Ramos-Gutiérrez y Montenegro-Fragoso, 2012). Por ello, autores como Meza-Prieto y Aparicio. (2018) determinaron lugares factibles y la energía que podría explotarse para la implementación de centrales hidroeléctricas a pequeña escala en cuencas hidrográficas por medio del análisis de potencial hidroeléctrico.

Los resultados de esta evaluación y de los índices emergéticos basados en *emergy accounting* (EA) aplicados a la Cuenca del Río Amacuzac proporcionarán áreas que pueden tener mayor sustentabilidad en microcentrales hidroeléctricas que operan con las características de las turbinas Pelton o Vortex y que podrían tener una mayor referencia para la planificación centrales hidroeléctricas a pequeña escala en cuencas hidrográficas.

Hipótesis

La generación de energía eléctrica mediante microcentrales hidroeléctricas con turbinas tipo Pelton y Vortex presentan grados de sustentabilidad adecuados bajo un enfoque de *energy accounting* evaluando las etapas de instalación y operación en función de variables hidrológicas, de infraestructura y constructivas en una cuenca hidrográfica.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un modelo conceptual bajo un enfoque de *energy accounting* asociado con la generación de energía eléctrica a microescala basada en las características de turbinas Pelton y Vortex para evaluar la sustentabilidad de proyectos de generación hidroeléctrica bajo diferentes condiciones hidrológicas, de infraestructura y constructivas en una cuenca hidrográfica.

Objetivos específicos

- Definir las condiciones y variables operativas involucradas en el funcionamiento de las turbinas Pelton y Vortex para la caracterización del impacto ambiental en la generación de energía eléctrica por medio de un inventario de análisis de ciclo de vida (ACV).
- Relacionar las variables definidas en el inventario de ACV y las relaciones causales entre ellas mediante flujos de masa, energéticos y monetarios para definir la sustentabilidad de un proyecto de generación hidroeléctrica bajo un enfoque de *energy accounting* (EA).
- Estimar la energía potencial física de precipitación y escurrimiento, así como los recursos necesarios para la instalación de microcentrales hidroeléctricas en los casos de estudio dentro de la cuenca del Río Amacuzac mediante la obtención de datos climatológicos e hidrométricos para el desarrollo del *energy accounting* (EA) en la generación de energía hidroeléctrica considerando turbinas tipo Pelton y Vortex.
- Estimar índices energéticos basados en *energy accounting* (EA) de la generación de energía a microescala en turbinas Pelton y Vortex para la interpretación de la sustentabilidad en cada tipo de microcentral.

Capítulo 1. Antecedentes

1.1. Clasificación de las centrales hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas actuales son el resultado de 2000 años de avances tecnológicos (Figura 1), desde la rueda de madera, que convertía un bajo porcentaje de energía hidráulica en energía mecánica útil, a los modernos turbogeneradores que giran a 1.500 revoluciones por minuto (RPM) y producen energía eléctrica con muy altos rendimientos (González et al., 2009).

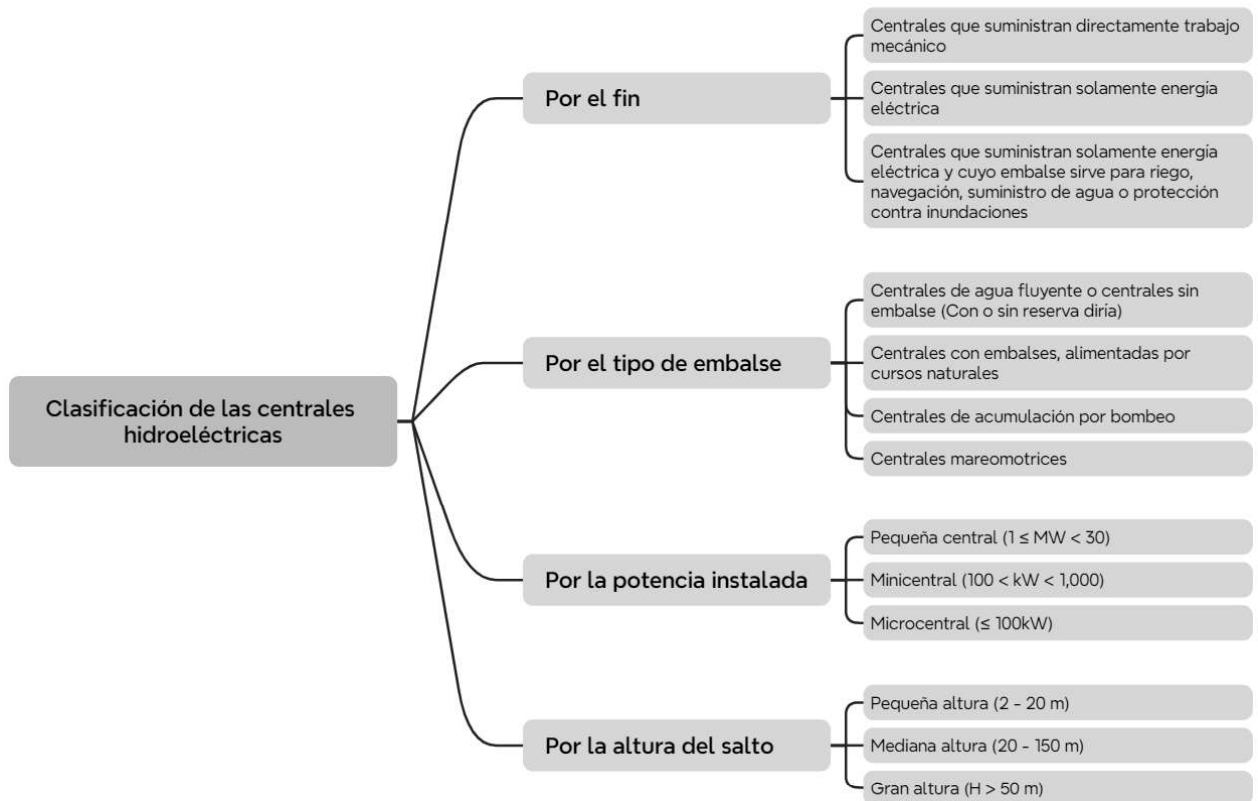


Figura 1. Clasificación de las centrales hidroeléctricas

Fuente: Orille (1993); González et al. (2009); Secretaría de Energía (2012).

1.1.1. Generación de energía hidroeléctrica en microcentrales

Las microcentrales hidroeléctricas (5 – 50 kW, Secretaría de Energía, 2012) se caracterizan por su instalación al aire libre y funcionamiento automático. Este tipo de centrales puede ser al hilo del agua usada en ríos con pendientes bajas, centrales de pie de presa donde el agua es almacenada y devuelta al cauce del río y las centrales integradas en redes de agua ya existentes como las de canales de riego o de navegación, para optimar el uso del agua y reducir los costos de implementación de un proyecto (Varela, 2022).

Entre las características más importantes (Tabla 1) de una central hidroeléctrica convencional se pueden destacar las obras civiles, instalaciones eléctricas y equipo mecánico (Lazo y Urbina, 2015).

Tabla 1. Características de una microcentral hidroeléctrica

Obras civiles	
Micropresa	Son las obras civiles de la microcentral hidroeléctrica destinadas a retener y desviar parcialmente el caudal, en este caso se llama micropresa a “hilo de agua”, ya que se utiliza una parte del mismo y el resto continua su curso normal en el cauce natural del río. El caudal desviado se capta por la bocatoma para su transporte por la tubería hacia la turbina.
Bocatoma	Esta obra civil está conectada a la presa y conduce el agua hacia la tubería de carga o el desarenador. Aquí se controla la cantidad de agua que requiere el sistema de presión y se desvía hacia un canal o directamente hacia una tubería.
Desarenador	Este elemento se utiliza para separar la arena u otros sedimentos orgánicos que sean captados por la bocatoma. No todos los proyectos de microcentrales hidroeléctricas tienen un desarenador, aunque se recomienda esta obra civil para proteger la turbina de micro impactos de material sólido que se transportan en la

	tubería de presión, lo cual afecta su vida útil sensiblemente.
Cámara de carga	Sirve para acumular una cantidad determinada de agua antes de entrar en la tubería de presión. Esta obra es prácticamente un reservorio para cubrir picos de consumo y que también puede servir como otro medio de limpieza semejante al desarenador.
Tubería de presión	Esta es la encargada de conducir el agua desde el desarenador y/o la cámara de carga hasta la turbina. La tubería de presión gana presión de acuerdo con el desnivel ganado en su distancia.
Casa de máquinas	Es el espacio físico donde se instala la turbina, el generador y el panel de control eléctrico. El piso debe ser de concreto y las paredes construidas en diferentes materiales por ejemplo bloques de concreto, ladrillo rojo o madera.
Canal de desfogue	Este elemento está en la casa de máquinas y hacia el cual se canaliza el agua que sale de la turbina para retornarla al río (al cauce natural).
Equipo mecánico	
Turbina	Dispositivo que se encarga de transformar la energía cinética que trae el agua en energía mecánica, mediante un movimiento de rotación mecánica. En Centroamérica se usan diferentes tipos de turbinas que se seleccionan de acuerdo con la relación de altura y caudal del agua, por ejemplo, tipo Pelton, Michell Banki, Francis, entre otras.
Sistema de transmisión mecánica	Es un sistema encargado de transmitir la energía mecánica de la turbina al generador.

	Existe la transmisión directa por medio de una unión entre la turbina y el generador o indirecta por medio de poleas, engranes, ejes, etc.
Instalaciones eléctricas	
Generador	El generador convierte la energía mecánica de la turbina en energía eléctrica; el generador puede ser asíncrono (cuando un motor eléctrico es usado como generador) o síncrono (generador). La potencia de producción de un generador depende del desnivel y caudal.
Regulador electrónico	Este componente se encarga de administrar electrónicamente la generación de energía, por medio de la regulación de la frecuencia y el voltaje. La generación de electricidad se hace “quemando” cualquier excedente por medio de resistencias (también llamados lastres), o disminuyendo el caudal a la turbina mediante impulsos electrónicos enviados a la válvula de aguja, un dispositivo que está en la entrada de agua de la turbina. Algunos sistemas, por razones de costos, no incluyen este componente, pero en este caso, se recomienda asesorarse adecuadamente con un especialista.
Transformadores	Los transformadores eléctricos son parte del sistema y permiten regular la tensión (voltaje), para evitar pérdidas en los cables conductores debido a la resistencia física. Mientras más alto el voltaje hay menor resistencia eléctrica en los cables, por lo cual se recomienda utilizar especialmente cuando la distancia entre la casa de máquinas y los puntos de consumo eléctrico son mayores a 2,000 metros.

Red eléctrica	Este elemento sirve para transmitir la energía generada en la microcentral hidroeléctrica desde la casa de máquinas hacia los puntos de consumo. En una microcentral hidroeléctrica se utilizan cables conductores a baja tensión (110 a 240 Voltios) o medias tensiones (750 a 24,700 Voltios).
---------------	--

Fuente: Lazo y Urbina (2015), BUN-CA (s/f).

De acuerdo con el manual de ESHA (2006) además de los elementos de la Tabla 1, es importante considerar que ofrece un enfoque integral para la planificación, diseño, construcción y operación de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), proporcionando un enfoque metodológico que abarca desde la identificación del sitio hasta la conexión a la red eléctrica, incluyendo la ingeniería, el impacto ambiental, la economía del proyecto que servirá de base en este proyecto para determinar aspectos importantes a considerar para las microcentrales hidroeléctricas.

1.1.2. Tipos de turbinas

La turbina hidráulica es el componente principal de una microcentral, ya que transforma la energía cinética y potencial en un movimiento rotacional que se transfiere al generador eléctrico. Existen diferentes tipos de turbinas hidráulicas entre ellas, los de acción o reacción. Los criterios más importantes para la selección del tipo de turbina son las condiciones topográficas e hidrológicas del sitio, es decir, la carga hidráulica y caudal respectivamente (Paish, 2002).

Las turbinas de acción son aquellas donde se aprovecha la presión dinámica debido a la velocidad del agua al momento de accionar la turbina. Algunas de las turbinas de acción más utilizadas son las Pelton, Turgo y Michell-Banki (Morales et al., 2014). A diferencia de la turbina de acción, en la cual el rodete opera al aire libre, la turbina de reacción aprovecha la presión estática al trabajar en el interior de compartimentos cerrados a presión superior a la atmosférica. Las turbinas de reacción más comunes descritas en la literatura son las turbinas Francis, Kaplan y Bulbo (Morales et al., 2014). Zamora-Juárez et al. (2023), evaluaron el rendimiento de una microcentral hidroeléctrica que opera a partir de un sistema de cosecha de lluvia mediante la optimización de la caracterización geométrica de una turbina tipo Pelton, ya que la selección para este tipo de turbina se debe a su capacidad de trabajar con cargas hidráulicas altas y valores de caudal bajo.

Zamora-Juárez et al. (2022), analizaron microcentrales que operan con turbinas tipo Vortex como una opción conveniente para generar beneficios adicionales tales como poseer una importante adaptabilidad a los cauces naturales (tanto en zonas urbanas como rurales), incrementar la aireación del agua de forma natural debido a la alta velocidad superficial y finalmente que pueden ser instaladas en un mismo cauce sin producir disturbios o variaciones de potencia entre ellas mismas.

1.2. Relación entre *emergy accounting* (EA) y análisis de ciclo de vida (ACV)

El ACV es un método utilizado para evaluar los posibles impactos ambientales de un bien o servicio desde la adquisición de materias primas, pasando por las fases de producción y uso, hasta la gestión de residuos (Rugani y Benetto, 2012). Los impactos ambientales resultantes son causados por el consumo de recursos, las emisiones de sustancias al medio ambiente natural y otros intercambios ambientales definidos por las normas ISO y las directrices del Manual ILCD (ISO, 2006; ISO4, 2006, 1404; CCI, 2010).

Otro método de evaluación ambiental es el *emergy accounting*. Este se define como la energía disponible (o exergía) de una forma, utilizada directa e indirectamente para producir un producto o servicio. El concepto *emergy accounting* se basa en los principios termodinámicos que trata de cuantificar la sostenibilidad de un sistema ecológico de los recursos energéticos y materiales utilizados en el proceso o los procesos de trabajo que generan un producto o servicio, calculado en unidades de una forma de energía que son los emjoules solares (seJ) la unidad de medida de la emergía (Brown y Ulgiati, 2004).

La integración de ambos métodos hace posible una evaluación sistémica y sistemática de cada fase del proceso investigado, a través de la comprensión de las emisiones, los impactos y el soporte ambiental (Santagata et al., 2020). Algunos autores como Rugani y Benetto (2012) han implementado el Inventario de ACV para lograr una mejora de las evaluaciones de *emergy accounting* para extender los límites de los sistemas utilizando la perspectiva “cradle to grave” en un análisis de ciclo de vida (ACV) (Du et al., 2022).

Se han aplicado métodos de análisis emergético en el campo de la energía hidroeléctrica, sin embargo, la mayoría de los análisis emergéticos de proyectos hidroeléctricos consultados se han centrado en la evaluación de centrales hidroeléctricas convencionales (Brown y McClanahan, 1996).

1.2.1. Etapas del análisis de ciclo de vida

El ACV cuantifica los impactos ambientales de un producto desde el inicio hasta su fin, abarcando adquisición de materias primas, fabricación, distribución, uso y fin de vida útil (Figura 2). Cada etapa

tiene insumos (materias primas y energía) y resultados (residuos y emisiones), y se pueden desarrollar con diferentes alcances (Haya, 2016).

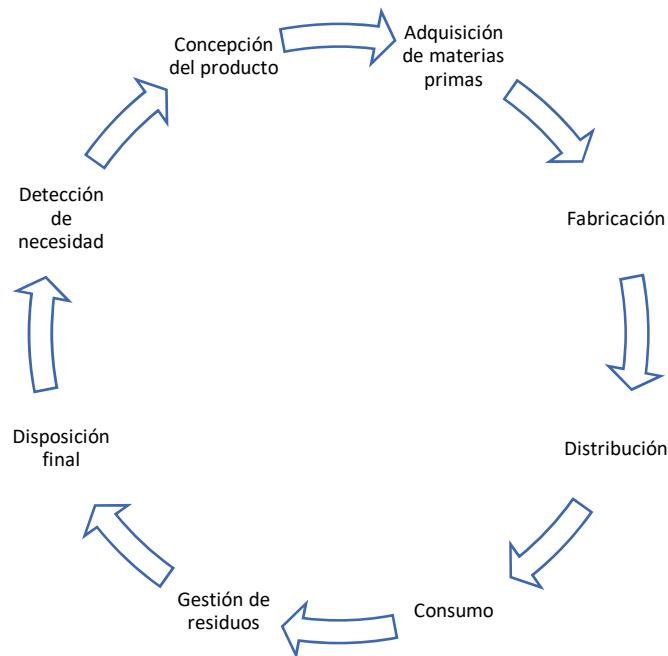


Figura 2. Etapas del análisis de ciclo de vida

Fuente: Turín Sedano et al., (2021).

Considerando las etapas del ciclo de vida, los enfoques más comunes en el desarrollo de un ACV son:

- De puerta a puerta (Gate to gate): sólo incluye las actividades del proceso productivo de la empresa.
- De cuna a puerta (Cradle to gate): abarca desde la extracción y preparación de materias primas hasta el proceso productivo de la empresa.
- De puerta a puerta (Gate to gate): considera tanto el proceso productivo como la gestión de los residuos generados.
- De cuna a tumba (Cradle to grave): cubre desde la preparación de las materias primas hasta la gestión final de los residuos.
- De cuna a cuna (Cradle to cradle): contempla todo el ciclo de vida del producto, incluyendo su reincorporación al proceso productivo.

1.2.2. Análisis del inventario del análisis de ciclo de vida

De acuerdo con la norma ISO 14040, el inventario de análisis de ciclo de vida (ACV) consiste en la recopilación y la cuantificación de entradas y salidas del sistema durante su ciclo de vida.

Para la elaboración del inventario de ACV es necesario determinar los flujos de materiales, energía y emisiones de todos los sistemas que conforman el producto y en todas las etapas de su ciclo de vida:

- Entradas de energía, materias primas y otras entradas físicas
- Productos, co-productos y desperdicios
- Emisiones de aire
- Descargas al agua y suelo

1.2.3. Aplicaciones de *emergy accounting* (EA) y análisis de ciclo de vida (ACV)

Tassinari et al. (2016), en su trabajo exploran la posibilidad de transformar los flujos e índices emergéticos en medidas monetarias y de área en dos centrales hidroeléctricas brasileñas (Jupia y Porto Primavera) ubicadas en una misma cuenca hidrográfica en términos de los recursos globales necesarios para apoyar a estas empresas utilizando un enfoque del lado de los donantes.

Fang et al. (2015), exploran acerca de la construcción de centrales hidroeléctricas asociada con efectos secundarios sobre el medio ambiente, de los cuales las represas bloquean los procesos naturales de los entornos acuáticos a través de la intervención humana, alterando significativamente la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas fluviales, llevando a cabo una evaluación de la salud de los ecosistemas para describir la condición de los ecosistemas fluviales perturbados en función de la emergía.

Du et al. (2022) proponen un método de estimación de emergía para evaluar la sostenibilidad ambiental, mencionando que resultados de esta evaluación podrían tener una mayor referencia para la planificación hidroeléctrica en las cuencas hidrográficas.

Capítulo 2. Materiales y métodos

En la Figura 3, se muestra la estructura metodológica que compone el trabajo de tesis en el cual se muestran las etapas correspondientes descritas a continuación:

En la etapa 1, se contextualiza el estudio de la generación de energía hidroeléctrica a microescala mediante la definición de condiciones y variables necesarias para realizar un inventario basado en el ACV. Para ello, son consideradas dos tipos de turbinas, un tipo Vortex para la generación de energía en escurrimientos superficiales y; una de tipo Pelton para captación de agua de lluvia. Por lo tanto, este proyecto proporciona una perspectiva y uso del modelo para la conocer la sustentabilidad sobre el uso de diseños específicos, que de fiabilidad en la eficiencia de su generación de energía eléctrica. Sin embargo, por medio de esta herramienta de impacto ambiental determina la información requerida en un análisis de *emergy accounting*.

En la etapa 2, se realiza la concepción del modelo gráfico general por medio del inventario de ACV previo obtenido en la etapa 1 y las relaciones causales (flujos de entrada y salida) identificadas para microcentrales hidroeléctricas, considerando los dos sistemas de aplicación para cada tipo de turbina (Pelton y Vortex) y así identificar el *unit emergy value* (UEV) y emergía de los flujos de materia, energía y económicos específicos.

En la última etapa (etapa 3), se aplica el modelo considerado para cada tipo de tecnología propuesta en la caracterización de la zona de estudio, considerando las variables hidrológicas, de infraestructura y fisiográficas. Con ello, por medio de los índices emergéticos, será evaluada la sustentabilidad para cada tipo de tecnología.

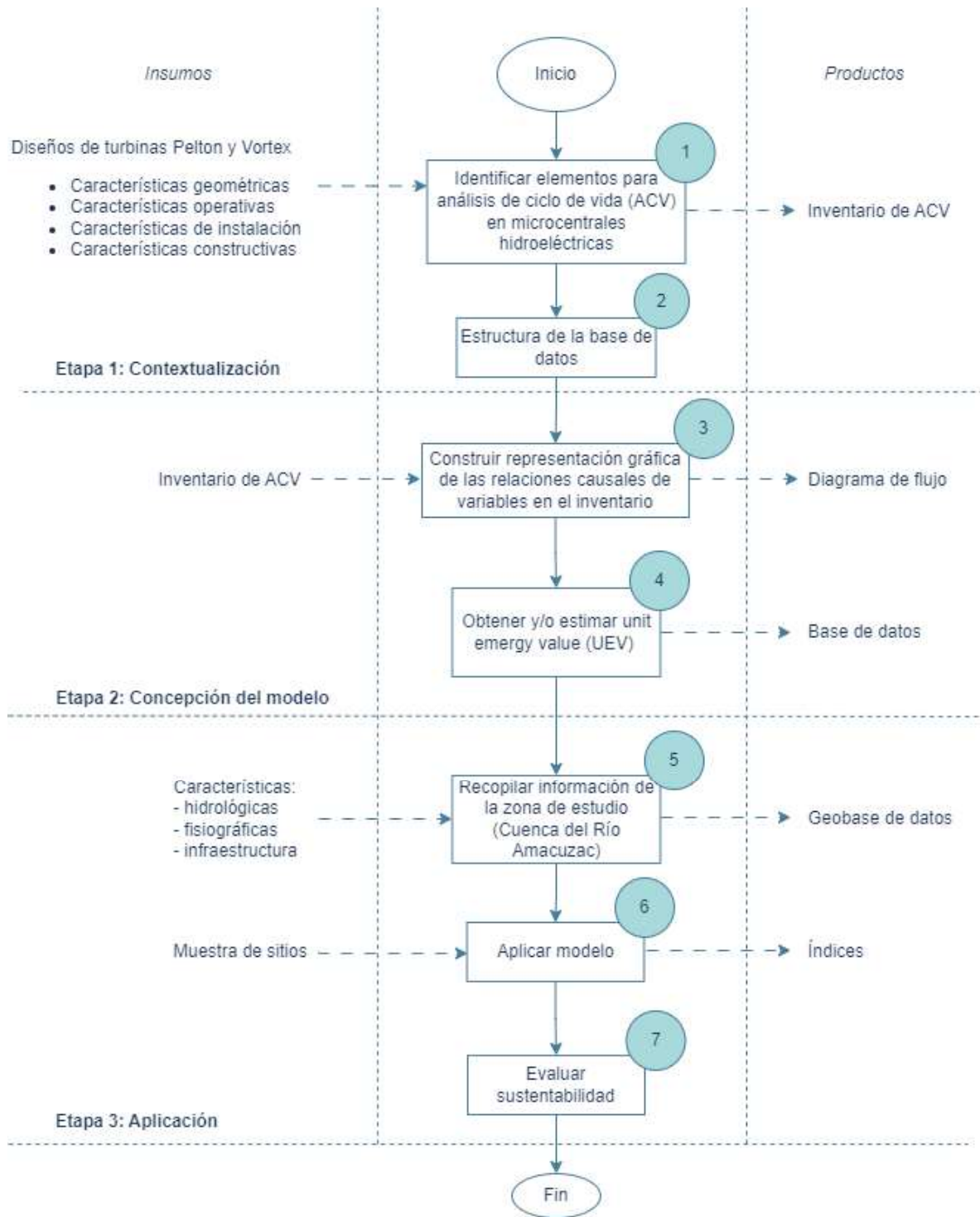


Figura 3. Diagrama metodológico

Fuente: Elaboración propia.

2.1. Etapa 1: Contextualización

2.1.1. Elementos de análisis de ciclo de vida (ACV) en microcentrales hidroeléctricas

La primera etapa consiste en la recopilación de información acerca de las características geométricas, de construcción, operación y rendimiento de microcentrales hidroeléctricas que operan con las turbinas tipo Pelton y Vortex diseñados con base en las propuestas de Zamora, (2019) Zamora, (2022), Zamora-Juárez et al., (2022) y Zamora-Juárez et al., (2023) siendo éstas, las turbinas base o “tipo”. Con ello, se pretende elaborar un inventario de ACV que considere, además de insumos, transporte y construcción, los bienes y servicios involucrados empleados de manera directa o indirecta en la generación de energía eléctrica a microescala.

2.1.2. Base de datos

La base de datos implica una colección de flujos de entradas y salidas para todos los procesos considerados en el “sistema” de la implementación de microcentrales hidroeléctricas que operan con turbinas tipo Pelton y Vortex. En esta base se muestra el formato de escala espacial y temporal de los elementos que facilitarían la estimación de los índices energéticos.

2.2. Etapa 2: Concepción del modelo

2.2.1. Representación gráfica de las relaciones causales de variables en el inventario

En la segunda etapa, concepción del modelo, se presentan los diagramas donde se identifican los elementos representativos involucrados del inventario de ACV en la generación de energía en microcentrales que operan con turbinas Pelton o Vortex.

De acuerdo con la metodología de *emergy accounting* los componentes y flujos dentro de los diagramas que representan el o los sistemas suelen organizarse de izquierda a derecha, reflejando los flujos de energía disponible a la izquierda y disminuyendo hacia la derecha con cada transformación de energía. Para la elaboración del modelo conceptual, se toman en consideración los recursos según su naturaleza, renovables (R), no renovables (N) y los insumos de la economía o socioeconómicos como bienes y servicios comprados (F) (Brown y Ulgiati, 2004).

Así mismo, para identificar los flujos se sugiere el siguiente esquema de colores:

- Amarillo: Luz solar y dispersión del calor.
- Verde: Productores.
- Azul: Agua, nutrientes y recursos materiales.
- Rojo: Consumidores, ciudades, unidades de alta transformidad es decir productos o servicios que han requerido mucha energía y procesos para ser producidos.
- Morado: Económico.

2.2.2. Unit emergy value

Los diagramas representativos de los flujos en los sistemas permiten visualizar de manera más clara las entradas y salidas a considerar para los valores de *unit emergy value* (UEV). Los UEV se pueden estimar en función de la emergía necesaria para producirlos (Brown y Ulgiati, 2004), así mismo existen investigaciones, artículos científicos, trabajos de tesis o la página oficial International Society for the Advancement of Emergy Research (ISAER) donde se encuentran los handbook emergy evaluation (Folios 1-5). En la tabla de evaluación emergética se pueden disponer los datos convencionalmente como se muestra en la Tabla 2.

- Columna 1: es el número de la partida, que también es el número de la nota a pie de página que se encuentra debajo de la tabla donde se citan las fuentes de datos sin procesar y se muestran los cálculos.
- Columna 2: nombre del elemento, que también se muestra en el diagrama.
- Columna 3: valor del dato.
- Columna 4: las unidades de cada elemento de datos sin procesar.
- Columna 5: emergía por unidad (seJ/unidad).
- Columna 6: los emjoules solares (seJ) de un flujo dado, calculada como entrada bruta multiplicada por el *unit emergy value* (UEV) (columna 3 por columna 5).
- Columna 7: los valores resultantes de esta columna expresan la cantidad de actividad económica que puede ser soportada por un determinado flujo o almacenamiento de emergía.

Tabla 2. Formato de tabla de evaluación emergética

1	2	3	4	5	6	7
Nota	Elemento	Dato	Unidad	UEV (seJ/unidad)	Emergía (seJ/año)	Valor (em\$/año)
1.						
2.						
...						

Fuente: Torres-Verzagas et al. (2019).

2.3. Etapa 3: Aplicación

2.3.1. Descripción de la zona de estudio

La Cuenca del Río Amacuzac (Figura 4) se localiza entre los estados de Morelos, Estado de México, Guerrero, Puebla y la Ciudad de México. Abarca una superficie de 8,946 km², esta característica la posiciona como una de las cuencas de mayor extensión en la Región Hidrológica 18 (Balsas) y tiene como principales afluentes a los ríos Apatlaco, Cuautla, Yautepec y Tembembe (Guzmán y Vargas, 2009).

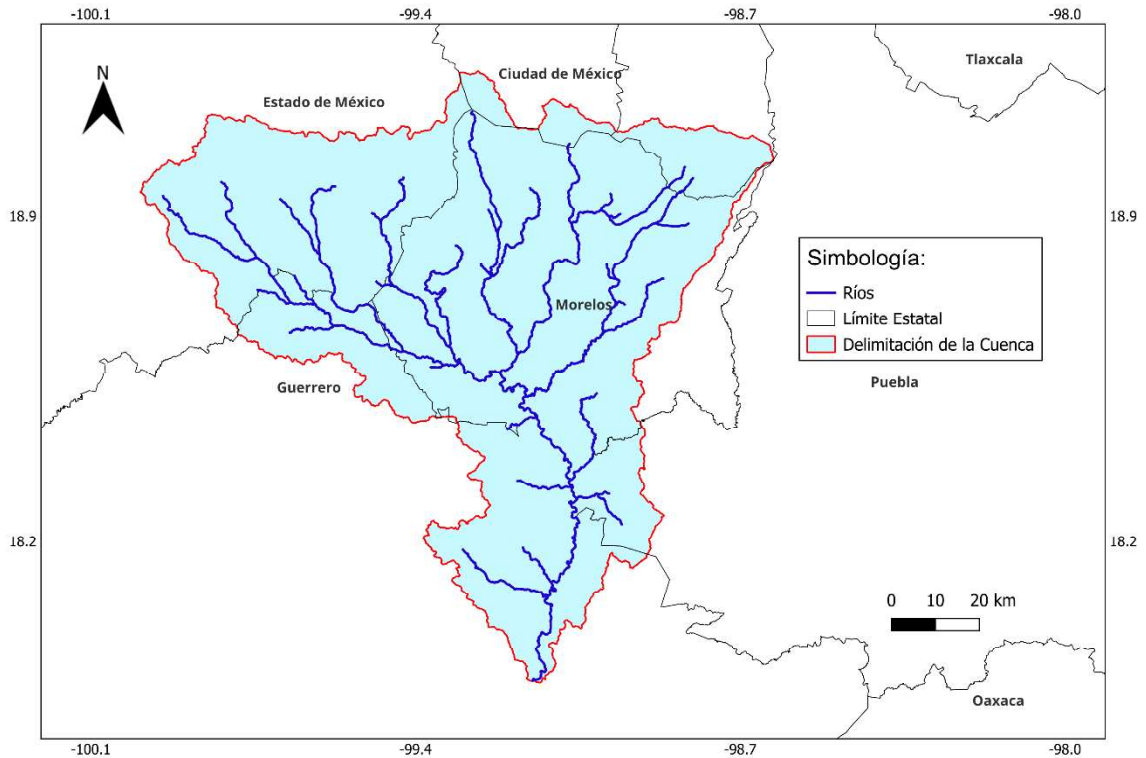


Figura 4. Ubicación de la Cuenca del Río Amacuzac

Fuente: Elaboración propia.

La precipitación media anual se encuentra entre 800 y 1500 mm; el clima de la cuenca en promedio es cálido, la parte alta de la cuenca se clasifica mayoritariamente como semifrío subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C. En la parte media de la cuenca domina el clima semicálido subhúmedo con temperatura media anual mayor de 18°C. Finalmente, en la fracción más al sur en el estado de Morelos y Guerrero el clima es mayoritariamente cálido subhúmedo con temperatura media anual mayor de 22°C (El Colegio de México, 2020).

El Río Amacuzac, se ha considerado como área prioritaria de conservación y algunas partes de sus ríos se encuentran dentro de áreas naturales protegidas por nombrar uno se encuentra el parque Nacional Grutas de Cacahuamilpa, la cual es considerada de Importancia para la conservación de las Aves (Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo sobre el Agua, 2012).

A partir del modelo digital de elevación de la cuenca del Río Amacuzac, se integró el mapa de altitudes (Figura 5), cuyo rango varía entre 860 y 3,892 m.s.n.m. Esta cuenca forma parte del sistema orográfico de la cordillera Neovolcánica, la cual representa una región estratégica para el aprovechamiento hidroenergético por su considerable gradiente altitudinal.

Al norte, la cuenca limita con la Ciudad de México y el Estado de México, donde se localiza el parteaguas principal, conformado por la Sierra del Chichinautzin, situada en la zona limítrofe entre la Ciudad de México y el estado de Morelos. En esta región destacan elevaciones significativas, como el volcán Chichinautzin (3,420 m.s.n.m.), el cerro Ocolique (3,280 m.s.n.m.), las cumbres del Ajusco (3,250 m.s.n.m.) y, hacia el noreste, el volcán Popocatepetl, que alcanza una altitud de 5,650 m.s.n.m.

La diferencia altitudinal en la cuenca favorece el potencial para el desarrollo de microcentrales hidroeléctricas, ya que permite generar caídas de agua aprovechables para la producción de energía renovable a pequeña escala, contribuyendo así al suministro energético local y a la diversificación de fuentes sustentables.

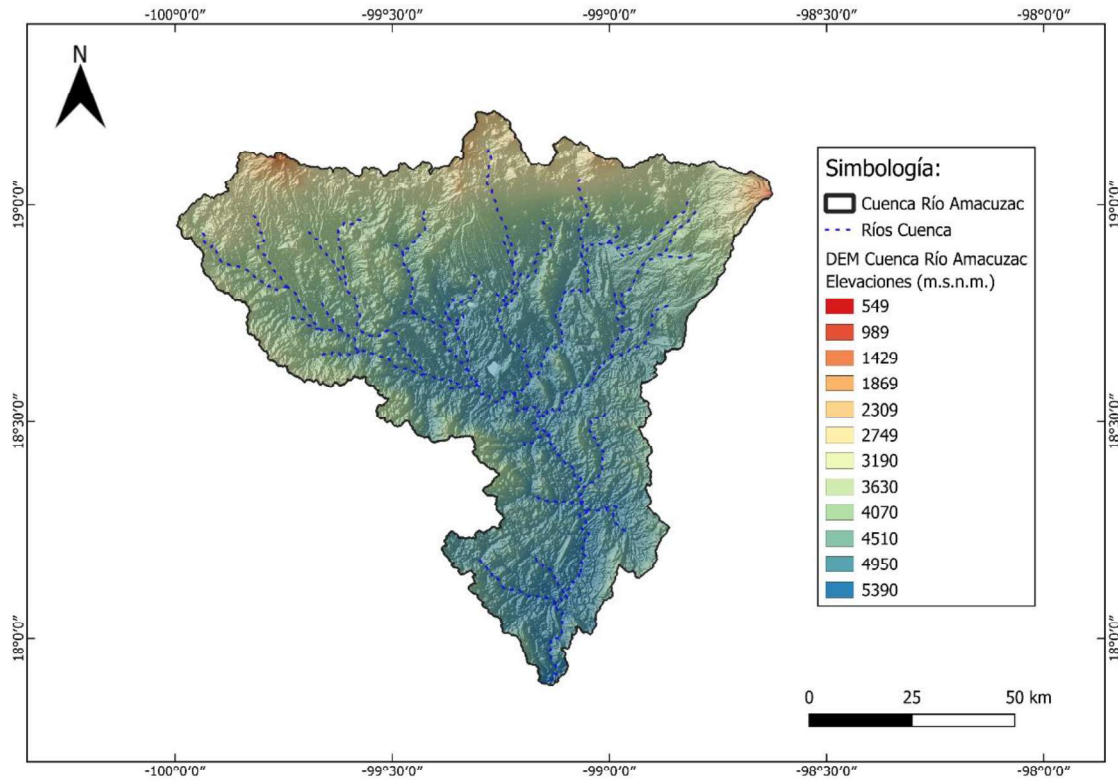


Figura 5. Elevaciones Cuenca Río Amacuzac

Fuente: Elaboración propia.

2.3.2. Recopilación de información de la zona de estudio (Cuenca del Río Amacuzac)

La recopilación de información de la zona de estudio considera las características fisiográficas, hidrológicas y climatológicas. En el desarrollo de la etapa 3, se delimitó la zona de estudio de la Cuenca del Río Amacuzac haciendo uso de herramientas de sistemas de información geográfica SIG y con base en datos oficiales del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) para obtener información sobre las estaciones hidrométricas, el marco geoestadístico del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para ubicar zonas con presencia poblacional, el geoportal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) para ubicar los ríos principales en la cuenca y la información estadística climatológica en el Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para obtener información sobre las estaciones climatológicas.

2.3.3. Aplicación del modelo

En la tercera etapa se construyó, una geobase de datos de la Cuenca del Río Amacuzac. La evaluación de la sustentabilidad del modelo se lleva a cabo por medio de índices emergéticos y valores de UEV utilizados en estudios de investigación previos (Du et al., 2022; Tassinari et al., 2016; Fang et al., 2015). Para los índices emergéticos se tiene el rendimiento en emergencia (EYR; Ec. (2)), que es la emergencia total usada por unidad de emergencia invertida, índice de carga ambiental (ELR, (3)), el índice de sostenibilidad (ESI; Ec. (4)) y renovabilidad o el porcentaje de recursos (%R; Ec. (5)). Estos índices son una función de los flujos de relaciones causales dentro de la evaluación en sistemas de generación de energía hidroeléctrica a microescala donde así mismo se especificará bajo qué condiciones de operación estarán sujetas las microcentrales en la Cuenca del Río Amacuzac (Tabla 3).

$$Y = R + N + F \quad (1)$$

Donde:

$Y =$ Rendimiento total de emergencia del sistema de producción (seJ/año)

$R =$ Recursos renovables (seJ/año)

$N =$ Recursos no renovables (seJ/año)

$F =$ Recursos del sistema socioeconómico (seJ/año)

$$EYR = \frac{Y}{F} = \frac{R + N + F}{F} \quad (2)$$

Donde:

$EYR =$ El rendimiento en emergencia (adimensional)

$Y =$ Rendimiento total de emergencia del sistema de producción (seJ/año)

$F =$ Recursos del sistema socioeconómico (seJ/año)

$$ELR = \frac{(N + F)}{R} \quad (3)$$

Donde:

$ELR =$ El índice de carga ambiental (adimensional)

$N = \text{Recursos no renovables (seJ/año)}$

$F = \text{Recursos del sistema socioeconómico (seJ/año)}$

$R = \text{Recursos renovables (seJ/año)}$

$$ESI = \frac{EYR}{ELR} \quad (4)$$

Donde:

$ESI = \text{El índice de sostenibilidad (adimensional)}$

$EYR = \text{El rendimiento en energía (adimensional)}$

$ELR = \text{El índice de carga ambiental (adimensional)}$

$$R\% = 100 \left(\frac{R}{Y} \right) \quad (5)$$

Donde:

$R\% = \text{El porcentaje de recursos o renovabilidad (\%)}$

$Y = \text{Rendimiento total de energía del sistema de producción (seJ/año)}$

$R = \text{Recursos renovables (seJ/año)}$

$$UEV = \frac{\text{Energía total de entrada}}{\text{Cantidad de producto o servicio}} \quad (6)$$

Donde:

$\text{Energía total de entrada} = \text{Suma de todos los flujos (seJ/año)}$

$\text{Cantidad de producto o servicio} = \text{Producto o servicio generado (unidad física)}$

El análisis mediante *emergy accounting* proporciona una medición objetiva para evaluar la sostenibilidad, integrando dimensiones desde el aspecto del entorno local de los recursos naturales, no naturales y socioeconómico. Los umbrales aquí presentados (Tabla 3) son una referencia para interpretar los resultados del estudio, identificando oportunidades de mejora hacia un manejo más eficiente de los recursos en sistemas como lo son la implementación de microcentrales hidroeléctricas.

Tabla 3. Índices emergéticos

Índice	Valor		Significado
EYR	>1	indica que un proceso entrega la misma cantidad de emergía que se proporcionó para impulsarlo, y que no es capaz de explotar útilmente ningún recurso local.	Estima la dependencia que tiene el proceso sobre los recursos, es decir, es una medida de la capacidad de un proceso para explotar y poner a disposición recursos locales invirtiendo recursos externos.
	<1	Sistemas insostenibles.	
ELR	<3	Impacto ambiental bajo.	es una medida de la perturbación de la dinámica ambiental local, generada por el desarrollo impulsado desde el exterior.
	3 – 10	Impacto ambiental moderado.	
	>10	Impactos ambientales mucho mayores.	
ESI	<1	depende de la economía externa, consume más emergía de la que puede sostenerse con recursos renovables.	Refleja la capacidad que tiene un sistema para suministrar productos o servicios con un impacto ambiental bajo y un beneficio económico.
	1	entrega la misma cantidad de emergía que se proporcionó para impulsarlo.	
	1 - 10	Es sustentable a mediano plazo.	
	>10	Es sustentable a largo plazo.	
%R	>50%	Sistema renovable.	A largo plazo, solo procesos con un alto %R son sostenibles.
	10 – 50%	Contribución significativa a sistema renovable.	

	<10%	Dominio de recursos no renovables en el sistema.	
--	------	--	--

Fuente: (Brown y Ulgiati, 2004), (Zavala-Reyna et al., 2017).

2.3.4. Evaluación de la sustentabilidad

En la etapa final bajo la aplicación del modelo propuesto considerando las características de las turbinas “tipo” de las microcentrales hidroeléctricas que operan con turbinas Pelton y Vortex evaluadas en trabajos como Zamora, 2019, 2022; M. A. Zamora-Juárez et al., 2022; M. Á. Zamora-Juárez et al., 2023 y para las condiciones hidrológicas y climatológicas de el caso de estudio en la Cuenca del Río Amacuzac que mediante los índices emergéticos basados en *emergy accounting* donde se evalúa la sustentabilidad de cada tipo de tecnología.

Capítulo 3. Resultados y discusión

3.1. Etapa 1: Contextualización

Teniendo en cuenta el análisis de ciclo de vida de una microcentral hidroeléctrica, la disponibilidad de datos para la fase de construcción, incluidos los detalles sobre el transporte, el procesamiento y las materias primas, se seleccionó un límite del sistema "De cuna a puerta" (cradle to gate) que toma en cuenta únicamente la fabricación del producto (extracción y acondicionamiento de materias primas) y la construcción/instalación hasta el proceso productivo (generación de energía eléctrica) de una microcentral hidroeléctrica como fases dentro del análisis. Para ello, el alcance se determinó dentro de un diagrama general de la concepción del fenómeno que modela la implementación de microcentrales hidroeléctricas que operan con turbinas Pelton y Vortex (Figura 6).

Con esta representación, fue posible la distinción de las etapas de análisis de ciclo de vida en la operación entre turbinas Pelton y Vortex en una microcentral hidroeléctrica, considerando los elementos hidrológicos, ambientales, fisiográficos y artificiales existentes.

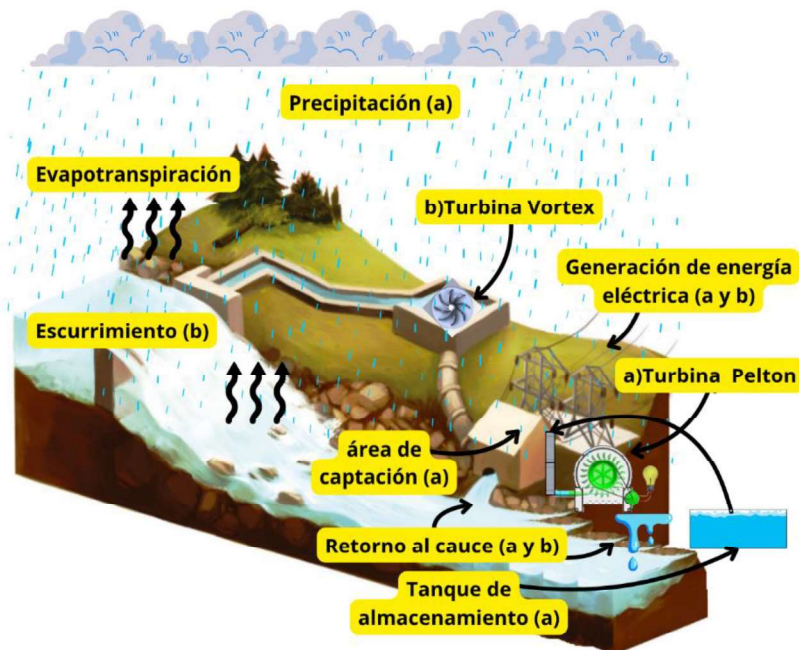


Figura 6. Diagrama general de la concepción del fenómeno para microcentrales hidroeléctricas

Fuente: Elaboración propia basado en ESHA, (2006).

Dentro de las fases del análisis de ciclo de vida en microcentrales hidroeléctricas se identificaron tres principales: la fase de extracción de recursos y construcción (adecuación), seguido de la fase del equipo para la generación de energía eléctrica y finalmente la fase de operación y mantenimiento para la generación de energía eléctrica.

En la fase de extracción de recursos y construcción se tomaron en cuenta los requerimientos para la adecuación dependiendo del tipo de turbina (Pelton y Vortex). En cada fase se identificó la presencia, y el posible grado de intensidad, del impacto presentado por las correspondientes actividades (Tabla 4). Por ejemplo, para la turbina Vortex se considera una derivación como una adecuación del terreno o la infraestructura para conducir el escurrimiento como materia prima el cual puede ser retornado a su cauce y para la turbina tipo Pelton se consideró la captación de precipitación como materia prima la cual puede o no ser almacenada. La fase de equipo para la generación de energía eléctrica engloba la construcción o manufactura externa de la turbina y por último la generación que tiene como producto la energía eléctrica a disposición del usuario con la operación y mantenimiento.

Una central hidroeléctrica convencional requiere de un gran volumen de agua para su funcionamiento es por eso que para pequeña generación no se encuentran muchas limitaciones. En la modificación de paisaje como impacto hacia el suelo o alteración del cauce para turbinas tipo Pelton no es considerado ya que no requiere más que un área de captación que no afecta directamente al cauce, por lo que no genera residuos de construcción, a su vez si es necesario adecuar, como ya se mencionó, un área de captación adecuada para su funcionamiento mientras que para los tipos de centrales hidroeléctricas convencionales y microcentrales hidroeléctricas que operan con turbinas tipo Vortex no lo requieren y no son consideradas.

El control sobre la generación de energía eléctrica toma más relevancia en una central hidroeléctrica convencional que requiere de equipos altamente sofisticados para su generación y distribución, mientras que para las microcentrales no se requieren de equipos de gran magnitud para el control y sistemas de refrigeración por lo que no se consideran.

Tabla 4. Fases de ACV

Fase de ACV	Impacto	Tipo de central hidroeléctrica		
		Convencional	Captación de lluvia (Pelton)	Esguerramiento superficial (Vortex)
1.Extracción de recursos y construcción (adecuación)	Extracción de materias primas (uso de materiales de construcción) retiro de suelo, modificación fisiográfica)	● ● ●	●	● ●
	Modificación de paisaje (alteración de cauces, suelo, cambio de uso de suelo)	● ● ●		●
	Pérdida de biodiversidad	● ● ●		
	Contaminación por construcción (emisión de polvo, ruido, residuos sólidos y contaminación del agua)	● ● ●		●
	Acondicionamiento de superficie de captación		●	
	Construcción de turbina	● ● ●	●	●

2. Equipo para la generación de energía eléctrica	Eje de transmisión y generador eléctrico	● ●	●	●
	Válvulas y compuertas	● ● ●	●	●
	Transformadores	● ● ●	●	●
	Paneles de control (SCADA)	●		
	Sistemas de refrigeración	●		
	Baterías		●	●
3. Operación para la generación de energía eléctrica	Carga hidráulica	● ● ●	● ●	●
	Caudal	● ● ●	●	● ●
	Almacenamiento	● ● ●	●	

Fuente: (Lazo y Urbina, 2015), (ESHA, 2006).

Donde:

● ● ●: impacto alto

● ●: impacto medio

●: impacto bajo

3.1.2. Inventario análisis de ciclo de vida de una microcentral hidroeléctrica

Algunos autores (Ueda et al., 2019, Gallagher et al., 2015 y Martínez-Vallejo et al., 2022) muestran los principales procesos, materiales de construcción o materia prima considerada dentro de los límites de un sistema de construcción de microcentrales hidroeléctricas, los cuales fueron clasificados por cada fase como se muestra en la Tabla 5, como un inventario de análisis de ciclo de vida (ACV). Sin embargo, fue necesario incluir materiales y servicios adicionales que intervienen en la producción de energía a microescala. Por ejemplo, en la fase de equipo se consideró, de manera adicional, la manufactura de las turbinas en polímeros de alta densidad o, en su caso, materiales metálicos ya que con esto se puede buscar ajustarse a las necesidades de los recursos o a la zona de estudio.

Tabla 5. Procesos y materiales generales dentro de la construcción de una microcentral hidroeléctrica

1.Extracción de recursos y construcción (adecuación)			2.Equipo para la generación de energía eléctrica	3. Operación para la generación de energía eléctrica
Tubería PVC	Forjado	Transporte de materiales	Excavación	Producción de electricidad
Cemento	Ensamblar	Transporte de material procesado	Soldadura de metales	Mantenimiento
Arena	Mecanizado	Visitas al sitio	Bombeo de hormigón	Refacción
Grava	Plástico turbinas (PLC/PLA)	Aluminio	Trabajos de grúa	Reemplazo
Acero	combustible	Madera	Relleno de roca	Servicio
Concreto	Cobre	Policarbonato	Trabajo del paisaje	Generador
Piedra	Caucho	Accesorios tuberías	Polímero de alta densidad	Transformador

Fuente: (Ueda et al., 2019), (Gallagher et al., 2015) y (Martínez-Vallejo et al., 2022).

3.2. Etapa 2: Concepción del modelo

3.2.1. Modelo conceptual bajo un enfoque de *emergy accounting* de una microcentral hidroeléctrica

El proceso de concepción del modelo conceptual general (Figura 8) de una microcentral hidroeléctrica inicialmente fue representado con diferentes configuraciones de modelos conceptuales previos (Figura 7) donde se analizó a detalle cada fase de los subsistemas considerados en la documentación de la información generada acerca de la implementación, operación y mantenimiento de microcentrales hidroeléctricas, elementos que a través de los flujos de energía, masa y económicos bajo el concepto de *emergy accounting* y contempladas durante el inventario de análisis de ciclo de vida (Tabla 4 y Tabla 5) que permitió englobar cada uno de los flujos e impactos que pudieran presentarse. Sin embargo, se encontraron importantes limitaciones en la representación de las causalidades en los flujos de energía y materia entre estas fases:

El suministro de materiales y servicios interviene de manera periódica a lo largo de los procesos, con la representación de los flujos transversales entre fases, se identificaron costos adicionales que deben ser imputados a los destinatarios finales. Por ello, deben ser incluidos más elementos de transacción económica. Por lo tanto, se determinó representarlos por diferentes elementos en lugar

de una sola fuente por fase por lo que se identificaron como materiales y servicios 1, 2, 3, 4 y 5 (M y S).

En la adecuación y generación de energía los cuales son procesos que generan externalidades adicionales al suministro de materiales y servicios, se propuso la representación de los flujos de energía y masa relacionados con procesos hidrológicos como la infiltración y evapotranspiración, así como conceptos como el caudal ecológico. Además, son representados algunos flujos transversales a las fases correspondientes a flujos de reutilización, retorno y disposición.

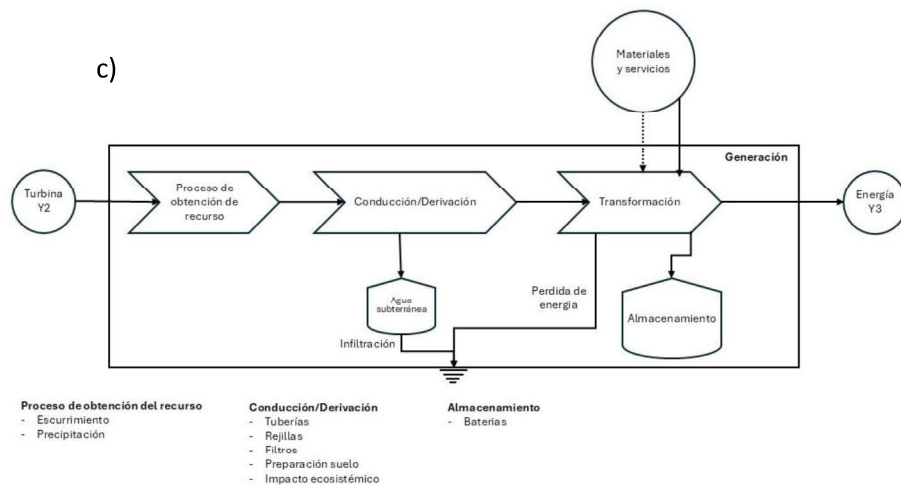
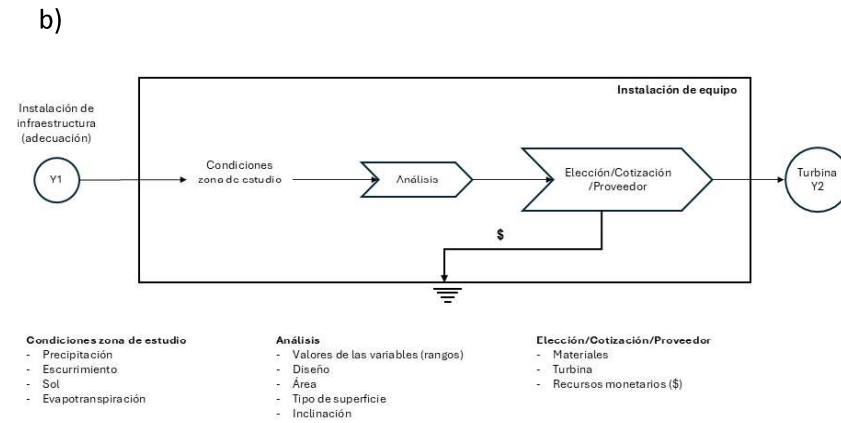
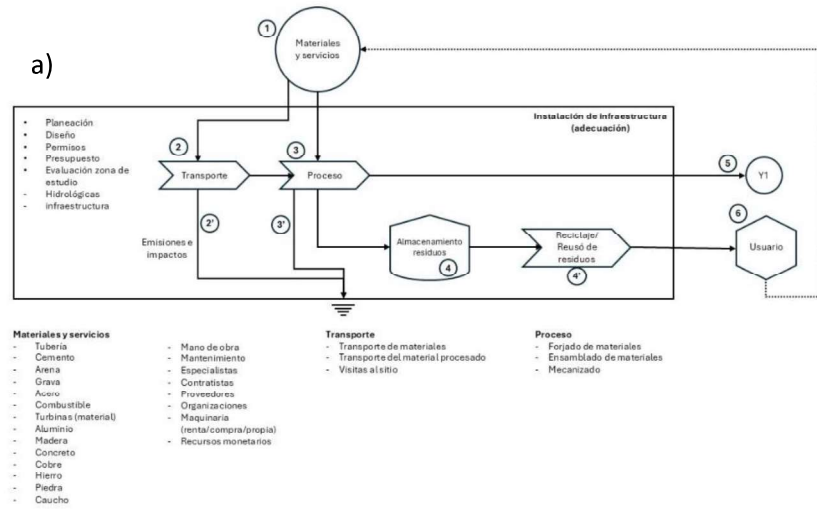


Figura 7. Modelos conceptuales: a) Instalación/adecuación de infraestructura, b) Instalación de equipo y c) Generación de energía eléctrica

Fuente: Elaboración propia.

Dentro del análisis del modelo conceptual general (Figura 8) como principal producto de este trabajo de investigación se identificaron un total de tres subsistemas (A, B y C), con 27 flujos de energía, 21 flujos de masa y 5 transacciones económicas. Para este último se relacionaron e identificaron 5 tipos de materiales y servicios según la necesidad del proceso, los cuales cuentan con un intercambio económico imputado al usuario.

A continuación, se describe de manera general la relación de los flujos dentro del sistema generado:

- 1 (Sol): La entrada de Sol se refiere a la energía solar que es utilizada o transformada en un sistema o proceso.
- 2 y 2': La energía potencial física y química contenida en la lluvia proviene del ciclo hidrológico impulsado por el Sol.
- 3 y 3': La evapotranspiración como salida en el modelo se refiere a la pérdida de agua desde la superficie terrestre al ambiente.
- 4 y 4': Las características fisiográficas y ambientales dependen de la zona de estudio.
- 5 y 5': La infiltración que conduce al almacenamiento de agua subterránea.
- 6 y 6': El agua subterránea puede recargar al agua superficial, en forma de caudal base.
- 7 y 7': Se tienen interacciones de masa y energía en el agua superficial con la subterránea.
- 8: El agua superficial nos asegura principalmente la disponibilidad del recurso.
- 9: El caudal ecológico es fundamental para mantener la biodiversidad en los ecosistemas acuáticos.
- 10: Al asegurar un flujo adecuado de agua durante todo el año, se pueden sostener los hábitats necesarios para diversas especies de plantas y animales.
- 11 y 11': El agua superficial suele ser conducida por medio de una derivación.
- 12, 12' y 12'': Los materiales y servicios son propios del tipo de derivación que se va a realizar.
- 13 y 13': El agua sigue su curso después de la derivación.
- 14 y 14': Parte de la construcción de la derivación conduce a residuos que pueden ser almacenados.
- 15 y 15': Depende de la disposición final de los residuos de pueden llevar a un segundo tratamiento.
- 16, 16' y 16'': El generar hasta un lugar de almacenamiento, o mover los residuos para su tratamiento o reutilización genera el uso de materiales y servicios.
- 17 y 17': Parte de los residuos suelen ser regresados al mismo cuerpo de agua.

- 18 y 18': Proporción del agua que se puede utilizar para la generación de energía eléctrica.
- 19, 19' y 19'': Los materiales y servicios que deber realizarse para poder hacer uso de un sistema de generación de energía.
- 20 y 20': Como pérdidas del sistema pueden generarse escurrimiento.
- 21 y 21': Es posible que después del uso se almacene el recurso.
- 22, 22' y 22'': El costo del almacenamiento suele ser elevado y depende de la demanda y el área de captación.
- 23 y 23': Siendo almacenado el recurso hídrico el destinatario puede darle diferentes usos.
- 24: La energía eléctrica es un producto generado, el cual es usado por el usuario.
- 25 y 25': El recurso hídrico utilizado puede llevarse a un tratamiento o reutilización.
- 26 y 26': El agua de retorno después de ser tratada si fue usada por el usuario regresa al ambiente.
- 27, 27' y 27'': Los costos de tratamiento y tipo dependen de las necesidades del usuario.

Qe: Caudal ecológico
 Qb: Caudal base
 Bi: Biodiversidad
 ET: Evapotranspiración
 Alm: Almacenamiento
 Esc: escurrimiento
 Div: Derivación
 Inf: Infiltración
 M y S: Materiales y servicios
 Trat. 1 y 2: Tratamiento
 A: Subsistema Hidrológico
 B: Subsistema de adecuación
 C: Subsistema de mecanismo para generación de energía eléctrica

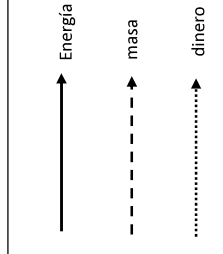
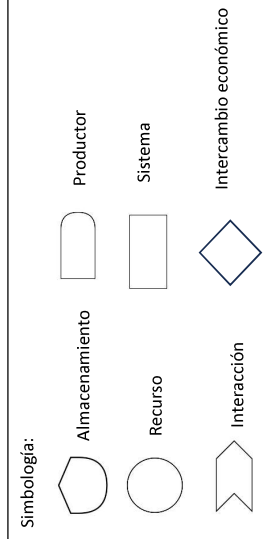
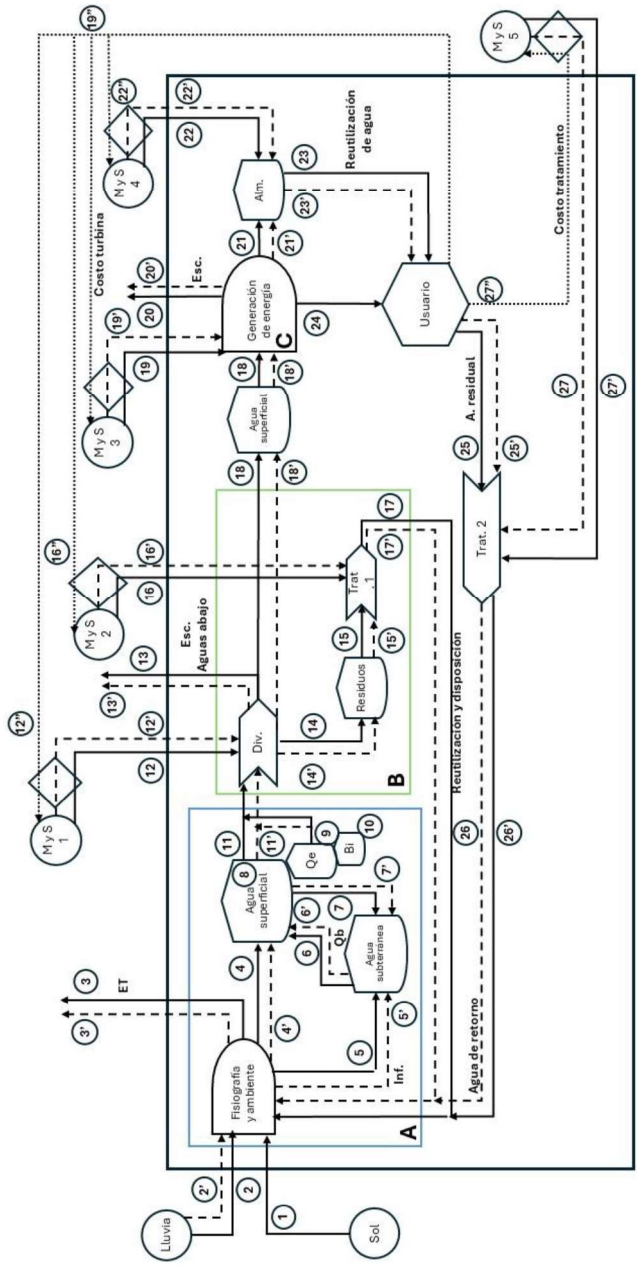


Figura 8. Modelo conceptual implementación de microcentrales hidroeléctricas
 Fuente: Elaboración propia.

3.3. Etapa 3: Aplicación

3.3.1. Recursos hídricos en la Cuenca del Río Amacuzac

Dadas las necesidades del proyecto, en el que se busca evaluar el modelo de *emergy accounting* para microcentrales hidroeléctricas que funcionen con una turbina Pelton o Vortex, los datos encontrados en el Sistema de Información Hidrológica (SIH) incluyen una base de datos históricos de estaciones hidrométricas y climatológicas, mediante la cual se ubicaron, analizaron haciendo el tratamiento de los datos de al menos 19 estaciones hidrométricas (Figura 9, Tabla 6 y ANEXOS) y 28 estaciones climatológicas (Figura 10 y Tabla 7) dentro de la cuenca donde se puede observar la proximidad de las zonas con presencia poblacional, a los ríos principales de la cuenca del Río Amacuzac.

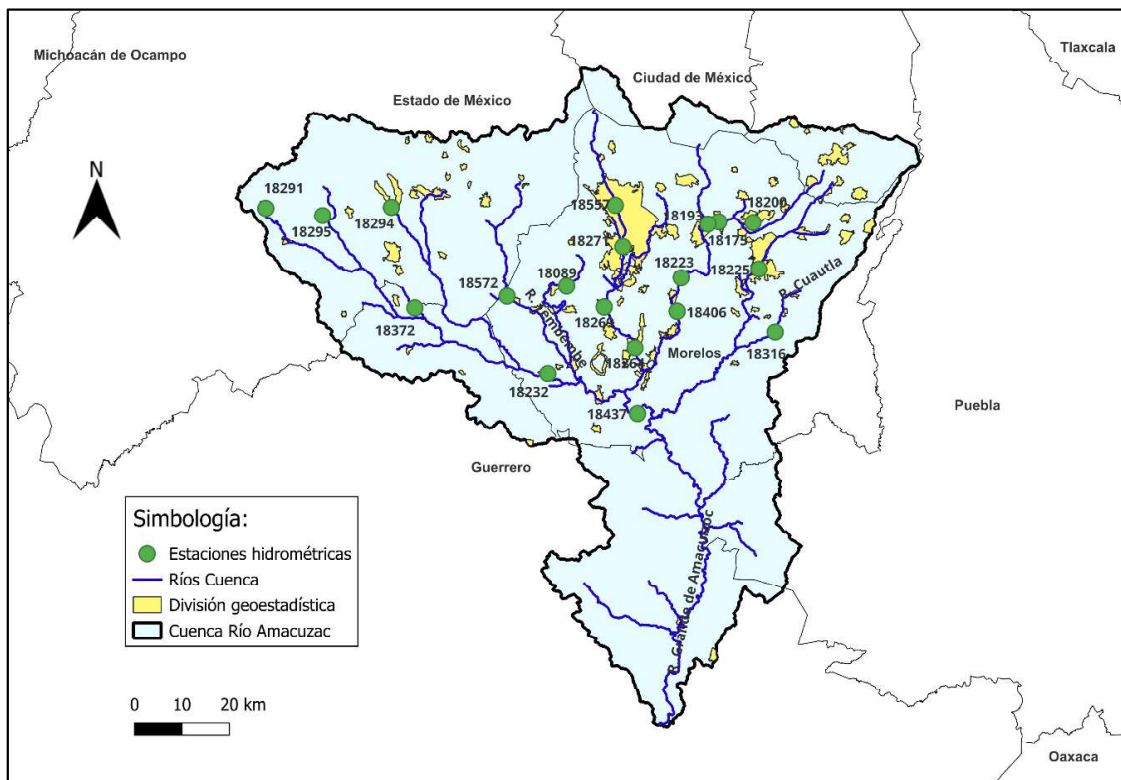


Figura 9. Estaciones hidrométricas de la Cuenca del Río Amacuzac

Fuente: Elaboración Propia

La evaluación de la turbina tipo Pelton se trabajó con los datos de precipitación de las estaciones climatológicas, se consideró para el análisis suponer el uso de la infraestructura existente dentro de la zona de estudio ya que en el contexto del análisis de sistemas de microcentrales hidroeléctricas representa una estrategia que puede garantizar la pertinencia y aplicabilidad de los resultados en

este trabajo de investigación. En particular, al evaluar una turbina tipo Pelton especialmente diseñada para aprovechar áreas de captación, es una consideración que permite integrar condiciones físicas, hidrológicas y operativas concretas del entorno, en consecuencia, dentro del trabajo de investigación de Zamora-Juárez et al., 2023 ya se tiene contemplada las características de operación de la turbina tipo e implementada con un área de captación (Tabla 8).

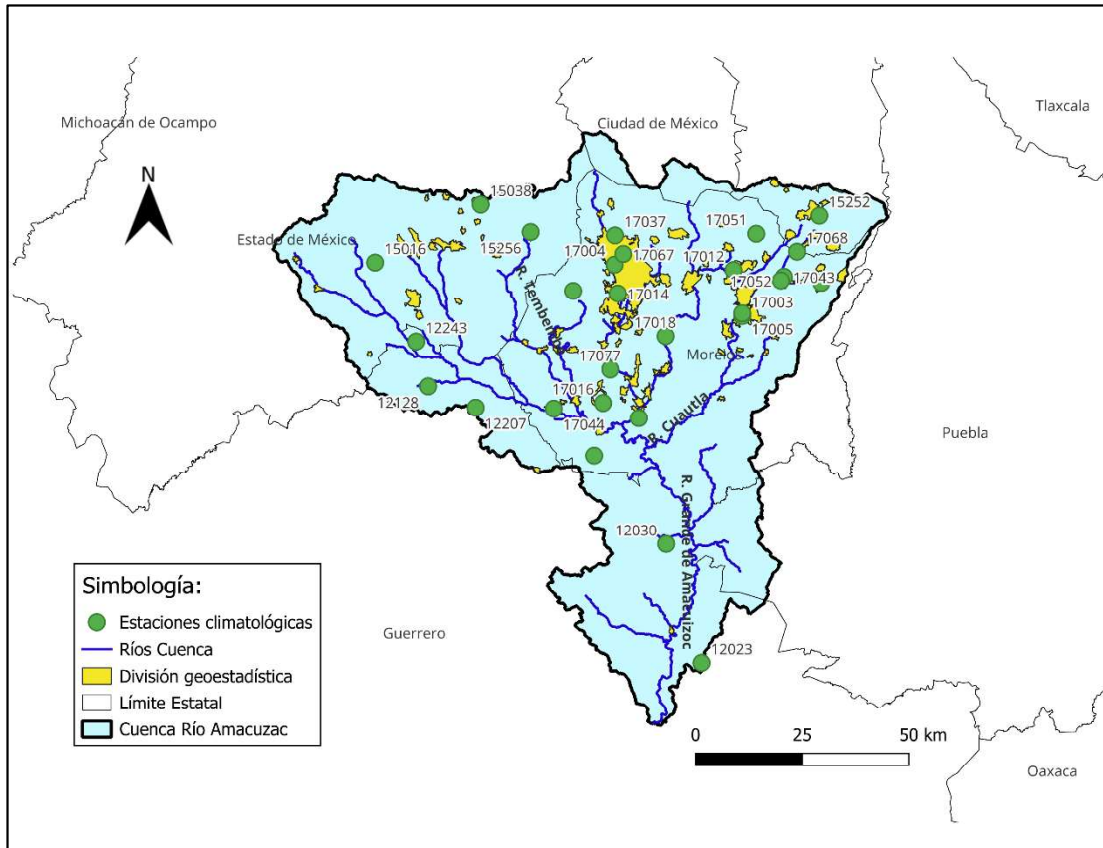


Figura 10. Estaciones climatológicas de la Cuenca del Río Amacuzac
Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Registros de estaciones hidrométricas

CLAVE	Nombre	Media	Desvest	Periodo		Años	No. Datos	Gasto Máx (m ³ /s)
18089	EL RODEO II	0.70	0.77	01/12/1951	31/12/2011	60	60688	2.8635
18175	OACALCO	0.84	0.33	01/08/1948	31/10/2014	66	102862	1.5669
18193	Yautepec	1.76	5.95	01/04/1949	30/11/2014	65	212047	2.833
18200	Cocoyoc	0.59	0.13	01/09/1949	31/12/2014	65	14245	0.8619
18223	TICUMAN	1.46	7.07	14/07/1951	31/12/2014	63	214501	1.56838
18225	Cuautla	3.21	8.80	15/03/1952	31/12/2014	62	86033	4.9297
18232	AMACUZAC	35.02	117.90	01/01/1955	31/12/2014	59	250075	108.35
18264	Zacatepec	10.30	21.11	01/01/1980	31/12/2014	34	92584	23.3217
18269	ALPUYECA	2.56	10.47	01/01/1980	31/12/2014	34	85774	3.858
18271	TEMIXCO	2.70	5.94	08/01/1956	31/12/2011	55	268648	4.445
18291	A-10 Texcaltitlan	1.38	1.43	19/07/1979	31/12/2014	35	64870	4.3264
18294	A-8 TOTOLMAJAC	1.97	2.40	01/01/1980	31/12/2009	29	31442	6.275
18295	A-9 EL MOLINO	3.14	2.30	01/01/1980	31/10/2008	28	68125	9.5
18316	LA CUERA	1.16	4.80	24/10/1960	31/12/2014	54	71924	1.4571
18372	Coatepequito	10.46	11.17	01/01/1980	07/12/2014	34	67574	33.3235
18406	LAS ESTACAS	7.00	1.86	01/08/1968	31/12/2014	46	60437	8.675
18437	XICATLACOTLA	39.83	44.16	01/01/1971	31/12/2011	40	211697	94.9575
18557	EL TUNEL	0.43	0.13	01/01/1976	01/01/2006	30	5319	0.613
18572	Colonia Hidalgo	6.50	6.69	12/01/1981	31/12/2014	33	26109	12.741

Fuente: Elaboración propia con datos de BANDAS.

Por otro lado, la Figura 11 muestra el análisis de distribución de datos entre las 19 estaciones hidrométricas, considerando los registros históricos de los caudales (m³/s). El comportamiento de los caudales es altamente similar entre las mayorías de las estaciones hidrométricas, sin embargo, algunas estaciones muestran caudales superiores a las demás que están presentes en estaciones como 18232 y 18437. Para un análisis como el energy accounting esto puede sobreestimar la disponibilidad real de agua.

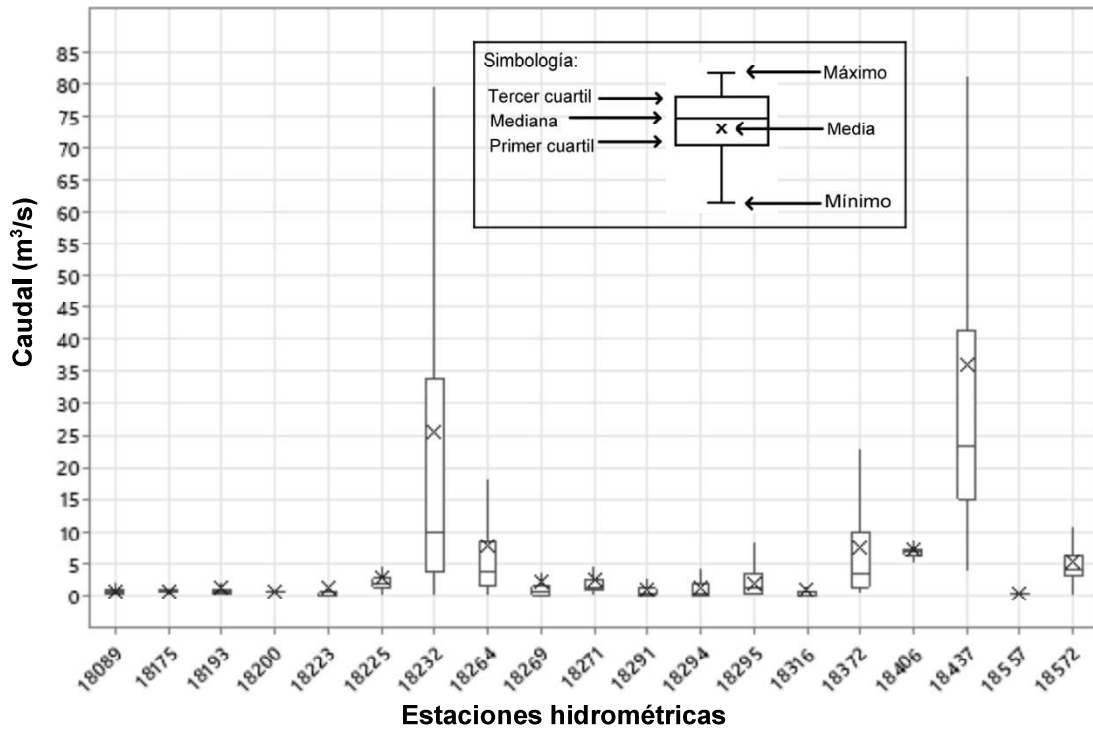


Figura 11. Registros de las estaciones hidrométricas
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 7 presenta un conjunto de 28 estaciones climatológicas ubicadas en los estados de Guerrero, México y Morelos, todas dentro del área de influencia de la Cuenca del Río Amacuzac. Para cada estación se indica la clave oficial, nombre, estado, situación operativa (activa o suspendida), a pesar de estar suspendidas se analizaron también porque cuentan con un periodo de registros considerados. El rango de precipitación anual va de 667 mm (COPALILLO, Guerrero) a 1854 mm (TETIPAC, Guerrero), evidenciando una marcada heterogeneidad espacial en el régimen pluviométrico. La mayoría de las estaciones se encuentran activas, con series históricas que superan las tres décadas en varios casos, lo que fortalece la representatividad temporal de los datos. Con base en los datos históricos de las estaciones climatológicas analizadas podemos afirmar que dentro de la cuenca se observa una precipitación promedio anual de 1030.2 mm, valor que contribuye a caracterizar el aporte hídrico promedio estimado en la cuenca y que resulta fundamental en el contexto del análisis energético.

Tabla 7. Precipitación media anual de las estaciones climatológicas

Clave	Nombre	Estado	Situación	Periodo		Precipitación media anual (mm)
12023	COPALILLO	GUERRERO	Activa	1963	2023	666.9
12030	CHAUCINGO	GUERRERO	Activa	1942	2024	1343.8
12128	TETIPAC	GUERRERO	Activa	1995	2024	1853.8
12207	ACUITLAPAN	GUERRERO	Activa	1981	2024	1124.7
12243	PILCAYA	GUERRERO	Activa	1984	2024	970.5
15016	COATEPEC HARINAS	MÉXICO	Activa	1961	2024	1071.2
15038	JOQUICINGO	MÉXICO	Activa	1956	2019	985
15252	ATLAUTLA E-9	MÉXICO	Activa	1978	2023	789.6
15256	OCUILAN E-23	MÉXICO	Activa	1978	2025	1210.1
17003	CUAUTLA (SMN)	MÉXICO	Activa	1926	2025	875.1
17004	CUERNAVACA (DGE)	MORELOS	Activa	1955	2025	1268.4
17005	CUAUTLA (DGE)	MORELOS	Activa	1955	2025	870
17012	OAXTEPEC	MORELOS	Activa	1970	2025	972
17014	TEMIXCO	MORELOS	Activa	1957	2025	963.7
17016	TEQUESQUITENGO	MORELOS	Activa	1955	2025	823.3
17018	TICUMAN	MORELOS	Activa	1955	2025	935.4
17019	TILZAPOTLA	MORELOS	Suspendida	1942	2016	869.6
17037	ESCUELA DE BIOLOGIA UAEM	MORELOS	Activa	1975	2021	1474.8
17043	E.T.A. 118 YECAPIXTLA	MORELOS	Suspendida	1976	2017	991.5
17044	E.T.A. 040 AMACUZAC	MORELOS	Activa	1973	2025	996.8
17048	PUENTE OCUITUCO E-5	MORELOS	Activa	1976	2025	1104.7
17051	TOTOLAPAN E-10	MORELOS	Activa	1976	2025	1090.5
17052	YECAPIXTLA (DGE)	MORELOS	Activa	1986	2025	899.4
17058	CUENTEPEC	MORELOS	Activa	1978	2025	1052.4
17067	CUERNAVACA (OBS)	MORELOS	Activa	1981	2025	1137
17068	ACHICHIPICO D-4	MORELOS	Activa	1982	2025	1133.7
17074	EL HIGUERON	MORELOS	Activa	1983	2025	869.7
17077	XOXOCOTLA	MORELOS	Activa	1983	2025	814.6
Total promedio de la precipitación media anual:						1041.4

Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA.

A continuación, se muestra la distribución de la precipitación de las estaciones climatológicas que se consideraron dentro de la cuenca, en la que se muestra el régimen acumulado durante el periodo de años encontrados para cada estación con la que se está trabajando. La gráfica de caja y bigotes (Figura 12) elaborada con los registros de precipitación media anual de 28 estaciones climatológicas del área de estudio permitió identificar con claridad el comportamiento estadístico de los datos. La mediana se situó cerca de los 1,037 mm, lo que concuerda con la tendencia central observada en la mayoría de las estaciones. El rango intercuartílico, que abarca del primer al tercer cuartil, se extiende

aproximadamente entre 865 mm y 1233 mm respectivamente, revelando que el 50 % de los datos se concentra en ese intervalo, el cual refleja una distribución relativamente homogénea para la región de la Cuenca del Río Amacuzac.

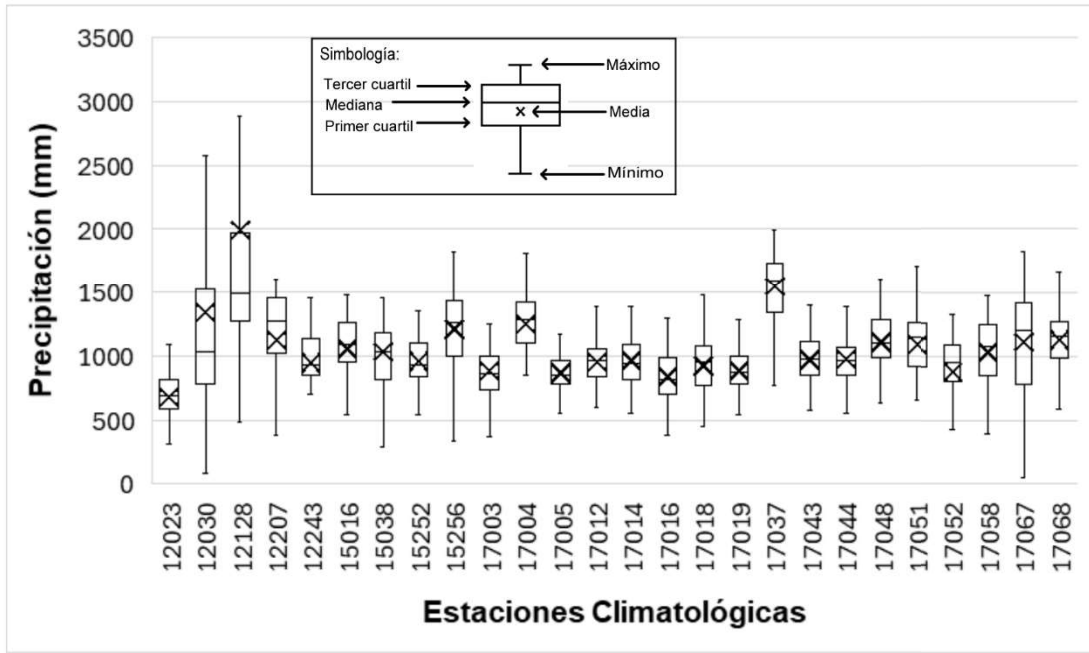


Figura 12. Registros de las estaciones climatológicas

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Aplicación del modelo

Aunque la selección no se basó en un análisis exhaustivo de selección entre las estaciones hidrométricas disponibles, el análisis con la estación hidrométrica 18175 (Figura 13) surge como un punto de partida, para el análisis de la microcentral hidroeléctrica que trabaja con escurrimiento (turbina tipo Vortex). La estación 18175 presenta un caudal bajo, con poca dispersión y una cantidad de datos históricos alto (66 años), para el análisis se eligió un año representativo (2010) que presenta un gasto medio diario de 0.73 m³/s.

Por otro lado, la Cuenca del Río Amacuzac presenta una precipitación promedio anual significativa (1041.4 mm), que junto con su marcado gradiente altitudinal (Figura 5) y las características de operación (Tabla 8) de la turbina tipo Pelton permitió la evaluación de sustentabilidad considerando una estación climatológica (12030) y un año representativo (2018) donde la precipitación acumulada de ese año fue de 1089.39 mm.

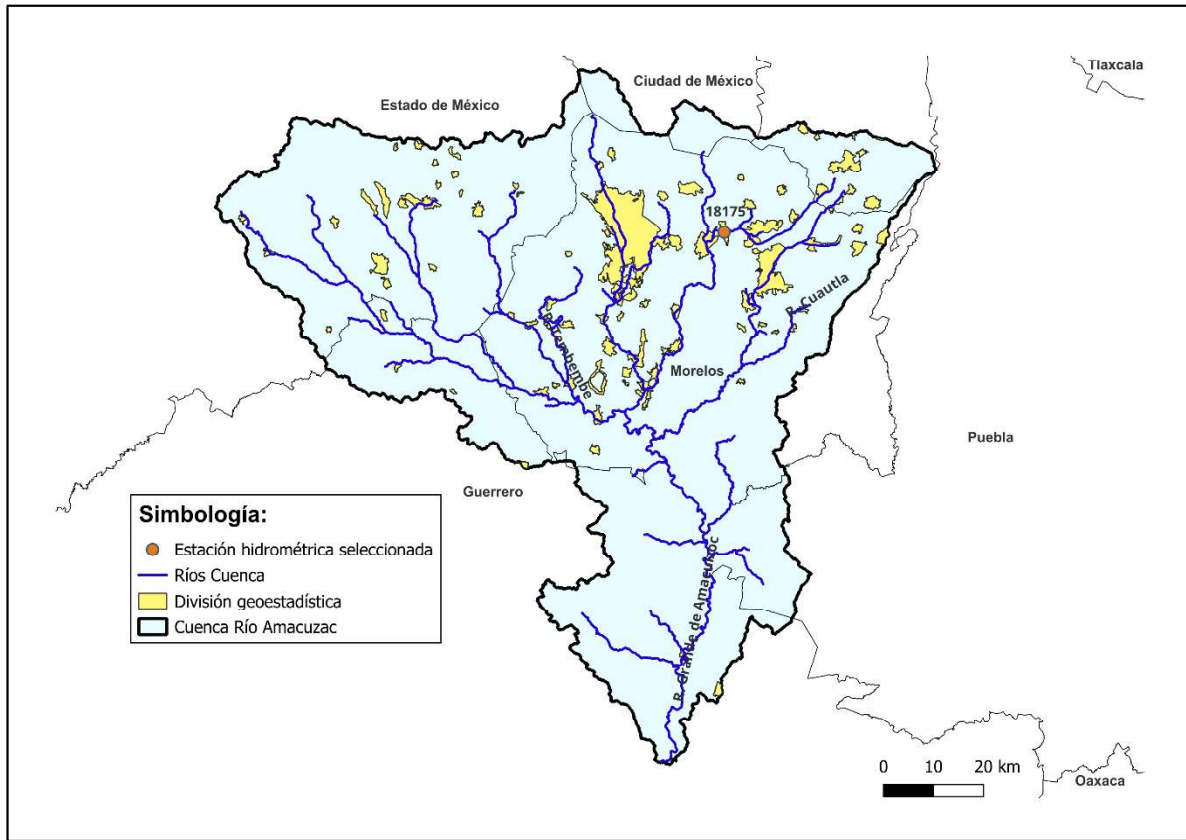


Figura 13. Estación hidrométrica seleccionada

Fuente: Elaboración propia.

La evaluación del modelo con el análisis de la sustentabilidad basado en *emergy accounting* se realizó con la estación hidrométrica con numero de clave 18175 para la turbina tipo Vortex y con la estación climatológica 12030 para la turbina tipo Pelton, se basó en sus características de operación (Tabla 8) para cada una de las turbinas y se describen a continuación.

Tabla 8. Características de operación de las turbinas "tipo"

Vortex		Pelton	
$Q_{\text{entrada, máx}}$	10 L/s	$Q_{\text{entrada, máx}}$	5.7 L/s
V_{entrada}	0.444 m/s	$H_{\text{máx}}$	6 m
η	40%	η	78.39%
H	0.4214 m	Área de captación	1303.33 m ²

Fuente: (Zamora-Juárez et al., 2022; Zamora-Juárez et al., 2023).

Adicionalmente se hizo un análisis haciendo uso del balance hidrológico de la Cuenca del Río Amacuzac con los valores de c_p (escurrimiento medio anual) y R_{xy} (volumen anual actual comprometido) de la publicación del Diario Oficial de la Federación (DOF, 2022), con los valores de

disponibilidad de la Cuenca del Río Amacuzac reportados por Conagua, los caudales (m^3/s) de la estación y el área de la turbina “tipo” (Vortex) obteniendo así un volumen (V), obteniendo el caudal comprometido y el caudal disponible para obtener el análisis de operación al año. Se determinó 1,932 valores de caudal menores a $0.01 m^3/s$ de un total de 101,777 registros reportando que la turbina se tendría operando aproximadamente 358 días al año.

$$C_p = 2305.189$$
$$R_{xy} = 1556.442$$
$$V = \frac{C_p - R_{xy}}{C_p} = 0.32$$

3.3.3. Obtención de los flujos y los *unit emergy value*

El diagrama de flujo de masa y energía desarrollado en esta investigación proporciona la dirección de la transformación emergética desde el origen hasta el producto, así como el soporte a la estimación de los UEV. Es decir que, de manera implícita, un flujo posterior representa la transformación de energía de los flujos anteriores conectados. Por ejemplo, considerando la Figura 8, si es conocido el flujo 11 (el escurrimiento en el cauce) entonces se encuentran consideradas las transformaciones de energía previas en los flujos 1 a 10. En la Figura 14, se resaltan sólo los flujos que se considerarían para el análisis de las microcentrales hidroeléctricas que operaran con las turbinas tipo Pelton y Vortex dentro de este trabajo de investigación, siendo el flujo 24 por considerar (12 + 18 + 19). De manera sintetizada, el flujo 24 (generación de energía eléctrica), es posible determinarlo a través de los flujos 12, 18 y 19. Los flujos 20 a 23 corresponden a los flujos de tratamiento de agua para su retorno al sistema.

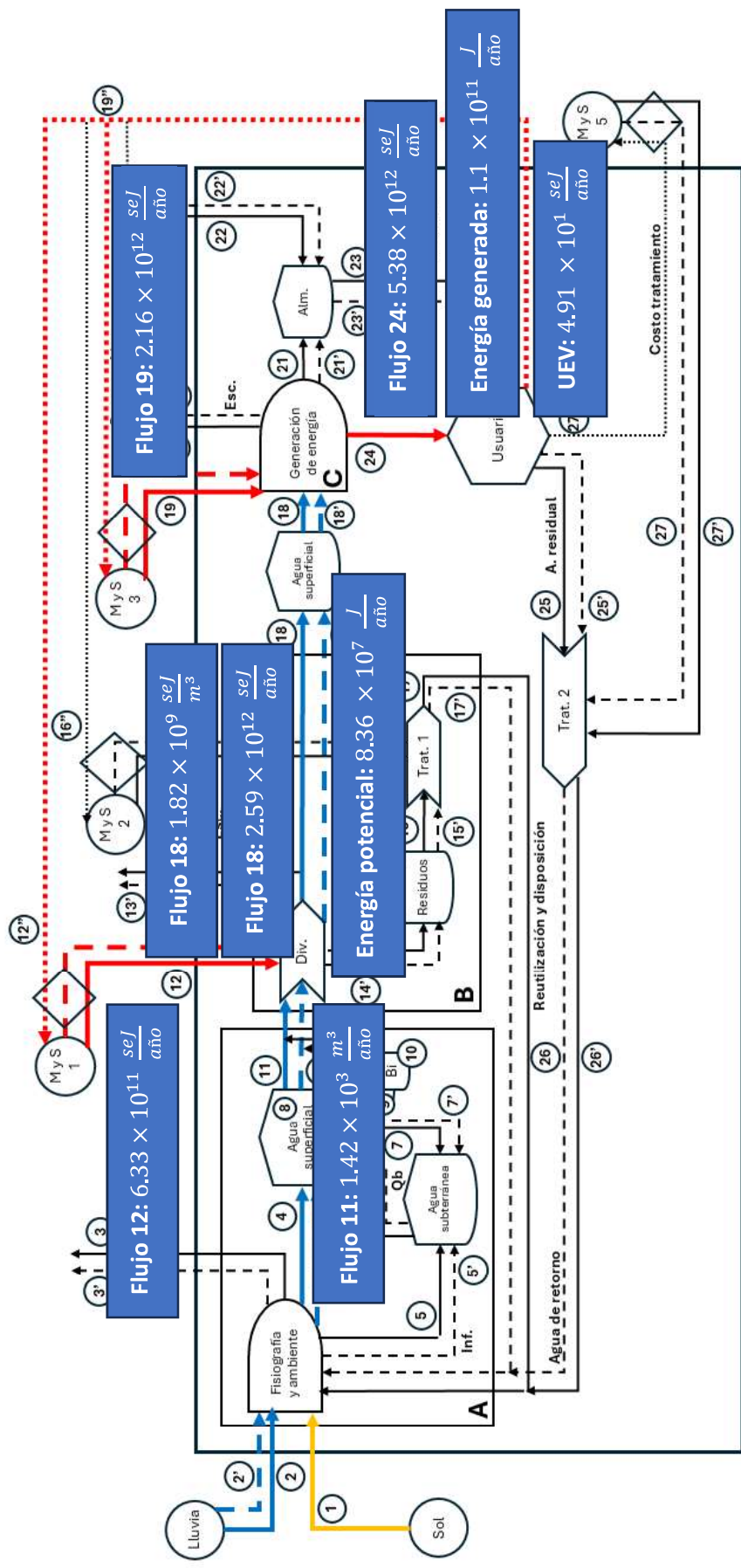


Figura 14. Diagrama para el caso de la turbina tipo Pelton

Fuente: Elaboración propia.

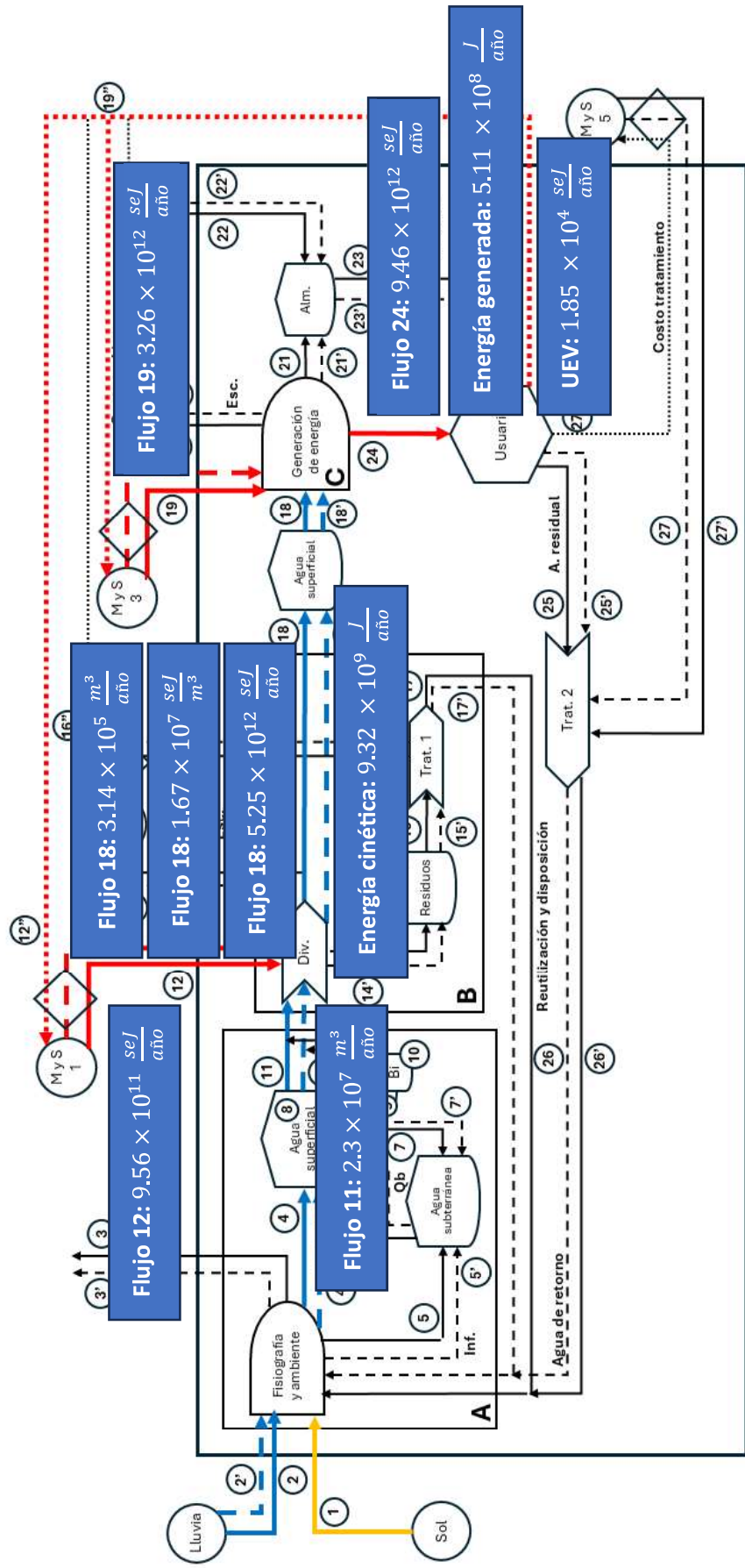


Figura 15. Diagrama para el caso de la turbina tipo Vortex

Fuente: Elaboración propia.

Los flujos fueron clasificados dentro de la tabla emergética (Tabla 9), dividen las fases del inventario de ACV consideradas: 1. Extracción de recursos y construcción (adecuación), 2. Equipo para la generación de energía eléctrica y 3. Operación para la generación de energía eléctrica, así mismo dentro de estas fases se englobó de manera general los recursos Y (Flujo 24), R (Flujo 18) y F (Flujo 12+19), para facilitar la estimación de cada flujo y la estimación de su UEV se elaboró en diagramas UML la representación conceptual y metodológica del *emergy accounting*. Para visualizar el origen, la naturaleza y las interacciones de dichos flujos antes de ser expresados numéricamente de este modo, los diagrama UML no sólo clarificaron el proceso de conversión emergética en cada sistema de microcentral hidroeléctrica, sino que también evidencia las diferencias estructurales entre las tecnologías analizadas (Pelton y Vortex).

La diferencia fundamental entre los diagramas radica en el Flujo 18 que alimenta a cada sistema, lo cual refleja la naturaleza del recurso hídrico aprovechado por cada tecnología, para la microcentral hidroeléctrica con turbina tipo Pelton el diagrama UML (Figura 16) destaca en el cálculo de flujo la energía potencial de la precipitación. Este detalle en el UML subraya la dependencia directa del sistema respecto a la precipitación como fuente principal del Flujo 18.

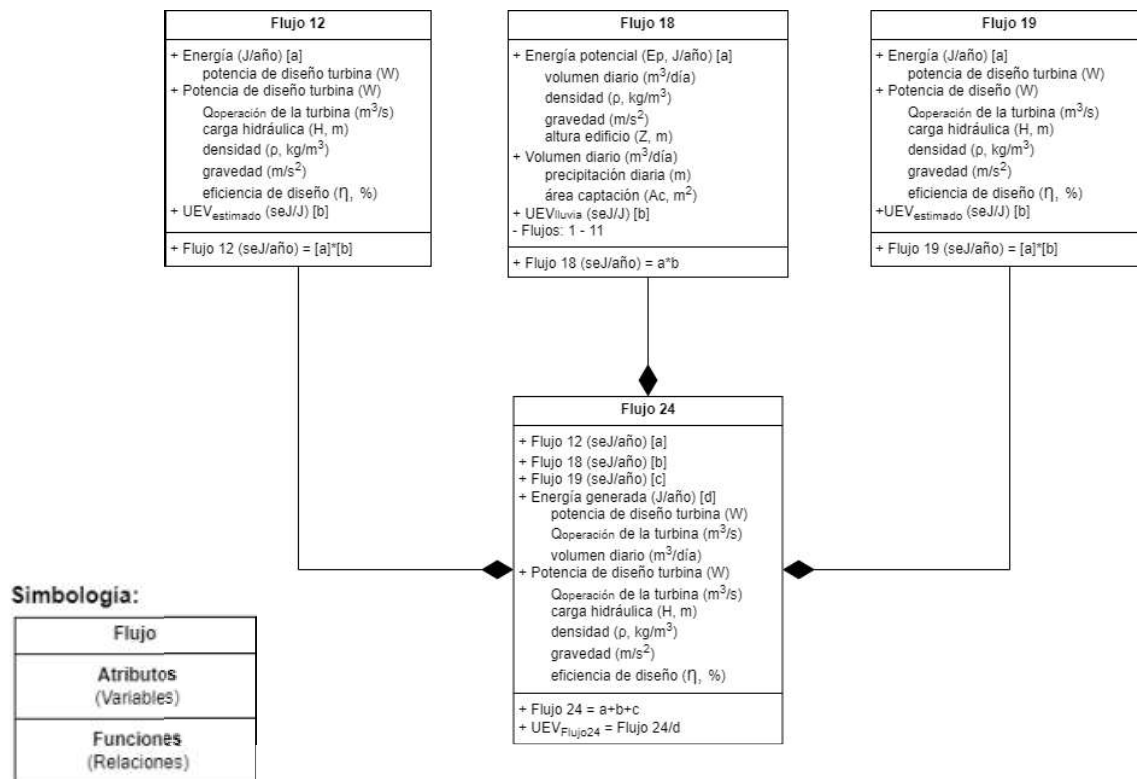


Figura 16. Diagrama UML microcentral hidroeléctrica con turbina Pelton
Fuente: Elaboración propia.

Para el sistema de microcentral hidroeléctrica con turbina Vortex, el diagrama UML (Figura 17) mantiene la misma estructura general, pero el Flujo 18 corresponde al escurrimiento. En este caso, no se requiere de la captación de la precipitación, sino que se aprovecha el caudal disponible de manera continua, lo cual modifica el perfil emergético del sistema al incrementar la participación de R (Flujo 18) frente a F (Flujo 12 y 19).

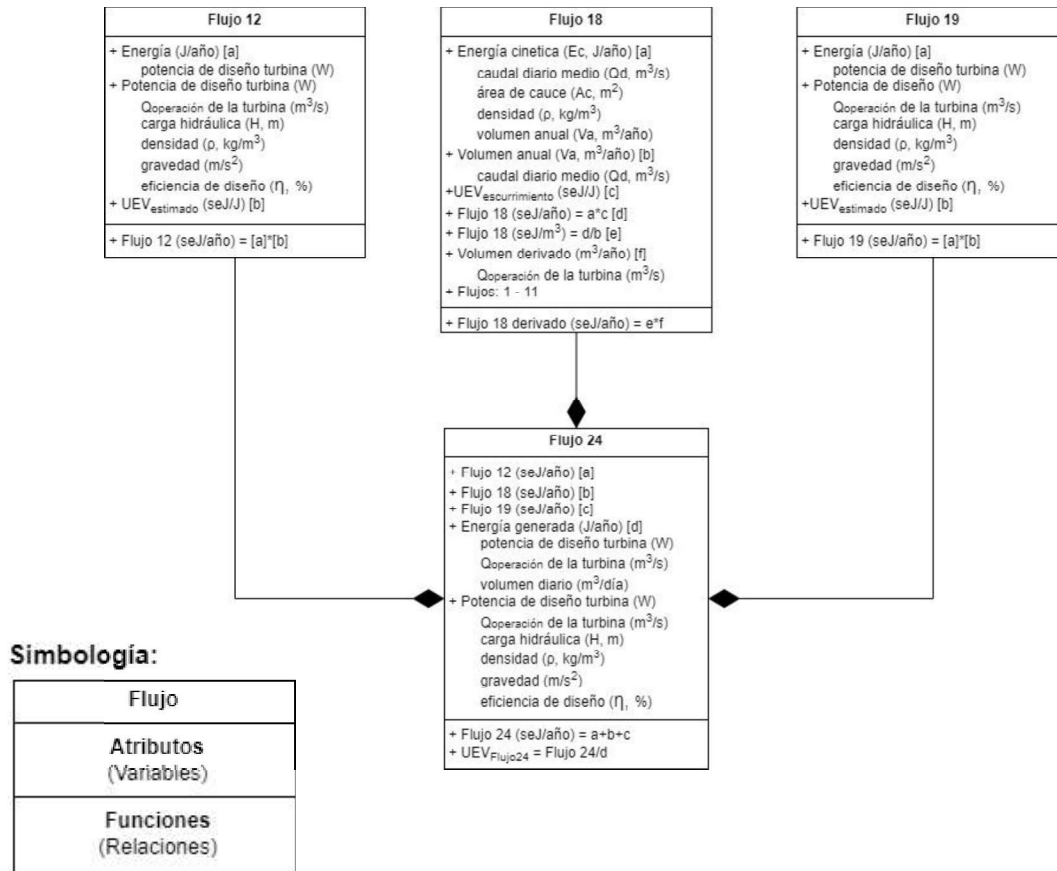


Figura 17. Diagrama UML microcentral hidroeléctrica con turbina Vortex

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de *emergy accounting* constituye una herramienta fundamental que permitió comparar sistemas con diferentes escalas mediante la contabilización de todos sus flujos, a través del UEV (Odum, 1996). En este contexto, la Tabla 9 constituye una base cuantitativa del análisis emergético comparativo entre ambas tecnologías de microcentrales hidroeléctricas de baja escala: turbinas Pelton y Vortex.

Tabla 9. Tabla energética microcentrales

Categoría	ITEM	Etapa A.C.V.	Pelton				
			Flujo anual	Unidad de flujo	UEV (seJ/unidad de flujo)	Flujo anual de energía (seJ)	ref
Renovable (R)	Flujo 18	1	8.36×10^7	J	$3.10 \times 10^{4[1], [2]}$	2.59×10^{12}	[1] [2] [4]
Recursos del sistema socioeconómico (F)	Flujo 12	2	3.46×10^8	J	$1.83 \times 10^{3[6]}$	6.33×10^{11}	[4] [5] [7]
	Flujo 19	3	3.46×10^8	J	$6.25 \times 10^{3[6]}$	2.16×10^{12}	[4] [6]
Rendimiento total de energía del sistema de producción (Y)	Flujo 24	3	4.91×10^1	J	3.79×10^2	1.40×10^{15}	[1] [2] [4] [5] [6] [7]

Categoría	ITEM	Etapa A.C.V.	Vortex				
			Flujo anual	unidad de flujo	UEV (seJ/unidad de flujo)	Flujo anual de energía (seJ)	ref
Renovable (R)	Flujo 18	1	9.32×10^9	J	$4.12 \times 10^{4[3]}$	5.25×10^{12}	[3]
Recursos del sistema socioeconómico (F)	Flujo 12	2	5.21×10^8	J	$1.83 \times 10^{3[6]}$	9.56×10^{11}	[5] [6] [7]
	Flujo 19	3	5.21×10^8	J	$6.25 \times 10^{3[6]}$	3.26×10^{12}	[6]
Rendimiento total de energía del sistema de producción (Y)	Flujo 24	3	5.11×10^8	J	1.85×10^4	9.46×10^{12}	[3] [5] [6]

Nota: Flujo 18 Pelton: Energía potencial lluvia(J/año)=Volumen diario ($m^3/día$) $\times Y(N/m^3)\times H(m)$, Energía generada turbina Pelton(J/año)=Potencia de la turbina(W) \times (Volumen diario ($m^3/día$)+caudal de operación de turbina(m^3/s) $\times 1000 \times 365$, Potencia de la turbina (W)= $\eta(\%)\times \rho(kg/m^3)\times g(m/s^2)\times Q(m^3/s)\times H(m)$, Volumen (m^3)= precipitación(m) \times área de superficie(m^2), **Flujo 18 Vortex:** Energía cinética del escurrimiento turbina Vortex (J/año)=((Caudal diario medio (m^3/s)) $^2 \div (2)(\text{área sección transversal río } (m^2))^2) \times \rho(kg/m^3)\times$ Volumen escurrimiento anual ($m^3/año$), Energía generada turbina Vortex (J/año)=Potencia de la turbina(W) \times número de días de operación $\times 24(h)\times 60(\text{min})\times 60(s)$.

Fases de ACV: 1.Extracción de recursos y construcción (adecuación), 2.Equipo para la generación de energía eléctrica y 3.Operación para la generación de energía eléctrica.

Fuente: [1: Brown y Ulgiati, 2004a], [2: Brown y Ulgiati, 2004b], [3: De Vilbiss et al., 2024], [4: Zamora, 2019], [5: Zamora, 2022], [6: Ren y Feng, 2021], [7: Zamora-Juárez et al., 2022]

3.3.4. Evaluación de sustentabilidad

En esta fase se usó la metodología emergética propuesta por Odum, (1996). Primero se identificaron los recursos, bienes y servicios empleados de manera directa o indirecta en la implementación de microcentrales hidroeléctricas y sus interacciones. Con esta información se realizó un modelo conceptual general de emergía del proceso (Figura 8).

Se organizó la información en la tabla de recursos energéticos donde cada recurso se clasificó según su naturaleza (R, N, y F) y se estimó la cantidad de energía requerida para su proceso. Los datos obtenidos se convirtieron en unidades de emergía utilizando los valores de *unit emergy value*. La emergía de cada elemento se estimó considerando un periodo anual.

Con esta información se estimaron los cuatro índices energéticos (Tabla 10): el rendimiento en emergía (EYR) que es la emergía total usada por unidad de emergía invertida la cual sirve para entender en qué medida una inversión permite a un proceso explotar recursos locales para su contribución económica, índice de carga ambiental (ELR) que compara la emergía no renovable utilizada con respecto a la emergía renovable utilizada, lo cual indica la presión que el sistema ejerce sobre el ambiente, el índice de sostenibilidad (ESI) es un índice compuesto que relaciona, la eficiencia del sistema para aprovechar recursos locales (EYR), con el impacto ambiental que genera (ELR) y evalúa que sustentable es un sistema y renovabilidad o el porcentaje de recursos (%R) evalúa que porcentaje del total de emergía proviene de fuentes renovables.

Tabla 10. Indicadores emergéticos para microcentrales hidroeléctricas

Indicadores	Pelton	Vortex
R	$2.59 \times 10^{12} \frac{seJ}{año}$	$5.25 \times 10^{12} \frac{seJ}{año}$
F	$2.79 \times 10^{12} \frac{seJ}{año}$	$4.22 \times 10^{12} \frac{seJ}{año}$
EYR	1.93	2.24
ELR	1.08	0.80
ESI	1.79	2.79
%R	48%	55%

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al índice ELR, que evalúa la carga ambiental del sistema en función de los insumos no renovables y comprados respecto a los insumos renovables, ambos sistemas arrojaron valores moderados, característicos de tecnologías basadas en fuentes de energía renovables. No obstante, el sistema Vortex también presenta un menor ELR (0.80) frente al sistema Pelton (1.08), lo que

sugiere una presión ambiental aún más reducida respecto a la dinámica local generada por el exterior.

Los resultados indican diferencias significativas en el desempeño energético de ambas alternativas. El sistema con turbina Pelton obtuvo un EYR de 1.93, mientras que el sistema con turbina Vortex alcanzó un valor de 2.24. Este índice refleja la eficiencia en la transformación de insumos comprados en productos útiles, por lo que un valor superior a 1 sugiere un mejor aprovechamiento de los recursos naturales locales disponibles. En consecuencia, la turbina Vortex presenta una mayor eficiencia energética en términos del retorno energético por unidad de recursos invertida.

El índice energético ESI, estimado como la razón entre EYR y ELR, muestra de forma integral la relación entre rendimiento y carga ambiental. En este sentido, la turbina Pelton obtuvo un ESI de 1.79, mientras que la Vortex alcanzó 2.79 donde ambos presentan una baja eficiencia energética, en comparación a los valores obtenidos el sistema Vortex no solo es más eficiente y menos contaminante, sino que representa una opción más sostenible a largo plazo.

Finalmente, el análisis del índice de porcentaje de recursos o renovabilidad (%R) utilizados indicó que ambos sistemas no dependen en gran medida a recursos renovables (R), con porcentajes inferiores al 60 %. Aunque la diferencia es marginal, la turbina Vortex mantiene una ventaja con un valor de 55 %, frente al 48 % de la Pelton, aunque ambos presentan una contribución significativa a un sistema renovable.

El diagrama ternario (Figura 18) elaborado para las turbinas Pelton y Vortex representa de mejor forma la proporción de los tres componentes fundamentales del análisis energético: el flujo de recursos renovables (R), el flujo no renovable (N) y el flujo de recursos socioeconómicos (F) para cada tecnología. En este tipo de representación gráfica, cada vértice del triángulo corresponde al 100 % de uno de los componentes, mientras que la posición de cada punto indica la contribución de cada flujo en el sistema.

Las regiones que se muestran indican:

- Hacia R: sustentable
- Hacia F: externalidades
- Hacia N: no sustentable
- Región A: sustentable con externalidades menores

- Región B: moderado con externalidades menores
- Región C: sustentable con externalidades moderadas
- Región D: medianamente sustentable con externalidades moderadas
- Región E: no sustentable con externalidades menores
- Región F: sustentable con externalidades significativas
- Región G: no sustentable con externalidades significativas

En el caso de la turbina Pelton, los resultados muestran que el 52 % de su energía proviene de flujos socioeconómicos (F), mientras que únicamente el 48 % corresponde un flujo renovable (R) y el 0 % a flujos no renovables (N) debido a que en el análisis no se desagregó. Esto ubica a la turbina tipo Pelton cerca del vértice de F, ligeramente desplazado hacia R, lo que refleja una dependencia de los insumos externos, como materiales, servicios tecnológicos y socioeconómicos, mientras que el aprovechamiento de recursos renovables locales se mostró limitado.

Por otro lado, la turbina tipo Vortex se ubicó con 45 % de su energía proveniente del flujo socioeconómicos (F), 55 % corresponde al flujo renovable (R) y el 0 % a el flujo no renovable (N).

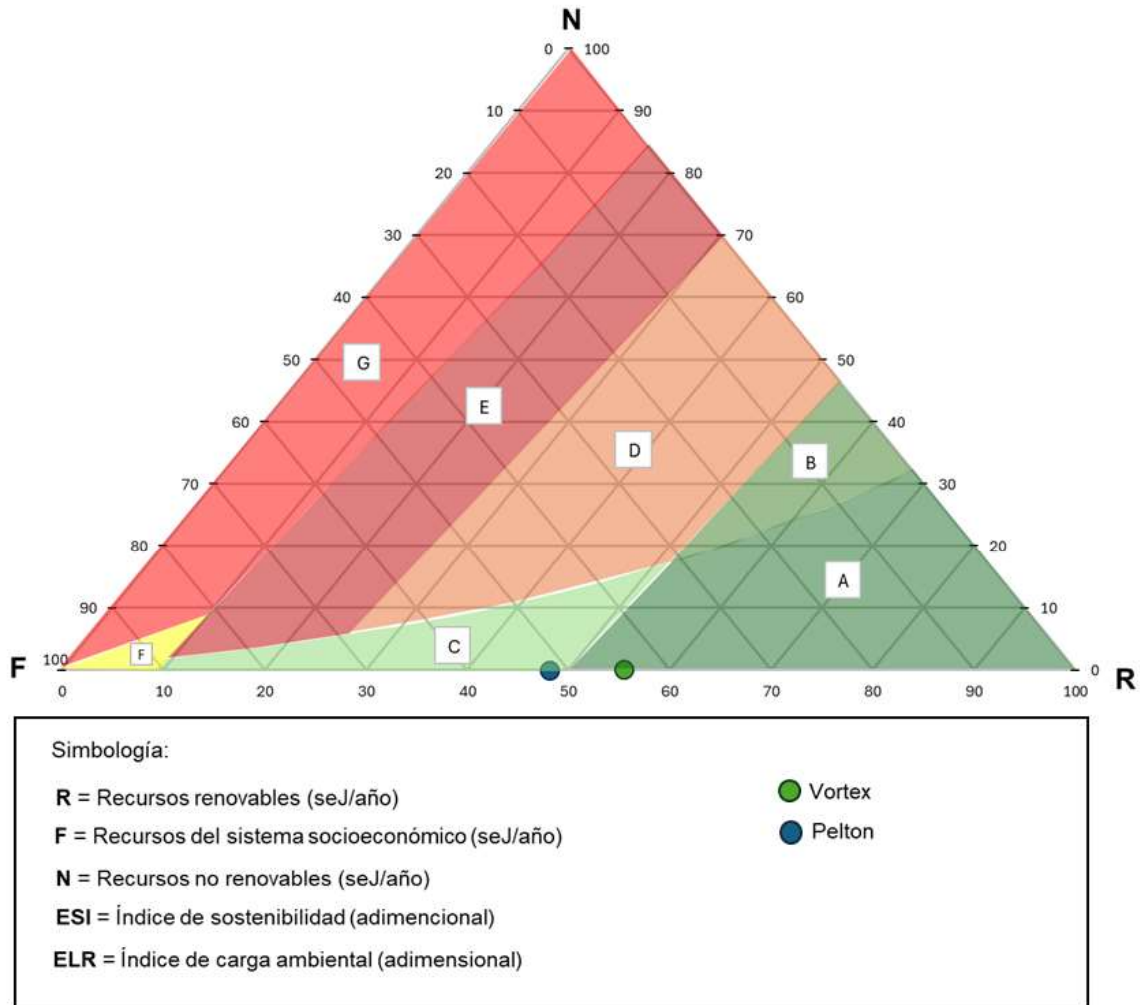


Figura 18. Diagrama ternario microcentrales hidroeléctricas

Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, los resultados evidencian que la microcentral que opera en esta primera evaluación con una turbina Vortex presenta mejores indicadores energéticos en todos los índices evaluados, lo cual la posiciona como la opción más sustentable entre las dos alternativas analizadas. Esta diferencia puede explicarse por su mayor capacidad de aprovechamiento de la energía potencial del agua en regiones con un adecuado gradiente topográfico, lo que la hace particularmente efectiva cuando existen condiciones hidráulicas favorables. Sin embargo, es importante considerar que la decisión final sobre su implementación debe complementarse con análisis técnicos, socioeconómicos y ambientales, especialmente en contextos donde el acceso, la infraestructura o las condiciones hidrológicas pudieran limitar el uso de una u otra tecnología.

En el aspecto de evaluación de microcentrales hidroeléctricas respecto a la elección de la tecnología más adecuada requiere un análisis técnico, económico y ambiental. Si bien las turbinas Pelton y Vortex responden características geométricas, operativas, de instalación y constructivas diferentes, la primera esta optimizada para altos desniveles y bajos caudales, y la segunda diseñada para funcionar con pendientes bajas y caudales altos, su comparabilidad se define cuando tienen el mismo objetivo de generación de energía hidroeléctrica sustentable. Ambas tecnologías cumplen con la función de transformar energía hidráulica en electricidad a pequeña escala, evaluarlas bajo un marco común permitió determinar cuál se ajusta mejor a las características geográficas, hidráulicas y socioeconómicas de la zona de estudio.

El análisis comparativo se justifica desde una perspectiva de *emergy accounting*, donde se estimaron los índices emergéticos de cada alternativa considerando flujos de energía, masa y socioeconómicos involucrados desde la fase de extracción de recursos y construcción (adecuación), equipo para la generación de energía eléctrica hasta la operación para la generación de energía eléctrica.

Por otro lado, la energía anual producida de la turbina Pelton fue de $3.46 \times 10^8 \frac{J}{año}$, lo que, para una turbina de prueba a escala, este valor es considerable, ya que indica un buen aprovechamiento del caudal y altura disponible, mientras que la Vortex alcanzó $5.21 \times 10^8 \frac{J}{año}$, siendo este mayor debido a las características de operación de la turbina y el recurso hídrico que es más abundante. Estas magnitudes reflejan el desempeño relativo de cada tecnología bajo las condiciones de prueba.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con el primer objetivo específico se logró definir las condiciones y variables fundamentales del funcionamiento de microcentrales hidroeléctricas que operan con turbinas Pelton y Vortex. Esta caracterización se logró principalmente mediante un esquema de la concepción del fenómeno y un inventario de análisis de ciclo de vida etapa clave dentro del análisis de ciclo de vida, que se encarga de cuantificar todos los flujos de entrada y salida de un sistema producto a lo largo de su ciclo de vida y que evaluó cada etapa considerada en el presente trabajo.

Como segundo objetivo específico las variables definidas en el inventario del análisis de ciclo de vida y las relaciones causales entre ellas se representaron y analizaron mediante flujos de masa, energía y socioeconómicos en un modelo conceptual que bajo un enfoque de *emergy accounting* facilitaron una visión completa de la generación de energía eléctrica con turbinas Pelton y Vortex.- Así mismo la distribución del modelo conceptual final considerado como el producto clave en este trabajo de investigación permitió elegir los flujos necesarios de consideración para los análisis específicos de las turbinas “tipo” elegidas (Pelton y Vortex). En consecuencia, se toma en consideración que con esta parte del análisis se permitió identificar a su vez el tipo de variables, escala temporal y formato la información necesaria para obtener los UEV correspondientes a cada variable para así estimar la emergía de los flujos generada por los sistemas. Los flujos identificados fueron el 12, 18, 19 y 24, donde el flujo 18 representa la energía renovable (R), el flujo 12 y 19 los flujos socioeconómicos (F) y el 24 el rendimiento total de emergía del sistema de producción (Y).

La representación del fenómeno requirió de una constante retroalimentación de acuerdo con los impactos identificados. Además, se concluyó que, a partir de la identificación de flujos transversales entre las fases fue posible develar costos ocultos en la producción de energía eléctrica a microescala. Para el tercer objetivo específico en cuanto a la caracterización del entorno hidrológico, se cumplió con el objetivo de construir una base de datos geoespacial de la Cuenca del Río Amacuzac donde se analizaron las estaciones hidrométricas y climatológicas que se encuentran presentes en el interior de la delimitación de la Cuenca del Río Amacuzac necesarias para la evaluación de los casos de estudio respectivamente. Adicional a esto se realizó un análisis del recurso hidrométrico de la estación 18175 para la turbina tipo Vortex donde con las condiciones de la turbina tiene como resultado un escenario de 358 días de operación al año.

Finalmente, en el cuarto objetivo específico, se logró estimar los índices emergéticos de sustentabilidad ambiental como el EYR, ELR y ESI para ambas tecnologías de microcentrales. Los resultados de los índices emergéticos para la Pelton fueron: EYR = 1.93, ELR = 1.08, ESI = 1.79 y %R

= 48 %; mientras que para la Vortex fueron: EYR = 2.24, ELR = 0.80, ESI = 2.79 y %R = 55%. Estas diferencias se explican principalmente por el tipo y abundancia del recurso renovable utilizado para cada tipo. La Pelton, al depender del agua de lluvia captada en una superficie limitada, presenta un R bajo en comparación con los insumos socioeconómicos (F), elevando el ELR y reduciendo el ESI. En contraste, la Vortex se beneficia de un recurso más constante y abundante (escurrimiento del río), que incrementa la participación de R en la salida total (Y), reduciendo la carga ambiental y mejorando su índice de sostenibilidad.

El análisis emergético para las condiciones dadas demuestra que la microcentral con turbina Vortex es eficiente y sustentable en términos de aprovechamiento de los recursos renovables es decir del recurso del escurrimiento elegido para el análisis, menor carga ambiental y mayor rendimiento energético. La turbina Pelton, aunque también se basa en un recurso renovable que es la precipitación, presento un menor rendimiento emergético.

A pesar de que la Pelton genera una energía anual de $3.46 \times 10^8 \frac{J}{año}$, sus indicadores emergéticos revelan que el aporte de flujo R frente a los flujos socioeconómicos F son reducidos. En el caso de la Vortex, la energía total fue de $5.21 \times 10^8 \frac{J}{año}$, lo que señala que la relación de R y F es más favorable, lo que se traduce en mejores índices emergéticos bajo las fronteras analizadas. Una de las recomendaciones para el análisis de la turbina Pelton es ampliar superficie de captación o integrar fuentes complementarias de agua como un almacenamiento ya que está limitada por la disponibilidad y variabilidad de la precipitación captada, para la Vortex si R se calcula con un caudal mucho mayor que el realmente es interceptado por tu prototipo, R podría estar sobreestimado y favorecer a los índices emergéticos, es necesario hacer sus respectivas validaciones.

Es importante señalar que dichos resultados dependen fuertemente de los supuestos metodológicos, la calidad de los datos de entrada y salida, así como las decisiones tomadas en la delimitación del sistema, además de errores comunes como la subestimación o sobreestimación de los recursos, la sensibilidad de los sistemas a la escala temporal y espacial. El uso de esta metodología es de gran relevancia, su aplicación regular en la planificación y evaluación de proyectos puede ayudar a evitar decisiones basadas únicamente en costos o rendimiento técnico, promoviendo así una visión más sustentable a largo plazo.

Referencias

- Brown, M. T. y Ulgiati, S. (2004a). Emergy Analysis and Environmental Accounting. En Encyclopedia of Energy (pp. 329–354). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00242-4>
- Brown, M. T y Ulgiati, S. (2004b). Emergy, Transformity, and Ecosystem Health. In S.E.
- Brown, M.T. y McClanahan, T. R. (1996). Emergy analysis perspectives of Thailand and Mekong River dam proposals. *Ecological Modelling*, 91(1–3), 105–130. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(95\)00183-2](https://doi.org/10.1016/0304-3800(95)00183-2)
- BUN-CA. (s/f). Pequeñas centrales hidroeléctricas guía general. www.bun-ca.org/areas-de-trabajo/energia-renovable/
- CNR. (n.d.). Obras de riego con microcentrales hidroeléctricas, comisión nacional e riego. Retrieved August 10, 2025, from https://www.cnr.gob.cl/temas-transversales/energias-renovables-en-riego/minihidro/#_
- De Vilbiss, C., Arden, S., Brown, M. T., Campbell, D. E., Ma, X. y Ingwersen, W. (2024). The Unit Emergy Value (UEV) Library for Characterizing Environmental Support in Life Cycle Assessment.
- Du, H., Yang, L., Wang, W., Lu, L. y Li, Z. (2022). Emergy theory to quantify the sustainability of large cascade hydropower projects in the upper Yangtze. *Ecological Modelling*, 468. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.109954>
- El Colegio de México. (2020). Balance hídrico de la cuenca Amacuzac.
- ESHA. (2006). Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica.
- Fang, D., Chen, S. y Chen, B. (2015). Emergy analysis for the upper Mekong river intercepted by the Manwan hydropower construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 899–909. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.061>
- Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo sobre el Agua. Proyecto 84369. CONACyT - CONAGUA. (2012). Informe de validación en campo cuenca del río amacuzac, morelos.
- Gallagher, J., Styles, D., McNabola, A. y Williams, A. P. (2015). Life cycle environmental balance and greenhouse gas mitigation potential of micro-hydropower energy recovery in the water industry. *Journal of Cleaner Production*, 99, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.011>

- González, J., Colmenar, A. y Castro, M. A. (2009). Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables (M. Martín-Romo & E. Martín, Eds.). PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Guzmán, N. y Vargas, S. (2009). El manejo comunitario del agua en la cuenca del río amacuzac: conflictos y pobre gobernanza del agua.
- Haya, E. (2016). Análisis de Ciclo de Vida. <http://www.eoi.es>
- IRENA. (2012). Renewable energy technologies: cost analysis. www.irena.org/Publications
- IRENA. (2023). Costos de generación de energías renovables en 2022. www.irena.org
- Kang, D. y Park, S. S. (2002). Emergy evaluation perspectives of a multipurpose dam proposal in Korea. *Journal of Environmental Management*, 66(3), 293–306. <https://doi.org/10.1006/jema.2002.0594>
- Lazo, D. A. y Urbina, C. (2015). Análisis de ciclo de vida y energético de las centrales hidroeléctricas Agoyán y Paute. Escuela Politécnica Nacional.
- Martínez-Vallejo, L. A., Cortés-Mora, H. G., Méndez-Alcázar, J. A. y Peña-Reyes, J. I. (2022). Un enfoque desde la sustentabilidad: análisis de ciclo de vida como herramienta para la toma de decisiones en el desarrollo de proyectos hidroeléctricos en Colombia. *Gestión y Ambiente*, 24(Supl2), 224–237. <https://doi.org/10.15446/ga.v24nsupl2.86822>
- Meza-Prieto, B. y Aparicio, J. (2018). Evaluación del potencial hidroenergético a pequeña escala en cuencas hidrológicas con un modelo lluviaescurrimiento. *Tecnología y ciencias del agua*, 09(1), 69–87. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-01-05>
- Morales, S., Corredor, L., Paba, J. y Pacheco, L. (2014). Stages in the development of a small hydropower project: Context and implementation basic criteria Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y criterios básicos de implementación. *DYNA*, 81(184), 178–185. <http://dyna.medellin.unal.edu.co/>
- Odum, H. T. (1996). Environmental accounting emergy and environmental decision making.
- Orille, Á. (1993). Centrales eléctricas I.
- Paish, O. (2002). Small hydro power: technology and current status. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 6). www.elsevier.com/locate/rser

Ramos-Gutiérrez, L. y Montenegro-Fragoso, M. (2012). Las centrales hidroeléctricas en México: pasado, presente y futuro. *Tecnología y ciencias del agua*. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000200007&lng=es&tlng=es.

Ren, S. y Feng, X. (2021). Emergy evaluation of ladder hydropower generation systems in the middle and lower reaches of the Lancang River. *Renewable Energy*, 169, 1038–1050. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.091>

Rugani, B. y Benetto, E. (2012). Improvements to emergy evaluations by using life cycle assessment. *Environmental Science and Technology*, 46(9), 4701–4712. <https://doi.org/10.1021/es203440n>

Santagata, R., Zucaro, A., Fiorentino, G., Lucagnano, E. y Ulgiati, S. (2020). Developing a procedure for the integration of Life Cycle Assessment and Emergy Accounting approaches. The Amalfi paper case study. *Ecological Indicators*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106676>

Secretaría de Energía. (2012). *Prospectiva de Energías Renovables 2012 - 2026*.

Tassinari, C. A., Bonilla, S. H., Agostinho, F., Almeida, C. M. V. B. y Giannetti, B. F. (2016). Evaluation of two hydropower plants in Brazil: using emergy for exploring regional possibilities. *Journal of Cleaner Production*, 122, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.077>

Torres-Verzagas, B., Leyva-Galán, Á. y Pozo-Rodríguez, P. (2019). Emergía: generalidades, apuntes, y ejemplos de utilidad, como herramienta para evaluar la sostenibilidad. En *Cultivos Tropicales* (Vol. 40, Número 2). <http://ediciones.inca.edu.cu>

Turín, E., Arce, F. G., Zelada, G. M., Muñoz, G. H., Benavente, L. C., Cruz, L., Tinoco, Ó. R., Gutiérrez, P. C., Moore, R. K. y Estrada, S. (2021). *Desafíos para el Ingeniero Industrial: Competencias ambientales*.

Ueda, T., Roberts, E. S., Norton, A., Styles, D., Williams, A. P., Ramos, H. M. y Gallagher, J. (2019). A life cycle assessment of the construction phase of eleven micro-hydropower installations in the UK. *Journal of Cleaner Production*, 218, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.267>

Varela, A. M. (2022). *Actualización del potencial energético desde una pequeña central hidroeléctrica (PCH) para el departamento del Huila y realización de un piloto de una PCH en la región RAP-E (Región administrativa de planificación especial)*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad Tecnológica.

Zamora, M. (2019). Eficiencia de micro central hidroeléctrica relativa al dimensionamiento geométrico de la turbina. Instituto interamericano de tecnología y ciencias del agua.

Zamora, M. (2022). Análisis de la eficiencia y diseño de una turbina para la generación de energía hidroeléctrica a superficie libre bajo flujos no estacionarios.

Zamora-Juárez, M. Á., Fonseca, C. R., Guerra-Cobián, V. H., López-Rebollar, B. M., Gallego, I. y García-Pulido, D. (2023). Parametric assessment of a Pelton turbine within a rainwater harvesting system for micro hydro-power generation in urban zones. *Energy for Sustainable Development*, 73, 101–115. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.01.015>

Zamora-Juárez, M. A., Guerra-Cobián, V. H., Fonseca, C. R., López-Rebollar, B. M., Ferriño, A. L. y Bruster, J. L. (2022). Performance of modified gravitational water vortex turbine through CFD for hydro power generation on micro-scale. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(11). <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03834-y>

Zavala-Reyna, A., Bautista-Olivas, A., Alvarado-Ibarra, J., Velázquez-Contreras, L. y Peña-León, D. (2017). Cuantificación emergética ambiental en la producción de lombricompost. *LOMBRICOMPOST Agrociencia*, 51(5), 543–553. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30252307005>

ANEXOS

Anexo 1

Tabla 11. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18089

Año	Caudal (m ³ /s)
1951	0.55388788
1952	0.63901548
1953	0.59323213
1954	0.36724154
1955	0.51759719
1956	0.58043468
1957	0.46748015
1958	0.38109924
1959	0.60851527
1960	0.46934729
1961	0.50310411
1962	0.3083
1963	0.56171516
1964	0.59083298
1965	0.57766453
1966	0.50934854
1967	0.56136366
1968	0.95335669
1969	0.67027333
1970	0.97645404
1971	1.24704211
1972	1.46188138
1973	1.856
1980	0.42523247
1981	0.49557096
1982	0.46347978
1983	0.62393624
1984	0.71646896
1985	0.60234326
1986	1.68114271
1987	0.62575466
1988	1.88652148
1989	0.62767134
1990	0.47480654
1991	1.0309319
1992	0.99613233
1993	1.75770355
1994	1.63231345

1995	2.897
2005	1.0130678
2006	1.36758921
2007	1.38276334
2008	1.68712813
2010	1.26867503
2011	1.64113267
Caudal promedio general:	0.69634095

Anexo 2

Tabla 12. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18175

Año	Caudal (m ³ /s)
1948	1.0423595
1949	0.71384413
1950	0.63527821
1951	0.66409921
1952	0.96829631
1953	0.75376014
1954	0.83485395
1955	0.79189317
1956	0.84068573
1957	1.03526927
1958	1.02483185
1959	1.02249889
1960	1.12458307
1961	1.18101544
1962	1.01947722
1963	0.91584473
1964	0.81417733
1965	0.63407696
1966	0.70606386
1967	0.65527347
1968	0.68584761
1969	0.64746111
1970	0.82374875
1971	0.81076345
1972	0.77195957
1973	0.76241468
1974	0.77544551
1975	0.74463193
1976	0.71092629
1977	0.68741674
1978	0.61897047
1979	0.65475308
1980	0.66881538
1981	0.69939041
1982	0.60806741
1983	0.58942973
1984	0.6097875
1985	0.71417946
1986	0.87865
1987	0.76972778

1989	0.74019788
1990	0.61695961
1991	0.49165316
1992	0.58011739
1993	0.60164238
1994	0.55276454
1995	0.6995186
1996	0.7322713
1997	0.68192512
1998	0.75015814
1999	0.70035721
2000	0.68239032
2001	0.65516817
2002	0.71106797
2003	0.67623267
2004	0.81008302
2005	0.88633817
2006	0.78820637
2007	0.72230002
2008	0.81016669
2009	0.78430682
2010	0.73001169
2011	0.75343153
2012	0.6690494
2013	0.61520469
2014	0.7087167
Caudal promedio general:	0.83722316

Anexo 3

Tabla 13. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18193

Año	Caudal (m ³ /s)
1949	0.61071806
1950	1.30090415
1951	1.69876369
1952	1.42843974
1953	0.81318981
1954	1.61830843
1955	2.08887318
1956	3.45973763
1957	1.89330955
1958	3.77815474
1959	2.45760322
1960	1.61532571
1961	2.35739661
1962	1.64760382
1963	1.49263602
1964	1.15819811
1965	1.72522066
1966	1.77358189
1967	2.23900806
1968	2.14813252
1969	2.61042318
1970	2.89980873
1971	2.34762136
1972	2.14314903
1973	3.47933201
1974	2.39923961
1975	4.31265612
1976	1.93545847
1977	0.77969925
1978	1.04838072
1979	0.92711116
1980	0.645
1981	1.39230781
1982	0.52240015
1983	1.28138447
1984	1.28587359
1985	0.77474422
1986	1.58834507
1987	1.32303208
1988	0.3913

1995	4.08045784
1996	1.50869399
1997	1.12644789
1998	3.42623818
1999	2.89479896
2000	2.30709399
2001	3.32374593
2002	2.69607112
2003	4.89352141
2004	1.66889853
2005	1.62893161
2006	2.23483627
2007	1.10884924
2008	1.57843131
2009	0.7805683
2010	2.43216134
2011	2.25158006
2012	0.88025461
2013	0.90037228
2014	1.76587866
Caudal promedio general:	1.76058147

Anexo 4

Tabla 14. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18200

Año	Caudal (m ³ /s)
1949	0.557466929
1950	0.498841667
1951	0.609330663
1952	0.624641477
1953	0.57540315
1954	0.583528415
1955	0.600188433
1956	0.666190977
1957	0.679517626
1958	0.755447851
1959	0.682023342
1960	0.714927968
1961	0.706346419
1962	0.68426756
1963	0.688827968
1964	0.763497326
1965	0.699998148
1966	0.645828117
1967	0.656560458
1968	0.563721246
1969	0.578382258
1970	0.579754878
1971	0.579149677
1972	0.581949324
1973	0.578112245
1974	0.593613699
1975	0.578264151
1976	0.555326368
1977	0.53681747
1978	0.511832099
1979	0.615335115
1980	0.60681203
1981	0.586089362
1982	0.551772857
1983	0.319037931
1984	0.439380909
1985	0.558924038
1986	0.585065986
1987	0.556415789
1988	0.581159551

1989	0.559384532
1990	0.511925632
1991	0.503023028
1992	0.508404054
1993	0.496428421
1994	0.431844248
1995	0.504167907
1996	0.504
1998	0.4877592
1999	0.456027306
2000	0.460525217
2001	0.469
2003	0.49657764
2004	0.503480882
2005	0.502434222
2006	0.473614851
2007	0.467809211
2008	0.486041369
2009	0.506562503
2010	0.481989905
2011	0.547706521
2012	0.47763097
2013	0.495708863
2014	0.567610824
Caudal promedio general:	0.585468622

Anexo 5

Tabla 15. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18223

Año	Caudal (m ³ /s)
1951	5.11033846
1952	2.25789472
1953	0.59401195
1954	1.50186305
1955	2.92846626
1956	3.70819579
1957	0.77678882
1958	5.87979252
1959	2.09216656
1960	1.95436479
1961	5.19550178
1962	0.86603357
1963	0.41583821
1964	0.74044742
1965	0.6798732
1966	0.82706151
1967	1.24096049
1968	1.10417426
1969	1.1937859
1970	1.58166448
1971	1.65093598
1972	0.43188909
1973	1.51276722
1974	0.8997504
1975	1.8027807
1976	1.82240416
1977	0.833615
1978	0.73256313
1979	0.68694091
1980	1.2887285
1981	2.34198747
1982	0.19421551
1983	1.13843721
1984	1.20891921
1985	0.59624321
1986	0.0452
1987	1.69534983
1988	3.74224388
1989	1.02364131
1990	2.73660244

1991	1.43424658
1992	1.12854497
1993	1.53216366
1994	0.95423363
1995	4.01977661
1996	1.11674919
1997	0.98151086
1998	4.80355743
1999	2.74137627
2000	0.015
2001	2.37965181
2002	2.05236987
2003	0.024
2006	4.00623155
2007	2.23328481
2008	4.08214386
2009	1.25772219
2010	4.64939836
2011	4.44168535
2014	4.68168733
Caudal promedio general:	1.45620437

Anexo 6

Tabla 16. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18225

Año	Caudal (m ³ /s)
1952	1.92467629
1953	1.8887684
1954	1.86253347
1955	3.45161289
1956	1.304925
1980	2.47432204
1981	3.47576732
1982	2.49492252
1983	2.80902404
1984	5.14957605
1985	3.49238548
1986	3.25850708
1987	2.88198971
1995	5.56339513
1996	5.66675261
1997	2.64113822
1998	2.66146717
1999	3.27078526
2000	3.68754157
2001	3.7326753
2002	3.48301441
2003	4.36850502
2004	3.95335438
2005	2.89948816
2006	4.26006505
2007	4.07297756
2008	4.05800592
2009	3.73081381
2010	6.23350609
2011	2.60542745
2012	1.86597026
2013	1.59495963
2014	1.7344959
Caudal promedio general:	3.21441181

Anexo 7

Tabla 17. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18232

Año	Caudal (m ³ /s)
1955	43.7115241
1956	42.64771
1957	34.4586402
1958	68.1623439
1959	59.7104647
1960	43.6333567
1961	39.0362237
1962	22.9050224
1963	30.0115392
1964	47.3993401
1965	32.2559515
1966	39.8266697
1967	36.6943705
1968	47.2892378
1969	69.837517
1970	54.4098686
1971	56.2584839
1972	42.119644
1973	59.0682853
1974	36.0577062
1975	44.5587418
1976	48.4461949
1977	25.2440611
1978	44.6089198
1979	17.7115034
1980	40.5112928
1981	80.5311221
1982	14.8394699
1983	33.6500901
1984	44.4914962
1985	39.3309626
1986	14.3325301
1987	16.1754591
1988	19.2854095
1989	20.7198322
1990	38.0427233
1991	19.6616784
1992	22.4936119
1993	27.8821336
1994	15.2820988

1995	99.8810222
1996	24.9981849
1997	27.7348632
1998	41.3683472
1999	42.5065229
2000	36.7433285
2001	42.1777519
2002	40.1741767
2003	34.0340784
2004	28.1892994
2005	30.1881212
2006	26.2986308
2007	24.0165718
2008	35.4216487
2009	25.4203691
2010	51.0547525
2011	30.7190216
2012	20.3941101
2013	25.6231943
2014	18.7588493
Caudal promedio general:	35.0196979

Anexo 8

Tabla 18. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18264

Año	Caudal (m ³ /s)
1980	9.43711867
1981	9.68564005
1982	4.12063289
1983	8.49462878
1984	6.43046793
1985	6.38182404
1986	4.18905486
1987	7.00199068
1988	6.95100196
1989	9.5162488
1990	13.16373
1991	18.430535
1992	7.37005719
1993	8.92131238
1994	11.7203296
1995	24.0135231
1996	8.96499827
1997	10.247793
1998	19.7858918
1999	17.9490255
2000	16.9153653
2001	16.1975723
2002	12.443458
2003	16.6373177
2004	13.634786
2005	8.20725039
2006	9.72596406
2007	8.3431671
2008	13.7438243
2009	9.97785551
2010	14.6796606
2011	6.76553711
2012	8.78114028
2013	6.6714856
2014	9.40921494
Cauda promedio general:	10.2961151

Anexo 9

Tabla 19. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18269

Año	Caudal (m ³ /s)
1980	2.27303808
1981	2.40318541
1982	0.63018168
1983	3.0306581
1984	1.98568847
1985	1.51729668
1986	2.31891934
1987	3.477855
1988	3.06321022
1989	2.89071618
1990	1.23266091
1991	1.157
1992	3.34326224
1993	3.95136896
1994	4.40336042
1995	10.9336441
1996	3.14154821
1998	5.52129802
1999	3.21546657
2000	2.1851668
2001	3.04487872
2002	3.22427388
2003	1.78828477
2004	3.40853425
2005	2.07974659
2006	2.15749873
2007	2.58142117
2008	2.83710456
2009	0.91702345
2010	1.52018953
2011	1.28753883
2012	1.23818564
2013	0.97333588
2014	1.97417525
Caudal promedio general:	2.56011504

Anexo 10

Tabla 20. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18271

Año	Caudal (m ³ /s)
1956	2.07701223
1957	1.3587766
1958	2.72966341
1959	2.31284872
1960	1.59270515
1961	2.50030326
1962	2.12990716
1963	1.78313186
1964	1.79687358
1965	1.90960438
1966	1.27329501
1967	2.09107018
1968	1.92537303
1969	2.43342256
1970	2.72714333
1971	2.65932201
1972	2.28371546
1973	4.01389139
1974	2.20779716
1975	2.34355947
1976	3.20672653
1977	2.41550822
1978	2.82686503
1979	2.54640753
1980	2.26713095
1981	3.38655191
1982	1.81054045
1983	2.17389914
1984	2.16859235
1985	2.34307952
1986	2.57873735
1987	4.79247232
1988	4.51439439
1989	4.24962252
1990	5.39967431
1991	4.62968245
1992	4.5841145
1993	4.92340512
1994	4.68536214
1995	7.18588761

1996	4.37096988
1997	3.55782598
1998	5.74389052
1999	4.89832597
2000	3.75929007
2001	4.82406192
2002	4.73563282
2003	5.02027055
2004	2.77832319
2005	1.78346914
2006	4.10938498
2010	4.97364544
2011	6.21134017
Caudal promedio general:	2.70348156

Anexo 11

Tabla 21. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18291

Año	Caudal (m ³ /s)
1979	1.73142141
1980	2.01830592
1981	2.63335885
1982	0.62591174
1983	1.24029981
1984	2.26027667
1985	1.51519826
1986	0.3859
1988	2.24086579
1989	1.71004855
1990	1.32457493
1991	0.53507725
1992	1.05090789
1993	0.82099473
1994	0.82438899
1995	1.2096726
1996	0.9686328
1997	0.66389028
1998	0.92915379
1999	0.89080245
2000	0.69001844
2001	1.30154407
2002	0.9851806
2003	0.554
2006	0.88635119
2007	0.32227034
2008	0.66285807
2009	0.63772844
2011	0.61711959
2012	0.69211011
2013	0.77950976
2014	0.7767467
Caudal promedio general:	1.37533326

Anexo 12

Tabla 22. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18294

Año	Caudal (m ³ /s)
1980	1.27766775
1981	3.57480695
1982	0.59714721
1983	1.54475087
1984	1.31493351
1985	2.01691873
1986	1.21689901
1987	1.21353089
1988	1.6797323
1989	1.26865695
1990	0.97030276
1991	1.24000269
1992	1.53508357
1993	3.11118263
1994	1.50562371
1995	3.05480185
1996	2.29996315
1997	2.03801042
1998	2.75367254
1999	1.48224962
2000	1.61937776
2001	2.68157992
2002	0.404
2003	2.51492902
2004	2.11853528
2005	2.15086699
2006	2.40736094
2007	1.16875951
2008	1.92447957
2009	1.43129757
Caudal promedio general:	1.96736893

Anexo 13

Tabla 23. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18295

Año	Caudal (m ³ /s)
1980	3.75312563
1981	5.40648187
1982	1.40557323
1983	1.11466252
1984	3.17647006
1985	3.13747106
1986	3.95837699
1987	3.59279091
1988	3.69393829
1989	3.61716453
1990	2.52592226
1991	3.81743858
1992	3.19327285
1993	5.09904065
1994	4.0216418
1995	3.65442996
1996	2.73008678
1997	2.22378501
1998	3.10815147
1999	2.66953145
2000	1.98683461
2001	3.27096263
2002	0.645
2003	2.12831749
2004	0.3
2005	1.86888979
2006	2.34674375
2007	1.90507434
2008	2.11188645
Caudal promedio general:	3.13552318

Anexo 14

Tabla 24. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18316

Años	Caudal (m ³ /s)
1960	0.15840268
1961	0.95939551
1962	0.93459579
1963	0.48271221
1964	0.40933148
1965	0.59408821
1966	1.05022103
1967	0.99520428
1968	2.85777523
1969	2.3361531
1970	2.50353702
1971	7.69357653
1972	1.74149732
1973	1.16144905
1974	1.36536686
1975	1.26778994
1976	4.58726207
1977	3.84590739
1978	1.84846368
1979	4.00034855
1980	0
1981	4.16144098
1982	0.15693004
1983	1.82140473
1984	1.71369893
1985	0.91319713
1986	0.53142883
1987	0.5686737
1988	0.564
1989	0.38233795
2003	0.87076533
2004	0.80171823
2005	0.30417666
2006	0.093
2007	0.27434482
2008	0.14671252
2009	0.02937762
2010	0.20524775
2012	0.14579188
2013	0.09288924

2014	0.22623266
Caudal promedio general:	1.15636182

Anexo 15

Tabla 25. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18372

Año	Caudal (m ³ /s)
1980	11.6553058
1981	20.8916302
1982	5.05843842
1983	7.12813909
1984	11.0550426
1985	15.2236428
1986	1.65
1994	7.34032853
1995	12.093332
1996	6.51398697
1997	6.72889401
1998	11.0130071
1999	9.57255564
2000	8.99434379
2001	10.1663186
2002	11.1229357
2003	11.6391099
2004	10.8026415
2005	11.0368542
2006	10.3149034
2007	3.36
2010	8.73103157
2011	7.32398144
2012	7.39456083
2013	8.37310611
2014	7.78106607
Caudal promedio general:	10.4615288

Anexo 16

Tabla 26. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18406

Año	Caudal (m ³ /s)
1968	7.05618149
1969	9.08747771
1970	7.82275889
1971	7.54222725
1972	7.43655196
1973	7.02268724
1974	7.09164223
1975	7.05713138
1976	7.20661721
1977	7.20271061
1978	6.7104443
1979	6.53603333
1980	6.6681946
1981	7.09681518
1982	7.13117863
1983	6.47644823
1984	6.72991981
1985	6.7558816
1986	6.46720465
1987	12.8911766
1988	6.39471189
1989	6.30311085
1990	6.5112833
1991	6.51759922
1992	6.69303117
1993	6.82346091
1994	6.42805872
1995	6.4360456
1996	7.36152146
1997	6.92028824
1998	6.59251576
1999	6.85945771
2000	6.34721348
2001	6.60822252
2002	6.64334759
2003	6.65938889
2004	7.28362286
2005	6.94008287
2006	6.74674947
2007	6.14492701

2008	6.22764836
2010	7.27029031
2011	7.16446201
2012	7.02409974
2013	7.18622634
2014	6.56133935
Caudal promedio general:	6.99569199

Anexo 17

Tabla 27. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18437

Año	Caudal (m ³ /s)
1971	43.590645
1972	37.7226054
1973	50.4823329
1974	37.685159
1975	42.3496287
1976	43.9239975
1977	39.6045074
1978	43.0328328
1979	30.4303717
1980	35.5834896
1981	59.4107751
1982	25.3967317
1983	27.5108576
1984	35.8043684
1985	43.4304022
1986	25.9100792
1987	33.5837903
1988	15.505
1989	56.1874098
1990	30.4708085
1991	32.4967
1992	34.7258721
1993	36.7306778
1994	24.530774
1995	42.8445844
1996	30.867757
1997	30.3863216
1998	43.5869849
1999	43.3579535
2000	34.683523
2001	39.0799365
2002	40.3762561
2003	44.8715816
2004	39.2541567
2005	48.5098468
2006	37.7764954
2007	51.2312141
2008	82.1793892
2010	57.251925
2011	38.7132114

Caudal promedio general:	39.8296647
--------------------------	------------

Anexo 18

Tabla 28. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18557

Año	Caudal (m ³ /s)
1976	0.61042516
1978	0.46250364
1979	0.45095393
1980	0.41401639
1981	0.52230303
1982	0.49839231
1983	0.34613967
1984	0.35474444
1985	0.37903429
1986	0.35958511
1987	0.4208276
1988	0.42190701
1989	0.39833165
1990	0.35976798
1991	0.38600909
1992	0.40352438
1993	0.41819064
1994	0.39853295
1995	0.43692324
1996	0.44303049
1997	0.41577477
1998	0.449912
1999	0.44718882
2000	0.43123907
2001	0.38321867
2002	0.38758688
2003	0.45669455
2004	0.55760268
2005	0.46163585
2006	0.461
Caudal promedio general:	0.4306222

Anexo 19

Tabla 29. Caudal promedio anual estación hidrométrica 18572

Año	Caudal (m ³ /s)
1981	5.43921923
1982	4.03201739
1983	5.95857194
1984	7.09033501
1985	7.9330851
1986	3.433
1987	5.67303452
1988	7.93675115
1989	7.00261876
1990	3.39979775
1993	7.48641236
1994	4.56647863
1995	8.8949309
1996	5.41376978
1997	5.39818051
1998	6.59319409
1999	4.56
2007	2.34100237
2008	5.07801759
2009	6.08255982
2011	7.49036932
2012	5.74108715
2013	6.06712424
2014	7.07201919
Caudal promedio general:	6.50211252