

JORNADAS ACADÉMICAS TRANSICIÓN ENERGÉTICA Y DESARROLLO PRODUCTIVO EN BOLIVIA

ABRIL 2025



Journal

Boliviano de Ciencias

Equipo Editorial

Editor en Jefe

Pablo Arce Maldonado, PhD

Universidad Privada del Valle, Bolivia

Editor de sección: Ingeniería Civil

M.Sc. María Elena Sahonero Saravia

Universidad Privada del Valle, Bolivia

Nahúm Gamalier Cayo Chileno, PhD(c)

Universidade Federal de Rio de Janeiro, Brasil

Joaquín Humberto Aquino Rocha, PhD

Universidad Mayor de San Simón, Bolivia

Editor de sección: Industrias

Ing. Daysi Lidia Iñiguez Calveti,

Universidad Privada del Valle, Bolivia

M.Sc. Manuel Laredo Garnica

Grupo-Mamut. Bolivia; Paraguay y México

Editor de sección: Electromecánica,

Mecatrónica y Aeronáutica

Ing. Edson Gastón Montaño Bautista

Universidad Privada del Valle, Bolivia

Pablo Adolfo Jiménez Zabalaga, PhD(c)

Université catholique de Louvain, Bélgica

Editor de sección: Petróleo y energías

Ing. Ximena Uscamayta Urizacari

Universidad Privada del Valle, Bolivia

Miguel Hernán Fernández Fuentes, PhD

Immersive Consulting Group, Bolivia

Editor de sección: Sistemas, Electrónica y Biomédica

M.Sc. Eynar Calle Viles

Universidad Privada del Valle, Bolivia

Bismark Claure Torrico, PhD

Universidade Federal do Ceará, Brasil

Editor de sección: Ingeniería de alimentos

Tania Araujo Burgos, PhD

Universidad Privada del Valle, Bolivia

Melissa Miranda Durán, PhD

Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia

Editor de sección: Arquitectura

M.Sc. Marcelo Pérez Mercado

Universidad Privada Boliviana, Bolivia

Patricia Arana Sema, PhD(c)

Visionaria - Arquitectura & Ambiente, Bolivia

Comité Editorial

Sección: Ingeniería Civil

Saulo Rocha Ferreira, PhD

Universidade Federal de Lavras (UFLA), Brasil

Sección: Ingeniería Industrial

Antoni Gil Pujol, PhD

Peak Resilience Pte Ltd, Singapur

Sección: Electromecánica, Mecatrónica y Aeronáutica

Francisco Javier Triveño Vargas, PhD

Consultor y Catedrático en Asia y Medio Oriente

Sección: Petróleo y energías

Camila Barreneche Güerisoli, PhD

Universitat de Barcelona, España

Sección: Sistemas, Electrónica y Biomédica

Carlos Estrada Nava, PhD

Instituto Nacional de Administración Pública, México

Sección: Ingeniería de Alimentos

Federico José Armando Pérez-Cueto Eulert, PhD

Umeå Universitet, Suecia

Sección: Arquitectura/Diseño de Interiores

Nino Andrey Gaviria Puerta, PhD

Universidad de San Buenaventura, Colombia

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

M.Sc. Gonzalo Vicente Ruiz Ostría

Rector Nacional

Diego Alonso Villegas Zamora, Ph.D.

Vicerrector Académico Nacional

M.Sc. Sandra Marcela Ruiz Ostría,

Vicerrectora Interacción Social y Difusión

Cultural

M.Sc. Daniela Zambrana Grandy

Secretaría General

Ing. Pamela Gil

Vicerrectora Sede Académica Santa Cruz

Carlos Torricos, M.B.A.

Vicerrector Sede Académica Sucre

M.Sc. Franklin Nestor Rada

Vicerrector Sede Académica La Paz

M.Sc. Martha Mejía Fayer

Vicerrectora Sede Académica Trinidad

M.Sc. Jorge Carlos Ruiz De la Quintana

Director Nacional de Investigación

EQUIPO TÉCNICO

Ing. Giubell Melanie Mercado Franco

**Coordinadora de Difusión Científica y
formación en investigación**

Dr. M.Sc. Rommer Ortega Martínez

**Coordinador de Publicaciones Científicas,
Académicas y Literarias**

M.Sc. Luis Marco Fernández Sandoval

Coordinador de Producción Audiovisual Digital

Lic. María Fernanda Torrico Rojas

Asistente en Divulgación y Manejo de Redes

Depósito Legal N° 2-3-66-09
La reproducción parcial o total de los
artículos está permitida en tanto las
fuentes sean citadas.

Es parte de:



Universidad Privada del Valle
Telf: (591) 4-4318800 / Fax: (591) 4-4318886.
Campus Universitario Tiquipaya.
Calle Guillermina Martínez, s/n, Tiquipaya.
Casilla Postal 4742.
Cochabamba – Bolivia.

ÍNDICE

Páginas

Editorial

Editorial

Miguel Hernán Fernández Fuentes, PhD.....5

Estudio de factibilidad para la implementación de la agrovoltaica en Bolivia.

Feasibility study for the implementation of agrovoltaic in Bolivia

Bryan Didson Montaño Mariscal.....6-21

Evaluación de un prototipo de cocina de biomasa tipo batch utilizando asai y pellets de aserrín de pino como combustible, conforme a la normativa NB/ISO 19867-1, para su implementación en áreas rurales de Bolivia

Evaluation of a batch-type biomass stove prototype using asai and pine sawdust pellets as fuel, in accordance with regulation NB/ISO 19867-1, for implementation in rural areas of Bolivia

Mariela Lizbeth Huanca Alcazar, Evelyn Cardozo.....22-41

Diseño y Construcción De Un Aerogenerador De Eje Vertical Tipo Banki Para Microgeneración Urbana

Design and construction of a Banki Vertical Axe Wind Turbine for Energy Harvesting

**Rafaella Hazel Rojas-Rojas, Daniel Felipe Sempertegui-Tapia, Omar Castellón-Castellón,
Renán Orellana-Lafuente.....42-59**

Energía para usos productivos. ¿Qué sabemos? ¿Y para el caso de las Mypes de Bolivia?

Energy for productive uses. What do we know? And for Bolivia's MSEs?

Jesica I. Sarmiento M. Eugenia Castelao Caruana Miguel H. Fernández-Fuentes.....60-74

Transición Energética Y Desarrollo Productivo En Bolivia: Viabilidad Tecno-Económica de Sistemas Híbridos Solar-Biogás en el Sector Productivo

Energy Transition and Productive Development in Bolivia: Techno-Economic Feasibility of Solar-Biogas Hybrid Systems in the Productive Sector

J. Villarroel-Schneider.....75-87

¿Verde o justa? implicancias de este dilema en torno a la transición energética a partir de estudios de caso en Bolivia

Green or Just? Implications of this dilemma for the energy transition: case studies from Bolivia

Pérez, Soledad Analía, Luna, Matilde Eugenia.....88-103

Participación de las mujeres en cadenas productivas en Bolivia. Una mirada desde el enfoque de género e interseccional

Participation of Women in Productive Value Chains in Bolivia: A Perspective from a Gender and Intersectional Approachds

Paola Portillo Calderón.....104-116

Análisis espacial del potencial de electrificación de estanques destinados a la piscicultura en áreas tropicales de Bolivia, y primera estimación de la potencia agregada de generación distribuida, el ahorro en combustibles y emisiones de CO₂

Spatial analysis of the potential for electrification of ponds intended for fish farming in tropical areas of Bolivia and first estimate of the added power of distributed generation, fuel savings and CO₂ emissions.

Michelle Fernández-Vázquez, Miguel Fernández-Fuentes.....117-134

Estimación de la huella de carbono de la piscicultura. Estudio de caso en Mariposas, Puerto Villarroel, Cochabamba

Carbon Footprint Estimation of Fish Farming: A Case Study in Mariposas, Puerto Villarroel, Cochabamba

Maria Celeste Marka Añez, Miguel Fernandez Vazquez.....135-155

Biocombustibles de segunda generación en Bolivia. Oportunidades y desafíos para una transición energética sostenible.

Second-generation biofuels in Bolivia. Opportunities and challenges for a sustainable energy transition

Jaime Fernando Ochoa Figueroa.....156-174

NOTA EDITORIAL



**Miguel Hernán
Fernández Fuentes, PhD**
Immersive Consulting
Group, Bolivia
Editor de Sección –
Petróleo y Energías,
Journal Boliviano de
Ciencias

Esta edición del *Journal Boliviano de Ciencias* presenta una selección de artículos científicos presentados en las **Jornadas Académicas “Transición Energética y Desarrollo Productivo en Bolivia”** realizadas el 23 y 24 de Abril de 2025 en Cochabamba - Bolivia, evento convocado en el marco del proyecto GENERIS, y contó con el soporte del IDRC de la Cooperación Canadiense.

Las Jornadas Académicas generaron un espacio que articuló a investigadores de diversas universidades bolivianas —UMSS, UPB, UNIVALLE, UNIBOL, instituciones técnicas, centros de investigación y proyectos nacionales e internacionales, cuyos trabajos muestran avances significativos en energías renovables, eficiencia energética, y generación distribuida, aplicada a los usos productivos; reflejando el rigor técnico de los equipos involucrados, el carácter colaborativo y multisectorial que distingue a este esfuerzo académico, y fortaleciendo así la producción científica nacional y la construcción de conocimiento aplicable a los desafíos energéticos actuales.

Con esta publicación se consolida un proceso de articulación entre universidades, organizaciones productivas y entidades del sector energético, que demuestran que la transición energética en Bolivia no debe entenderse únicamente como modernización tecnológica, sino como transformación social y económica con impactos directos en cadenas productivas, inclusión de mujeres y jóvenes, reducción de emisiones y mejora de condiciones rurales. Así, esta edición habilita una agenda continua de cooperación científica y aplicada, reafirmando que el país posee capacidades, actores y visión para avanzar hacia una transición energética sostenible, justa e inclusiva.

EDITORIAL NOTE

This edition of the Journal Boliviano de Ciencias presents a selection of scientific articles delivered at the Academic Conference “Energy Transition and Productive Development in Bolivia”, held on 23 and 24 April 2025 in Cochabamba, Bolivia. The event was convened within the framework of the GENERIS project and was supported by the IDRC of the Canadian Cooperation. The Academic Conference created a space that brought together researchers from various Bolivian universities — UMSS, UPB, UNIVALLE, UNIBOL — as well as technical institutions, research centres, and national and international projects. Their contributions demonstrate significant progress in renewable energies, energy efficiency, and distributed generation applied to productive uses; reflecting the technical rigour of the participating teams, the collaborative and multisectoral character that distinguishes this academic endeavour, and thereby strengthening national scientific output and the development of knowledge applicable to current energy challenges.

This publication consolidates a process of articulation among universities, productive organisations, and entities within the energy sector, demonstrating that the energy transition in Bolivia should not be understood solely as technological modernisation, but as a social and economic transformation with direct impacts on productive chains, the inclusion of women and young people, emissions reduction, and the improvement of rural conditions. Thus, this edition enables a continued agenda of scientific and applied cooperation, reaffirming that the country possesses the capacities, actors, and vision needed to advance towards a sustainable, just, and inclusive energy transition.

Artículo Científico

Estudio de factibilidad para la implementación de la agrovoltáica en Bolivia.

Feasibility study for the implementation of agrovoltaic in Bolivia

Bryan Didson Montaño Mariscal¹¹. Ingeniero eléctrico. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba. Bolivia. b.montanom64@gmail.com

RESUMEN

La quema de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, es uno de los factores causantes de fenómenos climáticos como granizos, sequías e inundaciones que generan pérdidas en producciones agrícolas, además, es factor que afecta a la salud de la sociedad en general. A lo largo del mundo entero se comenzó a plantear políticas que impulsan la producción de energía eléctrica a través de fuentes renovables y amigables con el medio ambiente. Bolivia no ha quedado al margen de esas políticas donde la Empresa Nacional De Electricidad se ha trazado como objetivo el cambio de matriz energética, buscando que la mayor parte de la energía que llega a los hogares bolivianos provenga de fuentes renovables. La agrovoltáica es una técnica innovadora que integra la producción de energía solar fotovoltaica y la agricultura en una misma superficie de terreno. Este enfoque estratégico utiliza estructuras elevadas o sombreadas para los paneles, lo que no solo genera electricidad, sino que también crea un microclima beneficioso para los cultivos al protegerlos del estrés térmico y reducir la evapotranspiración. El objetivo es optimizar el uso del suelo, permitiendo la coexistencia y sinergia de ambas actividades, lo que contribuye a una producción agrícola más resiliente y eficiente. Por ello es que se considera un aporte más que ayuda para lograr el cambio de matriz energética. Por la capacidad instalada en el sistema agrovoltáico, para el análisis de costos de producción y el análisis de factibilidad desarrollado en los nueve departamentos de Bolivia, se rige a las condiciones, reglamentos y normativas establecidas en el decreto supremo N° 5167 para generación distribuida, tomando en cuenta para el análisis la categoría general 1 de la estructura tarifaria vigente establecida para cada distribuidor en cada departamento.

Citar como: Montaño Mariscal, B.D. Estudio de factibilidad para la implementación de la agrovoltáica en Bolivia. *Journal Boliviano De Ciencias*, 21(58) 6-21. <https://doi.org/10.52428/20758944.y21i58.1368>

Recepción: 4/07/2025

Aprobación: 24/11/2025

Publicado: 30/12/2025

Declaración: Derechos de autor 2025 Montaño Mariscal, B.D.. Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0. Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento. [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



Palabras clave: Agrovoltáica. Fotovoltaica. Generación distribuida.

ABSTRACT

The combustion of fossil fuels for electricity generation is one of the main drivers of climate-related phenomena such as hailstorms, droughts, and floods, which cause severe losses in agricultural production. Furthermore, fossil fuel use represents a significant risk factor for public health. In response, governments around the world have introduced policies aimed at promoting electricity generation from renewable and environmentally friendly sources. Bolivia has not remained on the sidelines of these initiatives: the National Electricity Company has set the transition of the national energy matrix as a strategic objective, seeking to ensure that most of the electricity supplied to Bolivian households comes from renewable sources.

Agrovoltaics represents an innovative technique that combines solar photovoltaic energy production with agriculture on the same land surface. This strategic approach employs elevated or semi-transparent structures for photovoltaic panels, which not only generate electricity but also create a favorable microclimate for crops by mitigating thermal stress and reducing evapotranspiration. The overall objective is to optimize land use by enabling the coexistence and synergy of both activities, thereby fostering more resilient and efficient agricultural production. For this reason, agrovoltaics is considered a valuable contribution that supports the transition of the national energy matrix.

With respect to the installed capacity of agrovoltaic systems, both production cost assessments and feasibility analyses carried out across the nine departments of Bolivia are regulated by the conditions, guidelines, and standards established under Supreme Decree No. 5167 on distributed generation. These analyses are conducted in accordance with the General Category 1 of the current tariff structure, as defined for each electricity distributor in every department.

Keywords: Agrovoltaics. Photovoltaics. Distributed generation.

1. INTRODUCCIÓN

El mundo en la actualidad atraviesa uno de los mayores problemas como el “calentamiento Global”, el cual perjudica a toda la humanidad (Cabrera et al., 2018; Elortegui et al., 1998). Desde hace aproximadamente 150 años atrás cuando se inició la revolución industrial, se estima que dio inicio el cambio climático, esto se lo compara bajo el argumento que a la par de la revolución industrial se incrementó la generación de gases de efecto invernadero lo que por consecuencia provocó el aumento de temperaturas que da paso al calentamiento global. Datos anteriores a la llegada de la revolución industrial, gases como el Dióxido de carbono (CO₂) se situaban en niveles relativamente bajos de modo que el planeta no presentaba cambio alguno referente a los niveles de temperatura y desertización de la tierra.

Como respuesta para contrarrestar la problemática anterior surgen las nuevas tecnologías para la generación de energía eléctrica a través de la biomasa, solar térmica, solar fotovoltaica, eólica y geotermia con el fin de reducir los gases contaminantes.

De esta manera el plan a nivel mundial es cambiar las tecnologías de generación de energía eléctrica que funcionan a base de combustibles fósiles a tecnología amigable con el medio ambiente (Ibarra Yomayusa, 2022).

La generación fotovoltaica se encuentra dentro de estas tecnologías amigables con el medio ambiente, se define como una fuente de energía renovable sostenible e inagotable ya que su principal fuente para generar electricidad es la radiación solar, a través del principio fotoeléctrico.

Por otro lado, la agricultura es una actividad económica desarrollada en todo el mundo cuyo fin es la producción de alimentos como vegetales, frutas, hortalizas, cereales y otros.

En Bolivia, la agricultura es una actividad económica a menudo considerada como uno de los pilares fundamentales para el desarrollo de la economía del país.

Debido a la diversidad geográfica del territorio nacional, se puede considerar una gran ventaja poseer una variedad de tierras y climas.

El calentamiento global también ha llegado a afectar a esta actividad económica mediante el fenómeno de la sequía que tiene sus efectos sobre la erosión de la tierra, la falta de lluvias y las elevadas temperaturas o su contraparte lluvias intensas que generan inundaciones y fríos extremos, son efectos que impiden el desarrollo de la siembra y riego adecuado de las plantas y por consecuencia escasa o nula cosecha, lo que ocasiona daños y perjuicios en la economía de los agricultores.

La agrovoltaica surge como una propuesta novedosa para las centrales de generación fotovoltaica y los agricultores. Entre sus virtudes, ofrece una variedad de ventajas para este rubro cuyo objetivo es combatir los problemas que vienen arrastrando, ocupando espacios de producción agrícola para la generación de energía solar fotovoltaica sin perjudicar la producción agrícola y ofrecer a su vez una sombra que permite mejorar el desarrollo de los cultivos. De esta manera, mantiene la tierra húmeda, se reduce el consumo de agua y optimiza la producción (Goetzberger & Zastrow, 1981; Schindele et al., 2020).

Actualmente el país a través de la Empresa Nacional de Electricidad, ENDE, tiene como objetivo el cambio de matriz energética, lo que representa que se busca generar la mayor cantidad de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. Una alternativa más para alcanzar ese objetivo es que surge la Generación distribuida, regulada por normas y Decretos tales como el 4477 y el 5167. Este conjunto de cambios que se generan en el país, da pie al desarrollo de nuevas estrategias para la incorporación de sistemas de generación amigables con el medio ambiente, es así como se plantea que el presente estudio.

Se estima que desarrollar agrovoltaica como sistema de generación distribuida, ayuda a fomentar el estudio y la convivencia de ambas áreas (agrícola y generación fotovoltaica) de forma sinérgica, además, impulsa la implementación de sistemas fotovoltaicos conectados a la red (generadores distribuidos).

2. METODOLOGÍA

2.1 Relevamiento de información

El estudio de la investigación tomó un enfoque mixto porque se requiere inicialmente estudiar y poseer sólidos conceptos y fundamentos sobre agrovoltaica, para posteriormente desarrollar el diseño y dimensionamiento de un sistema agrovoltaico conectado a la red (generador distribuido) que brinde las condiciones adecuadas y óptimas para el beneficio del desarrollo de la producción agrícola y la producción de energía eléctrica garantizando el cumplimiento de las normas.

El estudio busca impulsar la convivencia en armonía de dos rubros como la agricultura y la generación de energía solar, debido a la evidencia obtenida, el área estudiada es relativamente nueva, por lo que se recurrió plenamente al análisis documental científico encontrado para estudiar los conceptos y fundamentos de mencionada técnica (agrovoltaica). Inicialmente se buscó antecedentes de estudio de agrovoltaica en el territorio nacional (Bolivia), desafortunadamente no se logró encontrar estudios previos en el territorio nacional. Seguidamente se exploró las evidencias científicas que existen a nivel mundial.

Fue importante recolectar información sobre agricultura en Bolivia, saber cómo se desarrolla esta actividad económica en nuestro país, el alcance que tiene y la importancia que representa. También se usó información disponible sobre sobre la generación solar fotovoltaica, el impacto global que ha tenido y el estado de avance que ha tenido en el país en los últimos años.

2.2 Sistemas agrovoltáicos

Los sistemas agrovoltáicos, son sistemas que combinan la producción de energía solar con la agricultura, ganadería o apicultura. Estos sistemas se basan en la idea de que los paneles solares pueden proporcionar sombra y protección a los cultivos, animales y panales de abejas mejorando su rendimiento y productividad. La idea de combinar la energía solar fotovoltaica con la producción agrícola, conocida como agro voltaica, surgió por primera vez en 1981 de la mano de Armin Zastrow y Adolf Goetzberger, fundador del Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energía Solar (ISE), pero el concepto de agricultura agrovoltáica comenzó a popularizarse sino hasta la década pasada, gracias a los estudios de rendimiento realizados por el francés Christophe Dupraz.

Finalmente, se engloba los conocimientos ya descritos para poder comprender de manera clara los conceptos del tema central (la agrovoltáica), y realizar el estudio requerido, de esta manera se logra cumplir satisfactoriamente los objetivos trazados en el presente estudio.

Dimensionamiento y diseño del sistema agrovoltáico

Para el dimensionamiento se debe elegir el tipo de cultivo sobre el cual se aplicará agrovoltáica, a continuación, se presenta un listado de cultivos que se benefician al recibir determinado grado de sombra durante su desarrollo:

Tabla 1. Selección de cultivo

CULTIVO	ZONAS PRODUCTORAS	REQUERIMIENTO HÍDRICO (L/m ² -día)	CONDICIONES CLIMÁTICAS	TECHO FOTOVOLTAICO (%)
Maíz	Cochabamba y Santa Cruz	8000	Húmedo	20
Pimiento	Santa Cruz y Cochabamba	5000	Húmedo, cálido	22
Lechuga	La Paz y Cochabamba	3000	Templado, húmedo	20
Frutilla	Cochabamba, Santa Cruz y Tarija	2080	Húmedo, templado	25
Tomate	Cochabamba, Santa Cruz y Tarija	3500	Húmedo, cálido	10
Flores	Cochabamba	3000	Húmedo, cálido	20

Fuente: elaboración propia 2024.

La producción de frutilla presenta tres técnicas que permiten su producción una mejor que la otra en cuanto se refiere a temas de rendimiento agrícola. La producción tradicional que posee un elevado riesgo de pérdida de la producción por fenómenos climáticos, producción en macrotúneles que busca conservar la humedad de la tierra del cultivo al ser recubierta con plásticos y finalmente la producción en invernaderos que busca mejorar el rendimiento agrícola; controla la temperatura dentro el invernadero, la humedad y además brinda protección ante posibles eventos de fenómenos climáticos que puedan llegar a dañar el cultivo afectado a la producción. Para la aplicación de agrovoltáica se selecciona la aplicación en invernaderos por lo que se debe elegir el diseño de invernadero adecuado.

Entre los diseños de invernaderos se debe buscar el que permita la implementación de paneles solares sobre la estructura con la capacidad de soportar esfuerzos de carga por viento y el peso de los paneles sin que afecte su integridad.

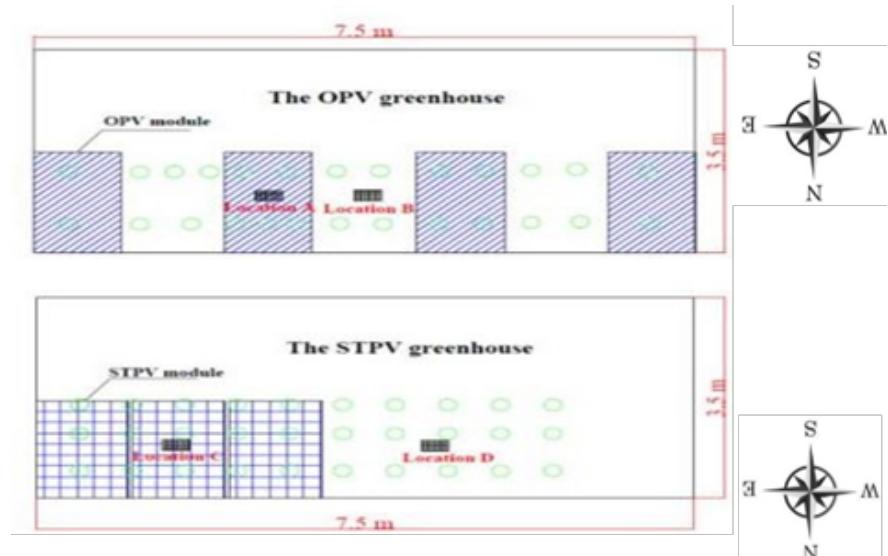
Tabla 2. Selección de estructura

INVERNADERO	RESISTENCIA DE CARGAS ESTÁTICAS	RESISTENCIA DE CARGAS DINÁMICAS (VIENTOS)
	Cargas ligeras	Ligeros
	Cargas pesadas	Fuertes
	Cargas relativamente pesadas	Fuertes

Fuente: elaboración propia 2024.

Definido la estructura, se debe buscar la distribución de paneles adecuada que permita incrementar el rendimiento agrícola con la aplicación de sombra en el área y además obtener un óptimo rendimiento eléctrico para la generación.

Tabla 3. Diseños de distribución de módulos solares OPV (Organic Photovoltaic) y STPV (Semi-Transparent Photovoltaics) estudiados.



Nota. En el estudio, los módulos solares deben ser ubicados en dirección norte dentro en territorio boliviano. Fuente: revista científica Sustainability.

Según Yilian Tang, Ming Li* y Xun Ma, en su artículo “Study On Photovoltaic Modules On Greenhouse Roof For Energy And Strawberry Production” publicado en 2019 se evidencia que la mejor configuración de la que se obtiene mejora en el rendimiento agrícola de la frutilla, ya que se aprovecha la radiación indirecta, y también buen rendimiento eléctrico, pues permite una mayor capacidad de potencia instalada en paneles. Esta es la configuración OPV..

Potencia instalada.

La potencia instalada dependerá de la cantidad de paneles solares que se pueda instalar sobre el techo de los invernaderos en determinada área de terreno, respetando el requerimiento de sombra de la configuración OPV (25% del techo). Para efectos del estudio se considera un terreno de una hectárea (1 ha), donde los invernaderos poseen un largo de 100 metros, ancho de 3,5 metros y se encuentran separados por 2 metros uno del otro. Conociendo las dimensiones del invernadero se debe dividir el largo (100 metros) en espacios iguales, de tal modo que en cada espacio entre un panel.

$$Espacios = \frac{\text{largo del invernadero}}{1,25 m}$$

$$Espacios = \frac{100 m}{1,25 m}$$

$$Espacios = 80$$

Después de elegir el panel para el estudio, se conoce que las dimensiones (1762x1134x30 mm) permite su montaje en el espacio de 1,25 m. De los 80 espacios que se menciona (el 50% del techo), ubicados con la cara al norte, solo se debe disponer de la mitad (40 espacios) con ello se cumple la configuración OPV que sugiere el ocupar el 25% del techo del invernadero.

Por lo que se puede realizar el montaje de 40 paneles en cada invernadero, sabiendo que existen 12 invernaderos en el terreno (con una separación de 2 metros entre cada invernadero), se puede tener un total de 480 paneles instalados en una hectárea de terreno sobre el techo de los invernaderos los invernaderos. La tecnología empleada en paneles fotovoltaicos posee una potencia pico máxima de 435 W como datos de placa, por lo que la potencia instalada será:

$$P_{instalada} = \text{Números de paneles} * P_{panel}$$

$$P_{instalada} = 480 * 435$$

$$P_{instalada} = 208.800 \text{ W}$$

$$P_{instalada} = 208,80 \text{ kW}$$

Los paneles solares y la instalación fotovoltaica presentan diferentes fenómenos que producen pérdidas en la producción de energía eléctrica las que deben ser consideradas en el dimensionamiento del sistema fotovoltaico -tales como pérdidas por temperatura, pérdidas por polución, las cuales representan un 15% de la potencia instalada, pérdidas en el inversor, pérdidas en el conductor- para obtener la potencia real final instalada.

Para seleccionar el inversor correcto se considera la potencia máxima que permite conectar en los bornes del inversor y, además, debe considerarse un equipo que permita conexión a la red, por ello es que se elige un inversor de red.

Tabla 4. Potencia disponible

Potencia instalada		208,80 kW
Pérdida por suciedad	15%	31,32 kW
Pérdida por temperatura		3,15 kW
Potencia que llega al <u>inversor</u>		174,33 kW
Pérdidas en el inversor	2%	3,49 kW
Pérdidas en el cable		0,36 kW
Potencia final		170,48 kW

Nota: La potencia instalada, es aquella que se presenta cuando en un caso ideal.

El costo de la inversión que se requiere para la implementación de la tecnología solar fotovoltaica aplicado para agrovoltaica se analiza con datos de proveedores a nivel nacional (Enersol).

Tabla 5. Presupuesto estimado al 2024.

ELEMENTOS Y MATERIALES	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO (\$)
Paneles (20 años)	480 paneles		62.400,00 \$
Inversores (20 años)	12 inversores		33.600,00 \$
Estructuras (50 años)	12 estructuras		240.000,00 \$
Mantenimiento de paneles (mensual)	1 mantenimiento		540,00 \$
Técnicos (incluye alimentación y ropa de trabajo)	6 técnicos		5.900,00 \$
Ingéniero (incluye alimentación y ropa de trabajo)	1 persona		30.000,00 \$
Mantenimiento de estructuras (semestral)	1 mantenimiento		200,00 \$
Personal para el mantenimiento de paneles (mensual) personal para el mantenimiento de estructuras (semestral)	2 personas		510,20 \$
Equipos de mantenimiento (sensores, tester, pinza ampirimétrica, cables, conectores, cajas de conexión, fusibles (5 años))	1 general		600,00 \$
Medidor bidireccional (50 años)	1 medidor		9.000,00 \$
COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO TOTAL			4.861.449,60 \$

Fuente: Enersol

El sistema diseñado y dimensionado es replicado en cada uno de los nueve departamentos de Bolivia para la producción de frutilla. Para calcular la energía que este sistema produce en cada región se debe considerar el ángulo óptimo de los paneles y los datos de radiación solar promedio en cada departamento.

2.4 Generación distribuida

Es importante conocer sobre lo que significa generación distribuida en el país porque el diseño y dimensionamiento del sistema fotovoltaico, que es parte del estudio de agrovoltaica, está pensado para que ser incorporado en ese rubro, un sistema conectado a la red.

La generación distribuida es un concepto relativamente nuevo en el territorio nacional definida como la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables a pequeña o mediana escala cerca de los puntos de consumo con la posibilidad de inyectar la energía excedente a la red. Se rige por los decretos supremos 4477 y el 5167.

En el 5167 define que el método de retribución económica por la inyección de energía a la red, aplicable en el territorio nacional, es el método Net Metering, conocido como la medición neta de energía. Esto significa que al final de cada mes, se realiza un balance entre la energía inyectada y la energía consumida de la red y la diferencia es el saldo a pagar al distribuidor de acuerdo a la categoría en la cual se tiene el contrato suscrito con el mismo.

Para el análisis de costos y estudio de factibilidad, se toma en cuenta la estructura tarifaria actual vigente de la AE, la Autoridad de Electricidad, y de los distribuidores de cada departamento, en la categoría general 1. Además, se estima el costo de la tecnología agrovoltaica requerida planteada en el diseño y dimensionamiento, misma que se replicará en cada uno de los 9 departamentos

para posteriormente determinar la capacidad de producción del sistema fotovoltaico de acuerdo a los datos de radiación propios del departamento en cuestión.

3. RESULTADOS

En este apartado, se presentan los resultados obtenidos del análisis de producción y el estudio de factibilidad para la implementación del sistema agrovoltaico (dimensionado) en los nueve departamentos de Bolivia. Las siguientes figuras y tablas detallan la radiación solar, las horas pico de sol, la producción energética, los costos de la energía y el análisis de viabilidad financiera.

La Tabla 6 muestra los datos de radiación solar promedio anual de los departamentos de Bolivia. Estos datos, obtenidos de la base de datos de la NASA, son fundamentales para estimar el potencial de generación de energía solar en cada región.

3.1 Radiación por departamento

Radiación Promedio mensual (kWh/m² dia) del 2013 a 2023

Mes	Cochabamba	Pando	Beni	Santa cruz	La Paz	Oruro	Potosí	Chuquisaca	Tarija
Enero	174,68	143,66	153,06	176,89	166,51	196,51	223,65	172,06	169,03
Febrero	152,22	122,35	131,43	152,74	151,61	176,72	207,68	152,03	144,38
Marzo	173,96	141,05	151,21	164,61	173,52	206,25	241,64	169,53	153,32
Abril	178,40	144,15	154,71	152,15	171,51	203,69	235,38	174,62	149,58
Mayo	184,88	147,06	144,60	127,61	178,55	201,54	229,93	192,63	154,33
Junio	173,71	145,72	138,58	116,28	163,48	187,79	207,16	182,99	156,56
Julio	188,78	167,89	160,94	138,61	177,47	198,65	222,60	195,70	175,92
Agosto	199,32	178,82	177,20	169,42	191,91	215,31	242,41	206,07	200,67
Septiembre	200,64	177,18	180,78	174,98	188,82	226,98	248,60	201,37	189,80
Octubre	204,38	169,90	178,42	179,19	194,81	236,09	263,85	199,09	180,51
Noviembre	187,31	148,86	158,04	169,51	181,76	223,16	249,63	184,87	166,04
Diciembre	172,48	142,74	152,04	168,98	165,22	199,39	236,62	170,35	161,42
Promedio Anual (kWh/m ²)	182,56	152,45	156,75	157,58	175,43	206,01	234,10	183,44	166,80

Fuente: Base de datos meteorológicos de la NASA.

3.2 Análisis de producción

La siguiente tabla, ilustra las Horas Solares Pico (HSP) promedio por departamento. Este valor, calculado con los datos de radiación de la NASA, es un indicador clave para el dimensionamiento y la estimación de la producción de energía eléctrica del sistema agrovoltaico.

Horas solar pico promedio mensual (hrs)

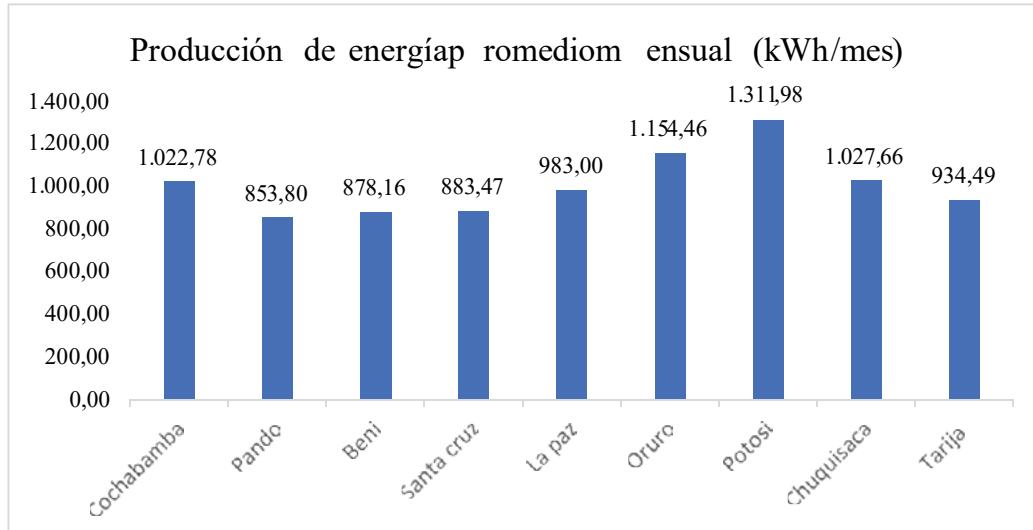
Mes	Cochabamba	Pando	Beni	Santa Cruz	La Paz	Oruro	Potosí	Chuquisaca	Tarija
Enero	5,63	4,63	4,94	5,71	5,37	6,34	7,21	5,55	5,45
Febrero	5,44	4,37	4,69	5,45	5,41	6,31	7,42	5,43	5,16
Marzo	5,61	4,55	4,88	5,31	5,60	6,65	7,79	5,47	4,95
Abril	5,95	4,80	5,16	5,07	5,72	6,79	7,85	5,82	4,99
Mayo	5,96	4,74	4,66	4,12	5,76	6,50	7,42	6,21	4,98
Junio	5,79	4,86	4,62	3,88	5,45	6,26	6,91	6,10	5,22
Julio	6,09	5,42	5,19	4,47	5,72	6,41	7,18	6,31	5,67
Agosto	6,43	5,77	5,72	5,47	6,19	6,95	7,82	6,65	6,47
Septiembre	6,69	5,91	6,03	5,83	6,29	7,57	8,29	6,71	6,33
Octubre	6,59	5,48	5,76	5,78	6,28	7,62	8,51	6,42	5,82
Noviembre	6,24	4,96	5,27	5,65	6,06	7,44	8,32	6,16	5,53
Diciembre	5,56	4,60	4,90	5,45	5,33	6,43	7,63	5,50	5,21
Promedio Anual (hrs)	6,00	5,01	5,15	5,18	5,77	6,77	7,70	6,03	5,48

Fuente: elaboración propia con datos extraídos de la base de datos de la NASA

3.3 Producción de energía por departamento

A continuación, se presenta la producción de energía estimada por departamento, la cual se basa en el dimensionamiento del sistema agrovoltaico y las horas solares pico promedio de cada región. Esta tabla, elaborada por el autor, muestra la capacidad de generación eléctrica anual en cada Departamento.

Figura 1. Cuadro comparativo de producción de energía por departamento.



Nota. Para estimar la energía, se emplea los datos de dimensionamiento desarrollado en el apartado 2.3, posteriormente se aplica los datos de horas sol pico propio de cada departamento para obtener la energía generada. Fuente: elaboración propia.

3.3 Costo de la energía por departamento

Los datos de la siguiente tabla son un elemento crucial para el análisis de factibilidad económica, permitiendo una comparación directa con los costos de producción del sistema propuesto y los costos de energía de la empresa distribuidora de cada departamento. Esta tabla ha sido elaborada por el autor.

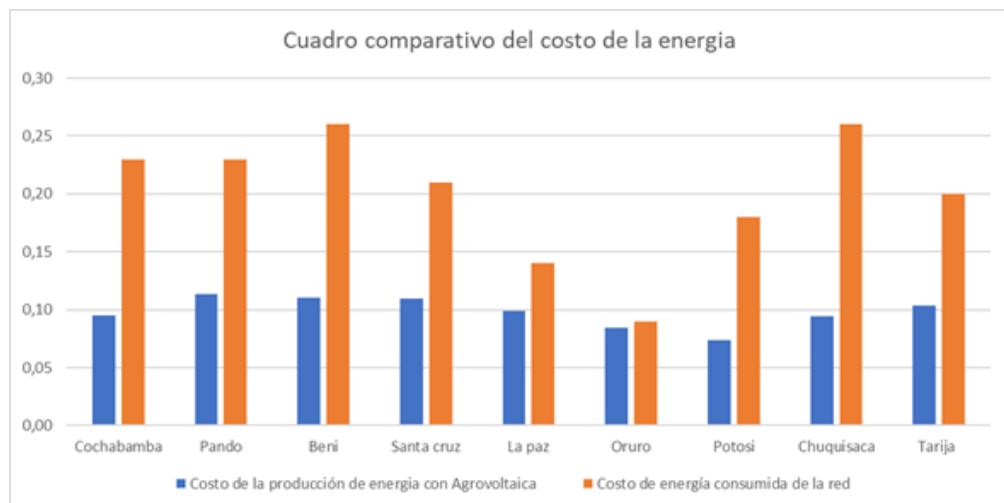
Tabla 9. Análisis de Costos por departamento.

Mes	Cochabamba	Pando	Beni	Santa Cruz	La Paz	Oruro	Potosí	Chuquisaca	Tarija
COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	4.861.449,60	4.861.449,60	4.861.449,60	4.861.449,60	4.861.449,60	4.861.449,60	4.861.449,60	4.861.449,60	4.861.449,60
TOTAL (\$)	7.466.271,19	6.232.729,27	6.410.538,12	6.449.307,85	7.175.873,84	8.427.564,99	9.577.420,54	7.501.895,92	6.821.813,29
ENERGÍA GENERADA A 20 AÑOS(kWh)									
COSTO DE PRODUCCIÓN DE LA ENERGÍA (\$/kWh)	0,09	0,11	0,11	0,11	0,10	0,08	0,07	0,09	0,10
COSTO DE LA ENERGÍA EN EL DISTRIBUIDOR (\$/kWh)	0,23	0,23	0,26	0,21	0,14	0,09	0,18	0,26	0,20

Fuente: elaboración propia.

Se presenta un cuadro comparativo entre los costos de producción del sistema agrovoltaico y el costo de la energía consumida de la red en cada departamento. Esta tabla, permite evaluar la rentabilidad del proyecto en cada región.

Figura 2. Cuadro comparativo de costos de producción vs costo de la energía consumida de la red.



Nota. La imagen muestra el costo de producción con agrovoltaica sin considerar intereses por financiamiento bancario. Fuente: elaboración propia.

3.5 Factibilidad por departamento

Considerando un financiamiento del 70% del proyecto, con una tasa de interés del 8% a plazo de 20 años.

Tabla 10. Factibilidad de financiamiento del proyecto.

	Condiciones actuales				Condiciones Necesarias				
	Costo de Producción (\$/kWh)	Costo de la energía (\$/kWh)	TIR (%)	VAN (\$)	Factibilidad	Costo de la energía (\$/kWh)	TIR (%)	VAN (\$)	Factibilidad
Cochabamba	0,09	0,23	12,00	67.252,00	SI				
Pando	0,11	0,23	9,00	-32.373,00	NO	0,26	11,00	26.432,00	SI
Beni	0,11	0,26	11,00	28.568,00	SI				
Santa Cruz	0,11	0,21	8,00	-9.538,00	NO	0,27	11,00	41.228,00	SI
La Paz	0,09	0,14	4,00	-227.549,00	NO	0,23	11,00	22.657,00	SI
Oruro	0,08	0,09	2,00	-303.524,00	NO	0,20	11,00	51.947,00	SI
Potosí	0,07	0,18	11,00	32.132,00	SI				
Chuquisaca	0,09	0,26	13,00	127.886,00	SI				
Tarija	0,10	0,20	7,00	-129.690,00	NO	0,26	11,00	34.214,00	SI

Nota: en los departamentos que no es factible su implementación (bajo las condiciones actuales), de acuerdo a la normativa establecida en el decreto supremo 5167 para la retribución económica, requiere (condiciones necesarias) que la tarifa por energía consumida de la red incremente, de esa manera se tiene una alternativa para lograr la factibilidad en los departamentos que así lo requieren.

Se expone los resultados del análisis de factibilidad para cada departamento, considerando un escenario de financiamiento. Esta tabla, elaborada por el autor, detalla la viabilidad económica del proyecto en función de las condiciones de financiación y los costos de la energía por departamento en base a la estructura tarifaria de cada empresa distribuidora.

4. DISCUSIÓN

En el estudio se concluye que es posible la implementación de sistemas agrovoltaicos en el país, considerando que existe potencial productivo en diferentes tipos de cultivos que son compatibles con agrovoltaica. Además, la normativa actual de generación distribuida permite encontrar ciertos beneficios para implementar estos sistemas en el territorio nacional.

Sin embargo, pese a las normas que rigen a los sistemas de generación distribuida el sistema agrovoltaico diseñado es factible en pocos departamentos y esto se debe al elevado costo de la tecnología que se requiere para su implementación.

El sistema puede llegar a ser más atractivo si:

- Implementan normas específicas (para sistemas agrovoltaicos).
- Beneficios específicos dirigidos a los productores como, por ejemplo: la retribución económica por excedentes de energía inyectada a la red, para sistemas agrovoltaicos conectados a la red se realice en forma de desembolso efectivo en moneda nacional.
- Se considera a estos sistemas para poder inyectar y retirar la energía en uno o varios puntos a partir de categorías como minigeneración.

5. CONCLUSIÓN

Se concluye que los equipos necesarios para la implementación de estos sistemas, existe en el país.

Se estudió diversas configuraciones posibles para la implementación de los invernaderos agrovoltaicos y la distribución de los paneles en los techos con la capacidad de generar energía eléctrica sin afectar de forma negativa al rendimiento de los cultivos, en base a experiencias desarrolladas en países donde ya se cuenta con estudios avanzados y plantas piloto puestas en operación. Por ello es que la configuración seleccionada es considerada por este estudio como la que mejor impulsa la sinergia y el trabajo en conjunto de la producción agrícola y la producción de energía solar fotovoltaica.

También se concluye que para la mejora de la factibilidad además del incremento de las tarifas, se debe buscar tasas de interés bancario más bajas lo que posibilitará mejorar la factibilidad o el acceso a los créditos de fomento al desarrollo de proyectos para la generación de energía eléctrica a través de fuentes de energía renovable.

7. REFERENCIAS

- Alvarado Ladrón de Guevara, J. (2019). *Diseño y cálculo de una instalación fotovoltaica*.
- Apaza Mamani, E. (2006). *Comportamiento agronómico de variedades de frutilla (fragaria virginiana) a diferentes densidades de plantación en la provincia sud yungas del departamento de la paz* [Tesis de grado].
- Cabrera, D., Díaz, M., Gracia, R., Hernández, C., Martel, G., Pardilla, J., Piernavieja, G., Schallenberg, J., Subiela, V., & Unamunzaga, P. (2018). *Energías renovables y eficiencia energética*.
- Colantoni, A., Monarca, D., Marucci, A., Cecchini, M., Zambon, I., Di Battista, F., Maccario, D., Saporito, G. M., & Beruto, M. (2018). Solar Radiation Distribution inside a Greenhouse Prototypal with Photovoltaic Mobile Plant and Effects on Flower Growth. *Sustainability*.
- Delgadillo Camacho, M. F., & Lazo Suárez, Á. (2015). *Diagnósticos Sectoriales Agropecuario 8. UDAPE*.
- Dupraz, C. (2019). *Study on photovoltaic modules on greenhouse roof for energy and strawberry production*.
- Elortegui, N., Fernández, J., Jarabo, F., Macias, J., & Pérez, C. (1998). *Libro de las energías renovables*. S.A.P.T.
- Goetzberger, A., & Zastrow, A. (1981). Sobre la coexistencia de la conversión de energía solar y el cultivo de plantas.
- Ibarra Yomayusa, J. (2022). *Invernaderos agrovoltaicos: desarrollo de eficiencias en el sector agrícola en Colombia*.
- Instituto de Desarrollo Agropecuario - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. (2017). *Manual de manejo agronómico de la frutilla*.

- Kaufmann, J., Cartsburg, M., Noleppa, S., Hattermann, F., Salinas, A., & Nava, G. (2023). *Análisis costo-beneficio: Producción de frutilla con riego por goteo en la cuenca del río Guadalquivir, Tarija*.
- Liendo B., R. (2018). “Seguridad Alimentaria con Soberanía, rompecabezas entre la agricultura familiar y la agroindustria”.
- Nagashima, A. (2020). *Compartir energía solar: cambiar el mundo y la vida*.
- Muñoz Vidal, B. (2022). *Investigación y desarrollo de la optimización de la tecnología agrovoltáica en la zona de Almería*.
- Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., Reise, C., Braun, C., Weselek, A., Bauerle, A., & Högy, P. (2020). Implementación de agrofotovoltaica: análisis tecnoeconómico de la relación precio-rendimiento y sus implicaciones políticas.
- Scognamiglio, A., Rizzo, A., & Picchi, P. (2021). Agrivoltaic Systems Design and Assessment: A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns).
- Secretaría de agricultura ganadería y pesca. (2023, enero). *Producción de Frutilla en Argentina*.
- Tang, Y., Li, M., & Ma, X. (2019). Study On Photovoltaic Modules On Greenhouse Roof For Energy And Strawberry Production.
- Toledo, C., & Scognamiglio, A. (2021). *Agrivoltaic Systems Design and Assessment: A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns)*.
- UDAPE. (2015). *Diagnósticos Sectoriales 2015: Sector Agropecuario Tomo 8*.
- Uribe, H. (2023). *Riego en frutilla* (PDF).
- Villagran Diaz, V. (2019). *Morfología y Fisiología de la frutilla*.
- Yano, A., Kadowaki, M., Furue, A., Tamaki, N., Tanaka, T., Hiraki, E., Kato, Y., Ishizu, F., & Noda, S. (2020). Sombreado y características eléctricas de un conjunto fotovoltaico montado dentro del techo de un invernadero orientado de este a oeste.
- Zisis, C., Pechlivani, E. M., Tsimikli, S., Mekeridis, E., Laskarakis, A., & Logothetidis, S. (2019). Organic Photovoltaics on Greenhouse Rooftops: Effects on Plant Growth. *Mater. Today Proc.*

OTROS ENLACES DE INFORMACIÓN:

Agrivoltaísmo Sun’Agr. (s.f.). Recuperado de <https://sunagri.fr/es/>

Campos de Bolivia. (s.f.). Recuperado de [https://www.camposdebolivia.com/agricultura-en-bolivia/#:~:text=La%20agricultura%20tradicional%20boliviana%20refiere,\(~una%20sola%20cosecha%20anual\)](https://www.camposdebolivia.com/agricultura-en-bolivia/#:~:text=La%20agricultura%20tradicional%20boliviana%20refiere,(~una%20sola%20cosecha%20anual))

En el Green Power. (s.f.). Recuperado de <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables>

Medio ambiente y Naturaleza. (s.f.). Recuperado de <https://medioambienteynaturaleza.com/energias-renovables-agricultura-agrovoltai>

REM Tec Agrovoltaiico. (s.f.). Recuperado de <https://remtec.energy/es/agrovoltaiico>

Xataka. (s.f.). Recuperado de <https://www.xataka.com/energia/agrovoltaiica-promete-ser-futuro-campo-energia-esta-ganando-terreno-espana>

NASA. (2025). Datos meteorológicos de la NASA [Base de datos]. NASA. <https://worldwind.arc.nasa.gov/worldweather/>

Artículo Científico

Evaluación de un prototipo de cocina de biomasa tipo batch utilizando asai y pellets de aserrín de pino como combustible, conforme a la normativa NB/ISO 19867-1, para su implementación en áreas rurales de Bolivia

Evaluation of a batch-type biomass stove prototype using asai and pine sawdust pellets as fuel, in accordance with regulation NB/ISO 19867-1, for implementation in rural areas of Bolivia

 Mariela Lizbeth Huanca Alcazar¹  Evelyn Cardozo²

¹Estudiante. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba. Bolivia. 201801574@est.umss.edu-marielalizbethhuanca@gmail.com

²Investigador. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba. Bolivia. evelyncardozo.r@fcyt.umss.edu.bo

RESUMEN

En el departamento de Pando, Bolivia, se generan grandes cantidades de residuos de pepa de asaí sin un aprovechamiento adecuado. Este estudio evaluó el desempeño térmico y ambiental de una cocina mejorada de biomasa tipo Batch, conforme a la normativa NB/ISO 19867-1, utilizando pellets de aserrín de pino y mezclas con residuos de asaí como combustibles alternativos.

Se realizaron pruebas experimentales con diferentes combinaciones de combustible (100% pellets de pino, 40% asaí - 60% pellets, y 30% asaí - 70% pellets) para analizar la eficiencia térmica, consumo energético, emisiones de CO, CO₂ y SO₂. Se emplearon pruebas de hervor de agua y un analizador de gases para la evaluación.

Los resultados indicaron que el uso de pellets puros alcanzó una eficiencia térmica del 35%, mientras que las mezclas con asaí registraron 34.20% y 34.61%, la concentración de CO varió entre 407 ppm (pellets puros), 408 ppm (mezcla 30% asaí, velocidad alta) y 310 ppm (mezcla 30% asaí, velocidad media), con una concentración máxima de CO₂ del 2.47% v/v y 4 ppm de SO₂ aproximadamente.

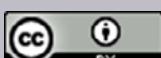
El estudio concluye que la combinación de residuos de asaí con pellets de pino en cocinas mejoradas representa una alternativa viable y sostenible para reducir el impacto ambiental y aprovechar desechos agroindustriales en Bolivia.

Palabras clave: Biomasa. Combustibles sólidos. Cocinas de biomasa

ABSTRACT

In the department of Pando, Bolivia, large quantities of asaí seed waste are generated without proper utilization. This study evaluated the thermal and environmental performance of an improved batch-type biomass stove, in accordance with standard NB/ISO 19867-1, using pine sawdust pellets and mixtures with asaí waste as alternative fuels.

Experimental tests were conducted with different fuel combinations (100% pine pellets, 40% asaí - 60% pellets, and 30% asaí - 70% pellets) to analyze thermal efficiency, energy consumption, CO, CO₂, and SO₂ emissions, as well



as particulate matter generation. Water boiling tests and gas analysis were used for evaluation.

The results indicated that the use of pure pellets achieved a thermal efficiency of 35%, while the asaí mixtures recorded 34.20% and 34.61%. In terms of emissions, CO varied between 407 ppm (pure pellets) and 408 ppm (30% asaí mixture High speed) and 310 ppm (30% asaí mixture, medium speed), with a maximum CO₂ concentration of 2.47% v/v and approximately 4 ppm of SO₂.

The study concludes that the combination of asaí waste with pine pellets in improved stoves represents a viable and sustainable alternative to reduce environmental impact and utilize agro-industrial waste in Bolivia.

Keywords: Biomass. Solid fuels. Biomass stoves

1. INTRODUCCIÓN

El uso de biomasa como fuente de energía sigue siendo una alternativa clave en diversas regiones, especialmente en áreas rurales donde el acceso a combustibles fósiles es limitado.

El cambio climático centró nuevamente la atención en la biomasa como la única fuente de carbono orgánico para producir combustibles a gran escala. (Deng et al., 2023). La definición de biomasa varía debido a la heterogeneidad, sin embargo, de manera general la biomasa consiste en una mezcla de materia de origen natural proveniente de plantas y animales (McKendry, 2002). Cabe resaltar que la biomasa es un recurso energético completamente renovable, ya que el CO₂ liberado durante su combustión no contribuye al aumento del dióxido de carbono atmosférico, las plantas absorben el CO₂ liberado en el ambiente por la descomposición de otras plantas, utilizándolo para su crecimiento y procesos metabólicos (Tursi, 2019).

Los bosques y océanos distribuidos en diversas regiones de la Tierra alberga una enorme cantidad de biomasa. Según varios informes, las reservas globales de biomasa, se estima en aproximadamente 1.8 billones de toneladas terrestres y 4 mil millones de toneladas acuáticas. En términos energéticos, el potencial de producción de biomasa a nivel mundial representa más de 80 veces el consumo de energía anual del planeta (Tursi, 2019).

En 2023 se estima que alrededor de 2 mil millones de personas en el mundo aún no tienen acceso a cocinas limpias. La implementación y el desarrollo de esta tecnología han avanzado de manera más lenta en comparación con el acceso a la electricidad (*Access to clean cooking – SDG7, s. f.*).

Debido a la contaminación del aire en el interior de los hogares causada por la cocción de alimentos con combustibles sólidos, anualmente mueren 1.6 millones personas prematuramente, lo que representa más del 2% de las enfermedades a nivel mundial (y el 4% en los países más pobres). (Kshirsagar & Kalamkar, 2014).

Como solución a estos problemas globales, los sistemas de cocinas mejoradas (ICS) que cuentan con una mayor eficiencia energética, menores emisiones de CO y material particulado que las cocinas tradicionales, reducen las enfermedades respiratorias, el tiempo y el costo de obtener combustible, el cambio climático y

la deforestación resultantes. En enero de 2011 se estableció nuevos estándares en tecnologías de cocina ICS, al menos un 90% de reducción de emisiones y un 50% de ahorro de combustible en comparación con la tecnología base (fuego de tres piedras) (*Biomass Cookstoves Technical Meeting: Summary Report*, s. f.)

Una cocina de biomasa es un dispositivo diseñado para quemar combustibles sólidos, la energía liberada durante la combustión de la biomasa se dirige a una olla, sartén o plancha, que permite el uso de la energía para la cocción de alimentos, calentar espacios y agua, iluminar interiores. Las cocinas modernas ofrecen más que un fuego común, ya que se caracterizan por su alta eficiencia, bajas emisiones y seguridad para los usuarios. Dependiendo de los hábitos alimenticios, factores socioculturales y tipos de combustible disponibles, existen diversos diseños de cocinas alrededor del mundo, ya sean tradicionales o mejorados (Kshirsagar & Kalamkar, 2014).

El período entre 1970 y 1980 fue el inicio de la primera ola en el desarrollo de estufas mejoradas. Las preocupaciones sobre cómo el uso excesivo de biocombustibles contribuiría a la deforestación y la pobreza motivaron esta primera fase, que se centró en mejorar la eficiencia energética de las estufas, con la reducción de humo como un objetivo secundario. Durante este tiempo, también comenzó el movimiento de cocinas en África, particularmente en el Sahel, tras la grave sequía de finales de los años 70. El terremoto de Guatemala en 1976 introdujo los ICS en Centroamérica, especialmente la estufa Lorena (Westhoff et al., 1995).

A mediados de la década de 1980, los diseños de estufas mejoradas comenzaron a evolucionar constantemente, apoyados en estudios científicos sobre transferencia de calor y mecánica de fluidos. Durante este periodo, se implementaron procedimientos de prueba y diseño sistemáticos, con un enfoque en la eficiencia del combustible y la reducción del humo. Aunque los programas de estufas en India y China fueron clave, Barnes et al. señalaron que no tuvieron mucho éxito entre 1980 y principios de 1990. A partir de los 90, el enfoque se centró en las necesidades del usuario, incluyendo la seguridad y la comodidad, y se integraron preocupaciones medioambientales. Programas como el NPIC en India, que distribuyó más de 35 millones de estufas (Venkataraman et al., 2010), y el NISP en China, que introdujo 129 millones de estufas, marcaron un hito en el desarrollo de estufas mejoradas. Hoy en día, el NISP sigue siendo uno de los programas más exitosos (Barnes & Weltbank, 1994).

Tras más de diez años de declive, el interés por la energía doméstica y, por ende, por las estufas mejoradas resurgió a nivel internacional. En la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible de 2002, celebrada en Johannesburgo, la EPA de los Estados Unidos lanzó la Alianza para un Aire Interior Limpio, para abordar los riesgos ambientales y de salud asociados con el uso de combustibles de biomasa tradicionales en interiores. Además, en 2008, el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) incluyó los programas de estufas en su agenda como parte de proyectos descentralizados más pequeños, registrando alrededor de 14 proyectos de estufas como “Programas de Actividades” para mayo de 2013 (Kshirsagar & Kalamkar, 2014).

El 56 % de la población en países en desarrollo depende principalmente de combustibles sólidos, como la biomasa tradicional y el carbón, para la cocción de sus alimentos, con un acceso muy limitado a formas de energía modernas y más eficientes. La disponibilidad de tecnologías como las cocinas mejoradas alcanza

solo al 27 % de las personas que dependen de estos combustibles(Rajkumar et al., 2019). En los países menos desarrollados, los niveles de acceso son aún más bajos; por ejemplo, en África subsahariana, solo el 6 % de la población que utiliza biomasa tradicional cuenta con cocinas mejoradas. No obstante, el acceso es considerablemente mayor en países como China, Tailandia y Brasil. (*Layout 1, s. f.*)

La combustión ineficiente de biomasa genera contaminación del aire en el hogar (HAP), incluyendo emisiones de carbono, carbono orgánico, material particulado (PM2.5), monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos policíclicos aromáticos (Kim et al., 2011).

La exposición a estos contaminantes está asociada con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, cáncer de pulmón y un sistema inmunológico debilitado, especialmente entre mujeres y niños, ya que las mujeres suelen ser las principales encargadas de cocinar en muchos países de bajos y medianos ingresos (Kim et al., 2011; Pandey et al., 2017). A nivel mundial, más de 3.7 millones de muertes prematuras se atribuyen al humo relacionado con las actividades de cocina (*Low-Cost Solutions Can Give Billions Access to Modern Cooking by 2030, but the World Is Failing to Deliver - News*, 2023; Rajkumar et al., 2019).

Las estufas de cocina de flujo forzado han mostrado ser prometedoras, mejorando la eficiencia térmica y reduciendo las emisiones de CO y PM2.5 (MacCarty et al., 2010). El suministro de aire secundario en estas estufas mejora la mezcla, reduciendo las emisiones de PM2.5. Varios estudios han examinado estufas de cocina de flujo forzado con suministros de aire primario y/o secundario, revelando que la inyección de aire secundario influye en las emisiones de partículas (Kirch et al., 2018; Sharma & Dasappa, 2017). Sin embargo, un mayor flujo de aire del aire secundario a veces puede causar el apagado de la llama, aumentando las emisiones de partículas finas mientras que puede reducir la masa total de material particulado, pero aumentar las concentraciones de partículas ultrafinas. Optimizar el suministro de aire es crucial para mejorar los diseños de las estufas de cocina (Caubel et al., 2018).

El uso de estufas mejoradas de biomasa ha demostrado ser una alternativa eficiente en Etiopía, reduciendo el consumo de combustible y mejorando las condiciones del hogar (Mekonnen, 2022). De manera similar se evaluaron la eficiencia térmica de una estufa mejorada mediante la prueba de ebullición de agua, obteniendo una eficiencia del 25 % al calentar 5 litros de agua (Barpatragohain et al., 2021)

Durante las pruebas experimentales, se evaluaron diferentes diseños de estufas (10, 20 y 40 orificios, además de un diseño alternativo) en función de su eficiencia térmica, producción de calor y emisiones. La estufa de 40 orificios presentó el mayor valor de energía generada (316.880 kJ) y las menores emisiones de gases (273 ppm), aunque también mostró la eficiencia térmica más baja (15.38%). En contraste, el diseño alternativo alcanzó la mayor eficiencia térmica (16.47%) pero con mayores niveles de emisión (333 ppm). Estos resultados demuestran que, si bien se ha logrado un avance significativo en la reducción de emisiones y el aprovechamiento de residuos, es necesario continuar con mejoras técnicas para optimizar el rendimiento térmico. (Himanshu et al., 2022; (*PDF*) *Effect of Holes System Designing for Low Energy Stove Using Coffee Husk Bio-Pellet as Solid Fuel*, s. f.)

Se han desarrollado estudios sobre estufas gasificadoras mejoradas, como el caso de la estufa Belony. Después de la fabricación con la primera modificación, la eficiencia alcanzó un 20,02 % al utilizar cáscara de arroz, un 25,89 % con una mezcla en proporciones iguales de pellets de biomasa y cáscara de arroz, y un 26,27 % al emplear una mezcla en partes iguales de cáscara de arroz y astillas de madera. No obstante, se observó la emisión de cantidades considerables de humo cuando la cámara de combustión principal estuvo completamente cubierta por la base de la olla. El cambio realizado mostró buenos resultados únicamente cuando se utilizaron pellets de biomasa de forma exclusiva; sin embargo, al emplear mezclas con cáscara de arroz o cáscara de arroz sola, se generaron emisiones visibles de humo. Por lo tanto, el uso de pellets de biomasa en esta tecnología se presenta como una opción prometedora para lograr una combustión más limpia y un entorno de cocción más saludable. (Bhusal et al., 2015; Sharma & Dasappa, 2017).

Finalmente, Ahmad et al. (2022) compararon el desempeño de varias estufas de carbón en China, encontrando que el modelo 2-TL presentaba la mayor eficiencia térmica, con un 87.2 % al utilizar briquetas de carbón.

Se han realizado estudios para evaluar el desempeño de siete tipos de cocinas que incorporan un ventilador con el fin de modificar la relación aire-combustible. En dichos estudios se emplearon dos tipos de combustible: briquetas de carbón semicoquizado y carbón crudo. La cocina identificada como 2-TL presentó los valores más altos de eficiencia térmica y las emisiones más bajas de monóxido de carbono (CO) y material particulado, especialmente cuando se utilizaron briquetas como combustible. Estos resultados indican que la homogeneidad de la biomasa y el contenido de humedad tienen una influencia significativa en el aumento de la eficiencia de combustión y en la reducción de contaminantes. (Ahmad et al., 2022)

Este estudio tiene como objetivo analizar el desempeño térmico y ambiental de una cocina conforme a la normativa boliviana NB/ISO 19867-1, empleando pellets de aserrín de pino y residuos de asaí como combustibles. Se busca determinar la viabilidad del asaí como combustible alternativo y evaluar los cambios en la eficiencia, las concentraciones de gases en las mezclas con asaí en comparación con el uso exclusivo de aserrín de madera.

2. METODOLOGÍA

2.1 Prototipo

La cocina que se evaluó presenta las siguientes características:

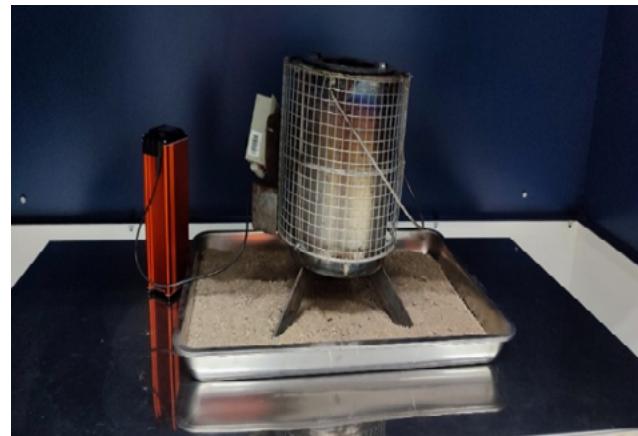


Figura N°1: Prototipo de cocina que se evaluó. Fuente: Elaboración propia,2024

Tiene un ventilador con diferentes velocidades, que nos permite regular la entrada de aire a la cámara de combustión que presenta algunos orificios, para una combustión más completa, el ventilador se alimenta con una batería de litio, que se recarga con energía solar que es captada por paneles solares (ver Fig. 1).

El combustible que se usó para la evaluación de la cocina son pellets de 8 mm certificados para evitar variaciones en el tamaño, composición de pellets que podría generar diferencias en la evaluación y así proveniente del departamento de Pando.

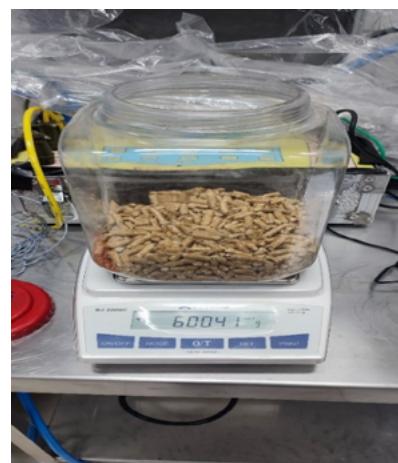


Figura N°2: Pellets certificados. Fuente: Elaboración propia,2024

2.2. Condiciones de rendimiento energético.

Para la determinación de las condiciones de rendimiento energético se desarrolló la prueba bajo la normativa NB/ISO 19867-1, que es una simulación del proceso de cocción que ayuda a entender, a diseñadores de cocinas mejoradas, con qué grado de eficiencia se transfiere la energía generada por el combustible utilizado, la cocina está diseñada para funcionar a diferentes niveles de potencia, por tanto, la cocina se evaluó en 3 fases (potencia alta, potencia media y potencia baja).

Previo a la realización de la prueba se determinó el poder calorífico del combustible, la humedad, registro la temperatura ambiente y temperatura de ebullición local.

2.2.1. Poder calorífico

Determinación del poder calorífico en bomba calorimétrica

Los pellets fueron triturados y homogenizados con ayuda de un mortero. Posteriormente, una porción de la muestra se envolvió en papel de combustión y se sujetó a un hilo de ignición en la bomba calorimétrica. La bomba fue alimentada con oxígeno a alta presión (~30 atm) para garantizar la combustión completa y luego se sumergió en el agua del calorímetro, registrándose la temperatura inicial. Se inició la combustión y se midió el aumento de temperatura (ΔT). Finalizada la combustión, la solución acuosa remanente, que contenía los ácidos formados, se extrajo y se transfirió a un matraz Erlenmeyer. A la solución se le añadió fenolftaleína como indicador y se tituló con una solución estandar de NaOH 0,02 M hasta alcanzar el punto de equivalencia, determinado por el cambio de color. El volumen de NaOH consumido se registró para la corrección de la energía liberada durante la combustión.

2.2.2. Porcentaje Humedad de los pellets.

La humedad de los pellets se determinó mediante el método gravimétrico, utilizando una balanza higrométrica digital. Se tomó una muestra homogenizada, representativa del lote evaluado, la cual fue introducida en el equipo. La muestra fue sometida a una temperatura de 120 °C hasta lograr la evaporación completa del agua. El equipo registró el valor de sólidos totales en la pantalla una vez alcanzada la estabilización, y el porcentaje de humedad se calculó por diferencia respecto al 100 %, se realizaron 3 análisis por lote de pellets y así.

2.2.3. Fases de la secuencia de la prueba estándar (eficiencia térmica)

La prueba estándar de eficiencia térmica se llevó a cabo en tres fases consecutivas. Para los pellets, las pruebas se realizaron durante tres días consecutivos, mientras que para las mezclas con asaí se realizaron únicamente dos fases consecutivas durante el mismo período. Cada fase correspondió a diferentes niveles de potencia y velocidades de ventilación de la cocina.

Primera fase: potencia alta, velocidad alta (encendido en frío)

Se verificó que la batería de la cocina asistida por ventilador estuviera completamente cargada.

Se pesó la olla vacía y el material de ignición, el cual no debía superar los 30 g por cada 5 litros de agua.

Se midió y registró la masa del primer lote de combustible.

La olla se llenó con 5 litros de agua a temperatura ambiente, se pesó nuevamente y se registró la masa total.

Se realizaron las conexiones entre el Data Logger, la computadora y la termocupla, registrándose la temperatura del agua cada 5 segundos.

Se midió la temperatura inicial del agua colocando un termómetro digital sumergible en el centro de la olla, fijado a 5 cm del fondo.

Se introdujo en la cámara de combustión el primer lote de combustible y el material de ignición, encendiéndose la cocina con el ventilador en velocidad alta. Una vez que la llama se estabilizó, se registró la hora de inicio de la prueba.

Cuando el agua alcanzó la temperatura de ebullición local, se anotó la hora de finalización y la temperatura.

Inmediatamente se pesó nuevamente la olla con el agua a temperatura de ebullición.

El combustible restante fue retirado sin el uso de agua para extinguir la llama. Los pellets no consumidos se separaron del carbón, pesándose ambos y registrando sus masas.

Segunda fase: potencia media, velocidad media (encendido en caliente)

Esta fase se inició inmediatamente después de la primera, aprovechando la cocina caliente.

Se repitió el mismo procedimiento de la fase anterior, modificando únicamente la velocidad del ventilador a nivel medio.

Tercera fase: potencia baja, velocidad baja (encendido en caliente)

La tercera fase comenzó de forma inmediata tras finalizar la segunda, manteniendo la cocina caliente.

Se repitió el procedimiento de la fase anterior, con la diferencia de que la velocidad del ventilador se reguló en nivel bajo.

2.3. Condiciones de salud (mediciones al interior del ambiente de la cocina).

Las condiciones de salud se basan en la medición de concentración del monóxido de carbono para este estudio se desarrolló la prueba bajo la normativa NB/ISO 19867-1.

Determinación de concentración de monóxido de carbono, dióxido de carbono y dióxido de azufre:

La prueba se realizó tres veces por día a diferentes potencias de cocción durante tres días consecutivos para los pellets al 100 %. En el caso del asaí, las pruebas se efectuaron únicamente a dos potencias, y a potencia alta con una mezcla de 30 % asaí y 70 % pellets, también durante tres días consecutivos.

Previo a cada ensayo, se efectuó una prueba de fugas, utilizando como gas trazador dióxido de carbono (CO₂), con el fin de garantizar la estanqueidad del sistema.

Posteriormente, se encendió el analizador de gases HORIBA PG-350, calibrando el equipo y registrando la concentración de CO entre 10 y 20 minutos antes del encendido de la cocina.

Se pesó el combustible y el material de ignición, además de verificar que la batería del ventilador estuviera cargada y en correcto funcionamiento.

Para iniciar la prueba, se encendió la cocina y se reguló la entrada de aire mediante el ventilador en sus diferentes velocidades (baja, media y alta). Seguidamente, se colocó la olla con 5 L de agua, previamente tapada. El sistema se instaló próximo a la tubería del extractor de la campana, procurando evitar fugas. Se registró la hora de inicio de cada ensayo.

Una vez que el agua alcanzó la temperatura de ebullición local, se mantuvo en esa condición durante aproximadamente 45 minutos o hasta que la concentración de CO₂ descendió a la mitad del valor máximo registrado en la prueba.

Durante el proceso, se procuró mantener la llama lo más constante posible. Al concluir el tiempo establecido, se apagó la cocina y de forma simultánea el analizador de gases, registrando la hora de finalización del ensayo.

3. RESULTADOS

Para calcular la eficiencia, previamente se determinaron los valores de humedad de los combustibles (pellets y asaí), así como su poder calorífico y la temperatura media de ebullición en Cochabamba.

En la Tabla 1 se presentan los valores de humedad obtenidos mediante la balanza higrométrica digital, donde se observa que el contenido de humedad del asaí es superior al de los pellets.

Tabla N ° 1.

Valores de humedad de los combustibles

% Humedad	% Pellets	% Asaí
Análisis 1	5,84	7,60
Análisis 2	5,89	8,04
Análisis 3	5,85	7,81
media	5,86	7,82

Fuente: Elaboración propia, 2025

En la Tabla 2 se presentan los valores de poder calorífico, donde se observa que el asaí posee un poder calorífico inferior al de los pellets. Cabe destacar que las pruebas se realizaron únicamente con las pepas de asaí, sin considerar el bagazo en el muestreo.

Tabla N ° 2.

Valores de poder calorífico de los combustibles

Combustible	Equivalente en H ₂ O del calorímetro [Kcal/Kg]	Valor calorífico mayor del combustible seco [Mj/Kg]	Valor calorífico menor del combustible seco [Mj/Kg]
Pellets	-4885,5637	-20,4549	-18,1940
Asaí	-3273,7098	-13,7064	-11,4455

Fuente: Elaboración propia, 2025

En la Tabla 3 se presentan los valores promedio registrados desde el inicio de la ebullición hasta cinco minutos después de alcanzada, obteniéndose un valor promedio de aproximadamente 89 °C.

Tabla N ° 3.

Valores de temperatura de ebullición media

Nº Prueba	Temperatura media de ebullición en Cochabamba
Prueba 1	89,98
Prueba 2	89,95
Prueba 3	89,05
Promedio	89,66

Fuente: Elaboración propia, 2024

Valores de eficiencia térmica y tiempo de ebullición de 5 L de agua a diferentes potencias.

En la Tabla N.º 4 se presentan los valores de eficiencia térmica obtenidos durante tres días consecutivos de pruebas, en las que se evaluó el desempeño de la cocina a diferentes velocidades de ventilación. Los mejores resultados se alcanzaron a velocidad alta, con un promedio de 35,21 %, seguidos por la velocidad media con 34,67 % y la velocidad baja con 32,63 %. Cabe señalar que los cálculos de eficiencia se realizaron sin considerar la masa de carbón residual.

Tabla N° 4.

Valores de eficiencia térmica para cada fase de prueba de hervido de 5 L, 100 % pellets

% Eficiencia térmica (100% pellets)			
	Potencia de alta(frio)	Potencia de media(caliente)	Potencia de baja
Prueba 1	35,03	34,46	32,76
Prueba 2	35,52	34,56	32,69
Prueba 3	35,07	35,00	32,44
Promedio	35,21	34,67	32,63

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Tabla N.^o 5 se presentan los valores de eficiencia térmica obtenidos al utilizar mezclas con asaí como combustible. Cuando la cocina opera a velocidad alta (nivel 5) con una mezcla que contiene un 30 % de asaí, se alcanza una eficiencia del 34,24 %. A velocidad media (nivel 3), con una mezcla de 40 % de asaí, la eficiencia obtenida es de 34,21 %. El mejor resultado se obtuvo al trabajar a velocidad media con una mezcla de 30 % de asaí, alcanzando una eficiencia del 34,61 %. Cabe destacar que los cálculos de eficiencia se realizaron sin considerar la masa de carbón residual.

Tabla N°5.

Valores de eficiencia térmica para cada fase de prueba, mezcla de pellets y asaí

% Eficiencia térmica		
Potencia alta (velocidad 5, 30% asaí)	Potencia media (velocidad 3, 40% asaí)	Potencia media (velocidad 3, 30% asaí)
34,24	34,20	34,61

Fuente: Elaboración propia, 2025

En la Tabla N.^o 6 se presenta el tiempo requerido para que 5 litros de agua alcancen la temperatura de ebullición local, utilizando pellets como único combustible. El menor tiempo se registró a velocidad alta, con un promedio de 16,67 minutos. A velocidad media, el tiempo promedio fue de 17,33 minutos, mientras que a velocidad baja ascendió a 23 minutos. Estos resultados indican que la velocidad alta permite alcanzar la temperatura de ebullición en menor tiempo.

Tabla N°6.

Valores de tiempo de hervido de 5 L de agua en los 3 días de prueba en min 100% pellets

Tiempo de ebullición (100% pellets)			
	Potencia de alta(frio)	Potencia de media(caliente)	Potencia de baja
Prueba 1	17	17	22
Prueba 2	16	19	22
Prueba 3	16	16	25
Promedio	16,67	17,33	23,00

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Tabla N.^o 7 se presenta el tiempo requerido para que 5 litros de agua alcancen la temperatura de ebullición local, utilizando mezclas de asaí y pellets como combustible. El menor tiempo se registró cuando la cocina operó a velocidad alta (nivel 5) con una mezcla que contenía 30 % de asaí, alcanzando la ebullición en 20 minutos. A velocidad media, el tiempo aumentó a 21 minutos con una mezcla de 30 % de asaí y a 24 minutos con una mezcla de 40 % de asaí. Estos resultados indican que tanto la velocidad de operación como el porcentaje de asaí influyen significativamente en el tiempo de ebullición.

Tabla N°7.

Valores de tiempo de hervido de 5 L de agua en min, mezcla pellets y asaí

Tiempo de ebullición		
Potencia de alta (velocidad 5, 30% asaí)	Potencia de media (velocidad 3, 40% asaí)	Potencia de media (velocidad 3, 30% asaí)
20	24	21

Fuente: Elaboración propia, 2025

Concentración de monóxido de carbono

Se utilizó un analizador de gases HORIBA PG-350, sin realizar ningún tipo de dilución, midiendo las emisiones como si fuera una chimenea. Los valores obtenidos se presentan a continuación.

En la Tabla N.^o 8 se presentan los valores promedio de concentración de monóxido de carbono (CO) emitido durante el funcionamiento de la cocina a diferentes velocidades. A velocidad alta, se obtuvo un valor promedio de 460 ppm con un coeficiente de variación del 9,94 %. A velocidad media, el promedio fue de 700 ppm con un coeficiente de variación del 12,98 %, mientras que a velocidad baja se registró un valor promedio de 1161 ppm con un coeficiente de variación del 29,50 %. Las mediciones se realizaron durante aproximadamente 45 minutos, hasta que la concentración de CO₂ descendió a la mitad del valor máximo registrado.

Tabla N° 8.

Valores promedio de monóxido de carbono y coeficiente de variación entre los valores de los tres días de prueba a diferentes velocidades

Valores Estadísticos				Unidades
Velocidades	5(alta)	3(media)	1(baja)	
Media aritmética	460,09	700,23	1161,32	ppm
Desviación estándar	45,75	90,92	342,56	ppm
CV	0,10	0,13	0,29	
% CV	9,94	12,98	29,50	<25% Se acepta

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Tabla N.º 9 se presenta el valor promedio de concentración de monóxido de carbono (CO) cuando la cocina operó a velocidad alta utilizando una mezcla compuesta por 30 % de asaí y 70 % de pellets. Se obtuvo un valor promedio de 409 ppm, con un coeficiente de variación del 11,9 %. La medición se realizó durante aproximadamente 40 minutos, hasta que la concentración de CO₂ descendió a la mitad del valor máximo alcanzado.

Tabla N° 9.

Valor promedio de monóxido de carbono y coeficiente de variación entre los valores de los tres días de prueba de la mezcla 30% asaí a velocidad alta

Valores Estadísticos	
Media aritmética	408,661
Desviación estándar	48,651
CV	0,119
% CV	11,905

Fuente: Elaboración propia, 2025

En la Figura N.º 3 se presentan las curvas de concentración de monóxido de carbono (CO) obtenidas durante las pruebas realizadas a velocidad alta. Se observa que, al utilizar mezclas con asaí, las curvas presentan picos iniciales más elevados, los cuales luego descienden y se estabilizan en un valor constante. En contraste, cuando se emplea 100 % pellets como combustible, la concentración de CO no muestra picos altos, pero se mantiene estable en valores superiores a los de las mezclas con asaí durante un periodo más prolongado. Como resultado, los valores promedio de concentración de CO son similares en ambos casos.

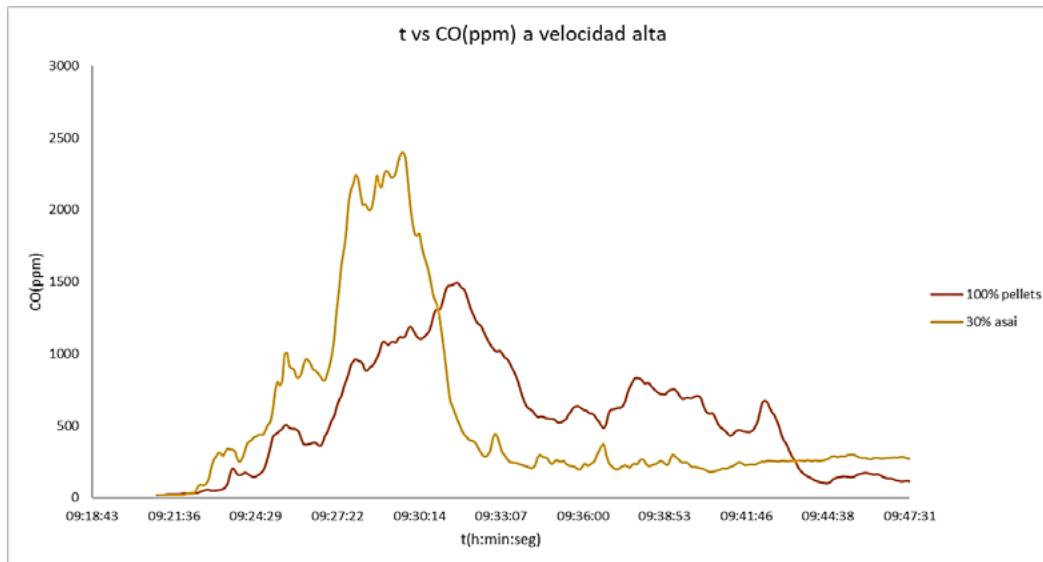


Figura N° 3. Curvas de concentración de monóxido de carbono en ppm con pellet al 100

y con mezclas de 30% asaí. Fuente: Elaboración propia, 2025

En la Figura N.º 4 se presentan las curvas de concentración de monóxido de carbono (CO) obtenidas durante las pruebas a velocidad media. Se observa que la emisión de CO es menor en comparación con las pruebas realizadas a velocidad alta. Además, el pico máximo de concentración registrado a velocidad media es considerablemente más bajo que el observado a velocidad alta.

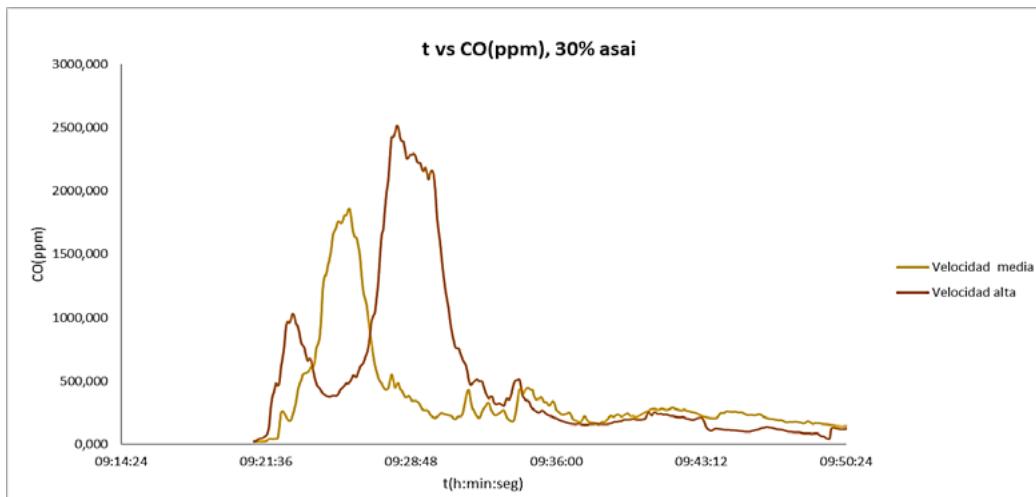


Figura N° 4. Curvas de concentración de monóxido de carbono en ppm a velocidades media y alta. Fuente: Elaboración propia, 2025

Para la concentración de dióxido de carbono

En la Tabla N.^o 10 se presentan los valores promedio de concentración de dióxido de carbono (CO₂) medidos durante tres días consecutivos de pruebas, utilizando como combustible 100 % pellets. A velocidad alta, se obtuvo un valor promedio de 1,95 % v/v con un coeficiente de variación (CV) del 9,5 %. A velocidad media, el valor registrado fue de 2,00 % v/v con un CV de 3,5 %, mientras que a velocidad baja se registró una concentración de 1,50 % v/v con un CV de 10,86 %.

Tabla N° 10.

Valores promedio de dióxido de carbono y coeficiente de variación entre los valores de los tres días de prueba, 100% pellets.

Velocidades	Valores Estadísticos			unidades
	5(alta)	3(media)	1(baja)	
Media aritmética	1,95	2,00	1,50	% v/v
Desviación estándar	0,18	0,07	0,16	% v/v
CV	0,09	0,04	0,11	
% CV	9,50	3,50	10,86	<25% Se acepta

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Tabla N.^o 11 se presentan los valores promedio de concentración de dióxido de carbono (CO₂) obtenidos al utilizar una mezcla de 30 % de asaí y 70 % de pellets como combustible, operando a velocidad alta. Se obtuvo un valor promedio de 2,47 % v/v, con un coeficiente de variación (CV) de 4,56 %.

Tabla N° 11.

Valor promedio de dióxido de carbono y coeficiente de variación entre los valores de las pruebas con mezclas de 30% asaí y a velocidad alta

Valores Estadísticos (% v/v)	
Media aritmética	2,468
Desviación estándar	0,112
CV	0,046
% CV	4,556

Fuente: Elaboración propia, 2025

En la Figura N.^o 5 se presentan las curvas de concentración de dióxido de carbono (CO₂) en % v/v, obtenidas durante el funcionamiento de la cocina a velocidades alta y media utilizando una mezcla de 30 % asaí y 70 % pellets como combustible. Se observa que, a velocidad alta, se alcanzan picos de concentración de CO₂ más elevados en comparación con los registrados a velocidad media.

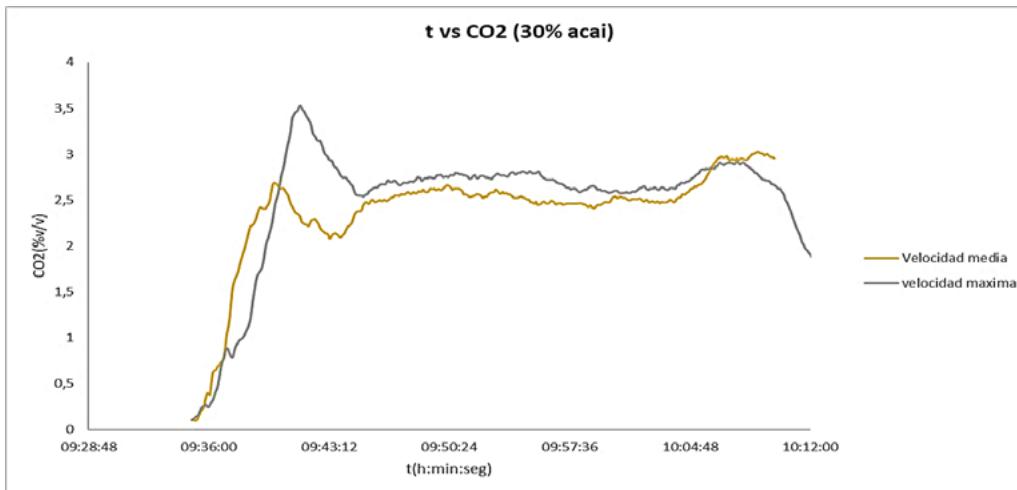


Figura N° 5. Curvas de concentración de dióxido de carbono en % v/v con 30% aсаí a velocidad alta. Fuente: Elaboración propia,2025

Para la concentración de dióxido de azufre

En la Figura N.^o 6 se observa la presencia de concentraciones de dióxido de azufre (SO₂) cuando se emplean mezclas con aсаí como combustible. En cambio, este gas no se detecta al utilizar 100 % pellets de pino. En promedio, se registró un valor de 4 ppm de SO₂.

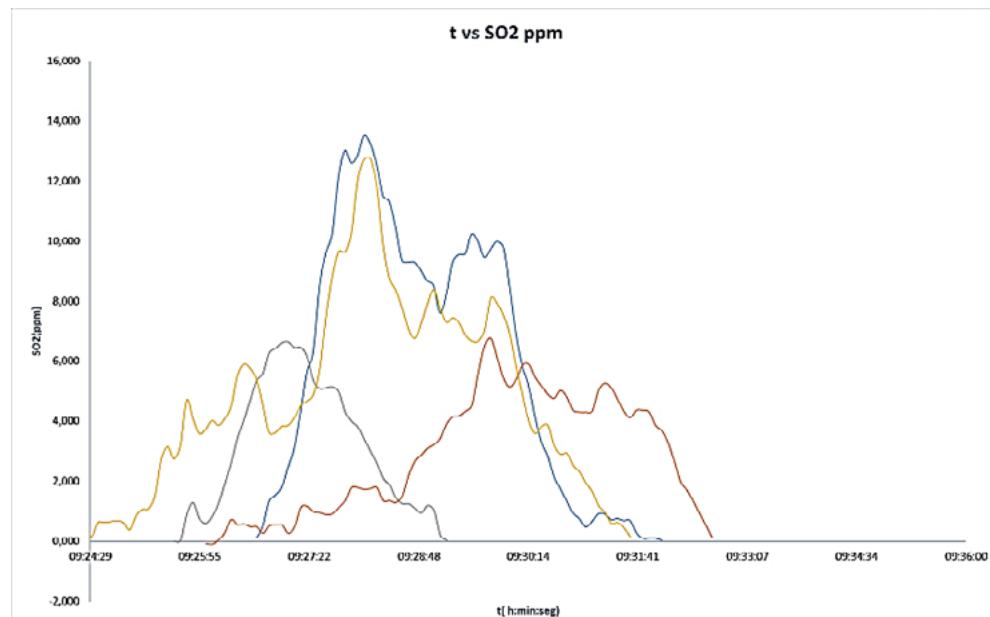


Figura N°6. Curvas de concentración de dióxido de azufre en ppm en mezclas de 30% aсаí a alta velocidad. Fuente: Elaboración propia,2025

4. DISCUSION

El mayor contenido de humedad del asaí (7,82 %) en comparación con los pellets (5,8 %) afecta la eficiencia térmica. Debido a su elevado contenido de humedad, el asaí consume una parte significativa de la energía liberada durante la combustión en la evaporación del agua, disminuyendo así su eficiencia térmica y su poder calorífico neto. Los resultados mostraron que la eficiencia fue menor con las mezclas en general, lo que se alinea con la teoría de que la mayor humedad menores eficiencias. Se observó una diferencia promedio de 4 minutos en el tiempo de ebullición entre ambos combustibles, siendo más eficiente el uso de pellets puros. Esto se debe principalmente a su menor humedad (5,8 %) y mayor homogeneidad, lo que permite una combustión más rápida y estable. En cambio, el asaí, con mayor humedad y composición heterogénea, reduce temporalmente la eficiencia térmica, al requerir más tiempo para alcanzar una combustión óptima.

Los resultados obtenidos muestran que cuando se utiliza pellets de pino al 100 %, el incremento de la velocidad de combustión conlleva una mayor disponibilidad de oxígeno en la cámara, lo que favorece una combustión más completa. Esto se traduce en una disminución de las concentraciones de monóxido de carbono (CO), ya que el oxígeno adicional permite la oxidación completa del CO a CO₂. Este comportamiento es característico de un proceso de combustión eficiente.

Sin embargo, al utilizar mezclas con 30 % de asaí y 70 % de pellets, se observa un fenómeno contrario: a velocidad alta, las concentraciones de CO aumentan comparada con la prueba a velocidad media de esta misma mezcla. Esto podría deberse a que el asaí por su estructura no tiene una interacción adecuada con el oxígeno debido al corto tiempo de residencia en la cámara y la mayor velocidad de ingreso de aire podría estar enfriando la temperatura del sistema, liberando compuestos volátiles como CO sin que estos lleguen a oxidarse completamente. En contraste, a velocidad media, estas mezclas presentan menores concentraciones de CO, lo que sugiere que una velocidad moderada permite un tiempo de combustión más prolongado, favoreciendo una oxidación más completa de los compuestos generados durante la combustión.

En resumen, la eficiencia de la combustión y la formación de CO en esta cocina dependen tanto del tipo de combustible como de la velocidad de operación. El uso de mezclas con asaí requiere un control más preciso de la velocidad de combustión o incluso un pretratamiento del residuo (como secado) para mejorar su comportamiento energético y reducir las emisiones contaminantes.

En el presente estudio, se observó que, al utilizar exclusivamente pellets de pino, las emisiones de SO₂ fueron prácticamente nulas. Sin embargo, al incorporar semilla de asaí en la mezcla, se detectaron emisiones bajas de SO₂. La presencia de dióxido de azufre (SO₂) en emisiones de combustión suele estar relacionada directamente con el contenido de azufre en el combustible utilizado.

5. CONCLUSIONES

Se realizaron pruebas experimentales para evaluar el rendimiento térmico, consumo energético y emisiones gaseosas de una cocina mejorada, utilizando pellets de pino puros y mezclas con residuos de asaí (30 % y 40 %). Los resultados permitieron establecer lo siguiente:

Los pellets de pino presentaron un poder calorífico de 20,45 MJ/kg, mientras que el asaí alcanzó 13,71 MJ/kg, evidenciando que el menor contenido energético y mayor humedad del asaí reduce la eficiencia térmica de las mezclas.

La cocina alcanzó un nivel 3 de eficiencia energética según la normativa ISO/TR 19867-3, mostrando un rendimiento superior al de cocinas tradicionales. La eficiencia térmica fue de 35 % con pellets puros, 34,61 % con 30 % de asaí y 34,20 % con 40 % de asaí. La diferencia se atribuye principalmente a la mayor humedad y composición heterogénea del asaí, que requiere más energía para evaporar el agua antes de la combustión.

El tiempo de ebullición del agua fue menor con pellets puros, aproximadamente 4 minutos menos que con mezclas de asaí, lo que refleja la combustión más rápida y estable de los pellets debido a su estructura homogénea.

Respecto a las emisiones, los pellets puros a velocidad alta generaron 407 ppm de CO (5,96 g CO/MJ), mientras que la mezcla 30 % asaí - 70 % pellets alcanzó 309 ppm de CO a velocidad media, indicando que un flujo de aire moderado favorece la oxidación completa de los compuestos durante la combustión de mezclas.

Se registró una concentración de CO₂ de 2,47 % v/v al usar la mezcla con 30 % de asaí a velocidad alta, y bajas emisiones de SO₂ asociadas a la presencia de compuestos azufrados en el asaí, ausentes en los pellets puros.

En conclusión, la mezcla de residuos de asaí con pellets de pino constituye una alternativa energética sostenible para comunidades rurales donde se genera este residuo. No obstante, el uso de 100 % asaí no resulta viable debido a la imposibilidad de mantener una llama estable con la cantidad de material de ignición recomendada. Para optimizar el desempeño de la cocina, se recomienda ajustar el flujo de aire según el tipo de combustible, equilibrando eficiencia energética y emisiones, así como explorar otras biomasas agroindustriales con buen poder calorífico y bajas emisiones contaminantes. Estas medidas permitirán desarrollar sistemas más limpios, eficientes y adaptados a contextos rurales, promoviendo el uso de residuos como fuente energética renovable y reduciendo el impacto ambiental.

6. BIBLIOGRAFIA

Access to clean cooking – SDG7: Data and Projections – Analysis. (s. f.). IEA. Recuperado 23 de septiembre de 2025, de <https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections/access-to-clean-cooking>

Ahmad, R., Zhou, Y., Liang, C., Li, G., Zhao, N., Abbas, A., Yu, F., Li, L., Gong, J., Wang, D., Yang, Y., Tang, Z., Sultan, M., Sun, C., & Dong, R. (2022). Comparative evaluation of thermal and emission performances for improved commercial coal-fired stoves in China. *RSC Advances*, 12(32), 20886-20896. <https://doi.org/10.1039/D2RA03364J>

Barnes, D. F. & Weltbank (Eds.). (1994). *What makes people cook with improved biomass stoves? A comparative international review of stove programs.* World Bank.

Barpatragohain, R., Bharali, N., & Dutta, P. P. (2021). Thermal Performance Evaluation of an Improved Biomass Cookstove for Domestic Applications. En S. Revankar, S. Sen, & D. Sahu (Eds.), *Proceedings of International Conference on Thermofluids* (pp. 579-590). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7831-1_54

Bhusal, P., Ale, B. B., & Singh, R. M. (2015). *Performance Evaluation of Domestic Rice Husk Gasifier Stove (Belonio Type) and Study on Modification of Design for using Different Biomass.*

Biomass Cookstoves Technical Meeting: Summary Report. (s. f.).

Caubel, J. J., Rapp, V. H., Chen, S. S., & Gadgil, A. J. (2018). Optimization of Secondary Air Injection in a Wood-Burning Cookstove: An Experimental Study. *Environmental Science & Technology*, 52(7), 4449-4456. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05277>

Deng, W., Feng, Y., Fu, J., Guo, H., Guo, Y., Han, B., Jiang, Z., Kong, L., Li, C., Liu, H., Nguyen, P. T. T., Ren, P., Wang, F., Wang, S., Wang, Y., Wang, Y., Wong, S. S., Yan, K., Yan, N., ... Zhou, H. (2023). Catalytic conversion of lignocellulosic biomass into chemicals and fuels. *Green Energy & Environment*, 8(1), 10-114. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2022.07.003>

Himanshu, Pal, K., Jain, S., & Tyagi, S. K. (2022). Energy and exergy analysis and emission reduction from forced draft gasifier cookstove models: A comparative study. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(15), 8509-8521. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-11137-y>

Kim, K.-H., Jahan, S. A., & Kabir, E. (2011). A review of diseases associated with household air pollution due to the use of biomass fuels. *Journal of Hazardous Materials*, 192(2), 425-431. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.05.087>

Kirch, T., Birzer, C. H., Medwell, P. R., & Holden, L. (2018). The role of primary and secondary air on wood combustion in cookstoves. *International Journal of Sustainable Energy*, 37(3), 268-277. <https://doi.org/10.1080/14786451.2016.1166110>

Kshirsagar, M. P., & Kalamkar, V. R. (2014). A comprehensive review on biomass cookstoves and a systematic approach for modern cookstove design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 580-603. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.039>

Layout 1. (s. f.). Recuperado 23 de septiembre de 2025, de <https://cleancooking.org/wp-content/uploads/2021/07/32-1.pdf>

Low-cost solutions can give billions access to modern cooking by 2030, but the world is failing to deliver—News. (2023, julio 26). IEA. <https://www.iea.org/news/low-cost-solutions-can-give-billions-access-to-modern-cooking-by-2030-but-the-world-is-failing-to-deliver>

MacCarty, N., Still, D., & Ogle, D. (2010). Fuel use and emissions performance of fifty cooking stoves in the laboratory and related benchmarks of performance. *Energy for Sustainable Development*, 14(3), 161-171. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.06.002>

McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 47-54. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5)

Mekonnen, B. A. (2022). Thermal efficiency improvement and emission reduction potential by adopting improved biomass cookstoves for sauce-cooking process in rural Ethiopia. *Case Studies in Thermal Engineering*, 38, 102315. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102315>

Pandey, A., Patel, S., Pervez, S., Tiwari, S., Yadama, G., Chow, J. C., Watson, J. G., Biswas, P., & Chakrabarty, R. K. (2017). Aerosol emissions factors from traditional biomass cookstoves in India: Insights from field measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(22), 13721-13729. <https://doi.org/10.5194/acp-17-13721-2017>

(PDF) *Effect of holes system designing for low energy stove using coffee husk bio-pellet as solid fuel.* (s. f.). ResearchGate. Recuperado 23 de septiembre de 2025, de https://www.researchgate.net/publication/329152217_Effect_of_holes_system_designing_for_low_energy_stove_using_coffee_husk_bio-pellet_as_solid_fuel

Rajkumar, S., Young, B. N., Clark, M. L., Benka-Coker, M. L., Bachand, A. M., Brook, R. D., Nelson, T. L., Volckens, J., Reynolds, S. J., L'Orange, C., Good, N., Koehler, K., Africano, S., Osorio Pinel, A. B., & Peel, J. L. (2019). Household air pollution from biomass-burning cookstoves and metabolic syndrome, blood lipid concentrations, and waist circumference in Honduran women: A cross-sectional study. *Environmental Research*, 170, 46-55. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.12.010>

Sharma, M., & Dasappa, S. (2017). Emission reduction potentials of improved cookstoves and their issues in adoption: An Indian outlook. *Journal of Environmental Management*, 204, 442-453. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.018>

Tursi, A. (2019). A review on biomass: Importance, chemistry, classification, and conversion. *Biofuel Research Journal*, 6(2), 962-979. <https://doi.org/10.18331/BRJ2019.6.2.3>

Venkataraman, C., Sagar, A. D., Habib, G., Lam, N., & Smith, K. R. (2010). The Indian National Initiative for Advanced Biomass Cookstoves: The benefits of clean combustion. *Energy for Sustainable Development*, 14(2), 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.04.005>

Westhoff, B., Europäische Kommission, Germann, D., & Rigby, N. (with Commission of the European Community & SfE - Sozietät für Entwicklungsplanung). (1995). *Stove images: A documentation of improved and traditional stoves in Africa, Asia and Latin America* (1. engl. ed). Brandes und Apsel.

Artículo Ingeniería Aplicada

Diseño y Construcción De Un Aerogenerador De Eje Vertical Tipo Banki Para Microgeneración Urbana

Design and construction of a Banki Vertical Axe Wind Turbine for Energy Harvesting

 Rafaella Hazel Rojas-Rojas¹,  Daniel Felipe Sempértegui-Tapia²,  Omar Castellón-Castellón³,
 Renán Orellana-Lafuente⁴.

¹Estudiante Ingeniería Electromecánica. Universidad Privada Boliviana. Cochabamba. Bolivia. rafa.hazel.rojas@gmail.com

²Docente. Director Laboratorio de Energías Alternativa. Universidad Privada Boliviana. Cochabamba. Bolivia. dsempertegui@upb.edu

³Gerente IngresteC. IngresteC-Metrología y Calibración. Cochabamba. Bolivia. omar.castellon.c@gmail.com

⁴Docente. Director Carrera Electromecánica. Universidad Privada Boliviana. Cochabamba. Bolivia. renanorellana@upb.edu

RESUMEN

El acuerdo de París y el establecimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) han impulsado a los países que firmaron estos acuerdos a invertir en la investigación y desarrollo de alternativas de generación de energía limpia y reducir la dependencia en los combustibles fósiles. Una de las estrategias para esta transición es la microgeneración en sistemas productivos urbanos, donde la energía eólica destaca debido a su flexibilidad de diseño y adaptabilidad. En este sentido, en este trabajo se diseña y construye un Aerogenerador de Eje Vertical (VAWT por su sigla en inglés) tipo Banki para microgeneración urbana. Para este propósito, primero se verifican mediante simulaciones numéricas los parámetros de diseño óptimos (número de álabes, ángulo de ataque del álabe y relación altura-diámetro) sugeridos en un trabajo previo del mismo grupo de investigación. Posteriormente, se analiza la influencia del perfil de los álabes del aerogenerador, un parámetro que no había sido considerado anteriormente. A partir de los resultados obtenidos de velocidad angular de los diferentes perfiles de álabes se llegó a un diseño final del aerogenerador. Finalmente, se logró construir un prototipo de aerogenerador de eje vertical el cual, en las pruebas, llegó hasta 600 RPM y consiguió generar una diferencia de voltaje de hasta 100 mV. Además, se verificó experimentalmente la importancia del ángulo de incidencia del viento en la rotación del aerogenerador.

Palabras claves: Aerogenerador Eje Vertical, Banki, Microgeneración, Generación Eólica, Energía Renovable.

ABSTRACT

The Paris Agreement and the establishment of the Sustainable Development Goals (SDGs) have prompted the countries that signed these agreements to invest in research and development of clean energy generation alternatives and reduce dependence on fossil fuels. One of the strategies for this transition is energy harvesting in urban production systems, where wind energy stands out due to its design flexibility and adaptability. In this regard, this work designs and builds a Banki Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) for urban energy harvesting. To this end, the optimal design parameters (number of blades, attack angle of the blade, and height-to-diameter ratio) suggested in a previous study made by the same research group, first verified through numerical simulations. Subsequently, the influence of the blade profile, a parameter that had not been

Citar como: Rojas-Rojas, R.H., Sempértegui-Tapia, D.F., Castellón-Castellón, O., Orellana-Lafuente, R. Diseño y Construcción De Un Aerogenerador De Eje Vertical Tipo Banki Para Microgeneración Urbana. *Journal Boliviano De Ciencias*, 21(58) 42-59 <https://doi.org/10.52428/20758944.y21i58.1391>

Recepción: 17/05/2025

Aceptado: 30/10/2025

Publicado: 30/12/2025

Declaración: Derechos de autor 2025 Rojas-Rojas, R.H., Sempértegui-Tapia, D.F., Castellón-Castellón, O., Orellana-Lafuente, R. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](#).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



previously considered, is analyzed. Based on the angular velocity results obtained for the different blade profiles, a final wind turbine design was arrived at. Finally, a prototype for the VAWT was built, which, in tests, reached speeds of up to 600 RPM and was able to generate a voltage difference of up to 100 mV. Furthermore, the importance of the incidence angle of wind on the rotation of the wind turbine was experimentally verified.

Key words: Vertical Axe Wind Turbine, Banki, Energy Harvesting, Wind Energy Generation, Clean Energy.

1. INTRODUCCION

En el año 2015 se firma el acuerdo de París (Nations, 2020), en el cual 196 países se comprometen a reducir sus emisiones de carbono, esto mayormente por medio de la transición de una matriz energética dependiente de combustibles fósiles a energía limpia, como ser solar, eólica y termal. Además, la Organización de Naciones Unidas (ONU) estableció 17 Objetivos para el Desarrollo Sostenible (Moran, 2023), en el cual el séptimo objetivo corresponde a la generación de energía limpia. La ONU reconoce en este punto que el desarrollo y acceso a una fuente de energía limpia es una necesidad para garantizar el suministro de localidades que se encuentran aisladas y disminuir la dependencia de aquellos que generan energía por medio de combustibles fósiles. Bolivia es uno de los países que depende de un combustible fósil para la generación de energía (71% de la matriz energética está compuesta por plantas de ciclo combinado, las cuales utilizan gas natural para la producción de energía eléctrica) y firmo tanto el acuerdo de París como los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Actualmente, Bolivia cuenta con plantas de energía solar y eólica, aunque la cantidad de energía que inyectan al interconectado eléctrico es muy pequeña (alrededor del 6%), se está investigando formas de aumentar la participación de las energías limpias por medio de la generación distribuida para autoconsumo tanto en ciudades como en zonas rurales y poblaciones alejadas que no pueden ser partes del interconectado nacional y por lo tanto no tienen acceso ninguna clase de energía eléctrica. Uno de los métodos propuestos para esta microgeneración es la instalación de aerogeneradores para aprovechar la energía del viento.

Los aerogeneradores están divididos según la orientación del eje de su rotor en Aerogeneradores de Eje Horizontal, o HAWT por su sigla en inglés, y Aerogeneradores de Eje Vertical, o VAWT por su sigla en inglés. Al mismo tiempo los VAWTs están divididos en dos grupos según su principio de funcionamiento: aerogeneradores de sustentación (donde los álabes del aerogenerador al girar, crean una diferencia de presión que genera una fuerza de sustentación perpendicular al flujo de aire, impulsando el rotor para generar energía eléctrica) o Darrieus y aerogeneradores de arrastre (el viento empuja la superficie de los álabes para producir la rotación que generará la energía eléctrica) o Savonius.

Los aerogeneradores Darrieus se caracterizan por tener 2 a 3 álabes delgados de geometría compleja (Möllerström *et al.*, 2019). Una de las versiones más populares de este aerogenerador es el Giromill o aerogenerador Darrieus H, donde los álabes de geometría compleja son reemplazados por álabes rectos, que tienen una alta fuerza de sustentación (Du *et al.*, 2019). Otro aerogenerador de sustentación que se ha vuelto una opción viable para microgeneración es el aerogenerador Crossflex, cuyos álabes tienen una forma helicoidal con un rotor alargado, este aerogenerador

se ha logrado integrar en la fachada de los edificios y las residencias (Denoon *et al.*, 2008). Los aerogeneradores Crossflex han pasado la etapa de investigación y se encuentran disponibles en el mercado, por el contrario existe un generador de sustentación que aún se encuentra en la etapa de investigación y todavía no pasado a la etapa de prototipaje, el aerogenerador *Variable Geometry Oval Trajectory* o VGOT fue diseñado por Ponta *et al.* (Ponta *et al.*, 2007), este modelo consiste en un aerogenerador Darrieus cuyos alabes revolucionan en una trayectoria ovalada sobre un riel respecto al eje. Este diseño permite obtener generación eléctrica a mayor escala gracias a la estabilidad estructural, logrando un mejor torque de inicio y velocidad *cut-in*.

El aerogenerador Savonius, en su versión clásica, está compuesto por 2 medios cilindros huecos unidos a un eje; este aerogenerador presenta algunas ventajas sobre el aerogenerador Darrieus, el mecanismo de arrastre del aerogenerador permite que pueda ser adaptado a una gran cantidad de fluidos o flujos másicos de diferentes características (Al-shammary *et al.*, 2020). Las variantes que se lograron desarrollar del aerogenerador Savonius son: el aerogenerador Sistan, el aerogenerador Zephyr y el aerogenerador Banki. El aerogenerador Sistan, el cual se puede ver en la Figura N° 1 a), fue uno de los primeros en ser desarrollado, su nombre deriva de la región de Irán en la que fue utilizado, tiene una facilidad de integración arquitectónica lo cual permite su integración en áreas residenciales, se sugiere que incrementar el número de álabes puede incrementar el rendimiento del aerogenerador (Muller *et al.*, 2009). El aerogenerador Zephyr, el cual se puede ver en la Figura N° 1 b), tiene varios álabes en el estator que ayudan a controlar el flujo y la dirección del viento a la entrada de la turbina. El beneficio aerodinámico de los álabes es la reducción de la turbulencia generada y la posibilidad que el flujo se concentre de mejor manera sobre la superficie del álate, si bien estos tipos alternos de turbinas no suelen ser explorados, son una alternativa a configuraciones comunes existentes (Pope *et al.*, 2010)numerical and experimental studies are presented to determine the operating performance and power output from a vertical axis wind turbine (VAWT. Por último, la turbina Banki, la cual se puede ver en la Figura 1 c), tiene su origen en la generación hidroeléctrica, poca investigación fue realizada para su integración eólica, Qusai *et al.* (Qusai *et al.*, 2021) realizaron un estudio sobre un aerogenerador Banki aplicado para la generación eólica en carreteras.

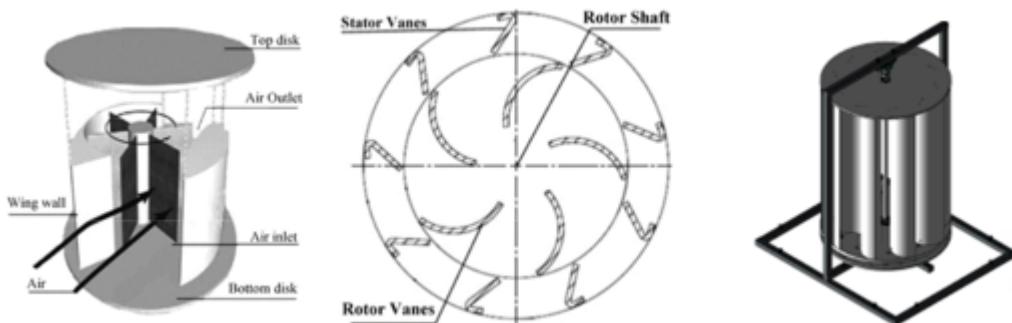


Figura N° 1. a) Aerogenerador Sistan, b) Aerogenerador Zephyr, c) Aerogenerador Banki,

fuentes:(Muller *et al.*, 2009), (Pope *et al.*, 2010)numerical and experimental studies are presented to determine the operating performance and power output from a vertical axis wind turbine (VAWT,(Qusai *et al.*, 2021).

Uno de los primeros estudios de adaptación a generación eólica fue realizado por Al Maaitah *et al.* (Al-Maaitah, 1993), en este estudio se realizaron simulaciones por medio de las cuales se buscó evaluar el comportamiento de un aerogenerador Banki para la generación de energía eléctrica en una carretera, en la cual utilizaba el flujo de viento forzado de los autos que circulaban, encontrando que su desempeño era mejor al de otros generadores. Posteriormente, Tian *et al.* (Tian *et al.*, 2020) buscaron la mejor forma de aprovechar las corrientes de aire turbulento provocadas por el movimiento de los vehículos en las autopistas por medio de VAWT de tipo Banki. Por otro lado, Liu *et al.* (Liu *et al.*, 2019) propusieron un diseño híbrido de aerogenerador, en el que se combinan características del aerogenerador Savonius y el aerogenerador Darrieus, el diseño propuesto se puede apreciar en la Figura N° 2. En este trabajo de ingeniería aplicada, se analizó el funcionamiento teórico y se validó el diseño a partir del análisis de los resultados obtenidos a partir de simulaciones numéricas.

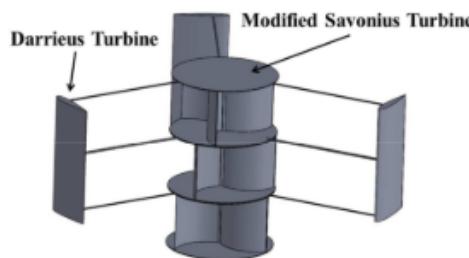


Figura N° 2. Turbina hibrida Darrieus-Savonius. Fuente: (Liu *et al.*, 2019)

Una buena cantidad de los trabajos de investigación de los VAWTs también analizan la influencia del perfil del álabe en los aerogeneradores de tipo Darrieus, ya que estos tienen un diseño más sencillo y el impacto de la forma del álabe es más notable. En sus respectivos trabajos sobre la influencia del perfil del álabe en el funcionamiento de un aerogenerador tipo Darrieus, Subramanian *et al.* (Subramanian *et al.*, 2017) y Sathiyamoorthy *et al.* (Sathiyamoorthy *et al.*, 2021) realizaron simulaciones con diferentes perfiles de álabe para verificar la influencia que estos tienen en el funcionamiento del VAWT para determinar cuál es la mejor combinación para incrementar la generación de energía.

Para profundizar el estudio de los VAWTs, se recomienda consultar el estado del arte realizado por Alave-Vargas *et al.* (Alave-Vargas *et al.*, 2022).

Por último, es necesario resaltar que, hasta este punto, todos los resultados encontrados son teóricos y no se han realizado prototipos para corroborar los resultados obtenidos por medio de simulaciones. En ese sentido, este trabajo propone no solo el diseño sino también la construcción y validación experimental de un aerogenerador eólico de eje vertical tipo Banki.

2. METODOLOGIA

El proyecto se desarrolló siguiendo una metodología investigativa, por medio del cual se buscó verificar que los parámetros de diseño encontrados anteriormente fueran óptimos para así pasar a la fabricación de un prototipo funcional.

Alave-Vargas *et al.* (Alave-Vargas *et al.*, 2023) determinaron, por medio de un análisis multivariable, los parámetros de diseño para el funcionamiento óptimo para la generación de energía eléctrica de un aerogenerador de eje vertical tipo Banki. Tras un análisis exhaustivo de la literatura, y considerando la aplicación de generación en carreteras y las características del espacio de separación entre los carriles contrarios de una autopista interdepartamental, los autores seleccionaron la relación altura/diámetro, el número de álabes y el ángulo de ataque como parámetros clave para el diseño de un VAWT de tipo Banki. El rango de valores de los parámetros seleccionados fueron los siguientes:

- La relación entre la altura y el diámetro del aerogenerador $H/D=9/14$ y $H/D=11/14$.
- El ángulo de ataque del álabe: 6° , 10° y 14° .
- El número de alabes del aerogenerador: 12, 16 y 20.

Los autores analizaron un total de 18 posibilidades (todas las combinaciones posibles entre los parámetros seleccionados), y por medio de un análisis multivariable determinaron que los parámetros óptimos de diseño para mayor generación son:

- Relación altura-diámetro: $H/D=9/14$
- Ángulo de ataque álabe: 11.55°
- Número de alabes: 12 álabes

Considerando la posible integración del aerogenerador en diversos lugares para microgeneración, se decidió diseñar y construir un prototipo más pequeño. Además, de esta forma se podrían realizar pruebas en un ambiente controlado, al mismo tiempo de dar flexibilidad para seleccionar materiales y escoger técnicas de fabricación. De esta forma, el radio externo fue fijado en 15 cm, el resto de las medidas disminuyeron en la misma proporción que el radio.

Tras la reducción del aerogenerador fue necesario verificar que el diseño del aerogenerador seguía siendo la versión óptima, es decir que su funcionamiento seguía siendo el mejor. Para realizar esta verificación se estudió el impacto que los parámetros del aerogenerador tendrían sobre su funcionamiento, específicamente sobre la velocidad de giro del aerogenerador, ya que este parámetro está directamente ligado a la generación de energía eléctrica del aerogenerador. Las pruebas de los parámetros óptimos se realizaron mediante simulaciones en el programa ANSYS (licencia Student). Primero, se estudió el efecto que el número de alabes tendría en el funcionamiento del aerogenerador. Se realizó una serie de simulaciones para aerogeneradores con 8, 12 y 16 álabes

Posteriormente, se realizaron simulaciones con modelos de aerogenerador con una relación H/D de $9/14$, $11/14$ y $13/14$, los resultados obtenidos confirmaron que, teóricamente, la relación $9/14$ otorga los mejores resultados, es decir que la velocidad de giro, la cual están directamente ligadas a la generación de energía eléctrica, es mayor para el aerogenerador que tiene una relación H/D igual a $9/14$.

No se realizaron pruebas sobre el impacto del ángulo de ataque del álabe, en cambio se prefirió observar el impacto que el perfil del álabe podría tener sobre el funcionamiento del aerogenerador.

Para homogeneizar el diseño, el estudio y la fabricación de los álabes, el Comité Nacional Asesor para Aeronáutica o NACA por su sigla en inglés, clasifica los perfiles de alabes con dígitos que corresponden a la misma cantidad de parámetros de caracterizan el perfil en cuestión. Los perfiles de álabes tienden a utilizar entre 1 a 7 dígitos en su nomenclatura. Los perfiles de alabes más populares y los que más se usan en trabajos investigativos de comparación de desempeño de VAWT son los de 4 y 5 dígitos.

La Tabla N° 1 muestra un resumen de la caracterización de los perfiles de álabes de 4 y 5 dígitos de acuerdo a NACA, donde la cuerda hace referencia a la longitud transversal del perfil del álabe, es decir la distancia que existe entre los extremos del perfil.

Tabla N° 1. Clasificación de perfiles de álabes de acuerdo a NACA.

Álabe de 4 dígitos NACA MPXX	Álabe de 5 dígitos NACA LPQXX
M es la curvatura máxima del perfil dividido entre 100 de la cuerda del ala.	L controla la curvatura, indica si el coeficiente de elevación (Cl) multiplicado por 3/20.
P es la posición de la curvatura máxima dividido por 10 de la cuerda del ala.	P es la posición de la curvatura máxima dividido por 200 de la cuerda del ala.
XX es el espesor dividido entre 100 de la cuerda del ala.	Q = 0, línea de curvatura normal. Q = 1, línea de curvatura reflejada. XX es el espesor máximo dividido entre 100 de la cuerda del ala

Fuente: Elaboración propia.

Para este trabajo, se seleccionaron y analizaron 4 perfiles de álabes: 2 perfiles de 4 dígitos y 2 perfiles de 5 dígitos. Se seleccionó perfiles cuya forma fuera notablemente diferente entre sí, esto para incrementar la posibilidad de obtener resultados diferentes que permitan observar el impacto que tiene el perfil del álabe en el rendimiento del aerogenerador. Los perfiles seleccionados fueron los siguientes: NACA0008, NACA2410, NACA24112 y NACA23015. La Figura N° 3 muestra una representación gráfica el perfil de álabe de 4 dígitos NACA2410 mientras que la Figura N° 4 ilustra el perfil de álabe de 5 dígitos NACA23015.

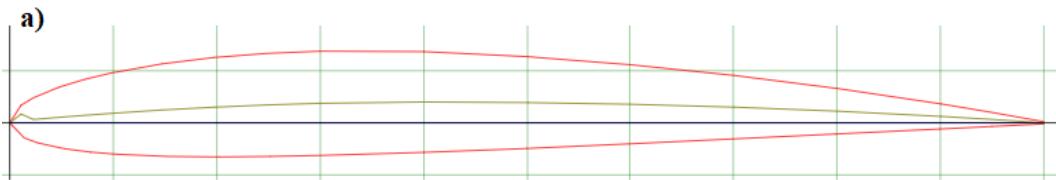


Figura N° 3. perfil de 4 dígitos NACA 2410. Fuente: <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>.

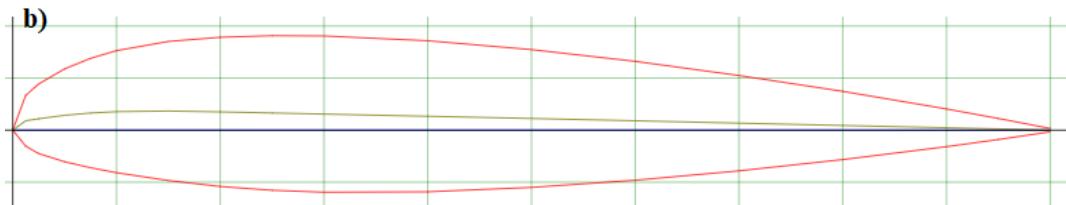


Figura N° 4. perfil de 5 dígitos NACA 23015. Fuente: <http://airfoiltools.com/airfoil/naca5digit>.

Se estudió el comportamiento que los aerogeneradores con perfil de álabes modificados. Por medio de simulaciones en ANSYS, se obtuvieron datos de la velocidad máxima en RPM.

Con los resultados obtenidos de la fase de simulación, se validaron los parámetros óptimos y se evaluó el impacto de modificar otros elementos del diseño, como el perfil del árbol (considerando la adopción de perfiles aerodinámicos NACA). Posteriormente, se procedió al diseño estructural completo del aerogenerador, contemplando tanto el rotor como el sistema de soporte y su integración mecánica.

A partir del diseño final se construyó un prototipo funcional del aerogenerador, utilizando materiales seleccionados por su disponibilidad, resistencia y facilidad de manufactura. La fabricación incluyó los álabes con las dimensiones y perfil definidos, las tapas de soporte del rotor y un sistema de sujeción robusto que garantizara estabilidad durante la operación. Cabe destacar que el proceso fue iterativo, especialmente en la interacción entre el diseño del sistema de sujeción y su implementación práctica.

Una vez construido el prototipo, se realizó la validación experimental en condiciones reales de operación. Se registraron parámetros como la velocidad del viento incidente, la velocidad de rotación del rotor (RPM) y el voltaje generado. Asimismo, se analizó la influencia del ángulo de incidencia del viento sobre el rendimiento.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Parámetros óptimos de diseño

Se estudió el efecto que el número de alabes tendría en el funcionamiento (velocidad angular) del aerogenerador. Se realizó una serie de simulaciones en el programa ANSYS (licencia student) para aerogeneradores con 8, 12 y 16 alabes. Se confirmó

que el número de álabes óptimo para velocidades del viento inferiores a 10 m/s, velocidad realística a la que el viento puede llegar sin tener vientos huracanados, es 12 (ver Figura N° 5).

Posteriormente, se realizaron pruebas con un aerogenerador con una relación H/D de 9/14, 11/14 y 13/14, los resultados confirmaron que la relación 9/14 otorga los mejores resultados.

Los aerogeneradores con perfil NACA mostraron resultados promisorios, especialmente el NACA24112 que llegó a los 518 RPM para una velocidad de viento de 9 m/s, comparado al perfil de ala simple con ángulo de ataque de 11.55° que llegó a 235 RPM para la misma velocidad.

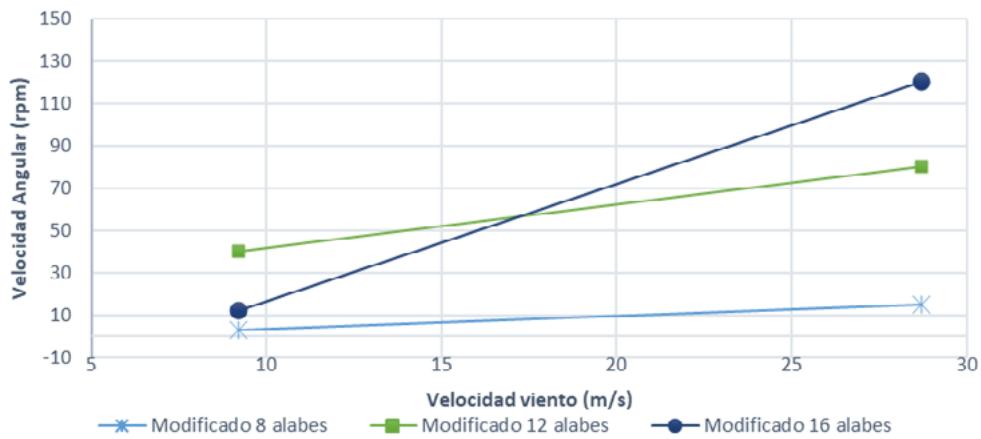


Figura N° 5. Rendimiento del aerogenerador con diferentes números de álabes, fuente: elaboración propia

Inicialmente se realizaron pruebas del comportamiento del aerogenerador sin tapa, es decir considerando que la turbina es el cuerpo principal del aerogenerador. Antes de validar los resultados obtenidos, se volvieron a realizar las pruebas añadiéndole tapas de 1 cm de espesor. Los resultados obtenidos en esta nueva serie de simulaciones diferían de los resultados anteriores, siendo que la velocidad máxima obtenida fue del aerogenerador de perfil clásico llegó a 90 RPM, mientras que la velocidad de giro del aerogenerador con perfil NACA24112 decayó a 40 RPM.

Posteriormente se añadió un borde de ataque a la tapa del aerogenerador Banki, es decir que el espesor externo de la tapa es menor al espesor interno (ver Figura N° 6), esta modificación ayudó a mejorar el funcionamiento del aerogenerador en aproximadamente un 25%, tal como se puede ver en la Tabla N.º 2. Solo se analizó, por medio de simulaciones numéricas, el impacto de esta modificación en el aerogenerador Banki con perfil de ala rectangular.



Figura N° 6. Borde de ataque en la tapa del aerogenerador. Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 2. Influencia de las tapas.

	Velocidad del viento (m/s)	Velocidad del aerogenerador (rpm)
Aerogenerador Banki sin tapa	9.2	235.65
	28.7	799.61
Aerogenerador Banki con tapa	9.2	90
	28.7	400
Aerogenerador Banki con borde de ataque	9.2	130
	28.7	556

Fuente: elaboración propia.

Tras las simulaciones iniciales se determinó que el aerogenerador con borde de ataque en la tapa tiene el mejor rendimiento teórico y es la mejor versión para la construcción.

Fabricación del aerogenerador

Tras la determinación de los parámetros óptimos de diseño del aerogenerador por medio de las simulaciones en ANSYS, se procedió con la fabricación del aerogenerador.

Se comenzó con el diseño de un sistema de soporte para el aerogenerador.

El diseño del sistema de soporte o sujeción fue un proceso iterativo en el cual se realizaron modificaciones de manera constante hasta llegar a un producto que sea satisfactorio. Se partió de la forma externa que el sistema de sujeción tendría y poco a poco se fueron determinando el resto de los detalles (posición de los rodamientos, espesores, topes de fabricación, etc). La parte más importante de este proceso fue el diseño de un sistema de sujeción que permitiera sujetar el aerogenerador de

manera estable a una base al igual que la generación de energía eléctrica con unos generadores de energía DC (corriente continua).

Para lograr un movimiento continuo, reducir la fricción y el efecto del peso al mínimo se utilizaron 2 rodamientos (uno grande y uno pequeño) en el sistema de sujeción. En la Figura N° 7 se pueden ver las diferentes piezas que formaron parte del sistema de sujeción (los rodamientos se encuentran pintados en amarillo).

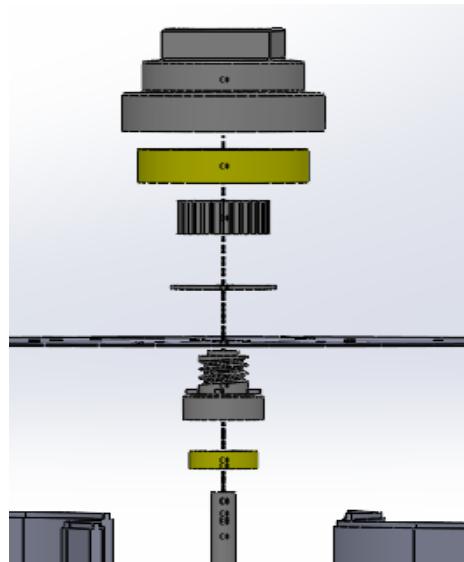


Figura N° 7. Sistema de Sujeción del aerogenerador. Fuente: elaboración propia.

La Figura N° 8 ilustra el diseño final del aerogenerador de eje vertical montado en las bases de sujeción.

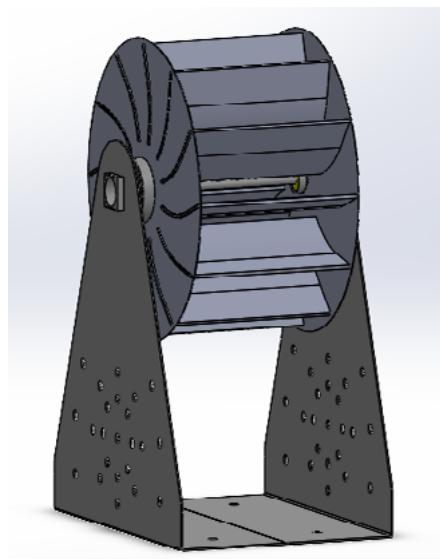


Figura N° 8. Base de sujeción para el aerogenerador. Fuente: elaboración propia.

Los álabes del aerogenerador y las piezas de soporte fueron fabricados por medio de impresión 3D en PLA, para tener igualdad entre las diferentes piezas (sobre todo los álabes) y por la facilidad de acceso que se tiene a esta tecnología, siendo una buena manera de obtener piezas de diferentes tamaños y geometrías de manera rápida y económica. Vale mencionar, que el tipo de material de los álabes tomado en cuenta durante las simulaciones debido a que se requiere datos asociados al material de fabricación del aerogenerador.

Durante el proceso de construcción, la tapa con borde de ataque definida en etapa de diseño se cambió por un disco metálico de 1 mm de espesor, esto debido a que las dimensiones de la impresora 3D con la que se trabajó (ENDER 3) no era lo suficientemente grande para fabricar la tapa en una sola pieza. Además, se verificó que tener una tapa montada con varias partes acarrearía problemas de encaje, los cuales podrían aumentar la resistencia al viento de las tapas y disminuir los beneficios ganados por la incorporación del borde de ataque de la tapa.

Para la construcción del sistema de sujeción, el rodamiento pequeño fue instalado entre el eje del aerogenerador y un asiento interno que permite la unión con la tapa. Por otro lado, el rodamiento grande se instaló de tal forma que permita que el aerogenerador gire mientras está sujetado por 2 bases de sujeción. Este rodamiento fue instalado al interior de un asiento externo que permite que el aerogenerador pueda ser sujetado por la base de sujeción al mismo tiempo que sirve de asiento para los generadores DC, tal y como se puede ver en la Figura N° 9.



Figura N° 9. Instalación rodamiento externo en el asiento externo. Fuente: elaboración propia.

Durante la construcción, montaje y pruebas preliminares se vio la necesidad de rediseñar algunas piezas. Un ejemplo de esto es la pieza ilustrada en la Figura N° 10, la cual es la unión de 3 piezas. Estas piezas están encargadas de unir el aerogenerador con el rodamiento externo, sin embargo, durante las pruebas de rotación iniciales estas no aguantaron los esfuerzos de rotación. El resultado final es una pieza más robusta, capaz de resistir los esfuerzos a los que será sometida durante la rotación.



Figura N° 10. Pieza modificada para el aerogenerador. Fuente: elaboración propia.

Es importante mencionar que a pesar de que el aerogenerador se encuentra sujetado en posición horizontal, esto no cambia en nada su principio de funcionamiento, el aerogenerador es posicionado de esta forma para tener mayor estabilidad en las etapas de validación experimental.

3.3 Pruebas experimentales

Se realizaron pruebas de funcionamiento iniciales con un túnel de viento, como se puede ver en la Figura N° 11. El aerogenerador Banki construido, con un peso de turbina de 4.56 kg y un momento de inercia teórico de 0.06 kg/m², incluso después de llegar a una velocidad del viento de 5 m/s no logró rotar, en algún momento

mostró un indicio de movimiento y la estructura vibró ligeramente, sin embargo, el aerogenerador no logró realizar una rotación completa.



Figura N° 11. Pruebas en el túnel de viento. Fuente: elaboración propia.

Tras varias pruebas se utilizó un soplador de aire para generar el flujo de viento y un alabe auxiliar para distribuir el flujo de aire en su superficie al igual que darle un ángulo de incidencia sobre los álabes del aerogenerador, tal y como se puede ver en la Figura N° 12.



Figura N° 12. Escenario de prueba con el soplador. Fuente: elaboración propia.

Tras varias pruebas se encontró que el mejor ángulo para el álabe de apoyo es de 13.9°.

Durante las pruebas se obtuvieron velocidades que llegaban hasta los 650 RPM, esta velocidad es mayor a lo anticipado por las simulaciones (un máximo de 400 RPM), esto puede ser explicado por la modificación de la tapa, al trabajar con una

tapa más delgada se logró incrementar la velocidad de giro del aerogenerador. Se utilizaron 2 generadores, uno a cada extremo del aerogenerador, para incrementar la generación de energía ya que no se podía modificar los generadores para asegurar un mejor rendimiento. Las frecuencias medidas con el osciloscopio fueron diferentes entre estos 2 generadores, esto debido a su fabricación, aunque externamente los generadores sean iguales, eléctricamente son diferentes. El generador 1 llegó a generar un máximo de 80 mV a 33,5 Hz de frecuencia, mientras que el generador 2 logró generar un máximo de 100 mV a una frecuencia de 34,74 Hz.

Los resultados se pueden ver resumidos en la Tabla N° 3.

Tabla N° 3. Resultados pruebas funcionales.

VELOCIDAD VIENTO		RPM		VOLTAJE			
		Generador 1		Generador 2		Generador 2	
Min.	Max.	Min.	Max.	Freq. (Hz)	Vp-p (mV)	Freq. (Hz)	Vp-p (mV)
1,1	1,8	239	563,5	22,44	40	99,34	65
1	1,5	191	537	22,4	45	56,11	60
1,1	1,9	178	641	33,51	80	33,97	100
1,1	1,9	55	645,5	33,41	80	34,74	100

Fuente: elaboración propia.

Durante las pruebas se observó que el tiempo de estabilización del aerogenerador es de aproximadamente 4 minutos. En la Figura N° 13 se puede observar cómo evoluciona la generación de energía, medida a partir del voltaje generador, contra la velocidad media del viento medida durante las pruebas. No se tiene resultados para una velocidad del viento inferior a 1.1 m/s ya que el aerogenerador empieza a rotar de manera constante a partir de esta velocidad.

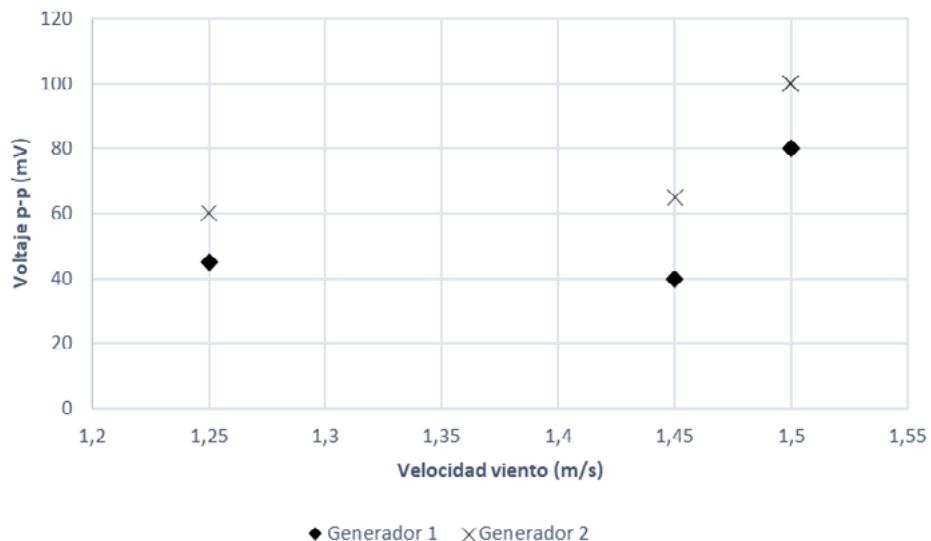


Figura N° 13. Voltaje p-p generador vs Velocidad media del viento. Fuente: elaboración propia

3.4 Discusión

Durante la etapa de pruebas se obtuvieron velocidades de giro para el aerogenerador que superaban lo esperado según las simulaciones.

Puesto que gran parte de la literatura disponible en cuanto a la investigación de aerogeneradores de eje vertical trata no van más allá de las simulaciones y análisis numéricos, no se encontraron proyectos previos en los cuales se evaluará el desempeño del prototipo de un aerogenerador de eje vertical de tipo Banki, independientemente de los parámetros utilizados para el diseño del aerogenerador.

Aunque las velocidades obtenidas superaban lo esperado por las simulaciones, esto todavía no se traduce a una generación óptima de energía. El sistema de generación utilizado, dos generadores acoplados al eje del aerogenerador, aun puede ser optimizado para mejorar la generación de energía. al mismo tiempo también se debe diseñar el sistema por medio del cual la energía generada será rectificada y almacenada en baterías para su utilización.

El trabajo realizado sirve de base para todos los proyectos relacionados que se hagan a futuro, es un punto de partida y comparación que se puede referenciar según las modificaciones que se deseen implementar, ya sea al diseño o al proceso de fabricación. De momento se ha propuesto un prototipo del cuerpo de la turbina Banki y su sujeción para garantizar un movimiento constante y evitar desbalanceo y vibraciones, sin embargo, aún quedan varios componentes por implementar para

tener un sistema de generación de energía completo que nos dé como producto final energía que pueda ser utilizada directamente o almacenada.

4. CONCLUSIONES

Entre las conclusiones del presente trabajo se pueden mencionar:

- Se corroboró la optimización de diseño de un aerogenerador obtenida por un trabajo previo del mismo grupo de investigación (Alave-Vargas *et al.*, 2023). Estos parámetros óptimos de diseño son: $H/D=9/14$, 12 álabes y ángulo de ataque de 11.55° , independientemente del diámetro con el que se trabajó.
- La forma y espesor de las tapas de un aerogenerador, parámetro que no suele ser tomado en cuenta en simulaciones en la literatura, resultó ser una de las variables de mayor influencia en su rendimiento. Se comprobó experimentalmente que trabajar con una tapa más delgada permitió incrementar la velocidad de rotación esperada a través de las simulaciones.
- La etapa de diseño del sistema de sujeción y la construcción del aerogenerador fue un proceso iterativo en el que se tenía que probar de manera experimental el encaje entre la diferentes piezas y la resistencia de estas durante el armado y funcionamiento del aerogenerador. Fue un proceso de aprendizaje, con intentos fallidos y piezas rotas que nos ayudó a llegar al montado final de un aerogenerador funcional.
- Se diseñó, construyó y validó un aerogenerador de eje vertical funcional. Se realizaron pruebas prácticas en un ambiente controlado y se demostró que se puede generar hasta 100 mV a una frecuencia de 33.5 Hz con cada uno de los generadores acoplados.

Se puede considerar el aerogenerador construido como una base sobre la cual se puede modificar los componentes o mecanismos para llegar a un prototipo con mayor rendimiento. Se llegaron a varias conclusiones satisfactorias a lo largo de este proyecto, sin embargo, aún hay aspectos que se pueden seguir desarrollando y mejorando en futuras versiones del aerogenerador, entre ellos estudiar la forma en la que el aerogenerador podría ser integrado al paisaje urbano para una generación energética más eficiente.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo de los docentes de la universidad por ayuda, conocimientos y guía a lo largo de este proyecto, en especial se agradece al ingeniero Omar Castellón-Castellón y a todo el grupo de trabajo de INGESTEC por su apoyo y conocimientos técnicos durante la fabricación del prototipo del aerogenerador, los cuales permitieron obtener el prototipo con el cual se trabajó a lo largo de este proyecto. Este trabajo es solo el primer paso y como en cualquier proyecto investigativo todavía queda un largo camino por recorrer.

6. REFERENCIAS

- Alave-Vargas, E. M., Orellana Lafuente, R., Sempértegui-Tapia, D. F., Alave-Vargas, E. M., Orellana Lafuente, R., & Sempértegui-Tapia, D. F. (2022). ESTADO DEL ARTE SOBRE AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL. *Investigación & Desarrollo*, 22(1), 161-172. <https://doi.org/10.23881/idupbo.022.1-13i>
- Alave-Vargas, E. M., Sempertegui-Tapia, D. F., Villarroel-Beltran, V. R., Orellana Lafuente, R., & Tapia-Siles, C. (2023). Design and Simulation of a Banki Cross-Flow Wind Turbine for Highways Under High Turbulence and High Altitude Conditions. *36th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2023)*, 1588-1599. <https://doi.org/10.52202/069564-0144>
- Al-Maaitah, A. A. (1993). The design of the Banki wind turbine and its testing in real wind conditions. *Renewable Energy*, 3(6), 781-786. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(93\)90085-U](https://doi.org/10.1016/0960-1481(93)90085-U)
- Al-shammari, S., Karamallah, A., & Aljabair, S. (2020). Blade Shape Optimization of Savonius Wind Turbine at Low Wind Energy by Artificial Neural network. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 881, 012154. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/881/1/012154>
- Denoon, R., Cochran, B., Banks, D., & Wood, G. (2008). Harvesting wind power from tall buildings. *Congress Proceeding of CTBUH*.
- Du, L., Ingram, G., & Dominy, R. G. (2019). A review of H-Darrieus wind turbine aerodynamic research. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C*, 233(23-24), 7590-7616. <https://doi.org/10.1177/0954406219885962>
- Http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit.* (s. f.). Recuperado 27 de febrero de 2024, de <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>
- Http://airfoiltools.com/airfoil/naca5digit.* (s. f.). Recuperado 11 de marzo de 2024, de <http://airfoiltools.com/airfoil/naca5digit>
- Liu, K., Yu, M., & Zhu, W. (2019). Enhancing wind energy harvesting performance of vertical axis wind turbines with a new hybrid design: A fluid-structure interaction study. *Renewable Energy*, 140, 912-927. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.120>
- Möllerström, E., Gipe, P., Beurskens, J., & Ottermo, F. (2019). A historical review of vertical axis wind turbines rated 100 kW and above. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.022>
- Moran, M. (2023). Energía. *Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- Muller, G., Jentsch, M., & Stoddart, E. (2009). Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings. *Renewable Energy*, 34, 1407-1412. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.10.008>
- Nations, U. (2020). *El Acuerdo de París | Naciones Unidas*. United Nations; United Nations. <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>

Ponta, F. L., Seminara, J. J., & Otero, A. D. (2007). On the aerodynamics of variable-geometry oval-trajectory Darrieus wind turbines. *Renewable Energy*, 32(1), 35-56. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.12.007>

Pope, K., Rodrigues, V., Doyle, R., Tsopelas, A., Gravelsins, R., Naterer, G. F., & Tsang, E. (2010). Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*, 35(5), 1043-1051. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.10.012>

Qusai, S., Esraa, S., & Aseel, R. (2021). Polycarbonate Bladed Highway Wind Turbine: A Case Study. *2021 12th International Renewable Engineering Conference (IREC)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/IREC51415.2021.9427820>

Sathiyamoorthy, K., Gorli, S. S., Sai, P. K., & Varma, N. N. S. (2021). Numerical analysis of vertical axis wind turbine with the wing profile of NACA0021. *Journal of Physics: Conference Series*, 2054(1), 012088. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2054/1/012088>

Subramanian, A., Yogesh, S. A., Sivanandan, H., Giri, A., Vasudevan, M., Mugundhan, V., & Velamati, R. K. (2017). Effect of airfoil and solidity on performance of small scale vertical axis wind turbine using three dimensional CFD model. *Energy*, 133, 179-190. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.118>

Tian, W., Song, B., & Mao, Z. (2020). Numerical investigation of wind turbines and turbine arrays on highways. *Renewable Energy*, 147, 384-398. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.123>

Artículos de revisión bibliográfica

Energía para usos productivos. ¿Qué sabemos? ¿Y para el caso de las Mypes de Bolivia?

Energy for productive uses. What do we know? And for Bolivia's MSEs?

 Jesica I. Sarmiento^a  M. Eugenia Castelao Caruana^b  Miguel H. Fernández-Fuentes^c

a. Lic. en Economía. Bariloche. Argentina. jesicaisarmiento@gmail.com

b. Dra. en Economía. CONICET – Fundación Bariloche. Bariloche. Argentina.ecastelao@fundacionbariloche.org.ar

c. Ph. D. IMMERSIVE SRL – Univalle. Cochabamba. Bolivia. miguel@immersive-srl.com

RESUMEN

En las últimas décadas, la cobertura eléctrica en América Latina y el Caribe ha alcanzado niveles elevados, aunque persisten desigualdades profundas en áreas rurales, especialmente en términos de acceso, calidad y asequibilidad del suministro de energía. En el marco de la transición energética y del cumplimiento de los ODS, este trabajo indaga sobre las restricciones que enfrentan las unidades productivas para acceder a servicios energéticos y satisfacer sus requerimientos de energía.

Se realizó una revisión teórico-conceptual y un análisis de datos secundarios agregados, a fin de explorar cómo la falta de acceso a energía adecuada limita la productividad, la competitividad y la generación de empleo en estas unidades. Se discute sobre el concepto de vulnerabilidad en el uso productivo de la energía, identificando aquellos factores que refieren a condiciones energéticas inadecuadas que inciden negativamente en la capacidad productiva de las empresas.

En el marco del proyecto GENERIS, se profundizó el análisis del acceso, uso y calidad de los servicios energéticos en unidades productivas rurales de Bolivia, particularmente micro y pequeñas empresas (Mypes). Los hallazgos evidencian que el acceso a energía no es una condición suficiente para el desarrollo productivo, ya que también se requiere de apoyo integral en términos de financiamiento, equipamiento, información y acceso a mercados.

Palabras clave: Micro y pequeñas empresas. Usos productivos de la energía. Vulnerabilidad energética.

ABSTRACT

In recent decades, electricity coverage in Latin America and the Caribbean has improved significantly. However, deep inequalities still exist in rural areas, particularly concerning access to, quality of, and affordability of energy supply. In the context of the energy transition and the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs), this paper examines the challenges that productive units face in accessing energy services and fulfilling their energy needs. A



'Esta investigación fue financiada por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC) en el marco del proyecto Generis Bolivia. Sin embargo, las opiniones expresadas en este artículo son exclusivamente de los autores y no reflejan necesariamente la posición del IDRC.'

theoretical-conceptual review and analysis of aggregated secondary data were conducted to understand how inadequate access to energy hampers productivity, competitiveness, and job creation within these units. The paper discusses the concept of vulnerability in the productive use of energy, highlighting factors related to insufficient energy conditions that adversely affect the productivity of enterprises.

As part of the GENERIS project, an investigation was conducted on the access, use, and quality of energy services in rural productive units in Bolivia, focusing on micro and small enterprises (MSEs). The findings indicate that merely having access to energy is not enough for productive development; comprehensive support is also essential in areas such as financing, equipment, information, and market access.

Keywords: Micro and small enterprises. Productive Uses of Energy. Energy vulnerability.

1. INTRODUCCIÓN

Las metas y estrategias de desarrollo de los países de América Latina y el Caribe se ven condicionadas por los compromisos asumidos en materia de transición energética y los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible). En el marco de la transición energética, se propone modificar la matriz energética primaria para reemplazar los combustibles fósiles por fuentes renovables. Mientras que el ODS 7 busca garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para toda la población. Para ello, es necesario ampliar la disponibilidad de infraestructura que facilite el acceso a energía bajo condiciones de calidad y precio que posibiliten niveles mínimos de consumo, a la vez que se promueva la eficiencia energética y la difusión de tecnologías de generación de energía de fuentes renovables.

En las últimas dos décadas, países de América Latina y el Caribe han implementado programas para extender la cobertura de conexión eléctrica a viviendas en zonas rurales, mediante la extensión de la red eléctrica o la instalación de sistemas de energía descentralizados. Esto se ve reflejado en altas tasas de conexión a fuentes de energía eléctrica (97%) para dicha región, salvo en Haití donde es apenas del 30% (AIE, IRENA, UNSD, Banco Mundial, OMS, 2023). Estos programas han tenido resultados desparejos y una situación muy dispar desde la calidad de vida como del potencial de desarrollo productivo en los hogares. En algunos casos, las instalaciones realizadas, orientadas a brindar acceso a iluminación, solo dieron solución a una parte mínima del problema de acceso a energía en áreas rurales (Gonza, González, & Duran, 2022). En este sentido, una alta tasa de conexión dice poco sobre la satisfacción de los requerimientos energéticos. Además, las desigualdades en el acceso persisten (ver Figura 1), la falta de acceso a la electricidad en países latinoamericanos se encuentra mayormente en áreas rurales y entre los quintiles de menor ingreso. En el caso particular de Bolivia, aproximadamente medio millón de personas carecen de electricidad y muchos hogares rurales experimentan consumos energéticos bajos que no les permite satisfacer necesidades básicas, debido a situaciones de pobreza y a una limitada calidad del suministro (Sánchez Solis, 2023).

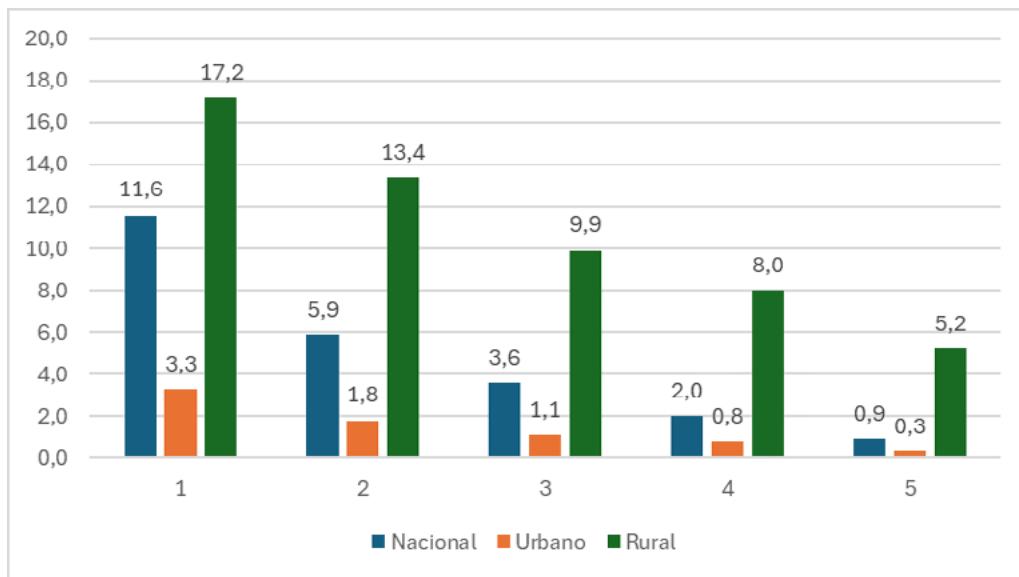


Figura 1. Proporción de la población sin acceso a electricidad, por quintil de ingreso. América Latina-2019. Fuente: CEPAL (2022)

Distintas fuentes de información y artículos académicos han indagado en el tipo y calidad de acceso a los servicios energéticos, las condiciones que restringen su consumo y, que de esta forma, impiden la satisfacción plena de sus necesidades. Estos temas se han abordado principalmente en el ámbito doméstico, bajo la noción de pobreza o vulnerabilidad energética, donde se analizan las causas y consecuencias de este fenómeno que, con sus especificidades, se encuentra presentes tanto en países desarrollados como en desarrollo (Bouzarovski, Petrova, & Tirado-Herrero, 2014). Por otro lado, son escasos los estudios que profundizan en el ámbito productivo, como ser análisis de los factores, internos y externos, que limitan el consumo de energía de las unidades productivas, el tipo y la calidad de acceso a estos servicios, y cómo esto incide en su desempeño económico y en la creación de empleo. Las pruebas sugieren que la energía empleada con usos productivos aumenta la productividad y permite el desarrollo empresarial, contribuyendo en última instancia a mejorar los resultados sociales y económicos de las personas (de Groot, Mohlakoana, Knox, & Bressers, 2017). La vulnerabilidad energética de los usuarios productivos está asociada con cambios repentinos en el precio de la energía, imposibilidad de acceso a fuentes de energía variadas y modernas y, una baja calidad en el suministro de las fuentes de energía esenciales (Cali, Cantore, Iacovone, Pereira-Lopez, & Presidente, 2019; Cali *et al.*, 2023). Sin embargo, algunos estudios profundizan en los requerimientos energéticos efectivos y potenciales de estas unidades económicas, especialmente de las micro y pequeñas empresas y de aquellas ubicadas en zonas rurales (Aliaga, Abastoflor, & Schöder, 2024). Tanto el acceso como la calidad y variedad de la oferta de energía puede afectar el surgimiento de nuevas actividades productivas, pero también el desempeño económico y crecimiento de las existentes. En este sentido, los ODS no solo se centran en una energía asequible para la población en el ámbito doméstico con el acceso a sistemas de cocción, calefacción, iluminación

de escuelas y hospitales, comunicación y acceso a internet, sino también en la necesidad de brindar energía para el uso de máquinas y herramientas de trabajo, cuestiones que repercuten directamente sobre el desarrollo (ODS7).

Atendiendo a las prioridades establecidas en el Plan de Desarrollo Económico y Social (PDES) 2021-2025 de Bolivia, el proyecto de investigación GENERIS¹ busca analizar la integración de Sistemas de Generación de Energía Renovable Distribuidos (SGERD) en Bolivia como parte de su transición energética, enfocándose en la creación de empleos verdes y en la mejora de la competitividad de las micro y pequeñas empresas (Mypes). En esta línea, este trabajo indaga sobre las restricciones que enfrentan las unidades productivas para acceder a servicios energéticos y satisfacer sus requerimientos de energía. Para ello, se propone una revisión teórico conceptual de la literatura sobre el vínculo entre la energía y las unidades productivas. Seguido de ello, se analiza y caracterizan los datos agregados sobre acceso y uso de la energía. Para luego, profundizar en el análisis de la situación de las Mypes en Bolivia y su acceso a fuentes de energía.

2. ENERGÍA Y UNIDADES PRODUCTIVAS: ¿QUÉ DICE LA LITERATURA SOBRE EL TEMA?

La propensión o predisposición de un elemento a verse afectado negativamente por cambios en el tipo y calidad del suministro de energía puede ser entendida como vulnerabilidad energética. Aplicado a los usuarios productivos, la vulnerabilidad energética refiere, entonces, a la exposición a las consecuencias que este cambio pueda tener sobre estos usuarios y su capacidad para hacer frente y adaptarse a los mismo (OLADE, 2023).

En los países de Europa, esta noción ha ganado terreno desde mediados de la década de 2000 para comprender el impacto económico que genera la volatilidad de los precios de la energía, especialmente de la electricidad, en las empresas (Percebois, 2007). En los países en desarrollo, donde las economías son más susceptibles a shocks externos, los estudios sobre vulnerabilidad energética también indagan en la relación entre la volatilidad de los precios de la energía y la competitividad de las firmas. Estos estudios abarcan empresas instaladas en México (Greve, Lay, & Negrete, 2023), Indonesia (Cali *et al.*, 2019; Rentschler, Kornejew, & Bazilian, 2017) e India (Abeberese, 2017; Sadath & Acharya, 2015), que se caracterizan por tener un suministro de energía eléctrica estable. Sus resultados sostienen que la volatilidad de los precios de la energía afecta significativamente a las empresas, especialmente en términos de competitividad y productividad.

Por su parte, Greve *et al.* (2023), destacan que los cambios en los precios de los combustibles tienen un impacto mayor que los cambios en los precios de la electricidad. Los autores coinciden en que la respuesta de las empresas frente a estos cambios son diversas y pueden variar en el tiempo: absorber el costo, sustituir fuentes de energía, o trasladar los costos a los precios de sus productos (Cali *et al.*, 2019). La intensidad de uso de energía, el tamaño de la empresa, la cantidad de empleados, el origen del capital y la estabilidad de la provisión de energía son factores determinantes en el grado y dirección del impacto de los cambios en los precios de la energía (Abeberese, 2017; Cali *et al.*, 2019; Cali *et al.*, 2023; Greve *et*

¹ Proyecto de investigación con soporte-financiamiento- del IDRC (Centro Internacional para el Desarrollo de la Investigación) de la Cooperación Canadiense.

al., 2023; Rentschler *et al.*, 2017; Sadath & Acharya, 2015). El impacto negativo en la productividad es mayor en el corto plazo, pero en el largo plazo puede inducir a las empresas a invertir en eficiencia energética (André, Costa, Demmou, & Franco, 2023). No obstante, las limitaciones de acceso a capital pueden ser un obstáculo importante, especialmente para las pequeñas empresas y aquellas informales (Greve *et al.*, 2023), limitando las posibilidades de invertir en eficiencia energética (André *et al.*, 2023; Hernández-Trillo, Pagán, & Paxton, 2005).

Algunos estudios abordan la incidencia del acceso a energía moderna en la productividad de las Mypes, especialmente informales y ubicadas en áreas rurales, debido al desplazamiento que realizan de combustibles tradicionales (leña) o que requieren mayor esfuerzo en su gestión (kerosene, GLP). Estos estudios coinciden en que el acceso a energía para usos productivos es esencial para que los hogares generen mayores ingresos y, así, reducir la pobreza. Los usos productivos de la energía (PUE-Productive Uses of Energy) son definidos como aquellos que dan lugar a bienes y servicios con un valor de mercado. Si bien la definición incluye tanto la energía eléctrica como la mecánica, la primera es la más desarrollada por la literatura, además se considera que su acceso representa un shock tecnológico que puede mejorar la performance de las empresas (Pueyo & Maestre, 2019). Asimismo, gran parte de los estudios definen el uso productivo de la electricidad como la aplicación de los servicios energéticos de la electricidad a actividades que generan ingresos o mejoran la productividad (Aarakit, Ntayi, Wasswa, Buyinza, & Adaramola, 2024).

El acceso a fuentes de energía puede incrementar las condiciones de trabajo en establecimientos productivos, facilitar acceso a servicios, productos y tecnologías de mejor calidad, resultando en un aumento de la productividad (Freitas, Neves, & de Figueiredo Silva, 2021). Tanto la literatura como los reportes de política suelen indicar que el acceso a energía puede incrementar la producción agrícola. Freitas *et al.* (2021), ponen a prueba y verifican esta hipótesis para el caso de Bolivia, Perú y Colombia, observando que el acceso a energía está asociado a un mayor valor de la producción agrícola para los tres países analizados. Además, demuestran que aquellos establecimientos que acceden a energía presentan un mayor acceso a crédito y mayores extensiones rurales en todos los países analizados. Para Perú y Bolivia, los productores con un mayor nivel educativo eran más propensos a tener acceso a energía que aquellos con menor nivel educativo. Asimismo, unidades productivas de menor tamaño (entre 0,1-5 hectáreas) suelen tener un menor acceso a energía, excepto en Perú.

La literatura aborda múltiples situaciones de acceso a la energía con fines productivos, tales como comunidades pesqueras en Tanzania (Pueyo, Carreras, & Ngoo, 2020), microempresas del sector alimenticio en áreas urbanas y periurbanas (de Groot *et al.*, 2017), proyectos de generación de energía de pequeña escala en el sur global (Terrapon-Pfaff, Gröne, Dienst, & Ortiz, 2018), y la adopción de combustibles modernos en Bolivia (Israel, 2002). Por un lado, estos estudios coinciden en que acceder a energía no es una condición suficiente, sino necesaria, para desarrollar una actividad productiva, ya que son necesarios otros insumos y un apoyo integral que incluya información, capacitación y equipamiento para maximizar los beneficios que pueden surgir del acceso a energía en gran escala. Además, estos análisis ponen en cuestión el tipo y calidad de acceso que reciben estos usuarios, dado que la transformación de bienes puede demandar una intensidad y calidad energética diferente a la que reciben los usuarios residenciales. Servicios

energéticos caros y poco fiables, además de la ausencia de infraestructura, pueden condicionar a los emprendedores a utilizar una gama limitada de fuentes de energía o a alternar entre fuentes de energía o usarlas simultáneamente. En este contexto, el desarrollo de políticas públicas e inversión en infraestructura se vuelven esenciales para facilitar la transición hacia fuentes de energía más limpias (Israel, 2002).

Más allá de los efectos económicos y productivos, el acceso a la energía tiene implicaciones sociales más amplias. Se reconoce que la energía no solo contribuye en términos de ingresos o productividad, sino que también mejora los servicios de salud y educación en áreas rurales, así como la equidad de género y el empoderamiento de las mujeres (Cabraal, Barnes, & Agarwal, 2005). Algunos trabajos adoptan una perspectiva de género en su análisis y sugieren que existen diferencias de género en el acceso y uso de la energía. Las razones se encuentran en que las mujeres poseen menos recursos (educación, tiempo) que los varones para crear emprendimientos y acceder a financiamiento y, así, sacar provecho del acceso a energía (de Groot *et al.*, 2017; Pueyo *et al.*, 2020). Además, algunas normas sociales condicionan su participación en ciertas actividades productivas y la distribución de su tiempo entre las tareas de cuidado y el trabajo remunerado (Israel, 2002; Terrapon-Pfaff *et al.*, 2018). Aun así, algunos autores destacan que las pruebas empíricas que sugieren que el acceso adecuado a energía puede mejorar los emprendimientos liderados por mujeres son aún limitadas (de Groot *et al.*, 2017).

En el marco de una transición energética justa, las necesidades básicas de servicios energéticos de las personas deberían satisfacerse de forma equitativa, al tiempo que se respetan los límites ecológicos. Esto refiere al concepto de suficiencia energética (Sánchez Solis *et al.*, 2022), que inicialmente fue planteado como una estrategia para reducir el consumo de energía en países de altos ingresos. Sin embargo, para el caso del Sur Global, donde hay comunidades que aún no tienen electricidad y, una vez que consiguen acceder a ella, el consumo sigue siendo bajo, el concepto toma otro sentido. La satisfacción de necesidades energéticas varía en función de las condiciones locales y conceptos como salud, vivienda, movilidad y trabajo se están replanteando desde la perspectiva de la «suficiencia» y se están poniendo a prueba en diferentes contextos. Los cálculos de umbrales mínimos de consumo energético se plantean para identificar las necesidades de poblaciones en áreas rurales y así poder guiar en el diseño de políticas para asegurar un acceso a la energía equitativo y sostenible.

En el altiplano boliviano, las familias dependen de una combinación de las fuentes de energía cuya elección depende de diversos factores, como la accesibilidad, el costo y la disponibilidad local (Aliaga *et al.*, 2024). A pesar de los avances tecnológicos en energías renovables y del apoyo gubernamental para el desarrollo energético, la transición hacia fuentes energéticas más sostenibles en esta región ha sido gradual. Esto se debe, en parte, al difícil acceso a las comunidades, los bajos ingresos y el acceso restringido a las tecnologías modernas, así como a estructuras socioeconómicas que favorecen el uso de la biomasa tradicional (Aliaga *et al.*, 2024). Para las áreas rurales de Bolivia, los umbrales de suficiencia energética de electricidad oscilan entre 930 y 1160 kWh anuales por hogar, con variaciones regionales significativas, donde la refrigeración es especialmente crítica. Asimismo, un 57% de los municipios consumen menos de la mitad de los umbrales estimados, observándose una gran brecha energética, cuyos hogares no

logran cubrir sus necesidades básicas de energía (Sánchez Solis, 2023). Kooijman-van Dijk y Clancy (2010) evidencian que los impactos de la electrificación en las comunidades rurales no están relacionados con el uso en las empresas, sino con el uso en los hogares, cuyo impacto se observa en los aspectos no financieros de la pobreza, más que en un aumento de los ingresos. A su vez, en su estudio, observan que las oportunidades del uso de electricidad en empresas bolivianas dependen del acceso a mercados para sus productos y que esto depende en gran medida de la ubicación de la empresa, tanto según el tamaño de la localidad como su ubicación en términos de accesibilidad (rutas/caminos). La relación entre el consumo energético y el bienestar de las comunidades agrícolas subraya la importancia de realizar estudios detallados que analicen el modo en que diferentes fuentes de energía impactan en los costos de producción y, por lo tanto, en la rentabilidad de los cultivos.

En este sentido, la noción de la vulnerabilidad en el uso productivo de la energía refiere a la exposición o sensibilidad de las unidades productivas a condiciones energéticas inadecuadas que limitan su capacidad de operar, las cuales pueden manifestarse de múltiples formas: suministro eléctrico inestable, costos elevados, baja calidad del servicio, escasa variedad de fuentes disponibles o barreras tecnológicas para adoptar soluciones más eficientes. Esta vulnerabilidad implica impactos directos en la producción, los ingresos y el empleo y podría agravarse por factores estructurales como el aislamiento geográfico, la informalidad de las Mypes, el bajo acceso al financiamiento o el limitado conocimiento sobre tecnologías energéticas.

3. METODOLOGÍA

El análisis de los datos agregados se basó en una revisión de la información disponible sobre el acceso y uso de energía a nivel macro, con el objetivo de identificar patrones generales y tendencias comunes entre distintos sectores y regiones, brindando una visión amplia del estado actual de la provisión energética en el ámbito productivo. La revisión incluyó fuentes secundarias, estadísticas oficiales y estudios previos, lo que facilitó una comprensión inicial de las condiciones energéticas que enfrentan los establecimientos productivos.

Además, se analizaron entrevistas no estructuradas realizadas a referentes en el marco del proyecto GENERIS². Dichas entrevistas fueron realizadas con el objeto de identificar las posibilidades de intervención y aplicación de Sistemas de Generación de Energía Renovable Distribuidos (SGERD). Para ello, se indagó sobre aspectos de su proceso productivo y las demandas vinculadas a los servicios energéticos. Toda la información analizada permite conocer las restricciones que enfrentan las unidades productivas bolivianas para acceder a servicios energéticos y satisfacer sus requerimientos de energía. Cabe destacar que, al basarse en casos de estudio en el marco del proyecto, se le da prioridad al conocimiento profundo de los casos y sus particularidades, por sobre la generalización de los resultados. Las entrevistas a referentes se concentraron en el área central del país, en municipios de los departamentos de Cochabamba, La Paz, Santa Cruz y Tarija. Las cadenas productivas que abarcaron son la piscicultura, la transformación industrial de la papa y del orégano, la recolección de frutos del bosque y copoazú y su posterior procesamiento.

² Las entrevistas fueron realizadas por IMMERSIVE SRL – Univalle en el marco del proyecto GENERIS.

4. REVISIÓN Y ANÁLISIS DEL USO PRODUCTIVO DE LA ENERGÍA

4.1 El acceso a la energía en América Latina y el Caribe: datos, fuentes, metodologías

En los países de América Latina y el Caribe el acceso de la población a la electricidad ha crecido sostenidamente en las últimas décadas pasando del 88,7 % en 1992 al 98,6 % en 2022, aún por debajo del acceso universal alcanzado por los países de Europa Central y el Báltico y EE. UU. (AIE, IRENA, UNSD, Banco Mundial, OMS. 2023). Este avance ha sido particularmente sostenido en las últimas dos décadas entre los hogares residentes en áreas rurales, donde la proporción de acceso creció unos 20 puntos porcentuales en promedio (del 72,7 % al 96,2 % entre 2000 y 2022) debido a la implementación de diversos programas nacionales, en algunos casos con financiamiento internacional. Aun así, esta tasa sigue siendo menor que la registrada en zonas urbanas y presenta fuertes variaciones entre los países de la región (Figura 2) y entre los hogares según su nivel de ingreso y origen étnico (CEPAL, 2022). Acompañando esta tendencia, el consumo de electricidad per cápita ha aumentado a una tasa anual promedio de 2% en el periodo 2000-2014 en la región, alcanzando un consumo de electricidad per cápita medio de 2.161 kWh. Este valor varía significativamente entre los países (Figura 3), pero en todos los casos el consumo de energía eléctrica per cápita se encuentra muy por debajo del de América del Norte (13.254 kWh). De la misma forma, el consumo de energía primaria per cápita en América Latina y el Caribe se ha mantenido relativamente bajo (1.362 kep) según los datos del año 2014, especialmente cuando se los compara con el consumo de los países de Asia Oriental y el Pacífico (2.125 kep), la Unión Europea (3.123 kep) y América del Norte (7.055 kep).



Figura 2. Tasa de acceso a electricidad de la población rural (%) en países de América Latina y el Caribe. Año 2000 y 2022. Fuente: Banco Mundial (2024)

De esta forma, aun cuando una mayor proporción de personas están accediendo a la posibilidad de consumir energía eléctrica, de forma on-grid u off-grid³, el consumo de electricidad -y de energía en general- de los hogares y del sector productivo y comercial se encuentra por debajo de los valores de muchos países desarrollados.

Las diferencias de consumo entre países pueden explicarse por su estructura

³ On-grid refiere a que el usuario está conectado a la red eléctrica pública, mientras que cuando su acceso a la energía eléctrica es independiente a la red, se lo llama off-grid.

económica, la composición de su matriz energética, el clima y el tipo y calidad de acceso de los hogares y unidades productivas a servicios energéticos.

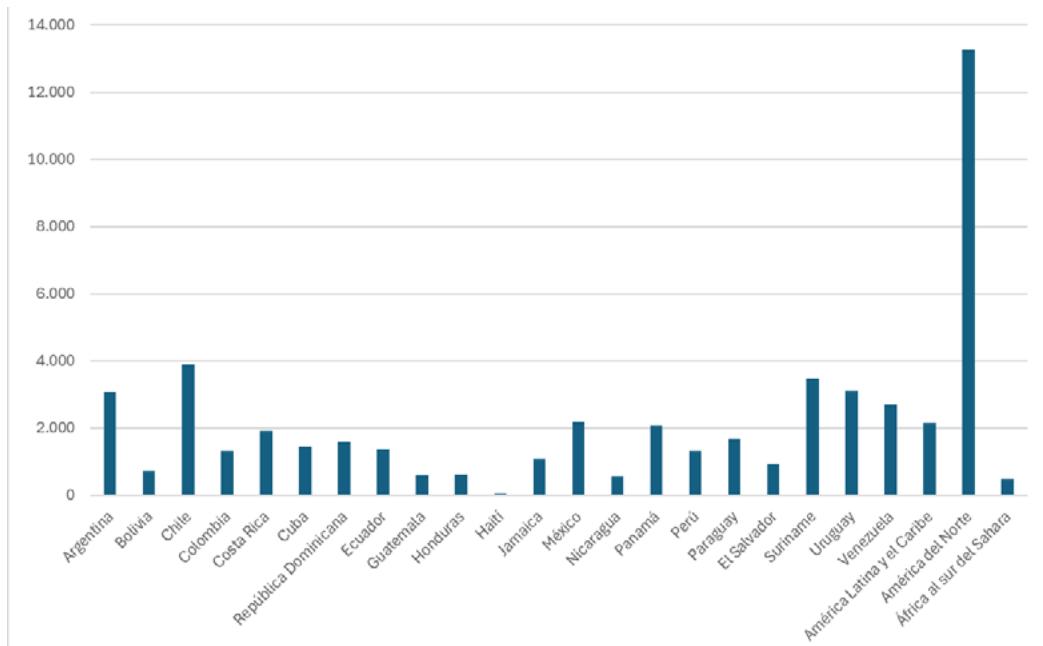


Figura 3. Consumo de energía eléctrica (kWh) per cápita en países de América Latina y el Caribe y en otras regiones. Año 2014. Fuente: Banco Mundial (2024)

Algunas encuestas nacionales, mayormente destinadas a empresas grandes o medianas asentadas en centros urbanos, recaban información sobre el gasto en electricidad, gas natural y otros combustibles y lubricantes en su proceso de producción. Con esta información y el precio de cada energético, es posible estimar el consumo de energía en términos físicos de cada empresa y convertir cada combustible a una unidad equivalente para su comparación. Estas encuestas, entonces, ofrecen información sobre costos de energía para un grupo específico de empresas, pero no indagan en sus consumos, usos o calidad del suministro ni en los requerimientos insatisfechos. Esto dificulta identificar espacios para sustituir fuentes de energía (flexibilidad), mejorar la calidad del servicio o la eficiencia en el uso de la energía.

Otra fuente de información sobre las condiciones de acceso a energía eléctrica de las empresas son World Bank Enterprise Surveys (WBES) y las Informal Sector Enterprise Surveys. Estas son encuestas representativas al nivel de las firmas, realizadas en más de 150 economías, la primera se centra en firmas formales con 5 o más trabajadores, que tienen como mínimo 1% de propiedad privada, y se dedican a actividades industriales y comerciales. Mientras que la segunda se aboca al estudio de las empresas informales en áreas urbanas y, hasta el momento, se ha realizado en 14 ciudades, entre ellas Lima y Trujillo en Perú (únicas por el momento

en la región de América Latina y el Caribe) (World Bank, 2023). Como parte de la infraestructura que condiciona la actividad de las firmas, estas encuestas indagan en la calidad del suministro de la red eléctrica, consultando sobre la existencia de cortes en el suministro de electricidad, su frecuencia, duración, las pérdidas que esto genera, el uso de generadores individuales y las restricciones que representa la electricidad. Si bien estas encuestas se realizan con cierta periodicidad, en algunos países como Brasil la última encuesta realizada se remonta al año 2009, lo que pueda condicionar la comparación entre países además de la vigencia de los datos. Con estas restricciones, los datos muestran que la calidad de acceso a electricidad es un desafío global, aunque heterogéneo en su intensidad, ya que si bien en todas las regiones las empresas experimentan cortes de electricidad -en la región de Oriente Medio y el Norte de África esto afecta al 26% mientras que en la región del África Subsahariana al 72%- lo hacen con distinta frecuencia y duración. En América Latina y el Caribe, los cortes afectan a un gran porcentaje de las firmas encuestadas, pero su frecuencia mensual y duración son relativamente bajas comparadas -1,6 veces y 0,3 horas, respectivamente- con estas regiones e incluso con la región de Asia oriental y el Pacífico.

Un esbozo de las consecuencias de las fallas en la calidad del servicio eléctrico son también recopiladas en estas encuestas que muestran que existe una correlación positiva significativa entre el porcentaje de empresas que experimentan cortes de electricidad y aquellas que poseen o comparten un generador (26,5%) y que identifican la electricidad como una limitación importante o muy grave (34%).

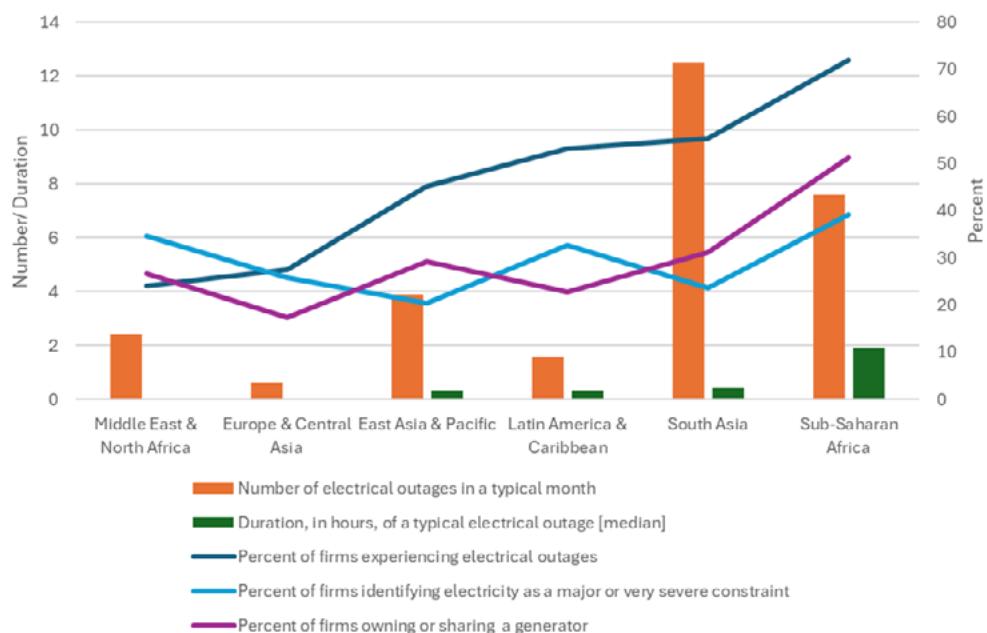


Figura 4. Calidad del suministro de energía eléctrica por regiones. Fuente: World Bank Enterprise Surveys, www.enterprisesurveys.org

Por su parte, los balances de energía útil son un método de análisis más integral de los sectores que demandan energía, ya que ofrece información sobre los usos y tipo de energéticos utilizados por cada sector de actividad, considerando el rendimiento de las tecnologías utilizadas durante su consumo (Secretaría de Energía, 2024). De esta forma, el balance de energía útil permite conocer los requerimientos energéticos y la eficiencia en cada etapa de las cadenas de abastecimiento, así como las posibilidades de sustitución de fuentes y tecnologías, con base en parámetros como eficiencia en la disposición de recursos, rendimientos, factores de emisión de contaminantes, etc. (OLADE-BID, 2017). El Balance de Energía Útil de Argentina, por ejemplo, muestra que en la cría de bovinos algunas unidades productivas utilizan motores a gasoil para el abastecimiento de agua en los feedlots⁴ y en la producción de frutales utilizan gasoil y otros materiales (caucho, fueloil, residuos de madera, etc.) para el control de heladas y para el riego por goteo, aspersión o microaspersión (Secretaría de Energía, 2024). Esto, en principio, plantea espacios de oportunidad para la incorporación de sistemas renovables de energía descentralizada que reemplacen el uso de combustibles líquidos y, posiblemente, disminuya el costo de producción. Los Balances de Energía Útil de Panamá y Paraguay, por otra parte, muestran que es en los usos calóricos donde se presenta una mayor competencia entre las fuentes: en vapor la principal competencia está entre el fueloil, la leña y el diésel, y en calor directo a las fuentes anteriores se le agregan el gas licuado y la electricidad. No obstante, la biomasa residual es una fuente de energía de difícil sustitución porque es un subproducto del proceso productivo y, por tanto, su costo es relativamente bajo comparado a otros energéticos (IDEE/FB, 2023a, 2023b).

De esta forma, el Balance de Energía Útil es una herramienta clave para el diseño de políticas públicas que mejoren la eficiencia energética, impulsen la transición energética y alineen el consumo de energía con las proyecciones de crecimiento y desarrollo del sector productivo y el bienestar de la población en general. Además, brinda información a nivel sectorial sobre el grado de dependencia de fuentes de energía costosas o con precios volátiles, la flexibilidad de los sectores en la sustitución de energéticos, y la eficiencia de la tecnología utilizada en los procesos. En la región, este tipo de análisis ha sido aplicado, con diferentes metodologías y alcances, en Argentina, Brasil, Panamá, Paraguay, República Dominicana, y Uruguay (Secretaría de Energía, 2024; IDEE/FB, 2023a, 2023b). Si bien esta metodología permite identificar patrones de consumo que podrían dar lugar a mejoras, los problemas de entorno que condicionan el acceso y los requerimientos energéticos potenciales que no logran ser satisfechos son captados de mejor forma por encuestas nacionales a nivel de las firmas que incluyan a empresas de todos los tamaños y áreas geográficas.

4.2. Análisis del acceso y uso de la energía en las Mypes rurales bolivianas

Del análisis de las entrevistas, se observa que las unidades productivas emplean diversas fuentes de energía para sus actividades productivas: energía eléctrica, combustibles y gas natural de red o GLP. Cabe destacar que, si bien las unidades productivas tienen acceso a la energía, principalmente a la energía eléctrica, Bolivia vive un panorama de restricciones de combustibles (gasolina y diésel) debido a la dependencia de las importaciones de combustible para satisfacer su demanda interna. Esto ha llevado a una crisis de abastecimiento, que afecta diversos sectores productivos y de transporte. Las restricciones de acceso influyen

4 Los feedlots es un sistema intensivo de producción de carne, conocido también como engorde a corral.

fuertemente, sobre todo en la compra a granel del combustible, un detalle adicional es que la gasolina se la considera precursor para el narcotráfico, y en la región del Chapare, esto implica controles adicionales a los compradores de combustibles (Di Sbroiavacca & Sagardoy, 2025; Castelao Caruana, 2025). Para el caso de los establecimientos piscícolas las principales dificultades de acceso a la energía refieren al abastecimiento de combustible utilizado en el proceso de oxigenación de las piscinas.

Los costos de la energía son una preocupación transversal para los productores rurales. Para los productores piscícolas, cuando el consumo de combustible excede el cupo oficial o hay escasez, los productores compran gasolina a revendedores a casi 3 veces su valor. Esto representa un mayor costo y tiempo destinado a la obtención del combustible, que utilizan para la oxigenación de las piscinas. Esto ha llevado a algunos productores a oxigenar con aireadores eléctricos, pero los altos costos de la energía eléctrica persisten, incluso llevándolos a desistir con esa alternativa. Para productores de alimentos perecederos, la refrigeración es fundamental para poder comercializar el producto durante todo el año. En el caso del copuazú, la cosecha se realiza durante los meses de febrero a marzo, luego se realiza el despulpado y la refrigeración. Sin embargo, la cantidad de refrigeradores que poseen las Mypes se ve condicionada por los altos costos de la electricidad, limitando la capacidad de almacenamiento refrigerado. Esto lleva la venta del producto a un menor valor sobre todo durante la temporada alta de producción de la fruta. Lo mismo sucede en el caso de la producción de pulpas de frutas propias del bosque Chiquitano, donde los altos costos en la energía eléctrica encarecen el proceso productivo. En los casos relevados se observa que un menor costo energético permitiría aumentar la competitividad de las Mypes.

A pesar de los avances en electrificación rural, en Bolivia persisten importantes desafíos en la calidad y confiabilidad del servicio, como ser cortes frecuentes, baja tensión, o la falta de mantenimiento. Este problema es particularmente crítico en sectores donde los procesos productivos son sensibles a interrupciones, obligando en muchos casos al uso de soluciones costosas y menos eficientes. Si bien este aspecto no surgió en los casos bajo estudio, la disponibilidad y calidad de la energía está directamente relacionada con la capacidad de las Pymes para acceder a mercados formales. Por ejemplo, en el caso del orégano, la falta de electrificación adecuada limita el secado y procesamiento, afectando la calidad del producto final. En cuanto a la eficiencia en el uso de la energía, se observa que algunos productores han optado por la instalación de maquinaria moderna, principalmente eléctrica. En Yaco, los productores de papa instalaron una freidora eléctrica que les permitió mejorar el proceso productivo y superar los problemas de abastecimiento de GLP. Asimismo, persisten actividades que emplean combustibles fósiles, como en el caso de las pisciculturas con las motobombas para oxigenación, o se realizan de manera manual, lo cual implica procesos más lentos y menos estandarizados. Los productores expresaron su interés en adquirir maquinaria para mejorar sus procesos productivos, pero representa una inversión muy grande que, no están en condiciones de realizar por el momento.

Cabe destacar el rol de las asociaciones de productores en la gestión de proyectos de energía, capacitación y acceso al financiamiento. En sectores como la piscicultura, las asociaciones han facilitado la instalación de sistemas solares fotovoltaicos y han canalizado el apoyo de ONGs y programas estatales.

5. CONCLUSIONES

Los datos agregados disponibles sobre acceso a energía evidencian avances importantes en términos de cobertura eléctrica general, con una tasa de electrificación elevada para algunos países de América Latina y el Caribe. Sin embargo, esta cifra oculta importantes desigualdades territoriales, económicas y funcionales. En las zonas rurales, persiste una brecha significativa en cuanto a la calidad del suministro, la variedad de fuentes energéticas disponibles y el nivel de consumo efectivo. La revisión de literatura sobre energía y unidades productivas permite dar cuenta de la variedad de aristas que toma en cuenta esta temática. Existen diversas herramientas analíticas que permiten relevar la relación entre consumo energético y eficiencia en los distintos sectores económicos, aunque no siempre están disponibles o desarrolladas en todos los países de América Latina. En el caso boliviano, esta carencia limita la posibilidad de identificar con precisión las brechas de energía útil disponibles para las unidades productivas rurales. Asimismo, restringe la capacidad de orientar políticas energéticas hacia soluciones más adecuadas a las necesidades de las MYPEs rurales, integrando criterios de suficiencia, calidad y eficiencia energética.

A partir del trabajo de campo desarrollado en el marco del proyecto GENERIS, se identificaron diversas restricciones que afectan el acceso y uso de energía por parte de las Mypes de Bolivia. La evidencia recopilada refuerza la necesidad de considerar la vulnerabilidad en el uso de productivo de la energía, no solo desde un enfoque de cobertura, sino también desde una perspectiva de calidad, estabilidad y suficiencia energética adaptada a los requerimientos productivos de las unidades productivas. En Bolivia, el acceso efectivo a energía para usos productivos constituye un factor habilitante del desarrollo económico rural, que impactan en las posibilidades de industrialización a pequeña escala y la generación de empleo de calidad. Para que los Sistemas de Generación de Energía Renovable Distribuidos (SGERD) sean una solución viable y justa, deberán ser parte de una estrategia integral de desarrollo productivo, capaz de articular políticas energéticas, de fomento económico y de inclusión social.

6. REFERENCIAS

- Aarakit, S. M., Ntayi, J. M., Wasswa, F., Buyinza, F., & Adaramola, M. S. (2024). Conceptualization and antecedents of productive use of electricity: A systematic literature review. *Cleaner Engineering and Technology*, 100747.
- Abeberese, A. B. (2017). Electricity cost and firm performance: Evidence from India. *Review of Economics and Statistics*, 99(5), 839-852.
- Aliaga, J., Abastoflor, M. C. L., & Schöder, L. (2024). Patrones de consumo energético en productores de quinua del altiplano sur de Bolivia. *Development Research Working Paper Series.*, (No. 12/2024).
- André, C., Costa, H., Demmou, L., & Franco, G. (2023). Rising energy prices and productivity: short-run pain, long-term gain? *Documents de travail du Département des Affaires économiques de l'OCDE*(No. 1755).
- Bouzarovski, S., Petrova, S., & Tirado-Herrero, S. (2014). From Fuel Poverty to Energy Vulnerability: The Importance of Services, Needs and Practices.

Cabraal, R. A., Barnes, D. F., & Agarwal, S. G. (2005). Productive uses of energy for rural development. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 30(1), 117-144.

Castelao Caruana, M. E. (2025). Desafíos para el uso productivo de la energía en zonas rurales. GENERIS. San Carlos de Bariloche, Argentina: Fundación Bariloche.

Cali, M., Cantore, N., Iacovone, L., Pereira-Lopez, M., & Presidente, G. (2019). Too Much Energy: The Perverse Effect of Low Fuel Prices on Firms. In *Policy Research Working Paper 9039*. World Bank.

Cali, M., Cantore, N., Marin, G., Mazzanti, M., Nicolli, F., & Presidente, G. (2023). Energy prices and the economic performance of firms in emerging countries. *Structural Change and Economic Dynamics*, 66, 357-366.

CEPAL. (2022). La energía en América Latina y el Caribe: acceso, renovabilidad y eficiencia. In *Temas estadísticos de la CEPAL N° 5 - Mayo de 2022*. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/44c0de08-d80a-44ed-9925-1bacb187501a/content>.

de Groot, J., Mohlakoana, N., Knox, A., & Bressers, H. (2017). Fuelling women's empowerment? An exploration of the linkages between gender, entrepreneurship and access to energy in the informal food sector. *Energy Research & Social Science*, 28, 86-97.

Di Sbroiavacca, N., & Sagardoy, I. (2025). Situación Energética en Bolivia. GENERIS. San Carlos de Bariloche, Argentina: Fundación Bariloche.

Freitas, C. O., Neves, M. C., & de Figueiredo Silva, F. (2021). Agricultural Production and Access to Energy in Bolivia, Peru, and Colombia. IDB Technical Note 2217.

Gonza, C. N., González, F. D. F., & Duran, P. A. (2022). Hábitat, Pobreza Energética y Mujeres Indígenas en el noroeste argentino: una propuesta interseccional para comunidades en zonas rurales aisladas del chaco salteño. *Hábitat y Sociedad* (15), 183-209.

Greve, H., Lay, J., & Negrete, A. (2023). How vulnerable are small firms to energy price increases? Evidence from Mexico. *Environment and Development Economics*, 28(1), 89-109.

Hernández-Trillo, F., Pagán, J. A., & Paxton, J. (2005). Start-up capital, microenterprises and technical efficiency in Mexico. *Review of Development Economics*, 9(3), 434-447.

IDEE/FB. (2023a). Balance Nacional de Energía Útil de Panamá 2021. OLADE.

IDEE/FB. (2023b). Balance Nacional de Energía Útil de Paraguay 2021. OLADE.

Israel, D. (2002). Fuel choice in developing countries: evidence from Bolivia. *Economic Development and cultural change*, 50(4), 865-890.

Kooijman-van Dijk, A. L., & Clancy, J. (2010). Impacts of electricity access to rural enterprises in Bolivia, Tanzania and Vietnam. *Energy for Sustainable Development*, 14(1), 14-21.

- OLADE-BID. (2017). *Manual de Balances Energía Útil 2017*. Ecuador. OLADE.
- OLADE. (2023). Vulnerabilidad y riesgo de los sistemas energéticos de América Latina y el Caribe ante las amenazas del cambio climático. Disponible en: www.olade.org/wp-content/uploads/2024/06/ARTICULO-SOBRE-EL-INFORME-FINAL-DEL-PROYECTO-SCREEN-ALC.pdf.
- Percebois, J. (2007). Energy vulnerability and its management. *International Journal of Energy Sector Management*, 1(1), 51-62.
- Pueyo, A., Carreras, M., & Ngoo, G. (2020). Exploring the linkages between energy, gender, and enterprise: evidence from Tanzania. *World Development*, 128, 104840.
- Pueyo, A., & Maestre, M. (2019). Linking energy access, gender and poverty: A review of the literature on productive uses of energy. *Energy Research & Social Science*, 53, 170-181.
- Rentschler, J., Kornejew, M., & Bazilian, M. (2017). Fossil fuel subsidy reforms and their impacts on firms. *Energy Policy*, 108, 617-623.
- Sadath, A. C., & Acharya, R. H. (2015). Effects of energy price rise on investment: Firm level evidence from Indian manufacturing sector. *Energy Economics*, 49, 516-522.
- Sánchez Solis, C. (2023). Más allá del Acceso a la Energía: Explorando la Suficienciapara una Transición Energética Justa en Bolivia. Cochabamba: Modelos para la Planificación Energética en Bolivia.
- Sánchez Solis, C. L., Di Betta, P., Andersen, L., Guzman, G., Quoilin, S., & Balderrama Subieta, S. L. (2022). *The Energy Sufficiency Concept and Its Impact on Energy Demand Estimation in Rural Communities from Developing Countries*. Paper presented at the 3rd Latin American Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems.
- Secretaría de Energía (2024). *Balance de Energía Útil Argentina 2022*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Secretaría de Energía.
- Terrapon-Pfaff, J., Gröne, M.-C., Dienst, C., & Ortiz, W. (2018). Productive use of energy—Pathway to development? Reviewing the outcomes and impacts of small-scale energy projects in the global south. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 198-209.
- World Bank (2023). Enterprise Survey Manual and Guide. World Bank. Disponible en: https://www.worldbank.org/content/dam/enterprisesurveys/documents/methodology/Enterprise%20Surveys_Manual%20and%20Guide.pdf

Artículos de revisión bibliográfica

Transición Energética Y Desarrollo Productivo En Bolivia:

Viabilidad Tecno-Económica de Sistemas Híbridos Solar-Biogás en el Sector Productivo

Energy Transition and Productive Development in Bolivia:

Techno-Economic Feasibility of Solar-Biogas Hybrid Systems in the Productive Sector

 J. Villarroel-Schneider¹

¹Investigador. Centro Universitario de Investigaciones en Energías – CUIE, Universidad Mayor de San Simón – UMSS.
Cochabamba. Bolivia. jh.villarroel@umss.edu

RESUMEN

Bolivia se encuentra en una encrucijada energética y de desarrollo. Con variados recursos renovables, especialmente solares y de biomasa, el país tiene la oportunidad de transformar su matriz energética, actualmente dependiente de combustibles fósiles, hacia un modelo más sostenible, resiliente e inclusivo. Esta transición no es solamente una necesidad ambiental global, sino una palanca estratégica para dinamizar el desarrollo productivo nacional, particularmente en el sector agropecuario, que es clave para la economía y el sustento de gran parte de la población. Este artículo analiza en profundidad las sinergias potenciales entre la adopción de energías renovables distribuidas, como la solar fotovoltaica y el biogás a partir de residuos orgánicos, y el fortalecimiento de las capacidades productivas locales. Se examinan las oportunidades para mejorar la eficiencia, la competitividad y la sostenibilidad de las unidades productivas, tomando como caso de estudio las granjas lecheras a través de la evaluación de la viabilidad técnica y económica de los sistemas híbridos solar-biogás y poligeneración. Asimismo, se identifican y discuten las barreras técnicas, financieras y regulatorias que obstaculizan su implementación. Los resultados confirman la superioridad económica y ambiental de estas soluciones. Se concluye que la superación de las barreras financieras y regulatorias existentes es imperativa y debe abordarse con un enfoque socio-técnico, participativo y adaptado al contexto boliviano para que la Transición Energética impulse un verdadero Desarrollo Productivo Sostenible.

Citar como: Villarroel-Schneider, J. Transición energética y desarrollo productivo en Bolivia: viabilidad tecno-económica de sistemas híbridos solar-biogás en el sector productivo. *Revista Journal Boliviano De Ciencias*, 21(58) 75-87 <https://doi.org/10.52428/20758944.v21i58.1386>

Recepción: 16/07/2025

Aceptado: 7/11/2025

Publicado: 30/12/2025

Declaración: Derechos de autor 2025 Villarroel-Schneider, J. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](#).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



Palabras clave: Transición Energética. Desarrollo Productivo. Energías Renovables. Bolivia. Desarrollo Sostenible.

ABSTRACT

Bolivia is at a crucial turning point regarding its energy use and development. With varied renewable resources, especially solar and biomass, the country has the opportunity to transform its energy matrix—currently dependent on fossil fuels—towards a more sustainable, resilient, and inclusive model. This transition is not only a global environmental necessity but a strategic lever to boost national productive development, particularly in the agricultural sector,

which is key to the economy and the livelihood of a large part of the population. This article provides an in-depth analysis of the potential synergies between the adoption of distributed renewable energy, such as solar photovoltaic and biogas from organic waste, and the strengthening of local productive capacities. It examines the opportunities to improve the efficiency, competitiveness, and sustainability of productive units, taking dairy farms as a case study through the evaluation of the technical and economic viability of solar-biogas hybrid and polygeneration systems. Furthermore, it identifies and discusses the technical, financial, and regulatory barriers that hinder their implementation. The results confirm the economic and environmental superiority of these solutions. It concludes that overcoming the existing financial and regulatory barriers is imperative and must be addressed with a socio-technical, participatory approach adapted to the Bolivian context so that the Energy Transition drives true Sustainable Productive Development.

Keywords: Energy Transition. Productive Development. Renewable Energies. Bolivia. Sustainable Development.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 La Encrucijada Boliviana en el Contexto de la Transición Energética Global

El desafío global de la Transición Energética (TE), impulsado por la urgencia de mitigar el cambio climático y cumplir los objetivos del Acuerdo de París, hace necesario redefinir las políticas y las estrategias de desarrollo de las regiones y países de todo el mundo. Para países en desarrollo como Bolivia, la TE no puede ser vista únicamente como una responsabilidad ambiental; sino también como una ventana de oportunidad estratégica para reconfigurar el modelo de desarrollo, históricamente dependiente de los hidrocarburos, hacia uno basado en los abundantes recursos renovables que Bolivia posee (Jimenez Zabalaga *et al.*, 2025; IEA, 2023).

La posición de Bolivia es paradójica, su matriz energética histórica se ha basado en el gas natural, que ha generado una dependencia significativa y subsidios internos que distorsionan el mercado energético nacional. La generación eléctrica se basa predominantemente en gas natural, con una participación que oscila entre el 60% y el 70%. Esta dependencia crea una vulnerabilidad sistémica, principalmente por el agotamiento de las reservas probadas. Frente a esto, Bolivia es un gigante dormido en recursos renovables. La radiación solar media global horizontal (GHI) en el Altiplano boliviano se encuentra entre las más altas del planeta, superando consistentemente los 6 kWh/m²/día. Bolivia también tiene una significativa disponibilidad de biomasa proveniente de las regiones tropicales, su sector agropecuario y residuos urbanos (Morato *et al.*, 2020) mientras que la biomasa residual, proveniente del sector agropecuario, es un recurso energético subutilizado (PNUD, 2021; Jimenez Zabalaga *et al.*, 2025). Por otra parte, la gestión inadecuada de los residuos orgánicos, como el estiércol generado por la ganadería no solo provoca contaminación, sino que es una fuente importante de emisiones de metano (CH₄), un gas de efecto invernadero (GEI) con un potencial de calentamiento global 28 veces superior al CO₂ a un horizonte de 100 años (IPCC, 2021). La TE, por tanto, emerge como una necesidad estratégica para la seguridad energética futura

que priorice los aspectos medioambientales mientras se impulsa un Desarrollo Productivo (DP) más robusto, sostenible y descentralizado.

1.2 Articulación Estratégica: Transición Energética como Palanca del Desarrollo Productivo

El concepto de Desarrollo Productivo (DP), en el marco de la TE, no sólo promueve crecimiento económico implica también fortalecer las capacidades productivas locales, mejorar la competitividad y promover la inclusión social y económica. La electrificación rural y el acceso a energía limpia y asequible (ODS 7) son precursores directos del DP (Terrapon-Pfaff *et al.*, 2018). En este contexto, el sector agropecuario, pilar fundamental de la economía boliviana y fuente de sustento para una gran parte de la población rural, se presenta como un ámbito prioritario donde la sinergia entre energía renovable y DP puede ser particularmente transformadora.

Por otra parte, varias actividades productivas generan residuos orgánicos (estiércol, residuos de cosecha), cuyo manejo adecuado mediante la digestión anaeróbica para producir biogás ofrece, no solo una fuente de energía limpia y versátil, sino que también soluciona problemas ambientales y sanitarios locales (Villarroel-Schneider *et al.*, 2020). Combinado con la energía Solar Fotovoltaica (PV), el biogás puede permitir la implementación de soluciones energéticas hibridas y de poligeneración que satisfagan múltiples necesidades energéticas (electricidad, calor, y frío), además de biofertilizantes en las mismas unidades productivas, incrementando su autosuficiencia y resiliencia mientras se promueve un ecosistema basado en la economía circular (Villarroel-Schneider *et al.*, 2019; Villarroel-Schneider *et al.*, 2023).

1.3 El Potencial del Biogás y la Energía Solar en el Sector Productivo

Dentro del abanico de energías renovables, el biogás y la energía solar destacan por su aplicabilidad descentralizada y su sinergia directa con las actividades productivas, especialmente en el ámbito rural, agropecuario y agroindustrial.

Biogás, del residuo al recurso energético:

El sector agropecuario boliviano, particularmente la ganadería lechera y de engorde, así como la avicultura y porcicultura, son fuentes concentradas de residuos orgánicos. Como presenta Villarroel-Schneider *et al.* (2020) en su estudio de caso para granjas lecheras bolivianas, el estiércol generado representa no solo un problema de gestión ambiental (contaminación, olores, vectores de enfermedades, emisiones de metano), sino una materia prima valiosa para la producción de biogás mediante el uso de digestores anaeróbicos. El proceso es relativamente simple: en ausencia de oxígeno se descompone la materia orgánica, produciendo una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono) denominada biogás, además de un efluente semi líquido llamado digestato o biol.

Usos del Biogás: El biogás puede ser purificado (eliminando dióxido de carbono, azufre y otras impurezas) para obtener biometano, con calidad similar al gas natural, utilizable en vehículos o injectable a la red de gas natural convencional. Sin embargo, su uso más directo y común en entornos productivos puede ser para:

- Cocción y Calefacción: Reemplazando leña (reduciendo deforestación y contaminación intradomiciliaria) o GLP (generando ahorros económicos).
- Generación Eléctrica: Mediante motores de combustión interna o microturbinas. Esto es vital en zonas sin red eléctrica o con suministro inestable.
- Cogeneración (CHP - Combined Heat and Power): Aprovechando los gases de combustión del generador eléctrico basado en biogás para procesos que requieren calor (agua caliente, calefacción de instalaciones, secado de productos, etc.).
- Trigeneración (CCHP - Combined Cooling, Heat and Power): Añadiendo al CHP un sistema de refrigeración por absorción que utiliza el calor recuperado para producir frío, esencial para la conservación de productos y alimentos como leche, frutas, carnes procesadas, etc. (Villarroel-Schneider et al., 2019).

Beneficios del Digestato o Biol: El Biol es un fertilizante orgánico rico en nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio) y materia orgánica estabilizada. Su aplicación mejora la estructura del suelo, reduce la necesidad de fertilizantes sintéticos (costosos y con alta huella de carbono) y cierra el ciclo de nutrientes en las plantaciones (Villarroel-Schneider, 2023).

Escalabilidad: Los sistemas de biogás son escalables, desde pequeños biodigestores familiares hasta plantas comunitarias o industriales que procesan residuos orgánicos de múltiples fuentes.

Energía Solar Fotovoltaica (PV):

Electricidad Limpia y Descentralizada: La abundancia de sol en Bolivia hace de la energía solar fotovoltaica PV una opción atractiva y cada vez más competitiva económicamente.

Aplicaciones Productivas: La electricidad generada con el sol puede alimentar directamente:

Bombas de agua para riego o suministro de agua para el ganado.

Sistemas de iluminación para extender jornadas laborales o mejorar seguridad.

Equipos de procesamiento (ordeñadoras, molinos, peladoras, secadoras, etc.).

Sistemas de refrigeración (complementarios o alternativos que contribuyan a la reducción del consumo de energía).

Equipos de comunicación, monitoreo y gestión.

Modalidades: Puede implementarse como sistemas aislados o desconectados de la red (*off-grid*) en zonas remotas, sistemas conectados a la red (*on-grid*) con posibilidad de vender excedentes (si la regulación lo permite), o sistemas híbridos en combinación con otras fuentes de energía.

Hibridación Solar-Biogás: La combinación de energía solar PV y sistemas de biogás (especialmente con generación eléctrica) es particularmente interesante. La energía solar es intermitente (depende del sol), mientras que el biogás puede almacenarse y usarse para generar energía de forma continua o bajo demanda, proveyendo una fuente de energía más estable y confiable (Wegener et al., 2021). Villarroel-Schneider et al. (2023) demostraron mediante un modelo de

optimización tecno-económica para una asociación de lecheros en Bolivia que un sistema híbrido solar-biogás puede ser una solución óptima para cubrir las demandas energéticas (electricidad, calor, frío) de forma más rentable y sostenible que soluciones basadas únicamente en una fuente o en la red convencional (cuando está disponible y considerando costos reales).

El contexto presentado previamente y el panorama particular de Bolivia da lugar a esta pregunta de investigación: ¿Cómo puede la adopción de sistemas de energía renovable distribuida, específicamente la hibridación solar fotovoltaica y biogás a partir de residuos orgánicos, permitir el Desarrollo Productivo Sostenible en el sector agropecuario boliviano, demostrando su viabilidad técnica y económica frente a las fuentes convencionales?

Para responder a la pregunta planteada este artículo pretende analizar la interrelación entre la Transición Energética y el Desarrollo Productivo, presentando una metodología de evaluación de la viabilidad técnica y económica de sistemas híbridos de energía solar fotovoltaica y biogás aplicados al sector agropecuario, e identificando las barreras y las estrategias de política pública necesarias para su implementación a escala en Bolivia.

2. ANÁLISIS Y REFLEXIÓN

2.1 Metodología de Evaluación: El Enfoque Técnico-Estratégico y Socio-Técnico

El presente estudio plantea un enfoque de análisis técnico-estratégico, combinando la revisión del contexto energético y regulatorio nacional con la aplicación de modelos de evaluación de ingeniería y economía. Este enfoque permite ir más allá del análisis descriptivo, proporcionando evidencia cuantitativa sobre la competitividad y viabilidad de las soluciones renovables. El marco conceptual para este análisis también reconoce la naturaleza socio-técnica del cambio, ya que la implementación no solo es tecnológica; requiere cambios en las prácticas de gestión de residuos, una fuerte organización comunitaria cuando corresponda, acceso a financiamiento y un capital humano capacitado (Villarroel-Schneider, 2023).

2.2 Modelado y Optimización Tecno-Económica de las Soluciones Energéticas

El análisis integral requerido para la implementación de las soluciones energéticas propuestas tiene como pilar fundamental la aplicación de un modelo de optimización tecno-económica. La función objetivo de este modelo es minimizar el Valor Presente Neto de los costos de inversión, operación y mantenimiento de las soluciones, considerando el volumen de los servicios energéticos a ser provistos durante la vida útil del sistema. También se toma en cuenta, en una base horaria, la disponibilidad de los recursos energéticos, las demandas energéticas, la operación y la interconexión de diversas tecnologías para reducir el costo final de los servicios demandados, manteniendo la fiabilidad y continuidad del suministro de los mismos (Villarroel-Schneider *et al.*, 2023). Cabe mencionar que estas soluciones son replicables para diferentes sectores productivos siendo, en este artículo, el sector de las granjas lecheras el caso de estudio seleccionado del cual se describe a continuación las principales características y conceptos a tomar en cuenta:

- Sistema Modelado (Caso de Estudio): Una planta de Poligeneración/Trigeneración (CCHP) diseñada para atender la demanda de una asociación de productores lecheros en Bolivia central. Se consideraron demandas de Electricidad, Calor (agua caliente para fines sanitarios) y Frío (refrigeración para la conservación de la leche ordeñada).
- Fuentes Energéticas de Entrada: Solar Fotovoltaica (PV) y Biogás (producido por la digestión anaeróbica del estiércol bovino). La cuantificación del recurso principal se basa en la carga animal real (disponibilidad de estiércol) y el rendimiento de metano específico, mientras que para el recurso solar se requiere el potencial de irradiación solar horaria (para un año) del sitio de implementación de la solución energética.
- Métricas de Viabilidad (KPIs): Las soluciones propuestas se comparan con soluciones convencionales utilizando:
 - Costo Nivelado de Electricidad (LCOE): El costo por unidad de energía eléctrica generada (USD/kWh).
 - Costo Nivelado de Refrigeración (LCOC): El costo de la unidad de energía térmica para frío (USD/kWh-frío), para evaluar la competitividad de la trigeneración.
 - Análogamente se puede determinar el costo nivelado del biogás en términos de su potencial energético. Por otro lado, el calor recuperado del sistema es un recurso que se utiliza para la producción de refrigeración y agua caliente y al cual se puede, o no, asignar un valor monetario, dependiendo del tipo de evaluación económica. Finalmente, el digestato, que es un fertilizante orgánico de alto valor nutricional, debe ser considerado un producto adicional del sistema que puede ser monetizado.
 - Reducción de GEI y Autosuficiencia: Cuantificación del impacto ambiental (reducción de emisiones de gases de efecto invernadero), por el desplazamiento del uso de soluciones convencionales basadas en combustibles fósiles, y verificación de cobertura de los servicios energéticos requeridos en la unidad productiva.

2.3 Viabilidad Tecno-económica de la Trigeneración Híbrida Solar-Biogás

Los resultados del modelado tecno-económico confirman que la adopción de sistemas híbridos solar-biogás en unidades productivas es una solución óptima, rentable y sostenible para el caso específico de las granjas lecheras estudiadas en Bolivia (Villarroel-Schneider *et al.*, 2023).

2.4 Eficiencia Energética y Rentabilidad Económica

La autogeneración de servicios energéticos a partir de recursos disponibles localmente reduce la dependencia de combustibles fósiles (diésel, GLP).

- Competitividad del LCOE: Los sistemas de Trigeneración híbridos Solar-Biogás, óptimamente dimensionados, pueden alcanzar Costos Nivelados de Electricidad (LCOE) competitivos, incluso en el escenario actual boliviano donde los combustibles fósiles son subsidiados, o con precios preferenciales, para la generación eléctrica. Esto quiere decir que en un escenario con precios reales de los combustibles fósiles la competitividad de estos sistemas aumentaría aún más (Villarroel-Schneider, 2023). El cálculo del LCOE, al

- internalizar la materia prima (estiércol) y el subproducto de valor (digestato), refleja el verdadero costo socio-ambiental de la energía.
- El Valor de la Trigeneración: El verdadero diferencial de los sistemas híbridos de trigeneración reside en su capacidad de generar frío para la refrigeración inmediata de los productos resultantes de las actividades productivas. Esta capacidad es vital para mantener la calidad e inocuidad alimentaria, lo que permite a los productores procesar alimentos, acceder a mercados mejor remunerados, impulsando directamente la competitividad. En el caso específico, considerado en este artículo, este producto es la leche recién ordeñada. El costo de producir refrigeración (LCOC) con un refrigerador por absorción puede ser igual o inferior al costo de producir frío mediante los sistemas de refrigeración convencional, ya que el sistema requiere calor para su funcionamiento, este recurso es recuperado de gases de combustión, por lo tanto, se puede asumir un costo nulo. Aunque el costo de inversión de los equipos puede ser todavía una limitante, se ha evidenciado que, a lo largo de la vida útil, el sistema puede ser económicamente competitivo (Villarroel-Schneider et al., 2020).

2.5 Impacto Ambiental y Mitigación Climática

Desde una perspectiva ambiental, la implementación de este tipo de soluciones genera una mitigación sustancial de GEI.

- Captura de Metano: El beneficio ambiental más significativo proviene de la captura del metano (CH₄) del estiércol. Al ser capturado y utilizado para la producción de electricidad y calor, se reduce la emisión de un GEI con un alto potencial de calentamiento. Se estima que una planta de biogás puede reducir las emisiones de CO₂ equivalente en una granja lechera hasta en un 80% (Villarroel-Schneider et al., 2022).
- Economía Circular y Biofertilizantes: Todas las unidades productivas con demandas energéticas de electricidad, calor y frío, y que a su vez generan residuos orgánicos tienen el potencial de adoptar este tipo de soluciones en el marco de una economía circular, aprovechando los residuos para la producción de biogás y la provisión de los servicios energéticos requeridos. Por otra parte, el digestato (biol), es un biofertilizante que se puede utilizar para mejorar la productividad agrícola, reduciendo y desplazando la necesidad de utilizar fertilizantes químicos y por ende la generación de GEI, cerrando el ciclo de nutrientes y minimizando la huella de carbono de la unidad productiva.

En la Figura N°1 se resume de manera gráfica los diferentes factores y los aspectos más importantes que se presentaron y que deben ser considerados en el análisis de implementación de las soluciones propuestas. A continuación, en la Figura N°2, se presenta la metodología práctica y sistemática esencial para el diseño y evaluación de las soluciones energéticas propuestas, haciendo un enfoque en los factores técnicos únicamente. Este diagrama de flujo, puede convertirse en una guía para la transformación de la matriz energética en el sector agropecuario y otras unidades productivas, la misma abarca la recopilación de datos técnicos y de demanda para dimensionar componentes y optimizar los costos de producción y el despacho de los servicios energéticos. Paralelamente, integra datos económicos para la optimización de costos y considera, también, la estimación de las reducciones de CO₂. Este enfoque práctico y reproducible es fundamental para

determinar la viabilidad técnica y económica de sistemas híbridos solar-biogás y de poligeneración en diversas unidades productivas, reforzando la competitividad económica y viabilidad ambiental de estas soluciones para un desarrollo productivo sostenible, además que proporciona una estructura clara para analizar las sinergias y superar las barreras identificadas.



Figura N° 1: Factores y aspectos a ser considerados para la implementación de Soluciones Energéticas Híbridas. Fuente: Elaboración propia, 2025.



Figura N° 2: Proceso para el análisis y optimización de Soluciones Energéticas Híbridas.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

3. REFLEXIÓN CRÍTICA: LA SUPERACIÓN DE LAS BARRERAS SOCIO-TÉCNICAS

A pesar de la sólida viabilidad técnica y económica demostrada en diversos estudios y aplicaciones, la implementación a escala de este tipo de soluciones enfrenta obstáculos significativos que deben ser abordados estratégicamente. La transición de la escala piloto a la escala masiva en Bolivia requiere un cambio profundo en el ecosistema habilitador.

3.1 Barreras Financieras y la Distorsión de Precios

La principal barrera práctica es el alto Costo de Inversión Inicial (CAPEX) de los sistemas híbridos, el cual resulta prohibitivo para pequeños y medianos productores.

- **Subsidios a los Combustibles Fósiles:** La política de subsidios generalizados al diésel, la gasolina y el precio preferencial del gas natural para la generación de electricidad, es un freno directo a la inversión y el desarrollo de las energías renovables. Estos subsidios reducen artificialmente el costo operativo de la alternativa fósil, lo que desincentiva la inversión en soluciones limpias, a pesar de su mejor rendimiento a largo plazo (Gómez-Arias, 2018). Es imperativo revisar y reorientar estos subsidios hacia la innovación y la capitalización de proyectos renovables.
- **Falta de Financiamiento Especial:** Los bancos carecen de la experiencia y los productos financieros adecuados (crédito “verdes” a largo plazo, tasas de interés preferenciales) para proyectos de biogás, y soluciones energéticas no convencionales, percibidos como de alto riesgo. Se necesitan mecanismos de financiamiento mixto (blended finance) y apoyo del gobierno que genere garantías para mitigar este riesgo inicial.

3.2 Barreras Regulatorias y de Gobierno

El marco regulatorio actual en Bolivia está diseñado principalmente para un sistema energético centralizado. Sin embargo, los Decretos Supremos 4477 y 5167, ya establecen las condiciones, normas y lineamientos para impulsar el uso de energías renovables y el cambio de la matriz energética del país a través de los sistemas de Generación Distribuida (AETN, 2024). A pesar de esos esfuerzos, todavía quedan ciertos aspectos a ser considerados de manera integral:

- **Incertidumbre en la Interconexión:** Las normativas existentes para la inyección de excedentes de electricidad a la red han sido ajustadas recientemente (2024), buscando incentivar la adopción de estos sistemas. Sin embargo, no se ha conseguido una adopción masiva. Tampoco se considera una retribución monetaria en caso de que el balance energético sea a favor del productor de energía, es decir que este haya inyectado más energía a la red de la que consume. Se debe garantizar un precio de compra justo para incentivar la instalación de estos sistemas y así maximizar la producción.
- **Falta de Política de Biogás:** El biogás, a pesar de sus múltiples beneficios, carece de una política nacional clara y con objetivos de capacidad instalada definidos. Debido a los combustibles fósiles subsidiados, la producción de biogás no es atractiva. A esto se suma la falta de coordinación interinstitucional entre los ministerios de Hidrocarburos y Energía, Desarrollo Rural, Medio Ambiente y Economía que frena su desarrollo.
- **Generación Distribuida con Sistemas Híbridos complejos:** El reducido marco legal existente en el país sobre este tema se centra en la producción de electricidad, no se contemplan soluciones híbridas complejas que podrían producir no solo este servicio, sino también biogás y servicios térmicos, por ejemplo. El biogás excedente tratado para aumentar su composición de metano (biometano) es equiparable al gas natural por lo que puede distribuirse para diversos usos (domiciliario, comercial, industrial y transporte). Esto requeriría un marco regulatorio dedicado especial.

3.3 Barreras Socio-Técnicas y de Capital Humano

La implementación exitosa requiere capacidades técnicas y organizacionales.

- **Déficit de Capital Humano:** Existe una escasez de técnicos y profesionales capacitados en el diseño, construcción, operación y mantenimiento de biodigestores, generadores de biogás y sistemas energéticos complejos, especialmente en zonas rurales (Villarroel-Schneider, 2019). Los proyectos fracasan no sólo por fallas tecnológicas, sino por la falta de mantenimiento preventivo o la inadecuada gestión de los procesos involucrados.
- **Organización Social y Gobernanza:** Los sistemas híbridos a escala asociativa (como los de la asociación de productores de leche) o comunitaria exigen una fuerte organización social y mecanismos de gobernanza efectivos. La gestión de los residuos y el uso compartido del biogás y digestato requieren acuerdos claros sobre la propiedad, los costos de operación y los beneficios, haciendo del componente social un elemento definitorio para la sostenibilidad operativa a largo plazo (Martí-Herrero et al., 2013; Garfi et al., 2016; Villarroel-Schneider et al., 2020).

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La reflexión y el análisis técnico-económico demuestran que la viabilidad técnica y económica de los sistemas híbridos solar-biogás/poligeneración es sólida y representa una de las vías más prometedoras para impulsar simultáneamente la Transición Energética y el Desarrollo Productivo Sostenible en el sector agropecuario y otros sectores productivos de Bolivia. La hibridación mediante el aprovechamiento de los recursos energéticos locales no solo ofrece energía limpia y resiliente, sino que tiene el potencial de generar beneficios productivos directos y ambientales que la convierten en una solución integral de triple resultado final (*Triple Bottom Line*).

Por lo tanto, el desafío ya no es técnico, sino institucional y financiero. Para que la evidencia cuantitativa se traduzca en implementación a una escala que pueda producir un impacto real, es imperativo superar las barreras estructurales de precios (subsidios a combustibles fósiles) y regulación (generación distribuida) mediante una acción coordinada y visionaria.

4.1 Recomendaciones Estratégicas y de Política Pública

Para materializar la viabilidad demostrada en la investigación y asegurar que la Transición Energética se traduzca en un desarrollo tangible, se proponen las siguientes acciones estratégicas:

I Marco Regulatorio Habilitador y Eliminación de Distorsiones

1. Desarrollo de una Ley de Generación Distribuida Clara: Implementar con urgencia un marco legal y tarifario que facilite la interconexión y la remuneración justa de los excedentes de electricidad de la Generación Distribuida, incluyendo un esquema de pagos o tarifas preferenciales para la generación híbrida biogás-solar, por ejemplo.
2. Revisión y Reorientación de Subsidios a Combustibles Fósiles: Revisar y reformar adecuada y transparentemente los subsidios a los combustibles fósiles, reorientando esos recursos hacia el fomento y promoción de la eficiencia energética y la capitalización de proyectos de soluciones renovables distribuidas.
3. Política Nacional de Biogás: Crear una Política Nacional de Biogás que reconozca explícitamente el biogás como una fuente de energía estratégica y un eje de la economía circular, estableciendo objetivos de capacidad instalada y simplificando los permisos ambientales. Esto considerando que la producción de biogás aborda, por otra parte, el problema de tratamiento y manejo de residuos orgánicos.

II Mecanismos Financieros Innovadores y Accesibles

1. Fondo de Capitalización Verde: Crear fondos verdes o líneas de crédito específicas para proyectos de energía renovable productiva, con tasas de interés bajas, plazos largos (15 a 20 años) y garantías adaptadas a los ciclos productivos.

-
2. Esquemas de Financiamiento por Desempeño: Implementar programas de subsidios directos o garantías parciales de crédito para reducir la barrera del alto costo de inversión inicial, atrayendo financiamiento climático internacional mediante mecanismos de pago por resultado (ej. pagos basados en la cantidad de CO₂ equivalente mitigada), valorizando la captura de metano como un servicio ambiental.

III Fortalecimiento de Capacidades y Enfoque Socio-Técnico

1. Inversión en Capital Humano: Invertir en programas de formación técnica y profesional especializados para crear una base de diseñadores, instaladores, operadores y mantenedores locales de sistemas energéticos híbridos y de trigeneración.
2. Promoción de Modelos Asociativos Exitosos: Apoyar el fortalecimiento de asociaciones y cooperativas para facilitar la gestión colectiva, la gobernanza y la apropiación local de los sistemas, reconociendo que el éxito a largo plazo se basa en la capacidad de la comunidad para operar y mantener la tecnología.

Con este análisis reflexivo y las recomendaciones establecidas se puede concluir que la acción decidida y coordinada de los actores involucrados es indispensable para convertir el potencial de las energías renovables de Bolivia, aprovechados eficazmente por los sectores productivos, en un motor de desarrollo sostenible, resiliente, duradero y equitativo.

REFERENCIAS

AETN (Autoridad de Electricidad y Tecnología Nuclear). (2024). *Generación Distribuida en Bolivia*. <https://www.aetn.gob.bo/web/main?mid=1&cid=217>

Garfi, M., Martí-Herrero, J., Garwood, A., & Ferrer, I. (2016). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 599-614. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.071>

Gómez-Arias, J. (2018). *Políticas de subsidios a los combustibles fósiles en América Latina y el Caribe: impactos económicos, sociales y ambientales*. CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/44122-politicas-subsidios-combustibles-fosiles-america-latina-caribe-impactos-economicos>

IEA (International Energy Agency). (2023). *World Energy Outlook 2023*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Jimenez Zabalaga, P., Limpens, G., Meyer, S., Thiran, P., Villarroel-Schneider, J., Cardozo, E., & Jeanmart, H. (2025). Towards a sustainable Bolivian energy system in 2050: The pathway for decarbonization under high renewable potential. *Energy*, 337, 138335. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138335>

Martí-Herrero, J., et al. (2013). *Biogas en América Latina*. Editorial Universitaria. https://redbiolac.org/wp-content/uploads/2016/06/LibroBiogas_RedBioLAC.pdf

Morato, T., Vaezi, M., & Kumar, A. (2020). Assessment of energy production potential from agricultural residues in Bolivia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110311. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110311>

PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). (2021). *Energía solar en Bolivia: Guía de recursos y oportunidades*. <https://www.undp.org/es/bolivia/publicaciones/energ%25C3%25ADa-solar-en-bolivia-gu%25C3%25ADade-recursos-y-oportunidades>

Terrapon-Pfaff, J., Gröne, M.-C., Dienst, C., & Ortiz, W. (2018). Productive use of energy – Pathway to development? Reviewing the outcomes and impacts of small-scale energy projects in the global south. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 198–209. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.016>

Villarroel-Schneider, J. (2023). *Combined Energy Solutions Applied to Dairy Farming in Bolivia and Latin America* (PhD dissertation, KTH Royal Institute of Technology). <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-323374>

Villarroel-Schneider, J., Balderrama, S., Sanchez, C., Cardozo, E., Malmquist, A., & Martin, A. (2023). Open-source model applied for techno-economic optimization of a hybrid solar PV biogas-based polygeneration plant: the case of a dairy farmers' association in central Bolivia. *Energy Conversion and Management*, 291, 117223. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117223>

Villarroel-Schneider, J., Höglund-Isaksson, L., Mainali, B., Martí-Herrero, J., Cardozo, E., Malmquist, A., & Martin, A. (2022). Energy self-sufficiency and greenhouse gas emission reductions in Latin American dairy farms through massive implementation of biogas-based solutions. *Energy Conversion and Management*, 261, 115670. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115670>

Villarroel-Schneider, J., Mainali, B., Martí-Herrero, J., Malmquist, A., Martin, A., & Alejo, L. (2020). Biogas-based polygeneration plant options utilizing dairy farm waste: A Bolivian Case. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100571. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100571>

Villarroel-Schneider, J., Malmquist, A., Araoz, J. A., Martí-Herrero, J., & Martin, A. (2019). Performance Analysis of a Small-Scale Biogas-Based Trigeneration Plant: An Absorption Refrigeration System Integrated to an Externally Fired Microturbine. *Energies*, 12(20), 3830. <https://doi.org/10.3390/en12203830>

Wegener, M., Villarroel-Schneider, J., Malmquist, A., Isalgue, A., Martin, A., & Martin, V. (2021). Techno-economic optimization model for polygeneration hybrid energy storage systems using biogas and batteries. *Energy*, 218, 119544. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119544>

Artículos de reflexión

¿Verde o justa? implicancias de este dilema en torno a la transición energética a partir de estudios de caso en Bolivia

Green or Just? Implications of this dilemma for the energy transition: case studies from Bolivia

 Pérez, Soledad Analía¹  Luna, Matilde Eugenia²

¹Consejo Nacional de Investigaciones científicas y técnicas (CONICET) soledadaperez@gmail.com

²Universidad Nacional de Córdoba, Argentina matilde.luna@mi.unc.edu.ar

Resumen

El artículo³ se centra en las discusiones en torno a la noción de transición energética, con especial énfasis en las tensiones entre sostenibilidad ambiental y lo socialmente justo. A partir del análisis de emprendimientos productivos localizados en Bolivia, seleccionados como estudios de caso en el marco del proyecto GENERIS⁴, se examinó desde una perspectiva interseccional cómo estas tensiones se manifiestan en actividades que incorporan sistemas de generación de energía renovable descentralizados. El objetivo consistió en identificar, a partir del trabajo de campo realizado, dimensiones clave de esta problemática que contribuyan a una comprensión más profunda de los desafíos y oportunidades para construir una transición energética socialmente inclusiva y ambientalmente responsable.

Citar como: Pérez, S.A., Luna, M.E. ¿Verde o justa? implicancias de este dilema en torno a la transición energética a partir de estudios de caso en Bolivia. *Revista Journal Boliviano De Ciencias*, 21(58) 88-103. <https://doi.org/10.52428/20758944.v21i58.1381>

Receipt: 14/07/2025

Approval: 21/10/2025

Published: 30/06/2025

Declaración: Derechos de autor 2025 Pérez, S.A., Luna, M.E. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](#).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



1 Investigadora Adjunta del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Integrante del Instituto de Investigaciones en Diversidad Cultural y Procesos de Cambio de la Universidad Nacional de Río Negro. Doctora en Ciencia Sociales por la Universidad de Buenos Aires (UBA), Magíster en Filosofía e Historia de las Ciencias (Universidad Nacional del Comahue), Licenciada en Sociología (UBA).

2 Licenciada en Ciencia Política por la Universidad Nacional de Rosario, Diplomada Superior en Desarrollo y Políticas Locales con Enfoque de Igualdad de Género (PRIGEPP-FLACSO), y Doctoranda en Estudios de Género en la Universidad Nacional de Córdoba. Es miembro adherente del Instituto de Investigaciones en Diversidad Cultural y Procesos de Cambio de la Universidad Nacional de Río Negro. Se desempeña como consultora independiente.

3 Esta investigación fue financiada por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC) en el marco del proyecto Generis Bolivia (acuerdo de subvención 190011/001). Sin embargo, las opiniones expresadas en este trabajo son exclusivamente de las autoras y no reflejan necesariamente la posición del IDRC.

4 Este proyecto es financiado por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC, por sus siglas en inglés) y tiene como objetivo principal identificar oportunidades para que las MIPYMES (micro, pequeña o mediana empresa) del sector agroalimentario en Bolivia adopten Sistemas de Generación Distribuida de Energía Renovable (DREGS, por sus siglas en inglés) como parte de sus actividades productivas (GENERIS, 2024). Asimismo, busca fortalecer las capacidades productivas de las MIPYMES nuevas y existentes mediante el ensayo, la formación y la implementación de sistemas de energías renovables, contribuyendo así a la creación de empleos verdes que promuevan la igualdad de género. Para más información consultar: <https://generis.com.bo/introducing-the-clean-energy-for-development-call-to-action-initiative/>

La investigación se apoyó en una metodología cualitativa, basada en entrevistas semiestructuradas y observaciones no participantes realizadas en tres emprendimientos productivos. A partir de estos casos, se analizó cómo las desigualdades estructurales —atravesadas por género, clase, etnicidad, edad y lugar de residencia— condicionan el acceso y la participación en los procesos de transición energética.

Palabras clave: Transición energética justa; Interseccionalidad; Género y energía; Energías renovables; Desigualdades sociales.

Abstract

This article focuses on debates surrounding the notion of energy transition, with particular emphasis on the tensions between environmental sustainability and social justice. Based on the analysis of productive enterprises located in Bolivia—selected as case studies within the framework of the GENERIS project—it examines, from an intersectional perspective, how these tensions manifest in activities that incorporate renewable energy generation systems. The objective is to identify, from the fieldwork conducted, key dimensions of this issue that contribute to a deeper understanding of the challenges and opportunities for building a socially inclusive and environmentally responsible energy transition.

The research is based on a qualitative methodology, using semi-structured interviews and non-participant observation carried out in three productive enterprises. These cases are used to analyse how structural inequalities—intersected by gender, class, ethnicity, age, and place of residence—shape access to and participation in energy transition processes.

Keywords: Just energy transition; Intersectionality; Gender and energy; Renewable energy; Social inequalities.

1. Introducción

La transición energética constituye un proceso clave para enfrentar la crisis climática global. Sin embargo, su implementación no está exenta de tensiones (Svampa, 2022). Por lo general, en América Latina los debates en torno a la transición energética se han centrado principalmente en la lucha contra el cambio climático y la modificación de la matriz energética, priorizando la dimensión ambiental (Fornillo, 2017), dejando en segundo plano las desigualdades sociales, económicas, territoriales y de género que atraviesan dicho proceso (Sandwell y Hamouchene, 2024; Oparaocha y Dutta, 2011).

Es por ello que se torna necesario problematizar la idea de la transición energética, subrayando la importancia de visibilizar y reconocer los impactos diferenciados en distintos grupos sociales, para garantizar una participación equitativa de sus beneficios (Muñoz Cabré y Vega-Araújo, 2022).

En el caso boliviano, los compromisos internacionales asumidos en materia climática y energética, como el Acuerdo de París (2015) y la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, expresan la voluntad de avanzar hacia una matriz energética más diversificada y sostenible. A ello se suma la Contribución Nacionalmente Determinada (CND) 2021–2030 de Bolivia, que establece metas específicas de

mitigación y adaptación, orientadas a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y a ampliar el uso de energías renovables. Sin embargo, esta proyección se enfrenta a un escenario marcado por la escasez de combustibles, que revela tanto la fragilidad del sistema energético como la vulnerabilidad económica asociada. En este marco, resulta clave no perder de vista las dinámicas locales, para así abordar la transición energética desde una mirada que integre las desigualdades sociales, territoriales y de género, poniendo en tensión los imperativos “verdes” en Bolivia.

Este trabajo se inscribe en esa preocupación crítica. Se trata de una primera aproximación que adopta una mirada situada sobre la transición energética en Bolivia, a partir del análisis de estudios de caso. El objetivo principal es identificar, a partir del trabajo de campo, dimensiones clave que permitan comprender con mayor profundidad los desafíos y oportunidades para construir una transición energética que sea socialmente inclusiva, al tiempo que ambientalmente responsable.

En particular, este trabajo busca aportar a este debate, a partir de incorporar una perspectiva interseccional que permita analizar cómo factores como el género, la clase, la etnidad y el territorio inciden en las posibilidades de acceso, participación y distribución de los beneficios en los procesos de transición energética.

Incorporando esta perspectiva de género interseccional, el análisis se focaliza en tres casos de estudio que se enmarcan dentro del proyecto GENERIS: dos situados en el departamento de Cochabamba —el primero vinculado a la producción de copoazú y el segundo a la cadena productiva de la piscicultura— y un tercer caso ubicado en el departamento de Pando, dedicado al procesamiento de asaí. Esta aproximación permite analizar de qué modos las tensiones entre lo “verde” y lo “justo” se expresan en contextos productivos diversos y situados.

La metodología empleada es de corte cualitativo, combinando entrevistas semiestructuradas y observación no participante. El artículo se encuentra estructurado de la siguiente manera, en primer lugar, se presenta el abordaje metodológico, posteriormente, se realiza una aproximación conceptual a la noción de transición justa. En tercer lugar, se abordan los desafíos que implica el enfoque interseccional para analizar la complejidad de las desigualdades en el marco de una transición energética justa. En cuarto lugar, a partir del análisis de los casos de estudio, se identifican dimensiones clave que evidencian la incidencia de distintas formas de desigualdad en contextos productivos situados. Finalmente, se problematiza la metáfora cromática que asocia lo “verde” con lo “justo”, mostrando que dicha relación no siempre se cumple.

2. Consideraciones metodológicas

La investigación se enmarca en una metodología cualitativa, orientada a captar las experiencias, significados y prácticas de los actores en sus contextos sociales específicos (Vasilachis de Gialdino, 2006). Para ello se combinaron entrevistas semiestructuradas y observación no participante.

Las entrevistas semiestructuradas se caracterizan por aportar una estructura flexible que permite la emergencia de categorías analíticas desde los discursos de las personas entrevistadas, situadas en sus propios contextos, en este caso, se

trató de sus entornos familiares y laborales o productivos. Esta técnica posibilita no solo la recolección de narrativas personales, sino también el abordaje de sentidos y tensiones que se presentan en distintas prácticas sociales. Por su parte, la observación no participante aportó una perspectiva contextual, al registrar con cierta distancia los comportamientos y dinámicas en el espacio en que se desarrollan los emprendimientos o eventos ligados al proyecto que es objeto del estudio.

Las entrevistas se realizaron de manera presencial⁵, con la aplicación de un consentimiento informado. Estas fueron grabadas, transcritas y analizadas. Cabe aclarar que, si bien se cuenta con dicho consentimiento, no se adopta una postura ingenua ni acrítica respecto de las implicancias del hecho de que esta investigación haya sido llevada adelante por el mismo equipo involucrado en la instalación de los sistemas de generación distribuida. Este aspecto plantea una situación particular, dado que las personas entrevistadas tenían un interés específico en que dichos equipos fueran efectivamente instalados en sus emprendimientos. En este sentido, la reflexividad se torna un elemento central en el análisis, ya que implica una revisión crítica constante por parte de las investigadoras que suscriben este artículo en torno a su propia posición y al poder que ejercen -o pudieron haber ejercido- en la relación investigativa, así como de los modos en que dicha dinámica pudo haber influido en la construcción e interpretación de los datos. Reconocer estas aristas permite abordar con mayor responsabilidad y rigor metodológico las complejidades inherentes a la producción de conocimiento en contextos sociales y políticos especialmente sensibles.

3. Análisis

3.1. Aportes para pensar en una transición energética justa

La idea de transición justa tal como la expresión lo indica, implica pensar que el proceso de transición energética involucra una dimensión vinculada a la justicia y en función de ello, quizás de manera no tan evidente, al reconocimiento de la energía como un derecho humano fundamental.

La noción de transición justa implica reconocer que el proceso de transformación del sistema energético no puede desvincularse de consideraciones de justicia. En este sentido, la transición energética adquiere una dimensión ética fundamental, al estar intrínsecamente ligada al reconocimiento de la energía como un derecho humano básico. Concebir el acceso a la energía como un derecho -y no como una mercancía más- es indispensable, ya que constituye un prerrequisito para el ejercicio efectivo de otros derechos fundamentales. La falta de acceso a servicios energéticos seguros, asequibles y sostenibles afecta negativamente las posibilidades de satisfacción de derechos tales como el derecho a la salud, alimentación, educación, así como también a oportunidades de desarrollo de las comunidades, profundizando así desigualdades estructurales existentes.

Reconocer esta interdependencia (entre derechos) permite aproximarse con mayor precisión a la idea de transición justa. Sin embargo, en la actualidad, este concepto no es unívoco ni consensuado; por el contrario, se ha convertido en un terreno de disputa donde confluyen diversas visiones respecto a las respuestas posibles

⁵ Las entrevistas fueron realizadas por el equipo responsable de los componentes sociales y de género del proyecto GENERIS. Una de las autoras de este artículo participó del trabajo de campo en Bolivia y realizó algunas de las entrevistas junto con el resto del equipo.

y necesarias frente a la crisis climática. El término transición justa no remite automáticamente a políticas integrales o emancipadoras, ya que ha sido apropiado por distintos actores para legitimar propuestas que, en muchos casos, mantienen intactas las estructuras de poder y las desigualdades históricas (Sandwell y Hamouchene, 2024).

La literatura especializada identifica varias dimensiones clave en torno a la relación entre transición energética y justicia. En primer lugar, la noción de *Justicia distributiva* que refiere a los modos en que se distribuyen los beneficios y cargas de la transición energética. Desde esta perspectiva se promueve la democratización del acceso a la energía, la equidad social y la identificación de los grupos más vulnerables frente al cambio climático. En segundo lugar, aunque no en orden de importancia, la idea de *Justicia procesal* da cuenta de los procedimientos y mecanismos que forman parte de los procesos de toma de decisiones, enfatizando la importancia de la transparencia, la participación efectiva y la rendición de cuentas por parte de instituciones involucradas en dichos procesos. En tercer lugar, la dimensión *restaurativa de la justicia*, propone mecanismos de reparación de las injusticias identificadas, buscando instituir o restituir derechos, reparando daños en las comunidades que puedan haber sido afectadas. Finalmente, la *Justicia de reconocimiento*, destaca la importancia de reconocer y respetar las identidades, necesidades y derechos de todas las personas y comunidades afectadas por las transiciones energéticas (Muñoz Cabré y Vega-Araújo, 2022; Universidad de Antioquia, 2023; Van Bommel y Höffken, 2021).

En esta línea, al hablar de transición justa, no es posible obviar el legado colonial que sigue influyendo en la forma en que se gestionan los recursos y se toman las decisiones a nivel global (Svampa, 2022), siendo indispensable la priorización de las necesidades de las comunidades locales (Sandwell, K., y Hamouchene, H., 2024). Esto implica una postura crítica que reconoce, entre otras cosas, que las discusiones sobre la transición deben considerar las desigualdades históricas generadas por el colonialismo y el imperialismo; además, se debe comprender que no resulta posible enfrentar la crisis ambiental sin cuestionar las estructuras racistas, sexistas y opresivas del sistema capitalista (Svampa, 2022). En efecto, es fundamental evitar la cooptación neoliberal de este término, que puede reducir el proceso de transición energética a una serie de proyectos tecnológicos o soluciones sin un genuino compromiso con los intereses de las poblaciones que han sido históricamente más vulneradas.

En ese marco, entender el acceso a la energía como un derecho universal supone garantizarlo para asegurar una vida digna y plena para todas las personas. Esto resulta en un punto clave para aproximarse a la comprensión del concepto de transición justa, ya que esta transición no puede ser concebida únicamente desde una perspectiva ambiental y/o económica, sino también desde una perspectiva de justicia social que reconozca la importancia del acceso equitativo a los recursos energéticos como fundamental para la dignidad humana.

En ese sentido, en este trabajo adherimos a una noción de transición justa como un proceso que busca abordar las causas sistémicas de la crisis climática, priorizando la soberanía local y la democratización energética (Sandwell, K., y Hamouchene, H., 2024).

3.2. Hacia una mirada interseccional

En un esfuerzo por abordar de manera más compleja el problema de la desigualdad en el marco de una transición justa, este trabajo se inscribe en el campo de los estudios de género, integrando una perspectiva interseccional. Desde esta mirada, sostenemos que hablar de transición justa sin incorporar un enfoque de género interseccional implica desatender las desigualdades estructurales que condicionan tanto el acceso a los recursos como la participación efectiva y activa en los procesos de transformación energética.

Como punto de partida, es fundamental subrayar que la categoría “género” no debe entenderse simplemente como un dato empírico de la realidad, sino como una construcción producida a partir de entramados sociales complejos (Scott, 1988). En efecto, trabajar desde una perspectiva de género implica analizar las posiciones y roles de género socialmente asignados, reconociendo que estos atraviesan todos los ámbitos de la vida social, económica y política, tanto en espacios públicos como privados. La naturalización de determinados roles ha contribuido a reforzar desigualdades en términos de responsabilidades y oportunidades, consolidando relaciones de poder que subordinan principalmente a las mujeres. Estas relaciones se expresan en brechas de género que impactan en el acceso y control de recursos económicos, tecnológicos, laborales, culturales, políticos y simbólicos, entre otros (Rojo y Blanco, 2014).

Comprender cómo operan estas brechas y cómo pueden ser transformadas requiere necesariamente un enfoque de género que permita identificar las desigualdades estructurales que afectan el acceso a derechos, oportunidades, recursos y a la participación social y política. No obstante, leer el género como una categoría aislada puede conducir a la producción de generalizaciones o universalismos que invisibilizan otras dimensiones interrelacionadas de la desigualdad.

Al analizar las relaciones de género, particularmente en el contexto de la energía y el cambio climático, es fundamental evitar supuestos universales que puedan conducir a generalizaciones erróneas. En este sentido, resulta clave cuestionar la construcción de la categoría “mujeres” como algo homogéneo, especialmente en discursos académicos y en la formulación de proyectos, dado que tales generalizaciones pueden distorsionar la complejidad de las experiencias y realidades situadas. Por ejemplo, si bien se reconoce que las mujeres enfrentan mayores dificultades para acceder a servicios energéticos limpios, económicos, seguros y no contaminantes (Oparaocha y Dutta, 2011), estas barreras se intensifican en el caso de mujeres que habitan contextos marcados por desigualdades estructurales, como ocurre en muchos territorios del Sur Global (Vanegas Díaz y Cardoso, 2024). Esto pone de relieve la necesidad de considerar no solo la variable género, sino también el contexto geográfico, socioeconómico y cultural en el que se inscriben los distintos grupos sociales.

Frente a estos desafíos, resulta fundamental incorporar una mirada interseccional. El concepto de interseccionalidad constituye tanto una herramienta teórica como una estrategia metodológica que permite visibilizar la interconexión entre múltiples ejes de diferenciación y opresión, tales como género, etnidad, clase, edad, orientación sexual o nacionalidad. Esta perspectiva considera dichas categorías “como estructuras organizativas de la sociedad que influyen en el acceso a derechos, la participación política, la equidad y el potencial para alcanzar cualquier forma de justicia” (Hancock, 2007, p. 64).

El trabajo desarrollado en el marco del proyecto GENERIS, reconoce que el género se entrelaza con otros sistemas de categorización, tales como la raza/etnicidad, la clase, la edad, la ubicación geográfica (principalmente, aunque no exclusivamente), los cuales se refuerzan mutuamente de manera históricamente situada. Estas categorías no pueden analizarse de forma aislada o por fuera de los contextos específicos. En esa línea, distintas teóricas feministas han advertido que ignorar la categoría de género o abordarla de forma descontextualizada contribuye a reproducir estereotipos, a la vez que esto puede contribuir a partir de la premisa errónea de que las mujeres constituyen un grupo homogéneo (Listo, 2018, Lugones, 2008; Mohanty, 1988).

Por este motivo, el proyecto incorporó un enfoque interseccional, con el objetivo de identificar la diversidad de experiencias y comprender cómo interactúan distintas variables que pueden generar formas de desigualdad complejas. La interseccionalidad permite identificar con mayor precisión cómo diferentes sectores y grupos sociales experimentan las desigualdades, al considerar que los múltiples sistemas de opresión se entrelazan para configurar significados y experiencias diferenciadas tanto dentro como entre los grupos sociales, en contextos determinados. En este sentido, es fundamental adoptar una perspectiva situada de la interseccionalidad (Yuval-Davis, 2017), entendiendo que las divisiones sociales, constituidas por relaciones de poder, son por naturaleza heterogéneas y se articulan en contextos históricos y territoriales específicos.

Desde esta perspectiva, una transición justa no debe limitarse a corregir las desigualdades de acceso, es decir, la dimensión distributiva de la justicia desde una perspectiva neutral o técnica. Debe también considerar cómo las relaciones de poder—configuradas por factores como el género, la clase, la etnicidad, la edad, el lugar de residencia, entre otras—determinan quienes acceden a los beneficios de la transición, quiénes asumen sus costos y quiénes quedan excluido/as de los procesos de toma de decisiones. Estas cuestiones remiten a la dimensión procedural de la justicia, que se vincula con los mecanismos, prácticas e instituciones que regulan la participación en los procesos de transformación energética. Incorporar una perspectiva interseccional, por tanto, implica ampliar el análisis sobre la justicia energética, incorporando no sólo lo que se transforma, sino también el abordaje de la pregunta de “para quién”, “desde dónde”, en “qué contextos” y el “cómo” (justicia procedural) se lleva a cabo dicha transformación.

Desde este marco conceptual, este trabajo retoma aspectos a considerar del estudio de casos específicos, para explorar cómo las identidades sociales se configuran de manera compleja y situada en torno a los procesos de transición energética. A su vez, indaga en cómo dichas configuraciones inciden en las posibilidades reales de acceso, participación y agencia dentro de un modelo de transición que aspire a ser verdaderamente justa.

3.3. Explorando interseccionalmente las tensiones entre lo justo y lo verde en estudios de caso seleccionados

Luego de haber desarrollado el potencial analítico de la perspectiva interseccional, en este apartado se analiza, desde dicho enfoque, cómo se manifiestan las tensiones entre lo verde y lo justo en tres casos de estudio enmarcados en el proyecto

GENERALIS, identificando dimensiones clave que permiten comprender la incidencia de diversas formas de desigualdad en contextos productivos situados.

Dos de los casos analizados se encuentran en el Departamento de Cochabamba. El primero está vinculado a la producción de copoazú, donde, en el marco del proyecto GENERALIS, se incorporó un sistema de generación distribuida fotovoltaica para apoyar el proceso productivo, específicamente en la refrigeración. El segundo caso, relacionado con la cadena productiva de la piscicultura, consistió en la implementación de un sistema similar para alimentar oxigenadores eléctricos en dos granjas familiares, permitiendo sustituir las motobombas a gasolina. En la producción piscícola, la oxigenación adecuada de los estanques es un proceso clave que asegura la sostenibilidad de los estanques, como así también permite acelerar el crecimiento de los peces, mejorando la rentabilidad de los emprendimientos. El tercer caso se localiza en el Departamento de Pando y consistió en la instalación de un sistema de generación distribuida fotovoltaica en una planta comunitaria de procesamiento de asaí.

Si bien estos casos difieren tanto en la cadena productiva a la que pertenecen como en la naturaleza de los emprendimientos -dos corresponden a granjas familiares y uno a una planta procesadora comunitaria-, es posible identificar puntos en común que permiten un análisis transversal.

A partir del trabajo de campo realizado, en este acápite retomamos cuatro dimensiones de análisis que emergieron de las entrevistas y observaciones no participantes. Estas dimensiones permiten reflexionar sobre aspectos clave a considerar al momento de pensar los desafíos que implica una transición energética justa, especialmente en relación con las desigualdades estructurales que atraviesan a los procesos productivos en distintas cadenas de valor.

-Roles asignados en los emprendimientos

En la planta procesadora de asaí, las actividades de las mujeres reproducen las tareas reproductivas propias del ámbito doméstico, encargándose fundamentalmente de cocinar, de la limpieza de las instalaciones y de actividades como la selección de frutos, asociadas a características históricamente atribuidas a las mujeres como la paciencia y minuciosidad. Por su parte, los hombres realizan labores que requieren el uso de fuerza física para introducir el fruto y agua a la despulpadora, se ocupan de la supervisión del proceso y de actividades que requieren conocimiento técnico específico como el manejo de la cadena de frío. Las actividades desempeñadas por unas y otros se encuentran estrechamente vinculadas a roles de género, a la vez que jerarquizadas. Como menciona una entrevistada:

“Nosotras hacemos todo lo que es trabajo de mujeres. Sarandeamos, escogemos los frutos buenos y separamos los malos, y luego ellos [los varones] se encargan. Las mujeres después hacen solo la limpieza. El despulpado es de varones. El sellado también es de mujeres: dos mujeres se encargan, una pesadora y otra selladora” (Entrevista 4, planta de asaí)⁶.

En la misma línea, otra de las mujeres que trabaja en la planta procesadora de frutos amazónicos describe su trabajo en los siguientes términos:

⁶ Con el fin de garantizar el anonimato, los testimonios fueron codificados y se eliminaron referencias que pudieran permitir la identificación de las personas entrevistadas.

“Solo de cocinera, preparando la alimentación para los que trabajan todos los días. Nos capacitaron para entrar. Logré entrar, solamente que ya no tenían quien le cocine, yo le cocinaba” (Entrevista 6, planta de asaí).

El “solo de” evidencia la desvalorización de su propio trabajo, incluso el no reconocimiento del mismo como tal, ya que señala que ella cocina “para los que trabajan todos los días”, como si el de ella no fuese un trabajo.

A pesar del rol activo que muchas mujeres desempeñan en las distintas etapas del aprovechamiento del asaí, persisten barreras estructurales que restringen su participación plena y equitativa en el empleo. Uno de los principales factores que condiciona su inserción es la división sexual del trabajo, que asigna tareas según estereotipos de género vinculados al uso de la fuerza física y al rol tradicional de las mujeres en el ámbito doméstico. Como afirma un trabajador de la planta entrevistado:

“Este tipo de trabajo, intensivo en fuerza y riesgo, se asocia culturalmente con el rol masculino en las comunidades. En cambio, las mujeres participan en el despique o separación de los frutos en el suelo, lo cual tiene menos riesgo físico y se percibe como una extensión de las tareas de apoyo [...] el esposo sube, va, y la mujer despica asaí” (Entrevista 14, planta de asaí).

Esta asociación entre fuerza física y trabajo masculino contribuye a la naturalización de la exclusión de las mujeres de ciertas tareas, así lo evidencia una entrevistada al relatar:

“Para las chicas es más difícil cosechar productos, pero hay señoritas que van al monte con sus papás. Cuando hicimos el encuentro de asociaciones, vieron y no creían que las señoritas también son ágiles, pero son pocas. La mayoría se quedan en casa con sus hermanitos” (Entrevista 1, planta de asaí).

Este testimonio revela que la idea de que las mujeres no pueden realizar tareas físicamente exigentes es más una construcción cultural y social que una imposibilidad física real. Las pocas mujeres que tienen la oportunidad de participar en actividades tradicionalmente masculinas demuestran que pueden hacerlo, pero los roles de género y las responsabilidades de cuidado en muchos casos les impiden acceder en igualdad de condiciones.

Una situación similar respecto a los roles de género se pudo observar en los emprendimientos piscícolas. Si bien las mujeres tienen una participación activa en las tareas de producción económica de la piscicultura, aún persiste una división de género en las responsabilidades. En efecto, los hombres suelen encargarse de las tareas más pesadas, como realizar la pesca con las redes, el faenado del pescado o trabajar en los chacos [porción de tierra destinada a la agricultura], mientras que las mujeres asumen roles que ellas describen como “ayuda” o “apoyo” a sus esposos en el manejo de las piscinas. Esta forma de enunciar su participación, como señala una entrevistada *“hay cosas de hombres que no pueden hacer [las mujeres] pero siempre hay algo para la mujer, más liviano y de ayuda en el faeneo”*, revela un proceso de subvaloración de su rol productivo.

Sin embargo, esta conceptualización de su trabajo como “ayuda” no alcanza a reflejar la extensión y la intensidad de sus jornadas, en las que se entrelazan trabajo reproductivo y productivo. Como expresa una de las entrevistadas:

“En la mañana tengo que mandar a mis pequeños a la escuela, después de eso cocinar, y así y después de preparar eso me doy unas vueltas para ver cómo están los peces (...) Más que todo me encargo de la comida en la mañana, y hacer el control de su oxígeno y qué le falta ¿no? cal o sal, esas cosas... ahí le ayudo a mi marido porque él más trabaja en el chaco (...) hay veces salen arriba [los peces] y ahí vamos, (...) cuando se bogan, digamos, hay que cargar motores para darle oxígeno, ahí se tarda más” (Entrevista 6, emprendimiento piscícola).

Las mujeres están a cargo de tareas centrales en la producción piscícola: el monitoreo de los estanques, la alimentación de los peces, la medición del pH del agua, el mantenimiento diario, la limpieza de los pescados durante la faena. Además, participan activamente en las ferias organizadas por la Asociación, donde cocinan y comercializan los productos.

El hecho de que los estanques están ubicados cerca de la vivienda contribuye a que este trabajo productivo sea percibido como una extensión del trabajo doméstico, al quedar asociado a actividades tradicionalmente feminizadas que allí se desarrollan, como el cuidado del hogar y de los/as hijos/as. Así, pese a su rol fundamental en la cadena de producción piscícola, el trabajo cotidiano de las mujeres tiende a quedar invisibilizado, en un mecanismo similar al que históricamente ha desvalorizado el trabajo reproductivo dentro de los hogares.

-Tecnologías y acceso al conocimiento: desigualdades en los usos y en la formación

La incorporación del enfoque interseccional en el análisis de los casos estudiados permite visibilizar cómo las relaciones de poder inciden tanto en el acceso a las tecnologías como en las posibilidades de apropiación de saberes técnicos. En este marco, muchas veces los dispositivos tecnológicos instalados, aunque orientados a mejorar la eficiencia productiva y promover una transición energética sustentable, no están exentos de sesgos en su diseño y uso.

En uno de los emprendimientos piscícolas, una entrevistada expresó las dificultades físicas que enfrenta para operar un oxigenador eléctrico, subrayando que el diseño del equipo no contempla la diversidad de capacidades corporales:

“Es pesado, yo sola no puedo manejar, necesito ayuda, este más chiquito se puede manejar entre dos, poner la manguera costosito es, jalar también es para fuerza, yo no puedo, tienes que pelear para hacer” (Entrevista 8, emprendimiento piscícola).

Este testimonio evidencia cómo la ergonomía de los equipos puede limitar su utilización por parte de las mujeres, restringiendo las posibilidades de apropiación de las tecnologías por su parte, profundizando así las desigualdades de género en los procesos productivos.

A su vez, estas barreras tecnológicas se ven reforzadas por brechas en el acceso al conocimiento y a la formación tanto en la cadena productiva como en el uso de energías renovables. La brecha en la capacitación técnica especializada manifiesta sesgos de género en la oferta educativa. Si bien existen programas como los de la UNIBOL (Universidad Indígena Boliviana) en Chimoré que ofrecen formación en energías renovables, hasta el momento ninguna de las mujeres entrevistadas que trabajan en los emprendimientos han recibido capacitaciones específicas. Esto revela una exclusión persistente en el diseño e implementación de ofertas

pedagógicas, que no contemplan las condiciones sociales, culturales y territoriales que atraviesan la participación de las mujeres en los procesos formativos.

Asimismo, respecto a la profesionalización en la cadena productiva, en las entrevistas realizadas se observó que la apropiación de conocimientos técnicos o acceso a los mismos, ha estado mediada por hombres, sean éstos parejas, familiares cercanos o miembros de la comunidad. Tal como mencionó una de las entrevistadas: “*Mi esposo ha ido a UNIBOL a esa universidad en Chimore Ramiro Huanca en quechua, ahí ha pasado cursillos y de la Alcaldía*” (Entrevista 5, emprendimiento piscícola).

En conjunto, estos elementos muestran que tanto el diseño de los equipos como la distribución del conocimiento operan como barreras estructurales que pueden obstaculizar el acceso equitativo a los beneficios de la transición energética.

Durante el proceso de instalación de los sistemas fotovoltaicos, se observó la importancia crítica de garantizar la participación activa de las mujeres en las instancias de capacitación vinculadas al uso y mantenimiento de los equipos. Para ello, es necesario revisar tanto el lenguaje utilizado como los formatos pedagógicos de estas capacitaciones, asegurando su accesibilidad. En contextos donde se hablan lenguas indígenas, resulta indispensable que los contenidos sean impartidos en dichas lenguas, así como considerar los tiempos disponibles y las responsabilidades de cuidado que recaen mayoritariamente sobre las mujeres, para garantizar que puedan participar plenamente en esas instancias. A su vez, se identificó el potencial que representan las y los jóvenes, cuyas habilidades tecnológicas y disposición al aprendizaje las/os convierte en actores clave a ser incorporados en los procesos de capacitación, tanto como estrategia de apropiación comunitaria de las tecnologías como de su sostenibilidad en el largo plazo.

-Brechas salariales

El testimonio de una productora de Copoazú ilustra cómo ciertas prácticas y patrones culturales patriarcales justifican disparidades remunerativas en proyectos productivos que están incorporando energías renovables:

“Yo no agarro hombres. Es que los hombres quieren ganar más. 100, 200 Bs. quieren ganar. Pero si no saben despulpar, yo no puedo pagar. Aparte de eso, un hombre tiene que venir con las uñas bien cortadas, bien aseados, sin pijchar. Entonces no le puedes decir a un hombre esto, como a una mujer, tienes que bañarte, tienes que venir de esta forma” (Entrevista 10, emprendimiento de copoazú).

Este relato evidencia dos aspectos significativos. En primer lugar, la naturalización de expectativas diferenciales en cuanto a normas de presentación personal e higiene (que incluye también la abstinencia de mascar coca -pijchar-), que son aplicadas con mayor rigor hacia las mujeres, revelando una división sexual de las exigencias laborales. En segundo lugar, la existencia de una brecha salarial de género que se percibe como “natural” o justificada por parte de quienes gestionan los emprendimientos, aun cuando las tareas desempeñadas no difieren en complejidad y/o responsabilidad.

Estos hallazgos se inscriben en una problemática más amplia. Según ONU Mujeres (2023), la brecha salarial de género en Bolivia asciende al 26,5 %, considerando diferencias en ingresos entre hombres y mujeres para trabajos equivalentes,

a tiempo completo, parcial o por hora. Esta disparidad es aún más pronunciada en contextos rurales, donde las mujeres, a pesar de su amplia participación en actividades agrícolas, enfrentan mayores desventajas económicas. Tal como señalan Ballara y Parada (2009), las brechas de ingresos entre hombres y mujeres rurales en América Latina se acentúan en sectores como la agricultura, donde predomina la informalidad y las relaciones laborales desreguladas.

En este contexto, resulta fundamental analizar la brecha salarial no solo como una cuestión de desigualdad en los ingresos, sino como expresión de un entramado más amplio de relaciones de poder, normas de género y valoraciones desiguales del trabajo productivo y reproductivo.

-Acceso a crédito y financiamiento

Otra dimensión clave se vincula con el acceso a fuentes de crédito y financiamiento. En el marco del trabajo de campo realizado, se participó del acto de inauguración de uno de los oxigenadores en un emprendimiento piscícola en Cochabamba. Al evento asistieron también representantes de entidades crediticias, convocados con el objetivo de informar a la comunidad sobre las posibilidades de acceso a créditos y préstamos bancarios. Este espacio, puso en evidencia, por un lado, una determinada disposición espacial de las y los asistentes, dando cuenta del modo en que las jerarquías sociales se ponen de manifiesto en el espacio y en las prácticas: durante la presentación general del proyecto, las mujeres de la comunidad se ubicaron al fondo, y posteriormente permanecieron en un sector aparte, encargándose de la preparación de la comida con la que se agasajó a las y los presentes. Por otro lado, en el momento en que el personal de las entidades crediticias comenzó a interactuar de manera personalizada con miembros de la comunidad para brindar información sobre posibles líneas de financiamiento, solo una mujer se acercó a consultar. En ningún momento se observó una acción activa de acercamiento del personal hacia el grupo de mujeres que permanecía reunido en otra zona, lo cual refuerza la idea de lo alejado que queda el acceso al financiamiento para las mujeres rurales.

Esta escena, cuyos sentidos y relevancia puede ser minimizada, puede contextualizarse y resignificarse a la luz de los siguientes datos: en Bolivia, el 80% de las mujeres mayores de 20 años no tienen acceso a servicios financieros (Banco Mundial, 2023). Los créditos otorgados a mujeres según su actividad económica, se concentran en sectores como la venta al por mayor y menor, la industria manufacturera, los restaurantes y hoteles. En contraste, actividades como la agricultura, la ganadería y otras áreas relacionadas solo reciben el 16% de los créditos (INE-ASFI, 2020).

En Cochabamba, en particular, se observa una brecha de casi un 20% en el acceso a créditos entre hombres y mujeres. Si bien se registra en términos generales una participación mayor de los hombres en el acceso al crédito en los distintos departamentos, en aquellos pocos en que es levemente superior el acceso de las mujeres, el monto promedio de créditos otorgados, expone una brecha considerable (INE-ASFI, 2020). Si bien el acceso al crédito creció un 30% respecto de 2020, aún persisten sesgos territoriales y sectoriales.

En ese marco, existe una evidente concentración del acceso al crédito en los sectores urbanos, siendo que el 60% de los créditos otorgados a mujeres se dieron en La Paz y Santa Cruz. Por otra parte, existe una brecha significativa en los montos promedio asignados. En las actividades agropecuarias, las mujeres reciben

el 28% de los créditos productivos, con proporciones menores a las asignadas a manufactura que alcanzan un 38% (ASFI, 2023).

Cabe mencionar que más de un tercio de las mujeres bolivianas no percibe ingresos propios, situación que se agudiza en contextos como el descrito por una entrevistada de uno de los emprendimientos piscícolas, en alusión a las inversiones iniciales requeridas para la infraestructura piscícola: “*tienes que pagar para cavar, al tractorista, a veces dos o tres días se paga y se hace platita, ¿de dónde sacamos? No hay plata*” (entrevista 11, emprendimiento piscícola). En el mismo sentido otra de las entrevistadas recuerda que para poder construir los estanques “*primero del banco hemos sacado préstamo, con eso nos hemos hecho, casi la mayoría sacó del banco y se han hecho las piscinas. Así de golpe difícil es hacerse*” (entrevista 5, emprendimiento piscícola).

Estas narrativas evidencian que, para muchas mujeres rurales, el acceso a financiamiento no solo está mediado por barreras burocráticas o técnicas, sino también por la falta de redes de apoyo institucional, garantías formales y reconocimiento económico.

En este sentido, una transición energética que aspire a ser justa requiere una crítica profunda a las estructuras que configuran de forma desigual el acceso a oportunidades técnicas y económicas. Las dinámicas de género, clase, etnidad y territorio no pueden ser consideradas factores periféricos, sino centrales para comprender y transformar los procesos de distribución de recursos en el marco de los nuevos modelos de desarrollo. Tal como se observa en los casos analizados, existen estereotipos y roles tradicionales que continúan reproduciendo inequidades, las cuales corren el riesgo de ser trasladadas desde los modelos energéticos fósiles hacia nuevas configuraciones descentralizadas y renovables, si no se interviene sobre ellas de manera deliberada y contextualizada.

4. Conclusiones

El análisis realizado a lo largo del artículo puso de manifiesto la compleja tensión que existe entre las dimensiones ambiental y social en el marco de la transición energética, tensionada entre lo “verde” y lo “justo”.

La metáfora cromática del “verde”, que suele asociarse con la sostenibilidad y las políticas ecológicas, no garantiza por sí misma procesos inclusivos y equitativos. El trabajo de campo realizado en emprendimientos productivos en Bolivia, evidenció que las iniciativas orientadas hacia la generación de energía renovable, aunque promueven beneficios ambientales y sociales enfrentan aún desafíos significativos vinculados al reconocimiento y la intervención sobre las desigualdades estructurales presentes en grupos, territorios y comunidades.

Los casos estudiados revelaron que las políticas y proyectos “verdes” pueden reproducir o incluso profundizar exclusiones sociales cuando no se consideran las particularidades de género, clase y etnidad. En particular, la ausencia de una mirada interseccional limita la posibilidad de que grupos históricamente vulnerabilizados, como las mujeres rurales e indígenas, accedan plenamente a los beneficios derivados de la transición energética. Esto se traduce en la existencia de una brecha entre las intenciones respetuosas del ambiente y la justicia energética en todas sus dimensiones: distributiva, procedimental, reparatoria o restaurativa y

la dimensión de reconocimiento. Este hiato sólo puede ser superado mediante un compromiso explícito con la inclusión y la equidad.

Asimismo, el trabajo de campo permitió identificar que la apropiación tecnológica y la capacitación son elementos clave para que las comunidades y las mujeres en particular, puedan ejercer un rol activo en la transición energética, evitando que esta se convierta en un proceso impuesto que reproduce dinámicas de dependencia o exclusión. La participación efectiva de todos los actores sociales, especialmente de aquellos tradicionalmente marginados, es fundamental para construir una transición que sea simultáneamente ecológica y justa.

En síntesis, los hallazgos subrayan la necesidad de repensar las políticas verdes desde un enfoque integral que articule aspectos ambientales y sociales en pos de construir transiciones justas, reconociendo la diversidad de experiencias y condiciones de vida. La transición energética, para ser genuinamente transformadora, debe trascender la mera implementación de tecnologías limpias y abrazar un compromiso ético y político que priorice el bienestar y la equidad para todas las personas involucradas.

El estudio realizado en el marco del proyecto GENERIS, aporta evidencia empírica que contribuye a visibilizar y problematizar estas tensiones, ofreciendo insumos valiosos para el diseño de políticas y prácticas que promuevan una transición energética inclusiva, participativa y responsable. El desafío futuro radica en sensibilizar a los distintos actores involucrados en estos procesos, de cara a consolidar procesos que articulen estas dimensiones, garantizando que lo “verde” sea sinónimo de justicia y sostenibilidad compartida.

5. Bibliografía

- Ballara, M. y Parada, S. (2009). *El empleo de las mujeres rurales: lo que dicen las cifras*. CEPAL. Disponible en: <https://repositorio.cepal.org/bitstreams/19b4f419-8e1a-45e4-8182-265c65e91c6e/download>
- Banco Mundial (2023). *Bolivia Ficha de puntuación de género*. Disponible en: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099040306072330901/pdf/IDU0995251ff0fddf0442a0a0c00b74f2178af21.pdf>
- Fornillo, B. M. (2017). Hacia una definición de transición energética para Sudamérica: Antropoceno, geopolítica y posdesarrollo. *Prácticas de Oficio*, 20(2), 46–53. Universidad Nacional de General Sarmiento, Instituto de Desarrollo Económico y Social.
- Hancock, A. M. (2007). When multiplication doesn't equal quick addition: Examining intersectionality as a research paradigm. *Perspectives on Politics*, 5(1), 63–79. <https://doi.org/10.1017/S1537592707070065>
- Instituto Nacional de Estadísticas – Autoridad de Supervisión del Sistema Financiero - ASFI (2020). Clasificación de cartera de créditos por localidad geográfica y género al 31 de diciembre de 2020, por departamento y por entidad financiera.
- Instituto Nacional de Estadísticas – Autoridad de Supervisión del Sistema Financiero - ASFI (2023). El acceso e inclusión de la mujer a los servicios financieros se incrementó en los últimos años. Nota de prensa. Disponible en: https://www.asfi.gob.bo/images/ASFI/DOCS/SALA_DE_PRENSA/Notas_de_prensa/2024/N7_Nota_de_Prensa - D%C3%ADA_de_la_Mujer.pdf
- Kirsten Jenkins, Benjamin K. Sovacool, Darren McCauley (2018). Humanizing sociotechnical transitions through energy justice: An ethical framework for global transformative change, *Energy Policy*, Volume 117, 2018, Pages 66-74, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.02.036>.
- Listo, R. (2018). Mitos de género en la literatura sobre pobreza energética: Un análisis crítico del discurso. *Energy Research and Social Science*, 38(enero), 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.01.010>
- Lugones, M. (2008). Colonialidad y género. *Tabula Rasa*, núm. 9, 73-101. Disponible en: <https://www.revistatabularasa.org/numero-9/05lugones.pdf>
- Mohanty, C. (1988). Under western eyes: Feminist scholarship and colonial discourses. *Feminist Review*, 30(1), 61–88. <https://doi.org/10.1057/fr.1988.42>
- Muñoz Cabré, M., y Vega-Araújo, J. (2022). *Consideraciones para una transición energética justa y equitativa*. Stockholm Environment Institute. <https://www.sei.org/wp-content/uploads/2022/06/consideraciones-para-una-transicion-energetica-justa-y-equitativa-1.pdf>
- ONU Mujeres (2022). *Inclusión financiera de las mujeres: Hacia la Igualdad de Género en Servicios Financieros: Diagnóstico y Propuesta*. La Paz, Bolivia.

Oparaocha, S., y Dutta, S. (2011). Género y energía para el desarrollo sostenible. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(4), 265–271. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2011.07.003>

Rojo, F. y Blanco, V. (2014). *El desarrollo rural desde el enfoque de género. Guía práctica para técnicos y técnicas rurales*. Unidad para el Cambio Rural (UCAR). Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/el_desarrollo_rural_desde_el_enfoque_de_genero.pdf

Sandwell, K., y Hamouchene, H. (Eds.). (2024). *Desmantelar el colonialismo verde: Energía y justicia climática en la región árabe*. CLACSO; TNI – Transnational Institute. <https://biblioteca-repositorio.clacso.edu.ar/bitstream/CLACSO/251554/1/Desmantelar-el-colonialismo.pdf>

Scott, J. W. (1988). Igualdad versus diferencia: los usos de la teoría postestructuralista. *Estudios feministas*, 14(1), 87–107.

Svampa, M. (2022). Dilemas de la transición ecosocial desde América Latina. *Documentos de trabajo n° especial FC/Oxfam Intermón*. Fundación Carolina/Oxfam Intermón. https://www.fundacioncarolina.es/wp-content/uploads/2022/09/DT_FC_OXFAM_2.pdf

Universidad de Antioquia. (2023). *La justicia en el sector energético colombiano: una mirada holística*. Universidad de Antioquia. Disponible en: https://www1.upme.gov.co/Documents/Enfoque-territorial/Resultados_convenios/3.Justicia%20Energetica.pdf

Urquidi, M., Valencia, H., y Durand, G. (2021). Brecha de ingresos laborales por género en Bolivia. Un análisis de su evolución en el periodo 1993 a 2018. *Revista de análisis económico*, 36, 95–124. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-88702021000200095

Vanegas Díaz, A. M., y Cardoso, M. B. (2024). Beyond Gender: The Intersectional Look at Energy Poverty Through the Experiences of Argentina and Mexico. En L. L. B. Lazaro et al. (Eds.), *Energy Poverty, Justice and Gender in Latin America*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80068-9_11

Van Bommel, N., y Höffken, J. I. (2021). Energy justice within, between and beyond European community energy initiatives: A review. *Energy Research and Social Science*, 79, Article 102157. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102157>

Vasilachis de Gialdino, I. (Ed.). (2006). *Estrategias de investigación cualitativa*. Barcelona: Gedisa.

Yuval-Davis, N. (2017). *Situated Intersectionality and the Meanings of Culture*. Consello da Cultura Galega.

Artículo de reflexión

Participación de las mujeres en cadenas productivas en Bolivia. Una mirada desde el enfoque de género e interseccional

Participation of Women in Productive Value Chains in Bolivia: A Perspective from a Gender and Intersectional Approach

 Mgr. Paola Portillo Calderón¹

¹Socióloga. Responsable de género del Proyecto GENERIS. Cochabamba. Bolivia. paolaf.pc@gmail.com

RESUMEN

En el marco de la implementación y fortalecimiento de la Revolución Productiva Comunitaria y Agropecuaria (Ley N° 144) y el Plan de Desarrollo Económico y Social de Bolivia, se ha venido apoyando la actividad productiva de pequeños y medianos productores de todas las regiones del país, a fin de aprovechar de forma sostenible los recursos naturales potenciales y las capacidades locales para mejorar el aparato productivo del país. Sin embargo, más allá de los principios de reciprocidad, respeto mutuo, cooperación e intercambio, aún persisten grandes brechas de desigualdad y de oportunidades, principalmente para mujeres y jóvenes.

El presente artículo, presenta algunos resultados de la participación de las mujeres en usos productivos de micro, pequeñas y medianas empresas en lo concerniente a la participación laboral, toma de decisiones, acceso y uso de fuentes de energía. En este sentido, plantea cómo la transición energética puede ser una alternativa eficiente para democratizar el acceso y uso a la tecnología, mejore las oportunidades y la participación de las mujeres en toda la cadena de valor de las diferentes actividades productivas y contribuya a la reducción de las brechas de desigualdad de género y aporte en la construcción de una sociedad más justa y equitativa.

Se integran el enfoque de género e interseccional como instrumentos fundamentales para el análisis, en la medida que permiten indagar cómo la yuxtaposición de desigualdades, muchas veces generadas por las mismas políticas públicas (institucionales) o bien por la dimensión simbólica (estereotipos) pueden tener incidencia en la participación activa y protagónica de mujeres en actividades productivas.

Palabras clave: Mujeres. Género. Interseccionalidad. Participación. Energías Renovables.

ABSTRACT

Within the framework of the implementation and strengthening of the Community and Agricultural Productive Revolution (Law No. 144) and the Economic and Social Development Plan of Bolivia, the productive activity of small and



medium-sized producers in all regions of the country has been supported, in order to sustainably take advantage of potential natural resources and local capacities to improve the country's productive apparatus. However, beyond the principles of reciprocity, mutual respect, cooperation and exchange, large gaps of inequality and opportunities still persist, mainly for women and young people.

This article presents some results of women's participation in productive uses of micro, small and medium-sized enterprises regarding labor participation, decision making, access and use of energy sources. In this sense, it suggests how the energy transition can be an efficient alternative to democratize access and use of technology, improve the opportunities and participation of women throughout the value chain of different productive activities; but above all, it can close gender inequality gaps and contribute to the construction of a more just and equitable society.

The gender and intersectional approach are integrated as fundamental instruments for the analysis, to the extent that they allow to investigate how the juxtaposition of inequalities, often generated by the same public policies (institutional) or by the symbolic dimension (stereotypes) may have an impact on the active and leading participation of women in productive activities.

Keywords: Women, Gender, Intersectionality, Participation, Renewable Energy.

1. INTRODUCCIÓN

Existen muchas corrientes desde las ciencias sociales que intentan explicar los problemas ambientales y/o energéticos a partir de la interacción de los diferentes actores sociales con el Estado ante la emergencia de problemáticas coyunturales como la escasez de recursos naturales no renovables, la mitigación del cambio climático y el uso sostenible de recursos estratégicos, entre muchos otros temas.

La sociología ambiental ha intentado comprender la emergencia de la crisis ecológica y el impacto ambiental en algunos territorios a partir de dos posiciones dicotómicas. Por un lado, la posición constructivista que advierte que la naturaleza es meramente una construcción social y por otro, el enfoque realista donde la naturaleza posee absoluta independencia de lo social y que cualquier problema ambiental es una realidad objetiva (Aledo y Dominguez, 2001). Si bien ambas posiciones se presentan de forma antagónica, en la práctica su abordaje es un buen comienzo para comprender la dinámica y la interacción entre las ciencias sociales y el medio ambiente, lo que ha dado lugar al análisis y explicación de problemáticas ambientales actuales.

La gestión de los recursos naturales, como prioridad para alcanzar un desarrollo sostenible requiere fundamentalmente la participación activa de mujeres y hombres desde la equidad e igualdad de oportunidades. Sin embargo, en la realidad, ambos ejercen una relación e interacción distinta con el medio ambiente y el uso sostenible de los recursos naturales y es precisamente a partir de ello que los estudios sobre género y medio ambiente cobran mayor relevancia.

En principio, reconocemos que esta relación se da a partir de los roles sexuales que nos han sido asignados por la sociedad y no por la naturaleza misma de las mujeres; por tanto, un desafío pendiente es pensar más allá de la forzada relación mujer/

naturaleza y más bien generar un debate sobre los efectos diferenciados que tiene cualquier acción medio ambiental o energética sobre mujeres y hombres.

Desde el enfoque de género se reconoce a la mujer como un sujeto ambiental y se aborda las construcciones sociales y culturales que condicionan y determinan su rol, además de los espacios de interacción con sus pares; pero también se proponen acciones concretas que propicien relaciones de igualdad y complementariedad como la participación en la toma de decisiones, corresponsabilidad en las tareas de cuidado y de trabajo doméstico para garantizar el empoderamiento femenino.

En estrecha relación con el enfoque de género, también se incluye un marco analítico interseccional, que permite abordar no solo la multiplicidad de identidades sino también cómo muchas de ellas generan desigualdades que se sobreponen, lo cual enriquece el análisis y aporta estrategias adaptadas a la realidad de cada mujer en un contexto específico.

El proyecto GENERIS, analiza los Sistemas de Energías Renovables Descentralizadas e Inclusivas (ERDIS) desde un abordaje que considera a los individuos como parte esencial en su desarrollo, por ello su interés en promover la inclusión y la participación de todos los actores, además de centrar su atención en la provisión de energía a partir de tecnologías de uso renovable y focalizado en los lugares de consumo. Así, el objetivo del proyecto es fortalecer las capacidades productivas de las Micro, Pequeñas y Medianas Empresas (MIPYMES) con la implementación de ERDIS, para generar empleo, especialmente de mujeres y jóvenes, con impacto e incidencia en políticas públicas desde un enfoque de género.

Precisamente, uno de los componentes del proyecto hace hincapié en el principio de inclusión e igualdad en el uso y acceso de energías renovables para mujeres, fortaleciendo las capacidades individuales y asociativas en cada uno de los emprendimientos productivos de los que forman parte, promoviendo la igualdad y el empoderamiento.

2. METODOLOGÍA

En este marco, el documento pretende aportar al debate con cierta evidencia sobre la participación de las mujeres en las diferentes cadenas productivas con las que el proyecto GENERIS interactúa hasta el momento, (piscicultura, frutas tropicales/amazónicas, producción agro alimentaria y de hierbas aromáticas) a partir de los resultados de un diagnóstico socio económico realizado en los talleres departamentales, entrevistas semiestructuradas e historias de vida a mujeres que forman parte de unidades productivas de tipo asociativo, familiar, comunitario y unipersonal en áreas predominantemente rurales o periurbanas.

El análisis de la información está en función de tres dimensiones, es decir, el espacio comunitario, espacio del hogar y espacio del emprendimiento productivo, desde donde se pone de manifiesto la situación de las mujeres en las diferentes actividades económicas, las oportunidades y vicisitudes que atraviesan para ser parte de las actividades productivas.

Finalmente, es importante manifestar que el proyecto de investigación GENERIS, aún se encuentra en proceso; por tanto, las conclusiones que presentamos son una

primera aproximación a los resultados y más bien surgen como reflexiones a partir de los primeros hallazgos encontrados.

3. RESULTADOS

El proceso de diagnóstico de las cadenas productivas más relevantes de Bolivia inició con un ciclo de nueve talleres departamentales donde emprendedores y emprendedoras socializaron su apuesta por la generación de empleo a través de iniciativas económicas innovadoras que potencian y promueven valor agregado a los recursos naturales de su región. Durante el desarrollo de cada taller se socializó la necesidad de hacer frente al cambio climático a través de la transición a fuentes de energías limpias, así como buscar la viabilidad y el impacto de implementar energías renovables en sus emprendimientos económicos a partir de la socialización de experiencias exitosas en unidades productivas que ya incorporaron tecnologías de energía renovable en su proceso productivo.

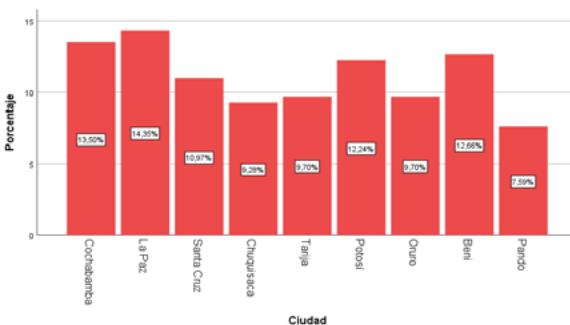
Fruto de la primera interacción con las y los emprendedores, se realizó un proceso de levantamiento de información cuantitativo a través de un cuestionario que nos permitió identificar de manera general los emprendimientos, así como una situación inicial del empleo de jóvenes y mujeres. El cuestionario, recopiló información socio demográfica del responsable, información básica del emprendimiento / asociación sobre la cadena productiva a la que pertenece, tipo de empresa (asociativa, familiar, etc.), el tamaño de la empresa (por número de trabajadores) y antigüedad de la empresa, así como los principales productos que elabora o transforma.

Una segunda parte abordó las fuentes de energía y el tipo de uso que se da en el proceso productivo, detallando minuciosamente el tipo de energía empleado en su proceso productivo a razón de conocer la existencia de dificultades en su uso, como por ejemplo: cortes de luz eléctrica, falta de cobertura, alto precio para su compra (GLP) o recurso escaso (leña), del mismo modo se planteó la posibilidad de incorporar tecnologías energéticas renovables indagando sobre las ventajas que ellos y ellas suponen traería no solo a sus emprendimientos, sino también a su organización o comunidad.

Finalmente, la encuesta indagó sobre la situación socio-laboral de las y los trabajadores del emprendimiento, número de trabajadores/as, áreas en las que trabajan, cargos que ocupan, jornadas y beneficios laborales con los que cuentan. Es importante precisar que la realidad de las micro, pequeñas y medianas empresas en Bolivia, no entran en el esquema formal de trabajo, puesto que las condiciones laborales se ajustan a las necesidades del emprendimiento, tal es el caso de las plantas procesadoras de frutas, de orégano y piscicultura entre otras, cuyo trabajo depende de la temporada de cosecha, la disposición de mano de obra etc.

Es fundamental aclarar que la información presentada no tiene carácter representativo, por tener un sesgo en el muestreo; empero, visualiza el estado de situación de los emprendimientos y de las cadenas productivas en el país.

Gráfico N°1
Emprendimientos productivos/departamentos



Fuente y elaboración: Encuesta nacional MIPYMES, Energías Renovables y Usos Productivos, 2023.

La concentración de emprendimientos productivos en el eje troncal del país (Santa Cruz, La Paz y Cochabamba) responde a una combinación de factores estructurales y socioeconómicos, relacionados también a la densidad poblacional, infraestructura más desarrollada, acceso a mercados y redes de comercio más sólidas, lo que facilita la instalación y sostenibilidad de iniciativas productivas.

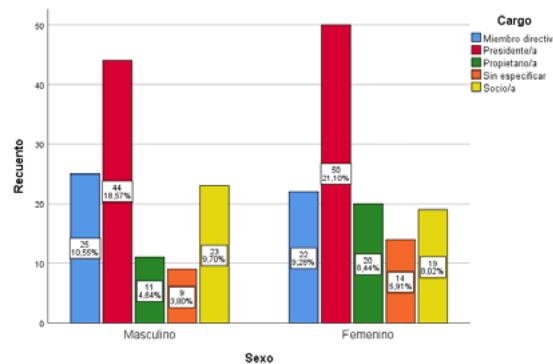
Si bien el eje troncal se posiciona como principal nicho de actividad productiva, los datos reflejan una situación inusual que ubica a Santa Cruz por debajo de los departamentos de Potosí y Beni, esto quizás por la producción masiva de la quinua por emprendimientos de tipo familiar que en las últimas décadas ha cobrado relevancia en mercados internacionales por el alto valor nutritivo que presenta este cereal y en el caso del departamento de Beni, por la concentración de emprendimientos focalizados en productos específicos como la almendra, cacao, la actividad piscícola y los frutos amazónicos, que adquirieron mayor protagonismo en los últimos años, especialmente el procesamiento y comercialización del asaí.

La ausencia de muchos de estos factores limita la participación de emprendimientos de otros departamentos o de áreas rurales más alejadas, que tienen que sortear dificultades de transporte, logística y mercados de comercialización de sus productos, impactando aún más a las mujeres por la combinación de barreras estructurales, socioculturales y económicas que limitan sus oportunidades de iniciar y sostener iniciativas productivas.

Pese al entorno poco favorable para que las mujeres desarrollen actividades económicas, se evidencia que muchas de ellas participan activamente en los principales eslabones de la cadena de valor agrícola, especialmente en la siembra, la cosecha/recolección y la transformación. En el encuentro, las cadenas productivas con mayor presencia de mujeres fueron el procesamiento de frutas tropicales (21%), la transformación de cereales (13,5%) y la producción de hortalizas (13,1%), lo que muestra su rol central en actividades clave de la producción agroalimentaria.

A partir de la amplia participación de las mujeres en la cadena agropecuaria, se indagó sobre los cargos que ocupan dentro de los emprendimientos productivos. Los resultados muestran que el género, como variable independiente, no presenta una incidencia significativa en la participación, ya que mujeres y hombres desempeñan roles similares. Más aún, al asociar el cargo de presidente/a con la condición de propietario/a del emprendimiento, se observa que el 29,54% de las mujeres ocupa estas posiciones, frente al 23,23% de los varones, lo que evidencia una creciente presencia femenina relevante en roles de liderazgo y toma de decisiones.

Gráfico N°2
Cargo que ocupan las mujeres en los emprendimientos



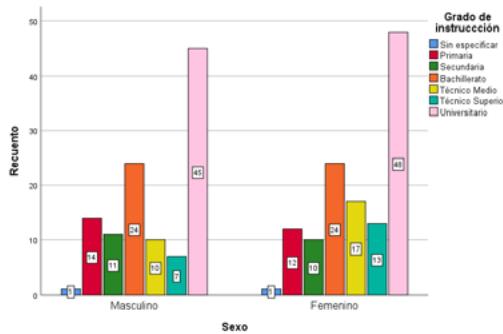
Fuente y elaboración: Encuesta nacional MIPYMES, Energías Renovables y Usos Productivos, 2023.

Otra de las variables que nos interesó indagar fue la edad promedio para emprender. De acuerdo a Global Entrepreneurship Monitor 2019, esta edad se encuentra en el rango de 35 años a 45 años coincidiendo con la etapa en la cual las personas adquieren madurez y/o ya cuentan con estudios técnicos o universitarios concluidos; por tanto, tienen el objetivo de obtener ingresos a través de su propio negocio sin dependencia de un empleador. De acuerdo a los datos de la encuesta realizada, por el proyecto GENERIS, los y las emprendedoras participantes del taller están por encima de ese rango de edad, concentrándose entre los 45 a 59 años, esto quizás se deba a que prima la necesidad de contar con un capital de inversión o bien porque la edad económicamente activa es aprovechada en el empleo dependiente para asegurar el sustento familiar.

El grado de instrucción, tampoco presenta diferencias sustantivas que contribuyan a la desigualdad entre hombres y mujeres, la mayoría de los y las participantes tiene un grado de instrucción universitario o cuenta con un nivel técnico medio o superior, lo cual posibilita que éste cúmulo de capacidades y habilidades adquiridas por su profesión o experiencia de vida pueda servirles para identificar nichos de oportunidades favorables. Si bien los datos muestran una leve diferencia en los niveles de formación entre hombres y mujeres, no puede afirmarse la existencia de una brecha estructural sin estudios adicionales. La formación técnica depende en gran medida de factores contextuales, de acceso y de oportunidades individuales.

El nivel educativo relativamente alto de las mujeres participantes evidencia un potencial importante para fortalecer capacidades técnicas, aunque no necesariamente se traduce en igualdad de oportunidades productivas.

Gráfico N°3
Grado de instrucción de los emprendedores/género



Fuente y elaboración: Encuesta nacional MIPYMES, Energías Renovables y Usos Productivos, 2023.

Otra inquietud fue conocer si el tamaño de la empresa dependía del género de los y las emprendedoras, y evidentemente el 32% de las mujeres pertenecen a un microemprendimiento en relación a los varones quienes sólo el 25% se encuentra en esa categoría de empresa y participa más en unidades económicas medianas 8,5% que las mujeres 6,5%. Un análisis más detallado sobre la actividad específica del emprendimiento respalda estos datos, puesto que los emprendimientos de las mujeres están más relacionados con la transformación de frutas en pulpa para consumo, uso cosmético, medicinal, elaboración de chocolate, etc.

Al introducir la variable uso de tecnologías basadas en energías renovables entre los y las emprendedoras, todos expresaron sus demandas energéticas en función de los requerimientos particulares. La transición energética hacia fuentes de energía renovable se presenta así, como una alternativa no solo para reducir los altos costos de las energías convencionales y la consecuente mejora de su producción, sino también porque su utilización podría tener un impacto diferenciado de género que haga frente a la dependencia y acceso desigual de los recursos energéticos, por la responsabilidad y el rol particular que históricamente se asignó a hombres y mujeres.

Otro factor de desigualdad de género evidenciada en los resultados del diagnóstico fueron las condiciones sociolaborales de las mujeres. Si bien las tasas de empleo femenino van en aumento a nivel nacional, ello obedece principalmente a la necesidad de incremento de ingresos en la economía familiar; sin embargo, los puestos que ocupan las mujeres en las asociaciones/emprendimientos guardan relación con los niveles de participación en ellos, la adopción de decisiones en los niveles de dirección, gerencia o presidencia. Es fundamental garantizar una mejora

en las condiciones laborales de las mujeres que trabajan en esos espacios y darles la posibilidad de conciliar su trabajo productivo y reproductivo.

La jornada laboral, es también uno de los puntos más álgidos cuando se analiza la situación laboral formal e informal de las mujeres y hombres, puesto que urgen acciones que favorezcan el empleo de mujeres y jóvenes. Un contexto laboral flexible considerará la economía del cuidado, como un trabajo adicional de las mujeres que genera desigualdad y que requiere acciones positivas desde los niveles gerenciales o directivos para ampliar las oportunidades de empleo de mujeres.

4. ANÁLISIS

Como mencionamos anteriormente, la información cuantitativa se complementó con información cualitativa a través de entrevistas no estructuradas e historias de vida que nos permitieron comprender desde las narrativas, la participación de las mujeres en los emprendimientos, su interacción con la tecnología y con el medio ambiente desde el enfoque de género y desde una mirada interseccional.

Las entrevistas reflejan distintas percepciones entre las mujeres participantes. Mientras algunas destacan las limitaciones impuestas por la maternidad o el cuidado del hogar, otras subrayan la falta de apoyo institucional o acceso a financiamiento como factores principales que dificultan su desarrollo económico. En conjunto, aproximadamente el 60% de las entrevistadas mencionó barreras vinculadas al tiempo y las responsabilidades domésticas, y un 40% hizo referencia a limitaciones estructurales en el acceso a crédito y formación técnica.

De acuerdo a las entrevistas realizadas, existen algunas iniciativas lideradas por mujeres adultas mayores, quienes, aliviadas por las tareas del hogar y de cuidado en sus años de juventud, emprenden un negocio individual o familiar, principalmente por la existencia de tiempo disponible para dedicarse media o jornada completa a esas tareas o en muchos casos inician su actividad asociativa a edad adulta por la reducción de carga doméstica en sus hogares.

La edad fértil de la mujer donde se lleva a cabo el embarazo y la maternidad, se convierten en un factor que limita las oportunidades laborales de muchas mujeres profesionales que deben renunciar al mercado laboral formal y la vida productiva, precisamente por el rol de cuidado exclusivo asignado a ellas. Una productora piscícola de la zona de Yapacaní mencionaba en relación a la única opción que tenía después de su embarazo, pese a contar con una profesión universitaria:

“yo postulé a varios trabajos, pero piden disponibilidad de tiempo, cosa que no tenemos las mujeres porque hay que cuidar a los hijos y la casa. En cambio, al hombre le llaman del trabajo y el corre porque no tiene nada que hacer”(Productora de Yapacaní).

La maternidad, en este contexto se presenta como una desigualdad adicional que se entrecruza a la existente que afecta directamente en los derechos laborales de las mujeres. El embarazo, así, está relacionado con el rendimiento, ausentismo y permanente hostigamiento llevando inclusive a las mujeres a la renuncia o aceptación de condiciones laborales precarias, lo que se denomina el “sesgo de contratación por género”. En el caso de mujeres emprendedoras por cuenta propia, existe un paréntesis en su participación en el ámbito económico, hasta que sus hijos puedan ser más independientes y cuenten con el apoyo de sus conyugues para iniciar una actividad independiente.

“al principio me costó porque él(esposo) nunca me ayudó. Me tocó además hacer ese rol de dirigente y el rol de mamá, porque yo no iba a una sola reunión sin mi hijita (...) Siempre me han visto con la mayor y luego con la segunda y hasta hace poco con la más pequeña. Siempre manejaba un cuaderno para ellas y sus crayones, sus lápices para que dibujen, pinten. Yo les imprimía dibujos, lo que sea, para que ellas estén distraídas mientras estaba en las reuniones y los viajes por la asociación” (Presidenta de la asociación de asaí –Villa Florida Pando).

De acuerdo a un reciente estudio¹, la tasa de participación laboral de las mujeres sin hijos es del 74%, aquellas que tienen un hijo es 68%, con dos hijos 63%, mientras que las mujeres con tres hijos es de 50% y así a mayor cantidad de hijos, menos posibilidades de acceder al mercado laboral con remuneración económica y beneficios sociales.

El mandato social de cuidado de los hijos y de las tareas del hogar limita el acceso y permanencia en el mundo laboral donde muy pocas tienen la posibilidad de continuar en sus espacios de trabajo delegando a otras mujeres estas responsabilidades. En el caso de las mujeres emprendedoras, esta opción no es posible por el cargo económico extra que ello implica; sin embargo, en muchos emprendimientos las mujeres se organizan realizando turnos de trabajo que les permite dejar a sus niños con otras mujeres, mientras trabajan.

En otro contexto, la edad como factor determinante y diferencial para la participación activa de mujeres y varones se entrelaza con la situación económica de las y los emprendedores. La planta procesadora de papas chips de Yaco, ubicada en una comunidad a 35 Km. de Konani es un emprendimiento comunitario formado por una asociación de productores de papa que al ver la poca rentabilidad de la venta del tubérculo decidieron empezar a transformarla y comercializarla como papas fritas. La composición de este grupo es netamente de adultos mayores, por encima de los 65 años, que han visto cómo la actividad productiva puede evitar la exclusión, soledad y estimula sus capacidades cognitivas y motoras propias de su edad.

Para las y los jóvenes, la situación es similar, los espacios de participación en los sistemas productivos son limitados por la falta de experiencia para forjar nuevos emprendimientos o por no tener las condiciones necesarias como un capital de arranque para iniciar su propio emprendimiento.

4.1 Los hombres trabajan, las mujeres ayudan

Aunque las mujeres constituyen la mayoría en varios de los emprendimientos analizados, persiste una percepción cultural de que su labor es solo de apoyo. Este discurso invisibiliza el papel central que desempeñan en tareas técnicas esenciales —como la alimentación y control sanitario de los peces—, que requieren conocimiento y dedicación. Por tanto, la expresión ‘ayuda’ refleja más un imaginario de género que una realidad productiva.

El abordaje de las tres dimensiones de análisis de las narrativas de las mujeres entrevistadas, nivel comunitario, el hogar y propiamente del emprendimiento, también nos permite dilucidar las diferentes intersecciones que se entrecruzan entre el nivel comunitario, donde muchas mujeres, principalmente relacionadas

**1 Estudio realizado por Banco Interamericano de Desarrollo:
Trabajar y ser mujer en Bolivia, 2020**

a la piscicultura en zonas de colonización expresan su vinculación con el medio ambiente, el cambio climático, la migración y el trabajo que ahora desarrollan,

“¿Afuera ya no había vida, ya no llovió no ve? Casi 4 años o 5 no llovió, no había producción, ni maíz ni trigo ni alverja, papita también apenas para comer no más, no había lluvia, ni para regar ni para comer papita así una carguita y eso no abastece si comemos” (Piscicultora, Puerto Villarroel)

Así mismo, la migración desde zonas andinas o fruto de la relocalización de las zonas mineras generaron acceso a la tierra diferenciado y condicionado por la variable género.

[Mi hermana mayor] ella ha venido primero y ha venido con algunos, ella ha venido primero, vamos allá hay vida, así nomás hemos venido. Aburrido mucho sol, así... así ya que puedo hacer dije y nos hemos venido, lotecito he agarrado. No querían dar a las mujeres también lote... no querían, mujeres no trabajan, la mujer cómo va a mantener, de verdad no hacemos caso también nosotras, no levantamos como hombre, solo ayudamos. (Piscicultura Puerto Villarroel).

La **segregación ocupacional** vinculada a la actividad productiva en los emprendimientos, relega la responsabilidad del cuidado de los peces, de las plantas de orégano, cuestiones que requieren cuidados específicos, de detalle, de fragilidad, de mantenimiento de la vida; así, el trabajo de las mujeres es percibido como “ayuda” al trabajo de los hombres, en alguna medida es subvalorado: “*hay cosas de hombres que no pueden hacer [las mujeres] pero siempre hay algo para la mujer, más liviano y de ayuda en el faeneo*” (Piscicultora, Puerto Villarroel).

En general, en la mayoría de las actividades productivas las mujeres solo “ayudan a sus compañeros”, restando el esfuerzo y compromiso suyo en las responsabilidades que tienen dentro los emprendimientos, en la cadena de piscicultura, por ejemplo, las mujeres son las responsables, de forma casi exclusiva de alimentar los peces y realizar el mantenimiento de los estanques midiendo el PH de manera diaria; sin embargo, no existe una valorización de su trabajo por parte suya, más aún cuando el conocimiento sobre ese tema fue aprendido de manera autónoma por la transmisión de sus compañeros que sí recibieron capacitación.

Por otro lado, la informalidad de muchos de los emprendimientos productivos ocasiona que las mujeres obtengan ingresos por debajo de lo que perciben los hombres, precisamente porque no hay una valoración de que las actividades que realizan son concebidas también como un trabajo. La “sensibilidad ambiental” no debería ser la única posibilidad para que las mujeres sean parte de la interacción y el uso sostenible de los recursos naturales, de ahí surge el reto de insertar a las mujeres en temas energéticos, y no hablamos de formación solamente, sino de uso y acceso a la tecnología en el proceso de transición.

4.2 Las mujeres trabajan, los hombres ayudan

Una segunda dimensión de análisis de los hallazgos es el espacio del hogar. Aquí la frase anterior es inversa, los hombres ayudan y las mujeres trabajan en las tareas domésticas y de cuidado, la asignación de roles es clara y socialmente aceptada por ambos. La carga mental femenina obliga a que las mujeres prioricen sus tareas y sólo después puedan realizar otros trabajos fuera del hogar.

En general, son las mujeres las responsables exclusivas de las tareas domésticas como la limpieza, la preparación de alimentos, el lavado de ropa y el cuidado de las/os hijas/os, lo que resulta en una “doble jornada” de trabajo productivo y reproductivo que limita sus oportunidades y capacidades de empoderamiento y actoría en otros espacios.

“Todos los días se trabaja, carpir coquita, desyerbar las orillas de los estanques, lo que necesitamos. Empezamos 6-7 arrinconando un poco la casa porque no puedes dejar así, un poco ordenar, salimos a trabajar, al mediodía descansamos un rato hasta la tarde se trabaja también” (Piscicultora, Puerto Villarroel).

En este sentido, el trabajo en torno a los estanques es percibido como extensión del trabajo doméstico. Las tareas en la producción piscícola, por ejemplo, a cargo de las mujeres son el monitoreo de los estanques, la alimentación y el mantenimiento diario. Este trabajo se vincula fuertemente con las actividades comunes del hogar vinculadas al cuidado, además que la mayoría de los estanques están ubicados cerca del hogar.

Finalmente, en el espacio del emprendimiento como tal, hay una ausencia de incentivos o iniciativas que fomenten el empleo y la permanencia de las mujeres, sean unidades económicas de tipo asociativo, familiar o unipersonal. Entre las oportunidades de empleo para mujeres y la posibilidad de tener autonomía en la consolidación de una iniciativa económica existe un evidente sesgo de género, porque son los hombres quienes tienen mayor facilidad para acceder a créditos, lo que afecta en su autonomía financiera.

5. CONCLUSIONES

En este artículo, analizamos la participación de las mujeres en algunas de las cadenas productivas con las que el proyecto GENERIS trabaja. Después de analizar los resultados del diagnóstico socio económico a los emprendimientos y complementar la información con los hallazgos a partir de las narrativas de las mismas actoras, contamos con elementos suficientes para sugerir que cualquier política ambiental o energética debe partir de una comprensión profunda de las problemáticas sociales que subyacen por las desigualdades que pueden tener incidencia en la generación de nuevas formas de desigualdad sino son abordadas desde un enfoque integral.

El análisis de las desigualdades por razones de género y con perspectiva interseccional, nos permite vislumbrar la interacción de los múltiples factores de desigualdad que complejizan la situación pero que paradójicamente se convierte en una herramienta analítica fundamental para explicar las superposiciones y cómo las políticas públicas pueden abordarlas para alcanzar la autonomía y el empoderamiento económico de las mujeres.

La promoción de sistemas de inclusión de energías renovables descentralizadas en MIPYMES, es una oportunidad valiosa para mejorar la calidad de vida de comunidades en condiciones de vulnerabilidad económica, pero sobre todo haciendo énfasis en la participación, toma de decisiones y empoderamiento de mujeres y de este modo contribuir a cerrar las brechas de desigualdad laboral y

de oportunidades. En el caso de mujeres piscícolas, por ejemplo, ante la carencia de prácticas de formación técnica por sesgo de género, se ha ido cambiando progresivamente con las acciones de instituciones que han apostado por la igualdad de oportunidades y el empoderamiento como es el caso de Peces para la vida². Peces para la Vida es una organización que impulsa el desarrollo sostenible de la cadena piscícola en Bolivia, promoviendo prácticas inclusivas y equitativas entre mujeres y hombres.

La informalidad laboral es una constante en la participación de las mujeres en las actividades productivas, salvo algunas excepciones como aquellas que están empleadas en las plantas procesadoras de alimentos de tipo público-privado como la de orégano en Chuquisaca y la planta procesadora de manzanilla en Iscayachi (Tarija); por ello es fundamental que las iniciativas de Estado de apoyo a la producción contemplen el enfoque de género para garantizar el acceso y permanencia de mujeres en el ámbito productivo, a la vez que busquen la conciliación laboral y familiar.

Como menciona un informe de la FAO referido a la cadena productiva piscícola, es importante contar con información sobre las actividades de pesca y acuicultura desde un enfoque de género, pero además prestar atención a todos los eslabones de la cadena de valor donde las mujeres se involucran (FAO, 2016), solo así puede visibilizarse el aporte de las mujeres y se identifican los espacios en los cuales es importante trabajar el fortalecimiento de la formación, capacitación, etcétera.

En este sentido, resulta fundamental promover la realización de estudios más profundos y sistemáticos que aborden con datos relevantes y actualizados la situación de género y la participación de las mujeres en los emprendimientos productivos en Bolivia. Contar con investigaciones que integren evidencia cuantitativa y cualitativa permitirá comprender mejor las brechas existentes, los factores estructurales que las generan y las oportunidades para fortalecer la autonomía económica y el liderazgo de las mujeres en las diferentes cadenas de valor

² “Peces para la vida-Empoderamiento y sostenibilidad” es una iniciativa que impulsa la acuicultura y pesca en Bolivia, generando oportunidades económicas para mujeres y fomentando la nutrición familiar para reducir la pobreza con seguridad alimentaria. Mayor información en: <https://pecesvidaempoderamiento.org/>

6. REFERENCIAS

- Aledo, A., & Domínguez Gómez, J. A. (2001). *Sociología ambiental*. Grupo Editorial Universitario. <https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/2725>
- Urquidi, M., Tejerina Camacho, V., Raphael, M., y Durand, G. (2020). *Trabajar y ser mujer en Bolivia*. <https://doi.org/10.18235/0002914>
- FAO. 2016. *El rol de la mujer en la pesca y la acuicultura*. Nota de orientación. <https://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/881805/>
- Iñaki Peña Legazkue; Guerrero Maribel; González José; Montero Javier (2019). Global Entrepreneurship Monitor (GEM). Informe GEM España 2019-2020. https://observatoriodeemprendimiento.es/gem-spain/wp-content/uploads/2020/06/Informe-GEM-Espa%C3%B1a-2019_20.pdf
- Ley 144 de 2011. Revolución Productiva y Comunitaria Agropecuaria. Junio, 26 de 2011. https://www.insa.gob.bo/images/normativa/LEYES/LEY_144-Ley_de_Revolucion_Productiva_Comunitaria_Agropecuaria.pdf

Proyectos de ingeniería aplicada

Análisis espacial del potencial de electrificación de estanques destinados a la piscicultura en áreas tropicales de Bolivia, y primera estimación de la potencia agregada de generación distribuida, el ahorro en combustibles y emisiones de CO₂

Spatial analysis of the potential for electrification of ponds intended for fish farming in tropical areas of Bolivia and first estimate of the added power of distributed generation, fuel savings and CO₂ emissions.

 Michelle Fernández-Vázquez¹  Miguel Fernández-Fuentes²

Ingeniera ambiental / Innovación Sostenible y Escuela Militar de Ingeniería / Cochabamba / Bolivia / tdimichelle@gmail.com

Ingeniero eléctrico / IMMERSIVE SRL - Proyecto GENERIS / Cochabamba / Bolivia / miguel@immersive-srl.com

RESUMEN

Citar como: Fernández-Vázquez, M., Fernández-Fuentes, M. Análisis espacial del potencial de electrificación de estanques destinados a la piscicultura en áreas tropicales de Bolivia, y primera estimación de la potencia agregada de generación distribuida, el ahorro en combustibles y emisiones de CO₂. *Revista Journal Boliviano De Ciencias*, 21(58) 117-134 <https://doi.org/10.52428/20758944.v21i58.1387>

Recepción: 16/07/2025

Aceptado: 17/11/2025

Publicado: 30/12/2025

Declaración: Derechos de autor 2025 Fernández-Vázquez, M., Fernández-Fuentes, M. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](#).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



La piscicultura es una actividad en expansión en el Trópico de Cochabamba, Bolivia, y representa una oportunidad clave para el desarrollo económico local bajo criterios de sostenibilidad. Sin embargo, el uso de motobombas a gasolina para el llenado de estanques y también la oxigenación, genera emisiones significativas de CO₂ y altos costos operativos. Este estudio realizó un análisis espacial para estimar el potencial de electrificación de estanques piscícolas mediante sistemas de generación distribuida interconectados a la red eléctrica nacional. Se utilizaron datos geográficos en QGIS, considerando áreas buffer de 100 m y 500 m alrededor de la red eléctrica. Se determinó que el 83.57% de los 17,396 estanques registrados en 2023 se encuentran dentro de estas áreas, lo que representa una oportunidad significativa para reducir emisiones. La sustitución de combustibles fósiles por sistemas de generación distribuida permitiría evitar la emisión de aproximadamente 5856,3 toneladas de CO₂ por año, a través de la instalación de 2,49 MWp de paneles fotovoltaicos, generando de 30,7 GWh/año y una necesidad de inversión en la región de 6,7 millones de USD para este universo. Este cambio, además sería rentable para el piscicultor, debido al alto costo de la gasolina.

Estos resultados evidencian el alto potencial de implementación de tecnologías limpias en la piscicultura boliviana, alineadas con los objetivos de transición energética justa.

Palabras clave: Usos productivos de la energía, transición energética, generación distribuida fotovoltaica. Electrificación de la piscicultura.

ABSTRACT

Fish farming is a growing activity in the Tropics of Cochabamba, Bolivia, and represents a key opportunity for local economic development under sustainability criteria. However, the use of gasoline-powered water pumps for pond fill and oxygenation generates significant CO₂ emissions and high operating costs. This study conducted a spatial analysis to estimate the electrification potential of

fish farming ponds through distributed generation systems interconnected to the national electric grid. Geographic data were processed using QGIS, considering 100 m and 500 m buffer areas around the power grid. The results showed that 83.57% of the 17,396 ponds recorded in 2023 are located within these areas, presenting a significant opportunity to reduce emissions. Replacing fossil fuel use by distributed generation systems could prevent approximately 5.856,3 tons of CO₂ emissions per year, through the installation of 2,49 MWp of photovoltaic panels, generating 30,7 GWh/year and an investment need in the region of 6,7 million USD for this universe. This change would also be profitable for the fish farmer, due to the high cost of gasoline.

These findings highlight the strong potential for implementing clean technologies in Bolivian aquaculture, aligned with the goals of a just energy transition.

Keywords: Productive uses of energy, Energy transition, PV distributed generation. Fish farming electrification.

1. Introducción

Las actividades productivas deben encaminarse a la eficiencia y la sostenibilidad, incluyendo los aspectos ambientales, sociales, económicos y tecnológicos que mejoren su eficiencia y rentabilidad. Esto resulta prioritario al considerar que entre las principales amenazas y problemas que enfrenta la humanidad están la falta de alimento y los efectos del cambio climático. El ser humano se encuentra en un estado de vulnerabilidad dependiente de la posición geográfica y del desarrollo tecnológico para asegurar la supervivencia. En el sector alimentario es importante fomentar la generación de economías locales, ofrecer oportunidades de empleo e incrementar el nivel de bienestar de los productores, resaltando la importancia de un crecimiento de la producción de productos piscícolas (FAO, 2020; Gómez *et al.*, 2022).

La piscicultura puede tener un impacto ambiental positivo o negativo, dependiendo de las prácticas de producción utilizadas. La producción responsable puede contribuir a la conservación de los ecosistemas usando el agua de manera eficiente, la gestionando correctamente los residuos y protegiendo la biodiversidad y el entorno local. No obstante, una piscicultura intensiva mal manejada puede llegar a provocar disminución y/o contaminación del agua, pérdida de hábitats naturales, eutrofización de los cuerpos de agua, y pérdida de ecosistemas y biodiversidad (Faunagua, 2024). Por lo tanto, al igual que en otras actividades productivas como la agricultura, es de gran importancia disminuir la mayor cantidad posible de impactos ambientales negativos.

La piscicultura se expande rápidamente en la región del trópico de Cochabamba llegando a promover una permanente construcción de nuevos estanques de cultivo. Muchos estanques son construidos en espacios que solían ser pastizales o cultivos cercanos a centros poblados, pero a la larga esta situación podría llevar a la destrucción de bosques para la construcción de estanques y la transformación de ecosistemas acuáticos naturales (Faunagua, 2024).

Cultivar peces, implica crear criaderos en piscinas o estanques, por lo cual es fundamental realizar el llenado de agua y la oxigenación adecuada de los estanques para optimizar el crecimiento de los peces a través de máquinas que demandan fuentes de energía para su utilización constante. El método más común es el uso

de motobombas que sirven para llenar los estanques de agua regularmente y también, en el caso de la oxigenación, absorben agua del estanque y la lanzan al aire, provocando que, en la caída, el agua entre en contacto con el oxígeno y remueva el volumen de la piscina (IMMERSIVE SRL, 2024).

Los informes del proyecto GENERIS sobre estudios de caso realizados en la comunidad de Mariposas, Municipio de Puerto Villaruel en Cochabamba, donde participó la Asociación de Piscicultores 1ro de Mayo conformada por 73 familias productoras, muestran que los estanques para piscicultura en la zona tienen en promedio una superficie de 20 m x 50 m de área y produce 1000 kg de pescado en un periodo de 8 a 10 meses. La oxigenación es una práctica extendida en la región y se hace una vez a la semana por 3 horas aproximadamente por cada estanque, utilizando motobombas a gasolina. Este equipo consume en promedio 4,28 litros de gasolina en cada proceso, totalizando 171,4 litros de gasolina al año, emitiendo 402,9 kgCO₂/año (Faunagua, 2024; IMMERSIVE SRL, 2024).

La disponibilidad de motobombas es generalizada en la zona, prácticamente todos los productores tienen más de un equipo, con una potencia entre 3 HP y 4 HP y su difusión ha sido tal, qué en los paquetes de los programas de apoyo a piscicultores de diferentes proyectos gubernamentales, la motobomba es un equipo integral, junto a la excavación de estanques, dotación de alevines y otros.

Adicionalmente, la escasez de gasolina en la región se ha agudizado, al igual que en el resto del país, comprar gasolina en bidones es muy dificultoso, ya que existe prioridad para el autotransporte, medidas como el DS 4910 de 12 de abril de 2023 y el DS 5353 de 19 de marzo 2025 evidencian esta situación.

Es este contexto, el cambio de fuente energética de gasolina a electricidad proveniente de la energía solar, es una opción que el proyecto GENERIS decidió estudiar de manera práctica. Aunque existe un hecho particular, la oxigenación se realiza en la madrugada, en horarios donde no hay energía solar. Esta situación plantea como opción convencional, el diseñar un sistema fotovoltaico con baterías para el almacenamiento de energía y, poder accionar la bomba en horarios donde no hay acceso a la radiación solar, sin embargo, esta solución que incluye baterías, es altamente costosa (Fernández F. 2019).

De esa manera, se decidió utilizar un esquema de generación distribuida (GD), mucho más económico y que no utiliza baterías. En este sistema de GD los paneles fotovoltaicos generan electricidad y a través de un inversor de red, la inyectan directamente a la red de consumo en 220 V AC; en caso de existir un excedente, es posible inyectar esa energía a la red de distribución, utilizando un medidor bidireccional. En el marco del Decreto Supremo (DS) 4477 (2021) y el DS 5167 (2024) que permiten el intercambio de energía entre la red eléctrica y los sistemas fotovoltaicos, se puede reponer la electricidad consumida en la madrugada durante el resto del día, así sería posible utilizar la electricidad de la red en cualquier horario. En términos simples, la red actúa como una batería. La normativa permite que se realice un balance bianual de entregas y retiros de energía.

La principal condición para utilizar este esquema, es el acceso a la red eléctrica por parte de los piscicultores. Los estanques de aproximadamente 1000 m², están distribuidos al interior del predio de los productores, a lo largo de pasajes internos de gran longitud; para poder llevar la electricidad a los estanques de peces es necesario realizar la construcción de redes de distribución internas que permitan

llegar a todos los estanques con tomas de fuerza, para que ahí se enchufe la bomba eléctrica portátil o el oxigenador. En los casos de estudio, se ha identificado la necesidad de construir redes distribución interna que van desde 250 m hasta 750 m de longitud.

Bajo esas premisas se realizaron instalaciones prototipo demostrando que esta medida, puede disminuir la demanda de gasolina para esta actividad productiva, pero también convertirse en una forma de disminuir el impacto ambiental negativo de la producción piscícola del país, además de mejorar la rentabilidad de esta actividad económica.

Sin embargo, surge el cuestionamiento si esta alternativa planteada es válida para un universo importante de piscicultores, pues si bien el recurso solar es ampliamente aprovechable y disponible en la zona (Fernández Morales, 2012), el acceso a la red en áreas rurales puede ser, en principio una limitante para utilizar la opción de generación distribuida.

Con las condicionantes descritas, el alcance de esta investigación pretende estimar el potencial de estanques dedicados a la piscicultura que podrían estar conectados a la red distribución, ubicados en el trópico cochabambino, utilizando un Sistema de Información Geográfica e imágenes satelitales de la zona, con el fin de desplazar el consumo de combustibles fósiles de motobombas y oxigenadores, y reemplazarlos por equipo eléctrico. Paralelamente, en cada predio se instalaría un sistema fotovoltaico de generación distribuida, el que posibilitaría generar toda la electricidad demandada por las bombas y oxigenadores, y al realizar el intercambio de energía con la red, no incrementaría la factura de las familias. Bajo esta acción se lograría disminuir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero y los costos de producción piscícola bajo un enfoque de transición energética justa.

2. Metodología

De manera específica se planteó la posibilidad de realizar un análisis espacial de los estanques de piscicultura y su relación con la red de baja tensión en las zonas analizadas. En las áreas coincidentes se realizarían análisis de cobertura suponiendo una extensión de la red de baja tensión de 100 m (límite para áreas de concesión de la empresa eléctrica), hasta un máximo de 500 m.

Para realizar esta investigación se partió de la información generada por Faunagua, quienes referencia más de 22.000 estanques para piscicultura en 10 Municipios de Cochabamba y Santa Cruz.

De esta manera se obtuvieron diferentes capas de información geográfica; del estudio de Faunagua (2024), se analizó un archivo shape con la georreferenciación de estanques presentes en 2023 en los municipios de Villa Tunari, Puerto Villaruel, Chimoré, Shinahota y Entre Ríos. También se obtuvo un archivo shape de la Red Eléctrica de Bolivia, realizado por el Ministerio de Hidrocarburos y Energía.

Ambas capas de información fueron tratadas en QGIS 3.4, superponiéndolas y posteriormente generando un área Buffer de 100 m y de 500 m alrededor de las líneas de la Red. Estos rangos fueron considerados en base a los criterios de cobertura

Aquellos estanques que se encontraron dentro de estas áreas buffer se seleccionaron para posteriormente calcular el porcentaje de estanques que podrían oxigenarse a partir de un sistema de generación distribuida que alimente las bombas de agua.

Una vez que se identificaron los estanques se los segmentó en función a su distancia a la red. Con el universo probable que tenga acceso a la red, se procederá a realizar extrapolaciones sobre la cantidad de gasolina que podrá desplazarse, las emisiones evitadas, la potencia total en generación distribuida que se podría instalar, las inversiones necesarias y las implicaciones de esta medida para impulsar un proceso de transición energética en este sector productivo.

3. Resultados

3.1 Análisis espacial del acceso a la red eléctrica de estanques de piscicultura

La cantidad de estanques presentes en el Trópico Cochabambino en el año 2023 fue de 17396 (Faunagua, 2024). Estos se observan en la Figura 1, y fueron superpuestos a la capa de la Red que se observa en la Figura 2.

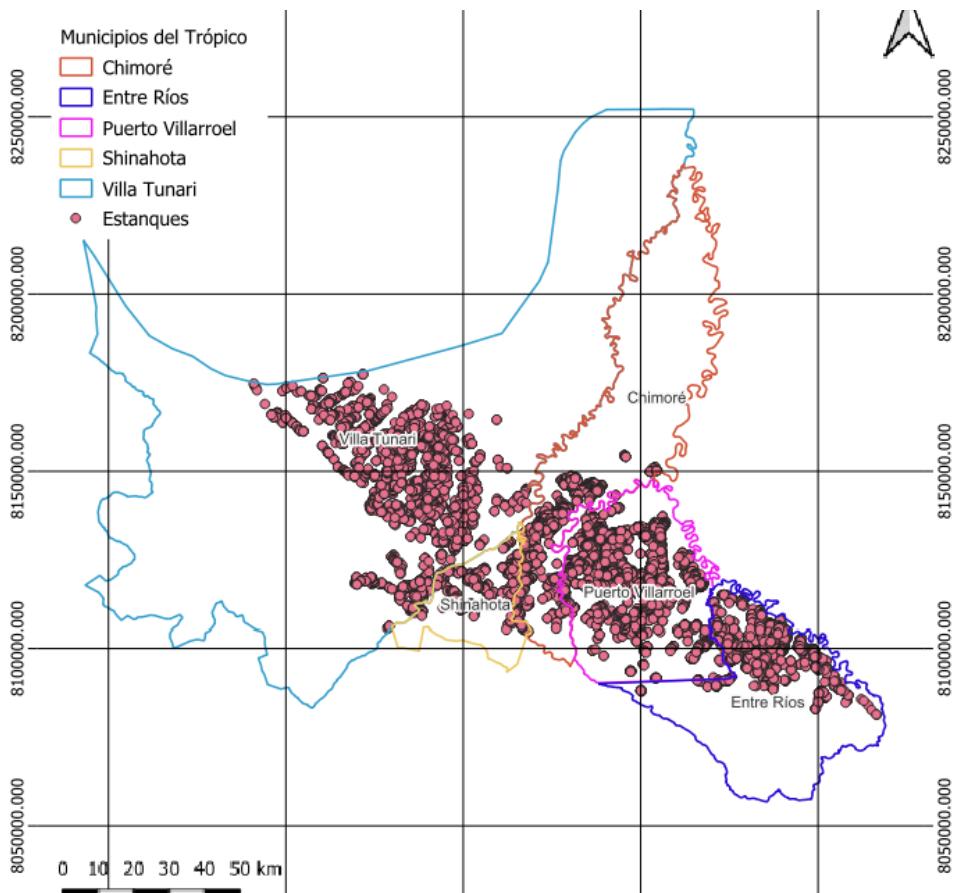


Figura N° 1. Estanques piscícolas del Trópico de Cochabamba. Fuente: Faunagua, 2024)

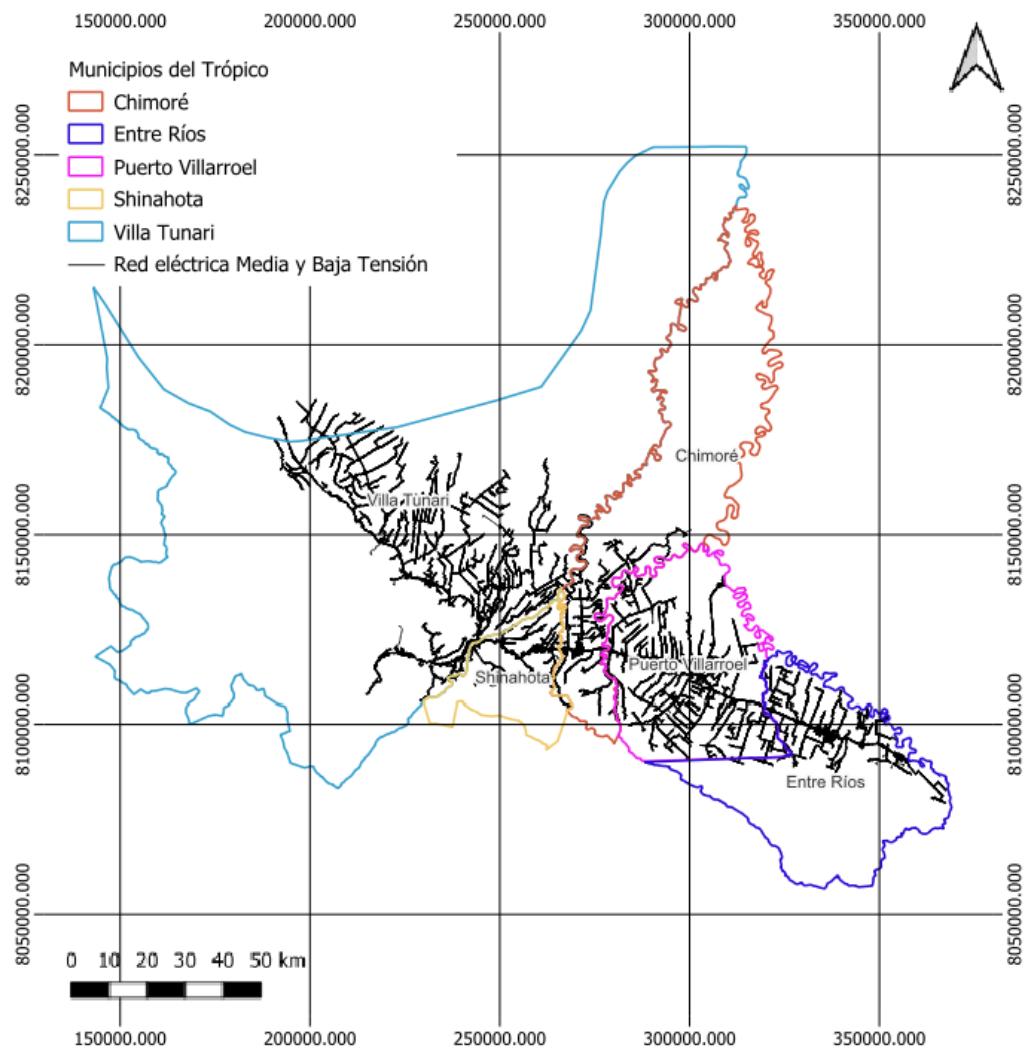


Figura N° 2. Red Eléctrica en el Trópico de Cochabamba. Fuente: Faunagua, 2024.

En la Figura 3 se muestra una parte del procesamiento de imágenes en el sector sureste del Trópico de Cochabamba, entre los municipios de Puerto Villaruelo y Entre Ríos. Las líneas moradas representan un área buffer de 100 m alrededor de la red, mientras que las líneas naranjas representan el área buffer de 500 m alrededor de la Red eléctrica.

Posteriormente, se muestran en verde oscuro los estanques que se encuentran a 100 m o menos de distancia de la Red, mientras que en rosado se representan los estanques que no entran dentro del primer área buffer.

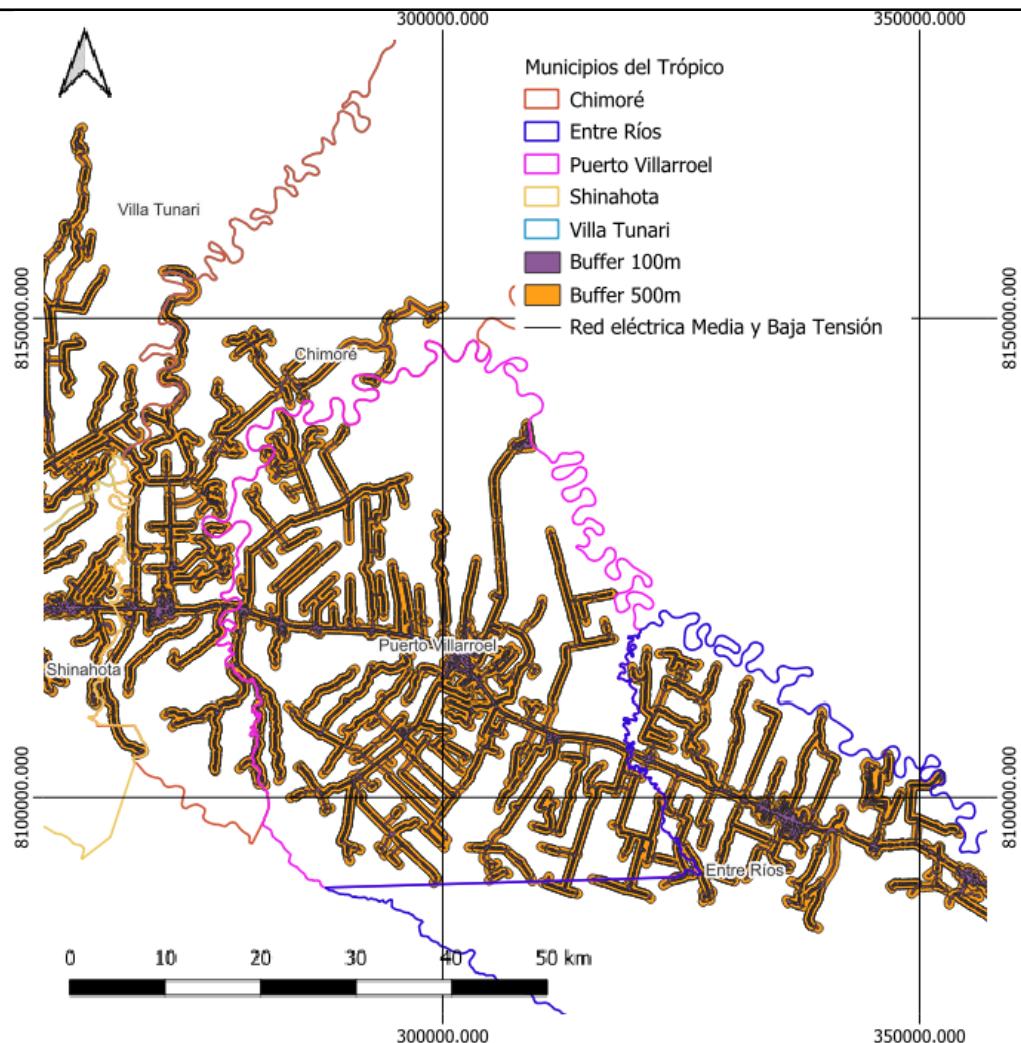


Figura N° 3. Áreas Buffer en Entre Ríos (a 100 m y 500 m). Fuente: Elaboración propia.

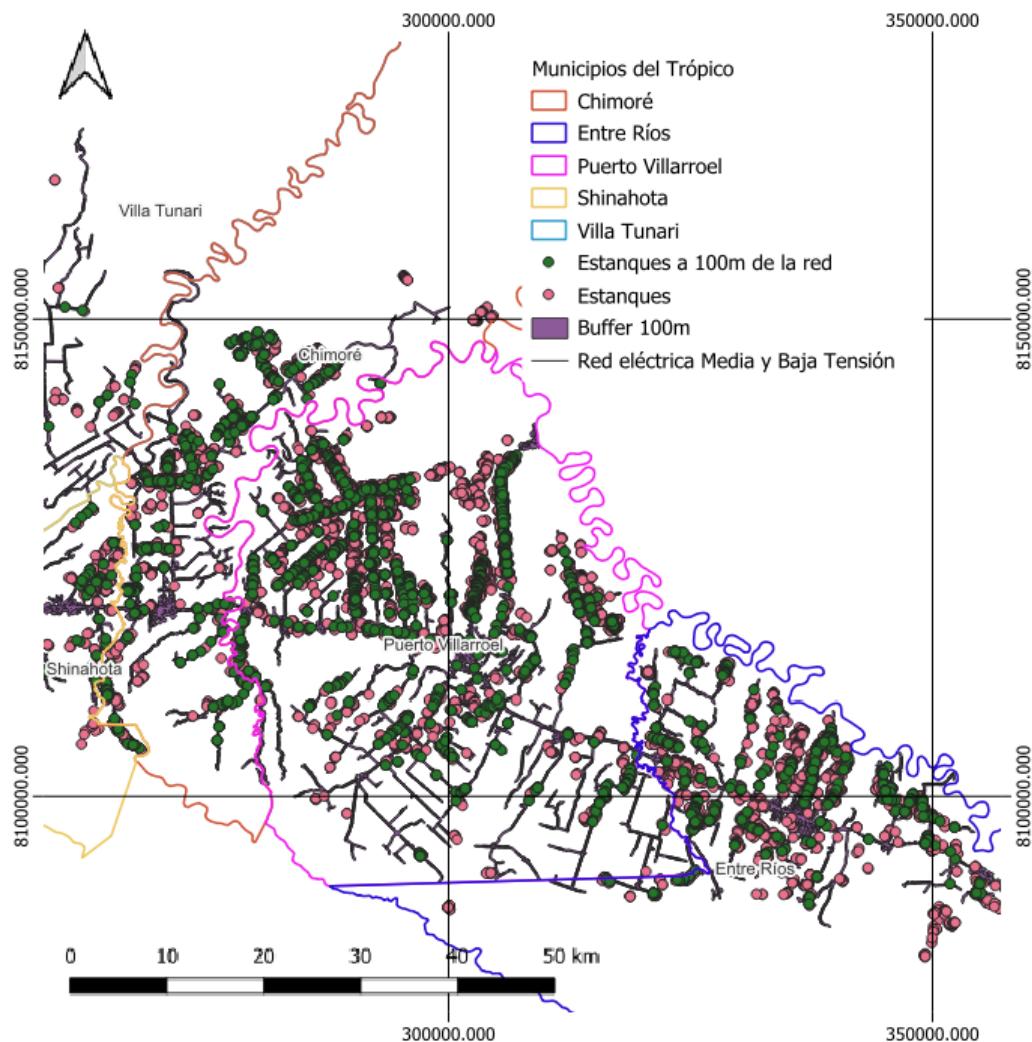


Figura N° 4. Estanques ubicados a 100 m o menos de la Red. Fuente:
Elaboración propia.

Por último, en verde claro se encuentran representados los estanques se ubican hasta a 500 m de distancia de la Red, siendo factible su oxigenación con sistemas de generación distribuida.

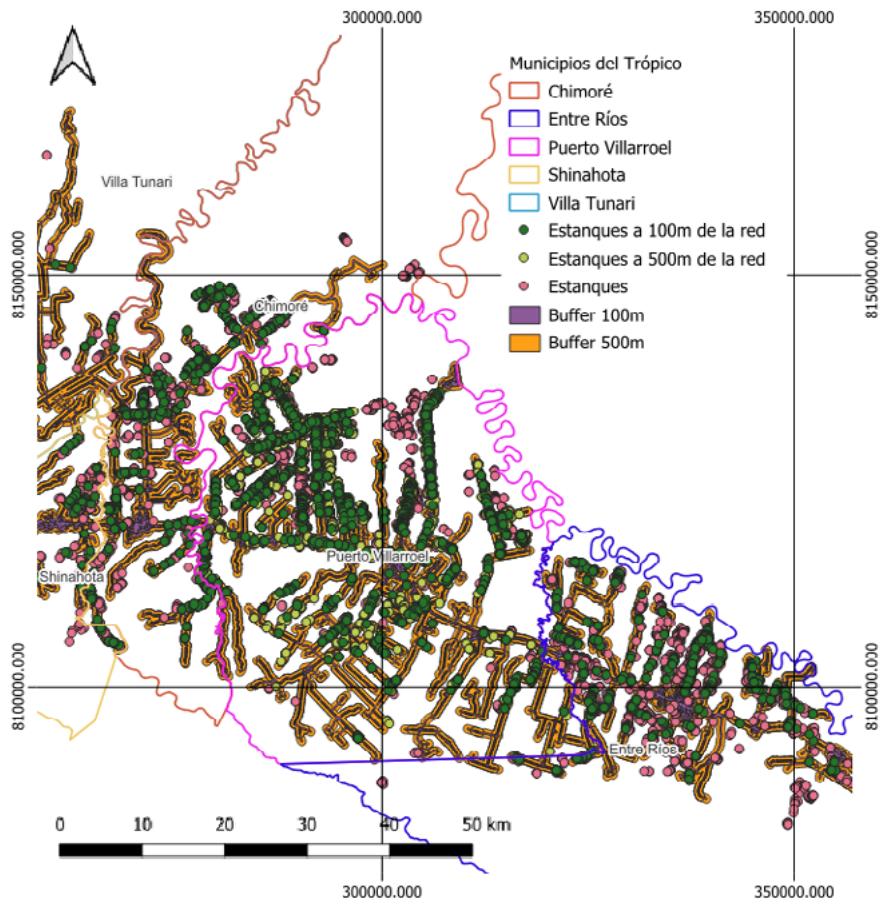


Figura N° 5. Estanques con posibilidad de conexión a la Red (500 m de distancia). Fuente: Elaboración propia.

Los datos numéricos de los estanques analizados se encuentran en la Tabla 1, la misma indica que el 83.57% de los estanques para producción piscícola del Trópico de Cochabamba podría obtener electricidad de la Red para conectar sus bombas eléctricas y dejar de utilizar gasolina como combustible. Cabe recalcar que este estudio considera la distancia a la Red como factor determinante para la transición energética de esta actividad productiva.

Tabla N° 1. Estanques a 100 m, 500 m y más de 500 m (S/C) de la Red

Municipio	Es 100m	%Es 100m	Es 100-500m	%Es 100-500 m	EsS/C	%S/C	EsTotales
Chimoré	608	30.74	1.169	59.10	201	10.16	1.978
Entre Ríos	635	23,12	1.592	57,98	519	18,90	2.746
Puerto Villarroel	2.069	26,50	4.558	58,38	1.181	15,13	7.808
Shinahota	179	27,67	394	60,90	74	11,44	647
Villa Tunari	1.406	33,34	1.927	45,70	884	20,96	4.217
Trópico de Cbba.	4.897	28,15	9.640	55,42	2.859	16,43	17.396

Fuente: Elaboración propia.

Donde, Es100 m: cantidad de estanques a 100 m o menos de la red; %Es100 m: porcentaje de estanques a 100 m o menos de la red con respecto al total de estanques por municipio; Es 100-500 m: cantidad de estanques ubicados de 100 m a 500 m de la red; %Es 100-500 m: porcentaje de estanques de 100 a 500 m de la red con respecto al total de estanques por municipio; EsS/C: cantidad de estanques a más de 500 m de la red, %S/C: porcentaje de estanques a más de 500 m de la red. De esta manera se tendría un universo de 14.537 estanques en el área de cobertura de la red eléctrica.

3.2 Descripción del paquete tecnológico a implementar

El paquete tecnológico a implementar está conformado por 3 componentes: a) la red de distribución interna que permite acercar la electricidad a los estanques de los piscicultores, en condiciones de calidad de energía y seguridad (ante lluvias y otros incidentes); b) los equipos que utilicen la electricidad: básicamente bombas eléctricas adaptadas para que puedan funcionar como equipos portátiles (similar a las motobombas que utilizan y que se desplazan a cada estanque) y los oxigenadores eléctricos; c) el sistema fotovoltaico de generación distribuida que permite la generación de electricidad limpia y, el intercambio de energía con la red eléctrica.

En cuanto a la extensión de la red eléctrica de servicio público, es una responsabilidad y atribución de la empresa distribuidora. En la zona, una gran mayoría de los productores tienen conexión a la red, por lo que no se constituye en una barrera. En cambio, las extensiones internas de la red, para llegar a los estanques, son de responsabilidad del productor. GENERIS ha realizado instalaciones piloto, y de estos casos se ha podido estimar los costos de extensión de redes, que cumplan las exigencias técnicas según las normas (caídas de voltaje, pérdidas, etc.) cuidando que los diámetros de conductores y otros sean los correctos. Una ventaja en la zona objeto del estudio, es que la topografía es llana, sin pendientes abruptas y otros

accidentes geográficos. Justamente esta topografía llana hace que el territorio sea apto para piscicultura.

Sobre esta base de campo, se ha considerado el caso de mayor extensión (750 m para 14 piscinas, 250 m para 5 piscinas) y estas condiciones han permitido establecer un costo promedio unitario por estanque.

La selección de la energía solar como fuente renovable para su utilización en el trópico de Cochabamba, ha sido realizada considerando la radiación solar promedio de la región Primero de Mayo, obtenida de la base de datos de la NASA para el periodo 2001-2020, la cual alcanza un valor medio anual de 4.41 kWh/m²día (Figura 6.)

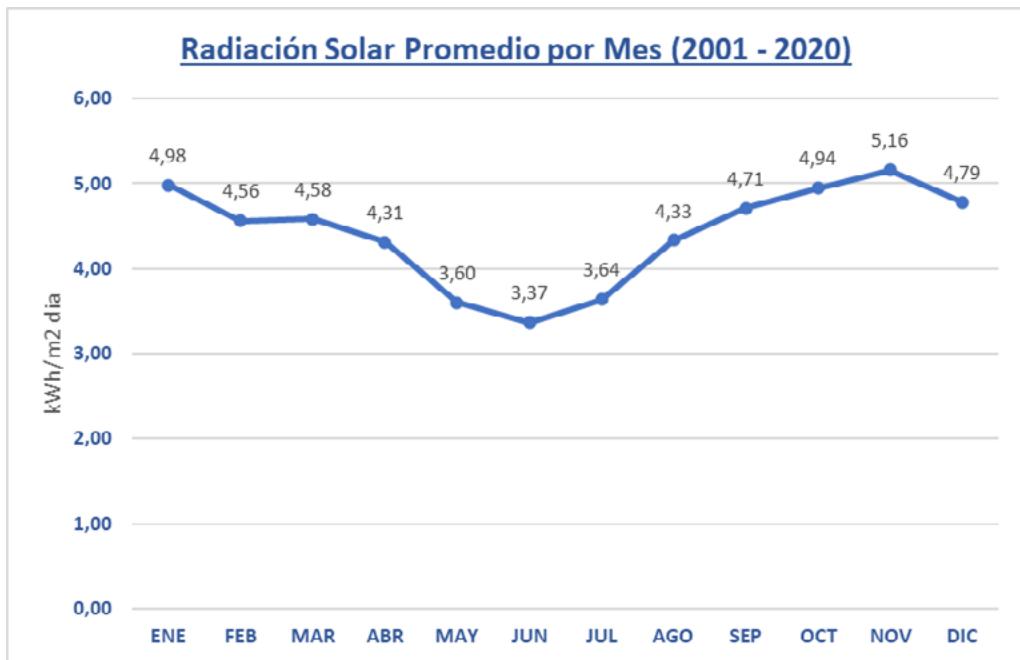


Figura N° 6. Radiación promedio mensual (kWh/m²dia) para el periodo de 2001/2020. Fuente: Base de datos NASA 2001 – 2020

Los valores promedios de radiación anual para 20 años, que se muestran en la Figura 7, permiten apreciar el comportamiento regular a lo largo del tiempo de este potencial.

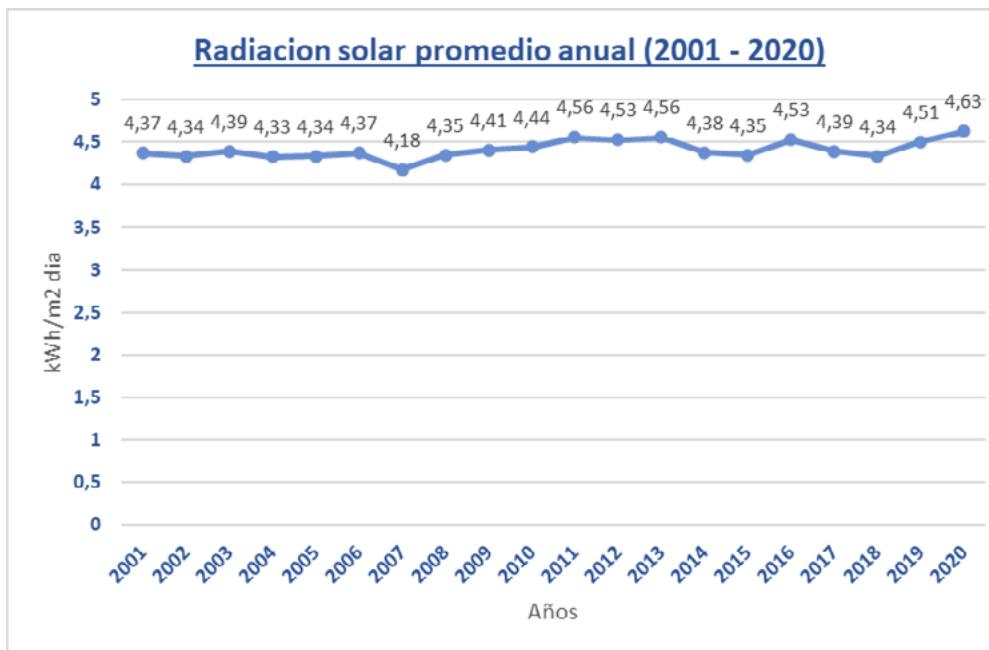


Figura N° 7. Radiación promedio [kWh/m²/día] anual para el periodo de 2001-2020. Fuente: Base de datos NASA 2001 – 2020

En cuanto al sistema de generación distribuida, este debe cumplir con las condiciones técnicas establecidas en el DS 4477 y DS 5167 y las resoluciones de la AETN (2024) que detallan los procedimientos específicos: el registro de empresas instaladoras (AETN N° 376/2024; registro e incorporación de generadores distribuidos a la red (AETN N° 379/2024); retribución de la energía inyectada a la red (AETN N° 380/2024).

Una representación esquemática de un sistema de generación distribuida, se muestra a continuación (Figura 8).

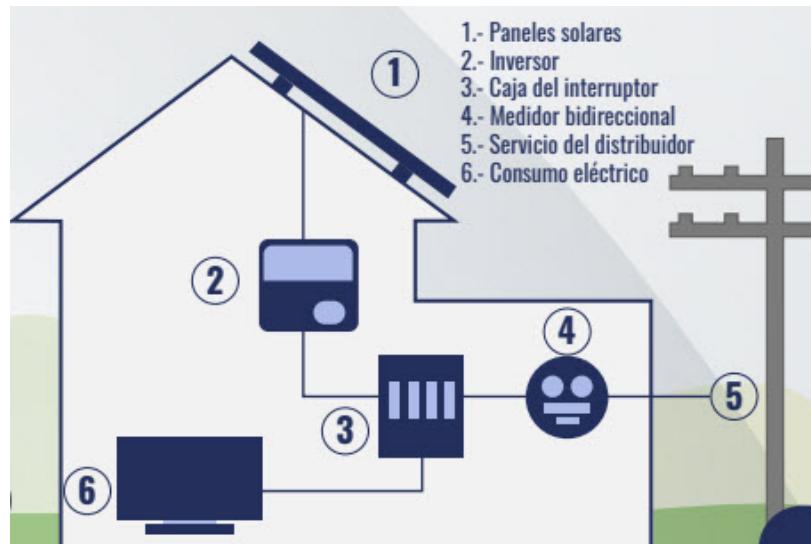


Figura N° 8. Componentes de un sistema de generación distribuida. Fuente: Elaboración propia.

El sistema de GD funcionará en paralelo con la red, priorizando el consumo directo de la energía generada para alimentar las cargas internas. No utiliza baterías. Toda la energía que genera, primero se la consume internamente en los usos que se tengan activados, y si existe un excedente, se lo inyecta a la red. La red eléctrica almacena la energía generada. Cuando no hay sol, la electricidad que se necesita, se la toma de la red. Se debe instalar un medidor bidireccional; este medidor registrará la electricidad que se inyecte a la red, pero también registrará la energía que se retire de la red.

Al final de cada mes la empresa distribuidora realiza la lectura de lo inyectado y lo consumido y, factura solamente por el consumo si hubiese. Pero, si el usuario ha generado más de lo que consumió, este excedente es guardado por la empresa, hasta el próximo mes. De esta manera si un día o varios no se consume la energía que se genere, esta energía estará almacenada en la red eléctrica hasta que la retiremos. De acuerdo al DS 5167, es posible almacenar energía hasta por 2 años.

De los proyectos piloto realizados se ha verificado que un sistema con 2,4 kWp en paneles fotovoltaicos y un inversor de 2 kWn AC, puede prestar el servicio a 14 estanques de 1000 m², oxigenando al menos 2 estanques por día, y cada uno por 3 horas, de acuerdo a la práctica productiva existente que es oxigenar un estanque al menos una vez a la semana.

3.3 Caracterización operativa del sistema

Las motobombas y oxigenadores se utilizan preferentemente en la madrugada, a partir de las 4 am adelante. De esta manera los nuevos equipos eléctricos, deberán trabajar en ese horario. Un sistema fotovoltaico convencional tendría como única opción utilizar baterías, pues en el horario de funcionamiento no existe potencia solar. Sin embargo, al utilizar un sistema GD, la energía en ese horario se tomará de red eléctrica para el funcionamiento de los equipos; más adelante,

durante el día, la energía generada por los paneles fotovoltaicos se inyectará a la red, reponiendo el consumo realizado. En un sentido estricto, quien alimenta a la bomba y oxigenador es la red eléctrica convencional y no el sistema fotovoltaico de GD directamente. El medidor bidireccional que instala la empresa distribuidora se encarga de contabilizar los flujos de ingreso y salida de energía, de manera que lo más importante en el proceso de GD (y en general en energías renovables), es que en el dimensionamiento de los sistemas se realiza por energía demandada, y no por potencia.

En el marco del DS 5167, las instalaciones que se realicen corresponderán a la categoría de Nanogeneración (menor a 10 kW); para esta categoría no se exigen estudios de estabilidad u otros requisitos técnicos de despacho temporal. Por otro lado, la estabilidad de la red y calidad de servicio están regulados por la AETN y el reglamento de calidad de servicio respectivo.

3.4 Variables estandarizadas para un estanque de 1000 m²

Los datos relevados por el proyecto GENERIS en la zona de estudio en el Municipio de Puerto Villarroel, permiten caracterizar el estanque promedio de 1000 m². De esta manera se estima que cada estanque tiene las siguientes variables anuales (Tabla 2).

Tabla N° 2. Variables anuales promedio de un estanque de 1000 m²

Variable	Cantidad / año	Observaciones
Producción de pescado	1000 a 800 kg	Densidad 1 kg/m ² – 0,8 kg/m ²
Consumo de gasolina	171,4 litros	Para uso en motobombas/ oxigenadores
Precio de compra promedio	5,9 Bs/litro	Compra de surtidor y mercado negro
Emisiones en CO ₂	402,9 kg CO ₂ /año	Debido al uso de gasolina
Demanda de electricidad	2114,9 kWh/año	Para sustituir los 171,4 l gasolina
Potencia fotovoltaica por estanque	171 Wp	Potencia FV del SGD promedio/estanque
Inversión promedio por estanque	460,85 USD	Calculado para un estanque de 1000 m ² y que considera la extensión de red interna, el sistema GD y una bomba eléctrica u oxigenador por cada 7 piscinas

Fuente: datos de la Asociación 1ero de Mayo – Mariposas – Puerto Villarroel, GENERIS 2024

3.5 Hallazgos en cuanto a rentabilidad

El análisis económico realizado por el proyecto GENERIS-IRDC, que se reporta en el informe: Las Energías Renovables Descentralizadas como oportunidad para enverdecer la cadena de valor piscícola de Bolivia. (Castelao Caruana *et. al.* 2020) para los diferentes estudios de caso, considera los costos de inversión en el equipo de generación distribuida (paneles fotovoltaicos, inversor de red, protecciones, estructuras, accesorios, costo de interconexión con la red y medidor bidireccional); los costos de extensión de redes internas en baja tensión (considerando normativa de electrificación rural, enchufes de fuerza con IP65); costos de una electrobomba 220 V, adaptada para funcionamiento portátil; adicionalmente el transporte y la instalación llave en mano.

Para el análisis de flujos se incluye costos de operación y mantenimiento anuales del sistema en su conjunto y el recambio del inversor el año 13. El principal beneficio es el desplazamiento de la gasolina, que se considera la fuente de repago de la inversión.

El análisis de rentabilidad y sensibilidad muestran los siguientes indicadores, considerando que se compra la totalidad de la gasolina al precio oficial, y también con el precio promedio actual de compra de la gasolina en la región.

Tabla N° 3. Sensibilidad de los indicadores al precio de la gasolina

Indicadores	Precio oficial (0,54 USD/litro)	Situación actual (1,6 el precio oficial) (0,864 USD/litro)
TIR	17%	30%
VAN	26805	74151
B/C	3,1	4,9
PRI	5	3,2

Fuente: GENERIS, Informes de rentabilidad de estudios de caso en piscicultura 2025

La alta rentabilidad en la situación actual muestra la conveniencia de las inversiones, y que el principal factor es el precio del combustible. Una variación de la inversión en un 50% adicional, aún genera una TIR de 19%, un VAN positivo, una relación B/C de 3,7 y un periodo de recuperación de la inversión de 4,9 años.

3.6 Extrapolación al universo identificado con potencial acceso a la red

Tomando en cuenta que cada estanque emite 402,9 kg de CO₂ al año, solamente por consumo de combustibles fósiles para la oxigenación, se podría evitar la emisión de 5856,3 TonCO₂/año correspondiente a los 14.537 estanques que se encuentran a menos de 500 m de la Red, como consecuencia del uso de 2,49 millones de litros anuales de gasolina.

También podría significar la instalación de 2.492,05 kWp de paneles fotovoltaicos (2,49 MW), y en energía eléctrica, considerando la demanda anual de 2.114,91 kWh por estanque, se podría tener una demanda agregada de 30,74 GWh/año.

Los costos de inversión en los proyectos piloto de generación distribuida realizados en la zona por GENERIS (IMMERSIVE, 2024), permiten estimar una inversión promedio por estanque de 1.000 m² de 460,85 USD (¹). Con estos datos iniciales, la inversión que se esperaría movilizar en la región podría alcanzar a 6,70 millones de USD para el universo en consideración (14.537 estanques).

¹ Estos costos consideran los sistemas fotovoltaicos de generación distribuida una bomba eléctrica adaptada, que sirve para oxigenar y bombear agua, la extensión de redes internas en baja tensión en 220 V al borde los estanques, transporte e instalación, registro de proyecto ante la empresa distribuidora.

4. Discusión

El uso de la energía en forma de electricidad representa un elemento importante en el ámbito social, económico y ambiental, sobre todo bajo una perspectiva de transición energética justa; por lo que resulta necesario promover la eficiencia en procesos productivos y crear condiciones óptimas para tener comunidades desarrolladas que puedan basar sus economías en energías limpias y eviten la migración hacia centros urbanos (Rodríguez-Gámez *et al.*, 2018).

La actividad de la piscicultura en el Figura N° 6 trópico de Cochabamba, sobre todo en el Municipio de Puerto Villarroel, ha generado una alta densidad de estanques y un número creciente de pequeños productores; esta situación ofrece un escenario estratégico para la implementación de soluciones de energía limpia y descentralizada. La electrificación de procesos como la oxigenación y el bombeo de agua, mediante sistemas de generación distribuida fotovoltaica conectados a la red, no solo reduce la dependencia de combustibles fósiles, sino que también disminuye la exposición de los productores a la volatilidad del mercado de hidrocarburos y las restricciones en el abastecimiento de gasolina.

Los resultados evidencian que el 83.57% de los estanques se encuentran a menos de 500 m de la red eléctrica, lo que sugiere un altísimo potencial de conexión sin requerir infraestructuras complejas ni inversiones prohibitivas en líneas de media tensión. Esta cifra es especialmente relevante al considerar que la mayor parte de las motobombas funcionan de forma regular para tareas de oxigenación, generando un consumo anual considerable de gasolina y emisiones de CO₂.

La electrificación de los estanques piscícolas, mediante sistemas fotovoltaicos conectados a la red también permitiría avanzar hacia un modelo más resiliente y tecnológicamente moderno, facilitando la automatización parcial de algunos procesos, la implementación de sensores de calidad del agua, o incluso el control remoto de sistemas de oxigenación. Todo ello puede aumentar la productividad, mejorar la calidad del producto final y reducir los costos operativos a mediano plazo.

Este cambio de fuente de energía para el bombeo y oxigenación, permitiría desplazar 2,49 millones de litros anuales de gasolina, los mismo que representan a precios internacional de 1,247 USD/litro (ANH, 2025) poco más de 3,1 millones de USD por año que podrían dejar de importarse.

Por otra parte, si bien el análisis presentado es robusto en términos espaciales, aún queda por incorporar variables complementarias que puedan modular la viabilidad real de los sistemas propuestos. Por ejemplo, la distribución de los estanques en el terreno, la capacidad de inversión de las familias piscicultoras, la disponibilidad de asistencia técnica para el diseño e instalación de sistemas eléctricos, y la confiabilidad del suministro eléctrico en áreas rurales.

Es fundamental considerar la dimensión social y organizacional. Las asociaciones de productores podrían jugar un rol clave para negociar mejores condiciones para acceder a la tecnología, condiciones de financiamiento, y sobre todo, organizando la demanda. Una estrategia de este tipo, debería incorporar estrategias de formación y sensibilización para fortalecer la apropiación tecnológica, y asegurar que la electrificación se implemente con un enfoque inclusivo, sensible al género y a la diversidad de actores productivos.

5. Conclusiones y recomendaciones

El análisis espacial demuestra que la mayoría de los estanques piscícolas del trópico de Cochabamba se encuentran a una distancia viable (≤ 500 m) de la Red Eléctrica para su conexión, abriendo la posibilidad de implementar sistemas de oxigenación eléctrica con energía renovable.

La sustitución de motobombas a gasolina por sistemas eléctricos podría evitar la emisión de aproximadamente 5.856,3 Toneladas de CO₂ al año, representando una contribución concreta a la lucha contra el cambio climático desde el sector productivo rural.

Las inversiones que podrían movilizarse para la implementación de esta tecnología, permiten generar un ahorro directo en la importación de combustibles fósiles. Considerando los precios internacionales de estos combustibles, desde un punto de vista macroeconómico el ahorro anual al país por evitar la importación de 2,49 millones de litros gasolina permitiría recuperar la inversión inicial en aproximadamente en 3,12 años. Los sistemas fotovoltaicos que tienen una vida útil de al menos 20 años continuarán generando beneficios económicos y ambientales.

Esta transición energética representa un beneficio macroeconómico para Bolivia, al reducir la dependencia de importaciones de combustibles y aliviar la presión sobre las reservas internacionales, mejorando la seguridad energética de los productores y del país.

Desde la perspectiva de políticas públicas, la electrificación de la piscicultura en el Trópico de Cochabamba, se puede posicionar como una estrategia prioritaria dentro de los lineamientos de transición energética justa, al tener impactos positivos simultáneos en los ámbitos ambiental, social y económico. Esta medida se alinea con las metas nacionales esbozadas en las NDC (Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra, 2024) de reducción de emisiones, de incremento de la Generación Distribuida y con los principios de seguridad alimentaria sostenible.

Se recomienda que futuras investigaciones incorporen un enfoque integral que considere aspectos como:

- Viabilidad económica de los sistemas de generación distribuida en este campo específico, aplicando criterios de modularidad y escalamiento
- Identificación y gestión con los actores sociales de la región, para encontrar modelos organizativos que faciliten la adopción de la tecnología y su expansión.
- Disponibilidad de financiamiento y esquemas de incentivos, versus las capacidades de pago de los productores locales.
- Riesgos operativos y estabilidad del suministro eléctrico en relación a la generación distribuida.
- Opciones de automatización del proceso, podrían incrementar la productividad

Esta investigación podría ser utilizada como base para la elaboración de programas a mayor escala, que sirvan como modelos replicables en otras regiones tropicales del país.

Finalmente, el estudio integra análisis espacial, técnico y económico demostrando la viabilidad de la electrificación productiva con energía renovable, ofreciendo una metodología replicable en otros sectores rurales.

6. Referencias bibliográficas

- Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra (APMT), 2022. *Contribuciones Nacionalmente Determinadas 2022 - 2030*.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), 2025. *Precios internacionales 2025*. <https://www.anh.gob.bo/w2019/contenido.php?s=13>
- Castelao Caruana M.E., Parma M.E., Sarmiento J., Fernandez Fuentes M. (2025). *Las Energías Renovables Descentralizadas como oportunidad para enverdecer la cadena de valor piscícola de Bolivia*. GENERIS. <https://generis.com.bo/wp-content/uploads/2025/04/Informe-Piscicultura.pdf>
- Fernandez, M. H., Morales, M.E.; IV Congreso Brasilero de Energía Solar y V Conferencia Latino Americana del ISES, 2012; *Costos de generación de electricidad fotovoltaica en Bolivia y barreras para su expansión*.
- FAO. (2020). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9229es>
- Faunagua. (2024). *Estudio de producción acuícola y prácticas ambientales actuales a partir de una evaluación de imágenes satelitales, informes municipales, y visitas de campo*.
- Fernandez Fuentes M. (2025). *Informes de rentabilidad de estudios de caso en piscicultura*. GENERIS
- Gaceta Oficial de Bolivia (2023). *DS 4910 de 12 de Abril 2023*.
- Gaceta Oficial de Bolivia (2025). *DS 5353 de 19 de Marzo 2025*
- Gómez, A. T., Gómez, J. A. D., Rodarte, G. E. V., Baylon, J. S., & León, R. R. arbitrada de divulgación científica de la U. T. de. (2022). Acuicultura: Seguridad alimentaria y su dependencia energética y tecnológica, casos estados de Colima y Jalisco. *Reaxion Revista de Divulgación Científica*, 2. http://reaxion.utleon.edu.mx/Art_Impr_Acuicultura_seguridad_alimentaria_y_su_dependencia.html
- IMMERSIVE SRL. (2024). *Proyecto piloto: Oxigenadores para piscicultura*. GENERIS Bolivia.
- Rodríguez-Gámez, M., Vázquez-Pérez, A., Vélez-Quiroz, A. M., & Saltos-Arauz, W. M. (2018). Mejora de la calidad de la energía con sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales. *Revista científica*, 33, 265-274. <https://doi.org/10.14483/23448350.13104>

Proyectos de ingeniería aplicada

Estimación de la huella de carbono de la piscicultura. Estudio de caso en Mariposas, Puerto Villarroel, Cochabamba

Carbon Footprint Estimation of Fish Farming: A Case Study in Mariposas, Puerto Villarroel, Cochabamba

Maria Celeste Marka Añez¹ Miguel Fernandez Vazquez²

Estudiante. UPB. La Paz, Bolivia. celestemarka01@upb.edu.

Ing. Ambiental. Cochabamba, Bolivia. miguel.jhfv@gmail.com

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo estimar la huella de carbono generada durante la etapa de producción en un sistema piscícola representativo del trópico cochabambino, específicamente en la comunidad de Mariposas, municipio de Puerto Villarroel. Se aplicó una adaptación de la norma ISO 14064-1:2006 para cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), enfocándose en tres áreas clave: residuos sólidos (lodos), alimento balanceado y consumo energético. La metodología incluyó recolección de datos in situ, entrevistas con productores y análisis de procesos. Los resultados evidenciaron que los lodos representan la mayor fuente de emisiones ($2.8 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^2$), seguidos del alimento balanceado ($2.43 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^2$) y el uso de energía ($0.23 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^2$ con oxigenadores). Se concluyó que la incorporación de tecnologías limpias, como oxigenadores automáticos alimentados por energía solar, puede reducir considerablemente el impacto ambiental. Este estudio sienta una base técnica para futuras investigaciones y la formulación de políticas públicas orientadas hacia una piscicultura sostenible en Bolivia.

Palabras clave: Huella de carbono. Piscicultura. Emisiones de CO_2 . Energías limpias. Sostenibilidad ambiental.

ABSTRACT

The objective of this study was to estimate the carbon footprint generated during the production stage in a representative fish farming system of the Cochabamba tropics, specifically in the community of Mariposas, municipality of Puerto Villarroel. An adaptation of the ISO 14064-1:2006 standard was applied to quantify greenhouse gas (GHG) emissions, focusing on three key areas: solid waste (sludge), balanced feed, and energy consumption. The methodology included on-site data collection, interviews with producers, and process analysis. The results showed that sludge was the main source of emissions ($2.8 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^2$), followed by balanced feed ($2.43 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^2$) and energy use ($0.23 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^2$ with oxygenators). It was concluded that the incorporation of clean technologies, such as solar-powered automatic oxygenators, can significantly reduce the environmental impact. This study provides a technical foundation for future research and the formulation of public policies aimed at sustainable aquaculture in Bolivia.

Keywords: Carbon footprint. Fish farming. CO_2 emissions. Clean energy. Environmental sustainability.

Citar como: VMarka
Áñez, M.C., Fernández-Vázquez, M. Estimación de la huella de carbono de la piscicultura. Estudio de caso en Mariposas, Puerto Villarroel, Cochabamba. *Revista Journal Boliviano De Ciencias*, 21(58) 135-155 <https://doi.org/10.5242/20758944.v21i58.1390>

Recepción: 21/07/2025

Aceptado: 25/11/2025

Publicado: 30/12/2025

Declaración: Derechos de autor 2025 Marka Áñez, M.C., Fernández-Vázquez, M. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](#).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



1. INTRODUCCIÓN

La piscicultura se consolida como uno de los sectores de producción de alimentos de más rápido crecimiento a nivel global (FAO, 2024) y una alternativa productiva clave en regiones tropicales de Bolivia, priorizada dentro de las estrategias de soberanía alimentaria y desarrollo productivo (Ministerio de Planificación del Desarrollo, 2021). Sin embargo, al igual que otros sistemas de producción de proteína, cuyo impacto ambiental ha sido ampliamente documentado (FAO, 2013), este crecimiento conlleva un desafío ambiental. La generación de gases de efecto invernadero —derivada de prácticas intensivas, el manejo de residuos y el consumo energético— es un indicador crítico de sostenibilidad (Boyd, 2022).

En este contexto, la zona de Mariposas, en el municipio de Puerto Villarroel (Cochabamba), se presenta como un caso representativo para evaluar el impacto ambiental del sector piscícola bajo condiciones tropicales. El objetivo principal de este trabajo es estimar la huella de carbono generada durante la etapa de producción de un sistema piscícola regional, enfocándose en tres áreas clave: residuos sólidos (lodos), alimento balanceado y energía utilizada para la producción. A través de esta evaluación, se busca no solo visibilizar los focos críticos de emisión, sino también proponer alternativas sostenibles para reducir el impacto ambiental de esta actividad en Bolivia.

2. METODOLOGÍA DE CUANTIFICACIÓN

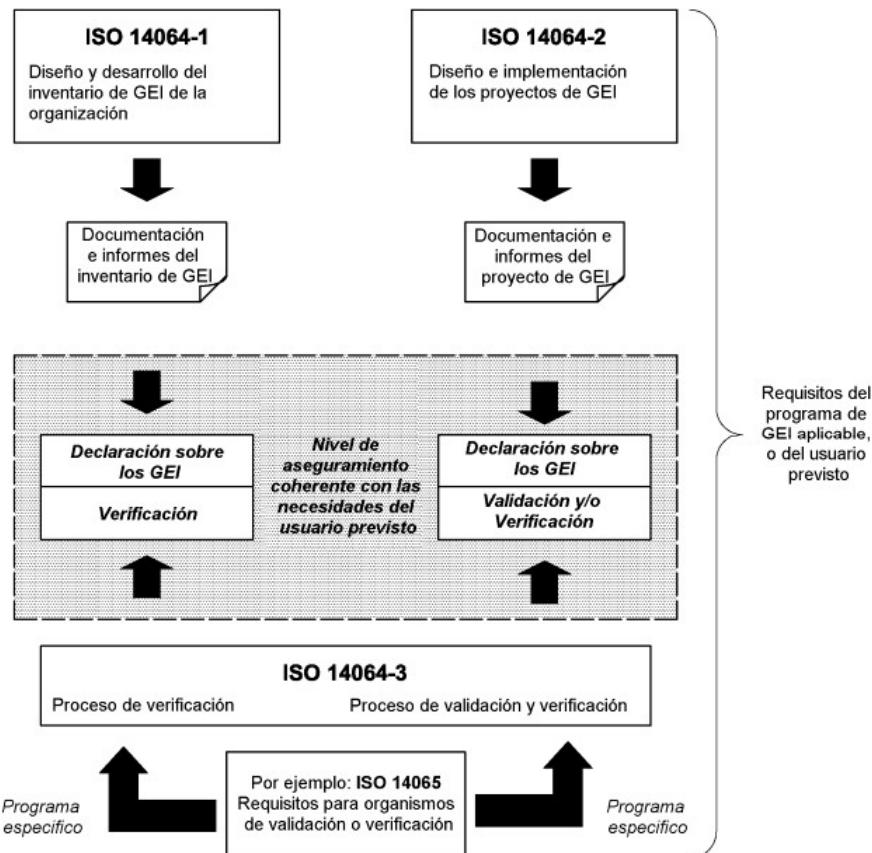
La familia de normas ISO comprendidas entre la ISO 14064 y la 14069 tienen como objetivo dar credibilidad y aseguramiento a los reportes de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y a las declaraciones de reducción o eliminación de GEI. Las normas no están alineadas con ningún esquema particular, más bien son independientes y pueden ser usadas por organizaciones que participan en el comercio, en proyectos o en mecanismos voluntarios de reducción de emisiones. ISO 14064:2006: Contiene 3 partes y un conjunto de criterios para la contabilización y verificación de GEI. Las normas definen las mejores prácticas internacionales en la gestión, reporte y verificación de datos e información referidos a GEI. El uso de enfoques normalizados para la contabilización y verificación de datos de emisión aseguran que una tonelada de CO₂, por ejemplo, sea siempre la misma, donde sea que se emita o se acumule.

ISO 14064-1:2006 Greenhouse gases-Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals. (Cuantificación y reporte de emisiones y remoción de Gases con Efecto Invernadero a nivel de las Organizaciones).

ISO 14064-2:2006. Greenhouse gases- Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements. (Cuantificación y reporte de GEI a nivel de Proyectos).

ISO 14064-3:2006. Greenhouse gases- Part 3: Specification with guidance for the validation and verification of greenhouse gas assertions. (Validación y verificación de aseveraciones sobre GEI).

Esquema de las ISO 14064



Esquema 1. ISO 14064

Para cuantificar las emisiones de CO₂ del sector piscicultor en la etapa de producción, se realizó una adaptación de la norma ISO 14064, utilizando como base principal la primera parte de esta norma (ISO 14064-1).

Para realizar el cálculo de las emisiones de CO₂ se siguieron los siguientes pasos:

- Identificación de fuentes de emisión de CO₂,
- Discriminación de actividades según su representatividad,
- Base de datos y
- Cuantificación global.

a) Identificación de fuentes de emisión de CO₂

Las principales fuentes de emisión de CO₂ identificadas en la organización fueron:

- Área de residuos sólidos (lodos)
- Área de alimento
- Área de energías para la producción

b) Discriminación de los procesos según su representatividad

Para realizar un cálculo de emisiones de CO₂ lo más preciso y representativo posible se realizó un listado de los procesos principales necesarios en la operación diaria considerando cada estanque de 1000 :

- ▶ Lodos generados
- ▶ Impacto del alimento balanceado
- ▶ Actividades que requieren uso de combustibles (motobombas, oxigenadores, rozadora, bomba y vehículos de transporte)

c) Base de datos

En este paso se realizó la toma de datos in situ y también se utilizaron los datos proporcionados por los propios piscicultores, gracias a los cuales es posible desarrollar el primer inventario de Gases de Efecto Invernadero a partir de la información seleccionada.

Para realizar el inventario de cada consumo o proceso esquematizado es necesario realizar el llenado de las tablas elaboradas de todos los procesos involucrados en la actividad tomados en cuenta. De esta manera, se podrá obtener información de las emisiones y podremos cuantificar las emisiones de CO₂ anual en función del tamaño de las piscinas.

d) Cuantificación global

A partir de la información recopilada será posible una cuantificación de emisiones de CO₂ del sector piscicultor en función de las actividades, procesos realizados y el tamaño de las piscinas.

3. CÁLCULOS**3.1 Área de residuos sólidos (lodos).**

Los lodos generados en la piscicultura son el resultado de la interacción entre los peces, su alimentación y el entorno acuático. Durante el cultivo, los peces excretan desechos ricos en nitrógeno y fósforo, que representan entre el 10 % y el 25 % del alimento suministrado y entre el 2 % y el 12 % del alimento no consumido se descompone en el fondo del estanque (Vásquez Torres, s.f.). En estos entornos, a medida que el material se acumula, se agota el oxígeno disponible, creando condiciones anaeróbicas. Bajo estas condiciones, los microorganismos degradan la materia orgánica y producen gases como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y, en algunos casos, sulfuro de hidrógeno (H₂S), dependiendo del tipo de microorganismos y de los compuestos presentes (Ladino-Orjuela, 2011).

Para estimar el total de lodos producidos por estanque a lo largo del ciclo de vida (10 meses), se aplicó un balance de materia. La metodología consistió en calcular las excreciones y los residuos no consumidos como un porcentaje del alimento total proporcionado, basándose en las referencias y las estimaciones del estudio:

Con este contexto, se consideró lo siguiente:

- En el trópico de Cochabamba se producen aproximadamente 1000 kg de peces en 10 meses por estanque.
- El Factor de Conversión Alimenticia (FCR) típico para la piscicultura eficiente es de 1.2 a 2.2, es decir, se necesitan entre 1.2 y 2.2 kg de alimento para producir 1 kg de pescado (Boyd, 2022).
- Basándose en las referencias mencionadas, se estimó que, a lo largo del ciclo de vida de los peces, aproximadamente el 25% del alimento suministrado se convierte en excreciones, mientras que un 15% corresponde a alimento no consumido.

El cálculo se realizó mediante las siguientes ecuaciones:

- **Lodos generados por excreción**

$$\text{Lodos por excreción} = A \times B \quad (1)$$

Donde:

A = Alimento total suministrado en el ciclo (kg)

B = Porcentaje estimado de alimento convertido en excreción (Vásquez Torres, s.f.).

- **Lodos por residuos no consumidos**

$$\text{Lodos por residuos no consumidos} = A \times D \quad (2)$$

Donde:

A = Alimento total suministrado en el ciclo (kg)

D = Porcentaje estimado de alimento no consumido (Vásquez Torres, s.f.).

En la **Tabla N°1** se observa los resultados de la cantidad de lodo producido durante un período de 10 meses por estanque (1000 m^3).

Cantidad de lodos producido		
Cant. Peces	1000	kg
FCR	1.3	Estimado [3]
Alimento proporcionado	1300	kg
Lodos por excreción	325	kg
Residuos no consumidos	195	kg
Total lodos producido por estanque	520	kg

Tabla N°1. Cantidad de lodo producido por estanque. Fuente: Elaboración Propia, 2025.

La cantidad total de lodos producidos a partir del alimento proporcionado es de 520 kg por estanque como se muestra en la **Tabla N°1**.

A continuación, se calcularon las emisiones de GEI generadas por la descomposición anaeróbica de estos lodos. La metodología se basa en estimar la fracción de materia orgánica biodegradable que se convierte en biogás (metano y dióxido de carbono). De los lodos totales, se estima que un 60% corresponde a materia orgánica —un valor consistente con los rangos de 55% a 89% reportados para lodos de piscicultura (SAG, 2009)— y de esta fracción, un 50% es biodegradable (Tchobanoglous et al., 2014), es decir, susceptible de ser descompuesta por microorganismos en condiciones anaeróbicas. En base a estas referencias se utilizó la ec. (3) y (4). Este proceso, que ocurre principalmente en el fondo de los estanques, genera biogás compuesto en su mayoría por metano (CH_4), entre 50% - 70%, y dióxido de carbono (CO_2), entre 30%- 50% (FAO, 2013; IDAE, 2007). Estas transformaciones son el resultado de una serie de reacciones bioquímicas que incluyen las etapas de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Bhatia, 2014).

La materia biodegradable es esencial para estimar la producción de biogás, ya que únicamente esta cantidad de materia orgánica contribuye a la formación de CH_4 y CO_2 (Werkneh, 2022). En este caso, se consideró el biogás con una composición promedio de 65% de metano y 35% de dióxido de carbono, valores útiles para la ec. (5) y (6), lo que permite calcular con mayor precisión las emisiones. Dado que el potencial de calentamiento global del metano es 28 veces mayor que el del dióxido de carbono (Intergovernmental Panel on Climate Change; U.S. Environmental

Protection Agency, 1990), este análisis es clave para cuantificar las emisiones equivalentes en términos de kilogramos de CO₂, asociadas a la descomposición de los lodos. Los cálculos se realizaron con las siguientes ecuaciones:

$$MO = Lodo \text{ total} \times 0.60 \quad (3)$$

$$MOD = Lodo \text{ total} \times 0.50 \quad (4)$$

$$\text{Emisiones CH4} = MOD \times 0.65 \quad (5)$$

$$\text{Emisiones CO2} = MOD \times 0.35 \quad (6)$$

$$\text{Emisiones totales} = (\text{Emisiones CH4} \times GWP \text{ CH4}) + (\text{Emisiones CO2} \times GWPCO2) \quad (7)$$

Donde:

- MO = Materia Orgánica total en los lodos (kg).
- MOD = Materia Orgánica Biodegradable (kg).
- Emisiones CH4 = Emisiones de Metano (kg).
- Emisiones CO2 = Emisiones de Dióxido de Carbono (kg).
- Emisiones totales = Emisiones totales en kg de CO₂ equivalente.
- GWP CH4 = Potencial de Calentamiento Global del metano (28).
- GWP CO2 = Potencial de Calentamiento Global del dióxido de carbono (1).

Los resultados detallados se presentan en la **Tabla N°2.**

Cálculo kg CO ₂ equivalente		
Cant. de lodo total	520	kg lodo
Cant. de materia orgánica	312	kg materia org.
Cant. de materia orgánica degradable	156	kg materia org. degradable
Producción de biogás por descomposición anaeróbica	65%	CH ₄
	35%	CO ₂
Emisiones CH ₄	101.40	kg CH ₄
Emisiones CO ₂	54.6	kg CO ₂
Potencial de calentamiento global (GWP) CH ₄	28	-
CO ₂ eq.	2844.6	kg CO ₂ eq.

Tabla N°2. Kilogramos de dióxido de carbono equivalentes. Fuente: Elaboración Propia, 2025.

A partir de los resultados presentados en las Tablas 1 y 2, se cuantificó la emisión de CO₂ por estanque con la ec. (8).

$$\text{Indicador} = \frac{\text{Emisiones (kg CO}_2\text{ eq.)}}{\text{Área (m}^2\text{)}} \quad (8)$$

Donde:

- Emisiones = Cantidad de CO₂ eq. (kg CO₂ eq.)
- Área = Área total del estanque (m²)

Indicador kg CO ₂ /área		
Emisiones	2844.66	kg CO ₂ eq.
Área estanque	1000	<i>m</i> ²
Total	2.8	kg CO ₂ / <i>m</i> ²

Tabla N°3. Estimación anual de emisiones de CO₂(kg/m²) generadas por lodos.
Fuente: Elaboración Propia, 2025.

Como se muestra en la **Tabla N°3**, a partir de las emisiones totales estimadas en 2844.66 kg de CO₂ equivalente y un área de estanque de 1000 m², se obtiene un indicador final de 2.8 kg de CO₂ equivalente por metro cuadrado (kg CO₂/m²). Este valor representa la huella de carbono específica generada únicamente por la descomposición anaeróbica de los lodos en el fondo del estanque.

3.2 Área de alimento balanceado

El impacto ambiental de la acuicultura es relativamente bajo en comparación con otros sectores de producción de proteína animal, como la ganadería (FAO, 2013). Sin embargo, su contribución a las emisiones de GEI es considerada significativa (FAO, 2009), principalmente debido a que el alimento balanceado representa el mayor porcentaje de su huella de carbono, con estimaciones que varían del 40% al 90% del impacto total debido a su producción, procesamiento y transporte (Revista: Feed & Additive Magazine). La fabricación de estos alimentos requiere energía para la obtención de materias primas, su procesamiento y el funcionamiento de equipo. Como resultado, este proceso genera, en promedio, entre 2.34 kg y 2.90 kg de CO₂ equivalente por cada kilogramo de pescado producido (Bahida et al., 2022).

La metodología para cuantificar esta fuente consistió en un análisis de los componentes principales del alimento de NutriFish, estos incluyen harina de maíz, harina de trigo, harina de carne, harina de arroz y sal. Posteriormente, se evaluó el porcentaje de cada ingrediente en la fórmula del alimento. Dado que el cálculo del factor de emisión es complejo, se utilizó la página CarbonCloud, que ofrece estimaciones regionales de emisiones para una amplia variedad de alimentos.

El cálculo se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Emisión por ciclo de vida} = \text{FE} \times \text{PI} \times \text{AC} \quad (10)$$

Donde:

- FE = Factor de emisión (kg CO₂eq/kg).
- PI = Porcentaje de ingrediente en la fórmula.
- AC= Alimento proporcionado por ciclo (1300 kg).

En la **Tabla N°4** se muestra los resultados obtenidos:

Alimento balanceado					
Ingredientes principales	Porcentaje en la fórmula	Factor de emisión	Emisiones por ciclo de vida		
Harina de maíz	35%	1.97	kg CO ₂ eq/Kg	896	kg CO ₂ eq
Harina de trigo	25%	0.98	kg CO ₂ eq/Kg	319	kg CO ₂ eq
Harina de carne	20%	3.40	kg CO ₂ eq/Kg	884	kg CO ₂ eq
Sal	5%	0.07	kg CO ₂ eq/Kg	5	kg CO ₂ eq
Harina de arroz	15%	1.68	kg CO ₂ eq/Kg	328	kg CO ₂ eq
Totales				2.4	kg CO₂ eq/ m²

Tabla N°4. Estimación anual de emisiones de CO₂(kg/m²) generadas por alimento balanceado. Fuente: Elaboración Propia, 2025

Considerando un consumo anual de 1,300 kg de alimento balanceado para 1000 kg de peces, se calculó que esto equivale a 2.4 kg de CO₂/m² emitidos anualmente como se muestra en la **Tabla N°4**.

3.3 Área de consumo energético

Bolivia atraviesa, desde finales del 2024, por una problemática de combustible caracterizada por el desabastecimiento de gasolina y diésel en diversas regiones del país, lo que ha generado largas filas en estaciones de servicio, paralización de actividades económicas y malestar social. Esta crisis afecta no solo el transporte, sino también sectores clave como la agricultura, la industria y en esta situación, al sector piscícola, donde la gasolina es utilizada para el funcionamiento de motobombas, mecanismo que se logra al recircular el agua del estanque y agitar su superficie, lo cual facilita la disolución del oxígeno atmosférico para los peces. Dado que la adquisición de gasolina se ha vuelto cada vez más complicada, muchos piscicultores se ven obligados a recurrir a revendedores, donde el precio del litro oscila entre 7 y 10 Bs, lo que representa un costo 2 a 3 veces superior al precio oficial.

Por este motivo, se optó por reemplazar las motobombas con un oxigenador automático, el cual no solo cumple la misma función, sino que también elimina por completo el uso de gasolina, generando un impacto positivo en el medio ambiente al reducir significativamente las emisiones de CO₂.

Para dimensionar la magnitud de esta reducción y emisiones de los demás equipos requeridos en este proceso, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$Emisiones \text{ por } m^2 = FE \times CT \text{ (11)}$$

Donde:

- FE = Factor de emisión de co2 de gasolina 2.35 kg CO₂/litro (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, s.f.) para equipos que requieren gasolina como motobomba, rozadora, bomba, movilidad para transportar alimento balanceado) y 0.414 kg CO₂/kWh para equipos que consumen energía como los oxigenadores automáticos (CNDC, 2022).
- CT = Consumo total anual de cada equipo (motobomba, oxigenadores, rozadora, bomba, movilidad para transportar alimento balanceado) (litros).

Para calcular el CT se consideró lo siguiente:

$$CT = CE \times N \times D \text{ (12)}$$

Donde:

- CE = Consumo de gasolina o energía por equipo (litros).
- N = Cantidad de equipos.
- D = Número de días de operación al año

En la **Tabla N°5** se presenta el detalle de las emisiones anuales ocasionadas por las motobombas.

Motobomba		
Indicador kg CO ₂ /		
Cantidad de estanques	14	estanques
Área por estanque	1000	
Área total	14000	
Consumo de gasolina estimado de cada motobomba	4	litros/día
Tiempo de uso diario	3	h
Cantidad motobombas	2	
Número de días de operación al año	300	días
Consumo total	2400	litros/año
Factor de emisión	2.35	kg CO ₂ /litro
Emisiones por	0.40	kg CO ₂ /
	0.0004	ton CO ₂ /

Tabla N°5. Estimación anual de emisiones de CO₂ (kg/m²) generadas por motobomba. Fuente: Elaboración Propia, 2025.

Los datos recolectados de la **Tabla N°5** fueron tomados en cuenta en el siguiente contexto: Cada estanque, con un tamaño promedio de 20 x 50 metros, puede generar aproximadamente 1,000 kilogramos de pescado en un periodo de 10 meses. Cada motobomba consume alrededor de 4 litros de gasolina por estanque durante cada proceso. En este caso de estudio, un piscicultor con 14 estanques oxigena 2 de ellos diariamente, lo que resulta en un consumo anual de gasolina de 2,400 litros. Tomando en cuenta las emisiones por estanque se puede deducir que 0.4 kg CO₂ eran emitidos anualmente por m².

Por otro lado, el oxigenador automático consume 7.3 kWh/día durante 6 horas de funcionamiento, realiza el mismo trabajo que las dos motobombas. Este equipo es alimentado mediante un sistema fotovoltaico, lo que lo hace más

sostenible y eficiente energéticamente, que opera en paralelo con la red eléctrica generando 2 kwp.

Oxigenadores Automáticos conectado a la red		
Indicador kg CO ₂ / m ²		
Cantidad de estanques	14	estanques
Área por estanque	1000	m ²
Área total	14000	m ²
Consumo de energía estimado de cada oxigenador	7.05	kW/día
Tiempo de uso diario	6	h
Cantidad	1	
Número de días de operación al año	300	días
Consumo energético total	2115	kWh/año
Factor de emisión	0.414	kg CO ₂ /kWh
Emisiones por m²	0.063	kg CO ₂ / m ²
	0.000063	ton CO ₂ /m ²

Tabla N°6. Estimación anual de emisiones de CO₂ (kg/m²) generadas por oxigenador automático. Fuente: Elaboración Propia, 2025.

En caso de conectarse a la red, las emisiones generadas como se ve en la **Tabla N°6** es de 0.063 kg CO₂/ lo que demuestra que sería significativamente menor en comparación con las motobombas

La rozadora es otro equipo utilizado, el cual también consume gasolina y que se utiliza para el mantenimiento de las áreas alrededor de los estanques. Su uso principal es cortar el césped, la maleza, vegetación que crece en los taludes y caminos de los estanques. Se estima un consumo aproximado de 2 litros por m², con una frecuencia de uso de una vez al mes.

Rozadora		
Indicador kg CO ₂ / m ²		
Cantidad de estanques	14	estanques
Área por estanque	1000	
Área total	14000	
Consumo de gasolina estimado	2	litros/ m ²
Cantidad rozadora	1	
Número de días de operación al año	10	días
Consumo total	20	litros/ m ²
Factor de emisión	2.35	kg CO ₂ /litro
Emisiones por m²	0.0047	kg CO ₂ / m ²
	0.000047	ton CO ₂ / m ²

Tabla N°7. Estimación anual de emisiones de CO₂(kg/m²) generadas por rozadora.
Fuente: Elaboración Propia, 2025.

Según los datos de la **Tabla N° 7**, este equipo genera anualmente 0.0047 kg de CO₂/ m²

Otro equipo que consume gasolina es una bomba empleada para vaciar los estanques una vez al año. Este dispositivo consume alrededor de 40 litros de combustible por estanque.

Bomba para vaciar estanque		
Indicador kg CO ₂ / m ²		
Cantidad de estanques	14	estanques

Área por estanque	1000	m ²
Área total	14000	m ²
Consumo de gasolina estimada	40	litro/ m ²
Cantidad de bombas	1	
Número de días de operación al año	1	día
Consumo total	560	litros/ m ²
Factor de emisión	2.35	kg CO ₂ /litro
Emisiones por m ²	0.094	kg CO ₂ / m ²
	0.000094	ton CO ₂ / m ²

Tabla N°8. Estimación anual de emisiones de CO₂(kg/m²) generadas por bomba.

Fuente: Elaboración Propia, 2025.

Con un estanque vaciado al año, las emisiones generadas son 0.094 kg de CO₂/m², como se detalla en la **Tabla N°8**.

Finalmente, se incluyó en el análisis un vehículo utilizado para transportar alimento balanceado a los estanques. Este vehículo recorre 6 km diarios y tiene un rendimiento de 10 km por litro de gasolina.

Vehículo para transportar alimento balanceado a cada piscina		
Indicador kg CO ₂ / m ²		
Cantidad de estanques	14	estanques
Área por estanque	1000	m ²
Área total	14000	m ²
Consumo de gasolina estimado	10	km/litro
Recorrido	6	km/día
Cantidad	1	
Número de días de operación al año	300	días

Consumo total	180	litros/ m ²
Factor de emisión	2.35	kg CO ₂ /litro
Emisiones por m²	0.03	kg CO ₂ / m ²
	0.00003	ton CO ₂ /m ²

Tabl N°9. Estimación anual de emisiones de CO₂(kg/m²) generadas por vehículo.
Fuente: Elaboración Propia, 2025.

Como se observa en la **Tabla N°9**, este transporte genera emisiones anuales de 0.03 kg de CO₂/m²

4. RESULTADOS

En la **Tabla N°10** se resumen los valores obtenidos anteriormente y se puede concluir que, la huella de carbono estimada anualmente en las tres áreas seleccionadas que pertenecen a la etapa de producción.

Huella de carbono		
Componente de Emisión	Referencia (Tabla)	Indicador (kg CO ₂ eq/ m ²)
Residuos Sólidos (Lodos)	(Tabla N°3)	2.84
Alimento Balanceado	(Tabla N°4)	2.43
Energía para Producción		
Mantenimiento (Rozadora)	(Tabla N°7)	0.047
Vaciado (Bomba)	(Tabla N°8)	0.094
Transporte (Vehículo)	(Tabla N°9)	0.030
Subtotal Equipos Auxiliares		0.17
ESCENARIO A (Con Motobomba)		
Oxigenación (Motobomba)	(Tabla N°5)	0.40
TOTAL ESCENARIO A		5.8
ESCENARIO B (Con Oxigenador)		
Oxigenación (Oxigenador de red)	(Tabla N°6)	0.063
TOTAL ESCENARIO B		5.4

Tabla N°10. Huella de carbono en la etapa de producción del sector piscicultor.
Fuente: Elaboración Propia, 2025.

Se determina que la huella de carbono total del sistema tradicional (Escenario A, con motobomba) es de 5.8 kg CO₂ eq/m². Al implementar la mejora tecnológica (Escenario B, con oxigenador automático conectado a la red), la huella total se reduce a 5.4 kg CO₂ eq/m². En ambos escenarios, el impacto está dominado por las emisiones de los lodos (2.8 kg CO₂ eq/m²) y el alimento balanceado (2.4 kg CO₂ eq/m²), mientras que la contribución combinada de todos los equipos energéticos auxiliares (rozadora, bomba y vehículo) es de 0.171 kg CO₂ eq/m².

Como se observa en la Figura N°1, la huella de carbono del sistema piscícola está dominada por dos fuentes principales. Los residuos sólidos (lodos) representan la mayor contribución con un 51.2% del impacto total, seguidos de cerca por el alimento balanceado (44.5%). El consumo total de energía (incluyendo oxigenación y equipos) representa el 4.3% de las emisiones en el escenario mejorado.

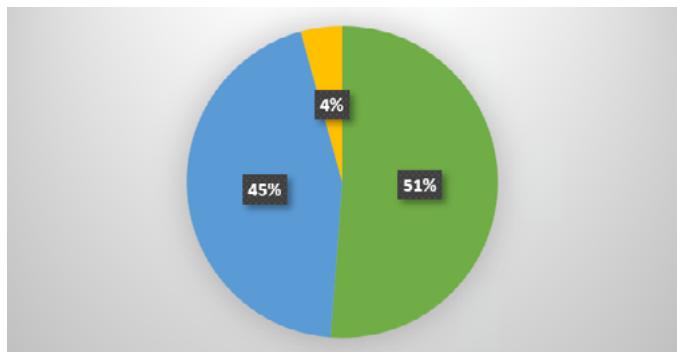


Figura N°1. Porcentaje de contribución de cada área a la huella de carbono. Fuente: Elaboración Propia, 2025.

Huella de Carbono por kg de Carne

Para permitir la comparabilidad con otros estudios y tipos de proteína, también se calculó en función de la unidad de producción con la ec. (13).

$$\text{Huella por pescado} = \frac{\text{Huella total } \left(\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{m}^2} \right)}{\text{Densidad de producción } \left(\frac{\text{kg pescado}}{\text{m}^2} \right)} \quad (13)$$

$$\text{Huella por pescado} = \frac{5.4 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^2}{1 \text{ kg pescado/m}^2} = 5.4$$

Considerando una densidad de producción de 1 kg de pescado por m² (1000 kg de cosecha por estanque de 1000 m²), la huella de carbono total del sistema (Escenario B) equivale a 5.46 kg de CO₂ equivalente por cada kilogramo de pescado producido. Este valor es altamente consistente con el promedio global para la piscicultura de agua dulce, que el meta-análisis de Poore & Nemecek (2018) sitúa en 5.1 kg CO₂ eq/kg. Dicho valor es comparable al de la carne de ave (promedio global de 6.9 kg CO₂ eq/kg) y es significativamente menor que el de la carne de res, la cual varía dependiendo del sistema: 33.3 kg CO₂ eq/kg para carne proveniente de ganado lechero y hasta 99.5 kg CO₂ eq/kg para ganado especializado de carne (Poore & Nemecek, 2018).

5. DISCUSIÓN

La estimación de la huella de carbono en el sector piscícola, particularmente en la etapa de producción, permite identificar las fuentes críticas de emisión y proponer estrategias de mitigación efectivas. Los resultados obtenidos revelan que los residuos sólidos (lodos) constituyen la principal fuente de emisiones, con un total de 2.8 kg CO₂eq/m², debido al proceso de descomposición anaeróbica que genera principalmente metano (CH₄), un gas con un potencial de calentamiento global 28 veces superior al del dióxido de carbono. Este hallazgo coincide con estudios previos que subrayan la importancia de gestionar adecuadamente los residuos orgánicos en ambientes acuáticos para reducir su impacto ambiental (Luna Imbacuan, 2011).

El alimento balanceado, aunque menos impactante que los lodos, también representa una contribución significativa con 2.43 kg CO₂eq/m². Esta cifra se alinea con lo reportado por Bahida et al. (2022), quienes destacaron que la producción y procesamiento de ingredientes como la harina de carne y de maíz son responsables de emisiones relevantes, dada su alta demanda energética.

Respecto al uso de energía para la producción, el cambio de motobombas a oxigenadores automáticos alimentados por energía fotovoltaica demostró ser una solución ambientalmente eficiente. Mientras que las motobombas generan 0.4 kg CO₂eq/m², los oxigenadores eléctricos reducen las emisiones a solo 0.063 kg CO₂eq/m², y si se alimentan completamente con energía solar, estas emisiones podrían considerarse nulas. Esta transición tecnológica, además de mitigar emisiones, responde a la crisis energética que atraviesa Bolivia desde 2024, optimizando el uso de recursos en un contexto de escasez de combustibles.

Por otro lado, el impacto de equipos como rozadoras, bombas de vaciado y vehículos de transporte fue relativamente bajo, aunque no despreciable. En conjunto, estos suman 0.17 kg CO₂eq/m², lo que sugiere que, aunque representan una fracción menor, también deben considerarse en un enfoque integral de sostenibilidad.

Un aspecto crítico a considerar es la variabilidad en los factores de emisión utilizados, especialmente en lo referido a la composición del alimento balanceado y la producción de biogás, que pueden variar significativamente según la localización, prácticas de cultivo y tecnología disponible. Asimismo, aunque se emplearon factores de emisión promedio, sería valioso en futuras investigaciones realizar mediciones *in situ* para aumentar la precisión de los resultados.

Finalmente, este estudio no solo permite comprender la magnitud de las emisiones generadas por el sector piscícola, sino que también abre la puerta a estrategias de mejora, como la optimización del uso del alimento, la reutilización de residuos orgánicos para producción de energía (biogás), y la transición energética hacia tecnologías limpias, contribuyendo así a una piscicultura más sostenible.

6. CONCLUSIONES

El estudio realizado en Mariposas, Puerto Villarroel, representa un importante avance en la comprensión del impacto ambiental de la piscicultura en Bolivia, al cuantificar la huella de carbono desde una perspectiva enfocada en la etapa de producción. Si bien los resultados evidencian que los residuos sólidos (lodos) y el alimento balanceado constituyen las principales fuentes de emisión de CO₂ equivalente, también se demuestra que la adopción de tecnologías más limpias, como los oxigenadores automáticos alimentados por energía solar, puede reducir significativamente el impacto ambiental del sector.

Es importante mencionar que, los resultados obtenidos especialmente en el área de residuos sólidos pueden variar significativamente en función del tipo y tamaño del pez cultivado, tanto en este caso como en investigaciones similares. Cada especie presenta distintas tasas de conversión alimenticia, necesidades energéticas y patrones de excreción, lo que influye directamente en la generación de residuos y emisiones asociadas. Además, debido a la limitada disponibilidad de estudios específicos sobre huella de carbono en piscicultura en contextos similares, se recurrió principalmente al uso de valores promedio reportados en la literatura. Esta aproximación permite establecer una línea base referencial, aunque se reconoce que la incorporación de datos más específicos podría mejorar la precisión de futuras evaluaciones.

Este tipo de estudios es fundamental para Bolivia, donde el desarrollo agropecuario y acuícola está en crecimiento, pero carece de datos técnicos específicos sobre impactos ambientales. Contar con herramientas de medición como la huella de carbono permite tomar decisiones más informadas, promover políticas públicas basadas en evidencia y avanzar hacia modelos de producción resilientes al cambio climático y responsables con el entorno natural.

A futuro, será fundamental ampliar este tipo de estudios a otras regiones del país y considerar todas las etapas del ciclo productivo, incluyendo el transporte y la comercialización, con el fin de diseñar una piscicultura verdaderamente sostenible que contribuya a la seguridad alimentaria sin comprometer los ecosistemas locales.

7. Referencias bibliográficas

- Bahida, A., Chadli, H., Nhhala, H., Nhhala, I., Wahbi, M., & Erraioui, H. (2022). Carbon Footprint Assessment of a Seabass Farm on the Mediterranean Moroccan Coast. *Ribarstvo, Croatian Journal of Fisheries*, 80(4), 165–178. https://www.researchgate.net/publication/366262928_CARBON_FOOTPRINT_ASSESSMENT_OF_A_SEABASS_FARMS_ON_THE_MEDITERRANEAN_MOROCCAN_COAST
- Bennardi, D. O. (2020). DIGESTIÓN ANAERÓBICA: OBTENCIÓN DE BIOGÁS. Bhatia, A. (2014). Biogas Production. En: History, Feedstock and Principle of Anaerobic Digestion. Springer, Cham.
- Boyd, C. E. (2022, 2 de enero). Tasa de conversión alimenticia y los beneficios de reducirla. Global Seafood Alliance. <https://www.globalseafood.org/advocate/un-bajo-indice-de-conversion-alimenticia-es-el-principal-indicador-de-una-acuacultura-eficiente/>
- Comité Nacional de Despacho de Carga (CNDC). (2022). Cálculo del Factor de Emisión de CO₂ del Sistema Interconectado Nacional - Gestión 2021. La Paz, Bolivia: CNDC.
- FAO. (2009). Consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/i0994s/i0994s.pdf>
- FAO. (2013). Enfrentando el cambio climático a través de la ganadería: Una evaluación global de las emisiones y oportunidades de mitigación. (Gerber, P.J., et al., Eds.). Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/4/i3437s/i3437s.pdf>
- FAO. (2024). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/publications/fao-flagship-publications/the-state-of-world-fisheries-and-aquaculture/es>
- IDAE. (2007). Biomasa: Digestores anaerobios. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Digestores_Anaerobios_A2007_0d62926d.pdf
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (s.f.). Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México. <http://www.inecc.gob.mx>
- Intergovernmental Panel on Climate Change; U.S. Environmental Protection Agency. (1990). Emisiones globales de metano antropogénico (Figura 3) y Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases. Recuperado de <https://www.epa.gov/climatechange/economics/international.html>
- Ladino-Orjuela, G. (2011). Dinámica del carbono en estanques de peces. *Orinoquia*, 15(1), 48–61. <https://www.redalyc.org/pdf/896/89621344006.pdf>
- Luna Imbacuan, M. A. (2011). Efluente Piscícolas: Características Contaminantes, Impactos y Perspectivas de Tratamiento. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, 3(1), 12–15. <https://jci.uniautonoma.edu.co/2011/2011-2.pdf>

Ministerio de Planificación del Desarrollo. (2021). Plan de Desarrollo Económico y Social (PDES) 2021-2025. La Paz, Bolivia.

Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987-992. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aaq0216>

SAG. (2009). Guía de Aplicación de Lodos de Piscicultura en Suelos. Santiago: Servicio Agrícola y Ganadero, Gobierno de Chile. https://www.sag.gob.cl/sites/default/files/Guia%20Piscicultura_2009.pdf

Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. L. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5^a ed.). Metcalf & Eddy, Inc. <https://www.mheducation.com/highered/product/wastewater-engineering-treatment-and-resource-recovery-metcalf-and-eddy.html>

Vásquez Torres, W. (s.f.). Las dietas como factor de impacto sobre la calidad del agua en sistemas de cultivo intensivo de peces. <https://revistas.udesar.edu.co/index.php/reipa/article/view/1662>

Werkneh, A. A. (2022, 1 de octubre). Biogas impurities: environmental and health implications, removal technologies and future perspectives. *Heliyon*, 8(10), e10929. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36299513/>

Proyectos de ingeniería aplicada

Biocombustibles de segunda generación en Bolivia. Oportunidades y desafíos para una transición energética sostenible.

Second-generation biofuels in Bolivia. Opportunities and challenges for a sustainable energy transition

 Jaime Fernando Ochoa Figueroa

Especialista Ambiental. Consultora Nacional (CONNAL S.R.L.). La Paz-Bolivia. fochoa.101@gmail.com

RESUMEN

Los biocombustibles de segunda generación en Bolivia ofrecen la oportunidad de una transición energética sostenible al utilizar residuos agrícolas, forestales y urbanos, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de carbono. Los principales desafíos incluyen la inversión tecnológica, marcos regulatorios y altos costos iniciales. Casos exitosos en Latinoamérica destacan su potencial, sin embargo, Bolivia necesita incentivos fiscales, subsidios y apoyo a la investigación y desarrollo (I+D) para superar las barreras y poder posicionarse como líder regional en energía sostenible.

Palabras clave: Biocombustibles de segunda generación. Transición energética. Sostenibilidad.

ABSTRACT

Second-generation biofuels in Bolivia offer the opportunity to a sustainable energy transition by using agricultural waste, forest, and urban waste, reducing fossil fuel dependence and carbon emissions. Key challenges include technological investment, regulatory frameworks, and high initial costs. Successful Latin American cases highlight potential, but Bolivia needs fiscal incentives, subsidies, and R&D support to overcome barriers and establish itself as a regional leader in sustainable energy.

Keywords: Second-generation biofuels, Energy transition, Sustainability.

Citar como: Ochoa Figueroa, J.F. Biocombustibles de segunda generación en Bolivia. Oportunidades y desafíos para una transición energética sostenible. *Revista Journal Boliviano De Ciencias*, 21(58) 156-174 <https://doi.org/10.52428/20758944.v21i58.1371>

Recepción: 07/07/2025

Aceptado: 21/10/2025

Publicado: 30/12/2025

Declaración: Derechos de autor 2025 Ochoa Figueroa, J.F. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](#).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



1. INTRODUCCIÓN

La transición hacia sistemas energéticos sostenibles exige alternativas innovadoras como los biocombustibles de segunda generación (2G), capaces de descarbonizar sectores difíciles de electrificar —como el transporte, la industria y la agricultura— a partir de materias primas no alimentarias: residuos agrícolas, forestales y plásticos posconsumo. Esta doble ventaja —reducción de emisiones y gestión de residuos— convierte a los biocombustibles 2G en una solución estratégica para países altamente dependientes de hidrocarburos, como Bolivia, donde el 78 % de la matriz energética primaria aún se basa en fuentes fósiles (IEA, 2023), a pesar de su rol como exportador de gas.

En Bolivia, recursos clave permanecen subutilizados. La agroindustria genera anualmente 3,2 millones de toneladas de residuos (MMAyA, 2021), mientras que el reciclaje de plásticos urbanos no supera el 5 %. Aprovechando estos flujos como insumos, las tecnologías 2G podrían sustituir hasta un 15 % del diésel fósil consumido en el país. Sin embargo, su implementación enfrenta importantes desafíos: altos costos de inversión (entre 50 y 100 millones de dólares por planta, según el tipo de proceso: termoquímico o bioquímico), ausencia de incentivos normativos claros y falta de información sistematizada sobre la disponibilidad de biomasa residual.

Esta investigación, realizada en el marco de la Maestría en Cambio Climático de la Universidad del Atlántico (España), aborda estas brechas a través de un análisis técnico-económico. Los resultados se alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 7 —energía asequible y no contaminante— y 13 —acción por el clima—, así como con los lineamientos del Plan Nacional de Desarrollo 2021–2025 de Bolivia.

1.1 ANTECEDENTES

Los biocombustibles (2G), producidos a partir de residuos agrícolas, forestales y plásticos posconsumo, se perfilan como una alternativa estratégica para reducir la dependencia de hidrocarburos en Bolivia y alinearse con las políticas climáticas globales, sin comprometer la seguridad alimentaria (MHE, 2022). Su adopción se formalizó en 2017 con un memorándum de entendimiento entre el Gobierno nacional y el sector agroempresarial cruceño, que derivó en la Ley 1098 de Aditivos de Origen Vegetal, orientada a promover su incorporación en la matriz energética (Fundación Tierra, 2024).

Los avances recientes incluyen la comercialización de gasolinas mezcladas con etanol (Súper Etanol 92 y Especial Plus), la construcción de dos megaplantas de biodiésel con capacidad de 600.000 litros diarios —una de ellas ya en operación en Santa Cruz—, y el impulso a cultivos sostenibles de oleaginosas como palma aceitera y Jatropha curcas (MHE, 2022). Sin embargo, la drástica caída de las reservas probadas de gas natural —de 10,7 TCF¹ en 2017 a 2,13 TCF en 2023 (Fundación Milenio, 2024)— refuerza la urgencia de diversificar la matriz energética.

En foros recientes (MHE, 2022; 2024), se enfatizó la necesidad de escalar tecnologías B2G como la pirólisis de plásticos y el HVO, junto con medidas de política pública: actualizar la Ley 1098 para incorporar estándares de sostenibilidad, redirigir

1 Trillion Cubic Feet (TCF) = billones de pies cúbicos de gas natural

subsidios fósiles hacia biocombustibles, e impulsar investigación en materias primas alternativas como residuos orgánicos y aceites usados. La meta nacional para 2050 es reemplazar el 100 % de las importaciones de diésel y gasolinas, lo cual exige coordinación público-privada, inversión en I+D y un marco regulatorio alineado con la economía circular.

A pesar de los avances, persisten obstáculos críticos: la dependencia estructural de los hidrocarburos (67 % de los subsidios estatales), la limitada capacidad tecnológica para procesar residuos lignocelulósicos y plásticos, y los riesgos socioambientales asociados a la expansión de monocultivos de palma sin salvaguardas adecuadas. En este escenario, los biocombustibles 2G constituyen una vía viable, cuyo éxito dependerá de innovación tecnológica, políticas audaces y participación comunitaria efectiva, garantizando una transición energética inclusiva y ecológicamente responsable.

2. METODOLOGÍA

Enfoque general del estudio

Este estudio evalúa el potencial de biocombustibles 2G en Bolivia mediante un enfoque interdisciplinario, integrando tecnología, economía, ambiente y políticas, alineado con prioridades nacionales y compromisos globales. La investigación se desarrolla en dos etapas:

Primera etapa: Diagnóstico energético y revisión del estado del arte

Incluye una revisión crítica de literatura científica, informes técnicos (IEA, OLADE) y normativa nacional (Ley 1098, PNDES 2021–2025). Además, se evalúa la matriz energética, la dependencia de fósiles y el potencial de residuos, con datos del INE y ministerios.

Segunda etapa: Evaluación técnico-económica y ambiental

Se analizan tecnologías como pirólisis, gasificación y fermentación mediante modelado con ASPEN Plus, evaluando eficiencia, CAPEX/OPEX y TIR. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se realiza con SimaPro/OpenLCA siguiendo ISO 14040-44.

También se integran criterios de sostenibilidad (ODS² 7 y 13) y políticas nacionales.

3. RESULTADOS

3.1 TIPOLOGÍA DE LOS BIOCOMBUSTIBLES

De acuerdo con Trejo Zamudio *et al.* (2019), los biocombustibles son carburantes producidos a partir de biomasa o residuos orgánicos mediante procesos físicos o químicos, y pueden encontrarse en estado sólido, líquido o gaseoso. Se distinguen tres generaciones:

- **Primera generación:** obtenidos de cultivos alimentarios (caña de azúcar, girasol), generan bioetanol y biodiésel, pero con efectos negativos sobre la seguridad alimentaria.
- **Segunda generación:** derivados de materias no comestibles (como jacinto de agua) y residuos agrícolas o urbanos, reducen la competencia con la producción de alimentos.
- **Tercera generación:** basados en microalgas y macroalgas con alta capacidad de captura de CO₂, permiten producir biodiésel y bioturbosina sin requerir suelo agrícola.

Estas tecnologías contribuyen a disminuir la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones netas de CO₂, al mantener un ciclo cerrado de carbono en el que el gas liberado en la combustión se reabsorbe durante el crecimiento de la biomasa. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la escalabilidad tecnológica, los costos de producción y los impactos socioambientales, que deben ser abordados para consolidar su potencial como una alternativa energética sostenible.

3.2 BENEFICIOS AMBIENTALES

Los biocombustibles (2G) son una alternativa estratégica para Bolivia, pues reducen la huella de carbono, aprovechan residuos agroforestales y no compiten con alimentos. Al usar insumos no comestibles, impulsan una transición energética sostenible que respeta biodiversidad y producción local. Su desarrollo requiere infraestructura, incentivos y políticas públicas, pero su potencial es significativo: diversifican la matriz energética, fortalecen la economía circular y mejoran la calidad ambiental.

3.2.1 Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

Los biocombustibles (2G) reducen significativamente la huella de carbono frente a los combustibles fósiles, gracias a su ciclo de carbono cerrado, donde el CO₂ emitido se compensa con el absorbido por la biomasa (Waldheim & Pettersson, 2021). En Bolivia, donde el transporte genera altas emisiones de GEI³, su uso podría disminuir hasta un 80 % las emisiones netas de CO₂, dependiendo del tipo de materia prima y el proceso de conversión utilizado (IEA Bioenergy, 2023).

3.2.2 Valorización de residuos agrícolas y forestales

En Bolivia, los residuos agrícolas y forestales —como rastrojos, bagazo de caña y aserrín— suelen destinarse a la quema, generando emisiones contaminantes y liberación de CO₂ (Carbon Neutral Plus, 2024). La producción de biocombustibles (2G) ofrece una alternativa para valorizarlos como materia prima, favoreciendo una economía circular y reduciendo los impactos ambientales derivados de su acumulación o disposición inadecuada (Waldheim & Pettersson, 2021).

3.2.2.1 Protección de ecosistemas

A diferencia de los biocombustibles de primera generación, los 2G no requieren ampliar la frontera agrícola. En Bolivia, la expansión de monocultivos como la

soya ha sido uno de los principales motores de deforestación en regiones del Chaco y la Amazonía (Repsol, 2024). El uso de biomasa residual como insumo energético reduce esta presión, contribuyendo a la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (IEA Bioenergy, 2023).

3.2.2.2 Disminución de la contaminación

La quema de residuos agrícolas genera contaminación del aire y afecta la salud pública en comunidades rurales (Alvarez & García, 2022). Su aprovechamiento en biocombustibles disminuye las emisiones de partículas, NOx y CO, mejorando la calidad del aire. De igual forma, el uso de aceites de cocina y residuos orgánicos evita descargas inadecuadas en ríos y suelos, reduciendo riesgos de contaminación hídrica (Carbón Neutral Plus, 2024).

3.2.2.3 Economía circular y sostenibilidad

El aprovechamiento de residuos en biocombustibles fomenta la **economía circular**, al transformar desechos de un sector en insumos energéticos para otro. Esto contribuye a diversificar la matriz energética, avanzar hacia un modelo resiliente y sostenible, y cumplir compromisos internacionales de mitigación del cambio climático (IEA Bioenergy, 2023).

3.3 MATERIAS PRIMAS PARA BIOCOMBUSTIBLES 2G EN BOLIVIA

Los biocombustibles de Segunda Generación (2G) provienen de residuos agrícolas, forestales, agroindustriales, plásticos y biomasa no convencional, sin competir con alimentos (Trejo Zamudio *et al.*, 2019). Estos insumos procesados en plantas especializadas producen combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, además de subproductos valorizables como fertilizantes. Su viabilidad depende de la disponibilidad de biomasa, características físico-químicas, logística de transporte e integración al balance energético nacional (Manrique *et al.*, 2023). Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas clave para planificar su aprovechamiento. Asimismo, los bosques energéticos complementan la oferta, fortaleciendo un modelo circular y sostenible en Bolivia.

3.3.1 Materias Primas para Biocombustibles 2G

La diversidad de materias primas en Bolivia se organiza según su origen Trejo Zamudio *et al.* (2019), su capacidad para generar biocombustibles sólidos, líquidos o gaseosos, agrupados según su origen:

- **Residuos agrícolas** (bagazo de caña, rastrojos, cascarilla de arroz, quinua, castaña): base para bioetanol lignocelulósico, biogás y biodiésel. Su valorización reduce la dependencia de oleaginosas y la quema a cielo abierto.
- **Residuos forestales** (aserrín, virutas, restos de poda): utilizados en pellets, syngas o diésel sintético (vía Fischer-Tropsch), favoreciendo el manejo sostenible y disminuyendo la presión sobre bosques.
- **Residuos plásticos**: mediante pirólisis catalítica o gasificación se transforman en diésel sintético y syngas, mitigando la contaminación ambiental.

- **Residuos orgánicos urbanos** (frutas, aceites usados, poda): representan más del 60 % de los residuos sólidos en ciudades como La Paz y Santa Cruz. Son aptos para biodiésel y biogás vía digestión anaerobia, reduciendo vertidos y emisiones de GEI.
- **Biomasa no convencional** (jacinto de agua, biomasa fluvial): insumos con doble beneficio, al producir biocombustibles (biodiésel, bioetanol, syngas) y controlar problemas ambientales como especies invasoras o acumulación de desechos en ríos.
- **Residuos agroindustriales amazónicos** (cáscaras de castaña): con potencial para gasificación, pirólisis y licuefacción hidrotermal, generando biocombustibles líquidos y sólidos, además de empleo local en la Amazonía.

Tabla 1. Clasificación de las Materias Primas

Clasificación	Materias Primas	Biocombustibles Potenciales	Aspectos Técnicos	Aspectos Socioambientales	Cantidades Probables*
Residuos Agrícolas	Bagazo de caña, rastrojos de maíz, cascarrilla de arroz, quinua, residuos de castaña	Bioetanol lignocelulósico, biodiésel, biogás, gas de síntesis	- Gasificación: 85% syngas, 10% biochar, 5% líquidos - Pirólisis: 30-75% bioaceite, 12-35% biochar, 13-35% gases	Reducción de dependencia de cultivos alimentarios (soya, palma)	~2-3 millones t/año → 1.200 millones L bioetanol o 800 Mm ³ biogás
Residuos Forestales	Aserrín, virutas, restos de poda	Pellets, syngas, diésel sintético (FT), bio-oil	- Gasificación + FT: diésel sintético - Pirólisis rápida: bio-oil (~35 MJ/kg)	Manejo forestal sostenible, reducción de deforestación	~0,8 millones t/año → 500 Mm ³ syngas o 300.000 t pellets
Residuos Plásticos	Plásticos urbanos/rurales	Diésel sintético, syngas	- Pirólisis catalítica: conversión a líquidos	Mitigación de contaminación por plásticos	~0,4 millones t/año → 300 millones L diésel sintético
Residuos Orgánicos Urbanos	Frutas, verduras, aceites usados, poda, residuos industriales	Biodiésel (aceites), biogás, pellets	- Digestión anaerobia: biogás (~60% CH ₄)	Reducción de emisiones en vertederos, gestión integral de residuos	~1,2 millones t/año → 700 Mm ³ biogás o 90 millones L biodiésel
Biomasa No Convencional	Jacinto de agua, madera flotante	Biodiésel, bioetanol, syngas, biocrudo	- Licuefacción hidrotermal: biocrudo (20-50%, ~35 MJ/kg)	Control de especies invasoras, mejora de navegabilidad	~0,5 millones t/año → 150 millones L biocombustibles líquidos
Residuos Agroindustrial Amazónicos	Cáscaras de castaña	Syngas, bioaceite, biocrudo, biochar	- Gasificación: syngas - HTL: biocrudo (20-50%, ~35 MJ/kg)	Valorización de residuos, empleo local	~80.000 t/año → 40 Mm ³ syngas o 25 millones L biocrudo

Fuente: Trejo Zamudio *et al.* (2019)

*Notas:

Los valores son estimativos basados en promedios de disponibilidad de biomasa y rendimientos de conversión reportados en literatura técnica.

Se expresan en toneladas (t), millones de metros cúbicos (Mm^3) o millones de litros (L) por año, en base al potencial boliviano.

3.4 TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE BIOCUMBUSTIBLES 2G

Según Trejo y otros (2019), los residuos orgánicos de la agroindustria, agricultura, ganadería y desechos municipales constituyen una fuente clave para producir biocombustibles líquidos, sólidos o gaseosos mediante distintas rutas de conversión. El sistema se organiza en cuatro fases: (1) recolección y clasificación de los residuos, (2) transporte hacia las plantas de procesamiento, (3) transformación a través de procesos bioquímicos, químicos o termoquímicos y (4) uso final como energía térmica o eléctrica.

Los procesos bioquímicos emplean microorganismos en fermentación para generar bioetanol u otros compuestos. Los procesos químicos, como la transesterificación, permiten obtener biodiésel a partir de lípidos y alcoholes, mientras que la hidrólisis descompone biomasa con soluciones ácidas, básicas o enzimáticas. Los procesos termoquímicos operan a altas temperaturas en atmósferas controladas: el pirólisis produce bioaceites y carbón vegetal, la gasificación genera gas de síntesis y la licuefacción obtiene biocombustibles líquidos.

La selección de la tecnología depende del tipo de biomasa, la infraestructura y el producto final buscado. Los métodos termoquímicos ofrecen mayor eficiencia energética y subproductos valorizables, mientras que los bioquímicos y químicos son óptimos para biocombustibles específicos. En conjunto, constituyen alternativas complementarias para impulsar una bioeconomía sostenible.

Tabla 2. Clasificación de tecnologías para la producción de biocombustibles de segunda generación

Categoría	Procesos	Mecanismo clave	Productos principales
1. Termo conversión	1.1 Pirólisis (rápida, catalítica, al vacío)	Descomposición térmica en atmósfera inerte (300-800°C).	Bioaceite, biochar, gases no condensables. Incluyen H ₂ , CO, CH ₄ , etc.
	1.2 Gasificación (lecho fijo, fluido, plasma)	Oxidación parcial con agentes gasificantes (vapor, O ₂ limitado; 700-1300°C).	Syngas (CO + H ₂), alquitranes (subproductos no deseados), cenizas.
	1.3 Licuefacción hidrotermal	Conversión en fase acuosa bajo alta presión (250-400°C, 5-20 MPa).	Biocrudo, productos hidrotermales.
2. Bio conversión	2.1 Fermentación (etanol celulósico, ABE ⁴)	Metabolismo microbiano de azúcares C5/ C6 (levaduras, bacterias).	Bioetanol, biobutanol, ácido butírico.
	2.2 Digestión anaerobia	Degrado por consorcios microbianos en condiciones anaerobias.	Biogás (CH ₄ + CO ₂), biol y biosol (fertilizantes).
	2.3 Hidrólisis enzimática	Ruptura de enlaces β-1,4-glucosídicos mediante celulasas/hemicelulasas ⁵ .	Glucosa, xilosa, oligómeros fermentables.

4 Acetona-Butanol-Etanol, producto típico de Clostridium spp

5 Etapa previa a la fermentación en muchos esquemas lignocelulósicos

Categoría	Procesos	Mecanismo clave	Productos principales
3. Quimio conversión	3.1 Transesterificación (alcalina, ácida, enzimática)	Intercambio de grupos alquilo entre ésteres y alcoholes (metanol, etanol).	Biodiesel, glicerina.
	3.2 Procesos catalíticos (Fischer-Tropsch, HDO, HVO)	Reacciones de desoxigenación, craqueo o isomerización con catalizadores heterogéneos.	Hidrocarburos renovables (diésel verde, biojet).
	3.3 Síntesis electroquímica (<i>e-fuels</i>)	Electrólisis de agua + conversión catalítica de CO ₂ (metabolismo artificial).	Metanol sintético, e-queroseno, e-metano.

Fuente: Elaboración propia, en base a datos secundarios

3.4.1 Tecnologías de termo conversión

La pirólisis y la gasificación son procesos termoquímicos esenciales para transformar biomasa en energía renovable. La pirólisis, realizada en ausencia de oxígeno a 300-600 °C, produce principalmente bioaceite (45-75%), acompañado de biochar (20-30%) y gases combustibles. El bioaceite requiere refinamiento por su acidez, mientras que el biochar mejora suelos agrícolas y captura carbono, aportando beneficios energéticos y ambientales (Mohan *et al.*, 2006). En contraste, la gasificación opera con oxígeno limitado a 700-1000 °C y genera syngas (CO+H₂), aprovechable en electricidad, calor o síntesis de combustibles sintéticos. No obstante, demanda sistemas avanzados de limpieza de gases y mayor inversión en infraestructura (McKendry, 2002; Basu, 2010).

En Bolivia, donde aproximadamente 65% de los residuos corresponden a biomasa lignocelulósica (Marín *et al.*, 2023), la selección tecnológica depende del recurso y la escala. La pirólisis es adecuada para biomasa seca como bagazo de caña, mientras la gasificación se adapta a desechos heterogéneos como ramas o aserrín. Asimismo, la licuefacción hidrotermal (250-400 °C, alta presión) constituye una alternativa para biomasa húmeda, generando biocombustibles estables sin secado previo. La integración de estas tecnologías en biorrefinerías circulares permite optimizar eficiencia energética y económica mediante el uso combinado de biochar, syngas y biocrudo (Bridgwater & Peacocke, 2000).

3.4.1.1 Pirólisis

La pirólisis es un proceso termoquímico que descompone biomasa en ausencia de oxígeno, generando bioaceite, biochar y gases no condensables. Sus rendimientos dependen de parámetros como temperatura (300–800 °C), velocidad de calentamiento y tiempo de residencia (Bridgwater, 2003). En el marco de los biocombustibles de segunda generación (B2G), se destaca por transformar biomasa lignocelulósica y residuos en combustibles líquidos y sólidos. Sin embargo, enfrenta limitaciones como la inestabilidad del bioaceite y la necesidad de refinamiento adicional para su uso energético eficiente (Mohan *et al.*, 2006).

Pirólisis Rápida

La pirólisis rápida opera entre 500–800°C, con velocidades de calentamiento extremas (100–1.000°C/s) y tiempos de residencia inferiores a 2 segundos, maximizando la producción de bioaceite (60–75% en peso seco). Este líquido,

con poder calorífico de 15–25 MJ/kg, presenta alta acidez (pH 2–3) y contenido de oxígeno (~35%), lo que limita su uso directo (Bridgwater, 2003). Para biocombustibles 2G, se requiere hidrodesoxigenación (HDO) catalítica para reducir su oxigenación y obtener diésel renovable o biojet. Un ejemplo exitoso es la conversión de bagazo de caña de azúcar, donde el bioaceite refinado alcanza estándares compatibles con motores de combustión (Mohan *et al.*, 2006).

Pirólisis Catalítica

Este proceso, realizado a 400–600°C con catalizadores como zeolitas o níquel, produce hidrocarburos líquidos similares a gasolina o diésel, con bajo contenido de oxígeno (<10%) (Zhang *et al.*, 2020). A diferencia de la pirólisis convencional, elimina la necesidad de etapas intensivas de refinación, permitiendo la obtención directa de combustibles compatibles con infraestructuras existentes. Un caso destacado es la co-conversión de residuos plásticos y lignocelulósicos, que bajo condiciones catalíticas genera diésel sintético con rendimientos del 40–50%, posicionándose como alternativa para la valorización de desechos urbanos (IEA, 2021).

Pirólisis al Vacío

Realizada a 300–500°C bajo presión reducida (0,1–1 kPa), la pirólisis al vacío produce bioaceites con menor oxigenación (<20%) y mayor estabilidad térmica que los obtenidos por métodos tradicionales (Butler *et al.*, 2011). Esta técnica es ideal para biomasas con alto contenido de humedad o lignina, como residuos forestales, donde se logran fracciones similares a gasolina con rendimientos del 50–60%. Su ventaja radica en la reducción de reacciones secundarias de oxidación, facilitando la integración del bioaceite en refinerías convencionales sin modificaciones mayores. Un estudio aplicado a desechos de poda urbana demostró la viabilidad de obtener combustibles de transporte con emisiones un 70% menores que los fósiles (Butler *et al.*, 2011).

3.4.1.2 Gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico que convierte biomasa en syngas (CO , H_2 , CO_2 , CH_4), aprovechable para producir combustibles líquidos, químicos y biopropano (BioGLP) (Bridgwater, 2012). Se desarrolla en cuatro etapas: secado (<150 °C), pirólisis (300–700 °C), oxidación (>700 °C) y reducción (850–1.200 °C), generando un syngas con poder calorífico de 4–20 MJ/Nm³ (Milne *et al.*, 1998; IPCC, 2019). Entre sus aplicaciones destacan los combustibles líquidos vía síntesis Fischer-Tropsch (catalizadores Fe/Co, 150–300 °C) para obtener diésel o gasolina renovables, y el biopropano, derivado de metanol e hidrotratamiento, aunque más costoso (2–3 €/kg frente a 1,41–1,65 €/kg fósil) reduce hasta 80% las emisiones (Primagas, 2023). Sus ventajas incluyen eficiencia (~70%), flexibilidad en insumos y capacidad multiproducto (electricidad, H₂ verde). No obstante, enfrenta retos en costos, catalizadores y políticas de incentivo. A futuro, la integración con biorrefinerías y la captura de carbono consolidará al BioGLP como alternativa clave en la transición energética.

3.4.1.3 Licuefacción hidrotermal (HTL)

La licuefacción hidrotermal (HTL) es un proceso termoquímico que convierte biomasa húmeda, como microalgas, lodos y residuos alimentarios, en biocrudo, operando a 250–400 °C y 10–25 MPa en medio acuoso (Toor *et al.*, 2011). En estas condiciones, el agua subcrítica actúa como solvente y catalizador, promoviendo la descomposición de lípidos, proteínas y carbohidratos en un biocrudo con poder calorífico de 30–40 MJ/kg (Peterson *et al.*, 2008). Este producto, rico en hidrocarburos, requiere hidrotratamiento catalítico ($\text{NiMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$) para disminuir oxígeno y nitrógeno, cumpliendo estándares de combustibles renovables (Jena *et al.*, 2011).

Una ventaja clave de la HTL es procesar biomasa con >70 % de humedad sin secado previo, alcanzando eficiencias de carbono superiores al 60 % y co-produciendo biochar (5–25 %) y una fase acuosa rica en nutrientes (Biller & Ross, 2011). No obstante, persisten desafíos técnicos, como la corrosión de reactores, tratamiento de efluentes y escalado industrial, lo que impulsa el desarrollo de catalizadores avanzados y biorrefinerías integradas (Zhang *et al.*, 2020).

Sus aplicaciones emergentes abarcan la valorización de aguas residuales y la obtención de precursores químicos (ácidos grasos, fenoles), consolidando a la HTL como una tecnología estratégica en la economía circular (Elliott *et al.*, 2015).

3.4.2 Tecnologías de Bioconversión

La bioconversión, mediante procesos biológicos como la **digestión anaerobia, fermentación oscura y fermentación en estado sólido**, transforma residuos orgánicos urbanos (1,6 millones de ton/año, MMAyA, 2023) y biomasa lignocelulósica en biocombustibles 2G, como biogás o bioetanol, aprovechando microorganismos y enzimas. En Bolivia, esta tecnología ofrece una solución dual: gestionar desechos (ej.: mercados generan 18,7 millones de m³ de biogás/año, equivalente al 12% del GLP nacional; Cámara de Hidrocarburos, 2022) y diversificar la matriz energética

3.4.2.1 Fermentación de Biomasa

La fermentación de biomasa es un proceso bioquímico mediante el cual microorganismos transforman materia orgánica en alcoholes, ácidos orgánicos o gases. Dos rutas destacan en biocombustibles de segunda generación: la fermentación para etanol celulósico y la fermentación ABE (acetona–butanol–etanol). El etanol celulósico requiere pretratamientos físico-químicos e hidrólisis enzimática para liberar azúcares fermentables a partir de residuos agrícolas o forestales (IEA Bioenergy, 2022). La fermentación ABE, realizada con bacterias del género *Clostridium*, convierte azúcares o almidones en solventes, incluido el butanol, un biocombustible avanzado con elevado poder energético (Bastos *et al.*, 2020).

Ambos procesos pueden integrarse en biorrefinerías circulares, combinándose con tecnologías termoquímicas como la gasificación. Un estudio del TEC⁶ en Costa Rica (2018) evidenció que el uso de carbón residual de la gasificación como aditivo en digestión anaerobia mejora la producción de biogás. Esta sinergia entre fermentación y termoquímica optimiza el aprovechamiento de biomasa, disminuye residuos y fortalece la sostenibilidad de los sistemas energéticos locales.

6 Instituto Tecnológico de Costa Rica

3.4.2.2 Otros Procesos de bioconversión

Diversas técnicas de bioconversión son claves en la producción de biocombustibles de segunda generación. La fermentación alcohólica, con *Saccharomyces cerevisiae*, transforma azúcares en bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos como bagazo o paja, previa hidrólisis enzimática, con eficiencias de 0,4–0,5 L/kg de biomasa (Taherzadeh & Karimi, 2007). La fermentación oscura, mediante bacterias como *Clostridium* y *Enterobacter*, genera hidrógeno sin requerir luz ni pretratamientos costosos (Levin *et al.*, 2004). La fermentación en estado sólido (FES) emplea hongos como *Aspergillus* y *Trichoderma* para degradar residuos agrícolas (café, cítricos), obteniendo bioetanol, ácidos orgánicos o enzimas (Pandey *et al.*, 2000). La hidrólisis enzimática, usando celulasas y hemicelulasas, descompone celulosa y hemicelulosa en azúcares fermentables, etapa esencial para biocombustibles 2G (Kumar *et al.*, 2009). Finalmente, las Microbial Fuel Cells (MFC) utilizan bacterias electrogénicas para oxidar materia orgánica y producir electricidad, alcanzando 0,5–1 W/m³ (Logan *et al.*, 2006). Estas tecnologías son complementarias y favorecen sistemas circulares de energía sostenible.

3.4.3 Tecnologías de Químico conversión

Las tecnologías de químico conversión transforman biomasa y residuos urbanos o industriales en energía limpia, biocombustibles avanzados y productos químicos de alto valor. A diferencia de los procesos térmicos, emplean reacciones químicas o catalíticas que mejoran la eficiencia y reducen impactos ambientales. Entre ellas destacan la transesterificación, la hidrólisis y la electrólisis, capaces de generar hidrógeno verde e insumos industriales. Estas tecnologías fortalecen la economía circular, descarbonizan sectores estratégicos y contribuyen a un modelo energético sostenible, aunque aún enfrentan desafíos técnicos, económicos y logísticos para su escalabilidad.

3.4.3.1 Transesterificación

La transesterificación es un proceso químico fundamental para obtener biodiésel a partir de aceites vegetales, grasas animales o residuos lipídicos. Consiste en la reacción de triglicéridos con metanol o etanol en presencia de un catalizador, generando ésteres alquílicos (biodiésel) y glicerol como subproducto (Knothe *et al.*, 2010). Los catalizadores pueden ser homogéneos (NaOH, KOH), heterogéneos (óxidos de calcio, zeolitas) o enzimáticos (lipasas), con ventajas y limitaciones. Los alcalinos homogéneos son muy eficientes (>98 % de conversión en 1–2 h a 60 °C), pero sensibles a ácidos grasos libres (FFA >1 %), que generan jabones y complican la purificación (Ma & Hanna, 1999).

En cambio, los catalizadores ácidos (H_2SO_4) toleran altos FFA (>20 %), aunque requieren condiciones severas (100 °C, 3–6 h) y presentan problemas de corrosión (López Granados *et al.*, 2007). Los enzimáticos ofrecen selectividad y menor impacto ambiental, pero su alto costo y baja estabilidad térmica limitan su aplicación (Tan *et al.*, 2020). Avances recientes incluyen catalizadores heterogéneos magnéticos (Fe_3O_4 funcionalizado), que facilitan separación y reutilización, reduciendo residuos (Zhang *et al.*, 2019).

El proceso comprende pretratamiento (remoción de humedad y FFA), reacción principal y purificación (lavado y secado). El biodiésel resultante debe cumplir normas ASTM D6751 o EN 14214, que regulan viscosidad (3,5–5,0 mm²/s) y

glicerol libre (<0,02 %). Integrada en biorrefinerías circulares, la transesterificación valoriza residuos agroindustriales y reduce emisiones de CO₂ hasta un 80 % respecto al diésel fósil (NREL, 2021).

3.4.3.2 Procesos catalíticos (Fischer-Tropsch, HDO, HVO)

Los procesos catalíticos son esenciales para mejorar la calidad y estabilidad de los biocombustibles avanzados. La síntesis Fischer-Tropsch (FT) convierte syngas (CO + H₂) en hidrocarburos líquidos como diésel y jet fuel, utilizando catalizadores de hierro o cobalto a 200–350 °C y 20–40 bar, con selectividad controlada mediante soportes mesoporosos (SiO₂, Al₂O₃) (Dry, 2002). Este método, aplicado por Sasol, produce combustibles libres de azufre y aromáticos, adecuados para aviación sostenible (IEA, 2020).

La hidrodesoxigenación (HDO) elimina oxígeno de bioaceites obtenidos por pirólisis o llicuefacción, mediante catalizadores sulfurados (NiMo/Al₂O₃, CoMo/SBA-15) a 300–400 °C y 50–150 bar. El resultado son hidrocarburos estables, con menor acidez y mejor estabilidad oxidativa, aunque la necesidad de hidrógeno externo eleva los costos (Wang *et al.*, 2017).

El hidrotratamiento de aceites vegetales (HVO) transforma triglicéridos de aceites usados y grasas animales en diésel renovable, mediante hidrogenación catalítica (Pt, Pd) a 300–450 °C y 30–90 bar. No genera glicerol y cumple la norma EN 15940, ofreciendo mayor poder calorífico que el biodiésel convencional y plena compatibilidad con motores diésel (Neste, 2022).

Aunque demandan energía e insumos, estos procesos son pilares para biocombustibles de alta densidad energética y bajas emisiones, contribuyendo a la descarbonización global (Huber *et al.*, 2006).

3.5 MODELADO DE UNA BIORREFINERÍA EN SANTA CRUZ

Este capítulo desarrolla un modelo tecno-económico de una biorrefinería integrada ubicada en el Departamento Santa Cruz con dos líneas productivas complementarias:

1. Co-combustión 70 % Gas Natural (GN) / 30 % Biogás en ciclo combinado para generación eléctrica, y
2. Producción de diésel sintético mediante dos rutas alternativas: Gasificación + Fischer-Tropsch (FT) y Pirólisis + HVO (con foco en fracciones aptas para SAF⁷).

3.5.1 Diseño de proceso e integración de sitio

El análisis compara CAPEX/OPEX, eficiencia, riesgos de activos y creación de valor (TIR, payback, resiliencia regulatoria), considerando las condiciones de oferta de biomasa/residuos del oriente boliviano, la infraestructura gasifera existente y los incentivos de descarbonización aplicables en Bolivia.

La biorrefinería se concibe como un hub multi-feedstock con utilidades compartidas (vapor, agua de enfriamiento, aire de servicio, tratamiento de efluentes) y sinergias energéticas entre líneas:

- Biogás (digestión anaerobia de residuos agroindustriales/ROU8) → acondicionamiento → mezcla 70/30 con GN → ciclo combinado (CCGT9).
- Sólidos lignocelulósicos/plásticos → Ruta A: Gasificación → Syngas → FT → diésel sintético / nafta / ceras.
- Sólidos secos → Ruta B: Pirólisis rápida/catalítica → bio-oil → hidrotratamiento (HDO/HVO) → diésel renovable/SAF.

Integraciones clave: recuperación de calor del CCGT para precalentamientos, uso de H₂ (de reformado/FT o electrolítico) en hidrotratamiento, y gestión de CO₂ biogénico (recirculación a upgrading, créditos de carbono o síntesis de e-combustibles).

3.5.2 Supuestos y datos de entrada (síntesis)

- **Biogás crudo:** CH₄ 55–65 %, CO₂ 35–45 %, H₂S variable (decenas–miles ppmv), humedad saturada; presencia potencial de siloxanos.
- **Acondicionamiento estándar:** desulfurización (biotrickling/carbono activado), deshumidificación (chiller/adsorción), pulido de siloxanos.
- **CCGT:** mezcla en poder calorífico equivalente (base LHV), respetando límites del OEM para H₂S total y contaminantes.
- Rutas diésel sintético:
 - **Gasificación + FT:** syngas acondicionado (H₂/CO), FT (Co/Fe), hidrocraqueo/isomerización.
 - **Pirólisis + HVO:** bio-oil estabilizado → HDO/HVO (NiMo/CoMo o metales nobles) con requerimientos de H₂ y gestión de N/S/O.
- **Análisis financiero:** horizonte 15–20 años; TIR/NPV; sensibilidad en costo de feedstock, precio de GN/diésel, capacidad, precio del carbono y factores de disponibilidad.

3.5.3 Eje 1: Generación eléctrica 70 % GN / 30 % Biogás (CCGT)

La integración de biogás en la Planta Termoeléctrica de Warnes (70 % gas natural / 30 % biogás) puede abordarse mediante dos esquemas de acondicionamiento.

La Alternativa 1 (biogás crudo) presenta un CAPEX bajo, pero conlleva mayores costos operativos por corrosión, incrustaciones y fallas frecuentes en turbinas, además de un perfil ambiental más complejo por las emisiones de SOx y partículas. En contraste, la Alternativa 2 (biogás tratado: desulfurado y deshumificado) exige una inversión inicial más alta, pero asegura menores OPEX, mayor eficiencia térmica, prolongada vida útil de los equipos y cumplimiento ambiental más seguro.

En una planta de ciclo combinado de operación continua y estratégica, la opción más recomendable es la del biogás tratado, ya que, aunque incrementa el CAPEX, optimiza el desempeño técnico, reduce riesgos de indisponibilidad y maximiza la sostenibilidad del proyecto en el largo plazo.

8 Residuos Orgánicos Urbanos (ROU)

9 Combined Cycle Gas Turbine (CCGT) o en español Central de Ciclo Combinado a Gas

3.5.4 Eje 2: Producción de diésel sintético

La biorefinería puede optar por dos rutas tecnológicas. La **Gasificación + Fischer-Tropsch (FT)** produce un diésel parafínico de alta calidad, con bajo azufre y alto número de cetanos, además de coproductos valiosos (nafta, ceras). Su principal limitante es el alto CAPEX requerido para gasificación, limpieza de syngas y upgrading; sin embargo, logra una rentabilidad competitiva ($TIR \approx 15\%$) en escenarios de logística optimizada y contratos de venta asegurados. La complejidad técnica es elevada, con riesgos asociados al control de alquitranes, ajuste de la relación H₂/CO y manejo de catalizadores.

La ruta de Pirólisis rápida + HVO presenta un CAPEX inferior y mayor flexibilidad tecnológica, destacando la posibilidad de orientar parte de la producción hacia combustibles sostenibles de aviación (SAF). Aunque su rentabilidad base es menor que la del FT en diésel terrestre, puede mejorar significativamente con incentivos climáticos, primas SAF y créditos de carbono. Sus desafíos técnicos se centran en la estabilidad del bio-oil, la elevada demanda de hidrógeno y el control de impurezas durante el hidrotratamiento.

En comparación, la gasificación-FT se perfilaría como una opción atractiva para el mercado de diésel sintético, gracias a su mayor TIR, escalabilidad y perfil de producto. En cambio, la pirólisis-HVO resulta estratégica en escenarios donde la prioridad es el SAF y se dispone de financiamiento climático.

4. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

La transición energética en Bolivia requiere un enfoque integral que combine seguridad energética, reducción de emisiones y desarrollo socioeconómico. Los Biocombustibles de Segunda Generación (B2G) constituyen una oportunidad estratégica para diversificar la matriz energética y avanzar hacia un modelo de **energía sostenible y baja en carbono**. A continuación, se plantean los ejes estratégicos que articulan la implementación de B2G en el país.

4.1 AGRICULTURA DEL CARBONO COMO BASE DE INSUMOS SOSTENIBLES

La **agricultura del carbono** se propone como un pilar para garantizar materia prima sostenible para biorrefinerías B2G. Mediante prácticas como la producción de biochar, agroforestería y cultivos de cobertura, se captura CO₂ en suelos y biomasa, generando **residuos agrícolas y forestales** que alimentan procesos termoquímicos (pirólisis, gasificación) y biotecnológicos para producir bioetanol celulósico, biocrudo y syngas.

Esta estrategia convierte al sector agropecuario en **sumidero neto de carbono**, mejora la fertilidad de suelos y contribuye a la **resiliencia climática**, fortaleciendo la sinergia entre **producción agrícola sostenible y generación de bioenergía limpia**.

4.2 DESARROLLO DE UNA BIORREFINERÍA CIRCULAR INTEGRADA

Se plantea la construcción de Biorrefinerías Circulares Integradas de segunda generación, capaces de transformar residuos agrícolas, forestales, ganaderos y urbanos en biocombustibles avanzados (bioetanol, biodiésel 2G, bio-GLP), además de biofertilizantes y bioproductos de valor agregado.

El modelo se fundamenta en la economía circular, articulando cadenas de valor locales, sistemas de gestión de residuos y Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Este enfoque promueve la descentralización energética, la generación de empleos verdes y la industrialización sostenible, en concordancia con la Ley Marco de la Madre Tierra (Ley N° 300) y el DS N° 3874.

4.3 INTRODUCCIÓN PROGRESIVA DE MEZCLAS EN EL TRANSPORTE

Como medida de corto y mediano plazo, se priorizará la introducción de mezclas de biodiésel, diésel fósil y diésel sintético (HVO, FT-diesel) en el transporte terrestre e industrial. Estas mezclas permiten una reducción inmediata de emisiones contaminantes y se adaptan a la infraestructura vehicular existente, dado que los combustibles sintéticos son drop-in y cumplen normas internacionales (EN 15940).

La estrategia contempla porcentajes de mezcla crecientes (B10 → B20 → B30) hasta lograr un mercado consolidado de diésel sostenible, garantizando compatibilidad técnica y seguridad energética en el país.

4.4 INCLUSIÓN SOCIAL Y PARTICIPACIÓN COMUNITARIA

La implementación de biocombustibles avanzados debe asegurar la inclusión de comunidades rurales e indígenas, priorizando modelos de producción descentralizada de bioenergía a partir de residuos locales (ej. yuca en el Chaco, castaña en la Amazonía, quinua en el Altiplano). Se promoverán esquemas de gobernanza participativa, consultas previas y beneficios equitativos, evitando conflictos por uso de tierras y generando valor compartido en territorios productivos.

4.5 COOPERACIÓN INTERNACIONAL Y FINANCIAMIENTO CLIMÁTICO

La estrategia nacional de B2G se vincularía con financiamiento climático (Green Climate Fund, Fondo de Adaptación), alianzas regionales (CELAC, OLADE) y programas como ProTransición (VMEEyER–GIZ). Esto permitirá crear marcos regulatorios, mecanismos financieros sostenibles, fortalecer la transferencia tecnológica en bioprocesos, eficiencia energética y movilidad sostenible, además de consolidar la capacidad institucional e investigativa nacional.

5. CONCLUSIONES

Los biocombustibles de segunda generación (B2G) ofrecen a Bolivia una alternativa estratégica para diversificar su matriz energética, reducir la dependencia de combustibles fósiles y avanzar hacia una economía baja en carbono. A partir de residuos agrícolas, forestales, plásticos y biomasa acuática, el país dispone de un potencial bioenergético considerable, aún poco aprovechado. Tecnologías como la pirólisis, gasificación, fermentación y licuefacción hidrotermal permiten transformar esta biomasa en biocombustibles sostenibles, impulsando además la economía circular, el desarrollo rural y la inclusión energética.

Su implementación requiere desafíos importantes: generar regulación específica, superar elevados costos iniciales, barreras tecnológicas y ausencia de incentivos claros. También existen limitaciones en infraestructura, capacidades técnicas locales y gestión eficiente de residuos. Para avanzar, se requiere fortalecer la

gobernanza energética, fomentar alianzas público-privadas y actualizar el marco normativo, incluyendo criterios de sostenibilidad y mecanismos de financiamiento como créditos de carbono.

Si Bolivia logra articular innovación tecnológica, justicia social y sostenibilidad ambiental, podrá posicionarse como un referente regional en bioeconomía circular. La instalación de biorrefinerías integradas, junto con el acceso a cooperación internacional y redes científicas, permitirá transformar el modelo energético del país, alineándolo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y el Acuerdo de París.

7. REFERENCIAS

- Álvarez, C., & García, L. (2022). **Producción de biocombustibles y su impacto en la seguridad alimentaria**. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de <https://www.economia.unam.mx/publicaciones/econinforma/pdfs/359/04carlosalvarez.pdf>
- Andrade Torres, F., et al. (2021). *A comparative study of biofuels and Fischer-Tropsch diesel blends on the engine combustion performance*. Energies, 14(6), 1538. <https://doi.org/10.3390/en14061538>
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94.
- Bridgwater, A.V. (2003). Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. *Chemical Engineering Journal*, 91(2-3), 87-102.
- Bridgwater, A.V., & Peacocke, G.V.C. (2000). Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(1), 1-73.
- Carbon Neutral Plus. (2024). *¿Qué son los biocombustibles?* Recuperado el 25 de febrero de 2025, Recuperado de <https://www.carbonneutralplus.com/que-son-los-biocombustibles>
- Dimitriadis, A., et al. (2018). *Evaluation of a hydrotreated vegetable oil (HVO) and effects on emissions of a passenger car diesel engine*. Frontiers in Mechanical Engineering, 4, 7. <https://doi.org/10.3389/fmec.2018.00007>
- Estado Plurinacional de Bolivia. (2023). *Ley 1407 de Electricidad*. Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia.
- Estado Plurinacional de Bolivia. (2009). *Constitución Política del Estado*. Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia. <https://www.lexivox.org/norms/BO-CPE/>
- Estado Plurinacional de Bolivia. (2005). *Ley N° 3058 de Hidrocarburos*. Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia.
- Estado Plurinacional de Bolivia. (2012). Ley N° 300 de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien. Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia.
- Estado Plurinacional de Bolivia. (2021). *Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social 2021-2025*. <https://www.planificacion.gob.bo>

Faba, L., Díaz, E., & Ordóñez, S. (2014). *Transformación de biomasa en biocombustibles de segunda generación*. Madera y Bosques, 20(3), 11-24.

Fundación Milenio. (2024). Coy 497: ¿Cuál es el nivel de reservas de gas natural? Recuperado de <https://fundacion-milenio.org/coy-497-cual-es-el-nivel-de-reservas-de-gas-natural>

Fundación Tierra. (2024). *Biocombustibles: Falsas soluciones y riesgos para la seguridad alimentaria*. Fundación Tierra. <https://www.ftierra.org/index.php/publicacion/documentos-de-trabajo/252-biocombustibles-falsas-soluciones-y-riesgos-para-la-seguridad-alimentaria>

GALMP Gobierno Autónomo Municipal de La Paz. (2020). *Estudio de caracterización de residuos sólidos para una planta de industrialización de basura en la ciudad de La Paz, como posible fuente de generación de energía, en el marco de la promoción y atracción de inversiones*. Informe final, Producto 3 (4ta. versión corregida).

IEA Bioenergy. (2023). *Second-generation biofuels: Opportunities and challenges*. International Energy Agency. <https://www.ieabioenergy.com/publications/second-generation-biofuels>

Instituto Nacional de Estadística. (2022). *Anuario Estadístico Agropecuario 2021* (Publicación No. 245-2022). <https://www.ine.gob.bo>

International Energy Agency IEA. (2023). *Bolivia energy policy review*. OECD Publishing. <https://www.iea.org/reports/bolivia-2023>

International Energy Agency IEA. (2023). *Energy policy review: Bolivia*. OECD Publishing. <https://www.iea.org/reports/bolivia-2023>

IPCC. (2019). Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.

Johnson, K. A., et al. (2022). *Effects of HVO and HVO/biodiesel blends on the toxicological properties of emissions*. Fuel, 323, 124283. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124283>

Manrique, S.M., Salvo, A., Binda, C., Subelza, C., Mosconi, L., & Balderrama, B. (Eds.). (2023). *Conversión energética de la biomasa: bases para su aprovechamiento. Guía científico-técnica*. Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiR-T), Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Ediciones CYTED. ISBN: 978-84-15413-60-8. Madrid, España. 355 páginas.

Marín, G. M., Surculento, R. V., & Lopez, L. (2023). Perspectivas en la utilización de residuos de la industria de la castaña: procesos termoquímicos, revisión bibliográfica. Revista Boliviana de Química, 40(4), 97-116.

McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 3): Gasification technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 55-63.

Milne, T. A., Evans, R. J., & Abatzoglou, N. (1998). Biomass gasifier “tars”: their nature, formation, and conversion. National Renewable Energy Laboratory.

Ministerio de Hidrocarburos y Energías MHE. (2022). *Memoria del Foro de Biocombustibles 2022*. La Paz, Bolivia.

Ministerio de Hidrocarburos y Energías - MHE. (2024, 30 de junio). Expertos identifican desafíos y estrategias para obtener financiamiento climático en proyectos energéticos. Recuperado de: <https://www.mhe.gob.bo>.

Ministerio de Hidrocarburos y Energías - MHE. (2024). *Bolivia y Alemania fortalecen alianza para la transición energética con un convenio de cooperación por 5 millones de euros*. Viceministerio de Electricidad y Energías Renovables – GIZ. Disponible en: <https://www.mhe.gob.bo> (Consultado el 28 de marzo de 2025).

Ministerio de Medio Ambiente y Agua - MMAyA. (2021). *Informe Nacional de Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia 2020*. <https://www.mmaya.gob.bo>

Mohan, D., Pittman Jr., C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy Fuels*, 20(3), 848-889.

Movimiento en Defensa de la Cuenca del Río Madera y de la Región Amazónica. (2008). *Represas sobre el río Madera: Energía para las transnacionales y destrucción de la Amazonía*. Foro Boliviano sobre Medio Ambiente y Desarrollo (FOBOMADE). <https://www.fobomade.org.bo>

Prabhakara Rao, T., Adusuri, M., & Donipati, J. V. (2024). Optimization of drying temperatures for enhanced biodiesel production from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 8(11), 996-1003. <https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i11m.3005>

Primagas. (2023). *Biopropano, un biogás como opción energética*. Recuperado de <https://www.primagas.es/blog/biopropano>

Primagas. (2023). *Producción de Biopropano a partir de Syngas*. Recuperado de <https://www.primagas.es/gas/biopropano>

Propanegas. (2023). Precios de GLP en España. Recuperado de <https://propanegas.com/faq/evolucion-precio-mercados>

Repsol. (2024). *Biocombustibles: Alternativas sostenibles para el transporte*. Recuperado de <https://www.repsol.com/es/tecnologia-digitalizacion/technology-lab/reduccion-emisiones/biocombustibles/index.cshtml>

Sánchez Bastardo, N. (2014). *Obtención de gas de síntesis a partir de biomasa utilizando catalizadores de níquel* [Tesis de grado, Universidad de Valladolid]. Escuela de Ingenierías Industriales.

Smigins, R., et al. (2023). *Studies of engine performance and emissions at full-load mode using HVO, diesel fuel, and HVO5*. *Energies*, 16(12), 4785. <https://doi.org/10.3390/en16124785>

TEC (Instituto Tecnológico de Costa Rica). (2018). *Plantaciones dendroenergéticas y gasificación de biomasa: nuevos desarrollos con marca TEC*. Revista Kuru. Recuperado de: <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/3848>

Trejo Zamudio, D., García Trejo, J. F., & Gutiérrez Antonio, C. (2019). *Conversión de residuos a biocombustibles*. Ciencia, 70(1), 65-71. Recuperado de https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/70_1/PDF/ResiduosBiocombustibles.pdf

Vargas Bautista, J. P. y Calvimontes, J. (2017). *Evaluación del Potencial de Biogás de Rellenos Sanitarios en Bolivia para Producir Electricidad*. Investigación & Desarrollo, No. 17, Vol. 1: 55-62. UPB.

Viera, J., et al. (2020). *Influence of fuel properties on performance and emissions of a Euro 6 diesel engine fueled with HVO, GTL, and FAME blends*. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 13(2), 108-118. <https://doi.org/10.4271/03-13-02-0007>

Waldheim, L., & Pettersson, K. (2021). *Advances in second-generation biofuel production technologies*. Biofuels, 12(3), 567-582. <https://doi.org/10.1080/17597269.2021.1931200>

Waldheim, L., & Pettersson, K. (2021). *Advances in second-generation biofuel production technologies*. Biofuels, 12(3), 567-582. <https://doi.org/10.1080/17597269.2021.1931200>

**SEDE CENTRAL COCHABAMBA**

Campus Universitario Tiquipaya
c. Guillermina Martínez s/n
Telf: (591 - 4) 4318800

Torre Académica América

Av. América N°165 entre Túpac Amaru y Av. Libertador Bolívar
Telf: (591 - 4) 4150300

Edif. Polifuncional Ayacucho

Av. Ayacucho N°256
Telf: (591 - 4) 4150200

SEDE ACADÉMICA LA PAZ

Campus Miraflores
Av. Argentina N° 2083 esq. Nicaragua
Telf: (591 - 2) 2246725/6/7

SEDE ACADÉMICA SUCRE

Campus Las Delicias
Pasaje Guillermina de Ruiz N° 1 (Zona Bajo Delicias)
Telf: (591 - 4) 6441664

SEDE ACADÉMICA TRINIDAD

Campus El Gran Paititi
Av. Reyes s/n
Telf: (591 - 3) 4621238

SEDE ACADÉMICA SANTA CRUZ

Campus Eco Smart
Av. Banzer – Séptimo anillo y Av. Juan Pablo II