

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 kg CO₂eq/m²), seguidos del alimento balanceado (2.43 kg CO₂eq/m²) y el uso de energía (0.23 kg CO₂eq/m² 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 CO₂. 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 kg CO₂eq/m²), followed by balanced feed (2.43 kg CO₂eq/m²) and energy use (0.23 kg CO₂eq/m² 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. CO₂ emissions. Clean energy. Environmental sustainability.

Citar como: VMarka Añez, 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/10.52428/20758944.v21i58.1390>

Recepción: 21/07/2025

Aceptado: 25/11/2025

Publicado: 30/12/2025

Declaración: Derechos de autor 2025 Marka Añez, M.C., Fernández-Vázquez, M.. Esta obra está bajo una licencia internacional [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.



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

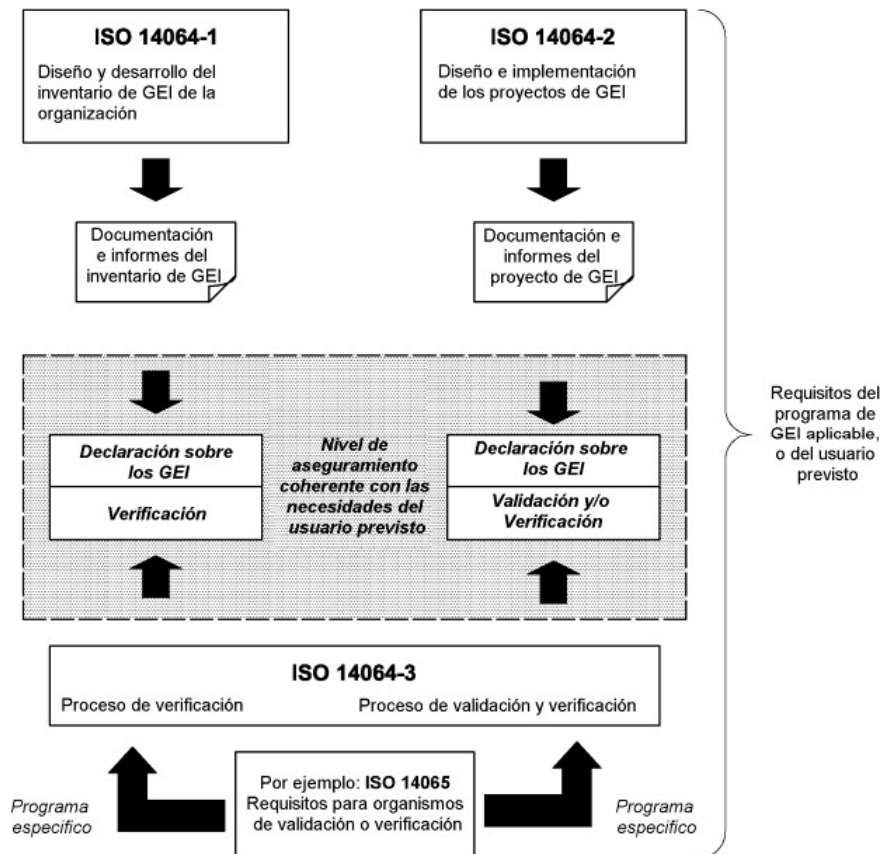
La familia de normas ISO comprendidas entre la ISO 14064 y la 14069 tienen como objetivo dar credibilidad y aseguramiento a los reportes de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y a las declaraciones de reducción o eliminación de GEI. Las normas no están alineadas con ningún esquema particular, 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:

a) Identificación de fuentes de emisión de CO₂, b) Discriminación de actividades según su representatividad, c) Base de datos y d) 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^2).

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:

$$MO = \text{Lodo total} \times 0.60 \quad (3)$$

$$MOD = \text{Lodo total} \times 0.50 \quad (4)$$

$$\text{Emisiones CH}_4 = MOD \times 0.65 \quad (5)$$

$$\text{Emisiones CO}_2 = MOD \times 0.35 \quad (6)$$

$$\text{Emisiones totales} = (\text{Emisiones CH}_4 \times GWP \text{ CH}_4) + (\text{Emisiones CO}_2 \times GWP \text{ CO}_2) \quad (7)$$

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 CO2 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 CH₄	101.40	kg CH ₄
Emisiones CO₂	54.6	kg CO ₂
Potencial de calentamiento global (GWP) CH₄	28	-
CO2 eq.	2844.6	kg CO2 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).

$$\text{Indicador} = \frac{\text{Emisiones (kg CO2 eq.)}}{\text{Área (m}^2\text{)}} \quad (8)$$

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	m ²
Total	2.8	kg CO ₂ /m 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:

$$\text{Emisión por ciclo de vida} = FE \times PI \times AC \quad (10)$$

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 piscicultor, 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:

$$Emisiones\ por\ m^2 = FE \times CT \quad (11)$$

Donde:

- FE = Factor de emisión de CO_2 de gasolina 2.35 kg CO_2 /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 CO_2 /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:

$$CT = CE \times N \times D \quad (12)$$

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 CO₂/
	0.0004	ton CO₂/

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 m ²	0.063	kg CO ₂ / m ²
	0.000063	ton CO₂/m²

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 m ²	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 CO₂ eq/ m²)
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.

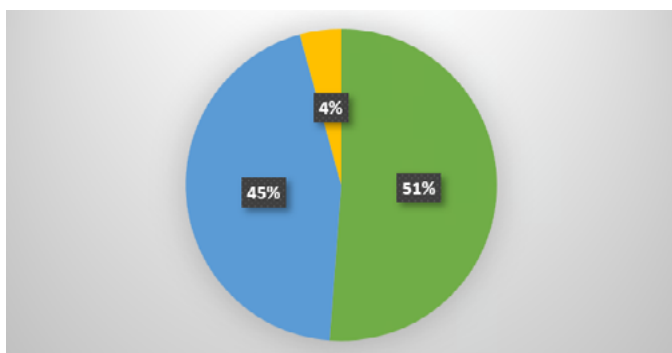


Figura N°1. Porcentaje de contribución de cada área a la huella de carbono. Fuente: Elaboración Propia, 2025.

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).

$$Huella\ por\ pescado = \frac{Huella\ total\ \left(\frac{kgCO_2eq}{m^2}\right)}{Densidad\ de\ producción\ \left(\frac{kg\ pescado}{m^2}\right)} \quad (13)$$

$$Huella\ por\ pescado = \frac{5.4\ kg\ CO_2eq/m^2}{1\ kg\ pescado/m^2} = 5.4$$

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 piscicultor, 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 piscicultor, 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_FARM_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-acuicultura-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.uniautonomia.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.aag0216>

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.udenar.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/>