

DOI: 10.35319/acta-nova.20235

ACTA NOVA

Revista de Ciencias y Tecnología

Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Católica Boliviana, c Márquez s/n esq. Plaza Trigo, Cochabamba Bolivia

Correspondencia:
Marcos Luján Pérez
mlujan@ucb.edu.bo

Modelos de estimación de emisiones de GEI en embalses hidroeléctricos y aplicación a tres proyectos hidroeléctricos en Bolivia para obtener indicadores de sostenibilidad aplicables a la Evaluación de Impacto Ambiental

Models for estimating GHG emissions in hydroelectric reservoirs and application to three hydroelectric projects in Bolivia to obtain sustainability indicators applicable to the Environmental Impact Assessment

María Mercedes Zurita & Marcos Luján

Resumen: En respuesta a la crisis climática, Bolivia ha adoptado la transición energética mediante el aprovechamiento de la energía hidroeléctrica como principal fuente. Gracias a sus condiciones climáticas y topográficas, el país cuenta con un potencial aproximado de 40 GW, aunque su capacidad actual de generación hidroeléctrica es de tan solo 0,75 GW.

Este artículo presenta los resultados de una investigación sobre diferentes modelos de estimación de emisiones de GEI en proyectos hidroeléctricos que permitan la estimación de estas emisiones en diferentes contextos biogeográficos y permitan establecer las condiciones del embalse y las condiciones climáticas que inciden en las emisiones de GEI. Se identificaron como principales variables indicadoras de sostenibilidad la densidad de potencia (potencia generada por unidad de superficie inundada) y las emisiones específicas (emisiones de GEI por energía generada). Entre los modelos empleados, se seleccionó el modelo G-res Tool para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en tres proyectos hidroeléctricos en Bolivia: Ivirizu, Miguillas y Misicuni en un ciclo de vida de 100 años. El Proyecto Hidroeléctrico Ivirizu genera 374 t CO_{2eq} año⁻¹ de las fuentes biogénicas y emite aproximadamente 664.664 t CO_{2eq} durante su fase de construcción, lo que resulta en una huella neta de GEI de 711.506 t CO_{2eq} y una emisión específica de 6,13 g CO_{2eq} kWh⁻¹. En el caso de Miguillas, se estimaron emisiones biogénicas del embalse de 239 t CO_{2eq} año⁻¹, mientras que las emisiones asociadas a la construcción se estimaron en 412.654 t CO_{2eq}. Las emisiones específicas son 4,14 g CO_{2eq} kWh⁻¹. Para el Proyecto Múltiple Misicuni se estimaron 299 t CO_{2eq} año⁻¹ en emisiones biogénicas, para la etapa de construcción se estimaron 974.448 t CO_{2eq}, resultando en una huella neta de GEI de 974.747 t CO_{2eq}, las emisiones específicas serían 6,95 g CO_{2eq} kWh⁻¹. Estos resultados muestran de manera evidente que las emisiones de GEI durante las actividades de construcción superan significativamente las emisiones biogénicas de GEI por la

inundación de los embalses de los tres proyectos hidroeléctricos. Además, es importante destacar que existe variabilidad en los valores debido a las condiciones ambientales específicas de cada lugar. Ivirizu presenta mayor cantidad de emisiones biogénicas de GEI porque se ubica en una zona templada, con épocas de altas temperaturas y alberga un bosque denso en el sitio del embalse. En el caso de Miguillas, la zona es templada y la cobertura del suelo se compone de bofedales. En cuanto a Misicuni, su ubicación en un clima frío de montaña, donde previamente predominaba un área de pajonal. Por sus emisiones específicas menores a los 80 g CO_{2eq} kWh⁻¹, todos estos proyectos se consideran como ambientalmente sostenibles.

Palabras clave: Emisiones de GEI, proyecto hidroeléctrico, G-res Tool.

Summary: In response to the climate crisis, Bolivia has adopted the energy transition by harnessing hydroelectric energy as the main source. Thanks to its climatic and topographic conditions, the country has an approximate potential of 40 GW, although its current hydroelectric generation capacity is only 0.75 GW.

This article presents the results of a research on different models for estimating GHG emissions in hydroelectric projects that allow the estimation of these emissions in different biogeographic contexts and allow establishing the conditions of the reservoir and the climatic conditions that affect GHG emissions. Power density (power generated per unit of flooded area) and specific emissions (GHG emissions per energy generated) were identified as the main sustainability indicator variables. Among the models used, the G-res Tool model was selected to estimate greenhouse gas (GHG) emissions in three hydroelectric projects in Bolivia: Ivirizu, Miguillas and Misicuni in a 100-year life cycle. The Ivirizu Hydroelectric Project generates 374 t CO_{2eq} year⁻¹ from biogenic sources and emits approximately 664,664 t CO_{2eq} during its construction phase,

resulting in a net GHG footprint of 711,506 t CO_{2eq} and a specific emission of 6.13 g CO_{2eq} kWh⁻¹. In the case of Miguillas, biogenic emissions from the reservoir were estimated at 239 t CO_{2eq} year⁻¹, while the emissions associated with the construction were estimated at 412,654 t CO_{2eq}, the specific emissions being 4.14 g CO_{2eq} kWh⁻¹. For the Misicuni Multiple Project, 299 t CO_{2eq} year⁻¹ were estimated in biogenic emissions, for the construction stage 974,448 t CO_{2eq} were estimated, resulting in a net GHG footprint of 974,747 t CO_{2eq}, the specific emissions would be 6.95 g CO_{2eq} kWh⁻¹. These results clearly show that GHG emissions during construction activities significantly exceed biogenic GHG emissions from flooding of the reservoirs of the three hydropower projects. Furthermore, it is important to highlight that there is variability in the values due to the

1 Introducción

En el año 2021, se registró un aumento de 1,9 Gt en las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía e industria, alcanzando un total de 36,6 Gt a nivel global, marcando un récord. En el contexto de Bolivia en 2022, las centrales hidroeléctricas jugaron un papel esencial al generar alrededor de 2.847,73 GWh, representando el 26,88% de la matriz energética del país (AETN, 2023).

No obstante, esta fuente de energía se ubica en áreas de alta biodiversidad y fragilidad ambiental, lo que ha llevado al desarrollo del proyecto MIBIO (Monitoreo Integral de la Biodiversidad ante el impacto de Megaproyectos Hidroeléctricos) hace cuatro años. Este proyecto busca incorporar la biodiversidad en la evaluación de impacto ambiental de estos proyectos.

Este proyecto busca incorporar la biodiversidad en la evaluación de impacto ambiental de estos proyectos, reconociendo que los embalses, que son un componente crucial de las centrales hidroeléctricas, son un sistema acuático antropogénico con un impacto substancial en el ciclo global del agua (Barros et al., 2011). Estudios han identificado a los embalses como una fuente importante de dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄) a la atmósfera (Abril et al., 2005; Rudd et al., 1993; Tremblay et al., 2004; Fearnside, 2002)

Hace más de dos décadas, han persistido debates acerca de la neutralidad de carbono de los embalses hidroeléctricos (Prairie et al., 2018). Por un lado, algunos argumentan que los reservorios hidroeléctricos representan una fuente de energía renovable limpia y sostenible. No obstante, esta perspectiva se encuentra en contraposición a la opinión de otros autores, quienes sostienen que los reservorios emiten cantidades significativas de GEI, en particular, el metano, un gas que tiene un impacto ambiental mucho mayor que el dióxido de carbono (Abril et al., 2005; Chanudet et al., 2011),

specific environmental conditions of each location. Ivirizu has a greater amount of biogenic GHG emissions because it is in a temperate zone, with periods of elevated temperatures and is home to a dense forest at the reservoir site. In the case of Miguillas, the area is temperate, and the soil cover is made up of wetlands. As for Misicuni, its location in a cold mountain climate, where previously an area of grassland predominated. Due to their specific emissions of less than 80 g CO_{2eq} kWh⁻¹, all of these projects are considered environmentally sustainable.

Keywords: GHG emissions, hydroelectric project, G-res Tool.

La generación de GEI proviene de la descomposición de la materia orgánica e inorgánica que se encuentra inundada, afectando tanto al ecosistema terrestre como acuático dentro del embalse. Estas emisiones se dividen en una fracción que se libera a la atmósfera, otra que se acumula en los sedimentos y una tercera que puede ser transportada aguas abajo (Abril et al., 2005; Barros et al., 2011).

La literatura indica que los embalses poco profundos y situados en zonas tropicales emiten cantidades significativas de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono y el metano. Las emisiones de metano son especialmente preocupantes en términos de cambio climático debido a que el CH₄ tiene un potencial de calentamiento global 34 veces mayor que el CO₂ (Gunkel, 2009) en un horizonte de tiempo de 100 años, este factor sube a 84 si consideramos un periodo de permanencia en la atmósfera de 20 años. Por ello, las emisiones de GEI en términos de CO₂ equivalente de una represa hidroeléctrica dependen en gran medida de la forma en que la materia orgánica se degrada, la cantidad de Metano que se emite y el momento y la forma en que se emite el Metano.

Las estimaciones realizadas de emisiones de GEI de reservorios a escala global tienen una amplia variación en los resultados. Estas variaciones son resultado de la complejidad de los ciclos biogeoquímicos de un embalse (Deemer et al., 2016). Estimar las emisiones solo con el uso de algunas variables, no es suficiente para explicar la variabilidad de las emisiones de GEI para un embalse (Goldenfum, 2012). Similarmente, los modelos y metodologías utilizadas en las investigaciones son limitadas para cuantificar las nuevas emisiones de GEI y el nuevo potencial como sumideros después de la inundación, una situación que llevó a varias discusiones entre diferentes autores (Prairie et al., 2018).

La estimación precisa de estas emisiones biogénicas requiere mediciones confiables de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso (N₂O) en embalses, a lo largo del tiempo y el espacio, dado que la interacción es altamente

compleja. Diversos factores, como las diferencias en la cobertura terrestre, la variabilidad entre sistemas terrestres y acuáticos, y la influencia del carbono orgánico contenido en el suelo y el bosque, complican la cuantificación precisa de la fracción de emisiones de CO₂ y CH₄ que proviene de esta fuente. Además, los cambios en la dinámica de degradación de la materia orgánica natural y la descomposición de la vegetación emergente también impactan en estas emisiones, en particular si la degradación es aerobia o anaerobia (Prairie et al., 2018).

Un factor relevante en estas emisiones es el tiempo de residencia del agua debido al embalsamiento del río. Cuanto mayor es este tiempo de residencia, mayor es la cantidad de carbono orgánico disuelto que se mineraliza dentro del embalse y se libera como CO₂. A esto se suma la influencia de la temperatura y las características del carbono en el reservorio, lo que puede modificar las tasas de mineralización. Es importante destacar que estas emisiones, aunque están relacionadas con el embalse, podrían haber ocurrido río abajo de todas formas, lo que plantea la cuestión de si deben considerarse como emisiones del embalse en sí (Prairie et al., 2018).

Uno de los primeros estudios sobre las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por unidad de energía en embalses hidroeléctricos fue realizado por Rudd et al., (1993). Además, han demostrado que esta relación también puede ser importante para determinar la magnitud de las emisiones de gases de efecto invernadero. Dependiendo de la magnitud de las inundaciones y otras características físicas, químicas y biológicas, algunos embalses pueden ser importantes emisores de gases de efecto invernadero.

En un estudio llevado a cabo por Demarty & Bastien, (2011), se encontraron niveles de intensidad de emisiones de GEI muy altos para centrales hidroeléctricas Amazónicas, tales como 1.368 g CO_{2eq} kWh⁻¹ en Tucuruí, a los 5 años después de la inundación, 1.308 g CO_{2eq} kWh⁻¹ en Petit Saut 2.167 g CO_{2eq} kWh⁻¹ en Samuel, 473 g CO_{2eq} kWh⁻¹ en Tucuruí a los 11 años después de la inundación, 3.641 g CO_{2eq} kWh⁻¹ en Barra Bonita, 1075 g CO_{2eq} kWh⁻¹ en Tres Marías, 2.222 g CO_{2eq} kWh⁻¹ en Balbina. Estos valores se contrastan significativamente con el factor de emisión de una central termoeléctrica, que emite 490 g CO_{2eq} kWh⁻¹, es decir son valores superiores.

Un análisis de la huella de carbono biogénica de 1.473 embalses hidroeléctricos en 104 países, bajo el supuesto de que las emisiones antes de las inundaciones son insignificantes y no cambian significativamente la huella neta, encontró que la huella de carbono de la energía hidroeléctrica es de 173 g CO₂ y 2,95 g CH₄ kWh⁻¹ de electricidad producida y dando como resultado una huella de carbono de 273 g CO_{2eq} kWh⁻¹ cuando se utiliza

un factor de equivalencia de 33,8 para el CH₄ en un horizonte temporal de 100 años (Scherer & Pfister, 2016).

Almeida et al., (2019) evaluó las intensidades de carbono en 351 represas hidroeléctricas propuestas y 158 ya existentes en la región amazónica. Los resultados encontraron que las intensidades de carbono de las represas en tierras altas del Amazonas emiten aproximadamente 39 gCO_{2eq} kWh⁻¹ en un tiempo de vida de 100 años, mientras que las represas en tierras bajas Amazónicas emiten 133 gCO_{2eq} kWh⁻¹ que pueden exceder la intensidad de carbono de plantas termoeléctricas.

Asimismo, un reciente estudio realizado por Ubierna, et al (2022) cuantificó las emisiones de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida promedio global de la energía hidroeléctrica en 23 g CO_{2eq} kW⁻¹ utilizando la herramienta G-res tras evaluar la emisión neta de 480 proyectos de almacenamiento de energía hidroeléctrica.

Las estimaciones de Almeida et al., (2019) se basaron en el escenario de desarrollo sostenible establecido en el Informe Mundial de Energía 2017 de la Agencia Internacional de Energía (AIE), considerando una intensidad de carbono de referencia de 80 g CO_{2eq}kWh⁻¹, para una generación de electricidad sostenible. Este valor se alinea con los objetivos establecidos en la Agenda 2030 de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible, que busca reducir la intensidad de carbono del sector eléctrico global de 500 g CO_{2eq} kWh⁻¹ en 2017 a 80 g CO_{2eq} kWh⁻¹ en 2040. Sin embargo, el informe del IEA (2022) estima que la intensidad de emisiones alcanzará los 325 g CO_{2eq} kWh⁻¹ hasta 2030, luego descenderá a 158 g CO_{2eq} kWh⁻¹ en 2050.

Las represas situadas en tierras bajas tienden a presentar intensidades de carbono significativamente superiores debido a la extensión de sus embalses y a sus menores densidades de energía. Por otro lado, las represas en zonas de gran altitud tienden a mostrar menores intensidades de carbono. Esto explica por qué las represas amazónicas con alta intensidad emisiones de GEI se localizan en Brasil, mientras que las de menor intensidad se ubican en regiones montañosas de Bolivia, Ecuador y Perú. Las represas en tierras bajas generan reservorios enriquecidos en nutrientes, como fósforo y nitrógeno, lo que incrementa la producción primaria acuática y, en consecuencia, las emisiones de GEI, contribuyendo a aumentar su intensidad de carbono (Almeida et al., 2019)

La construcción de represas sin coordinación a nivel de toda la cuenca ha llevado a una cartera actual de represas en el Amazonas con una intensidad de carbono colectiva de aproximadamente 200 g CO_{2eq} kWh⁻¹ (horizonte temporal de 20 años) y 90 g CO_{2eq} kWh⁻¹ (100 años en horizonte temporal) (Almeida et al., 2019).

A pesar de los avances recientes en la literatura sobre el balance de GEI en embalses, la predicción del balance de GEI en embalses futuros sigue siendo un desafío debido a la complejidad en la representación de los procesos biogeoquímicos que ocurren cada embalse, así como a la variabilidad espacial y temporal (Almeida et al., 2019). Los modelos desarrollados estiman emisiones globales en función a promedios de valores medidos por región climática o geográfica y son extrapolados a todo el mundo. Además, solamente han evaluado los flujos de GEI de la superficie del embalse y pocos estudios han cuantificado la huella neta de carbono de reservorios individuales (Prairie et al., 2021). Es decir, huella neta de carbono es la estimación y cuantificación del balance de GEI del paisaje antes y después de la inundación por la construcción del embalse hidroeléctrico.

El modelo robusto de regresión múltiple desarrollado por (Barros, et al., 2011) ha estimado las emisiones de CO₂ y CH₄ en función a la edad y la latitud del embalse. La ecuación para calcular las emisiones de CO₂ se relaciona con la edad, latitud y la concentración de carbono orgánico disuelto como variables independientes, mientras que la ecuación para estimar las emisiones de CH₄ depende de factores como la precipitación, la cantidad de carbono orgánico y la latitud. Los resultados obtenidos por (Barros, et al., 2011) revelaron que las emisiones en embalses hidroeléctricos ascendían a 192 Tg de CO₂ año⁻¹ y 4 Tg año⁻¹ de CH₄. Además, el modelo no tomó en cuenta la pérdida del potencial sumidero de carbono en la zona inundada que se convirtió en el embalse, por lo que las emisiones netas reales debido al embalse están actualmente sistemáticamente subestimadas. Los embalses hidroeléctricos también experimentan sedimentación y, por lo tanto, pueden acumular grandes cantidades de carbono secuestrado en los sedimentos, lo que compensaría las emisiones de GEI, a menos que esa materia orgánica se degrade de manera anaerobia produciendo CH₄.

Asimismo, (Hertwich, 2013) complementó el conjunto de datos con información sobre electricidad y la producción potencial neta primaria del área como variable adicional para llevar a cabo una estimación similar a Barros (Scherer & Pfister, 2016). Los resultados encontrados son 2,5 veces mayores que los estimados por Barros, et al., (2011). Además, estimó que, para una producción total de energía hidroeléctrica de 3,288 TWh en el año 2009, las emisiones directas promedio de los embalses hidroeléctricos ascienden a 3 g CH₄ kWh⁻¹.

Para abordar esta complejidad, Prairie et al., (2021) desarrollaron una herramienta llamada G-res, la cual ha estado disponible para su uso desde 2017. G-res es un modelo empírico estadístico sólido que describe las

principales fuentes de producción de GEI en un embalse, incluyendo las emisiones difusas de CH₄ y CO₂, las emisiones de CH₄ debido a burbujeo desde la superficie del embalse, y las emisiones resultantes de la desgasificación de CH₄ aguas abajo del embalse. Esta herramienta ha sido fundamental para evaluar la huella neta de carbono de embalses en todo el mundo y tomar decisiones más informadas en la planificación y construcción de proyectos hidroeléctricos. Además, la herramienta G-res compara las emisiones de GEI obtenidas con otras emisiones de embalses del mismo tipo de la misma zona climática.

El estudio realizado en el embalse multipropósito Stâncă-Costești por (Ion & Ene, 2021) indica que los modelos desarrollados por Scherer, Barros y Villela se limitan a calcular las emisiones de CO₂ y CH₄, mientras que la herramienta G-res es la única que puede estimar las emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI). Además, G-res es el único modelo que permite estimar las emisiones de GEI asociadas con cada uso del embalse, especialmente en el caso de embalses multipropósito. La utilización de la herramienta G-res para calcular las emisiones de GEI del embalse multipropósito Stâncă-Costești reveló que este actúa como un sumidero de GEI, con una emisión neta de -5 g CO_{2eq} m⁻² año⁻¹, sin tener en cuenta las emisiones derivadas de la construcción de la presa.

En el presente artículo, se han evaluado las emisiones de gases de efecto invernadero en tres proyectos hidroeléctricos ubicados en diferentes contextos biogeográficos. El proyecto hidroeléctrico Ivrizu se encuentra en una zona caracterizada por una densa cobertura forestal y temperaturas elevadas; mientras que el proyecto Miguilas se sitúa en una zona templada, y el área que será inundada corresponde a un bofedal. Por último, el proyecto Multipropósito Misicuni se desarrolla en un entorno de clima frío de montaña, donde predominan los pajonales y los cultivos.

2 Marco Teórico

2.1 Emisiones de biogénicas de GEI desde embalses Hidroeléctricos

La dinámica de emisiones biogénicas de GEI es bastante compleja y existen varios factores y mecanismos que intervienen en el proceso. Los principales factores son: ubicación del embalse, latitud, edad, clima, temperatura, tipo de vegetación, la cantidad de carbono almacenado en los suelos, profundidad, tiempo de residencia del agua, profundidad y las estructuras de toma de agua.

La inundación, provoca una alteración del ciclo del carbono, convirtiendo cada componente inundado en una posible fuente de emisiones o de acumulación de GEI. Estos embalses también funcionan como lugares activos para el procesamiento y transporte de carbono en sus diversas formas, ya sean fracciones disueltas o particuladas de origen orgánico o inorgánico (Prairie et al., 2018).

Además, es importante señalar que los embalses pueden desempeñar roles tanto como sumideros como fuentes de GEI en diferentes latitudes. El proceso principal que contribuye a estas emisiones elevadas de GEI en embalses recién creados es la descomposición de la vegetación y la materia orgánica del suelo, como hojas, ramas, troncos y hojarasca, en la zona de inundación. Durante este proceso, los embalses pueden liberar una parte de los GEI a la atmósfera, mientras que otra fracción se acumula en los sedimentos y el resto puede ser transportado aguas abajo (Abril et al., 2005; Barros et al., 2011).

En la fase inicial de degradación, que coincide con la inundación, se registran tasas elevadas de actividad microbiana y producción de GEI (Teodoru et al., 2012). Además, los sedimentos y el agua en el fondo del embalse a menudo carecen de oxígeno, especialmente en regiones tropicales, lo que contribuye a la producción de Metano. Los aportes continuos de materia orgánica procedente de los afluentes del río, la producción de algas y el crecimiento de la vegetación emergente en las áreas temporalmente inundadas pueden llegar a constituir la principal fuente de carbono orgánico a medida que el embalse envejece (Fearnside, 2002).

A lo largo del proceso de maduración del embalse, la producción tiende a disminuir exponencialmente en las etapas iniciales, con el tiempo las emisiones se estabilizan de acuerdo con las características específicas del embalse. Este decrecimiento es más pronunciado en climas templados que en climas cálidos. Este patrón refleja la rápida degradación de la fracción lábil de la materia orgánica inundada, seguida de una disminución gradual en la cantidad y biodisponibilidad de la materia orgánica que permanece en los fondos del embalse. En embalses antiguos, los aportes de carbono de la cuenca tributaria, la entrada fluvial y la producción primaria acuática, adquieren importancia en el proceso de descomposición dentro del embalse y sus emisiones de GEI (Abril et al., 2005).

Emisiones neta de GEI

$$\begin{aligned}
 &= [\textit{Emisiones de GEI del embalse después de la inundación}] \\
 &- [\textit{Emisiones de GEI del área antes de la inundación}] \\
 &- [\textit{Emisiones del embalse debido a las fuentes antropogénicas (UAS)}] \\
 &+ [\textit{Emisiones de GEI debido a la construcción}]
 \end{aligned}$$

Los mecanismos que intervienen en la liberación de los GEI desde embalse a la atmósfera son; las emisiones por difusión, ebullición y desgasificación. Las emisiones por difusión surgen de la difusión molecular a través de la interfaz aire-agua, y es la mayor vía de las emisiones de CO₂, en cambio las emisiones por difusión de CH₄ es lenta y puede ser parcialmente bio-oxidado en la columna de agua del embalse (Goldenfum, 2012). Las emisiones por ebullición son los gases que provienen del sedimento a través de la columna de agua, es una fuente minoritaria de emisiones de CO₂, pero pueden ser una fuente relevante de emisiones de CH₄ (Goldenfum, 2012). Por último, las emisiones por desgasificación son resultado de un cambio de presión hidrostática luego que el agua del embalse fluye por las turbinas o vertederos, y emite altas cantidades de CH₄ y en menor proporción CO₂ que se encontraban secuestrados en los sedimentos (Rosa et al., 2016).

2.2 Emisiones Netas de GEI en embalses

Las emisiones netas de GEI representan el cambio en las emisiones de gases de efecto invernadero debido a la creación del embalse. Las emisiones netas no pueden ser medidas de forma directa, los resultados medidos en campo son considerados emisiones brutas, incluyendo los efectos de fuentes naturales y antropogénicas no relacionadas, tanto antes y después de la inundación (Goldenfum et al., 2010).

Los valores son calculados por una estimación de las emisiones brutas en el área afectada (ecosistema terrestre y acuático) comparando con valores con las condiciones antes y después de la inundación (Del Sontro et al., 2010), es necesario excluir las fuentes antropogénicas no relacionadas porque (Prairie et al., 2021) encontró una evidencia fuerte de que las actividades antropogénicas contribuyen al crecimiento de las emisiones de GEI en el embalse, mostrando la importancia de evaluar la cantidad y la fuente de carbono y nutrientes que entran al embalse (Prairie et al., 2021).

En cuanto a Prairie et al., (2021), la huella neta de GEI es la suma de los cuatro componentes diferentes de emisión del total de emisiones posteriores al embalse, de las cuales se pueden restar las emisiones previas al embalse para obtener una estimación de la huella neta de GEI.

(*ec. 1*)

2.3 Emisiones en Embalses Hidroeléctricos Tropicales

Las variaciones de las emisiones de GEI de los embalses en zonas tropicales pueden ser causadas por; el carbono existente en el cuerpo de agua, los nutrientes provenientes de la cuenca, temperatura, concentración de oxígeno en el agua, tipo y densidad de la vegetación, flora y fauna acuática, tiempo de residencia, velocidad del viento, estructura del cuerpo de agua, topografía del reservorio y nivel del agua (Goldenfum et al., 2010).

Los embalses en regiones tropicales se destacan por recibir una mayor cantidad de materia orgánica particulada procedente del entorno circundante, lo que resulta en una acumulación significativa de sedimentos. Esta acumulación favorece la emisión de metano en comparación con el dióxido de carbono (Palau & Prieto, 2009). Además, estos embalses experimentan una estratificación térmica constante a lo largo del año, lo que crea gradientes de temperatura, variaciones en el oxígeno disuelto y densidad en el agua. Esto limita la capacidad de oxigenación de las aguas debido a la reducción de la solubilidad del oxígeno a temperaturas más altas, lo que, a su vez, favorece la actividad microbiana y la producción de CO₂ y CH₄ (Tremblay et al., 2005).

Las emisiones de carbono en forma de CO₂ pueden originarse en dos tipos de fuentes: fuentes fijas que producen una emisión única, como los árboles que mueren debido a la inundación del embalse y las reservas de carbono en el suelo, y fuentes renovables, como el carbono que se retira de la atmósfera a través de la fotosíntesis realizada por plantas acuáticas, fitoplancton o algas en el embalse, árboles en la cuenca que generan material orgánico que es llevado al embalse por el agua de lluvia, o vegetación en la zona expuesta cuando se baja el nivel del agua en el embalse (Fearnside & Pueyo, 2012).

El CO₂ de las fuentes fijas contribuye al calentamiento global, especialmente la descomposición de los árboles muertos que quedan fuera del agua en embalses amazónicos. Por otro lado, el CO₂ de las fuentes renovables no es una emisión neta, ya que se equilibra con el carbono eliminado de la atmósfera cuando se forma la biomasa, a menos que este carbono se emita en forma de CH₄ luego de una biodegradación anaerobia (Fearnside & Pueyo, 2012).

El embalse actúa como una "fábrica de metano", retirando constantemente carbono de la atmósfera como CO₂ y liberándolo como CH₄, con un impacto significativo

en el calentamiento global. El metano se forma cuando la materia orgánica se descompone en condiciones anaerobias, como en los sedimentos en el fondo del embalse. Esto también sucede con la vegetación que crece en la zona expuesta de la rivera del embalse, cuando baja el nivel del agua, y luego se descompone cuando sube el nivel del agua en condiciones anaerobias, liberando metano (Fearnside & Pueyo, 2012).

Para contextualizar estas observaciones, se puede tomar como referencia el embalse hidroeléctrico Balbina en la Amazonia, considerado uno de los embalses tropicales más grandes de América del Sur. A pesar de su capacidad de generar una gran cantidad de gases de efecto invernadero, su retorno energético es relativamente pequeño. Según mediciones, las emisiones anuales de CH₄ y CO₂, tanto aguas arriba como aguas abajo, fueron de 73 y 2.531 Gg CO_{2eq} año⁻¹, respectivamente, contribuyendo significativamente a la emisión total de GEI. Su intensidad de emisión, considerando su potencia nominal, fue de 2.900 g CO_{2eq} kW⁻¹ (Kemenes et al., 2011).

Además, Kemenes et al., (2011) estimó que las emisiones por desgasificación en la salida de la turbina de la represa Balbina representó el 51% de las emisiones anuales totales debajo de la presa Balbina, significativamente mayor que la pérdida proporcional atribuida a la desgasificación 18% en la presa Petit Saut. Este valor en Balbina se debe a que, de la parte hipolimnética, fluyen las aguas directamente hacia la toma de la turbina. Además, la toma de la turbina en la presa de Balbina tiene 30 m, aproximadamente el doble de profundidad que la de la presa de Petit Saut de 16 m, por lo que la presión hidrostática es considerada mayor en Balbina.

2.4 Emisiones de Embalse Hidroeléctricos Templados y Boreales

En contraste a los embalses en zonas tropicales, los embalses en regiones templadas y boreales tienden a exhibir emisiones de gases de efecto invernadero más bajas. Durante la fase inicial de inundación, estos embalses no muestran estratificación del cuerpo de agua, y la materia orgánica se descompone principalmente a través de procesos aeróbicos. A medida que disminuye el oxígeno disuelto y persiste una alta carga de materia orgánica, pueden surgir condiciones anaeróbicas que promueven la producción de CH₄. La maduración de estos embalses es más rápida, aproximadamente en unos 10 años, en comparación con los embalses tropicales. Después de la primera inundación, las emisiones de CO₂ y CH₄ disminuyen significativamente (Palau & Prieto, 2009).

La edad de un embalse es un factor crucial en las emisiones de gases de efecto invernadero. Los embalses más jóvenes requieren un monitoreo más constante durante los primeros años después de la inundación para observar cambios en las tasas de emisiones y almacenamiento de carbono (Goldenfum et al., 2010). Con las tendencias del cambio climático, los embalses van a tender hacia condiciones crecientes de eutrofización, con menos volumen de agua, menor reserva de oxígeno disuelto en el hipolimnium y mayor tendencia a la eutrofización, estas condiciones favorecen las emisiones de Metano en los embalses (Palau & Prieto, 2009).

Las emisiones de gases de efecto invernadero en los embalses también varían estacionalmente. En climas fríos, los gases quedan atrapados bajo el hielo durante el invierno, liberándose en grandes cantidades durante la primavera. En verano, las emisiones de CO₂ superan a las de CH₄ debido a la estratificación térmica del agua embalsada (Tremblay et al., 2005).

2.5 Metodologías para la Estimación de GEI

El enfoque más actual para estimar las emisiones procedentes de embalses implica calcular la emisión neta acumulada a lo largo de un período de 100 años, que se considera una aproximación sólida a la vida útil típica de estos proyectos (Levasseur et al., 2021).

2.5.1 Modelo desarrollado para calcular emisiones de CO₂ y CH₄ por IPCC

EL Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) define una metodología por niveles para calcular las emisiones de CO₂ y CH₄ de embalses hidroeléctricos

Nivel 1 de estimación

En el nivel 1 se utiliza factores de emisión por defecto y datos agregados para calcular las emisiones de CO₂ provenientes de embalses hidroeléctricos. La única vía de emisión considerada en este nivel es la difusión durante el período sin hielo. Se supone que las emisiones de CO₂ son nulas durante el período cubierto de hielo. Las emisiones de CO₂ se limitan a los primeros 10 años después de la inundación, y provienen principalmente de la descomposición de la materia orgánica y se representa con la ec. 2.

$$\text{Emisiones de CO}_2 = P * E(\text{CO}_2)_{dif} * A * f_A * 10^{-6} \quad (\text{ec. 2})$$

Donde:

CO₂: total de las emisiones de CO₂ provenientes de las tierras convertidas en tierras inundadas (GgCO₂ año⁻¹)

P: cantidad de días sin cobertura de hielos durante un año, días año⁻¹

E (CO₂)_{dif} : promedio diario de las emisiones difusoras (kgCO₂ ha⁻¹ día⁻¹)

A: área total de la superficie del reservorio, incluidas las tierras inundadas, los lagos y ríos (ha)

f_A: fracción del área total del reservorio que se ha inundado en los últimos 10 años

Asimismo, la ec. 3 para estimar las emisiones de metano provenientes de las tierras inundadas se incluyen sólo las emisiones difusoras durante el periodo libre de hielos. Las emisiones producidas durante el periodo cubierto de hielos se suponen nulas.

$$\begin{aligned} \text{Emisiones de CH}_4 \\ &= P * E(\text{CH}_4)_{dif} \\ &* A_{\text{superficie de inundación total}} * 10^{-6} \end{aligned}$$

(ec. 3)

Donde:

CH₄: total de las emisiones de CH₄ provenientes de las tierras inundadas (GgCH₄ año⁻¹)

P: periodo libre de hielos (días año⁻¹)

E(CH₄)_{dif}: promedio diario de las emisiones difusoras (kgCH₄ ha⁻¹ día⁻¹)

A: área total de la superficie inunda, incluidas las tierras inundadas (ha)

Nivel 2 de estimación

Este nivel utiliza factores de emisión específicos del país para estimar las emisiones difusoras de CO₂ y CH₄. Se consideran los períodos sin hielo y los períodos con hielo. La ec. 4 se utiliza para estimar las emisiones de CO₂.

$$\text{CO}_2 = [(P_f * E_f(\text{CO}_2)_{dif}) + (P_i * E_i(\text{CO}_2)_{dif}) * (A * f_A * 10^{-6})] \quad (\text{ec. 4})$$

Donde

Emisiones de CO₂ inundación: total de las emisiones de CO₂ provenientes de las tierras convertidas en tierras inundadas (Gg de CO₂ año⁻¹)

P_f: periodo libre de hielos, días año⁻¹

P_i: periodo cubierto de hielos, días año⁻¹

$E_f(\text{CO}_2)_{\text{dif}}$: promedio diario de las emisiones difusoras provenientes de la interfaz aire-agua durante el periodo libre de hielos ($\text{kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$)

$E_i(\text{CO}_2)_{\text{dif}}$: emisiones difusoras relacionadas con el periodo cubierto de hielos ($\text{kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$)

A: área total de la superficie del reservorio, incluidas las tierras inundadas, los lagos y ríos (ha)

f_A : fracción del área total del reservorio que se ha inundado en los últimos 10 años, adimensional

La ec. 5 para las emisiones de CH_4 es similar y considera las emisiones difusoras y las emisiones por burbujas.

$$CH_4 = (Pf * Ef (CH_4)_{\text{dif}} * A) + (Pf * Ef (CH_4)_{\text{burbuja}} * A + Pi * Ei (CH_4)_{\text{dif}} + Ei (CH_4)_{\text{burbuja}} * A$$

(ec. 5)

Donde:

CH_4 : total de las emisiones de CH_4 provenientes de las tierras inundadas por año ($\text{kg CH}_4 \text{ año}^{-1}$)

Pf: periodo libre de hielos, días año^{-1}

Pi: periodo cubierto de hielos, días año^{-1}

$E_f (\text{CH}_4)_{\text{dif}}$: promedio diario de las emisiones difusoras provenientes de la interfaz aire-agua durante el periodo libre de hielos ($\text{kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$)

$E_f (\text{CH}_4)_{\text{burbuja}}$: promedio diario de las emisiones por burbujas provenientes de la interfaz aire-agua durante el periodo libre de hielos ($\text{kg ch}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$)

$E_i(\text{CH}_4)_{\text{dif}}$: emisiones difusoras relacionadas con el periodo cubierto de hielos ($\text{kgch}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$)

$E_i(\text{CH}_4)_{\text{burbuja}}$: emisiones por burbujas relacionadas con el periodo cubierto de hielos ($\text{kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$)

Nivel 3 de Estimación

En este nivel, se realizan mediciones detalladas y se consideran todas las fuentes de emisión relevantes, incluidas las emisiones de desgasificación. La estimación es exhaustiva y toma en cuenta factores adicionales, como la profundidad, ubicación geográfica y temperatura del agua en el embalse. Los factores de emisión se desagregan para reflejar la variabilidad temporal y espacial. Se divide entre las emisiones de CO_2 y CH_4 degradadas de la materia orgánica inundada y de la cuenca hidrográfica.

Los principales valores por defecto son los factores de emisión del CH_4 y CO_2 a través de la vía de la difusión como se aprecian en la Tabla 1 y Tabla 2, son necesarios

para implementar el método de Nivel 1. Se obtienen a partir de datos de las emisiones medidas para varias zonas climáticas. Para el Nivel 1 deben usarse sólo los factores de emisión por defecto para el periodo libre de hielos. Las emisiones de CH_4 y CO_2 producidas durante el periodo cubierto de hielos se suponen nulas.

En resumen, estos niveles de estimación proporcionan diferentes niveles de detalle y precisión para calcular las emisiones de CO_2 y CH_4 en embalses hidroeléctricos, considerando diversos factores como el clima, la ubicación y la gestión del embalse. El nivel 3 es el más detallado y preciso al tomar en cuenta todas las fuentes de emisión y condiciones específicas del sitio.

Tabla 1. Emisiones medidas de CH_4 provenientes de tierras inundadas. Fuente:(IPCC, 2006).

Clima	Emisiones difusoras (periodos libres de hielos) ($\text{kgCH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$)		
	Medio	Mínimo	Máximo
Polar/boreal muy húmedo	0,086	0,011	0,3
Templado frío húmedo	0,061	0,001	0,2
Templado cálido húmedo	0,150	-0,05	1,1
Templado cálido seco	0,044	0,032	0,09
Tropical, muy húmedo	0,630	0,067	1,3
Tropical, seco	0,295	0,070	1,1

Tabla 2. Emisiones medidas de CO_2 provenientes de tierras inundadas. Fuente:(IPCC, 2006).

Clima	Emisiones difusoras (periodos libres de hielos) ($\text{kgCO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$)		
	Medio	Mínimo	Máximo
Polar/boreal muy húmedo	11,8	0,8	34,5
Templado frío húmedo	15,2	4,5	86,3
Templado cálido húmedo	8,1	- 10,3	57,5
Templado cálido seco	5,2	-12	31
Tropical, muy húmedo	44,9	11,5	90,9

Tropical, seco	39,2	11,7	38,7
----------------	------	------	------

2.5.2 Modelo desarrollado para calcular emisiones de GEI de embalses hidroeléctricos en función a edad y latitud por Barros et al.,2011

El estudio desarrolló un modelo que permite calcular las emisiones de GEI en embalses hidroeléctricos, teniendo en cuenta su edad y ubicación geográfica. Hace dos décadas, estimaciones sugerían que las emisiones de GEI de las hidroeléctricas ascendían a 321 Tg CO_{2eq} año⁻¹.

El estudio de Barros et al., (2011) se enfocó en evaluar las emisiones globales de CO₂ y CH₄ de embalses hidroeléctricos utilizando datos de 85 embalses ubicados entre 68°N y 25°S de latitud. Se recopilieron 141 estimaciones de emisiones de CO₂ y 89 estimaciones de emisiones de CH₄. Los resultados indicaron que todos los embalses eran fuentes de metano hacia la atmósfera, y el 88% también emitía dióxido de carbono. Solo el 12% de los embalses actuaba como sumideros netos de CO₂, y estos sumideros tenían una contribución modesta, menor a 500 mg CO₂ m⁻² d⁻¹ generalmente.

Las emisiones de CO₂ y CH₄ por área de los embalses mostraron una correlación negativa con la edad del embalse y la latitud. Esta tendencia concordó con evaluaciones previas sobre las emisiones de embalses hidroeléctricos (St. Louis et al., 2000) y Barros et al.,(2011) estableció una relación empírica que vincula las emisiones de CO₂ y CH₄ con la edad y la latitud, observando tasas de emisión más altas cerca de los trópicos y tasas más bajas en latitudes más bajas.

Ecuación para emisión de CO₂

Las ecuaciones utilizadas para estimar las emisiones de CO₂ y CH₄ se basaron en múltiples factores, incluyendo la edad del embalse, la latitud y la concentración de carbono orgánico disuelto. La ec. 6 representa a los flujos de CO₂ y la ec. 7 estima los flujos de CH₄.

$$\begin{aligned} \text{Log}(\text{Flujo CO}_2 + 400) \\ = 3,06 - 0,16 \text{ Log}(\text{edad}) - 0,01 \text{ Latitud} \\ + 0,41 \text{ Log COD} \end{aligned}$$

(ec. 6)

Donde:

Flujo CO₂: Las emisiones de CO₂ (mg C m² d⁻¹)

Edad: Es la edad del reservorio (años)

COD: Cantidad de carbono orgánico disuelto (mg C m² d⁻¹)

Ecuación para emisión de CH₄

Las emisiones de CH₄ varían en función de la edad del reservorio, profundidad media, contenido de carbono orgánico disuelto y latitud, según la siguiente ec. 7 (R² = 0,53; gl=89; p<0,001).

$$\begin{aligned} \text{Log}(\text{Flujo CH}_4) \\ = 1,33 - 0,36 \text{ Log}(\text{edad}) - 0,32 \text{ Log}(\text{pm}) + 0,39 \text{ Log COD} \\ - 0,01 \text{ Latitud} \end{aligned}$$

(ec. 7)

Donde:

Flujo CH₄: Emisiones de CH₄ (mg CO₂ m² d⁻¹)

Edad: (años)

pm: profundidad media del reservorio (m)

La investigación de Barros revela que, en los embalses hidroeléctricos, la proporción de CH₄ a CO₂ en las emisiones es mayor que en los lagos naturales. En promedio, los embalses liberan un 7% de carbono en forma de CH₄, mientras que en los lagos naturales esta proporción es inferior al 4%. En términos de emisiones de CH₄ por unidad de superficie, los embalses hidroeléctricos tienden a mostrar una proporción mayor que los lagos naturales. Esto se debe a la mayor producción de metano alimentada por los depósitos de carbono en los suelos inundados y la biomasa. Además, los embalses hidroeléctricos suelen retener la materia orgánica de los ríos y cuencas tributarias, lo que provoca condiciones anóxicas en las capas profundas del embalse, fomentando la producción de metano.

Es importante destacar que al considerar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de los embalses y los lagos, se debe tener en cuenta que las emisiones de los lagos no constituyen una nueva fuente de CO₂ para la atmósfera. Sin embargo, al menos una parte de los flujos de los embalses contribuye a las emisiones de CO₂, ya que las áreas terrestres inundadas suelen actuar como sumideros de carbono.

Además, la latitud desempeña un papel en las emisiones, posiblemente debido a las diferencias en la temperatura del agua. Se observa una correlación positiva entre las entradas de carbono disuelto y las emisiones tanto de CO₂ como de CH₄, ya que el carbono disuelto sirve como sustrato para la respiración microbiana y la producción de metano.

En cuanto a las emisiones de metano por área, se correlacionan negativamente con la profundidad del embalse, lo que sugiere que el metano se produce en los sedimentos, el metano producido en estas zonas tiene más tiempo para oxidarse en los embalses más profundos antes de ser emitido a la atmósfera como CO₂. Los

modelos de regresión múltiple muestran que la edad del embalse es un factor importante en las emisiones de carbono, siendo especialmente relevante en embalses jóvenes (menos de 15 años). Algunas excepciones incluyen embalses eutróficos, que actúan como sumideros de CO₂, independientemente de su edad o latitud. Este fenómeno se debe a que, en estos casos, la fotosíntesis supera la respiración de carbono orgánico, reduciendo las emisiones de CO₂ (Barros et al., 2011).

2.5.3 Modelo Hertwicht

El modelo de (Hertwich, 2013) ha ampliado la base de datos de (Barros et al., 2011), al incluir datos sobre la generación de electricidad y la productividad primaria neta potencial del área como variables adicionales, realizando un análisis exhaustivo de estos conjuntos de datos. Los resultados muestran que la mejor predicción del factor de emisión (g CH₄ kWh⁻¹) se obtiene al incorporar los logaritmos de las categorías de uso de suelo, la productividad neta primaria (PPN), y la edad del embalse como variables lineales en el modelo como se expresan en la ec. 8. Asimismo, en la Table 3 se expresan los coeficientes de regresión y los parámetros estadísticos para la regresión de las emisiones de CO₂ y CH₄ por energía producida.

Tabla 3. Coeficientes de Regresión y Parámetros Estadísticos. Fuente: (Hertwich, 2013).

Coeficiente	Emisiones de CO ₂ eq kWh ⁻¹	Emisiones de CH ₄ eq kWh ⁻¹
Const	0,8 (-1,8 hasta 3,8)	0,18 (-0,5 hasta 0,87)
B _{uso de suelo}	0,97 (0,84 -1,11)	1,26 (1,07 – 1,44)
B _{edad}	-0,006 (0,84 -1,11)	-0,014 (-0,022 hasta -0,006)
B _{NPP}	0,737 (-0,16 hasta 1,64)	0,0017 (0 – 0,0024)
r ²	0,69	0,79
F	77,5	93
P	<0,001	<0,001

$$\log E = \text{const} + B_{\text{uso de suelo}} + \log(\text{uso de suelo}) + B_{\text{edad}} * \text{Age} + B_{\text{NPP}} * \text{Log}(NPP)$$

(ec. 8)

En este estudio, también se han estimado las emisiones de CO₂ y CH₄ de los embalses a nivel global. En la Tabla 4, podemos apreciar los resultados encontrados para las emisiones generadas por los embalses, que corresponden a una generación de 3,288 TWh en 2009.

Sin embargo, (Hertwich, 2013) indica que la incertidumbre en la estimación biogénicas de un embalse se debe en gran medida a la notable variabilidad en las tasas de emisiones de los embalses individuales a lo largo del tiempo y en diferentes lugares, así como a las diferencias observadas entre los embalses. Esto se complica aún más por el hecho de que en muchos casos, las mediciones se centran en las emisiones totales en lugar de las emisiones netas, y a menudo se pasan por alto fuentes importantes de emisiones de metano, como las emisiones aguas abajo y la liberación de burbujas.

Tabla 4. Emisiones de CO₂ y CH₄ de embalses a nivel global por zona climática. Fuente: (Hertwich, 2013).

Zona Climática	Área (1000 km ²)	CO ₂ (kg m ⁻² año ⁻¹)	CH ₄ (g m ⁻² año ⁻¹)	CO ₂ eq (TgC año ⁻¹)	CH ₄ (TgC año ⁻¹)
Boreal	80	0,97	40	21	2,4
Templado	130	0,42	7,2	15	0,7
Tropical	120	1,2	46	50	4,1
Total	330			76	7,3

2.5.4 Estimación de la Intensidad de Emisiones por Almeida et al., 2019

(Almeida et al., 2019) realizaron una estimación de la intensidad de carbono para las represas amazónicas, tanto existentes como proyectadas hasta el año 2017. Para ello, combinaron datos específicos de cada proyecto, como el área inundada y la capacidad instalada, de nuestra base de datos de represas amazónicas, junto con estimaciones de flujos publicadas que abarcaban 48 de CO₂ y 38 de CH₄ para embalses ubicados en regiones tropicales y subtropicales.

En primer lugar, calcularon la intensidad de carbono para una presa en particular mediante la ec. 9.

$$ET_{\text{presa}} = A_{\text{dam}} (\text{net}_{\text{CO}_2} F_{\text{CO}_2 \text{ presa}} + \text{net}_{\text{CH}_4} F_{\text{CH}_4} GWP_{\text{CH}_4}) (1 + R_{\text{aguas abajo}})$$

(ec. 9)

Donde

ET_{presa} = Flujo total de GEI ($\text{kg CO}_{2eq} \text{ d}^{-1}$), los valores positivos denotan emisión y los valores negativos reflejan captación.

A_{dam} = Es el área inundada (km^2)

$F_{CO_2 \text{ presa}}$ = Los flujos de CO_2 ($\text{kg CO}_2 \text{ km}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

$F_{CH_4 \text{ presa}}$ = Los flujos de CO_2 ($\text{kg CH}_4 \text{ km}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

GWP_{CH_4} = Es un factor de conversión para el potencial de calentamiento global del metano durante el horizonte temporal correspondiente (20 o 100 años) para transformar $\text{kg CH}_4 \text{ km}^{-1} \text{ d}^{-1}$ en $\text{kg CO}_{2eq} \text{ km}^{-2} \text{ d}^{-1}$

$R_{\text{agua abajo}}$ = Es una constante que representa la relación entre las emisiones aguas abajo y las emisiones de la superficie del embalse.

Posteriormente, calcularon la generación total de electricidad con la ec. 10.

$$EG_{presa} = Cap_{presa} * 24 * P_{cap} \quad (ec. 10)$$

Donde

EG_{presa} = La generación de electricidad instalada (MWh d^{-1})

Cap_{presa} = Capacidad instalada (MW), el cual multiplicado por 24 se obtiene la energía en 24 horas.

P_{cap} = Es un constante que representa el factor de capacidad (0,5727), que denota la generación efectiva de electricidad como proporción de la capacidad instalada.

Finalmente, calcularon la intensidad de carbono (CI_{presa} , $\text{kg CO}_{2eq} \text{ MWh}^{-1}$) se calcula entonces como ec. 11..

$$CI_{presa} = \frac{TE_{presa} + CI_{construcción}}{EG_{presa}} \quad (ec. 11)$$

Dónde $CI_{construcción}$ es una constante que representa la intensidad de emisiones de CO_{2eq} asociada con la construcción e infraestructura de represas hidroeléctricas ($19 \text{ g CO}_{2eq} \text{ kWh}^{-1} \text{ día}^{-1}$) para un horizonte temporal de 100 años.

De esta manera, obtuvieron estimaciones de las intensidades de carbono para las represas propuestas en las tierras altas del Amazonas, con una mediana de $39 \text{ g CO}_{2eq} \text{ kWh}^{-1}$ en un horizonte de 100 años, valores que a menudo resultaron comparables con la energía solar y eólica. Por otro lado, algunas represas en las tierras bajas mostraron una mediana de $133 \text{ g CO}_{2eq} \text{ kWh}^{-1}$, lo que podría superar las intensidades de carbono observadas en las centrales eléctricas que utilizan combustibles fósiles.

2.5.5 Modelo lineal generalizado de Scherer & Pfister, 2016

Este estudio ha estimado que la huella de gases de efecto invernadero de la energía hidroeléctrica es significativamente mayor, con una media global de 173 g de CO_2 y $2,95 \text{ g de CH}_4$ emitidos por cada kWh de electricidad producida. Esto resulta en una huella de carbono promedio combinada de $273 \text{ g de CO}_{2eq} \text{ kWh}^{-1}$ cuando se utiliza un Potencial de Calentamiento Global (GWP) de 34 para el CH_4 en un horizonte de 100 años. En este estudio, se desarrollaron dos modelos diferentes. El primer modelo estimó las emisiones de CO_{2eq} por unidad de energía en (kg MWh^{-1}), y el segundo modelo consideró flujos regionales en miligramos de carbono por metro cuadrado por día ($\text{mg CO}_{2eq} \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

En el primer modelo para estimar las emisiones de CO_2 ($\text{kg CO}_2 \text{ MWh}^{-1}$), se utilizaron dos predictores: la relación entre el área y la electricidad generada (ATE, $\text{km}^2 \text{ GWh}^{-1}$) y el área (A, km^2). Mientras tanto, el modelo para las emisiones de CH_4 ($\text{kg CH}_4 \text{ MWh}^{-1}$) incluyó la edad de la instalación (edad, años), ATE y la temperatura máxima (TMX, $^{\circ}\text{C}$) como factores determinantes. Las ec. 12 y ec. 13 representan las emisiones de CO_2 y CH_4 respectivamente

$$CO_2 = -169,73 + 241,86 * ATE + 120,34 * \ln(A) \quad (ec. 12)$$

$$\ln(CH_4) = -9,81 - 0,75 * \ln(edad) + 1,18 * \ln(ATE) + 4,50 * \ln(TMX) \quad (ec. 13)$$

En cuanto al segundo modelo de emisiones de GEI $\text{mgC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, estas emisiones son independientes de la producción de energía y dependen de la edad y la tasa de erosión (ERR, $\text{t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) para el CO_2 . Además, se incluyeron las variables A y TMX como predictores para las emisiones de CH_4 . La ec. 14 y ec. 15 representan el modelo 2.

$$CO_2 = 494,46 - 4,07 * edad + 8,09 * ERR \quad (ec. 14)$$

$$\ln(CH_4) = -12,84 - 0,03 * edad + 0,21 \ln(A) - 0,01 * ERR + 4,88 * \ln(TMX) \quad (ec. 15)$$

En función a los resultados existe mejor desempeño el primer modelo que el modelo 2 sobre los flujos por área. Además, compararon sus resultados de los flujos

regionales con los obtenidos por (Barros et al., 2011) y las emisiones por unidad de energía con el de (Hertwich, 2013). En cuanto al modelo para predecir las emisiones de GEI tienen un buen desempeño. Además, este modelo puede tener incertidumbre como para estimar el CO₂ no considera el secuestro y para el CH₄ puede existir variación en cuanto a los flujos por ebullición

2.5.6 Modelo G-res desarrollada por Prairie et al., 2021

Es una herramienta informática diseñada para estimar la huella neta de carbono de los embalses en todo el mundo. Esta herramienta implica el desarrollo de modelos empíricos estadísticamente sólidos que describen las cuatro principales vías de emisión GEI basado en el carbono de los embalses: emisiones difusas de CO₂ y CH₄, emisiones de burbujeo de CH₄ desde la superficie del embalse y emisiones de CH₄ por desgasificación aguas bajo del embalse.

Este modelo tiene en cuenta las condiciones ambientales específicas de un embalse para predecir las emisiones tanto de CO₂ y CH₄, dividir los flujos entre las principales vías de emisión y caracterizar la evolución de las emisiones de GEI durante la vida útil del embalse.

En G-res Tool tiene un enfoque descrito por Prairie et al., (2018) que tiene como objetivo predecir el cambio inducido por el embalse en los flujos de GEI a la atmosfera por la inundación. La herramienta G-res es aplicable a nivel mundial y se puede usar con una funcionalidad de Earth Engine para que se pueda usar

dinámicamente en embalses existentes, así como en potenciales o ubicaciones de embalses planificadas.

Esta herramienta se basa en una serie de modelos empíricos desarrollados a partir de una síntesis de la literatura publicada sobre emisiones de GEI de embalses. Estos modelos se basan en la influencia de los factores ambientales locales y regionales sobre las emisiones de GEI y sobre las características de los embalses individuales y sus cuencas.

Esta herramienta se diseñó para evaluar de manera integral la huella neta de carbono del embalse a lo largo de su vida útil (100 años). La plataforma G-res tool puede proporcionar una estimación del impacto neto de GEI de la creación de embalses.

De manera similar, la herramienta G-res proporciona cálculos para estimar la porción de las emisiones de GEI que probablemente sean el resultado del enriquecimiento de nutrientes (llamadas fuentes antropogénicas no relacionadas UAS) debido a los aportes de Fósforo asociados con actividades humanas en la cuenca del embalse. Basada en la diferencia esperado en la carga de fosforo en ausencia de perturbaciones de captación inducidas por el hombre.

2.5.7 Modelo Empírico

Emisiones difusas de Metano y Dióxido de Carbono para 100 años

Para las emisiones difusas de CH₄ y CO₂, la edad del embalse fue seleccionada como una de las variables más fuertes en la predicción (ec. 16 y ec. 17).

$$CH_4 \text{ Emisión por difusas para 100 años} = \frac{10^{(0,832+0,459-\log 10(\frac{\% \text{Área litoral}}{100})+0,4819*Temperatura \text{ efectiva de } CH_4)} * (1 - 10^{(-100*0,01419)})}{(100 * 0,01419 * \ln(10))} \tag{ec. 16}$$

Donde:

CH₄ Emisiones difusas = Emisiones difusivas de metano [mgC m⁻² d⁻¹]

% Área litoral = [%]

Temperatura efectiva de CH₄= [°C]

$$CO_2 \text{ Emisiones difusas para 100 años} = (10^{(1,860+ 0,0332*Temperatura \text{ efectiva } CO_2+0,0799*\log 10 (\text{área del embalse}) + 0,0155*Cont.de C en el suelo del embalse + 0,2263*\log 10(PT))})^{\frac{100(0,330+1)-0,5(+0,330+1)}{(-0,330+1)*(100-0,5)}} \tag{ec. 17}$$

Donde:

CO₂ Emisiones difusas: Emisiones difusivas de metano [mg C m⁻² d⁻¹]

Área del embalse: [km²]

Temperatura efectiva de CO₂: [°C]

Contenido de C en el suelo del embalse: [kgC m⁻²]

PT: Fósforo total [μ/l]

Las emisiones de metano de un embalse son más complejas de la del dióxido de carbono porque pueden ser liberado por tres vías (desgasificación, burbujeo y difusión) cada uno puede entregar cantidades sustanciales de CH₄ a la atmósfera y porque cada vía es controlada por conductos diferentes y debemos modelar de forma diferente.

Emisiones de metano vía difusión

La ecuación para predecir las emisiones difusas de metano está en función de la edad del embalse,

$$CH_4 \text{ Emisiones difusas para una edad específica} = 10^{(0,8032 - 0,01419 * \text{Edad} + 0,4594 * \log 10 \left(\frac{\% \text{Área litoral}}{100} \right) + 0,04819 * \text{Temperatura efectiva de CH}_4)} \quad (\text{ec. 18})$$

Donde

CH₄ Emisiones difusas = Emisiones difusas de metano [mg C m⁻² d⁻¹]

% Área litoral = [%]

Temperatura efectiva de CH₄ = [°C]

Emisiones de metano por burbujeo

El metano es poco soluble y puede alcanzar presiones altas cuando es producido en los sedimentos, la formación de burbujas sucede cuando la presión parcial de CH₄ exceda la suma de la presión barométrica e hidrostática. A medida que las burbujas crecen o después de un cambio repentino en la presión, las burbujas pueden liberarse del sedimento a la columna de agua,

$$CH_4 \text{ Emisión por burbujeo} = 10^{(-1,3104 + 0,8515 * \log 10 \left(\frac{\% \text{Área litoral}}{100} \right) + 0,05198 * (\text{Radiación Horizontal Global Acumulada})} \quad (\text{ec. 19})$$

Donde

CH₄ Emisión por burbujeo: [mg C m⁻² d⁻¹]

Área litoral: [%]

Radiación horizontal global acumulada: [kWh m⁻² periodo⁻¹]

La ec. 19 usa la radiación global horizontal acumulativa y el porcentaje del área litoral como las variables más representativas para predecir las burbujas de metano. Para las emisiones de metano por ebullición no se encontró una ecuación, debido a que la edad del embalse no fue seleccionada por el método de regresión neta elástica. El modelo para predecir emisiones vía burbujeo tiene muchas incertidumbres porque existe un número limitado de mediciones (n=46) en campo.

temperatura media anual, porcentaje del área litoral. La edad del embalse tiene una influencia fuerte, particularmente en lugar con altas temperaturas. Asimismo, la disminución de emisiones de GEI con la edad fue mayor en embalses con zonas litorales extensas. La ec. 18 permite estimar las emisiones difusas de metano y las unidades son (mg C m⁻² d⁻¹).

evitando en gran medida el intercambio dentro de la columna de agua y emitiendo directamente a la atmosfera. Debido a su dependencia de la presión hidrostática, la liberación de burbujas de metano es inversamente proporcional a la profundidad del agua y, en muchos sistemas acuáticos, se limita a zonas poco profundas en combinación con áreas altas de deposición de sedimentos (ec. 19).

Emisiones de metano por desgasificación aguas abajo del embalse

Las salidas del embalse pueden originarse desde varias profundidades a través de varios conductos (a través de turbinas, vertederos, compuertas profundas y canales de derivación), con importante influencia en los flujos de metano por desgasificación. Para sistemas estratificados térmicamente o periodos, extraer agua del hipolimnion puede provocar una emisión de metano alta porque las concentraciones de metano se acumulan continuamente

en la hipolimnia anóxica. La caída de presión repentina del agua turbinada puede liberar una fracción grande de gas disuelto directo a la atmósfera. El agua rica en metano extraída del embalse puede ser liberada a la atmósfera por aguas turbulentas río abajo del embalse. Sin embargo, esta vía de emisión no es considerado en G-res tool, porque este componente puede tener una amplia variación entre los ecosistemas.

Es un requisito para evaluar las emisiones de desgasificación es comparar la toma de agua y las profundidades de la termoclina para determinar que el agua que fluye río debajo de la presa proviene del hipolimnion. Si es así, el agua es rica en CH₄. Contrariamente, si el agua que fluye río abajo es del epilimnion, es un agua pobre en metano, conduciendo a bajas emisiones por desgasificación. La herramienta G-res

$$CH_4 \text{ desgasificación} = \frac{10^{(-6,9106+2,950 \cdot \log_{10}(CH_4 \text{ Emisiones difusas para 100 años})+0,6017 \cdot \log_{10}(TR) \cdot 1000)}}{1000000000} * \text{Área de la cuenca} * 100000 * \left(\frac{\text{Escorrentía anual}}{100}\right) * 0,9$$

(ec. 20)

Donde:

CH₄ Emisión por desgasificación: [mg C m⁻²d⁻¹]

Área del embalse: [km²]

Escorrentía anual: [mm/años]

Área de la cuenca: [km²]

Emisiones difusas de CH₄: [mg C m⁻²d⁻¹]

TR: Tiempo de residencia [años]

Emisiones difusas de CO₂

El modelo para estimar el flujo de CO₂, incluye la edad del embalse, la temperatura media anual, la concentración de fosforo, el área del embalse, y el contenido de carbono de la superficie inundada como se muestra en la ecuación 14. En el modelo no se incluye cuando el embalse actúa como un sumidero. La entrada persistente de CO₂ generalmente se observa solo en condiciones eutróficas o cuando hay entradas de carbono alóctono orgánico muy bajas. El G-res Tool proporciona un límite superior a la huella de CO₂ de los sistemas eutróficos. En comparación con el CH₄ difusivo, la disminución de las emisiones de CO₂ a lo largo del tiempo es mucho más pronunciada al principio y se estabiliza más rápidamente hasta un nuevo equilibrio. Esta disminución temporal ha sido reportada en varios casos.

La predicción de las emisiones difusas de CO₂ tanto de los embalses individuales como de los embalses en conjunto están influenciados por la temperatura y son menos sensibles a la cantidad de carbono orgánico contenido en el suelo inundado. Las emisiones difusas de CO₂ de los

estima emisiones por desgasificación solo cuando las salidas de agua están ubicadas debajo de la termoclina.

El modelo para estimar emisiones de metano por desgasificación se desarrolló a base de datos publicados sobre las concentraciones de metano aguas arriba y aguas debajo de la presa y multiplicado por el flujo medio anual que pasa a través de la turbina. La diferencia entre estas concentraciones se predijo mejor en función del tiempo de residencia del agua y la emisión difusa anual de metano posterior al embalse como un representante de la producción de metano. La descarga promedio a través de la turbina se estima el 90% de la escorrentía anual, aunque este valor puede variar sustancialmente según las operaciones y el mantenimiento del embalse (ec. 20).

embalses podrían aumentar con el aumento de la temperatura de agua (ec. 21).

A una edad específica

$$= (1,860 - 0,330 * \log_{10}(\text{edad}) + 0,0332$$

$$* \text{Temperatura efectiva } CO_2 + 0,799$$

$$* \text{Log } 10(\text{Área del embalse})$$

$$+ 10^{0,0155 * \text{Contenido de C en la superficie del embalse} + 0,2263 * \log_{10}(PT)}$$

(ec. 21)

Dónde

Edad: [años]

Temperatura efectiva CO₂: [°C]

Área del embalse: [km²]

Contenido de C en el embalse: [kgC/m²]

PT: [µg/l]

2.6 Indicadores de Emisiones de GEI para evaluar la sostenibilidad de proyectos hidroeléctricos

Las emisiones de gases de efecto invernadero de los embalses muestran notables variaciones en términos de espacio y tiempo, lo que guarda una correlación positiva con la temperatura y la producción primaria acuática, y una correlación negativa con la antigüedad del embalse

(Almeida et al., 2019). Además, las emisiones netas totales de GEI están directamente relacionadas con el área inundada. La capacidad de generación de electricidad (capacidad instalada) por unidad de área inundada, es decir, la densidad de potencia constituye un factor clave que influye en la intensidad de carbono (Almeida et al., 2019).

La intensidad de carbono de las fuentes de energía se define como la cantidad de GEI emitida por unidad de electricidad generada ($\text{g CO}_{2\text{eq}} \text{ kWh}^{-1}$). Para calcularla, hemos integrado datos específicos de proyectos, como las áreas inundadas y la capacidad instalada, de nuestra

base de datos de represas en la región amazónica, combinándolos con estimaciones de flujo previamente publicadas.

Este enfoque revela que, incluso en casos de proyectos con emisiones de GEI relativamente bajas, la intensidad de carbono puede ser alta si la producción de electricidad por unidad de área inundada es reducida, lo que se traduce en una baja densidad de potencia. Por ello se consideran algunos indicadores de emisión que están asociados con la cantidad de GEI emitidos por la presa (ver Tabla 5) (Almeida et al., 2019).

Tabla 5. Indicadores para evaluar las emisiones de GEI de proyectos hidroeléctricos. Fuente: (Almeida et al., 2019).

Indicadores	Unidades	Descripción
Flujos de GEI	$\text{g CO}_{2\text{eq}} \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$	El intercambio de GEI, en equivalentes de CO_2 , en la interfase aire-agua del embalse por unidad de superficie durante un cierto período de tiempo.
Flujos Totales de GEI	$\text{Tg CO}_{2\text{eq}}$	Los flujos de GEI durante un período de tiempo de referencia multiplicado por el área total del embalse. Los tiempos de referencia son un día 1, 20 y 100 años. ($1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g}$)
Densidad de Potencia	W m^{-2}	Es la relación entre la capacidad de generación de electricidad y el área inundada por el embalse.
Intensidad de Emisiones	$\text{g CO}_{2\text{e}} \text{ kWh}^{-1}$	Emisiones de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ producidos por unidad de electricidad generada. Es un indicador utilizado para comparar el rendimiento de las emisiones en proyectos de diferentes tamaños y también entre fuentes de electricidad.

3 Materiales y métodos

La presente investigación abarca tanto un enfoque documental como de campo, caracterizado por su naturaleza explicativa, descriptiva y analítica. La dimensión documental de este estudio implica el análisis y revisión exhaustiva de la información bibliográfica relacionada con los modelos de estimación de gases de efecto invernadero en proyectos hidroeléctricos. Por otro lado, la faceta de campo se materializa a través de visitas técnicas a los casos de estudio seleccionados con el fin de recopilar y verificar datos relevantes.

La naturaleza explicativa de la investigación se manifiesta en su objetivo de conceptualizar y aplicar un modelo para estimar las emisiones de GEI en embalses en diversos contextos climáticos y biogeográficos. La componente descriptiva se centra en la caracterización biogeográfica de los embalses hidroeléctricos y la elaboración de un modelo conceptual que sirva de base para la estimación de dichas emisiones. La perspectiva analítica se refleja en el análisis minucioso de la información proveniente de los Estudios de Evaluación de Impacto Ambiental, Programa de Prevención y Mitigación, Plan de Adecuación y Seguimiento Ambiental e Informes de Monitoreo Anual de los proyectos Ivirizu y Misicuni.

El proyecto se desarrolló en tres fases claramente definidas. En la primera fase, se llevó a cabo el análisis y revisión exhaustiva de la literatura sobre modelos de estimación de GEI en embalses hidroeléctricos, así como la evaluación de metodologías propuestas por agencias ambientales de otros países. La segunda fase se enfocó en la caracterización biogeográfica de los proyectos, el desarrollo de un modelo conceptual para la estimación de emisiones de GEI en diferentes contextos climáticos y biogeográficos, y la selección de la herramienta G-res para su aplicación en los proyectos Ivirizu y Misicuni. En esta etapa, se analizó minuciosamente la información proveniente de diversas fuentes, incluyendo los informes mencionados anteriormente.

4 Resultados

La estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de los proyectos hidroeléctricos se llevó a cabo mediante la herramienta G-res Tool. Esta herramienta proporciona resultados de las emisiones de GEI antes y después de la inundación, emisiones no relacionadas con fuentes antropogénicas, emisiones durante la etapa de construcción y la huella neta de GEI del embalse durante su vida útil de 100 años. Además, la herramienta G-res utiliza Earth Engine para obtener

información sobre atributos físicos, climáticos y cobertura del suelo en la cuenca de los proyectos.

4.1 Caracterización de los Proyectos Hidroeléctricos Ivirizu, Miguillas y Misicuni

La Características técnicas de los proyectos hidroeléctricos presenta las características técnicas de los proyectos hidroeléctricos Ivirizu, Miguillas y Misicuni. El proyecto hidroeléctrico Ivirizu se ubica en los municipios de Pocona, Totorá y Mizque del Departamento de Cochabamba. Sus componentes principales, como la presa, la casa de máquinas, los túneles y la tubería forzada, se sitúan en las cuencas del río Ivirizu, mientras que la línea de transmisión abarca el municipio de Mizque. La superficie total del área de influencia directa es de 542,62 km² y comprende ambientes acuáticos, semiacuáticos y terrestres, incluyendo toda la cuenca del río Ivirizu y parte de la cuenca Cristal Mayu. Además, recibe aportes de 4 subcuencas desde sus nacientes: Cuenca Huasa Mayu, Cuenca Cristal Mayu, Cuenca Lope Mendoza, Cuenca Ivirizu, Cuenca Fuertes y Cuenca Yana Mayu. Desde una perspectiva biogeográfica, esta área abarca desde matorrales y pastizales altoandinos hasta bosques secos interandinos, bosques montanos de Yungas y bosques subandinos hiperhúmedos (1.000-4.000 m s.n.m) (Ende Corporación y Valle Hermoso, 2015).

En el caso del proyecto hidroeléctrico Miguillas se encuentra localizado en la provincia de Inquisivi en el Departamento de La Paz. En el área de proyecto, se tiene una cuenca aprovechable de aproximadamente de 410 km², con una precipitación promedio anual de 358,9 mm. En cuanto a la vegetación, se cuenta con la presencia de especies de gramíneas y amancollas, bosques subhúmedos puñenos, bosques montanos subhúmedos, bosques subhúmedos del subandino, bosques secos bisimontano. En el área del embalse se tiene la presencia de pajonales y bofedales (ENDE CORANI, 2021).

El proyecto Multiple Misicuni consiste en el aprovechamiento hídrico de las cuencas de los Ríos Misicuni, Viscachas y Putucuni, mediante el represamiento y trasvase de sus aguas. Se ubica en el sector sur de las Provincias de Ayopaya y Chapare y también quedan comprendidas, dentro del ámbito del proyecto, las Provincias de Quillacollo. La zona de influencia del proyecto se encuentra en la cadena montañosa de la Cordillera del Tunari y Ecológicamente pertenece a la Provincia Biogeográfica de la Puna Peruana. En la zona de inundación se presenta asociaciones vegetales de: Vegetación saxícola altoandina

y Vegetación altimontana y pajonales altoandinos de la Puna Húmeda (EMPRESA MISICUNI, 2018).

Tabla 6. Características técnicas de los proyectos hidroeléctricos

Características	Ivirizu	Miguillas	Misicuni
Latitud	-17,24	-67,36	-66.33
Longitud	-65,28	-16,70	-17.10
Zona Climática	Templada	Templada	Templada
Área de la cuenca (km ²)	542,62	587,9	351
Esorrentía Anual de la Cuenca (mm año ⁻¹)	491,61	358,9	467
Área del embalse (km ²)	1,007	0,33	4,6
Volumen del embalse (Hm ³)	29,48	5,19	185
Nivel de Agua (m s.n.m)	2.320	3.817	3.774
Profundidad máxima (m)	127	28	120
Profundidad mínima (m)		16	40
Caudal de diseño (m ³ s ⁻¹)	26,50	11,49	14,70
Cantidad de Carbono en el suelo (kg C m ⁻²)	23,49	11,11	7,29
Temperatura Media Anual (°C)	15,6	8,7	9,6
Tiempo de residencia (días)	12	6	144
Capacidad Instalada (MW)	290	206	120
Producción Energética (MWh año ⁻¹)	1.160	1.015	217

4.2 Estimación de la Huella Neta de GEI de los tres proyectos hidroeléctricos

En relación con la Huella Neta de GEI, la Tabla 7 indica los resultados obtenidos para los tres proyectos. Se ha

determinado que para Ivirizu es de 665.132 (t CO_{2eq} año⁻¹), mientras que para Miguillas asciende a 412.733 t CO_{2eq} año⁻¹. En el caso del proyecto multipropósito Misicuni, se registró una huella de 974.747 t CO_{2eq} año⁻¹. Es importante destacar que en el proyecto Misicuni, solo 146.212 t CO_{2eq} año⁻¹ corresponden a la generación de electricidad, lo que representa un 15% del total, mientras que el 80% de las emisiones se atribuyen al abastecimiento de agua y el 5% al riego.

Estos datos son fundamentales para comprender el impacto ambiental y la distribución de las emisiones de gases de efecto invernadero en cada proyecto. Estos datos son calculados utilizando el GWP de 34 para CH₄ a 100 años de vida. El proyecto con la mayor Huella Neta de GEI es Ivirizu, los mayores flujos de GEI pueden ser producto de la presencia previa de abundante vegetación en la zona inundada, además de una temperatura media anual superior, una mayor cantidad de carbono en el suelo y emisiones de GEI mucho más altas en cuanto a las

actividades de construcción en comparación con los otros proyectos.

En la Tabla 8 se presentan las emisiones biogénicas de CO₂ y CH₄ para los proyectos mencionados. En el caso de Ivirizu, aproximadamente el 80% de las emisiones corresponden a CO₂, el resto son emisiones de CH₄; mientras que, para Miguillas, las emisiones de CO₂ se reducen al 48%. Por otro lado, en el proyecto Misicuni, solo el 19% de las emisiones se atribuyen al CO₂ y el 81% corresponde a CH₄. Este resultado en Misicuni se explica por la presencia previa de una comunidad de alrededor de 3.000 personas que se dedicaban a la agricultura y la cría de camélidos antes de la construcción del embalse, la presencia de esta población genera emisiones de nutrientes que favorecen la productividad del embalse y la degradación de materia orgánica en zonas anóxicas. Entre los 3 proyectos, la mayor emisión biogénica del embalse corresponde al proyecto Ivirizu.

Tabla 7. Huella Neta de emisiones de GEI de los proyectos hidroeléctricos estudiados.

Proyectos Hidroeléctricos	Antes de la inundación (t CO _{2eq} año ⁻¹)	Después de la inundación (t CO _{2eq} año ⁻¹)	Construcción (t CO _{2eq} año ⁻¹)	Huella Neta de GEI (t CO _{2eq} año ⁻¹)
Ivirizu	176	-292	+664.664	= 665.132
Miguillas	56	-22	+412.654	= 412.732
Misicuni	480	-181	+974.448	= 974.747

Tabla 8. Emisiones promedio anuales de GEI por área

Proyectos Hidroeléctricos	CO ₂ (g CO _{2eq} m ⁻² año ⁻¹)	CH ₄ (g CO _{2eq} m ⁻² año ⁻¹)	CO _{2eq} (g CO _{2eq} m ⁻² año ⁻¹)
Ivirizu	372	93	465
Miguillas	113	125	237
Misicuni	12	53	65

Tabla 9. Emisiones Biogénicas Netas de GEI

Proyectos Hidroeléctricos	CO ₂ (tCO _{2eq} año ⁻¹)	CH ₄ (tCO _{2eq} año ⁻¹)	CO _{2eq} (t CO _{2eq} año ⁻¹)
Ivirizu	374 (80%)	94 (20%)	468
Miguillas	37 (48%)	41 (52%)	78
Misicuni	57 (19%)	242 (81%)	299

En la Tabla 8 se muestran las emisiones promedio anuales de GEI por unidad de área en los tres embalses hidroeléctricos. Estos resultados indican que las emisiones de CO₂ por unidad de área son significativamente más altas en Ivirizu. Asimismo, podemos observar que Ivirizu tiene mayores emisiones de CO₂ por área respecto a los otros embalses. En lo que respecta al metano, se observa que en Miguillas se registran las emisiones más elevadas de metano por área, alcanzando los 125 g CO_{2eq} m⁻² año⁻¹, seguido por Ivirizu con 93 g CO_{2eq} m⁻² año⁻¹ y, en último lugar, Misicuni con 53 g CO_{2eq} m⁻² año⁻¹.

En la Tabla 9 se presentan las emisiones biogénicas anuales de GEI de los tres embalses hidroeléctricos a lo largo de un período de vida de 100 años, considerando un GWP de 34 para una temporalidad de 100 años propuesto por el IPCC en el 2013. En el proyecto Ivirizu, durante el primer año se emiten 1.505 g CO_{2eq} m⁻² año⁻¹, y después de 100 años, estas emisiones disminuyen a 359 g CO_{2eq} m⁻² año⁻¹. En Miguillas, las emisiones biogénicas comienzan en 572 g CO_{2eq} m⁻² año⁻¹ y disminuyen gradualmente hasta llegar a 173 g CO_{2eq} m⁻² año⁻¹ después de 100 años. En el caso de Misicuni, las emisiones inician

en 655 g CO_{2eq} m⁻² año⁻¹ y van decreciendo hasta alcanzar valores de 5 g CO_{2eq} m⁻² año⁻¹. En los tres embalses se observa una disminución anual de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Durante los primeros 8 años, esta reducción es pronunciada, después se vuelve más gradual y constante. Ivirizu y Miguillas muestran un declive sostenido y lento después de los primeros 10 años, mientras que en Misicuni, las emisiones prácticamente se estabilizan después de 100 años. Este fenómeno se explica, según (Tremblay et al., 2005), por la degradación de la materia orgánica proveniente de la vegetación preexistente y el carbono orgánico del suelo

en los primeros 10 años, lo que genera emisiones de GEI, tanto de CO₂ como de CH₄.

La Tabla 10 presenta los resultados de los flujos de CH₄ y CO₂ a través de las distintas vías de emisión posteriores a la inundación. En el caso de Ivirizu, se destaca una contribución principal de metano a través de la difusión, seguida por el burbujeo y, finalmente, la desgasificación. En Miguillas, las emisiones se originan principalmente por burbujeo, seguidas de la difusión y, en última instancia, la desgasificación. Por otro lado, en Misicuni, el CH₄ se emite principalmente por burbujeo, seguido de la difusión y, por último, la desgasificación.

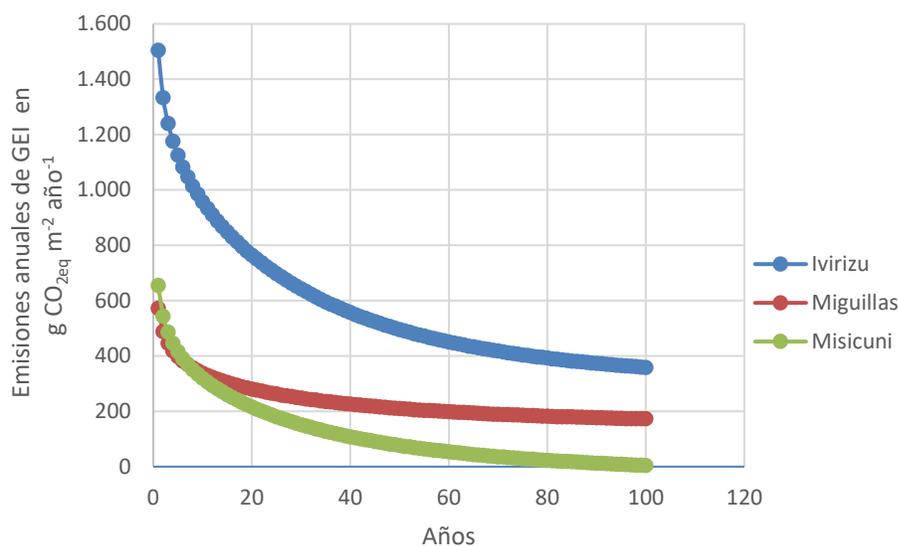


Figura 1: Emisiones Netas Anuales de GEI

Tabla 10. Emisiones de CH₄ y CO₂ por vías de emisión después de la inundación

Proyectos Hidroeléctricos	CH ₄ difusión (g CO _{2eq} m ⁻² año ⁻¹)	CH ₄ burbujeo (g CO _{2eq} m ⁻² año ⁻¹)	CH ₄ desgasificación (g CO _{2eq} m ⁻² año ⁻¹)	CO ₂ difusión (g CO _{2eq} m ⁻² año ⁻¹)
Ivirizu	55 (54%)	28 (28%)	18 (17%)	75
Miguillas	29 (22%)	93 (71%)	9 (7%)	39
Misicuni	21 (38%)	32(58%)	2 (4%)	50

Las emisiones por difusión están influenciadas principalmente por la edad del embalse, la temperatura media anual y el porcentaje del área litoral. Según Prairie et al., (2021), las emisiones por burbujeo son inversamente proporcionales a la profundidad y suelen limitarse a zonas poco profundas junto con áreas con altas tasas de deposición de sedimentos. Las emisiones por desgasificación ocurren cuando las aguas se

perturban, generando un cambio drástico en la presión, especialmente si se libera agua rica en metano desde zonas profundas.

Los resultados de G-res indican una disminución constante de las emisiones difusas tanto de CO₂ como de CH₄, mientras que las emisiones a través del burbujeo y la desgasificación permanecen estables en el tiempo. En el caso de Ivirizu, se caracteriza por tener un clima

templado, aunque experimenta temperaturas más elevadas en algunas temporadas, lo que puede llevar a la estratificación del embalse. Además, este embalse recibe un mayor aporte de materia orgánica en comparación con los otros dos embalses, lo que aumenta la producción de metano en lugar de dióxido de carbono. La estratificación térmica durante todo el año impide la oxigenación del agua y reduce la solubilidad del oxígeno disuelto en el embalse.

Por otro lado, tanto en Miguillas como en Misicuni, predominan las emisiones por burbujeo debido a la poca profundidad del embalse en Miguillas y a un mayor porcentaje de área litoral en Misicuni, además de una mayor radiación horizontal global que favorece las emisiones por burbujeo.

Además, se calcularon las emisiones biogénicas de GEI para dos intervalos de tiempo diferentes, uno de 100 años y otro de 20 años. Se empleó un GWP de 34 para convertir las emisiones de CH₄ en CO₂ equivalente en un período de 100 años y un GWP de 86 para un período de 20 años (ver Tabla 11). Estos resultados revelan que Ivirizu registra las mayores emisiones biogénicas, alcanzando 460 t CO_{2eq} año⁻¹ en un lapso de 100 años, seguido de Misicuni con 299 t CO_{2eq} año⁻¹. Sin embargo, es importante mencionar que en el caso de Misicuni, este valor total corresponde a los tres servicios prestados, y solo corresponde un 15 % a la generación de energía eléctrica que sería 45 t CO_{2eq} año⁻¹. Por último, Miguillas presenta emisiones de 78 t CO_{2eq} año⁻¹. En un intervalo de 20 años, Misicuni emite alrededor de 669 t CO_{2eq} año⁻¹ debido a una mayor emisión de metano en comparación con el CO₂ en todos los servicios, pero si nos enfocamos únicamente en las emisiones de la hidroeléctrica, la cifra se reduce a 100 t CO_{2eq} año⁻¹, siendo considerablemente menor que las 611 t CO_{2eq} año⁻¹ de Ivirizu en el mismo período.

Tabla 12. Indicadores de Sostenibilidad.

Indicadores	Ivirizu	Miguillas	Misicuni
Densidad de Potencia (Wm ⁻²)	288,2	624,2	26,10
Intensidad de Emisiones Biogénicas 100 años (g CO _{2eq} kWh ⁻¹)	0,40	0,08	0,21
Intensidad de Emisiones Biogénicas 20 años, (g CO _{2eq} kWh ⁻¹)	0,53	0,11	0,46
Intensidad de emisiones de Construcción 100 años, (g CO _{2eq} kWh ⁻¹)	5,73	4,06	6,74
Intensidad de Emisiones Total a 100 años (g CO _{2eq} kWh ⁻¹)	6,13	4,14	6,95
Intensidad de Emisiones Total a 20 años (g CO _{2eq} kWh ⁻¹)	6,26	4,17	7,20

Estos valores se sitúan por debajo de las emisiones promedio de GEI asociadas al ciclo de vida de proyectos hidroeléctricos a nivel global, alcanzan los 23 gCO_{2eq}kWh⁻¹, según una evaluación de 480 proyectos de almacenamiento de energía hidroeléctrica utilizando la

Los indicadores de sostenibilidad de los tres proyectos se presentan en la Tabla 12. Cuando se considera un período de 100 y 20 años, Misicuni muestra la mayor intensidad de emisiones con 6,95 g CO_{2eq} kWh⁻¹ para 100 años y 7,20 g de CO_{2eq} kWh⁻¹ para 20 años, seguido de Ivirizu con 6,26 g de CO_{2eq} kWh⁻¹ para 100 años y 6,13 gCO_{2eq} kWh⁻¹ para 20 años, mientras que Miguillas tiene valores de 4,14 g CO_{2eq} kWh⁻¹ para 100 años y 4,17 g CO_{2eq} kWh⁻¹ para 20 años. Es relevante destacar que al calcular las emisiones de Misicuni, solo se tiene en cuenta el porcentaje correspondiente a la hidroeléctrica. Una de las razones detrás de la mayor intensidad en Misicuni se debe al tamaño más grande de su embalse y a una generación de energía menor en comparación con los otros proyectos.

La etapa de construcción se define como la extracción de materia prima, la fabricación de equipos, el transporte y los procesos reales de construcción de las represas (Song et al., 2018) ha estimado que desde la etapa de construcción se emiten entre 2,3 y 37,9 g de CO_{2eq} kWh⁻¹, basándose en las emisiones de GEI de 27 represas en todo el mundo.

Tabla 11. Emisiones Biogénicas de GEI para un tiempo de 100 y 20 años.

Proyectos Hidroeléctricos	Emisiones Netas 100 años (t CO _{2eq} año ⁻¹)	Emisiones Netas en 20 años (t CO _{2eq} año ⁻¹)
Ivirizu	468	611
Miguillas	78	115
Misicuni	299	669

herramienta G-res. Asimismo, en comparación con las intensidades de otras fuentes de energías, solo la energía eólica tiene una intensidad promedio de emisión de GEI durante 100 años de vida que la energía hidroeléctrica como se muestra en la Tabla 13.

La intensidad de carbono de las represas hidroeléctricas está fuertemente vinculada a la densidad de potencia. La densidad de potencia es el criterio empleado por el Mecanismo de Desarrollo Limpio de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático para financiar y otorgar créditos de carbono a proyectos hidroeléctricos. Los proyectos con densidades de potencia superiores a 4 kW m^{-2} son elegibles para créditos, y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de los proyectos candidatos con densidades de potencia superiores a 4 kW m^{-2} se consideran insignificantes en horizontes de 100 años (Almeida et al., 2019).

Asimismo, la Iniciativa de Bonos Climáticos (CBI por sus siglas en inglés) ha introducido criterios para la emisión de Bonos Verdes para el sector de la Energía Hidroeléctrica. Los proyectos hidroeléctricos deben cumplir con los criterios de mitigación que implica tener una densidad energética mayor a 5 kW m^{-2} e Intensidad de Emisiones de GEI menor que $100 \text{ g CO}_{2\text{eq}} \text{ kWh}^{-1}$ para proyectos antes del 2020. En cambio, para proyectos hidroeléctricos que comience a operar en 2020 o después es elegible si tiene; una densidad energética mayor a 10 Wm^{-2} e Intensidades de Emisiones de GEI menor que $50 \text{ g CO}_{2\text{eq}} \text{ kWh}^{-1}$.

Tabla 13. Emisiones de Ciclo de Vida de Fuente de Energía. ^aFuente: IPCC, 2013

Fuente de Energía	Emisiones de Ciclo de Vida ($\text{g CO}_{2\text{eq}} \text{ kWh}^{-1}$)
Proyecto Hidroeléctrico Ivirizu	6,13
Proyecto Hidroeléctrico Miguillas	4,14
Proyecto Multipropósito Misicuni	6,95
Gas y ciclo combinado	490,00 ^a
Hidroeléctricas	24,00 ^a
Plantas Fotovoltaicas	48,00 ^a
Parque Eólicos	12,00 ^a

5 Conclusiones

Las emisiones de gases de efecto invernadero en un embalse hidroeléctrico se generan a partir de la descomposición de la vegetación y el carbono orgánico del suelo inundados. Estas emisiones pueden estar influenciadas principalmente por: la altura de la presa, la latitud, las condiciones climáticas, las concentraciones de fósforo y nitrógeno, la vida útil de la presa, el tiempo que

el agua permanece en el embalse y la composición de este.

Para estimar las emisiones de GEI en los proyectos hidroeléctricos Ivirizu, Miguillas y Múltiple Misicuni, se seleccionó la herramienta G-res porque utiliza datos más específicos del proyecto y estima las emisiones con variabilidad temporal. Esta herramienta requiere una serie de datos fundamentales, como la zona climática, la cobertura del suelo en la cuenca y en el lugar del embalse, la ubicación y altura de la presa, el año de inundación, la superficie de la cuenca y del embalse, la capacidad del embalse, la profundidad máxima y media del embalse, la profundidad de la toma de agua, la población en la cuenca y datos climáticos.

El modelo G-res Tool estimó tanto las emisiones biogénicas de GEI generadas por el embalse como las emisiones de GEI asociadas a las actividades de construcción de cada proyecto. En el caso del Proyecto Ivirizu, se estimaron emisiones biogénicas de GEI anuales de $468 \text{ t CO}_{2\text{eq}} \text{ año}^{-1}$ generadas por el embalse y $664.664 \text{ t CO}_{2\text{eq}} \text{ año}^{-1}$ emitidas durante las actividades de construcción, lo que resulta en una Huella Neta de GEI de $665.132 \text{ t CO}_{2\text{eq}} \text{ año}^{-1}$, y unas emisiones específicas de $6,13 \text{ g CO}_{2\text{eq}} \text{ kWh}^{-1}$. En cuanto, al proyecto hidroeléctrico Miguillas se ha estimado $78 \text{ t CO}_{2\text{eq}} \text{ año}^{-1}$ que corresponden a las emisiones biogénicas y $412.732 \text{ t CO}_{2\text{eq}} \text{ año}^{-1}$ a las actividades de construcción, las emisiones específicas de este proyecto son $4,14 \text{ g CO}_{2\text{eq}} \text{ kWh}^{-1}$. Por otro lado, en lo que respecta a la hidroeléctrica del proyecto multipropósito Misicuni, las emisiones biogénicas se sitúan en $45 \text{ t CO}_{2\text{eq}} \text{ año}^{-1}$, y las emisiones por la construcción alcanzan las $146.212 \text{ t CO}_{2\text{eq}} \text{ año}^{-1}$, con emisiones específicas de $6,95 \text{ g CO}_{2\text{eq}} \text{ kWh}^{-1}$. Todos estos proyectos están por debajo de los $80 \text{ g CO}_{2\text{eq}} \text{ kWh}^{-1}$ que se considera el límite de un proyecto hidroeléctrico sostenible.

Estos resultados revelan una mayor contribución de las emisiones de GEI durante las actividades de construcción en comparación con las emisiones derivadas de la inundación del embalse. Además, confirman la tendencia de una mayor generación de GEI en proyectos hidroeléctricos situados a menor altitud sobre el nivel del mar, siendo el embalse del Proyecto Ivirizu (a 2.175 metros sobre el nivel del mar) un emisor más significativo en comparación con el Proyecto Misicuni (a 3.774 metros sobre el nivel del mar).

6 Bibliografía

Abril, G., Guérin, F., Richard, S., Delmas, R., Galy-Lacaux, C., Gosse, P., Tremblay, A., Varfalvy, L., Aurelio, M., Santos, D., & Matvienko, B. (2005). *Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical*

- reservoir (Petit Saut, French Guiana)*.
<https://doi.org/10.1029/2005GB002457>
- Abril, G., Guérin, F., Richard, S., Delmas, R., Galy-Lacaux, C., Gosse, P., Tremblay, A., Varfalvy, L., Dos Santos, M. A., & Matvienko, B. (2005). Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana). *Global Biogeochemical Cycles*, 19(4).
<https://doi.org/10.1029/2005GB002457>
- AETN, A. de F. de E. y T. N. (2023). *Anuario Estadístico 2022*.
- Almeida, R. M., Shi, Q., Gomes-Selman, J. M., Wu, X., Xue, Y., Angarita, H., Barros, N., Forsberg, B. R., García-Villacorta, R., Hamilton, S. K., Melack, J. M., Montoya, M., Perez, G., Sethi, S. A., Gomes, C. P., & Flecker, A. S. (2019). Reducing greenhouse gas emissions of Amazon hydropower with strategic dam planning. *Nature Communications*, 10(1).
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-12179-5>
- Barros, N., Cole, J. J., Tranvik, L. J., Prairie, Y. T., Bastviken, D., Huszar, V. L. M., del Giorgio, P., & Roland, F. (2011). Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geoscience*, 4(9), 593–596. <https://doi.org/10.1038/ngeo1211>
- Barros, N., Cole, J. J., Tranvik, L. J., Prairie, Y. T., Bastviken, D., Huszar, V. L. M., Del Giorgio, P., & Roland, F. (2011). Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geoscience*, 4(9), 593–596. <https://doi.org/10.1038/ngeo1211>
- Chanudet, V., Descloux, S., Harby, A., Sundt, H., Hansen, B. H., Brakstad, O., Serça, D., & Guerin, F. (2011). Gross CO₂ and CH₄ emissions from the Nam Ngum and Nam Leuk sub-tropical reservoirs in Lao PDR. *Science of the Total Environment*, 409(24), 5382–5391.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.018>
- Deemer, B. R., Harrison, J. A., Li, S., Beaulieu, J. J., Delsontro, T., Barros, N., Bezerra-Neto, J. F., Powers, S. M., Dos Santos, M. A., & Vonk, J. A. (2016). Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis. In *BioScience* (Vol. 66, Issue 11, pp. 949–964). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw117>
- Demarty, M., & Bastien, J. (2011). GHG emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions: Review of 20 years of CH₄ emission measurements. *Energy Policy*, 39(7), 4197–4206.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.033>
- EMPRESA MISICUNI. (2018). Programa de Prevención y Mitigación y Plan de Aplicación y Seguimiento Ambiental (PPM y PASA) Proyecto Múltiple Misicuni.
- ENDE CORANI. (2021). *Memoria Anual*.
- Ende Corporación y Valle Hermoso. (2015). *EEIA Ivirizu*.
- Fearnside, P. M. (2002). GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM A HYDROELECTRIC RESERVOIR (BRAZIL'S TUCURUÍ DAM) AND THE ENERGY POLICY IMPLICATIONS.
- Fearnside, P. M. (2011). Greenhouse Gas Emissions from Hydroelectric Dams in Tropical Forests.
- Fearnside, P. M., & Pueyo, S. (2012). Underestimating greenhouse-gas emissions from tropical dams. In *Nature Climate Change* (Vol. 2, Issue 6, pp. 382–384).
<https://doi.org/10.1038/nclimate1540>
- Goldenfum, J. A. (2012). Challenges and solutions for assessing the impact of freshwater reservoirs on natural GHG emissions. *ECOHYDROLOGY HYDROBIOLOGY*, 12(2), 115–122. <https://doi.org/10.2478/v10104-012-0011-5>
- Goldenfum, J. A. (Joel A., International Hydropower Association., & UNESCO/IHA Greenhouse Gas Emissions from Freshwater Reservoirs Research Project. (2010). *GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs: derived from: The UNESCO/IHA Greenhouse Gas Emissions from Freshwater Reservoirs Research Project*. International Hydropower Association (IHA).
- Gunkel, G. (2009). Hydropower - A green energy? Tropical reservoirs and greenhouse gas emissions. *Clean - Soil, Air, Water*, 37(9), 726–734.
<https://doi.org/10.1002/clen.200900062>
- Hertwich, E. G. (2013). Addressing biogenic greenhouse gas emissions from hydropower in LCA. *Environmental Science and Technology*, 47(17), 9604–9611.
<https://doi.org/10.1021/es401820p>
- Ion, I. V., & Ene, A. (2021). Evaluation of greenhouse gas emissions from reservoirs: A review. *Sustainability (Switzerland)*, 13(21).
<https://doi.org/10.3390/su132111621>
- IPCC. (2006). Apéndice 3 Emisiones de CH₄ provenientes de tierras inundadas : Base para su futuro desarrollo metodológico Tierras inundadas que permanecen como tales. 1–8.
- Kemenes, A., Forsberg, B. R., & Melack, J. M. (2011). CO₂ emissions from a tropical hydroelectric reservoir (Balbina, Brazil). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(3). <https://doi.org/10.1029/2010JG001465>
- Levasseur, A., Mercier-Blais, S., Prairie, Y. T., Tremblay, A., & Turpin, C. (2021). Improving the accuracy of electricity carbon footprint: Estimation of hydroelectric reservoir greenhouse gas emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110433>
- Palau, A., & Prieto, C. (2009). Hidroelectricidad, Embalses y Cambio Climático. *Ingeniería Del Agua*, 16(4).
- Pinguelli Rosa, L., & Aurélio dos Santos, M. (n.d.). *HYDROELECTRIC RESERVOIRS AND GLOBAL WARMING*.
- Prairie, Y. T., Alm, J., Beaulieu, J., Barros, N., Battin, T., Cole, J., del Giorgio, P., Delsontro, T., Guérin, F., Harby, A., Harrison, J., Mercier-Blais, S., Serça, D., Sobek, S., & Vachon, D. (2018). Greenhouse Gas Emissions from Freshwater Reservoirs: What Does the Atmosphere See? *Ecosystems*, 21(5), 1058–1071.
<https://doi.org/10.1007/s10021-017-0198-9>
- Prairie, Y. T., Mercier-Blais, S., Harrison, J. A., Soued, C., Giorgio, P. del, Harby, A., Alm, J., Chanudet, V., & Nahas, R. (2021). A new modelling framework to assess biogenic GHG

- emissions from reservoirs: The G-res tool. *Environmental Modelling and Software*, 143.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105117>
- Rosa, L. P., Santos, M. A. Dos, Gesteira, C., & Xavier, A. E. (2016). A model for the data extrapolation of greenhouse gas emissions in the Brazilian hydroelectric system. In *Environmental Research Letters* (Vol. 11, Issue 6). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/6/064012>
- Rudd, J. W. M., Harris, R., & Kelly, C. A. (1993). *Are Hydroelectric Reservoirs Significant Sources of Greenhouse Gases?*
<https://www.researchgate.net/publication/283091278>
- Scherer, L., & Pfister, S. (2016). Hydropower's biogenic carbon footprint. *PLoS ONE*, 11(9).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161947>
- Song, C., Gardner, K. H., Klein, S. J. W., Souza, S. P., & Mo, W. (2018). Cradle-to-grave greenhouse gas emissions from dams in the United States of America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 945–956.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.04.014>
- St. Louis, V. L. S., Kelly, C. A., Duchemin, É., Rudd, J. W. M., & Rosenberg, D. M. (2000). *Reservoir Surfaces as Sources of Greenhouse Gases to the Atmosphere: A Global Estimate*.
<https://doi.org/10.1641/0006-3568%282000%29050%5B0766%3ARSASOG>
- Teodoru, C. R., Bastien, J., Bonneville, M. C., Del Giorgio, P. A., Demarty, M., Garneau, M., Hélie, J. F., Pelletier, L., Prairie, Y. T., Roulet, N. T., Strachan, I. B., & Tremblay, A. (2012). The net carbon footprint of a newly created boreal hydroelectric reservoir. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(2). <https://doi.org/10.1029/2011GB004187>
- Tremblay, A., Lambert, M., & Gagnon, L. (2004). Do hydroelectric reservoirs emit greenhouse gases? *Environmental Management*, 33(SUPPL. 1).
<https://doi.org/10.1007/s00267-003-9158-6>
- Tremblay, A., Varfalvy, L., Roehm, C., & Garneau, M. (n.d.). THE ISSUE OF GREENHOUSE GASES FROM HYDROELECTRIC RESERVOIRS: FROM BOREAL TO TROPICAL REGIONS.
- Tremblay, A., Varfalvy, L., Roehm, C., & Garneau, M. (2005). THE ISSUE OF GREENHOUSE GASES FROM HYDROELECTRIC RESERVOIRS: FROM BOREAL TO TROPICAL REGIONS.
- Ubierna, María & Santos, Cristina & Mercier-Blais, Sara. (2022). Water Security and Climate Change: Hydropower Reservoir Greenhouse Gas Emissions. 10.1007/978-981-16-5493-0_5.