



**GASES DE EFECTO INVERNADERO CO₂ y CH₄ EN
EMBALSES DE USO HIDROELECTRICO DE LA REGION
DEL BIOBÍO, CHILE CENTRAL.**

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniero Ambiental

CARLOS FRANCISCO CAMPOS SÁEZ

Docente guía: Dr. Ricardo Figueroa Jara

Concepción (Chile)

2023



“Gases de efecto invernadero CO₂ y CH₄ en embalses de uso hidroeléctrico de la region del Biobío, Chile central”

Profesor Guía: Dr. Ricardo Figueroa Jara

Profesor Co-guía: Dra. Mariela Yévenes Burgos

Profesor Comisión: Dr. Mauricio Aguayo Arias

Profesor Comisión: Dr. Yannay Casas Ledón

Conceptos que se indica en el Título

Aprobado por Unanimidad :	(En Escala de 4,0 a 4,9)
Aprobado con Distinción	(En Escala de 5,0 a 5,6)
Aprobado con Distinción Máxima	(En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, mayo 2023

Índice de contenido

Agradecimientos	VI
Nomenclatura	VII
Resumen ejecutivo	VIII
1. Introducción	1
2. Pregunta de investigación	2
2.1 Objetivos General	2
2.2 Objetivos Específicos	2
3. Marco teórico	3
3.1 Antecedentes generales.....	3
3.2 Generación de GEIS.....	4
3.2.1 Dióxido de Carbono (CO ₂)	5
3.2.2 Metano (CH ₄).....	5
3.3 Emisiones de los embalses	6
3.3.1 Evidencia Internacional	8
3.3.2 Embalses Tropicales	9
3.3.3 Embalses Boreales.....	10
3.3.4 Embalses Templados.....	11
3.4 Esquema de liberación de GEI (CO ₂ , CH ₄)	12
3.5 Metanogénesis	13
3.6 Implicancias en los ecosistemas fluviales.....	14
3.6.1 Cambios morfológicos en los ríos.....	14
3.6.2 Fragmentación de los ríos	14
3.7 Impactos ambientales de centrales hidroeléctricas de tipo embalse.....	15
3.8 Alteración de ciclos Biogeoquímicos en ecosistemas acuáticos.	17
3.8.1 Nutrientes implicados en un ecosistema acuático.....	17
3.8.2 Ciclo del Carbono	18
3.8.3 Ciclo del Nitrógeno	19
3.8.4 Ciclo del Fósforo	20
3.9 Déficit Hídrico y Cambio Climático	20
3.10 Hidroelectricidad en la cuenca del Biobío.....	21
3.10.1 Central Hidroeléctrica Ralco (ER)	22

3.10.2 Central Hidroeléctrica Pangué (EP)	22
3.10.3 Central Hidroeléctrica Angostura (EA)	22
4. Metodología.....	23
4.1 Área de estudio.	23
4.2 Materiales y métodos	25
4.2.2 Análisis de Componentes Principales (ACP).....	29
4.2.3 Recopilación bibliográfica	30
5. Resultados.....	31
5.1 Comportamiento temporal de los GEI	31
5.2. Estadísticos de interés.....	35
5.2.1 Coeficiente de variación	36
5.2.2 Diagrama de cajas o box plot	37
5.2.3 Rangos de metano (nM) y dióxido de carbono (uM)	39
5.2.4 Pruebas de normalidad	40
5.3 Correlaciones.....	41
5.4 Análisis de componentes principales (ACP)	43
5.4.1 Estacionalidad (invierno, primavera, verano)	44
5.4.2 Localidad (ER, EP y EA)	46
5.4.3 Años.....	48
5.5 Recopilación bibliográfica	50
5.5.1 Identificación del problema	50
5.5.2 Medidas de mitigación	51
5.5.3 Factores que inciden en la sustentabilidad de proyectos hidroeléctricos.....	53
5.5.4 Directrices Internacionales.....	53
5.6 Discusión	55
6. Conclusión.....	58
6.1 Recomendaciones futuras.....	60
7. Referencias bibliográficas.....	61
Anexos.....	67

Índice de Tablas

Tabla 1: Factores que determinan las emisiones CH ₄ y CO ₂ en embalses.....	7
Tabla 2: Vías metabólicas de la metanogénesis.....	13
Tabla 3: Impactos en el medio ambiente de centrales hidroeléctricas de tipo embalse.....	16
Tabla 4: Características principales de las estaciones de muestreo.....	24
Tabla 5: Toma de muestras Programa Monitoreo del río (PMBB).....	26
Tabla 6: Promedios estacionalidad para gas CH ₄ , serie 2016-2022.....	35
Tabla 7: Promedios estacionalidad para CO ₂ , serie 2016-2022.....	35
Tabla 8: Desviación estándar para los gases.....	36
Tabla 9: Coeficiente de variación periodos estacionales (invierno, primavera y verano).....	36
Tabla 10: Rangos de CH ₄ estaciones ER, EP y EA en un periodo de 7 años.....	39
Tabla 11: Rangos de CO ₂ estaciones ER, EP y EA en un periodo de 7 años.....	39
Tabla 12: Test de normalidad kolmogorov smirnov, estación de invierno	40
Tabla 13: Test de normalidad kolmogorov smirnov, estación de primavera	40
Tabla 14: Test de normalidad kolmogorov smirnov para la estación de verano	41
Tabla 15: Correlación de spearman periodos estacionales	42
Tabla 16: Componentes principales del conjunto de datos	43
Tabla 17: Test estadístico diferencias entre la estacionalidad de distintos grupos	45
Tabla 18: Pruebas estadísticas realizadas entre grupos asociados a la localidad.....	47
Tabla 19: Test de significancia por grupos (años: 2017, 2018, 2019, 2021 y 2022)	49

Índice de Figuras

Figura 1: Funcionamiento de una central hidroeléctrica de embalse.....	3
Figura 2: Emisiones de CH ₄ acuático.	8
Figura 3: Emisiones a la atmosfera de embalses ubicados en zonas tropicales.....	9
Figura 4: Relación entre las concentraciones de CO ₂ y CH ₄ en embalses de Canadá.	10
Figura 5: Emisiones de GEI en embalses templados y boreales.	12
Figura 6: Ciclo del carbono en un ecosistema acuático	18
Figura 7: Puntos de muestreo en la cuenca hidrográfica del Biobío	23
Figura 8: Esquema resumen metodología objetivo 1	27
Figura 9: Histograma de concentraciones CH ₄ , agosto (2016-2022)	31
Figura 10: Histograma de concentraciones CH ₄ , diciembre (2016-2022)	32
Figura 11: Histograma de concentraciones CH ₄ , marzo (2016-2022).	32
Figura 12: Histograma de concentraciones CO ₂ , agosto (2016-2022).....	33
Figura 13: Histograma de concentraciones CO ₂ , diciembre (2016-2022).	34
Figura 14: Histograma de concentraciones CO ₂ , marzo 2016-2022	34
Figura 15: Diagramas de cajas concentraciones de CH ₄ (nM).	37
Figura 16: Diagrama de cajas concentraciones de CO ₂ (uM)	38
Figura 17: ACP acorde a la estacionalidad.....	45
Figura 18: ACP acorde a la localidad a la que pertenecen las variables	47
Figura 19: ACP según el año al cual pertenecen las variables.....	48

Agradecimientos

A los miembros de mi comisión evaluadora, Dr. Ricardo Figueroa Jara, Dra. Mariela Yévenes Burgos, Dr. Mauricio Aguayo Arias y Dra. Yannay Casas Ledón por sus importantes aportes para el desarrollo de este proyecto de título. A la Dra. Marcela Cornejo, quien nos aportó con el análisis de las muestras y sin su apoyo no hubiera sido posible este trabajo.

Quisiera agradecer al Centro de recursos hídricos para la agricultura y la minería (CRHIAM) por el financiamiento al proyecto de investigación y el conocimiento entregado durante el 5to congreso de estudiantes de pregrado y postgrado.

Agradecer, además, a quienes me cobijaron y nutrieron en este proceso. Miembros y amigos del laboratorio bioindicadores de calidad de agua, depto. de ecosistemas acuáticos. Universidad de Concepción.

A mis padres y familia, quienes me brindaron un hogar al que llegar cuando estuve cansado. Rendir mi homenaje a las almas compañeras que me encontré en el camino, despertaron en mi conocimientos ya olvidados. Conocimientos que provienen de sincronías de la vida.

En último lugar agradecer a dios y la madre tierra por permitirme ser el canal de manifestación de este conocimiento, para que en un futuro las generaciones de aquel entonces puedan utilizar de forma asertiva y consciente el conocimiento sobre el medio ambiente.

Los ríos fueron parte fundamental de este proceso, en particular el río Biobío, quien desde su ancestralidad y entendimiento me otorgo la humilde misión de estudiar sus aguas. Le agradezco infinito, pertenezco a él y me disuelvo en él.

Nomenclatura

ACP	Análisis de componentes principales
COP	Conferencia de las partes
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CP1	Componente principal 1
CP2	Componente principal 2
DGA	Dirección general de aguas
Eawag	Instituto Federal Suizo de Ciencia y Tecnología Acuáticas
EDA	Análisis exploratorio de datos
Eh	Efecto del potencial redox
ERNC	Energías renovables no convencionales
GEI	Gases de efecto invernadero
HSAP	Protocolo de Evaluación de la Sustentabilidad de la Hidroelectricidad
IFC	Estándares de Sustentabilidad de la Corporación Financiera Internacional
IHA-GHG	Guías de Medición de GEI para Embalses de Agua Dulce
INE	Instituto Nacional de estadísticas
INPE	Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales
η_A	Eficiencia de atrape
MO	Materia orgánica
MMA	Ministerio de medio ambiente
MV	Potencial redox
MW	Unidad de potencia equivalente a un millón de vatios
OD	Oxígeno disuelto
ODS	Objetivos de desarrollo sostenible
PPB	Unidad de medida de concentración
PPM	Unidad de medida de concentración
SEN	Sistema eléctrico Nacional
Tg	Unidad de masa equivalente a un billón de gramos
TGR	Embalse tres gargantas
VDR	Volumen anual de descarga del río
WCD	Guías buenas prácticas, Comisión Mundial de Represas

Resumen ejecutivo

La metanogénesis es un proceso biológico producido de forma natural en los ecosistemas por parte de un grupo de bacterias metanogénicas o “metanógenos”, cuyo metabolismo y respiración se da a través de procesos anaeróbicos. Dado su metabolismo, estas producen gas CH₄ y contribuyen de forma directa en las emisiones de GEIS en los ecosistemas acuáticos junto con participar en el equilibrio del ciclo del carbono tanto a nivel local como mundial.

Se identificaron concentraciones de gas CH₄ y CO₂ en embalses de uso hidroeléctrico característicos de un ecosistema templado húmedo. El objetivo central de la investigación es analizar la relación que existe entre las concentraciones de CH₄ y CO₂ presente en las aguas superficiales de tres embalses localizados en el sector alto de la cuenca del río Biobío, además de incluir otras variables ambientales que permitan explicar patrones.

Por su parte se detectaron dinámicas estacionales entre las concentraciones de los gases y parámetros bioquímicos de calidad de agua como: nitrógeno total, nitratos, pH, T° y fosforo. A nivel particular, se observan diferencias significativas entre invierno, primavera y verano ($p=0.021$). En el caso del gas CH₄, los rangos para el invierno oscilan entre (42 ± 355 nM), mientras que la primavera (53 ± 352 nM), para el CO₂, los rangos de invierno son (91 ± 356 uM) y la primavera (84 ± 492). Durante el transcurso del verano se detectaron las mayores concentraciones de ambos gases (53 ± 434 nM; 283 ± 492 uM) respectivamente.

El principal aporte de la investigación hace referencia a la potencialidad que existe en los embalses hidroeléctricos de climas templados, ubicados en el hemisferio sur de ser emisores de GEIS dado las concentraciones identificadas en las aguas superficiales.

Palabras clave: Gases de efecto invernadero, embalse hidroeléctrico, calentamiento global, emisiones difusoras, dióxido de carbono, metano.

1. Introducción

El cambio climático es uno de los retos más importantes que enfrenta hoy la humanidad. Según la CMNUCC (ONU, 1992) este se define como: “El cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante períodos de tiempo comparables”. Los orígenes del cambio climático se hallan en la modificación de componentes minoritarios de la atmósfera y de la superficie del planeta (Fuenzalida, 1989). Por su parte, la atmósfera es de vital importancia para el desarrollo de los seres vivos y en la regulación del clima de la Tierra. Lo anterior es posible gracias a los gases que la componen y a la concentración en la que se encuentran. No obstante, el cambio climático se acentúa por el rápido incremento en las emisiones de GEI (Bolle, 1986) en la atmósfera. Principalmente como resultado de las diferentes actividades antropogénicas, lo cual ha provocado un aumento del efecto invernadero que trae como consecuencia cambios de la temperatura atmosférica y modificaciones de patrones climáticos de la tierra (Torres-Alvarado et al., 2005). De acuerdo con el Plan de adaptación al cambio climático (MMA, 2014) los efectos adversos de este, se describen como amenazas cuyos impactos pueden poner en riesgo el desarrollo de los países y la integridad ecosistémica a nivel mundial. Posicionándose como un gran desafío para quienes están encargados de establecer las políticas públicas. Por ello, toma gran relevancia la evidencia científica disponible (Jin H, 2018; Castro, 2015; Herrera, 2013, entre otros) en cuanto a las emisiones de GEIS generadas en los ecosistemas acuáticos producto de la ejecución de proyectos hidro-energéticos, cuya relación con los efectos del cambio climático podría ser dañina para los ecosistemas fluviales del mundo. Al respecto, no se conocen estudios similares en sistemas de embalses para Chile, por lo cual la presente investigación tiene como finalidad analizar las concentraciones de CH₄ y CO₂ en las aguas superficiales de un ecosistema fluvial, que ha sido modificado mediante la construcción y operación de centrales

hidroeléctricas de tipo embalse, localizadas en el tramo superior del cauce del río Biobío, Chile central.

2. Pregunta de investigación

La recopilación de antecedentes bibliográficos conforme al marco teórico (*cambio climático, emisiones de GEIS, calidad de agua, ecosistemas acuáticos, crisis hídrica y bioindicadores de calidad de agua*), llevo a la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es la relación/es que tienen las concentraciones de GEIS con otras variables indicadoras de calidad de agua, en embalses de uso hidroeléctrico característico de un ecosistema templado?

Para responder a la pregunta de investigación se planteó un objetivo general y 3 objetivos específicos detallados a continuación.

2.1 Objetivos General

Analizar concentraciones disueltas de GEIS en aguas superficiales de los embalses asociados a la producción hidroeléctrica de alto Biobío.

2.2 Objetivos Específicos

- Evaluar las concentraciones de GEI (CO_2 y CH_4) en las aguas superficiales de los embalses de uso hidroeléctrico: Ralco, Pangué y Angostura, región del Biobío, en un periodo de siete años (2016-2022).
- Relacionar las concentraciones de gases efecto invernadero con otras variables ambientales de calidad de agua como: Nitrógeno (total), Fosforo (total), Fosfatos, Nitratos, Nitritos, pH y Temperatura para identificar patrones.
- Recopilar información disponible para proponer medidas de mitigación para disminuir GEIS en embalses de uso hidroeléctrico en cuencas hidrográficas.

3. Marco teórico

3.1 Antecedentes generales

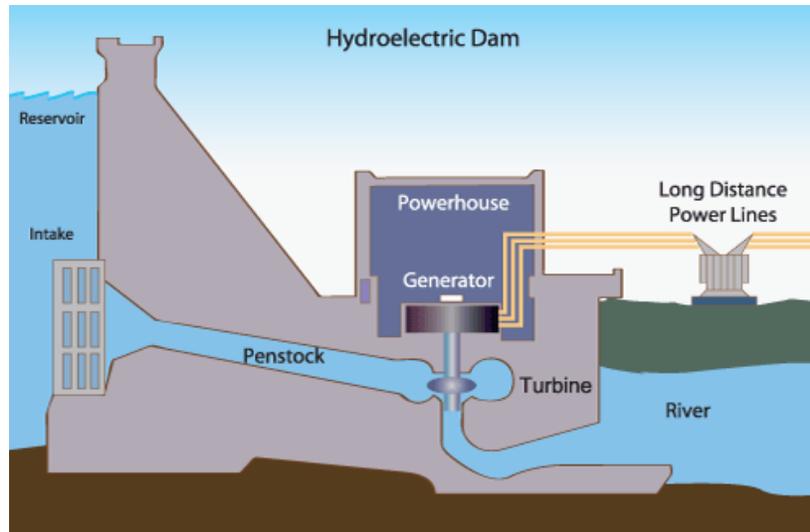


Figura 1: Funcionamiento de una central hidroeléctrica de embalse

Fuente: Arkipplus. <https://arkipplus.com/como-funciona-la-energia-hidroelectrica/> (2023).

Para profundizar en esta problemática es primordial definir que es la energía hidroeléctrica. La energía hidroeléctrica es una fuente de energía eléctrica renovable que deriva de la energía del agua que se mueve desde elevaciones más altas a más bajas (Killingtveit, 2014). Según Sanz (2016) se define como; una instalación cuya misión es convertir la energía potencial y cinética del agua en energía eléctrica disponible. En el caso particular de los embalses de uso hidroeléctrico, Ometto (2013) los detalla cómo; sistemas acuáticos antropogénicos construidos en amplias extensiones geográficas (Figura 1), considerados de gran importancia para la producción de energía, estos se construyen a diferentes escalas, debido principalmente al comportamiento hidrológico de los cursos de agua. Respecto a su funcionamiento, tienen como característica básica la existencia de un embalse en el que se almacena agua y del que se realiza la toma de agua, es decir, son centrales con capacidad de seleccionar el momento del día en el que turbinan sin que se corra el riesgo de perder agua, puesto que esta queda almacenada (Osorio, 2008), esto es, permite regular la cantidad de agua que pasa por las turbinas.

3.2 Generación de GEIS

Los gases dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) han tributado a la retención de calor en nuestra atmósfera desde hace millones de años estimulando la producción y la emisión de estos gases, aumentando así la retención de calor en la atmósfera y dando lugar al conocido “efecto invernadero” (Enrich Prast, 2018). Los gases de efecto invernadero (GEI) son los componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes (Ballesteros, 2007), que de acuerdo con Pérez (2011), los principales GEI en la atmosfera son:

- El vapor de agua (H_2O)
- El dióxido de carbono (CO_2)
- El óxido nitroso (N_2O)
- El metano (CH_4)
- El ozono (O_3)

Desde la revolución industrial, ciertas actividades humanas han alterado el balance de nutrientes en los ecosistemas naturales. Globalmente, la causa principal del incremento en las emisiones de éstos GEI son las actividades relacionadas con el sector energético que representan 26% de las emisiones, seguido del sector industrial (19%), forestal (17%), agrícola (14%), residencial y comercial (8%) y de manejo de desechos (3%) (IPCC, 2013). Existe evidencia científica suficiente para indicar que los embalses de uso hidroeléctrico son acumuladores de carbono, los cuales producen cantidades significativas de GEIS, que podrían alterar el gradiente de nutrientes natural de los ecosistemas y el balance de carbono a nivel mundial. No obstante, a pesar de sus importantes emisiones de GEI a la atmósfera, la hidroenergía es considerada por muchos una fuente de energía limpia cuando se le compara con la electricidad producida por la quema de combustibles fósiles (carbón, gas, petróleo), que agravan el problema del calentamiento global (Duque-Grisales, 2014). Para efectos de esta investigación solo se consideran los gases CO_2 y CH_4 .

3.2.1 Dióxido de Carbono (CO₂)

El CO₂ es el gas resultante de procesos tanto geoquímicos como biológicos, y cuya presencia en la atmósfera es fundamental en la regulación de la temperatura del planeta debido a sus propiedades como gas de efecto invernadero (Jaramillo, 2004). Diversos estudios señalan que el CO₂ es uno de los GEI más importantes y que su emisión a la atmósfera por el cambio en el uso del suelo, ocupa el segundo lugar a nivel mundial con una fuerte contribución de las zonas tropicales (Schneider 1989; Houghton y Woodwell, 1989; Lashof y Ahuja 1990; Dixon et al., 1994; Masera 1995a; Schimel 1995). Así lo comprueba el Sexto Informe de Evaluación del IPCC (2021), donde se indica que; la concentración de CO₂ en la atmósfera mundial ha pasado de un valor preindustrial de aproximadamente 280 ppm a 409,9 ppm en 2019.

3.2.2 Metano (CH₄)

El CH₄ es el hidrocarburo más sencillo, cada uno de los átomos de hidrogeno está unido al carbono por medio de un enlace covalente, es una sustancia no polar que se presenta en forma de gas en condiciones estándar de temperatura y presión (0° C y 100 kPa) (García, 2014). Es la forma más reducida del carbono y tiene una importante función en varios procesos geoquímicos en el planeta tierra como por ejemplo en el ciclo biogeoquímico del carbono (Schoell, 1988). El gas se produce por la fermentación de MO en condiciones anaeróbicas, tal como ocurre, por ejemplo, en los humedales, los sedimentos lacustres y en el aparato digestivo de los rumiantes y las termitas (Jaramillo, 2004). Las fuentes de CH₄ son de diversos tipos, siendo las principales: la termogénica, pirogénica y biogénica (Houweling, 2000), que además pueden darse como resultado de actividades humanas o de procesos naturales. Lyu (2018), enfatiza que el gas CH₄ es el más importante GEI después del CO₂, y su concentración atmosférica se ha duplicado con creces desde el inicio de la era industrial. La concentración de CH₄ en la atmósfera mundial ha pasado de un valor de unas 715 ppb en el año 1750, y su valor en 2019 era de 1866,3 ppb, representando un aumento del 156% por encima de los niveles de la era preindustrial que inicio en el año 1750 (Masson-Delmotte, 2021).

El IPCC (2013) señala que el gas CH₄ presenta un potencial de calentamiento global 28 veces mayor que el CO₂ en un escenario proyectado a 100 años y su tiempo de vida en la atmósfera es de 9 a 15 años, siendo su tasa anual de crecimiento de 7 %. Posicionándose como uno de los factores principales en el aceleramiento del cambio climático. Aproximadamente una quinta parte del aumento en el forzamiento radiativo de GEIS vinculados a los humanos desde 1750 se debe al CH₄ (Nisbet, 2014). Por su parte, el forzamiento radiativo se entiende cómo; aquel cambio en el balance de la radiación solar que entra y la radiación infrarroja que sale de la tierra (Cuatecontzi, 2004).

3.3 Emisiones de los embalses

Teniendo en cuenta los diferentes estudios desarrollados sobre emisiones atmosféricas producidas por reservorios, se ha señalado que las centrales hidroeléctricas de tipo embalse emiten GEIS a la atmósfera, principalmente CO₂ y, sobre todo CH₄, atribuible a dos procesos particulares: La primera durante la etapa de construcción del embalse en el cual se emplean combustibles fósiles en la maquinaria y la extracción de los materiales de construcción de la presa y cuarto de máquinas (Demarty, 2011). La segunda después de la inundación en la etapa de operación del embalse, en el cual se da lugar a la descomposición de la materia orgánica sumergida dentro de los reservorios de agua (Pinguelli Rosa, 1995). Las emisiones pueden ser significativas dependiendo de características como la edad y la profundidad del embalse, la temperatura del agua, el área inundada, el uso del suelo antes de ser inundado el embalse, las prácticas de manejo, entre otras (Rengifo, 2011). Vale decir, factores geográficos, geofísicos y bioquímicos (Duchemin, 2000). Las investigaciones sugieren que los principales factores que determinan la magnitud de las emisiones de GEIS en los embalses de uso hidroeléctrico (Tabla 1) se asocian a variables físicas, geográficas y biogeoquímicas.

Tabla 1: Factores que determinan las emisiones CH₄ y CO₂ en embalses

Factores	Variable	Características
Factores Geográficos	Altitud y Latitud	- Hace referencia a la ubicación del embalse respecto al nivel del mar (m.s.n.m). - Clasificación de los embalses de acuerdo al tipo de clima que pose, en base a su proyección sobre la línea del ecuador (boreal, tropical, templado, entre otros).
Factores Bioquímicos	Reacciones de oxido-reducción	- Disponibilidad e intercambio de nutrientes por medio de reacciones químicas de oxido-reducción y gradientes de energía en los diferentes compartimientos del cuerpo de agua (Epilimnion, Metalimnion e Hipolimnion).
Factores Biológicos	Interacciones biológicas	- Respiración anaeróbica y aeróbica de microorganismos (bacterias metanogénicas) e interacciones biológicas con la biota acuática, zooplancton y fitoplancton.
Factores Físicos	Dimensiones del embalse	- Ancho, profundidad, largo, cantidad de agua embalsada, años en operación.

Fuente: Elaboración propia por medio de la bibliografía.

Según el IPCC (2006), las emisiones de CH₄ dentro de los ecosistemas acuáticos se pueden generar de tres formas:

- Emisiones difusoras: Generada por la difusión molecular por medio de la interfaz agua aire.
- Emisiones por burbujas: Son emisiones de gas generadas por la interfaz agua-sedimento, proveniente del sedimento a través de la columna de agua, por medio de burbujas.
- Emisiones de desgasificación: Se presentan por el cambio repentino en la presión hidrostática de los embalses, así como de la superficie creciente de intercambio aire/agua después de que el agua de los reservorios fluye a través de una turbina y/o una vía de desagüe.

3.3.1 Evidencia Internacional

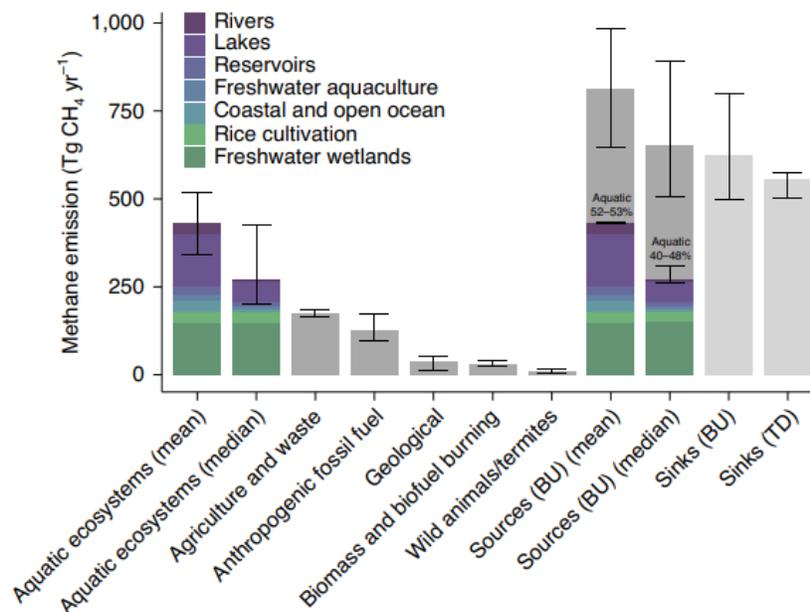


Figura 2: Emisiones de CH₄ acuático.

Fuente: La mitad de las emisiones globales de CH₄ provienen de fuentes de ecosistemas acuáticos altamente variables. Rosentreter (2021).

Rosentreter (2021) elaboró una base de datos que contiene flujos de difusión y ebullición de CH₄ de 15 ecosistemas acuáticos diferentes y los compararon con flujos de CH₄ de otras actividades productivas como: la agricultura, emisiones asociadas a combustibles fósiles, entre otras. El equipo de trabajo concluyó que los ecosistemas acuáticos contribuyen (mediana) en un 41% o (\bar{x}) 53% de las emisiones globales totales de CH₄ de origen antropogénico y fuentes naturales (Figura 2). De manera puntual, señalan que los ecosistemas que más emiten CH₄ al medio ambiente son: humedales de agua dulce, lagos/ cultivos de arroz e hidroeléctricas de tipo embalse respectivamente. Coherente con la presente investigación los embalses de uso hidroeléctrico emiten entre 9 y 28 Tg CH₄ año⁻¹, clasificándose como uno de los ecosistemas no naturales que emiten más CH₄ al año por unidad de masa. Contrariamente a lo que se podría pensar, la base de datos sigue incompleta para llevar a cabo un estudio integrativo de las dinámicas globales del CH₄ (Saunois, 2016).

3.3.2 Embalses Tropicales

Se ha demostrado que las emisiones de CH₄ de los embalses construidos en zonas más bien tropicales, pueden comprender una fracción significativa del metano generado antropogénicamente (Fearnside, 2004).

Se destaca que los flujos totales de CO₂ y CH₄ de los ecosistemas acuáticos emplazados en zonas tropicales probablemente aumenten debido a la expansión y/o transformación del hábitat (Rosentreter, 2021). Así lo corrobora Lima (2008), quien junto a sus compañeros del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE) de Brasil, calcularon que las grandes represas del mundo (Figura 3) emiten anualmente 104 millones de toneladas métricas de CH₄ desde la superficie del embalse, las turbinas, los vertederos y los ríos corriente abajo.

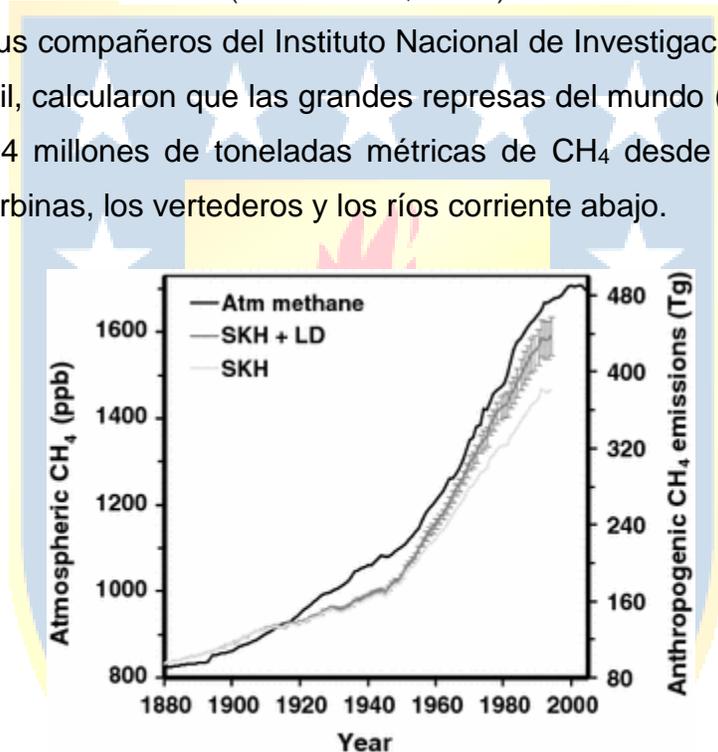


Figura 3: Emisiones a la atmosfera de embalses ubicados en zonas tropicales

Fuente: Las emisiones de CH₄ de las grandes represas como recursos de energía renovable: la perspectiva de una nación en desarrollo. Lima (2008).

Por otra parte, los investigadores Abril et al., (2005), determinó en su investigación las concentraciones de CO₂ y CH₄ de un embalse tropical construido en en el río Sinnamary, Guiana francesa, reportando emisiones elevadas de CO₂ y CH₄ (43 – 674 μ mol L⁻¹ y 0 – 293 μ mol L⁻¹, respectivamente) en hasta 40 km aguas abajo del dique de la represa, tras su operación luego de 10 años.

3.3.3 Embalses Boreales

Rust et al., (2022), evaluó los patrones espaciales y temporales de las concentraciones de CO_2 y CH_4 en el complejo de la Romaine, compuesto por tres embalses consecutivos a lo largo del río la Romaine en Canadá. Sus resultados (Figura 4) muestran concentraciones elevadas de CH_4 y especialmente de CO_2 en las aguas superficiales de los tres embalses, con una fuerte estacionalidad y una gran heterogeneidad espacial dentro de los embalses.

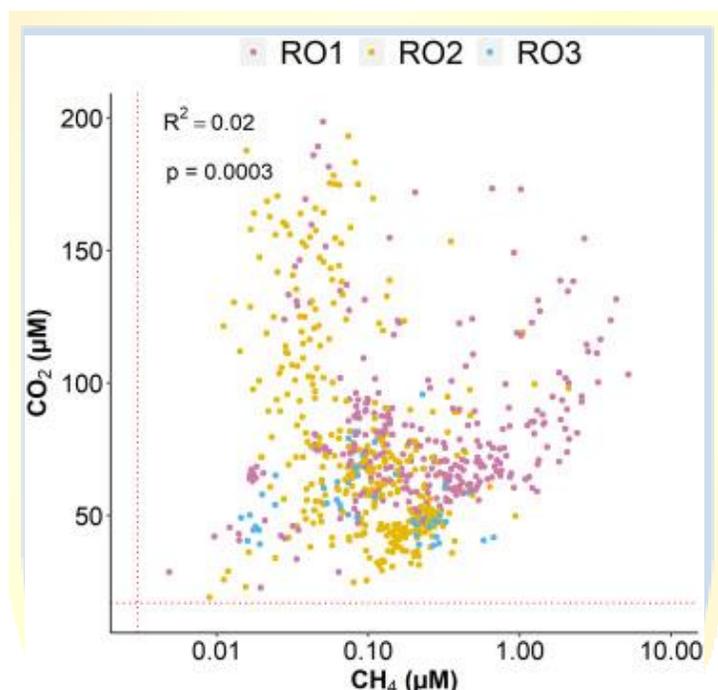


Figura 4: Relación entre las concentraciones de CO_2 y CH_4 en embalses de Canadá.
Fuente: Modelación de la variabilidad espaciotemporal de concentraciones de GEI. Rust (2022).

Encontraron una clara variación estacional en las concentraciones de CO_2 y CH_4 en los embalses estudiados, donde se observaron diferencias significativas en sus concentraciones ($p < 0.001$). Dentro de la estacionalidad a la cual hacen mención, se destaca que las concentraciones de CO_2 son más altas durante la primavera ($103.000 \pm 4.4000 \text{ nmol/l}$). Por contraparte, las emisiones de gas CH_4 son más altas durante el verano, $400 \pm 600 \text{ nmol/l}$.

3.3.4 Embalses Templados

Investigaciones del Instituto nacional Federal Suizo de Ciencia y Tecnología acuática (DelSontro, 2010), registraron altas emisiones de CH₄ en un pequeño embalse hidroeléctrico en Suiza. Descubrieron que la emisión de CH₄ del lago Wohlen fue en promedio >150 mg CH₄ m⁻² día⁻¹, que es el más alto jamás documentado para un reservorio de latitudes medias. Este análisis reveló una significativa correlación entre la temperatura del lago y las emisiones de CH₄.

Dos años más tarde, investigaciones de Diem et al., (2010), midieron las concentraciones de CH₄ disuelto en el agua de entrada y salida de seis embalses alpinos, sub alpinos y de tierras bajas construidos en Suiza (Lake Wohlen, Lake Luzzone, Lake Oberaar). Las muestras se tomaron a diferentes profundidades para cada depósito normalmente por debajo de la superficie, por encima del sedimento y cada 10 o 20 m entre ambas. El estudio reveló que todos los reservorios fueron emisores de CO₂ Y CH₄ con un promedio de 970 ± 340 mg m⁻² día⁻¹ y 0.20 ± 0.15 mg m⁻² día⁻¹, respectivamente.

En última instancia, el embalse de las Tres Gargantas (TGR), uno de los embalses más grandes del mundo ubicado en el río Yangtsé- China ha producido a un largo debate sobre sus emisiones de CH₄. Liu et al., (2021), observó junto con su equipo de investigadores grandes variaciones espaciotemporales del CH₄ disuelto (media ± DE: 0.26 ± 0.19 μM en verano y 0.24 ± 0.17 μM en invierno). Concluyeron que las concentraciones más altas con variaciones más fuertes se ubicaron aguas arriba de la sección más cercana a la presa de las Tres Gargantas, influenciada principalmente por la descarga de aguas residuales, la sedimentación, las condiciones topográficas, los afluentes y las variaciones espaciales y estacionales de la hidrodinámica. La información disponible reveló que existe una estacionalidad característica en los ciclos de CH₄ y CO₂ acorde a las características geográficas de cada territorio, vale decir, el tipo de clima que posee y su proyección sobre la línea del ecuador.

3.4 Esquema de liberación de GEI (CO_2 , CH_4)

La Figura 5, muestra un esquema que explica de forma gráfica la liberación de GEIS en una Hidroeléctrica de tipo embalse, correspondiente a un embalse templado viejo, con más de 10 años desde su puesta en operación (Palau, 2008).

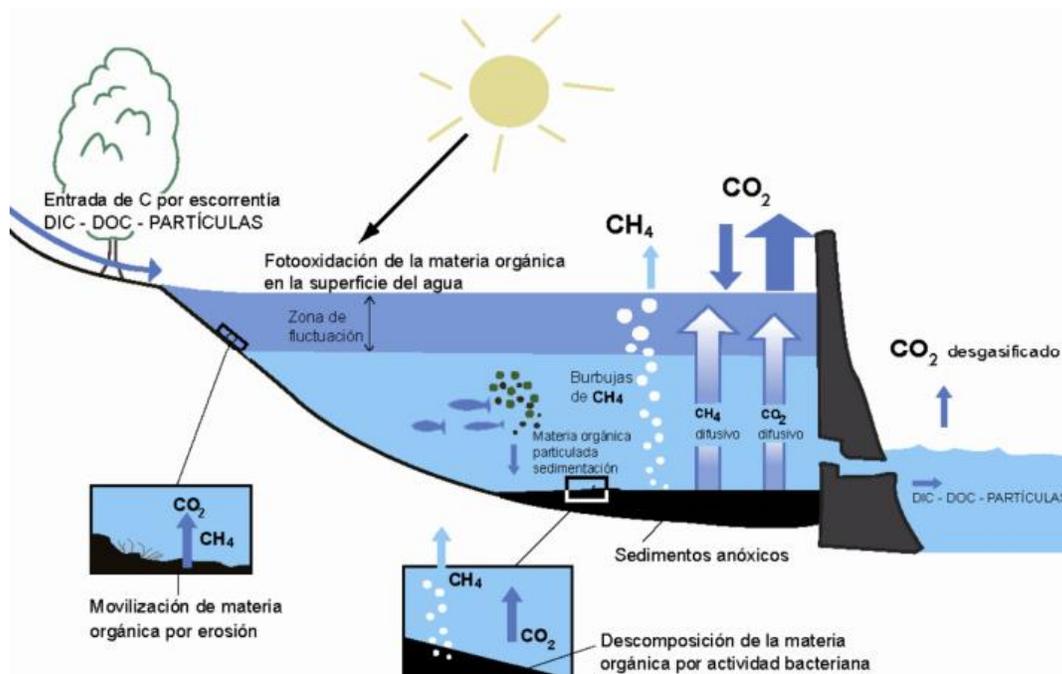


Figura 5: Emisiones de GEI en embalses templados y boreales.

Fuente: Embalses y Cambio Climático. Palau (2008).

De acuerdo con Ribera et al., (2018), el CH_4 se concentra en la parte inferior del embalse (sedimentos anóxicos) y sale por las compuertas de la represa fluyendo libremente con el agua retenida. Las burbujas suben desde el fondo del embalse y la desgasificación del agua es liberada a través de turbinas y vertederos. Por otra parte, también señala que, los GEI disueltos en el embalse que no son liberados en el vertedero o en la turbina pueden ser emitidos a la atmósfera corriente abajo. A pesar de que el máximo de las emisiones de GEI se reportan en los primeros años de funcionamiento de las represas, hay investigaciones (Parekh, 2011) que revelan que las emisiones son todavía altas 10 años después del embalsado (Anexo 1), en particular para embalses subtropicales ubicados en la provincia de Laos, sudeste asiático (Nam Ngum y Nam Leuk).

3.5 Metanogénesis

El mecanismo por el cual estos gases de efecto invernadero (GEI) se liberan a la atmósfera está mediado principalmente por microorganismos metanogénicos (bacterias) que cumplen un rol fundamental y determinante en los ciclos biogeoquímicos. La metanogénesis es la última etapa de la degradación de la materia orgánica en los sistemas acuáticos y terrestres, y es parte fundamental en los flujos de carbono en condiciones anaeróbicas. Según Torres-Alvarado et al., 2005, el proceso de metanogénesis es la formación de CH₄ generada por bacterias procariotas denominadas arqueas metanogénicas estrictas y ocurre principalmente en sedimentos sin presencia de oxígeno con valores de Eh iguales o inferiores a -200 mV, además se indica que las principales fuentes de estos sedimentos de carbono son:

- La vegetación alóctona y autóctona.
- Los suelos inundados.
- La materia orgánica transportada por el río.
- El plancton y las plantas acuáticas que crecen y mueren en el embalse. producto de procesos de descomposición como la eutrofización.

Acorde con Ramirez (2017), la fisiología de estos organismos está clasificada en 3 rutas metabólicas principales (Tabla 2), que dependen en estricto rigor del sustrato disponible en el medio ambiente que las rodea y las características del ecosistema objeto de estudio.

Tabla 2: Vías metabólicas de la metanogénesis.

Vía metabólica	Balance Químico
Hidrogenotrófica	$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
Acetoclástica	$\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CH}_4$
Metilotrófica	$\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ $4\text{CH}_3\text{NH}_3 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 4\text{NH}_4^+$

Fuente: Metanogénesis y metano-oxidación en humedales. Alvarado (2005).

3.6 Implicancias en los ecosistemas fluviales

Los ríos se caracterizan por el movimiento horizontal de sus aguas e interacción con su cuenca hidrográfica, donde se produce la contribución permanente de material alóctono, principalmente de origen orgánico: hojas, frutos e insectos acuáticos (Miranda, 2022).

3.6.1 Cambios morfológicos en los ríos

Los cambios morfológicos en los ríos son un proceso natural de los sistemas fluviales (Camporeale et al., 2005;) y son causados por procesos físicos que intervienen en el flujo de caudal, la erosión y el transporte de sedimento. En cuanto a la erosión y sedimento, los cambios en el río pueden asociarse al efecto del cambio climático (Shugar, 2017), que altera el volumen de las aguas superficiales y la composición del sedimento, además de producir variaciones en el régimen hidrológico (Schumm, 1968). Por otro lado, la producción de material autóctono en estos ecosistemas se encuentra asociada a la disponibilidad de luz y consecuentemente a la productividad primaria (Miranda, 2022).

3.6.2 Fragmentación de los ríos

Cualquier intervención antrópica sobre una cuenca genera un impacto y puede acelerar los cambios naturales de los procesos físicos, como es el caso de las construcciones de centrales hidroeléctricas (Ortega, 2014; Surian, 2003). Al fragmentar el río, se acumula la MO y se desencadenan procesos biológicos como la eutrofización. Según Pozo et al., (2011), la eutrofización de lagos y embalses, sería un proceso de degradación ambiental producida por la influencia humana y por los agentes de la misma naturaleza; consistente en el aumento de la concentración de nutrientes en los lagos, que da lugar a un crecimiento exagerado de algas y malezas acuáticas en las aguas que incide directamente en el deterioro continuo de los ecosistemas acuáticos. Con el quiebre del estado de equilibrio, debido a la eutrofización, el ecosistema pasa a producir más MO de la que es capaz de consumir y descomponer (Esteves, 2011), cuyas consecuencias documentadas producen una serie de impactos ambientales en los ecosistemas acuáticos.

3.7 Impactos ambientales de centrales hidroeléctricas de tipo embalse

El represamiento de los ríos representa uno de los cambios de hábitat más drásticos (Agostinho et al., 2008; Agostinho et al., 2016), ya que modifica la dinámica natural, hidrológica, las variables limnológicas, los patrones de productividad biológica y la distribución de organismos en el espacio y tiempo (Nilsson et al., 2005).

El resultado de un hidro-embalse es interrumpir el cauce natural del río con una estructura construida para tal fin, por lo que el río forma un lago artificial, incrementando su nivel de agua e inundando los terrenos de las riberas adyacentes según las características topográficas de la cuenca. Es justo por la inundación de amplias zonas geográficas, que los embalses producen efectos perjudiciales con relación a la producción de GEI, pues aminoran la absorción del CO₂ y paralelamente producen gas CH₄.

3.7.1 Estratificación térmica e hídrica

La construcción de un embalse implica un cambio de un ecosistema terrestre a uno acuático, y al mismo tiempo, el cambio de un ecosistema lótico a uno léntico (Roldán y Ramírez, 2008), produciéndose la estratificación del cuerpo de agua. La estratificación está constituida básicamente por el acomodamiento de capas de fluido, a lo largo de la dirección vertical, como consecuencia de gradientes de densidad. Estos gradientes, a su vez, son provocados por gradientes de temperatura, de concentración de sólidos disueltos y de sólidos en suspensión. El principal proceso generador del calentamiento térmico es la radiación solar que alcanza la superficie del agua. Como consecuencia, la duración y el período de la estratificación dependen de manera directa de las condiciones climáticas (Porto et al., 1991). Los impactos originados por el embalsamiento deben ser examinados estimando la respuesta del ecosistema durante las fases de construcción del proyecto y de operación del embalse. Una lista de posibles impactos ambientales en las diferentes fases del proyecto se reúne en la tabla 3 (Guevara, 2000).

Tabla 3: Impactos en el medio ambiente de centrales hidroeléctricas de tipo embalse.

Etapa del proyecto	Impactos ambientales
Etapa de construcción	<ul style="list-style-type: none"> - Desecho de sedimentos provenientes de la construcción de las obras en la corriente natural. - Descarga de pesticidas, desechos orgánicos o petroquímicos y otros elementos contaminantes. - Contaminación del aire con partículas sólidas en suspensión. - Aumento del ruido como consecuencia de la utilización de maquinaria y de las diversas operaciones necesarias para la construcción de las obras. - Inestabilidad de taludes por explotación de canteras. - Alteraciones en la morfología del cauce, en la red de drenaje y en el paisaje. - Alteraciones en la flora y la fauna por las desviaciones del cauce. - Alteraciones sobre las condiciones de vida humana al presentarse presión sobre el uso de los servicios públicos y en general sobre la población tradicionalmente establecida. - Introducción de vectores de enfermedades.
Etapa de operación	<p><u>Zona inundada:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Impacto en los usos del suelo por inundaciones del terreno. - Aporte de residuos al embalse por actividades recreativas. - Contaminación del aire por el tráfico inducido. - Descomposición orgánica en el embalse. - Eutrofización: Deficiencias en la cantidad de oxígeno disuelto. - Cambio de ambiente de río a lago y posible reducción de la diversidad de especies. - Sedimentación, disminuyendo el volumen útil y ocasionando la posible obstrucción de tomas y descargas de agua. - Cambio en el paisaje como consecuencia de la desaparición de algunos de sus elementos característicos. - Inestabilidad de taludes causada por el oleaje y por la fluctuación de niveles del agua. Alteraciones sobre el nivel freático. - Alteraciones de la fauna y de la vegetación por modificaciones en su hábitat natural. - Erosión de las laderas del embalse por la acción del oleaje. - Evaporación de embalses e incremento en la humedad atmosférica. - Efecto del remanso causando, por ejemplo, sedimentación en tributarios. <p><u>Estratificación de temperaturas en el embalse</u></p>
	<p><u>Aguas abajo del embalse</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Erosión en el cauce por la retención de sedimentos aguas arriba. - Descenso de la fertilidad de los suelos al quedar desprovistos de la aportación de limo. - Impacto sobre la biota, debido a la variación en la calidad del agua. - Parque de estacionamiento y mantenimiento de la maquinaria pesada - Posible eliminación de nutrientes en el contenido de agua, con efecto sobre los agro-ecosistemas. - Impacto sobre los peces, los cultivos, etc. debido al cambio de temperatura de las aguas. - Descarga de agua con temperaturas inadecuadas para los usos aguas abajo. - Control de contaminaciones al regular el caudal en épocas de estiajes.
Etapa de mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Derrame de aceites y grasas que puedan contaminar la calidad del agua.

Fuente: Elaboración propia.

3.8 Alteración de ciclos Biogeoquímicos en ecosistemas acuáticos.

En los ecosistemas acuáticos la materia solo está disponible en cantidades limitadas, por lo que dependen del reciclado de los elementos químicos esenciales (C, H, O, N, P, S). Los ciclos biogeoquímicos describen el movimiento de los elementos a través de los componentes del ecosistema. Permiten incorporar las conexiones con el suelo, biosfera, la atmósfera y la hidrosfera, así como las interacciones entre todos estos elementos (Esteve, 2013). Entre ellos se encuentran; el ciclo del carbono, del azufre, del agua, del nitrógeno, del fósforo y del potasio. Se refieren al movimiento y la conversión de biomasa por medio de actividades bioquímicas, catalizadas inicialmente por plantas acuáticas, detritívoros y microorganismos descomponedores, cuyo objetivo es hacer circular los nutrientes esenciales por rutas entre la fracción biótica y abiótica del ecosistema. La relevancia de los ciclos está en el gran volumen de materia y energía implicada en sus procesos de ciclado y el papel clave de estos elementos en la formación y mantenimiento de la biosfera. Las actividades humanas y el cambio global han modificado los ciclos biogeoquímicos y, por tanto, el funcionamiento de los ecosistemas (Enrich-Prast, 2018).

La investigación basada en enfoques biogeoquímicos aporta información valiosa para estudios de otras disciplinas (ej. Física, Ecología o las Ingenierías) y elementos para el manejo sustentable de los recursos (Espinoza, 2015).

3.8.1 Nutrientes implicados en un ecosistema acuático

Los nutrientes son elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo de las algas, y de las plantas presentes en los cuerpos de agua. Si bien existen una amplia variedad de nutrientes, en general se considera a aquellos compuestos de Nitrógeno (N) y de Fósforo (P) y Carbono (C) como los más importantes, siendo también representativos de las condiciones de calidad de los ecosistemas acuáticos (Lagomarsino, 2019).

3.8.2 Ciclo del Carbono

La participación de los embalses en el cambio climático es a través del ciclo biogeoquímico del carbono, con cuatro compartimentos: Atmosfera, agua, sedimentos y seres vivos y dos interfases implicadas: Agua-atmosfera y agua-sedimento (Prieto, 2009).

El carbono (C) se puede encontrar formando parte de la materia inorgánica (en forma de carbonatos o bicarbonatos) o como componente de compuestos producidos por el metabolismo de los organismos (MO). De hecho, el C es el constituyente esencial de la biomasa de todos los organismos vivos conocidos, ya sea en forma de compuestos estructurales o como sustratos de almacenamiento de energía, puesto que los organismos obtienen su energía vital rompiendo los enlaces químicos de los compuestos orgánicos (Enrich-Prast, 2018). Otro componente natural del ciclo del carbono lo constituye el CH_4 y está estrechamente relacionado con la metanogénesis, dado que esta última ocurre en la fase anóxica del ciclo del (C). Según lo plantea Palau et al., (2010), el CO_2 está asociado a las actividades de fotosíntesis, respiración aeróbica, anaeróbica y junto con el calcio, está integrado en el sistema carbónico-carbonatos, que juega un papel clave en la estabilización del pH del agua en los ecosistemas acuáticos epicontinentales. La figura 6 representa las interacciones de (C) y CH_4 a nivel bioquímico en un ecosistema acuático.

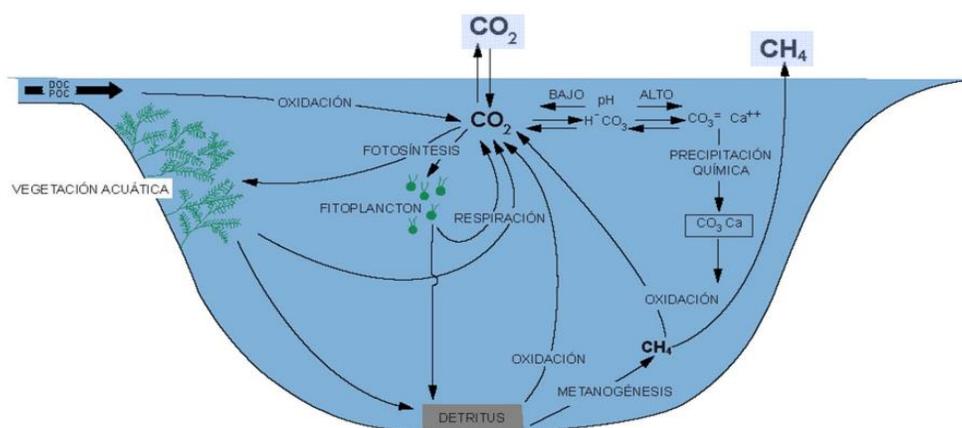


Figura 6: Ciclo del carbono en un ecosistema acuático.

Fuente: Embalses y Cambio Climático. Palau (2008)

De acuerdo con Palau et al., (2008), en los ecosistemas acuáticos, las formas químicas más importantes para el ciclo del (C) son:

- El dióxido de carbono (CO_2)
- El metano (CH_4)
- El sistema carbónico - carbonatos ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$).

Donde señala que, además de la fotosíntesis y la respiración, hay que tener en cuenta la precipitación o solubilización de carbonatos y su capacidad potencial de producción de CH_4 a partir de la oxidación anaeróbica de MO.

3.8.3 Ciclo del Nitrógeno

El ciclo del nitrógeno describe la transformación de gases de nitrógeno y otros compuestos nitrogenados en el medio ambiente, esto consiste principalmente en procesos dirigidos por microorganismos que incluyen la nitrificación (oxidación aeróbica de amonio y oxidación de nitrito), desnitrificación, oxidación anaeróbica de amonios (anammox) y la fijación del nitrógeno (Galván, 2014). Se trata de un proceso aeróbico de dos pasos que está mediado por procesos biológicos; el primer paso se centra en la oxidación del amoníaco a nitritos y posteriormente, los nitritos se oxidan a nitrato (Caffrey, 2007). También se debe tener en cuenta que la contaminación de compuestos nitrogenados como nitratos (NO_3^-), amonios y nitritos (NO_2^-), estos últimos en bajas concentraciones en aguas superficiales es de gran preocupación, ya que puede tener efectos negativos sobre el abastecimiento de agua y sobre los ecosistemas de agua dulce y costeros (Galván, 2014). El amoníaco y el nitrito pueden ser tóxicos para la vida acuática, mientras que los nitratos pueden estar asociados con la eutrofización de los cuerpos de agua (Gregory SP, 2012) cuyos desequilibrios en los compartimientos ambientales afectan directamente a la red trófica.

3.8.4 Ciclo del Fósforo

En la naturaleza, a diferencia del carbono (C) y del nitrógeno (N), los compuestos de fósforo son poco abundantes, y, por lo tanto, es comúnmente considerado un nutriente limitante. En los ecosistemas acuáticos el fósforo se puede encontrar en forma disuelta como fosfato (PO_4^{3-}), como polifosfatos o formando parte de moléculas orgánicas (Lagomarsino, 2019). También se lo puede encontrar en forma de partículas, formando parte de los microorganismos (bacterias, algas, zooplancton), de detritos orgánicos, o formando parte de partículas de naturaleza inorgánica como los carbonatos, y/o adsorbido a partículas de arcillas (Lagomarsino, 2019).

3.9 Déficit Hídrico y Cambio Climático

En el contexto de la COP 25, se elaboró un texto desde el MMA (Rojas, 2019), en el cual se reveló que, la zona centro-sur de Chile lleva una década con déficit de precipitaciones de entre 25% y 30%, lo que la convierte en la década más seca desde que existe registro. Trabajos de científicos han demostrado que una parte de esta sequía meteorológica se debe a la acción humana por medio del cambio climático global. La sequía, sumada al aumento de las temperaturas, ha impactado con fuerza el régimen de caudales, cuyo déficit varía entre 70% en los ríos de las regiones de Coquimbo y Valparaíso, a valores cercanos al 25% hacia el sur durante el período 2010-2014. En relación con las precipitaciones y los caudales, la evidencia científica sugiere que la disminución en los caudales de los ríos se vincula directamente con el OD y la temperatura. Muñoz (2015), obtuvo en su investigación relaciones significativas ($p < 0.05$) entre las varianzas y promedios del oxígeno disuelto (OD) con la lluvia acumulada. Concluyó que el OD está relacionado con la temperatura y que las precipitaciones pluviales afectaron de manera positiva la concentración de OD en el río Zahuapan, México, favoreciendo un entorno anóxico para el desarrollo de bacterias metanógenas. Así lo menciona Zhu (2020) y Schulz (1997), donde indican que, como consecuencia del calentamiento global, se prevé un aumento de las emisiones de CH_4 en todos los biomas y latitudes debido a la mayor actividad de las bacterias metanogénicas a temperaturas elevadas.

3.10 Hidroelectricidad en la cuenca del Biobío

Desde un punto de vista histórico, la energía hidráulica en nuestro país es una de las principales fuentes de abastecimiento energético. El total de capacidad instalada al 2016 se categoriza en un 58% de termoelectricidad, 28% de hidroelectricidad convencional y 14% de ERNC (Energía, 2016). A diciembre de 2019 existen 6.679 MW de capacidad hidroeléctrica instalada. Por otro lado, acorde al estudio de cuencas del ministerio de energía, Chile tiene un potencial hidroeléctrico de 15.938 MW, concentrando el mayor potencial en la cuenca del Biobío con un 18%, Baker con un 12% y Palena con un 11% (Energía, Estudio de cuencas, 2016). De acuerdo con el Instituto nacional de estadísticas (INE, 2022), la región del Biobío contribuyó con el 15,1% de la energía generada en el país, cifra que ascendió en 0,9 puntos porcentuales respecto a marzo de 2021. Al analizar por participación, la matriz eléctrica de la región durante el mes de análisis fue la siguiente: hidráulica (42,0%), térmica (47,2%) y otras fuentes* (10,7%). Por su parte, la cuenca hidrográfica del río Biobío representa a nivel nacional, la base natural de uno de los más importantes centros de desarrollo económico del país, área metropolitana del Gran Concepción. Conforme a (Parra, 2013), los sectores productivos más relevantes y dinámicos de la region corresponden a:

- Sector forestal.
- Sector agropecuario (localizado principalmente en las provincias de Ñuble y Biobío).
- Sector industrial (industrias de la celulosa y el papel, industrias metalúrgicas, químicas, refinería de petróleo, industria de la curtiembre y textiles).
- Sector hidroeléctrico (constituye la principal fuente de suministro de energía eléctrica a nivel nacional).

Desde donde se provee energía a través del SEN a las diversas actividades que lo requieran. Es así como, las principales centrales hidroeléctricas se encuentran ubicadas en la zona alta de la cuenca hidrográfica y corresponden a Ralco, Pangué y Angostura.

3.10.1 Central Hidroeléctrica Ralco (ER)

La central Ralco (690 MW) es la principal central hidroeléctrica de Chile y entró en operaciones en 2004, luego de 6 años de construcción. El embalse tiene en la actualidad una capacidad de 1.222 millones m³ que cubren 3.467 ha. La potencia instalada corresponde a dos turbinas que pueden generar 390 y 300 MW respectivamente (Höhl, 2018). Con esto es la planta de producción energética más grande del país (Bauer, 2009).

El embalse Ralco nace en la cordillera del norte de la región de la Araucanía, para abrirse hacia el norte, a los sectores de Alto Biobío, en la región homónima. Se caracteriza por presentar precipitaciones que se concentran entre los meses de mayo y junio. Respecto de los caudales, estos presentan dos máximos relativos, uno concentrado durante los meses de mayores precipitaciones y otro que se produce en los meses de primavera, probablemente asociado al derretimiento de las nieves invernales (Energía, 2020)

3.10.2 Central Hidroeléctrica Pangue (EP)

El segundo embalse del río Bio-Bio es Pangue ubicado en la confluencia de los ríos Bio-Bio, Pangue y Huirí-Huirí. Su construcción finalizó en 1996 y tiene una cortina de 450 m de largo, 113 m de altura y embalsa un volumen de 175×10^6 m³ que llenan un embalse de 14 km². La obra tardó cuatro años en construirse a partir de 1993 y produce 450 MW de energía en toda su capacidad (Scott, 1992).

3.10.3 Central Hidroeléctrica Angostura (EA)

En último lugar, el embalse Angostura (323,8 MW), propiedad de Colbún S.A. es el tercer gran embalse en la cuenca y entró en operaciones en 2014. La Central Angostura tiene un embalse artificial de regulación mínima, que opera como una central de pasada. El embalse posee una superficie de 641 ha, incluyendo las 180 hectáreas ocupadas por los cauces originales de ambos afluentes, y se extiende 5 km por el río Huequecura y 16 km por el río Biobío (Colbun, 2015).

4. Metodología

4.1 Área de estudio.

El sector de estudio corresponde a la Cuenca Hidrográfica del Biobío. De acuerdo con la información entregada por la dirección general de aguas (DGA) en el diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad (DGA, 2004), la cuenca del Biobío forma parte de la VIII Región y está comprendida entre los paralelos 36°42' – 38°49' Latitud Sur y los meridianos 71° - 73°20' Longitud Oeste. Es una de las cuencas de mayor superficie (24.264 Km²) y caudal del país, comprende parte de los territorios de las Provincias de Ñuble, Concepción, Biobío y Arauco. El alcance del proyecto de investigación contempla 3 sectores del río Biobío ubicados en la zona media-alta de la cuenca (Figura 7).

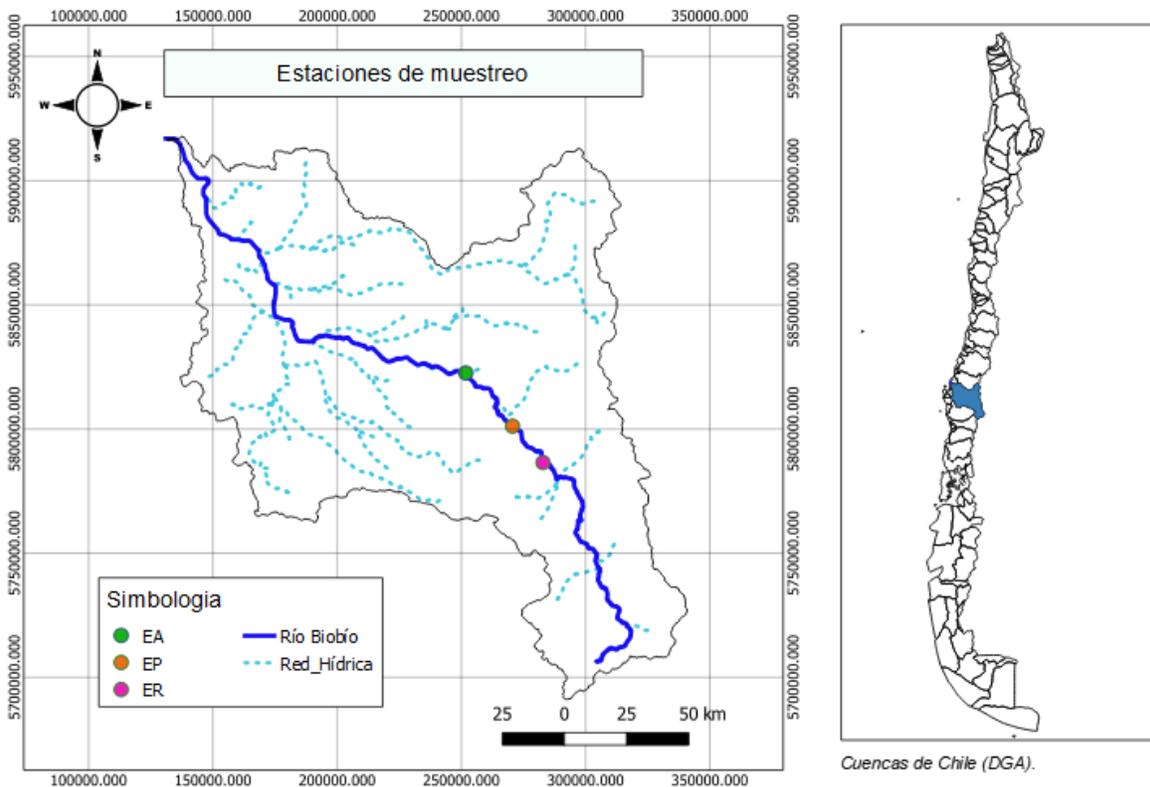


Figura 7: Puntos de muestreo en la cuenca hidrográfica del Biobío.

Fuente: Elaboración propia a través de QGIS 3.16.5

En relación a las particularidades de la cuenca se puede señalar lo siguiente; respecto a su geomorfología, se caracteriza por presentar 4 tipos de unidades de relieve:

- Cordillera Andina
- Depresión intermedia
- Cordillera de la costa
- Llanura litoral

En su conjunto, permiten el desarrollo de diversos biomas, biotopos y ecosistemas dentro de la cuenca, considerando los factores climáticos y geológicos que determinan el tipo de vegetación, fauna e interacciones biológicas. El clima de la cuenca, presenta características de transición entre los climas Mediterráneo y Templado Húmedo, predominante de la zona Sur. A través de la siguiente tabla se visualizan las principales características de las estaciones de muestreo.

Tabla 4: Características principales de las estaciones de muestreo.

Embalse	Potencia	Altitud	Superficie	Coordenadas
	MW	m.s.n.m	Ha	UTM
Central hidroeléctrica Ralco (ER)	690	628	3.467	19 H 282804.94 m E 5786222.23 m S
Central hidroeléctrica Pangué (EP)	456	512	540	19 H 270488.21 m E 5801003.01 m S
Central hidroeléctrica Angostura (EA)	323.8	299	614	19 H 251603.09 m E 5822466.91 m S

Fuente: Elaboración propia a través de la bibliografía.

4.2 Materiales y métodos

En términos generales, la muestra se fundamenta en un conjunto de datos muestreados desde el 1 de diciembre del 2016 hasta el 14 de diciembre del 2022. Este conjunto de datos incluye variables bioquímicas y de calidad de agua de los sectores del estudio. Dentro de esas variables a estudiar se encuentran:

- Dióxido de carbono (CO_2)
- Metano (CH_4)
- Temperatura ($T^\circ \text{C}$)
- Nitrógeno ($\text{N}_{\text{-total}}$)
- Fosforo ($\text{P}_{\text{-total}}$)
- Fosfato (PO_4^{3-})
- pH
- Nitrato (NO_3^-)
- Nitrito (NO_2^-)

El tipo de dato que representa a la muestra se clasifica como datos cuantitativos secundarios. En otros términos, estos fueron proporcionados por el programa de monitoreo del río Biobío (PMBB) con sus respectivos procedimientos en terreno. La toma de muestras se realizó en 3 estaciones a lo largo del cauce del río Biobío (ER, EP y EA) donde se encuentran emplazados estos proyectos hidroeléctricos. Esta se caracteriza por ser una muestra de agua de tipo superficial. Las mediciones in situ fueron realizadas en una muestra de agua contenida en un envase plástico de 5 litros. Para el caso de los gases, estos se fijaron con cloruro de mercurio (0.05 ml) en viales de vidrio sellados herméticamente, con 3 muestras por cada estación en un periodo de 7 años. Posteriormente fueron enviados al laboratorio donde fueron analizados y cuantificados por medio de cromatografía de gases. La temperatura fue medida con un termómetro de mercurio (graduación de 0,1 °C de sensibilidad) y el pH con un pH-metro Scott Gerate Mod. Handylab 2. Finalmente, los nutrientes fueron analizados mediante métodos estándar (Tabla 5) en los laboratorios de química ambiental del Centro EULA.

Tabla 5: Toma de muestras Programa Monitoreo del río (PMBB)

Variable	Técnica/Análisis	Toma de muestras	Límite de detección
CO ₂ (umol/l)	Cromatografía de gases	- Shimadzu, equipado con un detector de captura de electrones (ECD)	-----
CH ₄ (nmol/l)	Cromatografía de gases	- Shimadzu, equipado con un detector de captura de electrones (ECD)	-----
N-Total (mg/l)	Espectrofotometría de absorción molecular	- 4500-N C Methods 23th Edition.	0.01
P-Total (mg/l)	Espectrofotometría de absorción molecular	- 4500-P-E (Cuantificación). - 4500 P-B (Digestión) Standard Methods 23th Edition.	0.01
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	Espectrofotometría de absorción molecular	- 4500-P-E (Cuantificación). - 4500 P-B (Digestión) Standard Methods 23th Edition.	0.01
NO ₂ ⁻ (mg/l)	Espectrofotometría de absorción molecular	- 4110 B Standard Methods 23th Edition.	0.005
NO ₃ ⁻ (mg/l)	Espectrofotometría de absorción molecular	- 4110 B Standard Methods 23th Edition.	0.001
pH	Potenciométrico (análisis in situ)	- 4500 H B Standard Methods 23th Edition.	0.1
Temperatura (°C)	Termométrico (análisis in situ)	- 2550 B Standard Methods 23th Edition, medidor portátil multiparamétrico.	± 0.1

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Análisis exploratorio de datos (EDA)

Para analizar las concentraciones de GEI en el cuerpo de agua se realizó un análisis exploratorio de variables seleccionadas (Anexo 2) cuyo resultado permitió evaluar el comportamiento histórico de los gases según su estacionalidad. Dicho análisis se basa en gráficos y estadísticos que permiten explorar la distribución identificando características tales como: valores atípicos o observaciones inusuales, saltos o discontinuidades, concentraciones de valores, forma de la distribución y revelar patrones. Las variables base del análisis estadístico son; el tiempo (x años) y las concentraciones de los gases (umol/ L, nmol/ L). La metodología a seguir para responder a los objetivos se basó en 4 etapas principales (Figura 8).

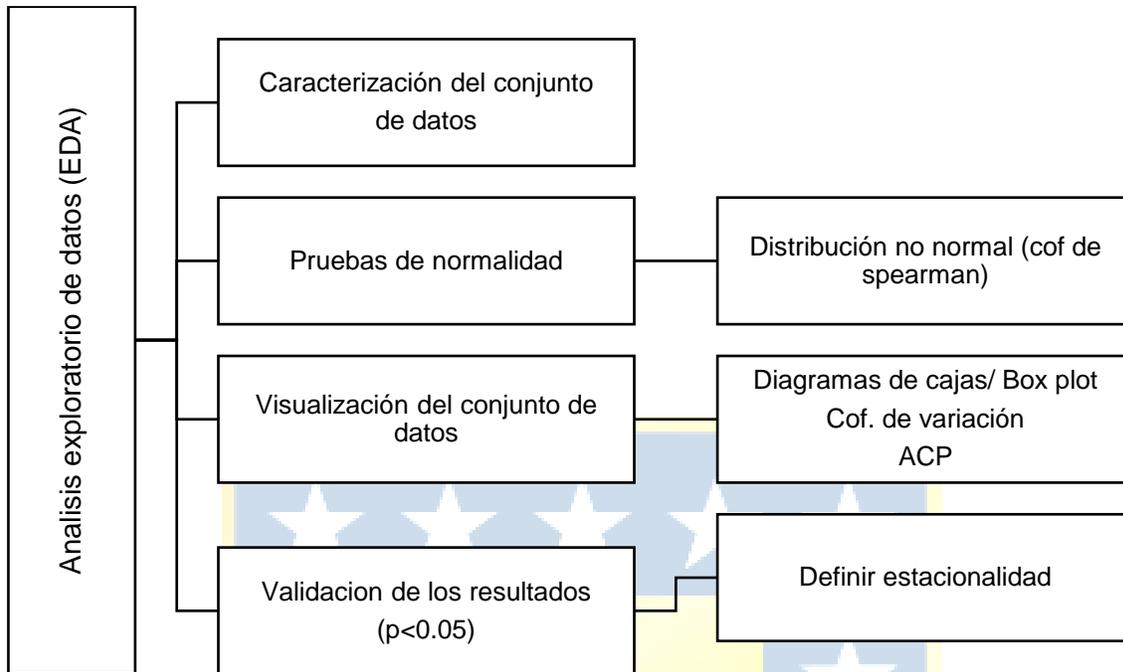


Figura 8: Esquema resumen metodología objetivo 1.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la estadística descriptiva, la muestra se clasifica como variables cuantitativas continuas, las cuales se subdividieron en 3 estacionalidades:

- Los datos muestreados durante agosto corresponden a invierno.
- Los datos muestreados durante diciembre corresponden a primavera.
- Los datos muestreados durante marzo corresponden a verano.

El siguiente paso realizado estableció antecedentes respecto a cómo se distribuyen los datos. El cálculo de la media, la varianza, la desviación estándar e histogramas fueron de gran utilidad para determinar previamente como de dispersos están los datos y cuáles son sus tendencias más típicas.

Además, se debió escoger el coeficiente de correlación adecuado utilizando el test de bondad de ajuste kolmogorov smirnov para verificar la normalidad del conjunto de datos.

En la tercera etapa se procedió a visualizar los datos de forma gráfica, bajo la premisa de estacionalidad se elaboró un diagrama de cajas o box plot cuya utilidad fue identificar los patrones entre las variables y si existían diferencias significativas. Finalmente, en la última etapa se debió comprobar la veracidad de la información entregada por el software (Infostat y Excel). Se calculo el p valor para las variables a modo de aprobar la hipótesis planteada y darle significancia estadística.

Para relacionar las concentraciones de GEIS con las variables ambientales de calidad de agua se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman, dado que no se cumple el supuesto de normalidad en la distribución de tales valores y se procedió a calcular el p-valor de las variables tratadas a modo de comprobar su significancia estadística utilizando el software Infostat. Las correlaciones se realizaron para cada estación, hablese de invierno, primavera, verano y corresponden a lo siguiente:

- Dióxido de Carbono / N (Total)
- Dióxido de Carbono / P (Total)
- Dióxido de Carbono / Fosfatos
- Dióxido de Carbono / Nitratos
- Dióxido de Carbono / Nitritos
- Dióxido de Carbono/ pH
- Dióxido de Carbono/ Temperatura
- Metano/ N (Total)
- Metano/ P (Total)
- Metano/ Fosfatos
- Metano/ Nitratos
- Metano/ Nitritos
- Metano/ pH
- Metano/ Temperatura

A modo de complementar la información antes planteada, se realizó un análisis multivariado, que consta de reducir la dimensionalidad de la muestra tratada. La pertinencia del análisis multivariado radica en examinar el efecto simultáneo del conjunto de más de una variable aleatoria. Su enfoque es encontrar patrones, relaciones y asociaciones entre las variables. Para ello se realizó un análisis de componentes principales (ACP), cuya utilidad en la presente investigación se centró en identificar las posibles variables fisicoquímicas de calidad de agua que se correlacionan con la concentración de los gases y a su vez con la estacionalidad.

4.2.2 Análisis de Componentes Principales (ACP)

El ACP es una técnica estadística que no requiere la suposición de normalidad multivariante de los datos y su utilidad radica en la reducción de la dimensionalidad de la muestra para identificar las variables que mejor explican al conjunto de datos. El análisis de componentes principales se realizó a través del software estadístico PRIMER. Mediante gráficas en dos dimensiones se identificaron los componentes principales que describen la varianza del conjunto de datos (estacionalidad de los gases y parámetros de calidad de agua). Para ello se establecieron 3 criterios de clasificación para el ACP:

El primer criterio de evaluación hace referencia a los periodos estacionales previamente definidos. Refiérase a la toma de muestras realizadas durante agosto (invierno), diciembre (primavera) y marzo (verano). Mientras que el segundo criterio hace hincapié a la localidad (ER, EP y EA) en la cual fueron muestreadas las variables, hállese del embalse Ralco, Pangué y Angostura. El último criterio utilizado hace referencia al año al que pertenecen las variables, en un periodo comprendido del año 2016 al año 2022. Acorde al tratamiento de los datos se destaca que se elevaron a la cuarta potencia las variables cuyos valores eran decimales (nitrato, fosforo, nitrógeno) a modo de estandarizar los datos.

4.2.3 Recopilación bibliográfica

Para llevar a cabo este objetivo se realizó una recopilación bibliográfica respecto a prácticas sustentables para buscar los diferentes estándares, así como sus experiencias de aplicación y críticas orientadas a disminuir o mitigar las emisiones de gases efecto invernadero generados en embalses de uso hidroeléctrico. La recolección bibliográfica, se fundamentó en información disponible en las bases de datos de Google Académico y Web of Science disponible en la Universidad de Concepción, procedimiento que se ordenó en las siguientes etapas.

- Primera etapa: Se realizó un diagnóstico de la problemática asociada a los GEIS y su relación con los embalses de uso hidroeléctrico, transversal a todas sus fases. Vale decir, se evaluó para cada etapa, ya sea de diseño, de construcción y posterior operación las actividades que emiten GEIS.
- Segunda etapa: Se identificaron medidas técnicas para mitigar y compensar las emisiones de GEIS en embalses de uso hidroeléctrico en cada una de sus fases (diseño, construcción y operación). Se contemplaron propuestas ingenieriles de diseño, directrices en cuanto a la gestión del uso de la tierra y finalmente la identificación de las condiciones mínimas para la construcción de mega centrales, minimizando al máximo los posibles impactos ambientales. Fundamentado en evidencia científica disponible.
- Tercera etapa: En la tercera fase se determinó los principales estándares a nivel internacional en cuanto a la sustentabilidad de los proyectos hidroeléctricos. De forma puntual, se describen los factores que indican en la sustentabilidad de proyectos hidroeléctricos y los principios por los cuales se deben regir las construcciones o ejecuciones de tales actividades.
- Cuarta etapa: Para finalizar, se sintetizó la información recopilada y se comparó con las medidas que posee Chile en cuanto a las emisiones de los gases en centrales hidroeléctricas de tipo embalse.

5. Resultados

5.1 Comportamiento temporal de los GEI

Los histogramas correspondientes a cada periodo estacional (Figura 9, 10 y 11), muestran visualmente como es la distribución del conjunto de datos. En primer lugar, se explican las distribuciones asociadas al gas metano. Se puede observar que las concentraciones de este gas durante los 3 períodos estacionales presentan una distribución asimétrica positiva, el máximo se registra durante el principio de la distribución, mientras que los valores van disminuyendo hacia la parte derecha de los histogramas. Tanto para la primavera (Figura 9) como para el invierno (Figura 10) se identifican valores atípicos o extremos, ubicados hacia la cola derecha de la distribución. Por el contrario, durante el verano (Figura 11) no se detectan outliers. Cabe destacar que para el invierno el máximo pico de los datos ocurre en torno a 72.52 nM, mientras que la primavera 46 nM, finalmente en el verano el máximo pico fue en 91.42 nM. Además, se puede observar que la distribución del conjunto de datos no se ajusta a la curva normal esperada.

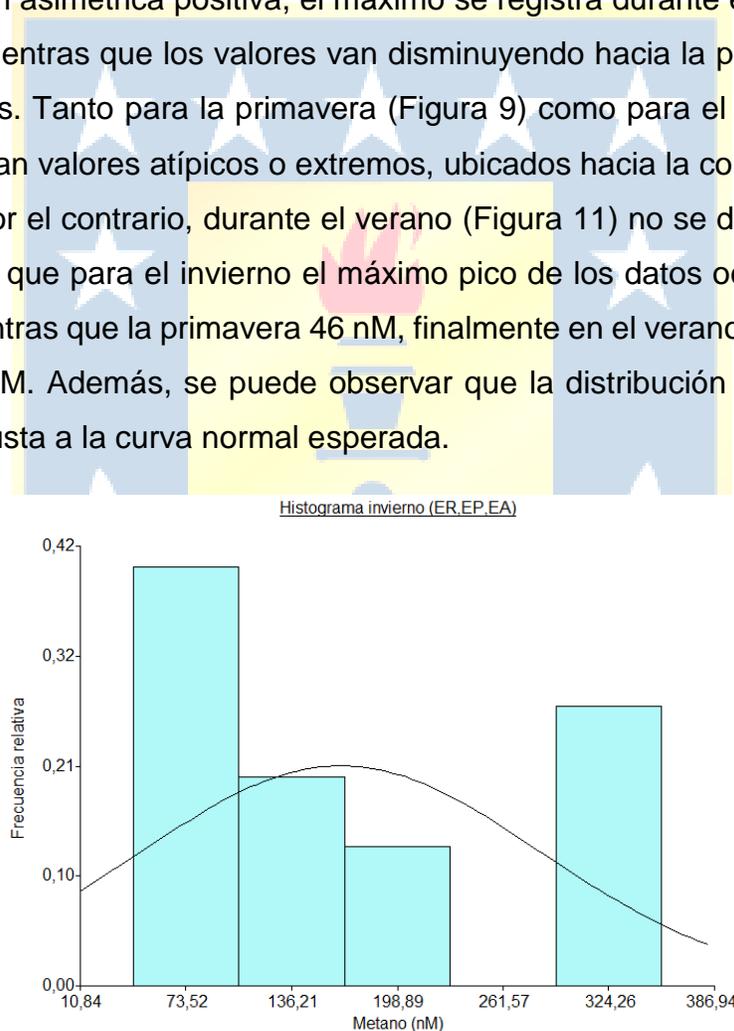


Figura 9: Histograma de concentraciones CH₄, agosto (2016-2022).

Fuente: Elaboración propia

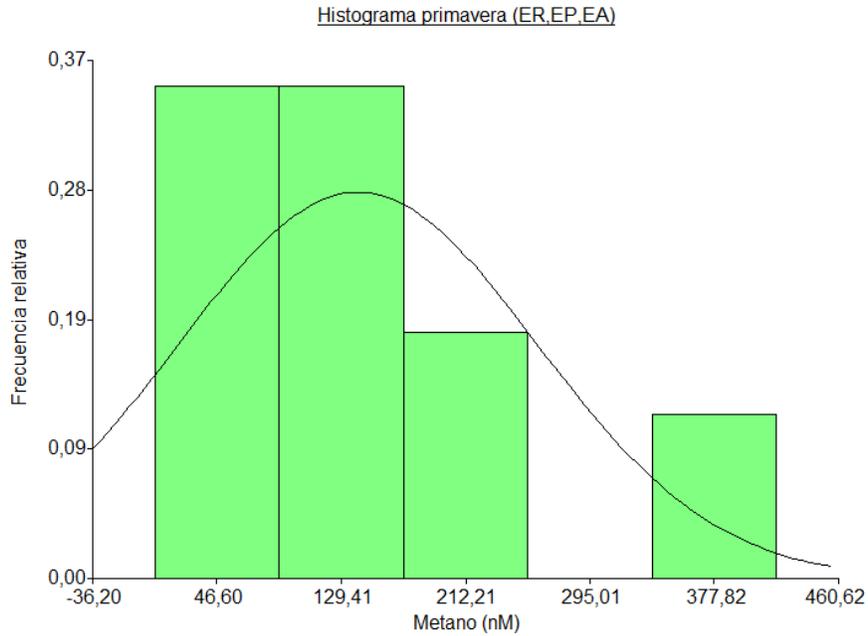
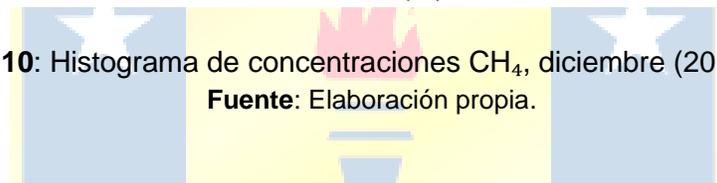


Figura 10: Histograma de concentraciones CH₄, diciembre (2016-2022).

Fuente: Elaboración propia.



Histograma verano (ER,EP,EA)

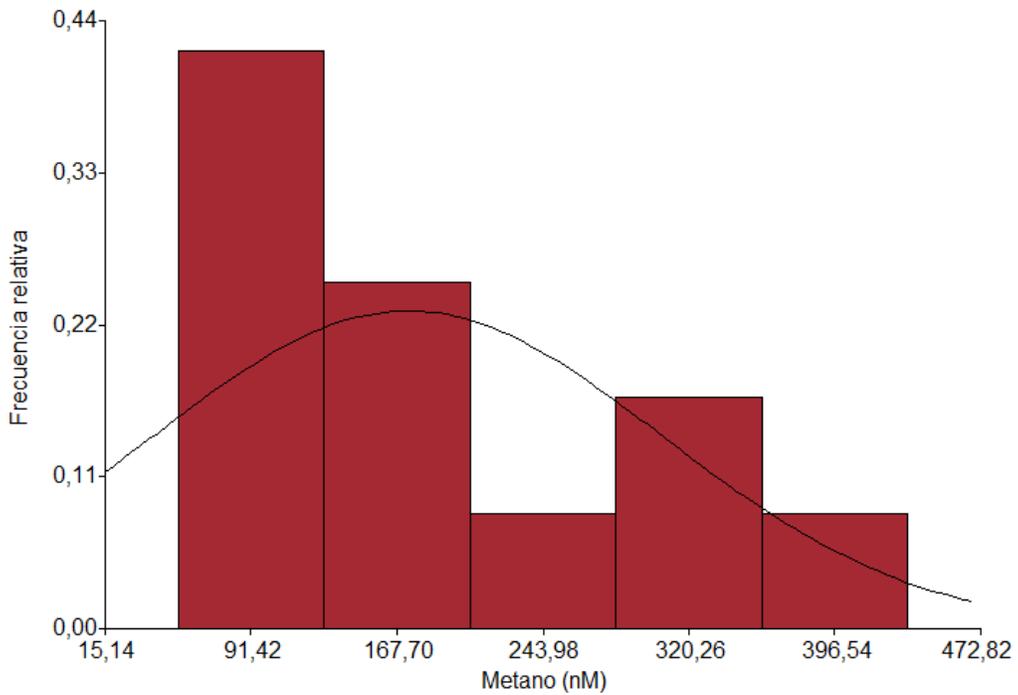


Figura 11: Histograma de concentraciones CH₄, marzo (2016-2022).

Fuente: Elaboración propia.

La distribución de frecuencia correspondientes a las concentraciones del gas CO₂ en el periodo 2016-2022 (Figuras 12, 13 y 14), mostró ser simétrica durante las 3 estaciones, sin embargo, se denotan algunas diferencias visuales. En primera instancia, durante el invierno el máximo pico se registró cercano a su valor medio (223 uM), el mismo caso se da para la primavera (288 uM). No obstante, el verano mostro su máximo registro (415 uM) desplazado hacia la izquierda de la cola del histograma. Por su parte, se detectaron valores atípicos en el transcurso del verano, llegando al orden de los 1200 uM. En relación a la normalidad de la distribución, se realizaron los test estadísticos respectivos a cada estación, cuyos resultados se presentan más adelante en los resultados. Subsiguientemente se calcularon estadísticos de interés como la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

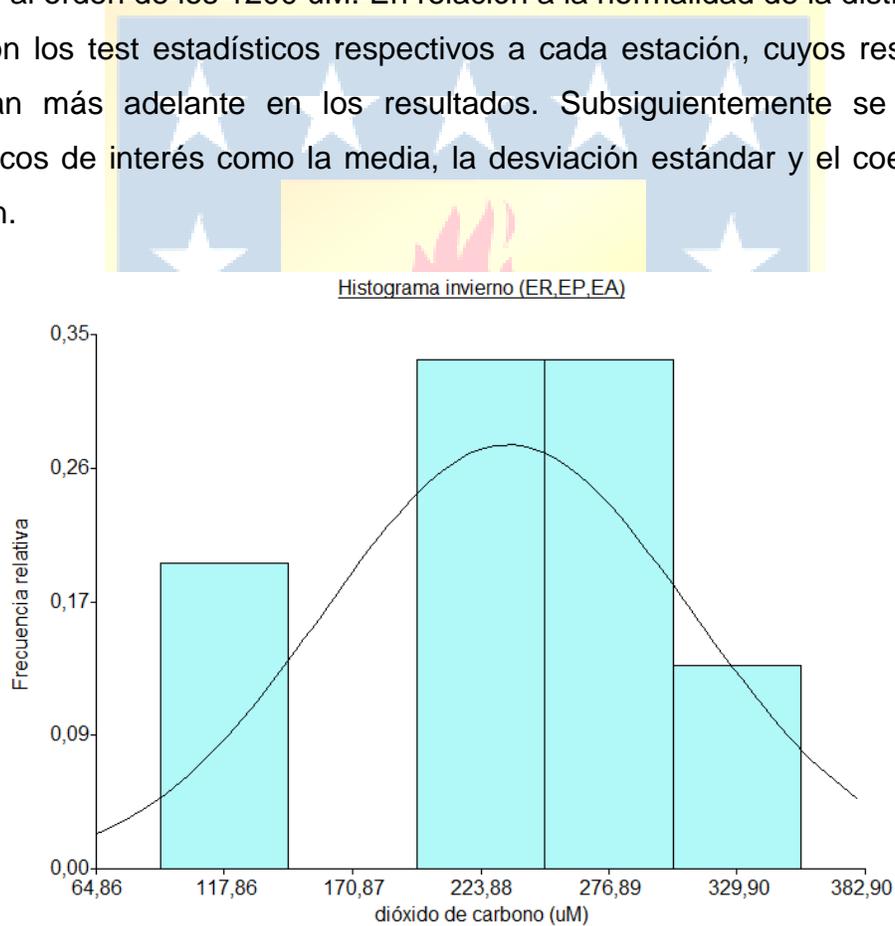


Figura 12: Histograma de concentraciones CO₂, agosto (2016-2022).

Fuente: Elaboración propia.

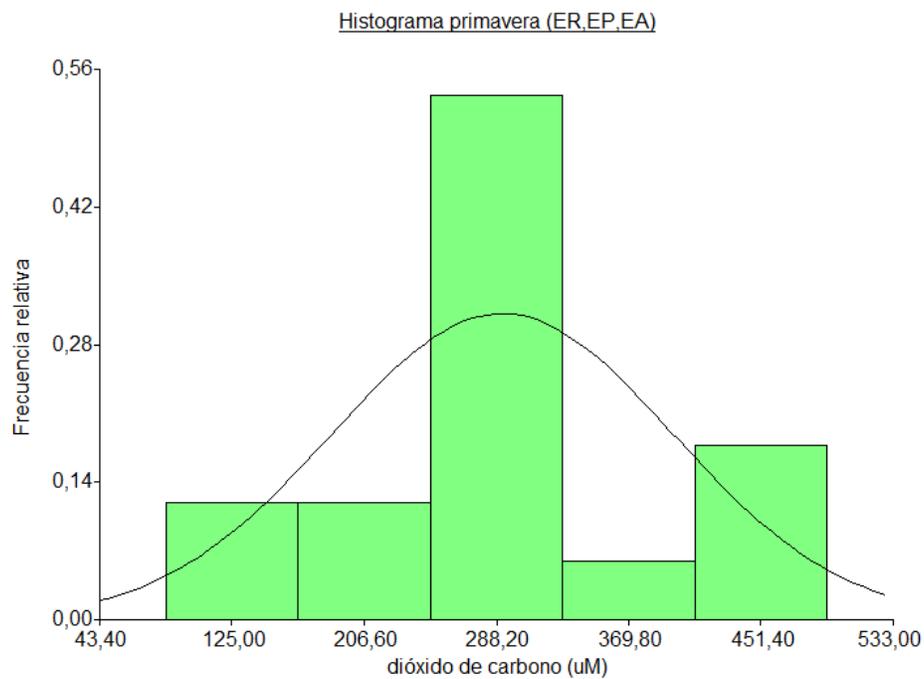


Figura 13: Histograma de concentraciones CO₂, diciembre (2016-2022).
Fuente: Elaboración propia.

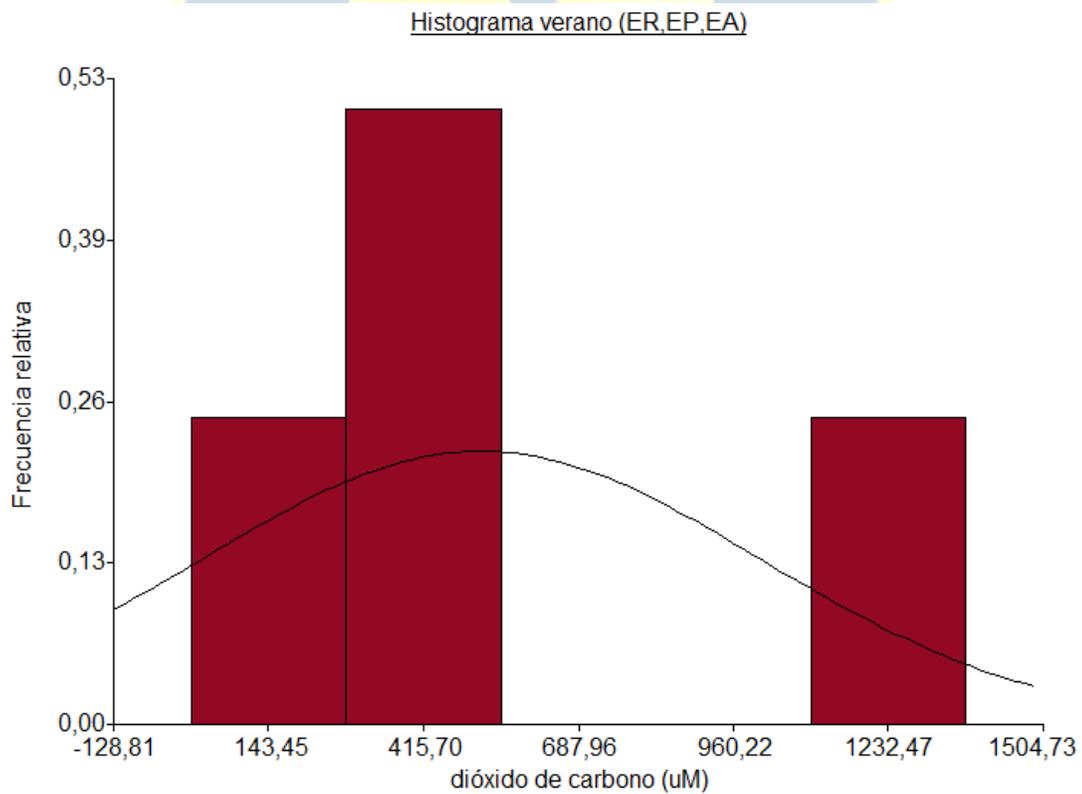


Figura 14: Histograma de concentraciones CO₂, marzo 2016-2022.
Fuente: Elaboración propia.

5.2. Estadísticos de interés

Para el gas CH₄, quien representa el mayor promedio en cuanto a sus concentraciones (nM) es el embalse Angostura (Tabla 6), ubicado en una altitud más próxima respecto al nivel del mar, mientras que el menor promedio se registró durante el invierno en el embalse Ralco, ubicado en la parte más alta de la cuenca hidrográfica del río Biobío. En correspondencia al CO₂ (Tabla 7), los promedios para cada estación de muestreo son similares durante el invierno y la primavera, mientras que el verano presenta rangos más elevados, especialmente el embalse Ralco (460.9). Se puede observar un efecto acumulativo para el embalse Angostura durante la primavera, puesto que durante los 7 años analizados es quien presenta las mayores concentraciones de gas CH₄.

Para ambos gases, los promedios estacionales tienden a ir en aumento desde el invierno hacia el verano. No obstante, el embalse Pangue presentó dinámicas contrarias al embalse Ralco y Angostura. Respecto a las concentraciones superficiales de CH₄ disuelto en el embalse Pangue, se identificó que el promedio estacional calculado tiende a ir en decrecimiento desde el invierno hacia la primavera y verano.

Tabla 6: Promedios estacionalidad para gas CH₄, serie 2016-2022.

CH ₄ (nM)			
Estación de muestreo	Invierno	Primavera	Verano
ER	74.2	72.4	103.3
EP	251.9	145.32	83.9
EA	169.8	256.3	332.8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7: Promedios estacionalidad para CO₂, serie 2016-2022.

CO ₂ (uM)			
Estación de muestreo	Invierno	Primavera	Verano
ER	248.6	239.7	460.9
EP	222.7	247.1	350.3
EA	234.1	281	387

Fuente: Elaboración propia

5.2.1 Coeficiente de variación

Para medir la variabilidad relativa del conjunto de datos, se calculó el coeficiente de variación, el cual se obtuvo a partir de la división entre la desviación estándar de la muestra y los promedios estacionales correspondientes a cada grupo, con la siguiente formula:

$$CV: \frac{\sigma}{|\bar{x}|}$$

Se observó que la mayor dispersión de datos se encuentra asociada al gas CH₄ puesto que, por norma general su CV superan el 50%. Específicamente, se denoto que durante el invierno para el gas CH₄ (Tabla 9), los valores presentan mayor dispersión (ER: 67%; EP: 51%; EA: 57%). Por el contrario, la primavera fue quien presento menor dispersión de los datos (38%; 24%; 44%, respectivamente). El CO₂ presento menor variabilidad en comparación con el CH₄.

Tabla 8: Desviación estándar para los gases CH₄ y CO₂, serie 2016-2022

CH₄			
Estación de muestreo	Invierno	Primavera	Verano
ER	49.76	28.09	48.13
EP	129.45	35.88	56.97
EA	96.91	113.77	79.52
CO₂			
Estación de muestreo	Invierno	Primavera	Verano
ER	75.71	111.42	44.33
EP	66.03	74.811	95.14
EA	94.64	39.04	90.10

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9: Coeficiente de variación periodos estacionales (invierno, primavera y verano)

CH₄	CV Invierno	CV Primavera	CV Verano
ER	67%	38%	46%
EP	51%	24%	67%
EA	57%	44%	23%
CO₂	CV Invierno	CV Primavera	CV Verano
ER	30%	46%	9%
EP	29%	30%	27%
EA	40%	13%	23%

Fuente: Elaboración propia a partir de Excel.

5.2.2 Diagrama de cajas o box plot

Para el caso del CH_4 , se observó que las mayores concentraciones del gas (Figura 15) se presentan durante marzo en el embalse angostura, con un valor de 434 nM. En caso contrario, se determinó que las concentraciones más bajas son durante agosto, a nivel particular 42 nM. Durante el verano, se aprecia una simetría en la distribución dado que, la media y los rangos intercuartílicos estarían ajustados a un valor medio, mientras que pivotes mayores y menores estarían del mismo ancho, visualmente podría indicar un patrón estacional para el caso del CH_4 . Se detectaron por su parte, valores atípicos o outliers, que se fundamentan en posibles errores asociados a toma de muestras. La mayor variabilidad la presentó la primavera en el embalse angostura, mientras que la menor variabilidad fue en el verano para la estación de pangue.

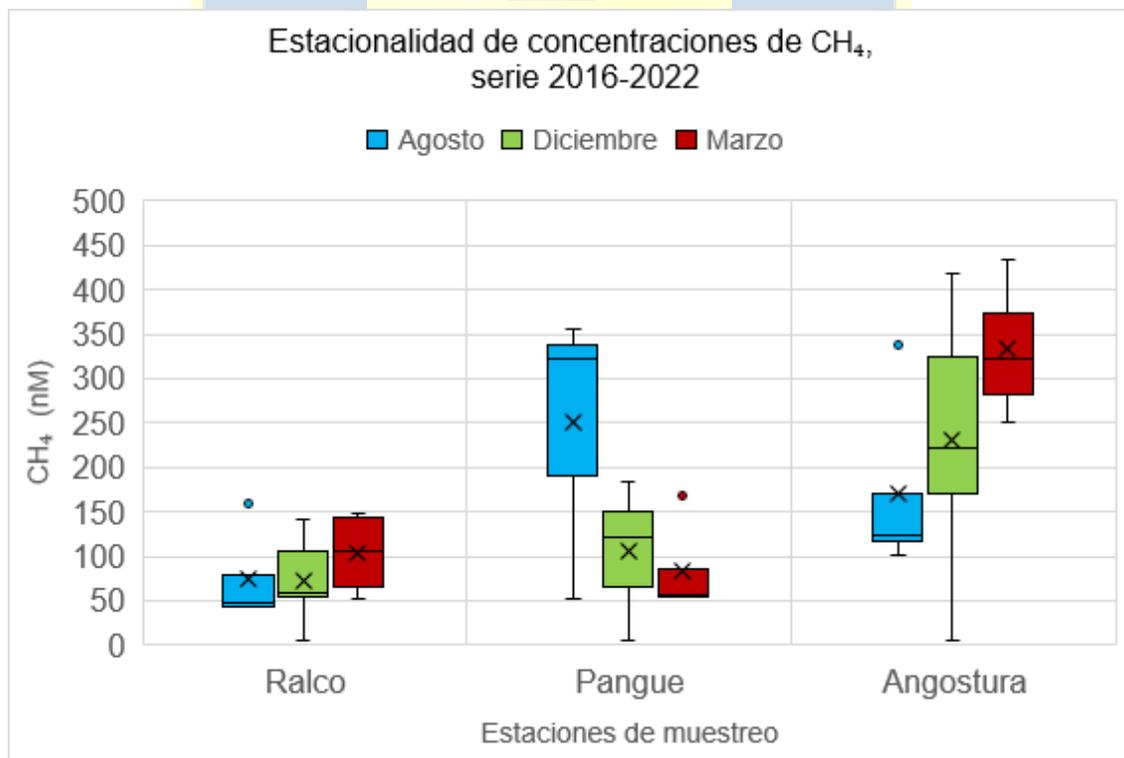


Figura 15: Diagramas de cajas concentraciones de CH_4 (nM).
Fuente: Elaboración propia.

El mayor registro para el gas CO₂ tuvo su origen en el embalse Ralco (Figura 16) cuya concentración fue de 492 uM, particularmente durante el transcurso del verano. Su menor registro dató durante la primavera en el embalse Ralco con una concentración de 84.2 uM. Considerando la eliminación de outliers. Se destaca por otra parte, que para el caso particular del invierno las medias son similares en los 3 puntos de muestreo por lo que podría indicar un patrón estacional ajustado a un valor medio. Se detecto dinámicas estacionales similares a las del gas CH₄, las concentraciones del gas para las 3 estaciones de muestreo fueron en aumento desde el invierno hacia el verano. Quien presento mayor variabilidad en sus rangos fue la estación de verano, mientras que la menor variabilidad fue durante la primavera en el embalse angostura. En particular, el año 2018 (marzo) se detectó un aumento atípico en cuanto a las concentraciones del gas. Estas concentraciones son 1368.6 uM (ER), 1286.19 uM (EP) y 1121.38 uM (EA).

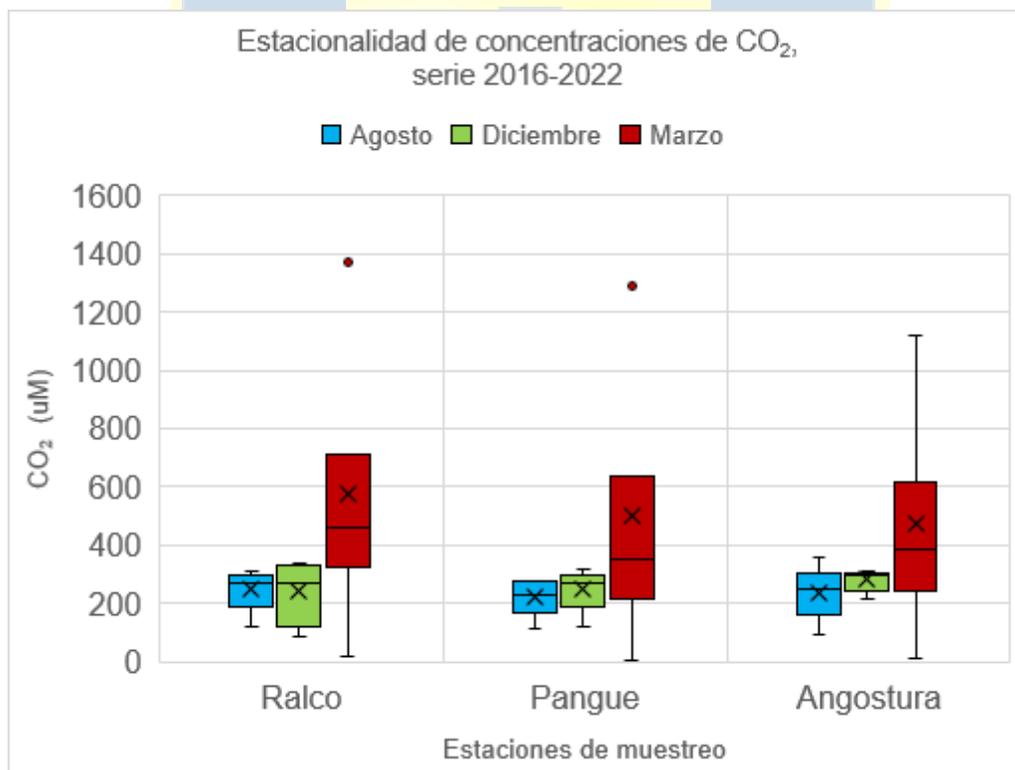


Figura 16: Diagrama de cajas concentraciones de CO₂ (uM)
Fuente: Elaboración propia.

5.2.3 Rangos de metano (nM) y dióxido de carbono (uM)

Teniendo en consideración la eliminación de datos atípicos (outliers), los resultados evidencian que los rangos tienden a aumentar desde la primavera hacia el verano para las concentraciones de CH₄. Mientras que el gas CO₂ presenta rangos similares durante el verano y la primavera en las 3 estaciones y tienden a aumentar desde la primavera hacia el verano llegando a su mayor registro con 451 uM.

Tabla 10: Rangos de CH₄ estaciones ER, EP y EA en un periodo de 7 años.

Estación de muestreo	Rangos de CH ₄		
	Invierno	Primavera	Verano
ER	42-159	54-141	53-147
EP	51-355	53-185	53-169
EA	101-337	162-352	241-434

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11: Rangos de CO₂ estaciones ER, EP y EA en un periodo de 7 años.

Estación de muestreo	Rangos de CO ₂		
	Invierno	Primavera	Verano
ER	117 – 313	84.2- 492.2	429 – 492
EP	112 – 275	120 – 417	283.1 – 417
EA	91 – 356	276 – 451	323 – 451

Fuente: Elaboración propia.

Para comparar los rangos de la investigación con otros embalses a nivel mundial se recopiló información disponible de GEIS identificados en el agua superficial de embalses a diferentes latitudes (Anexo 3). Posteriormente se transformó las concentraciones de gas metano de nanomolar (nM) a micromolar (uM) para tener coherencia con las unidades de medida. La recopilación bibliográfica evidenció que los embalses ubicados en zonas tropicales y subtropicales tienden a presentar mayores rangos de ambos gases, mientras que los rangos de la investigación se asemejan más a un ecosistema de tipo boreal y alpino. No obstante, la comparación mostró más bien una referencia entre los embalses en cuanto al agua superficial, puesto que para hacer una comparación integral se deben considerar otras variables ambientales, entre ellas, se encuentran: flujos difusivos y ebullitivos, balances de materia y energía de los ecosistemas, humedad y la velocidad del viento.

5.2.4 Pruebas de normalidad

Las variables acorde a su estacionalidad (invierno, primavera y verano) se clasifican como variables cuantitativas continuas y la muestra para cada estación es un valor menor que; $n=50$. Debido a estos dos supuestos se utilizó el test kolmogorov smirnov a modo de evaluar estadísticamente la normalidad del conjunto de datos.

Tabla 12: Test de normalidad kolmogorov smirnov, estación de invierno.

Variables	n	Media (\bar{x})	Desviación estándar (σ)	p-valor
CH ₄	15	165.31	117.58	0.005
CO ₂	15	235.17	74.59	0.09
pH	11	7.13	0.25	0.98
T°	11	7.06	0.54	0.17
NO ₃ ⁻	17	0.08	0.11	<0.0001
NO ₂ ⁻	17	0.01	0.01	<0.0001
N _(total)	17	0.12	0.15	<0.0001
P _(total)	17	0.09	0.16	<0.0001
PO ₄ ³⁻	17	0.02	0.01	<0.0001

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13: Test de normalidad kolmogorov smirnov, estación de primavera.

Variables	n	Media (\bar{x})	Desviación estándar (σ)	p-valor
CH ₄	14	169.3	108.3	0.071
CO ₂	17	291.8	102.5	0.62
pH	24	7.18	0.37	0.01
T°	24	17.87	2.08	0.11
NO ₃ ⁻	21	0.01	0.017	<0.0001
NO ₂ ⁻	21	0.005	0.003	<0.0001
N _(total)	21	0.059	0.031	0.069
P _(total)	21	0.028	0.020	0.11
PO ₄ ³⁻	21	0.013	0.007	<0.0001

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14: Test de normalidad kolmogorov smirnov para la estación de verano.

Variables	n	Media (\bar{x})	Desviación estándar (σ)	p-valor
CH ₄	12	173.31	131.08	0.039
CO ₂	12	517.12	482.94	0.022
pH	12	7.10	0.33	0.11
T°	12	18.2	1.11	0.66
NO ₃ ⁻	12	0.03	0.03	0.009
NO ₂ ⁻	12	0.01	0.003	<0.0001
N _(total)	12	0.09	0.05	0.45
P _(total)	12	0.02	0.02	0.01
PO ₄ ³⁻	12	0.02	0.006	<0.0001

Fuente: Elaboración propia.

Decisión: Dado que el valor-p del conjunto de variables es menor que el alfa (significancia), se rechaza la Ho (los datos tienen distribución normal), mientras que la hipótesis alterna es aceptada. Vale decir, la distribución de los datos en cuanto a la estacionalidad (invierno, primavera y verano) no se distribuyen de forma normal, por lo que se emplearon las pruebas no paramétricas correspondientes (coeficiente de spearman).

5.3 Correlaciones

El análisis de correlaciones es de utilidad para establecer las relaciones o tendencias entre las concentraciones de GEIS y variables bioquímicas de calidad de agua, esto es si cambian conjuntamente a una tasa constante. Acorde al conjunto de datos, este se ordenó en filas y columnas en el software Infostat cuyo tamaño de muestra (*n*) es igual a 411. Se realizó las pruebas estadísticas en cuanto a su significancia y se calculó el p valor del coeficiente de spearman (Tabla 14). La hipótesis planteada para este caso es la siguiente:

Hipótesis:

- Ho: Existe una relación lineal entre las concentraciones de GEIS y variables de calidad de agua.
- H₁: No existe relación lineal entre las variables de calidad de agua y GEIS.

Los resultados (Tabla 15) evidencian que existe cierta correlación entre los gases y variables bioquímicas de calidad de agua. En el caso del invierno, el CH₄ se correlaciona con el pH (-0.58), el P_(total) (-0.39) y el CO₂ se correlaciona con la temperatura (0.43) y el N_(total) (0.42). En el caso de la primavera: las mejores correlaciones del CH₄ son con la Temperatura (0.49) y el NO₂⁻ (0.46). Mientras que el CO₂, con el PO₄³⁻ (0.57). Finalmente, para el verano, el CH₄ muestra una correlación con el P_(total) (0.48) y el CO₂ muestra una buena correlación con el pH (0.71) y el Nitrógeno_(total) (0.60). Sin embargo, se detectó que, en su conjunto, las variables no presentan un p menor que 0.05 por lo que el resultado entregado no sería estadísticamente significativo.

Tabla 15: Correlación de spearman periodos estacionales

Variables (n= 411)	Invierno		Primavera		Verano	
	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂
pH	-0.58 (p=0.1)	0.4 (p=0.26)	(-)0.31 (p=0.28)	(-)0.04 (p=0.87)	0.10 (0.75)	0.71 (p=0.11)
T°	0.02 (p=0.97)	0.43 (p=0.25)	(-)0.49 (p=0.08)	(-)0.07 (p=0.78)	(-)0.22 (p=0.48)	0.38 (p=0.46)
NO ₃ ⁻	0.17 (p=0.55)	-0.11 (p=0.71)	0.12 (p=0.69)	0.10 (p=0.79)	(-)0.32 (p=0.30)	0.43 (p=0.34)
NO ₂ ⁻	-0.01 (p=0.98)	-0.08 (p=0.77)	0.46 (p=0.11)	(-)0.04 (p=0.07)	(-)0.32 (p=0.31)	0.0 (p=1)
N _(total)	-0.05 (p=0.85)	0.42 (p=0.12)	(-)0.22 (p=0.44)	0.03 (p=0.91)	(-)0.30 (p=0.34)	0.60 (p=0.18)
P _(total)	-0.39; (p=0.15)	-0.08 (p=0.77)	(-)0.29 (p=0.32)	0.26 (0.31)	(-)0.48 (p=0.12)	0.39 (p=0.4)
PO ₄ ³⁻	0.06 (p=0.82)	0.03 (p=0.91)	0.12 (p=0.69)	(-)0.57 (p=0.02)	(-)0.31 (p=0.33)	0.0 (p=1)

Fuente: Elaboración propia.

Decisión: Respecto a las pruebas estadísticas realizadas no se puede aprobar la hipótesis primeramente planteada, puesto que los p valor no serían significativos. No obstante, no se descartan otro tipo de relaciones entre las variables. Tal es el caso del análisis multivariado que a través del análisis de componentes principales reconoce las múltiples relaciones entre las variables.

5.4 Análisis de componentes principales (ACP)

A continuación, se presentan los resultados acordes al análisis de componentes principales. Se identificaron dos componentes principales que describen a la varianza en un 51% respecto a la estacionalidad.

En el CP1 la estacionalidad estaría influenciada principalmente por el nitrato (-0.62), mientras que el CP2 estaría asociado al dióxido de carbono (-0.68). Para el caso particular del nitrito y el fosfato, no se consideraron en el análisis dado que la variación en el periodo de tiempo estudiado es muy mínima por lo que sus datos no aportan información relevante, por el contrario, dificultaba más la visualización de las gráficas. En la tabla 16 se expone la descripción de la varianza con sus valores respectivos asociado a las componentes principales 1 y 2. Se notó que para el CP1, quienes describen a la varianza en mayor proporción serían el: NO_3^- , $\text{N}_{(\text{total})}$ y el $\text{P}_{(\text{total})}$ con valores del: -0.62, -0.5 y 0.31, respectivamente. En el caso del CP2, sería el gas CO_2 , el $\text{P}_{(\text{total})}$, y el pH.

Tabla 16: Componentes principales del conjunto de datos

Variables	CP1	CP2
CH_4	0.052	-0.3
CO_2	0.052	-0.68
pH	0.043	0.36
T°	0.5	-0.20
NO_3^-	-0.62	0.095
$\text{N}_{(\text{total})}$	-0.5	0.052
$\text{P}_{(\text{total})}$	0.31	0.53

Fuente: Elaboración propia a través del software PRIMER.

En el análisis multivariado, se registraron patrones estacionales entre las concentraciones de los gases CH_4 y CO_2 , con variables bioquímicas de calidad de agua, en un contexto de 3 estacionalidades previamente definidas. Acto seguido, se presenta a través de las Figuras 17, 18 y 19 los criterios de clasificación respectivos a los periodos estacionales (invierno, primavera y verano), localidades (ER, EP y EA) y finalmente los años (2017, 2018, 2019, 2020 y 2021) al que pertenecen las variables.

5.4.1 Estacionalidad (invierno, primavera, verano)

En la figura 17 se observan diferencias visuales entre los puntos muestreados, primeramente, entre el invierno y el verano y entre la primavera con el invierno. No obstante, entre el verano y la primavera el agrupamiento de los datos es homogéneo. Para el caso del invierno, se observa que la nube de puntos tiende ir hacia la izquierda o, mejor dicho, hacia el componente número 1. Esto significa que durante el invierno la estacionalidad estaría principalmente influenciada por las concentraciones de nitrato y nitrógeno total. Así lo comprueba las pruebas estadísticas cuyo p-valor representó una significancia del -0.62 y -0.51 respectivamente. Para la primavera, la nube de puntos tiende a agruparse de una forma no homogénea, no obstante, tiende ir hacia la derecha o componente principal 2, definida por el CO_2 . A nivel particular, se puede observar que, durante la primavera, esta estaría influenciada por el pH y el fósforo. En último caso, en el transcurso del verano las variables representativas son las relaciones entre el CH_4 - CO_2 y la temperatura. La validez del modelo estadístico presenta un p valor del 0.021, cuyo número es menor que 0.05 por lo que el resultado entregado es significativo estadísticamente. Por otra parte, el r asociado al coeficiente de determinación es un valor bajo. El supuesto bajo este valor, es el periodo de tiempo acotado de la toma de muestras, se esperaría que a mayor cantidad de datos posibles (n) el r sería más representativo. A continuación, se presenta una tabla que describe las diferencias entre el invierno, la primavera y el verano en cuanto a su significancia estadística.

En concordancia con los resultados (Tabla 17), se precisó que las mayores diferencias que existen en cuanto a las dinámicas de los gases y variables bioquímicas de calidad de agua son entre el verano y el invierno cuyo valor p mostro una significancia del 0.016. Las menores diferencias se encuentran entre el invierno y la primavera con p-valor del 0.056.

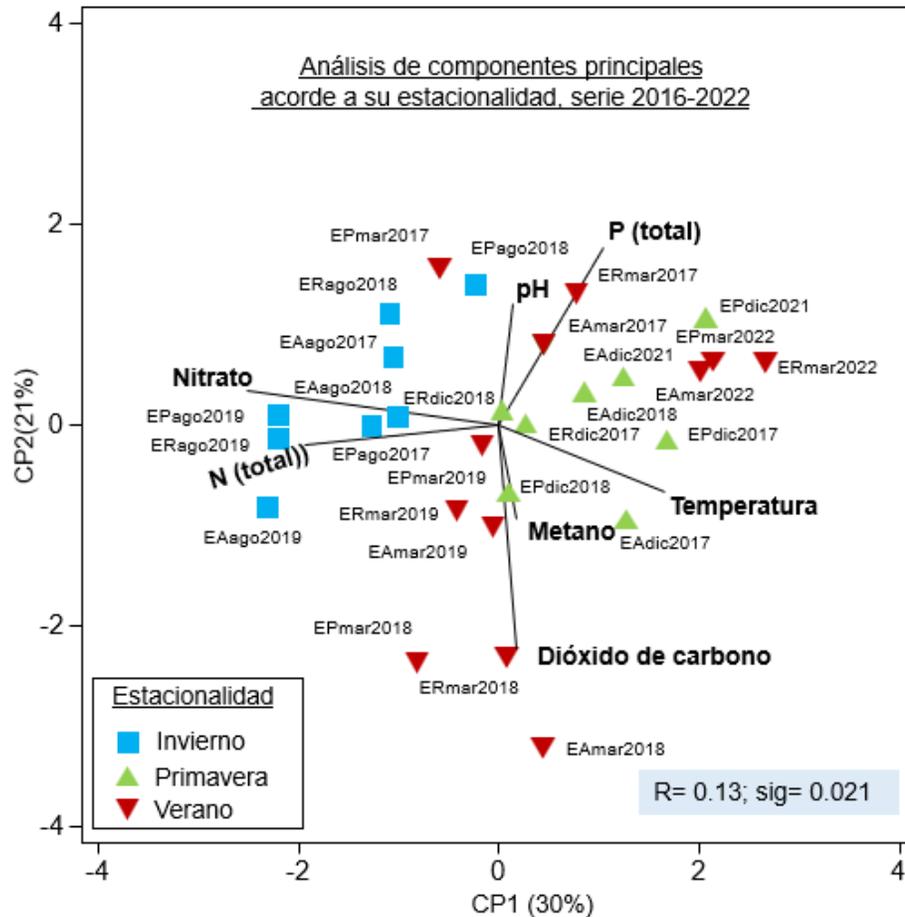


Figura 17: ACP acorde a la estacionalidad.
Fuente: Elaboración propia a través del software PRIMER.

Tabla 17: Test estadístico diferencias entre la estacionalidad de distintos grupos.

Grupo estadístico	Significancia de grupos	Muestra estadística (R)	Nivel de significancia (%)
Verano – Invierno	0.016	0.132	0.021 o 21%
Verano – Primavera	-0.011		
Invierno – Primavera	0.056		

Fuente: Elaboración propia.

5.4.2 Localidad (ER, EP y EA)

Desde una perspectiva visual, la Figura 18 del ACP evidencia que no existen patrones asociados a las localidades. La nube de puntos tiende a estar dispersa en el eje cartesiano, observándose una relación difusa entre los puntos de muestreo. Tanto el embalse Ralco, como el embalse Pangue y Angostura no tienden a agruparse según las componentes principales descritas anteriormente (Dióxido de carbono: CP2 y Nitrato: CP1). En el caso de la comparación de grupos por localidades, se obtuvo que la relación entre el embalse Ralco y Pangue no es significativa cuyo p-valor fue de (-0.081). En cuanto al embalse Ralco y Angostura tampoco se observaron diferencias estadísticas (0.088). Se determinó que no existen diferencias significativas entre las localidades. Esto indicaría que los embalses ubicados en la parte media alta de la cuenca del río Biobío se estarían comportando de forma similar durante el transcurso de las estaciones, evidenciando una posible continuidad entre tramos de ríos fragmentados por la construcción de la represa. Las pruebas estadísticas por grupos (Tabla 18) mostraron que entre el embalse Pangue y Angostura pudiesen existir diferencias significativas cuyo p-valor fue de (-0.007) cuyo valor representa un p-valor menor que 0.05. Teniendo en consideración los antecedentes técnicos e hidro-ecológicos de las centrales, se recomienda poner en observación las dinámicas entre los embalses bajo estudio ya que, existen diferencias técnicas en cuanto a la cantidad de años que llevan en operación, así como en su capacidad de almacenamiento y capacidad de generación, que podrían estar influyendo en la cantidad de CH₄ y CO₂ identificadas en el agua superficial que posteriormente pueden ser liberadas al medio ambiente.

Se recomienda seguir con el monitoreo de las variables para aumentar el n de la muestra y con ello su significancia estadística.

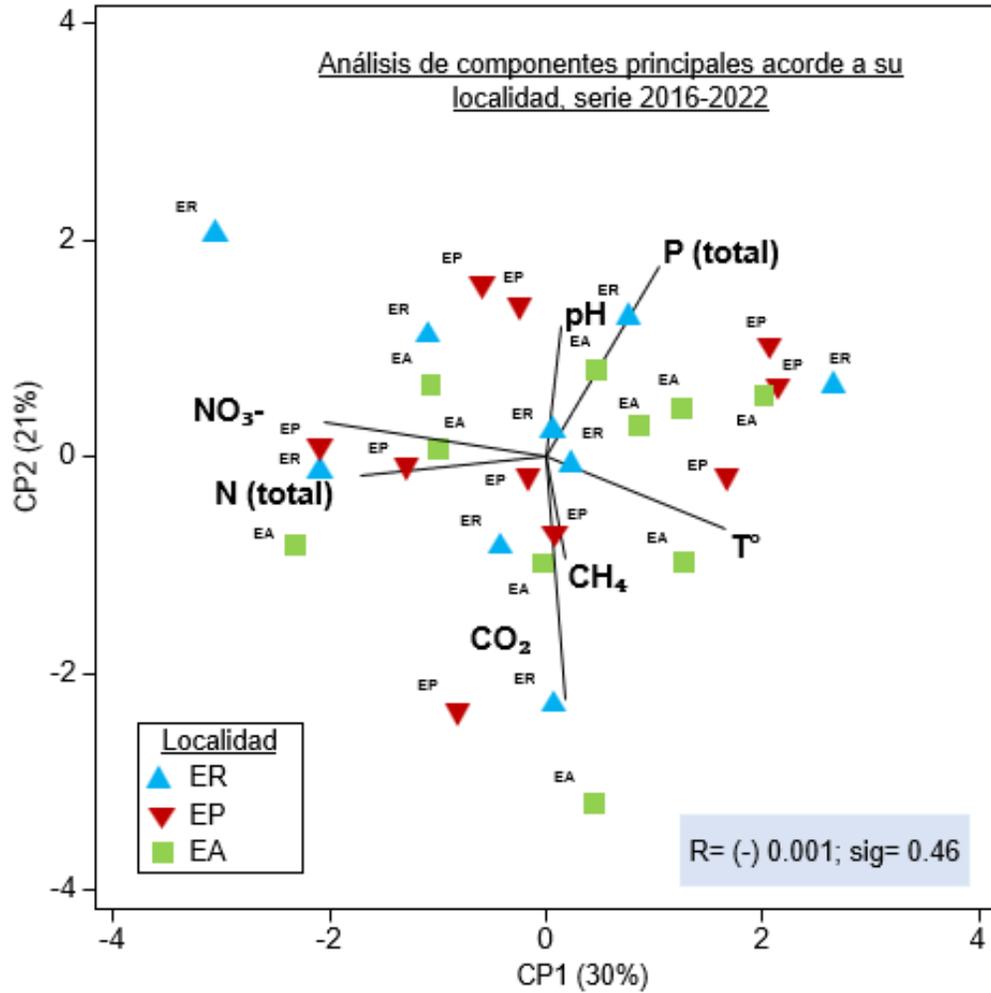


Figura 18: ACP acorde a la localidad a la que pertenecen las variables.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18: Pruebas estadísticas realizadas entre grupos asociados a la localidad.

Estación	Significancia de R	Nivel de significancia (%)
ER – EP	-0.081	89.4%
ER – EA	0.088	12.4%
EP – EA	-0.007	46%

Fuente: Elaboración propia.

5.4.3 Años

El último criterio de clasificación para definir en su totalidad las relaciones entre los gases y variables de interés fue analizar los años bajo estudio para cada estacionalidad (Figura 19). Cabe destacar que solo se consideraron los años 2017, 2018, 2019, 2021 y 2022. En el caso del año 2016 y 2020 no se encontraban los registros para todas las estaciones por lo que el análisis estadístico no permitió la inconsistencia de filas y columnas, en consecuencia, se procedió a no utilizarlos en el análisis. Se aprecia en el gráfico patrones asociados a los años, es decir, cada año estaría representado por características particulares asociadas a los CP1 y CP2.

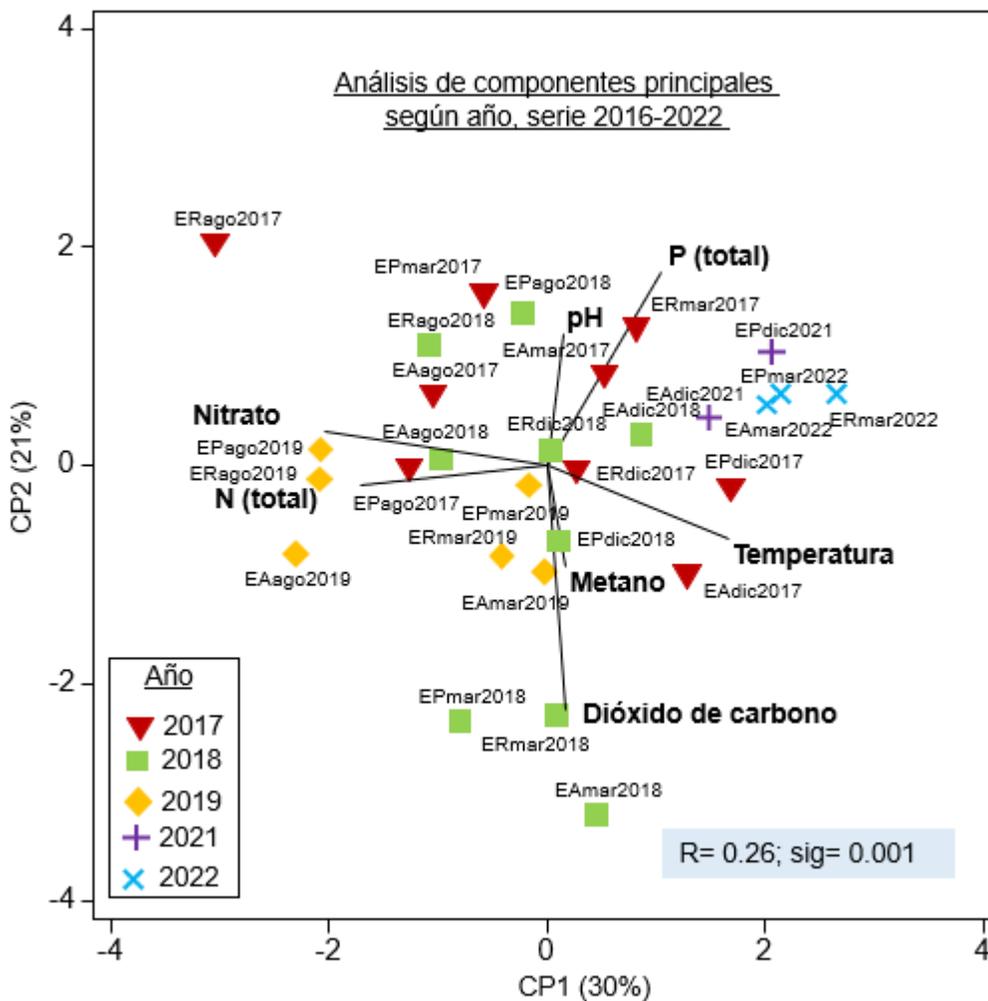


Figura 19: ACP según el año al cual pertenecen las variables.

Fuente: Elaboración propia.

Existen diferencias entre el año 2019 y 2022, tanto su p-valor como su r son estadísticamente representativos ante lo expuesto por el ACP (Tabla 19). Mientras que las mayores diferencias se dieron entre el año 2017 y 2019 respecto a su valor p (0.009 y 0.003 respectivamente). Conforme a los resultados se podrían clasificar a los años bajo estudio dependiendo de las variables fisicoquímicas o nutrientes que le caracterizan. En ese sentido se podría decir que el año 2021 y 2022 fueron años más sensibles hacia las variaciones de temperatura y pH, lo que podría indicar un año más cálido que la media. Para el año 2019 este se representaría por una importante influencia de carga orgánica asociada a nitratos y nitrógeno (total). Cabe destacar que, durante el 2018 se observa en el grafico dos dinámicas diferentes, primeramente, el invierno, se ve influenciado por el pH y el fosforo de tal modo que la nube de puntos se desplaza hacia la parte superior del ACP, mientras que la primavera representa una transición del cuadrante superior hacia el inferior por medio de las variables gas CH₄ y pH. De forma análoga se data que durante marzo de 2018 la mayor representatividad la tiene la presencia de los gases puesto que los datos se agrupan en el cuadrante inferior del ACP.

Tabla 19: Test de significancia por grupos (años: 2017, 2018, 2019, 2021 y 2022)

Grupo estadístico	Significancia de R	p-valor	Validez del modelo	Significancia
2017 – 2018	0.20	0.009	R=0.3	p-valor 0.001
2017 – 2019	0.38	0.003		
2017 – 2021	0.28	0.16		
2017 – 2022	0.35	0.06		
2018 – 2019	0.009	0.42		
2018 – 2021	0.033	0.38		
2018 – 2022	0.28	0.06		
2019 – 2021	0.60	0.03		
2019 – 2022	0.88	0.01		
2021 – 2022	0.08	0.30		

Fuente: Elaboración propia

5.5 Recopilación bibliográfica

En los puntos precedentes se abordaron el marco teórico general, la estacionalidad de los gases y su relación con variables ambientales de calidad de agua. En este inciso se presenta información complementaria en cuanto a la gestión de proyectos hidroeléctricos y prácticas sustentables asociadas al mismo.

5.5.1 Identificación del problema

Consecuente a la recopilación bibliográfica, se puede decir las medidas encontradas no se han desarrollado particularmente para la disminución de GEIS, sino más bien se centran en medidas precautorias para prevenir la acumulación de MO y sedimentos en los embalses. Se señala que existen 3 procesos fundamentales en cuanto a los posibles riesgos de emitir GEIS. En primer lugar, se encuentra el periodo inicial del proyecto, vale decir su etapa de diseño. Hace referencia al territorio o mejor dicho el tipo de ecosistema en el cual se quiere construir el hidro-embalse y si este está apto o no para sostener y remediar los impactos ambientales generados, refiérase a la pérdida de conectividad de los tramos del río y su consiguiente fragmentación. En segundo lugar, se encuentra el proceso de construcción, en donde se asocia las emisiones de GEIS primordialmente con el traslado, uso de maquinarias y construcción de la presa. Finalmente, cuando las centrales ya están en operación, se generan los gases por medio del metabolismo de las bacterias metanogénicas a través de la acumulación de MO en el cuerpo de agua.

Según Rodríguez et al., (2014), tradicionalmente, la gestión de los embalses se ha centrado en la satisfacción de los usos consuntivos y no consuntivos, y no se ha prestado la atención necesaria a los procesos que influyen en su estado ecológico y químico y a la influencia sobre la calidad aguas abajo. Si bien los embalses son sistemas creados por el ser humano, para gestionarlos de forma adecuada hay que ir más allá del concepto de un volumen de agua retenido por una presa.

5.5.2 Medidas de mitigación

De acuerdo a las metodologías propuestas por (Vilhena, 2003; Rodriguez, 2014) se proponen las siguientes medidas para la etapa de diseño:

Etapa de diseño:

- Estudios de teledetección (modelo digital de profundidades), en el cual se propone una nueva metodología de interpolación TIN mediante espirales, cuya finalidad recae en decidir cuál es el sitio más apto para la ejecución de los proyectos.
- Los criterios utilizados para la interpolación se basan en el tipo de sedimentología que caracteriza el fondo del embalse. Esta opción surge como una alternativa sustentable para evaluar cómo se comportarían los embalses en un futuro al modelar distintos escenarios de transporte de sedimentos y acumulación de nutrientes.
- Se sugiere que en la etapa de diseño se consideren obligatoriamente estudios geomorfológicos específicos para cada ecosistema, ya que las propiedades del sedimento y del suelo van cambiando según las condiciones climáticas y geológicas del territorio.
- Para ello se debe identificar el tipo de suelo que caracteriza al área de construcción y a la cuenca de drenaje. Evaluar variables como la capacidad de infiltración, la erosión, los tipos de suelo que lo componen, así como sus usos y el tipo de sedimento que lo caracteriza.
- Limpiar la vegetación lignosa de la zona del reservorio antes de inundarla para evitar la acumulación de MO en el embalse.
- Se recomienda calcular la eficiencia de atrape (η_A) de los embalses, que hace referencia a la capacidad que tiene el cuerpo de agua de atrapar el sedimento respecto al volumen anual de descarga del río (VDR) en m^3 .

Concorde a la metodología planteada por (Guevara, 2000; Córdoba, 2016) se propone lo siguiente para la etapa de construcción y operación:

Etapa de construcción:

- Cultivar las laderas en fajas o terrazas para retrasar el escurrimiento y mermar la erosión de la cuenca con el fin de reducir el aporte de sedimentos al embalse.
- Construir pequeñas presas (contra embalses) de retención en las laderas a modo de amortiguar la fragmentación y la pérdida de conectividad del río producto de la presa principal. Facilitando la mantención de las condiciones naturales del río en cuanto a la degradación de materia orgánica.
- Construir trampas de sedimentos en los afluentes al embalse.
- Construir vertedero de aireación, para ventilar naturalmente el embalse por oscilación de niveles del agua y eventualmente usar aireación artificial, por ejemplo, haciendo inyecciones de oxígeno a modo de evitar la producción de metano por aguas de tipo anóxicas.

Etapa de operación:

- Se recomienda levantar información en cuanto a el estado trófico de los embalses. Esto es de vital importancia para evaluar la calidad de las aguas y determinar su carga de nutrientes.
- También otorga una visión general del ecosistema en cuanto a sus dinámicas biogeoquímicas, principalmente la presencia de oxígeno en el fondo del embalse junto el fósforo y el nitrógeno precursor de la eutrofización.
- Remoción de sedimentos finos/ Limitar el tiempo de retención del agua en el reservorio
- Instalar salidas a diferentes niveles para evitar la descarga del agua sin oxígeno y controlar el uso de la tierra en la cuenca hidrográfica, con esto se refiere a prevenir, especialmente la deforestación tanto para la agricultura como industrias forestales en lugares aledaños al embalse.
- Eliminar, hidráulicamente, los sedimentos (lavado, corrientes de agua, liberación de corrientes de alta densidad).

5.5.3 Factores que inciden en la sustentabilidad de proyectos hidroeléctricos

Por la naturaleza del tema bajo estudio, no todo el material encontrado tiene origen académico; varios ejemplos de aplicaciones de algunos estándares provienen de la misma organización proponente de tal estándar. Conforme a la investigación de (Muñoz González, 2020), esta expone que; los principales factores que inciden en la sustentabilidad de los proyectos hidroeléctricos son: medioambientales, social-culturales, políticos organizacionales, económicos y finalmente aspectos técnicos. Esto no quiere decir que sean excluyentes, vale decir, es posible que surjan nuevos aspectos implicados en la sustentabilidad.

5.5.4 Directrices Internacionales

A nivel mundial existen directrices que regulan mediante diferentes criterios la sustentabilidad de las cuencas hidrográficas y sus respectivos usos del suelo, estos estándares incluyen una serie de condiciones y pasos previos a la decisión sobre proyectos hidroeléctricos que deben ser considerados en la política eléctrica nacional. Estas orientaciones aseguran la ejecución de prácticas sustentables coherentes con las necesidades de cada territorio.

i Protocolo de Evaluación de la Sustentabilidad de la Hidroelectricidad (HSAP)

El Protocolo es un instrumento voluntario e internacional para evaluar el desempeño de proyectos hidroeléctricos acorde a un grupo de criterios de sustentabilidad que abarcan temas ambientales, sociales, técnicos y financieros. Corresponde a parámetros de evaluación o de auditoría de la sustentabilidad en el desarrollo o la operación de proyectos hidroeléctricos específicos. Tiene como objetivo crear un perfil de sustentabilidad para el proyecto, en la etapa de desarrollo evaluada, lo que permite generar las herramientas necesarias para mejorar las prácticas asociadas a aquellos temas más débiles. El protocolo no establece criterios de sustentabilidad claros, sino más bien un procedimiento de implementación en el cual se establecen una serie de tópicos transversales a la sustentabilidad (corrupción, género, manejo integrado de cuencas, medios de sustento, proyectos multipropósitos y transparencia).

ii Estándares de Sustentabilidad de la Corporación Financiera Internacional (IFC)

La Corporación Financiera Internacional (IFC, por su sigla en inglés), agencia del Banco Mundial, aplica un conjunto de Normas de Desempeño, de modo que los proyectos del sector privado que financia no generen problemas con los ecosistemas afectados en su ejecución. Según este esquema, un desempeño correcto involucra buscar la sustentabilidad social y ambiental de tales proyectos, examinándolos a la luz de ocho Normas de Desempeño.

iii Estándar Técnico GreenHydro

Por último, a nivel de instancias privadas, está el Instituto Federal Suizo de Ciencias y Tecnologías Acuáticas (EAWAG), con cooperación de científicos, empresas generadoras de electricidad y empresas distribuidoras de electricidad desarrollaron el GreenHydro, que es un estándar certificable, siendo valorado y apoyado por empresas generadoras, distribuidoras, asociaciones de consumidores y ONGs ambientalistas. La certificación busca asegurar que el proyecto fue diseñado y será operado de manera de salvaguardar las características básicas y la integridad ecológica de la cuenca en la que se encuentra ubicado.

iv Guías de Buenas Prácticas de la Comisión Mundial de Represas (WCD)

Otra fuente normativa la integran los documentos generados por la WCD, que establecen directrices y presentan estrategias tendientes a alcanzar la sustentabilidad de los sectores agua y energía. En general estos documentos consideran una planificación a la escala de cuenca hidrográfica y todos los usos de los recursos hídricos. También incluyen una guía que busca informar a la ciudadanía y ONGs sobre todo el ciclo de vida de una central hidroeléctrica, tratando entre otros tópicos los impactos ambientales y sociales asociados a la construcción, operación y cierre de las centrales. Para finalizar se recomienda a los proponentes de los proyectos evaluar la pertinencia de iniciar los procedimientos para realizar un monitoreo de emisiones en embalses operando usando la Guía UNESCO/IHA GHG, Guías de Medición de GEI para Embalses de Agua Dulce.

5.6 Discusión

En cuanto a la validez de los resultados, estos pudiesen tener un sesgo estadístico, debido a dos factores. El primero hace referencia a que el conjunto de datos muestreados, vale decir, los 7 años considerados no son representativos en cuanto a la estacionalidad puesto que el intervalo es pequeño. Por lo que se recomienda seguir el monitoreo de las concentraciones de GEIS en los embalses asociados a la generación eléctrica de alto Biobío.

El segundo factor a considerar hace referencia al conjunto de datos, se debieron eliminar posibles datos representativos puesto que los análisis estadísticos realizados exigen coherencia de la matriz de datos (Anexo 2). En tal caso, solo se consideraron los años de muestreo que contemplaban todas las variables (2017, 2018, 2019, 2021, 2022). Un aspecto fundamental a discutir es si las concentraciones detectadas en las aguas superficiales de los embalses serían significativas. Para determinar aquel supuesto se deben incluir los flujos ebulitivos, difusivos y por desgasificación de ambos gases, e incluir en los procedimientos matemáticos variables como la humedad y la velocidad del viento en base a las metodologías expuestas por (Alcoser, 2020; Lopera, 2016; León, 2012; entre otros).

Por su parte, se destaca que los embalses de uso hidroeléctrico emplazados en el hemisferio sur, particularmente en el centro sur de Chile, región del Biobío, pueden ser potenciales emisores de GEIS dado las concentraciones disueltas detectadas en el agua superficial de los embalses construidos en la cuenca (ER, EP y EA). En cuanto a los usos del suelo de la cuenca y su relación con los embalses de uso hidroeléctrico, estos fueron obtenidos del programa de monitoreo del río Biobío (PMBB), los principales usos del suelo en la cuenca son: forestación, agricultura, recreación y turismo, asentamientos urbanos e industriales y áreas de protección ecológica. Los usos del suelo asociados a estas actividades y la planificación del territorio en su conjunto, representan un riesgo ambiental para aquellos ecosistemas más vulnerables si no existen directrices coherentes y sustentables con el medio ambiente.

Dentro de esos ecosistemas vulnerables se encuentran los bosques de riberas y la biodiversidad endémica que sustenta a los sistemas naturales. A pesar de la importancia de estos bosques en las diferentes cuencas y microcuencas, existen pocos estudios que permitan evidenciar los efectos que ejercen su fragmentación y degradación (Delgado, 2015). El estudio de la condición ecológica de las riberas constituye un elemento relevante en el análisis integral de los ríos y arroyos, estos corresponden a uno de los tipos de ecosistemas más afectados por las actividades humanas, los cuales han sido muy alterados respecto al estado natural que debieran mantener (Kutschker *et al.*, 2009). Diferentes actividades antrópicas pueden generar procesos que podrían generar un impacto al ecosistema. De acuerdo con Álvarez (2006), algunas de esas actividades son:

- El arrastre superficial de contaminantes.
- La erosión del suelo en consecuencia de la deforestación y la agricultura.
- La transformación de los patrones climáticos.
- Eutrofización/ contaminación de los cuerpos de agua.
- Fragmentación de los ríos, entre otras.

Según Andre *et al* (s.f), la composición química natural de las aguas puede verse alterada debido a la incorporación de sustancias de diferente naturaleza a través de vertidos de aguas residuales o debido al paso de las aguas por terrenos tratados con productos agroquímicos o contaminados. O bien a través de procesos biogeoquímicos como la metanogénesis. Es por ello que resulta fundamental conocer las dinámicas estacionales de los GEIS en embalses ubicados en climas templados, para proponer medidas de mitigación y/o compensación en el caso que corresponda.

Este trabajo es importante al generar información respecto los compromisos de Chile con el programa de las Naciones Unidas (COP) en relación a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Al respecto puede ser un aporte al objetivo 6, 7 y 13 según:

Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.

Descripción:

- ✓ Meta 1: Mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial.

Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante.

Descripción: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna.

- ✓ Meta 1: Ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo

Objetivo 13: Acción por el clima

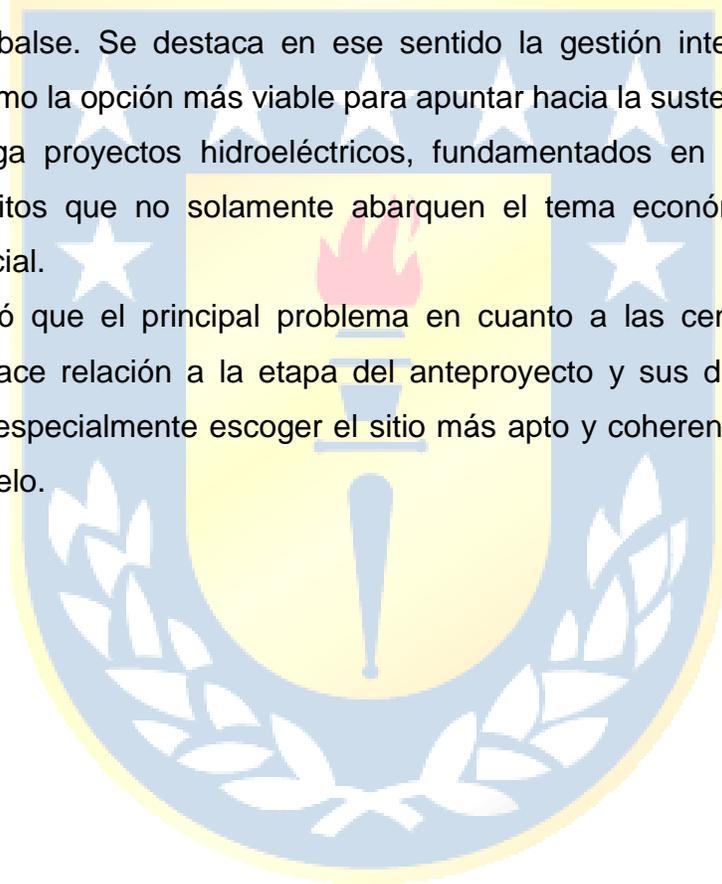
Descripción: Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales

- ✓ Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países.

6. Conclusión

- i. Se detectaron concentraciones de GEIS en las aguas superficiales de los embalses asociados a la producción hidroeléctrica de alto Biobío; Ralco, Pangue y Angostura. En particular, CH₄ y CO₂.
- ii. Se identificaron comportamientos estacionales para ambos gases durante el invierno, primavera y verano para el periodo comprendido entre 2016-2022.
- iii. La estacionalidad característica que se observó para el gas CH₄ y el CO₂ se define por presentar concentraciones más bajas durante el invierno, mientras que en el transcurso de la primavera hacia el verano tiende a aumentar considerablemente.
- iv. Existen diferencias significativas entre el invierno y el verano ($p=0.0016$), y entre el invierno y la primavera ($p=0.056$) en cuanto a las concentraciones de CH₄ y CO₂.
- v. El embalse Angostura, ubicado a una altitud de 299 m.s.n.m presentó las concentraciones más altas de gas CH₄ en sus aguas superficiales durante el verano (434 nM), patrón que se repite en los 7 años de muestreo. En ese sentido se destaca que el embalse Angostura tiende a acumular el gas CH₄ durante la primavera.
- vi. No existen diferencias significativas en cuanto a localidad a la que pertenecen las variables, por lo que los embalses estudiados tienden a comportarse de forma similar durante el transcurso de las estaciones estudiadas.
- vii. No hay una relación lineal entre los GEIS y variables de calidad de agua, sin embargo, el tipo de relación que caracteriza al conjunto de datos se fundamenta en una relación multivariada, donde, la conjunción de dos o más variables determinarían el desarrollo de un evento, tal es el caso de la metanogénesis o la eutrofización.
- viii. Existen dos componentes principales que describen la varianza de la estacionalidad en un 51%. Específicamente el componente NO₃⁻ (CP1=30%) y el CO₂ (CP2=21%).

- ix. La primavera se caracterizó por la presencia de PO_4^{3-} y el pH, mientras el invierno se distinguió por presentar una importante influencia de carga orgánica, asociada al NO_3^- y N(total). En tercer y último lugar, el verano estuvo determinado por la presencia de los gases, CO_2 , CH_4 y temperatura.
- x. Existen una serie de medidas a nivel internacional, ya sea certificaciones, modelos ingenieriles o propuestas ciudadanas para mitigar y compensar los impactos ambientales documentados de las centrales hidroeléctricas de tipo embalse. Se destaca en ese sentido la gestión integrada de cuencas como la opción más viable para apuntar hacia la sustentabilidad de los mega proyectos hidroeléctricos, fundamentados en proyectos multipropósitos que no solamente abarquen el tema económico sino también social.
- xi. Se identificó que el principal problema en cuanto a las centrales de embalse, hace relación a la etapa del anteproyecto y sus diseños de operación, especialmente escoger el sitio más apto y coherente con los usos del suelo.



6.1 Recomendaciones futuras

Para reforzar y analizar en profundidad las relaciones entre los flujos difusivos, ebullitivos y por desgasificación de los hidro-embalses bajo estudio (ER, EP y EA), se sugiere considerar lo siguiente:

- Se sugiere realizar estudios que contemplen los flujos ebullitivos y por desgasificación aguas abajo del embalse dado que, para poder evaluar con certeza la magnitud de las emisiones se deben contemplar todos los flujos asociados a los gases. Tanto en el agua superficial, como en los sedimentos acuáticos y finalmente los liberados por las turbinas corriente abajo.
- Por otra parte, se aconseja incorporar variables de interés como el oxígeno disuelto, la humedad, la velocidad del viento y la productividad primaria del ecosistema, a modo de evaluar las dinámicas de oxidación de metano y su posterior liberación hacia la atmósfera.
- Se recomienda evaluar la conectividad entre los puntos de las centrales hidroeléctricas y partes del río no intervenidas, a modo de comparar los rangos de CH_4 y CO_2 aguas abajo y aguas arriba del embalse.
- Se hace necesario incorporar a la matriz de datos al gas óxido nitroso N_2O dado que, según la bibliografía recopilada es un GEI más potente que el CH_4 y el CO_2 . A modo de identificar si existen tales concentraciones en el agua superficial de los objetos de estudio.
- En ese sentido, toma gran relevancia nuevos lineamientos en cuanto a la gestión del recurso hídrico, vale decir, incluir en los estudios actuales la mayor cantidad de variables (usos del suelo, erosión del suelo, gases, entre otras) que pudiesen describir la integralidad del ecosistema.

7. Referencias bibliográficas

- Abril, G. G.-L. (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) p.
- Agostinho, A.A., Pelicice, F.M y Gomes, L.C. (2008). Dams and the fish fauna of the Neotropical region: impacts and management related to diversity and fisheries. *Braz. J. Biol*, 68 (4), 1119–1132.
- Agostinho, A.A., Gomes, L.C., Santos, N.C.L., Ortega, J.C.G y Pelicice, F.M. (2016). Fish assemblages in Neotropical reservoirs: colonization patterns, impacts and management. *Fish. Res*, 173, 26–36.
- Alcocer, J., Vargas, M., Kato, E., & Oseguera-Pérez, L. A. (2020). Carbono en ecosistemas acuáticos epicontinentales: una visión para el desarrollo de políticas públicas. *Elementos para Políticas Públicas*, 4(1), 1-12.
- Alvarado, R., Ramírez-Vives, F., Fernández, F. J., & Barriga-Sosa, I. (2005). Methanogenesis and methane oxidation in wetlands: implications in the global carbon cycle. *Hidrobiológica*, 15(3), 327-349.
- Álvarez Cobelas, M., Catalán, J., & García de Jalón, D. (2006). Impactos sobre los ecosistemas acuáticos continentales.
- Andre, I. J., & Carmouze, J. L., s.f). VI Características Físico – Químicas del Agua. [Archivo en PDF]. Recuperado de http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers08-10/36611.pdf.
- Ballesteros, H. B. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. Bogotá, Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. Subdirección de Meteorología, 96p.
- Bauer, C. J. (2009). Dams and markets: Rivers and electric power in Chile. *Natural Resources Journal*, 583-651p.
- Bolle, H. J. (1986). Other greenhouse gases and aerosols: assessing their role for atmospheric radiative transfer. *The Greenhouse Effect, Climatic change and Ecosystems*.
- Briones Hidrovo, A. U. (2019). Metodología para la determinación del desempeño ambiental neto de la generación hidroeléctrica. Universidad de Zaragoza.
- Caamaño, D. (2019). Caracterización de cambios morfológicos en la parte media del río Biobío. Universidad Católica de la Santísima Concepción. 5 pp
- Caffrey, J. M. (2007). Ammonia oxidation and ammonia-oxidizing bacteria and archaea from estuaries with differing histories of hypoxia. *ISME Journal*, 1(7), 660-662.
- Camporeale, C., Perona, P., Porporato, A., & Ridolfi, L. (2005). On the long-term behavior of meandering rivers. *Water resources research*, 41(12)p
- Castro-González, M., & Torres-Valdés, V. (2015). Gases invernadero en aguas con bajo oxígeno en el reservorio eutrófico de Prado (Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39(152), 399-407.

- Córdova Carmen, J. J. (2016). Diseño de embalse teniendo en consideración los impactos ambientales. 61 pp
- Cruz Miranda, L. J. (2022). Evaluación del efecto del cambio climático en el recurso hídrico de la laguna de Piuray en la microcuenca de Piuray (Chincheros, Cusco). *Tesis doctoral*.
- Cuatecontzi, D. H., & Gasca, J. (2004). Los gases regulados por la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. *Cambio climático: una visión desde México*, 87 pp.
- Delgado, E. L. (2015). Evaluación de la calidad del bosque de ribera, utilizando un método simple y rápido en dos ríos de bosque seco tropical (Tolima, Colombia). *Revista Tumbaga*, 1(10).
- De la Luz Espinosa-Fuentes, M., Peralta, O., Castro, T., & Valdespino, P. M (2015). Ciclos Biogeoquímicos. 35 pp.
- DelSontro, T. M. (2010). Extreme methane emissions from a Swiss hydropower reservoir: contribution from bubbling sediments. *Environmental science & technology*, 44(7), 2419-2425.
- Demarty, M. B. (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.
- Diem, T. K. (2012). Greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄, and N₂O) from several perialpine and alpine hydropower reservoirs by diffusion and loss in turbines. *Aquatic sciences*, 74(3), 619-635.
- Dirección general de aguas, D. (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. MOP.
- Dixon, R. S. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263: 185-190.
- Duchemin, E. L. (2000). Greenhouse gases emissions from a 21 years old tropical hydroelectric reservoir, representativity for large scale and long term estimation. *Veranlundgen Int Vereinigung Theor Angew Limnol*, 27, 1391.
- Duque-Grisales, E. A.-M.-G. (2014). Aplicación del mercado de carbono en pequeñas centrales hidroeléctricas. *Energética*, (44), 19-32.
- Energía, C. n. (2020). Análisis de la Estadística Hidrológica utilizada en los procesos de la Comisión Nacional de Energía. 127 pp.
- Energía, M. d. (2016). Anuario Estadístico de Energía. Comisión Nacional de Energía (CNE), 146 pp.
- Energía, M. d. (2016). Estudio de cuencas. Análisis de las condicionantes para el desarrollo hidroeléctrico en las cuencas del Maule, Biobío, Toltén, Valdivia, Bueno, Puelo, Yelcho, Palena, Cisnes, Aysén, Baker y Pascua. Gobierno de Chile, Santiago, 22-23.
- Enrich Prast, A. G. (2018). Cambios Globales e ciclos biogeoquímicos. 111-125.
- Esteves, F. D. (2011). Fundamentos de limnología, 3.º ed. Rio de Janeiro. Interciência, 826 pp.

- Fearnside, P. (2004). Green House gas emissions from hy-droelectric dams : Controversies provide a springboard for rethinking a supposedly 'clean' energy source. *Climate Change* , 66,1-8.
- Fuenzalida, Humberto, Villagrán, Carolina, Bernal, Patricio, Fuentes, Eduardo, Santibáñez, Fernando, Peña, Humberto & Rutllant, José. (1989). Cambio climático global y eventuales efectos en Chile. *Ambient. Desarro*, 2, 37-42.
- Galván J., L. A. (2014). Procesos, bacterias y arqueobacterias involucrados en el ciclo biológico del nitrógeno para la eliminación de compuestos nitrogenados en ecosistemas de agua dulce, una revisión sistemática. *Hechos Microbiológicos*, 4(1), 34–51.
- García Maldonado, J. Q. (2014). Producción de metano en ambientes hipersalinos: diversidad microbiana, estructura y función de la comunidad de arqueas metanógenas. 94 pp
- Gregory SP, D. P. (2012). Nitrogen removal and changes to microbial communities in model flood/drain and submerged bio-filters treating aquaculture wastewater. *Aquac Eng* , 50(0): 37-45.
- Guevara, M. (2000). Embalses. En *Estructuras Hidráulicas* (págs. 1-31). Obtenido de http://www.academia.edu/7223828/Obras_hidraulicas_Embalses
- Herrera, J., Rojas, J. F., Rodríguez, S., Rojas, A., & Beita, V. H. (2013). Determinación de emisiones de metano en tres embalses hidroeléctricos en Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 46(1), 27-36.
- Höhl, J. (2018). Hidroelectricidad y pueblos indígenas: un análisis del megaproyecto Ralco en la región Biobío, Chile. *Agua y disputas territoriales en Chile y Colombia*, 297-334.
- Houghton, R. y. (1989). Global climate change. *Scientific American*, 260(4):36-40.
- Houweling, S. (2000). Global modeling of atmospheric methane sources and sinks. PhD thesis.
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2022). Boletín informativo del INE. Gobierno de Chile
- IPCC. (2006). Apéndice 3, Emisiones de CH₄ provenientes de tierras inundadas: Base para su futuro desarrollo metodológico. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero., Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. 1–8 pp.
- IPCC. (2013). Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. The physical science basis.
- Jaramillo, V. J. (2004). El ciclo global del carbono. *Cambio climático: una visión desde México*, 77.
- Jin, H., Yoon, T. K., Begum, M. S., Lee, E. J., Oh, N. H., Kang, N., & Park, J. H. (2018). Longitudinal discontinuities in riverine greenhouse gas dynamics generated by dams and urban wastewater. *Biogeosciences*, 15(20), 6349-6369.
- Killingtveit, Å. (2014). Hydroelectric power. In *Future Energy*, elsevier, pp. 453-470.
- Lagomarsino, L. B. (2019). ¿Qué son" los nutrientes" en los ecosistemas acuáticos?.

- Lashof, D. y. (1990). Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature*, 529-531.
- León, J. G., Guérin, F., Melo, E. L., & Loaiza, S. (2012). Adaptaciones metodológicas de muestreo para la cuantificación de gases de efecto invernadero en embalses de montaña. *Acta Agronómica*, 61(5), 11-12.
- Lima, I. B. (2008). Methane Emissions from Large Dams as Renewable Energy Sources: A Developing Nation Perspective, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Chang. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 13(2), 193-206.
- Liu, J. X. (2021). Spatial and temporal variability of dissolved methane concentrations and diffusive emissions in the Three Gorges Reservoir. *Water Research*, 207, 117788.
- Lopera, L. M., Rodríguez-Loaiza, D. C., & Peñuela, G. A. (2016). Aplicación de ensayos en discontinuo para la determinación de flujos de metano y dióxido de carbono en la degradación del material vegetal en el embalse Topocoro. *Ingenierías USBMed*, 7(2), 67-73.
- Lyu, Z. S. (2018). Methanogenesis. *Current Biology*, 28(13), R727-R732.
- Masera, O. R. (1995). Carbon mitigation scenarios for Mexican forests: methodological considerations and results. *Interciencia*, 20(6), 388-436.
- Ministerio de medio ambiente (2014). Plan de adaptación del cambio climático. Elaborado en el marco del Plan de Acción Nacional de Cambio Climático, 6p.
- Moreta Pozo, J. C. (2011). La eutrofización de los lagos y sus consecuencias. Ibarra 2008.
- Muñoz, H. O. (2015). Relación entre oxígeno disuelto, precipitación pluvial y temperatura: río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(5), 59-74.
- Nilsson, C., Reidy, C.A., Dynesius, M y Revenga, C. (2005). Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 308(5720), 405-408.
- Organización de las Naciones Unidas (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. <https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/BDL/2009/6907.pdf>.
- Nisbet, E. G. (2014). Methane on the rise—again. *Science*, 343(6170), 493-495.
- Ometto, J. P. (2013). Carbon emission as a function of energy generation in hydroelectric reservoirs in Brazilian dry tropical biome. *Energy policy*, 109-116.
- Ortega, J. A. (2014). Recent human impacts and change in dynamics and morphology of ephemeral rivers. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(3), 713-730.
- Osorio, J. F. (2008). Energía hidroeléctrica. Universidad de Zaragoza., (Vol. 139).
- Palau, A. &. (2009). Hidroelectricidad, embalses y cambio climático. . *Ingeniería Del Agua*, 16(4), 311–324.
- Palau, A. A. (2010). Análisis del ciclo de carbono en embalses y su posible efecto en el cambio climático. Aplicación al embalse de Susqueda (río Ter, NE España). *Ingeniería del agua*, 17(3), 247-255.
- Palau, A. y. (2008). Embalses y Cambio Climático. Monografía de Endesa. Dirección de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 47 pp.

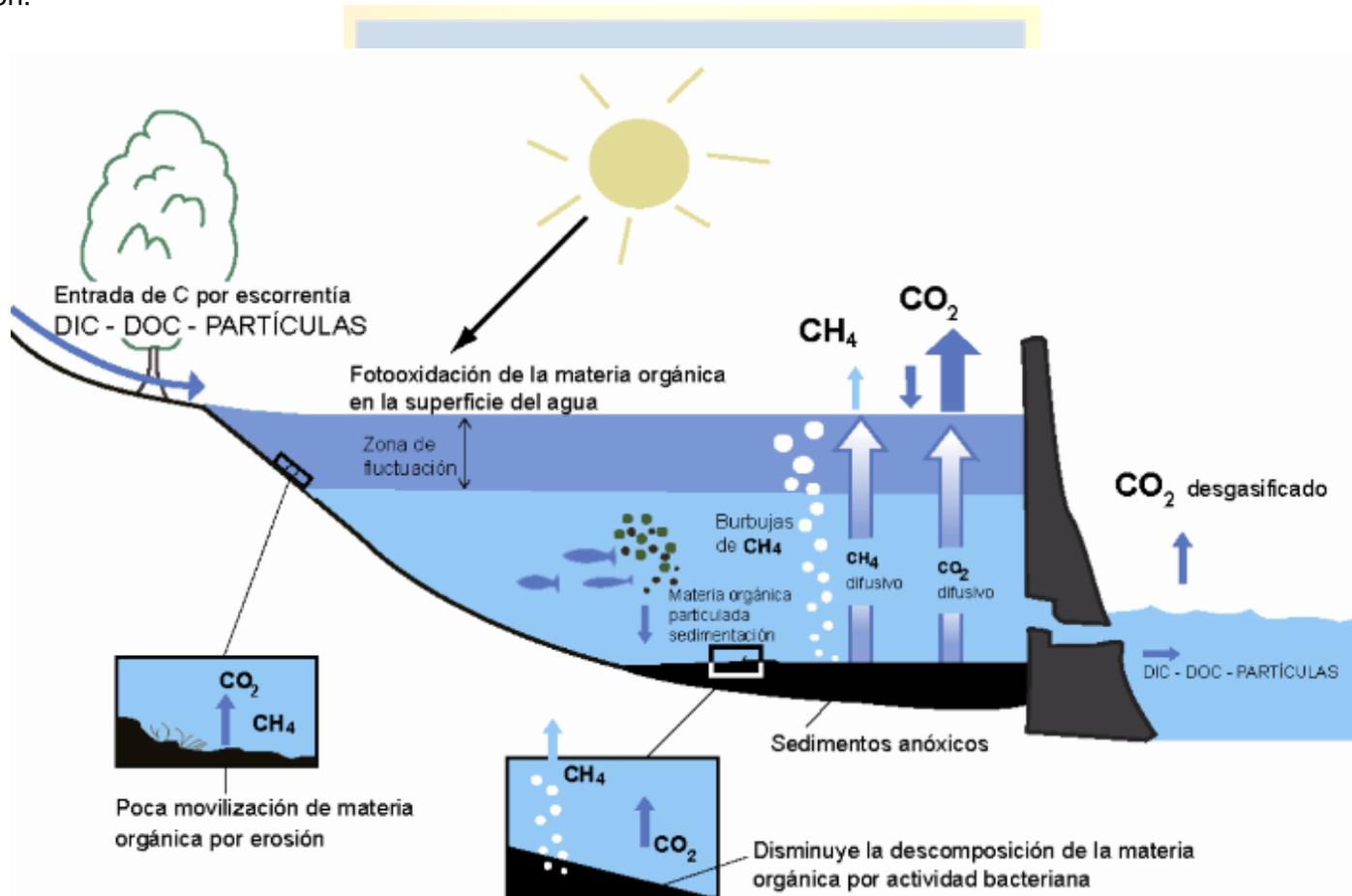
- Parekh, P. (2011). Avances en el campo de las emisiones de embalses. Un informe sobre la investigación y las directrices recientes. International Rivers, Berkeley, 15 pp.
- Parra, O. R. (2013). Programa de monitoreo de la calidad del agua del sistema rio Biobío 1994 – 2012: Aplicación del Anteproyecto de Norma Secundaria de la Calidad Ambiental (NSCA) del río Biobío. Editorial Universidad de Concepción, Chile.
- Pérez, M. E. (2011). Estudio de los principales procesos que originan emisiones de gases a la atmósfera. Ciencias Holguín, 17(1), 1-9.
- Porto, M., Branco, S., Luca, S. (1991). Caracterización de Calidad de Agua. En: Porto, R. L. L.; Branco, S.; Cleary, R. et al. Hidrología Ambiental. v.3. Sao Paulo: Edusp: Asociación Brasileira de Recursos Hídricos.
- Ramírez, J. H. M. (2017). Cambios en las poblaciones de bacterias metanogénicas y en la fermentación ruminal de bovinos alimentados bajo diferentes estrategias de alimentación (*Doctoral dissertation, universidad autónoma de chapingo*).
- Rengifo, O. D. (2011). Estudio de metodologías para estimar emisiones de GEI por embalses. Medellín, Colombia.
- Ribera Arismendi, M. O. (2018). Las mega represas no son energía limpia. Ecología en Bolivia, 53(1), 1-6.
- Rodríguez-Téllez, E., Domínguez-Calleros, P. A., Pompa-García, M., Quiroz-Arratia, J. A., & Pérez López, M. E. (2012). Calidad del bosque de ribera del río El Tunal, Durango, México; mediante la aplicación del índice QBR. *Gayana. Botánica*, 69(1), 147-151.
- Roldán Pérez, G y Ramírez Restrepo, J. (2008). Fundamentos de Limnología neotropical. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Rosa, L. P, & Schaeffer, R. (1995). Global warming potentials: The case of emissions from dams. *Energy Policy*, 23(2), 149-158.
- Rosentreter, J. A. (2021). Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. *Nature Geoscience*, 14(4), 225-230.
- Rust, F. B. (2022). Modeling the spatial and temporal variability in surface water CO₂ and CH₄ concentrations in a newly created complex of boreal hydroelectric reservoirs. *Science of The Total Environment*, 815, 152459.
- Sanz Osorio, J. (2016). Energía Hidroeléctrica. España: Prensas de la Universidad de Zaragoza. UNE.
- Saunois, M. e. (2016). The global methane budget 2000–2012. *Earth Syst*, 8(2), 697-751.
- Schimel, D. (1995). Terrestrial ecosystems and the carbon cycle: *Global Change Biology*. 1: 77-91.
- Schoell, M. (1988). Multiple origins of methane in the earth. *Chemical Geology*. 71: 1-10
- Shugar, D. H., Clague, J. J., Best, J. L., Schoof, C., Willis, M. J., Copland, L., & Roe, G. H. (2017). River piracy and drainage basin reorganization led by climate-driven glacier retreat. *Nature Geoscience*, 10(5), 370-375.
- Schneider, S. (1989). The greenhouse effect: science and policy. *Science*, 243(10), 271-281.

- Schulz, S., Matsuyama, H., & Conrad, R. (1997). Temperature dependence of methane production from different precursors in a profundal sediment (Lake Constance). *FEMS Microbiology Ecology*, 22(3), 207-213.
- Schumm, S. A. (1968). River adjustment to altered hydrologic regimen, Murrumbidgee River and paleochannels, Australia. US Government Printing Office, Vol. 598.
- Surian, N. &. (2003). Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology*, 50(4), 307-326.
- Weisser, D. (2007). A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *Energy*, 32(9), 1543–1559.
- Zhu, Y., Purdy, K. J., Eyice, Ö., Shen, L., Harpenslager, S. F., Yvon-Durocher, G., ... & Trimmer, M. (2020). Disproportionate increase in freshwater methane emissions induced by experimental warming. *Nature Climate Change*, 10(7), 685-690.



Anexos

En el Anexo 1 se muestra y explica visualmente el proceso para un embalse con una actividad de maduración superior a los 10 años en operación.



Anexo 1: Emisiones de GEI en embalses templados y boreales, según los años transcurridos desde la primera inundación.

Fuente: Palau y Alonso, 2008.

Anexo 2: Matriz de datos utilizada en el análisis exploratorio de datos.

Estacionalidad	Fecha	Localidad	Metano	Dióxido	pH	Tº	Nitrato	Nitrito	N (total)	P (total)	Fosfato
Primavera	dic-16	ER	5.2	84.2	7.62	19.6	0.03	0.0075	0.09	-	0.02
Primavera	dic-16	EP	5.9	120.3	7.45	19	0.01	0.0075	0.07	-	0.02
Primavera	dic-16	EA	5.5	311.4	6.73	19.3	0.03	0.0075	0.06	-	0.02
Verano	mar-17	ER	70.98	15.56	7.18	20.1	0.02	0.0075	0.07	0.02	0.02
Verano	mar-17	EP	54.59	7.32	7.16	17.8	0.11	0.0075	0.1	0.02	0.02
Verano	mar-17	EA	251.75	9.53	6.79	17.7	0.03	0.0075	0.08	0.03	0.02
Invierno	ago-17	ER	79.5	117.62	7.14	7.4	0.41	0.0075	0.19	0.05	0.02
Invierno	ago-17	EP	355.6	112.16	6.93	6.3	0.07	0.0075	0.08	0.01	0.02
Invierno	ago-17	EA	101	91.36	6.63	7	0.07	0.0075	0.07	0.02	0.02
Primavera	dic-17	ER	104.8	239.03	7.15	19.5	0.07	0.0075	0.05	0.01	0.02
Primavera	dic-17	EP	145.1	253.33	6.77	15.8	0.0025	0.0075	0.01	0.02	0.02
Primavera	dic-17	EA	162.2	215.18	6.69	20.1	0.01	0.0075	0.02	0.005	0.02
Verano	mar-18	ER	53.28	1368.6	6.69	18.7	0.05	0.0075	0.08	0.01	0.02
Verano	mar-18	EP	57.88	1286.19	6.72	16.5	0.07	0.0075	0.12	0.005	0.02
Verano	mar-18	EA	434.68	1121.38	6.68	17.2	0.01	0.0075	0.08	0.005	0.02
Invierno	ago-18	ER	42.18	278.77	7.41	6.5	0.05	0.0075	0.1	0.02	0.02
Invierno	ago-18	EP	51.9	275.4	7.33	7.1	0.01	0.0075	0.1	0.04	0.02
Invierno	ago-18	EA	169.68	247.17	7.25	7	0.03	0.0075	0.08	0.005	0.02
Primavera	dic-18	ER	54.28	297.53	7.56	16.4	0.01	0.0075	0.1	0.005	0.02
Primavera	dic-18	EP	184.98	317.85	6.9	12.5	0.02	0.0075	0.04	0.005	0.02
Primavera	dic-18	EA	419.22	300.07	7.15	13.5	0.03	0.0075	0.05	0.05	0.02
Verano	mar-19	ER	140.9	492.3	7.33	17.4	0.012	0.0075	0.17	0.005	0.02
Verano	mar-19	EP	53.76	417.66	7.45	19.3	0.008	0.0075	0.19	0.01	0.02
Verano	mar-19	EA	352.4	450.8	7.56	18.7	0.021	0.0075	0.13	0.005	0.02
Invierno	ago-19	ER	158.9	313.53	7.11	7.1	0.155	0.0075	0.1	0.005	0.02
Invierno	ago-19	EP	190.56	228.7	7.16	7.1	0.174	0.0075	0.09	0.005	0.02

Invierno	ago-19	EA	337.1	356.4	7.02	8.4	0.189	0.0075	0.13	0.005	0.02
Primavera	dic-19	ER	58.23	338.3	-	-	0.006	0.0075	0.05	0.05	0.011
Primavera	dic-19	EP	153.1	274.13	-	-	0.01	0.0075	0.08	0.04	0.012
Primavera	dic-19	EA	244.9	276.36	-	-	0.016	0.0075	0.08	0.08	0.01
Invierno	ago-20	ER	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Invierno	ago-20	EP	-	-	6.96	6.7	0.039	0.0075	0.02	0.17	0.04
Invierno	ago-20	EA	-	-	7.54	7.1	0.159	0.0075	0.66	0.17	0.006
Primavera	dic-20	ER	-	-	7.71	19.4	0.0005	0.001	0.04	0.02	0.006
Primavera	dic-20	EP	-	-	7.56	16.8	0.002	0.001	0.06	0.005	0.006
Primavera	dic-20	EA	-	-	7.81	17.7	0.002	0.001	0.08	0.04	0.006
Invierno	ago-21	ER	47.267	265.2	-	-	0.025	0.025	0.1	0.005	0.006
Invierno	ago-21	EP	322.967	225.67	-	-	0.016	0.016	0.06	0.005	0.006
Invierno	ago-21	EA	117.367	225.767	-	-	0.003	0.0008	0.04	0.005	0.006
Primavera	dic-21	ER	-	-	7.54	19.2	0.001	0.0008	0.1	0.03	0.006
Primavera	dic-21	EP	98.1	270.2	7.52	16	0.0005	0.0008	0.01	0.03	0.006
Primavera	dic-21	EA	198.8	302.4	7.52	19.7	0.0005	0.006	0.1	0.03	0.006
Verano	mar-22	ER	147.9	429.6	6.95	19.2	0.0005	0.002	0.02	0.08	0.006
Verano	mar-22	EP	169.3	283.1	7.07	16.9	0.0005	0.0008	0.02	0.05	0.006
Verano	mar-22	EA	292.3	323.37	7.57	18.9	0.0005	0.0008	0.04	0.04	0.006
Invierno	ago-22	ER	43.3	268	-	-	0.0005	0.001	0.005	0.02	0.006
Invierno	ago-22	EP	338.3	271.7	-	-	0.0005	0.001	0.09	0.02	0.006
Invierno	ago-22	EA	124	250.1	-	-	0.0005	0.001	0.05	0.04	0.006
Primavera	dic-22	ER	140.9	492,2	7.25	20.9	0.0005	0.001	0.005	0.02	0.006
Primavera	dic-22	EP	53.76	417.6	7.03	16.6	0.0005	0.001	0.09	0.02	0.006
Primavera	dic-22	EA	352.4	450.8	7.1	18.9	0.0005	0.001	0.05	0.04	0.006

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3: Concentraciones de CH₄ de distintos embalses a nivel mundial.

Embalse	Ubicación	Rangos CH ₄ (uM)	Características del embalse	Tipo de Embalse
<i>Abril, Guérin, (2005). Carbon dioxide and methane emission and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir.</i>				
Petit-Saut Dam	Guayana francesa	0.1 ± 275 Epilimnium 0.3 ± 1300 Hipolimnion	-Altitud: 33 m.s.n.m/ Altura: 48 m -Superficie del embalse: 365 km ² -Uso: electricidad	Tropical
<i>Liu, Xiao, (2021). Spatial and temporal variability of dissolved methane concentrations and diffusive emissions in the Three Gorges Reservoir.</i>				
Tres gargantas	China	0.26 ± 0.19, Verano 0.24 ± 0.17, Invierno	-Altitud: 175 m.s.n.m/ Altura: 181 m -Superficie del embalse: 1084 km ² -Uso: Electricidad	Sub-tropical monzónico
<i>Diem, (2012). Greenhouse gas emissions CH₄ and CO₂ from several perialpine and alpine hydropower reservoirs by diffusion and loss in turbines.</i>				
Lake Wohlen	Suiza	0.52 ± 0.53, Primavera 0.49 ± 0.25, Verano	-Altitud: 481 m.s.n.m/ Altura: 29 m -Superficie del embalse: 3.65 km ² -Uso: Electricidad	Alpino
<i>Rust, F. B, (2022). Modeling the spatial and temporal variability in surface water CH₄ and CO₂ concentrations in a newly created complex of boreal hydroelectric reservoirs.</i>				
Romaine 1	Canadá	0.2 ± 0.2, Primavera 0.4 ± 0.6, Verano	-Altitud: 57 m.s.n.m/ Altura: 38 m -Superficie del embalse: 12,6 km ² -Uso: Electricidad	Boreal
Romaine 2			-Altitud: 107 m.s.n.m/ Altura: 109 m -Superficie del embalse: 85.8 km ² -Uso: Electricidad	
Romaine 3			-Altitud: 628 m.s.n.m/ Altura: 95 m -Superficie del embalse: 38.6 km ² -Uso: Electricidad	
<i>Jin, (2018). Longitudinal discontinuities in riverine greenhouse gas dynamics generated by dams and urban wastewater.</i>				

Soyang DAM	Corea del sur	0.059, Verano	-Altitud: 183 m.s.n.m /Altura: 123 m -Superficie del embalse: 70 km ² -Uso: Múltiples usos	Subtropical monzónico
<i>Liu, (2020). Spatial and temporal variability of methane emissions from cascading reservoirs in the Upper Mekong River.</i>				
Miaowuei	Meseta tibetana	1.40 ± 1.00, Invierno	-Altitud: 1408 m.s.n.m -Superficie del embalse: 17.5 km ² -Uso: Electricidad	Tropical monzónico
Gongguoqiao		0.60 ± 0.90, Invierno	-Altitud: 1307 m.s.n.m -Superficie del embalse: 12.96 km ² -Uso: Electricidad	
Manwan		1.60 ± 1.50, Invierno	-Altitud: 994 m.s.n.m -Superficie del embalse: 23.6 km ² -Uso: Electricidad	
Dachaoshan		0.40 ± 0.30, Invierno	-Altitud: 899 -Superficie del embalse: 30.1 km ² -Uso: Electricidad	
<i>El presente estudio:</i>				
Embalse Ralco	Chile	0.042 ± 0.16, Invierno 0.054 ± 0.14, Primavera 0.053 ± 0.15, Verano	-Altitud: 628 m.s.n.m/ Altura: 155 m -Superficie del embalse: 34.67 km ² -Uso: Electricidad	Templado húmedo
Embalse Pangue		0.051 ± 0.35, Invierno 0.053 ± 0.19, Primavera 0.053 ± 0.017, Verano	-Altitud: 540 m.s.n.m/ Altura: 113 m -Superficie del embalse: 14 km ² -Uso: Electricidad	
Embalse Angostura		0.10 ± 0.34, Invierno 0.16 ± 0.35, Primavera 0.24 ± 0.43, Verano	-Altitud: 614 m.s.n.m/ Altura: 50 m -Superficie del embalse: 6.41 km ² -Uso: Electricidad	

Fuente: Elaboración propia.

