Universidad Católica de Santa María

Escuela de Postgrado

Doctorado en Ciencias Ambientales

Impacto ambiental generado en la etapa de operación y cierre de represas en la cuenca del Río Sumbay, 2023

Tesis presentada por:

Linares Flores Castro, Antonio Erick

ORCID: 0000-0003-0506-2297

para optar el Grado Académico de Doctor en Ciencias Ambientales

Asesor:

Dr. Cuevas Arizaca, Edy Elar

ORCID: 0000-0001-5228-3901

Arequipa – Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ESCUELA DE POSTGRADO

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR DE TESIS

Arequipa, 01 de Abril del 2026

Dictamen: 009603-C-EPG-2026

Visto el borrador del expediente 009603, presentado por:

2022002401 - LINARES FLORES CASTRO ANTONIO ERICK

Titulado:

IMPACTO AMBIENTAL GENERADO EN LA ETAPA DE OPERACIÓN Y CIERRE DE REPRESAS EN LA CUENCA DEL RÍO SUMBAY, 2023

Nuestro dictamen es:

APROBADO

29634665 - ZEVALLOS GONZALES WILBERT FELIPE
DICTAMINADOR

40926859 - VALDIVIA LLERENA CESAR ALONSO RENATO
DICTAMINADOR

42394111 - COLLADO OPORTO CHRISTIAM GUILLERMO
DICTAMINADOR

45460900 - VERA REVILLA CINTYA YADIRA
DICTAMINADOR

29366739 - JIMENEZ PACHECO HUGO GUILLERMO
DICTAMINADOR

Impacto ambiental generado en la etapa de operación y cierre de represas en la cuenca del Río Sumbay, 2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%	14%	7%	4%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	es.slideshare.net Fuente de Internet	1%
2	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
3	repositorio.upct.es Fuente de Internet	<1%
4	pirhua.udep.edu.pe Fuente de Internet	<1%
5	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	<1%
6	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC Trabajo del estudiante	<1%
7	idoc.pub Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1%

DEDICATORIA

A mí madre que incondicionalmente me apoyó en todo momento para forjar mi felicidad y mis logros personales y profesionales.

A mi esposa Susana y a mis hijos Arianita y Samuelito para motivarlos a futuro a plantearse siempre retos y conseguir sus metas con entusiasmo, alegría y esfuerzo.

EPÍGRAFE

" Un hombre exitoso es el que es capaz de asentar una base con los ladrillos que otros le han tirado″.

David Brinkley

RESUMEN

En la Región Sur del Perú, el esquema hidráulico de la Cuenca del Río Sumbay contempla la presencia de una serie de obras, entre ellas, las más importantes son la "Represa Pillones" de 80 MMC y la "Represa Chalhuanca" de 25 MMC de capacidad; mientras que en la Cuenca del Chili se encuentra la "Represa Bamputañe" de 40 MMC de capacidad, la que se trasvasa a la Cuenca del Río Sumbay a través del Canal Bamputañe-Sumbay. Estos mega proyectos no solo tienen como finalidad el abastecimiento de agua y el uso agrícola, sino también forman parte de la generación de energía eléctrica, la cual se encuentra interconectada en todo el Perú. Todos estos megaproyectos contemplan la elaboración de un EIA, el mismo que es un documento muy completo que describe las características ambientales de un proyecto (represas) y tiene como finalidad proporcionar antecedentes para poder predecir, identificar e interpretar los posibles riesgos, pero fundamentalmente permite la toma de decisiones para evitar o minimizar sus efectos adversos. En tal sentido, todos los planes de mejora del EIA contemplan medidas que previenen y/o mitigan los impactos que se pueden originar durante el proceso de construcción; sin embargo, se descuida todos los impactos que se pueden generar durante la etapa de operación y cierre de las represas. La información desarrollada en el presente estudio, permitirá arribar a conclusiones sobre los impactos que puedan ocasionar la instalación y desarrollo de una acción o proyecto sobre el ecosistema, para implementar medidas de mitigación y monitoreo de los impactos, y proponer los planes de contingencia necesarios. Es primordial considerar que la evaluación a realizarse en la presente investigación facilitará poder tener un panorama más preciso de cómo la etapa de operación de las obras civiles que fueron ejecutadas entre los años de 2005 y 2014 influyen en la actualidad en el medio ambiente que los rodea.

Palabras Claves: Impacto ambiental, operación, represas.

ABSTRACT

In the Southern Region of Peru, the hydraulic scheme of the Sumbay River Basin contemplates the presence of a series of works, among them the most important are the "Pillones Dam" of 80 MMC and the "Chalhuanca Dam" of 25 MMC capacity; while in the Chili Basin there is the "Bamputañe Dam" of 40 MMC capacity, which is transferred to the Sumbay River Basin through the Bamputañe-Sumbay Canal. These mega projects are not only intended to supply water and agricultural use, but are also part of the generation of electrical energy, which is interconnected throughout Peru. All these megaprojects contemplate the preparation of an EIA, which is a very complete document that describes the environmental characteristics of a project (dams) and its purpose is to provide background information to predict, identify and interpret possible risks, but fundamentally it allows the decision making to avoid or minimize its adverse effects. In this regard, all EIA improvement plans contemplate measures that prevent and/or mitigate the impacts that may arise during the construction process; however, all the impacts that may be generated during the operation and closure stages of the dams are neglected. The information developed in this study will allow us to reach conclusions about the impacts that may be caused by the installation and development of an action or project on the ecosystem, to implement mitigation measures and monitoring of the impacts, and to propose the necessary contingency plans. It is essential to consider that the evaluation to be carried out in this research will facilitate having a more precise overview of how the operation of the civil works that were carried out between the years of 2005 and 2014 currently influence the environment that surrounds them.

Keywords: Environmental impact, operation, dams.

ÍNDICE

DEDICATORIA
EPÍGRAFE
RESUMEN
ABSTRACT
INTRODUCCIÓN 1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO 3
1. Desarrollo teórico 3
1.1. Planificación y Diseño de Presas 3
1.2. Construcción y tipología 8
1.3. Operación y mantenimiento 16
1.4. Impacto ambiental y restauración 28
2. Análisis de Antecedentes Investigativos 36
2.1. Antecedentes nacionales 36
2.2. Antecedentes internacionales 39
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA 48
1. Técnicas, instrumentos 48
2. Campo de verificación 48
2.1. Ubicación Espacial 48
2.2. Ubicación Temporal 48
3. Cuadro de variables 48
4. Unidades de estudio 49
5. Población y muestra 49
6. Limitaciones 50
7. Estrategia de recolección de datos 50
8. Proyecto de construcción civil 50
9. ¿Qué comprende la etapa de operación y cierre de una represa? 53
10. Matriz de Leopold 53
10.1. Componentes de la matriz de Leopold 53
10.2. Uso y aplicación de la matriz de Leopold 54
10.3. Ventajas y desventajas de la matriz de Leopold 54
10.4. Desarrollo de matriz de Leopold 55

11. Aplicación de la matriz 59
11.1. Identificación de actividades del proyecto 60
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 64
1. Interpretación de resultados 65
2. Discusión 69
CAPÍTULO IV. 73
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 73
1. Conclusiones 73
2. Recomendaciones 74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Planificación y diseño de presas 8
Tabla 2 Construcción y tipología 16
Tabla 3 Operación y mantenimiento 27
Tabla 4 Impacto ambiental y restauración 35
Tabla 5 Cuadro de variables 49
Tabla 6 Criterios aplicativos a la Matriz de Leopold 57
Tabla 7 Actividades de Proyecto 60
Tabla 8 Actividades de Proyecto 61
Tabla 9 Identificación de factores ambientales de la etapa de cierre (parte I) 62
Tabla 10 Identificación de factores ambientales de la etapa de cierre (parte II) 63
Tabla 11 Interpretación de resultados 65
Tabla 12 Medición de Impactos 66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Presa El Frayle – Arequipa 4
Figura 2 Clasificación general de las presas 9
Figura 3 Presa de Gravedad..... 11
Figura 4 Presa de Contrafuerte..... 11
Figura 5 Presa de Arco/Bóbeda..... 12
Figura 6 Presa de tierra..... 13
Figura 7 Representación de los niveles característicos de un embalse 14
Figura 8 Etapas de un proyecto de construcción de represa..... 51

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Matriz de Consistencia 83
Anexo 2. Matriz Leopold 85
Anexo 3. Valoración de actividades 87
Anexo 4. Valoración de Factores 88

INTRODUCCIÓN

Las represas en el mundo son obras hidráulicas muy relevantes y útiles para el desarrollo de la sociedad, ya que no solo permiten almacenar agua para aprovecharla en actividades básicas como la agricultura, ganadería, sino también para el consumo humano y generación de energía eléctrica. Estas construcciones contemplan tres etapas muy definidas que son: etapa de preinversión, etapa de inversión y etapa de operación y cierre, en las cuales se consideran muchas actividades que de alguna manera tienen relación directa con el medio ambiente. Estas etapas no son monitoreadas con la misma intensidad durante el desarrollo de los proyectos, dejando de lado la operación y mantenimiento, donde se desarrollan actividades de vaciado, llenado en compuertas, cámaras, entre otras que alteran el ecosistema.

Adicionalmente, cada actividad o partida en la ejecución de un proyecto de construcción tiene un impacto en el medio ambiente. Desde los materiales seleccionados, los equipos y herramientas que utilizamos, hasta las obras que construimos, todo genera impactos que ocasionan el calentamiento global, sin embargo, no podemos detener el desarrollo y crecimiento de las empresas y la economía, pero sí podemos equilibrar el impacto medioambiental con medidas reflexivas.

En el Perú, esta realidad no es ajena, sobretodo en la Región Sur del Perú donde se realizará la presente investigación, aquí el esquema hidráulico de la Cuenca del Río Sumbay contempla la presencia de una serie de obras, entre ellas las más importantes son la "Represa Pillones" de 80 MMC y la "Represa Chalhuanca" de 25 MMC de capacidad; mientras que en la Cuenca del Chili se encuentra la "Represa Bamputañe" de 40 MMC de capacidad, la que se trasvasa a la Cuenca del Río Sumbay a través del Canal Bamputañe-Sumbay.

El objetivo central del presente estudio es evaluar el impacto ambiental generado por las actividades de las etapas de operación y cierre de las represas en la Cuenca del Río Sumbay, para lo cual se utilizará como técnica la observación directa y como instrumento se empleará la Matriz de Leopold, la cual nos brindará un reporte que nos permitirá extraer una relación de acciones y elementos ambientales.

La información desarrollada en el presente estudio, permitirá arribar a conclusiones sobre los impactos que puedan ocasionar la instalación y desarrollo de una acción o proyecto sobre el ecosistema, para implementar medidas de mitigación y monitoreo de los impactos, y proponer los planes de contingencia necesarios.

Es primordial considerar que la evaluación a realizarse en la presente investigación facilitará poder tener un panorama más preciso de cómo la etapa de operación y cierre de las obras civiles que fueron ejecutadas entre los años de 2005 y 2014 influyen en la actualidad en el medio ambiente que los rodea.

HIPÓTESIS

Dado que las represas son vitales para el consumo humano, control del agua, la producción de energía y la prevención de inundaciones; un aspecto muy relevante es su operación y cierre, ya que permite asegurar su funcionamiento óptimo y seguro a largo plazo. Por otra parte, aunque estas tareas son cruciales, conllevan la generación de impactos ambientales que deben ser atendidos con precaución; por lo que es probable que:

Hi

Las actividades de la etapa de operación y cierre de represas generan impactos ambientales negativos en el ecosistema.

Ho

Las actividades de la etapa de operación y cierre de represas no generan impactos ambientales negativos en el ecosistema.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Evaluar el impacto ambiental generado por las actividades de las etapas de operación y cierre de las represas en la Cuenca del Río Sumbay.

Objetivos específicos

- Analizar los procedimientos utilizados en las actividades de operación y cierre de las represas construidas en la Cuenca del Río Sumbay.
- Identificar la magnitud e importancia de la afectación de los ecosistemas del área de influencia de las represas.

CAPÍTULO I.
MARCO TEÓRICO

1. Desarrollo teórico

1.1. Planificación y Diseño de Presas

1.1.1. Presas

Una presa, también conocida como represa o dique, se erige como una estructura cuidadosamente construida empleando diversos materiales y posicionada estratégicamente a lo largo de un curso de agua, tanto si este es natural como artificial. Su función primordial radica en elevar el nivel del agua o en la creación de un embalse, lo que, a su vez, permite modificar y regular el flujo del agua de manera distinta a su condición original. En esencia, actúa como una barrera física estratégicamente emplazada en el lecho de un cuerpo de agua con el propósito de capturar y retener parte del caudal que fluye a través de dicha corriente (Sebastian & Betancourt, 2014). Así mismo la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD, por sus siglas en inglés) establece que una presa es "una barrera o estructura instalada a través de un curso de agua o río con el propósito de almacenar, controlar y redirigir el flujo del agua". Esta estructura desempeña un papel crucial en la gestión de recursos hídricos y en la regulación de caudales, lo que puede tener un impacto significativo en la generación de energía y en la provisión de agua para diversas aplicaciones.

Actualmente, en el Perú se encuentran registradas un total de 54 presas en el ICOLD. Entre estas presas, destaca la represa El Frayle (Figura 1), que se ubica a unos 78 kilómetros de la ciudad de Arequipa, dicha estructura tiene la capacidad de almacenar hasta 200 millones de metros cúbicos de agua, la cual es utilizada para el riego de las fértiles pampas de La Joya, su estructura está compuesta por una presa de hormigón tipo bóveda de doble curvatura (ANA, 2015a).

Figura 1

Presa El Frayle – Arequipa

Nota. Adaptado de ANA (2015a)

1.1.2. Selección del sitio de la represa

La ubicación de una presa considera múltiples factores técnicos, geográficos, ambientales y económicos lo cual garantizaría la eficacia y la sostenibilidad de la infraestructura de almacenamiento de agua.

La importancia de la ubicación de una presa radica en una serie de consideraciones fundamentales que van más allá de las medidas estructurales y no estructurales. Si bien la construcción de represas y reservorios es una opción recurrente para abordar la gestión de recursos hídricos, es crucial tener en cuenta los problemas ambientales asociados, especialmente en lo que respecta al emplazamiento de estas estructuras. El lugar donde se decide ubicar una presa tiene un impacto de largo alcance, ya que implica la pérdida permanente de un espacio. Además, puede desencadenar problemas como la eutrofización, cambios en la morfología de los ríos y alteraciones en los ecosistemas, entre otros, aunque estos problemas pueden ser de menor magnitud en comparación con la escasez de agua.

En este contexto, es vital destacar que las inversiones en proyectos relacionados con la creación de embalses artificiales, como presas y reservorios, deben llevarse a cabo considerando criterios meticulosos. Estos criterios deben incluir la ubicación geográfica, el estado actual de la infraestructura, la disponibilidad de recursos hídricos y la vulnerabilidad ante eventos extremos, entre otros factores. En algunos casos, incluso puede ser necesario dar prioridad a la

garantía de disponibilidad de agua por encima de la relación beneficio-costo, ya que la escasez de agua es una calamidad que debe evitarse a toda costa (ANA, 2015a).

Por otro lado, es importante evitar ubicar represas en lugares donde existan viviendas permanentes o instalaciones de importancia cerca del cauce, ya que esto podría aumentar los riesgos en caso de fallos estructurales. Si no hay otra alternativa, se debe llevar a cabo un diseño más cuidadoso y extremar las precauciones, lo que, en última instancia, resultará en un mayor costo. En contraste, una represa ubicada en otro lugar con menores consecuencias dentro del área potencialmente afectada podría requerir menos esfuerzo técnico y económico en su construcción, operación y mantenimiento. Además, se deben evitar sitios que generen grandes áreas de embalse de poca profundidad, ya que esto puede provocar una excesiva evaporación y fomentar el crecimiento de plantas acuáticas perjudiciales para la calidad del agua. Desde el punto de vista del volumen de obra, un sitio ideal para una represa suele ser una sección estrecha de un valle, con fuertes pendientes laterales, lo que permite disponer de un gran volumen embalsado con un dique de pequeño volumen, lo que optimiza la eficiencia de la inversión (MVOTMA, 2011).

1.1.3. Relevamiento topográfico del lugar

El relevamiento topográfico desempeña un papel crítico en la planificación y diseño de presas ya que influye en la elección del tipo de presa adecuado para un emplazamiento específico. La topografía del sitio, que abarca desde la forma superficial del terreno donde se ubicará la presa hasta la configuración de la zona del embalse y la accesibilidad a los materiales de construcción, es un factor determinante en la toma de decisiones. De acuerdo a ello, la topografía puede orientar la elección entre diferentes tipos de presas, como las de hormigón para ríos estrechos con altas paredes rocosas, o las de terraplén en terrenos llanos y ondulados. En valles profundos con paredes verticales, las presas de materiales sueltos pueden ser desaconsejables, favoreciendo la construcción de presas de hormigón. Estas consideraciones son cruciales para garantizar la seguridad, la eficiencia y la estabilidad de la construcción de la presa (Martínez Ruiz, 2019).

1.1.4. Fuente de agua de aporte a la represa

El suministro de agua a la represa puede provenir tanto de fuentes superficiales, como cuencas de aporte, como de aguas subterráneas de acuíferos, o incluso de ambas fuentes en combinación. En el caso en que las aguas superficiales sean la fuente principal, es esencial que

el área de la cuenca sea lo suficientemente amplia para garantizar que, a pesar de las variaciones en los caudales anuales, se pueda almacenar una cantidad adecuada de agua para el período de sequía. Sin embargo, esta área de cuenca no debe ser excesivamente grande en comparación con la capacidad de almacenamiento del embalse, para que las estructuras de vertido actúen como vertederos de emergencia solo en situaciones verdaderamente extremas. Además, para mantener la profundidad y capacidad del embalse, es crucial que el flujo de agua superficial esté libre de sedimentos erosivos de la cuenca de aporte (MVOTMA, 2011).

1.1.5. Evaluación de los suelos para la obra

La evaluación de los suelos para la construcción de una presa es de vital importancia. La elección del sitio adecuado implica consideraciones geológicas y geotécnicas cruciales, como la capacidad de alimentación de agua natural, que debe ser suficiente y estar determinada por la topografía. También se prioriza la elección de suelos arcillosos o rocosos en lugar de suelos limo-arenosos para evitar filtraciones (Córdova-Carmen, 2015). Además, se presta especial atención a la estabilidad de los taludes, especialmente durante cambios abruptos en los niveles de agua, y se gestiona cuidadosamente el costo de adquisición de los terrenos a inundar, evitando áreas con infraestructuras costosas. La calidad del agua embalsada, la disponibilidad de aportes de la cuenca y la evaluación del impacto ambiental y social son factores esenciales. Asimismo, se considera la prevención de la erosión y se lleva a cabo una caracterización geotécnica detallada de los suelos disponibles como parte integral de la planificación de la presa (MVOTMA, 2011).

1.1.6. Requerimientos de vertido

El aliviadero, también conocido como estructura de vertido, juega un papel crucial en la gestión de un embalse al permitir la evacuación de los excesos de agua que no se desean almacenar. Su función principal es manejar eficazmente las crecidas máximas que llegan al embalse, evitando desbordamientos y posibles colapsos en presas, especialmente en las de tierra o enrocado (Fattorelli & Fernandez, 2011). Según la Bureau Of Reclamation U. S. (1970) los vertederos en las presas tienen la tarea de liberar el exceso de agua que no cabe en el espacio de almacenamiento designado, redirigiéndola hacia ríos o canales de drenaje. La importancia de un vertedero adecuadamente dimensionado es crítica, ya que su capacidad influye en la seguridad de la presa, siendo especialmente vital en presas de tierra y enrocado. Además de la capacidad, la ubicación y la resistencia hidráulica y estructural son esenciales, evitando la

erosión y socavación aguas abajo de la presa. También se requieren medidas para disipar la energía generada por el vertido. La frecuencia de uso del vertedero depende de las condiciones de escurrimiento de la cuenca y la naturaleza del proyecto, con la mayoría de las avenidas siendo derivadas por otros medios cuando sea posible.

1.1.7. Análisis de planificación y diseño de presas

Como se aprecia en la Tabla 1, la planificación y diseño de presas implica una serie de decisiones técnicas fundamentales orientadas a garantizar su funcionalidad, seguridad y sostenibilidad. En primer lugar, las presas se conciben como estructuras estratégicas para regular el flujo del agua, cumplir funciones de almacenamiento y contribuir a la gestión hídrica y energética (Sebastián & Betancourt, 2014). La selección del sitio es un aspecto crítico, pues debe equilibrar factores técnicos, ambientales y sociales, priorizando emplazamientos con bajo riesgo e impacto (ANA, 2015a).

El relevamiento topográfico del terreno condiciona directamente el tipo de presa más adecuado, al igual que la fuente de agua disponible, que debe contar con suficiente caudal y baja carga sedimentaria (Martínez Ruiz, 2019; MVOTMA, 2011). Por su parte, la evaluación de suelos permite identificar condiciones geotécnicas apropiadas para evitar filtraciones y garantizar la estabilidad estructural (Córdova-Carmen, 2015; MVOTMA, 2011).

Finalmente, los requerimientos de vertido, mediante la incorporación de aliviaderos correctamente diseñados, aseguran el manejo seguro del exceso de agua y la disipación de energía hidráulica, previniendo riesgos aguas abajo (Fattorelli & Fernández, 2011; Bureau of Reclamation, 1970). Estos elementos, en conjunto, conforman la base para un diseño eficiente, seguro y ambientalmente responsable.

Tabla 1

Planificación y diseño de presas

Subtema	Aportes
Definición y función de las presas	Una presa es una estructura construida estratégicamente sobre un curso de agua para elevar su nivel o formar un embalse, permitiendo regular su flujo. Cumple un rol crucial en la gestión hídrica y energética (Sebastián & Betancourt, 2014; ICOLD, citado en ANA, 2015a).
Selección del sitio	La ubicación óptima de una presa considera factores técnicos, ambientales y económicos. Se priorizan lugares con menor impacto ecológico, mayor eficiencia hidráulica y baja exposición a riesgos humanos o materiales (ANA, 2015a; MVOTMA, 2011).
Relevamiento topográfico	El análisis topográfico define el tipo de presa a construir, influyendo en seguridad y estabilidad. Se evalúan la forma del terreno, la accesibilidad y la adaptación estructural al entorno (Martínez Ruiz, 2019).
Fuente de agua	Las fuentes pueden ser superficiales o subterráneas. La cuenca debe tener caudal suficiente, con control de sedimentos, para conservar el volumen útil y la operatividad del embalse (MVOTMA, 2011).
Evaluación de suelos	Se analizan características geotécnicas y geológicas para evitar filtraciones, garantizar estabilidad y minimizar impactos sociales, económicos y ambientales (Córdova-Carmen, 2015; MVOTMA, 2011).
Requerimientos de vertido	El aliviadero o vertedero permite evacuar excesos de agua, evitando fallos estructurales. Su diseño debe prevenir erosión y disipar la energía hidráulica de forma eficaz.

Nota. Adaptado de Fattorelli & Fernández (2011); Bureau of Reclamation, (1970)

1.2. Construcción y tipología

1.2.1. Seguimiento durante la construcción e informe de final de obra

Durante la fase de construcción de presas, el encargado de supervisar el proceso se asegurará de que se sigan rigurosamente todos los procedimientos establecidos en el proyecto específico y se apliquen las mejores prácticas en la materia. Para ello, recopilará la información necesaria para elaborar un informe final completo una vez finalizada la obra, que incluirá planos detallados, fotografías representativas y una memoria técnica exhaustiva. Este informe cumplirá dos objetivos esenciales: primero, servirá como certificación ante la autoridad

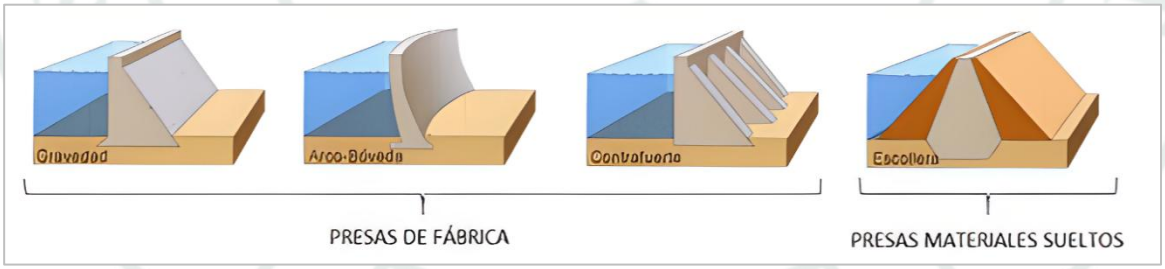
competente, garantizando que la construcción se haya llevado a cabo en plena conformidad con el proyecto aprobado y que la obra esté en óptimas condiciones para cumplir su función prevista. En segundo lugar, proporcionará documentación detallada de las características clave de la obra construida, facilitando futuras labores de mantenimiento y permitiendo una evaluación eficiente de cualquier posible anomalía en su funcionamiento. En relación a la supervisión de presas, esta tarea recaería en una entidad conformada por varios ministerios, incluyendo Agricultura y Riego, Ambiente, Energía y Minas, Vivienda, Construcción y Saneamiento, así como los organismos adscritos a ellos, que desempeñan funciones de planificación, supervisión, seguimiento y monitoreo de la construcción y operación de presas destinadas a múltiples propósitos (ANA, 2015b).

1.2.2. Clasificación de las presas

Aunque existen numerosas tipologías de presas, en líneas generales podemos clasificarlas en dos grandes grupos: presas de fábrica (de hormigón) y presas de materiales sueltos como se ilustra en la Figura 2, siendo estas últimas las más comunes por su versatilidad. La clasificación de las presas se realiza en base a los materiales empleados en su construcción y su capacidad de deformación, y a continuación, se describirán estas categorías en detalle:

Figura 2

Clasificación general de las presas



Nota. Adaptado de Martínez Ruiz (2019).

1.2.3. Según los materiales utilizados

Presas de hormigón:

Las presas de Hormigón Compactado con Rodillo son estructuras que combinan la fiabilidad de las presas de hormigón con la eficiencia de los métodos de construcción de las presas de materiales sueltos. Estas presas están compuestas por hormigón compactado de forma rígida y seca, con un bajo contenido de pasta, que se coloca y compacta utilizando un rodillo,

generalmente vibratorio, de alrededor de 10 toneladas. A pesar de su construcción con hormigón, la geometría de las presas de hormigón es similar a la de las presas de gravedad, pero con juntas horizontales significativamente más grandes, lo que busca minimizar las tensiones de tracción en la estructura (Martínez Ruiz, 2019).

Presas de materiales sueltos

Las presas de materiales sueltos se caracterizan por su integración en el terreno y el uso de grandes volúmenes de materiales locales, lo que las vincula estrechamente con el entorno natural en el que se construyen. Dada la variabilidad en las características de estos materiales y las limitaciones en las investigaciones y controles debido a las grandes cantidades necesarias, el diseño de estas presas a menudo involucra incertidumbre. Por lo tanto, se requieren coeficientes de seguridad y reservas, tanto cuantitativas como cualitativas, para abordar las posibles variaciones no previstas. Un mejor conocimiento de los materiales puede reducir la necesidad de coeficientes de seguridad excesivos. Antes de iniciar la construcción de una presa de materiales sueltos, es esencial llevar a cabo una evaluación exhaustiva que considere aspectos de diseño, así como preocupaciones humanas, ambientales y ecológicas, debido al potencial destructivo de estas estructuras y la importancia de los problemas asociados con su construcción (Ambrosio Spada, 1994).

1.2.4. Clasificación de las presas por su capacidad de deformación

Presas de gravedad

Las presas de hormigón a gravedad son estructuras diseñadas para soportar la presión constante del agua y la subpresión, adoptando una forma triangular en su perfil (Figura 3). Para lograr esta resistencia, utilizan hormigón con un peso específico superior al del agua, típicamente $\gamma h = 2{,}4$ t/m³ (Ramiro & Erazo, 2018b). Amplían la base de la presa para asegurar estabilidad contra el deslizamiento o volcamiento, ajustando la altura o incluso incorporando una corona para facilitar el acceso a lo largo de la presa. El nivel del vértice superior del triángulo puede coincidir con el nivel normal de operación o el nivel máximo del agua, dependiendo de las recomendaciones, reflejando la adaptabilidad en el diseño. El ancho de la base se calcula en función del coeficiente de fricción entre la cimentación y el hormigón, y los taludes aguas arriba y abajo varían según el tamaño de la presa, desde verticales hasta valores de m1 = 0,05 a 0,10 o más en presas grandes o con aligeramientos (Ramiro & Erazo, 2018b). Estas presas son delgadas, principalmente construidas con hormigón, y su resistencia se basa

en el rozamiento con el terreno, aprovechando su peso para prevenir el deslizamiento, mientras que se asegura que la resultante de los empujes del agua y el peso propio permanezca dentro de la base para evitar el vuelco (Martínez Ruiz, 2019).

Figura 3

Presa de Gravedad

Nota. Adaptado de Martínez Ruiz (2019).

Presas Alivianadas o de contrafuerte

Las presas de contrafuerte son estructuras en las que la cara principal de la presa se apoya en una serie de contrafuertes en su base, pudiendo variar en forma y material, como el concreto reforzado o sólido (Figura 4). En las variantes modernas, especialmente las de cabeza sólida, se consideran versiones más ligeras de este tipo de construcción. Estas presas aligeradas emplean columnas, losas y vigas para resistir las fuerzas concentradas generadas por la presión del agua, canalizándolas hacia los apoyos mediante elementos planos y lineales. Un ejemplo destacado de estas presas son las de contrafuertes verticales, donde los contrafuertes, similares a costillas estructurales, se conectan con losas de hormigón aguas arriba para transmitir las fuerzas a los cimientos. Este enfoque de diseño mejora la eficiencia estructural y optimiza el uso de materiales (Córdova-Carmen, 2015).

Figura 4

Presa de Contrafuerte

Nota. Adaptado de Martínez Ruiz (2019).

Presas en Arco/ Bóveda

Las presas de bóveda son estructuras curvas y delgadas que requieren considerablemente menos volumen de hormigón en comparación con las presas de gravedad, pero exigen una alta capacidad de base en sus cimientos y estribos para resistir cargas. Suelen construirse en cerradas dentro de macizos rocosos sólidos, donde la relación entre la cuerda del arco horizontal principal y la altura de la coronación es menor o igual a 3 veces, aunque hay casos con ratios mayores. La transmisión de esfuerzos a los cimientos y estribos es crucial, por lo que se debe evaluar el comportamiento del macizo rocoso en su totalidad. A pesar de su forma curva, estas presas son más económicas y tienen plazos de construcción más cortos debido a la menor cantidad de hormigón requerido como se puede observar en la Figura 5. Además, existen las presas arco-gravedad, donde el esfuerzo se distribuye entre los cimientos y los estribos laterales, y su funcionamiento implica la inyección de juntas para la transmisión del empuje hidrostático. Se necesitan terrenos con una alta capacidad de carga y una cimentación sólida para estas estructuras (Martínez Ruiz, 2019).

Figura 5

Presa de Arco/Bóbeda

Nota. Adaptado de Martínez Ruiz (2019).

Presas de tierra

Las presas de tierra son el tipo más común debido a su construcción con materiales naturales mínimamente procesados (Figura 6). Están compuestas principalmente de suelos finos, con limitaciones en cuanto a la presencia de grava como máximo. Estas presas se caracterizan por adaptarse bien a la cimentación natural del terreno, con requisitos de cimentación menos rigurosos que otros tipos. Los materiales de relleno deben ser resistentes al corte, impermeables, libres de materiales solubles y orgánicos, y no deben generar fisuras al secarse para prevenir filtraciones. Los taludes húmedos varían de 2,25:1 a 4:1, mientras que los

taludes secos oscilan entre 2:1 y 3:1 según las condiciones del terreno y los materiales disponibles. La estabilidad se evalúa mediante el método del Círculo de Falla, que simula el posible deslizamiento de una masa de suelo. Estas presas suelen contar con un núcleo impermeable en su sección central para evitar filtraciones y sifonamiento. Además, se requieren aliviaderos separados para evitar la erosión que podría destruir la presa en caso de vertidos por su coronación (Córdova-Carmen, 2015).

Figura 6

Presa de tierra

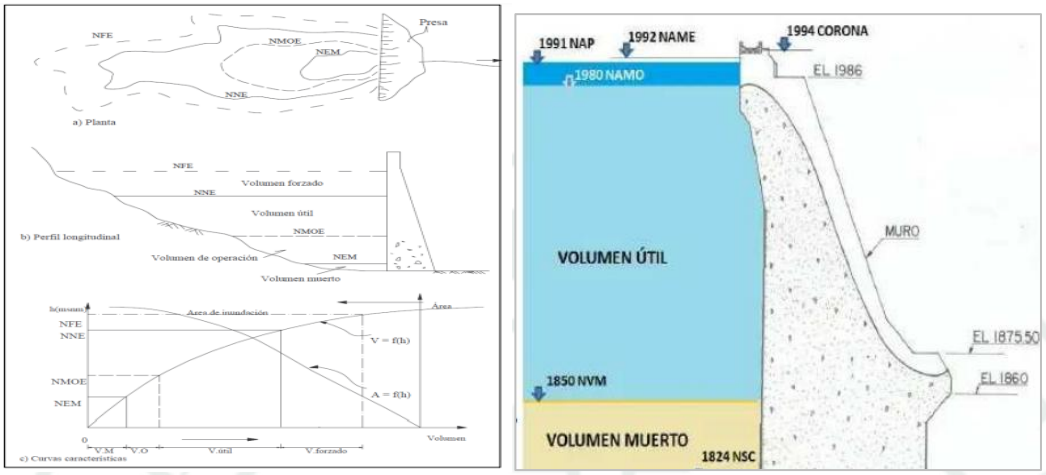
Nota. Adaptado de Martínez Ruiz (2019).

1.2.5. Niveles y volúmenes de los embalses

Los embalses tienen volúmenes característicos relacionados con sus niveles, que incluyen el volumen muerto, situado por debajo del Nivel Muerto del Embalse (NME), reservado para acumular sedimentos durante su vida útil y debe superar la capacidad de sedimentos calculada (Figura 7). El volumen útil se encuentra entre el nivel mínimo de operación del embalse (NMOE) y el nivel de aguas normales (NNE). El volumen de laminación se utiliza para reducir el caudal vertido durante las inundaciones, minimizando los daños aguas abajo. La determinación del volumen muerto puede ser compleja, especialmente en embalses de propósito múltiple, considerando factores como la carga de agua en las turbinas y condiciones de navegación, entre otros (Córdova-Carmen, 2015).

Figura 7

Representación de los niveles característicos de un embalse



Nota. Adaptado de Córdova-Carmen (2015).

- **Nivel de la Solera del Cauce:** El nivel de la solera del cauce es el nivel del fondo natural del cuerpo de agua. En el caso de las represas, el fondo correspondiente es el del río. El nivel de la solera del cauce depende de la energía que el agua generará, lo que puede requerir modificaciones en la construcción de la represa (Wan Mohtar et al., 2020).
- **Nivel Muerto:** es el nivel más bajo de una presa, este es dedicado a almacenamiento de sedimentos a lo largo de su tiempo útil, en consecuencia, es un nivel en el que la descarga de agua es nula (Ramiro & Erazo, 2018a).
- **Nivel Mínimo de Operación:** es volumen mínimo de operación correcta de una represa (Ramiro & Erazo, 2018a). Esta tiene una importancia en las estructuras de toda la represa, en su eficiencia, la perdida hidráulica del funcionamiento de las turbinas y en la longevidad de la construcción (Sarkardeh, 2017).
- **Nivel Máximo Normal de Operación:** es el volumen máximo de almacenamiento de agua en el que la represa puede funcionar de mara óptima, este momento es determinado por la altura de la construcción y no está incluido en los cálculos en el momento del diseño de represas, por lo que es un cálculo a parte y muy importante para su operatividad (Hīkina, 2022).
- **Nivel Máximo de Proyecto:** según la autoridad nacional del agua (ANA), el nivel máximo de proyecto es el volumen máximo diseñado y calculado en un proyecto de

construcción de presa, este viene por el estudio hidrobiológico en los que se consideran las estructuras de desvió del rio y el aliviadero para diferentes periodos de retorno de agua (Autoridad Nacional del Agua, 2017).

- **Nivel Máximo Extraordinario:** es el nivel de agua máxima en el embalse lo que provoca un trabajo en demasía de la presa, por ello, el aliviadero se mantiene trabajando a plena capacidad (Autoridad Nacional del Agua, 2017).

1.2.6. Análisis de la construcción y tipología

El análisis de la construcción y tipología de presas, presentado en la Tabla 2, abarca aspectos técnicos fundamentales que complementan la fase de planificación y diseño. Durante la ejecución de la obra, la supervisión rigurosa permite garantizar el cumplimiento del proyecto aprobado, así como documentar todos los elementos técnicos mediante informes, planos y memorias que faciliten tanto la certificación como el mantenimiento futuro (ANA, 2015b). En cuanto a su clasificación, las presas pueden diferenciarse según los materiales utilizados, como el hormigón o los materiales sueltos, y su capacidad de deformación, criterios que permiten prever su comportamiento estructural frente a cargas hidráulicas y eventos sísmicos (Martínez Ruiz, 2019). Las presas de hormigón compactado con rodillo destacan por combinar eficiencia constructiva y alta resistencia mediante un diseño que reduce tensiones internas (Martínez Ruiz, 2019), mientras que las de materiales sueltos aprovechan recursos locales, aunque exigen amplios márgenes de seguridad ante la incertidumbre en las propiedades del terreno (Ambrosio Spada, 1994). La clasificación por capacidad de deformación incluye presas de gravedad, contrafuerte, bóveda y tierra, cada una con principios estructurales específicos: desde el uso del peso propio hasta la transmisión de cargas a estribos o cimientos, siendo las presas de tierra las más comunes por su adaptabilidad y bajo procesamiento de materiales (Martínez Ruiz, 2019; Córdova-Carmen, 2015). Finalmente, los niveles y volúmenes del embalse, muerto, útil y de laminación, permiten gestionar el almacenamiento, la seguridad estructural y la mitigación de riesgos por crecidas, siendo claves para una operación eficiente (Martínez Ruiz, 2019).

Tabla 2

Construcción y tipología

Subtema	Aportes complementarios
Supervisión durante la construcción	Durante la construcción, se deben aplicar prácticas rigurosas de supervisión técnica y recopilar información clave que sirva tanto para certificar la obra como para facilitar futuras labores de mantenimiento. La elaboración del informe final con planos, fotos y memoria técnica garantiza la trazabilidad de la estructura y permite detectar futuras anomalías (ANA, 2015b).
Clasificación general de presas	Las presas pueden clasificarse según el material (hormigón o materiales sueltos) y su capacidad de deformación. Esta clasificación no solo orienta el diseño estructural, sino que permite prever su comportamiento frente a cargas hidráulicas y eventos sísmicos (Martínez Ruiz, 2019).
Presas de hormigón	Las presas de Hormigón Compactado con Rodillo permiten mayor eficiencia constructiva sin sacrificar estabilidad. Su diseño minimiza tensiones internas mediante juntas amplias, optimizando su resistencia y desempeño hidráulico (Martínez Ruiz, 2019).
Presas de materiales sueltos	Este tipo de presas aprovecha recursos locales y se integra al entorno natural, aunque su diseño involucra incertidumbre. Se requieren altos coeficientes de seguridad y estudios geotécnicos detallados para compensar la variabilidad de materiales (Ambrosio Spada, 1994).
Presas por capacidad de deformación	Las presas de gravedad, contrafuerte, bóveda y tierra presentan distintos comportamientos estructurales. Las primeras se basan en el peso propio, las de contrafuerte en geometría y apoyo interno, y las de bóveda en transmisión de esfuerzos a los estribos, mientras que las de tierra destacan por su adaptabilidad y bajo procesamiento de materiales (Martínez Ruiz, 2019; Córdova-Carmen, 2015).
Niveles y volúmenes del embalse	Los volúmenes del embalse —muerto, útil y de laminación— permiten una operación segura y eficiente. Su correcta estimación previene pérdida de capacidad útil por sedimentación y controla el riesgo durante crecidas.

Nota. Adaptado de Martínez Ruiz (2019).

1.3. Operación y mantenimiento

1.3.1. Etapa de operación y mantenimiento de proyecto de represa

Operación

La operación de una presa es el conjunto de actividades que se realizan para garantizar su funcionamiento seguro y eficiente (Yoosefdoost et al., 2022). Estas actividades incluyen:

- Ajustar los niveles del embalse para almacenar o liberar agua según sea necesario.

- Mantener registros de los niveles del agua, las precipitaciones y otros datos relevantes.
- Garantizar la seguridad pública inspeccionando la presa y sus alrededores con regularidad, y realizando las reparaciones necesarias.
- Controlar la basura y otros residuos que puedan acumularse en el embalse.
- Abrir y cerrar las válvulas para controlar el flujo de agua.

Es importante que los procedimientos operativos de una presa sean adecuados y se sigan estrictamente. Esto es especialmente importante para las presas pequeñas, que pueden no tener un operador a tiempo completo, en caso de emergencia, es importante que haya procedimientos especiales publicados para que los siga cualquier persona que esté disponible (Tonitto & Riha, 2016).

Drenaje de embalse

El drenaje del embalse es un elemento esencial para garantizar la seguridad y el funcionamiento adecuado de la presa. Las válvulas o compuertas de desagüe que no se han utilizado durante mucho tiempo pueden presentar problemas, como que no se cierren correctamente o que no puedan soportar grandes descargas de agua (Liu et al., 2018). Para evitar estos problemas, es importante inspeccionar y mantener el drenaje del embalse con regularidad. Además, es importante informar a los residentes aguas abajo de las grandes descargas de agua, para que puedan tomar las medidas necesarias para protegerse.

El drenaje del embalse es un elemento esencial para garantizar la seguridad y el funcionamiento adecuado de la presa. Las válvulas o compuertas de desagüe que no se han utilizado durante mucho tiempo pueden presentar problemas, como que no se cierren correctamente o que no puedan soportar grandes descargas de agua (Liu et al., 2018). Para evitar estos problemas, es importante inspeccionar y mantener el drenaje del embalse con regularidad. Además, es importante informar a los residentes aguas abajo de las grandes descargas de agua, para que puedan tomar las medidas necesarias para protegerse.

Equipo mecánico

El equipo mecánico de una presa es un conjunto de dispositivos que permiten su funcionamiento y control (Yaseen et al., 2020). Estos dispositivos incluyen compuertas de vertederos, compuertas o válvulas de desagüe del lago o tuberías de suministro de agua, troncos de cierre, bombas de sumidero, tablas de desbordamiento, pozos de alivio, fuentes de energía

de emergencia, sifones y otros dispositivos (Zanoli et al., 2023). Para garantizar la seguridad y fiabilidad de la presa, es importante mantener el equipo mecánico en buen estado de funcionamiento, esto se puede lograr mediante operaciones regulares, que deben realizarse al menos una vez al año y preferiblemente con más frecuencia, estas operaciones deben realizarse en todo el rango de funcionamiento del equipo, en condiciones reales de operación, permitiendo evaluar el rendimiento del equipo y detectar cualquier posible problema (Ma et al., 2023). Además de las operaciones regulares, es importante revisar las instrucciones de operación para verificar su claridad y mantenerlas en un lugar seguro, pero de fácil acceso. También es importante marcar permanentemente cada dispositivo operativo para facilitar su identificación. Todo el equipo operativo debe ser accesible, y todos los controles del equipo deben verificarse para verificar que tengan la seguridad adecuada para evitar el vandalismo.

El equipo mecánico de una presa es un conjunto de dispositivos que permiten su funcionamiento y control (Yaseen et al., 2020). Estos dispositivos incluyen compuertas de vertederos, compuertas o válvulas de desagüe del lago o tuberías de suministro de agua, troncos de cierre, bombas de sumidero, tablas de desbordamiento, pozos de alivio, fuentes de energía de emergencia, sifones y otros dispositivos (Zanoli et al., 2023). Para garantizar la seguridad y fiabilidad de la presa, es importante mantener el equipo mecánico en buen estado de funcionamiento, esto se puede lograr mediante operaciones regulares, que deben realizarse al menos una vez al año y preferiblemente con más frecuencia, estas operaciones deben realizarse en todo el rango de funcionamiento del equipo, en condiciones reales de operación, permitiendo evaluar el rendimiento del equipo y detectar cualquier posible problema (Ma et al., 2023). Además de las operaciones regulares, es importante revisar las instrucciones de operación para verificar su claridad y mantenerlas en un lugar seguro, pero de fácil acceso. También es importante marcar permanentemente cada dispositivo operativo para facilitar su identificación. Todo el equipo operativo debe ser accesible, y todos los controles del equipo deben verificarse para verificar que tengan la seguridad adecuada para evitar el vandalismo.

Niveles de reservorio

El nivel de un embalse se controla mediante un conjunto de dispositivos, como compuertas de vertedero, estructuras de desagüe y tablones de desbordamiento (Guo et al., 2004). La tasa de descenso del nivel del embalse no debe exceder 1 pie por semana para pendientes compuestas de arcilla o material limoso, excepto en situaciones de emergencia (Koel & Sparks, 2002). Las pendientes muy planas o las pendientes con zonas aguas arriba de drenaje

libre pueden soportar tasas de descenso más rápidas. Las condiciones o instancias en las que el nivel del embalse puede ajustarse de forma permanente o temporal son las siguientes:

- Problema que requiere que el embalse se baje: El descenso es temporal hasta que se resuelve el problema.
- Liberaciones mínimas: El agua se libera al canal aguas abajo para complementar el caudal del arroyo durante las condiciones secas. Esto puede bajar temporalmente el nivel del lago.
- Demanda de agua: Los niveles de los embalses de abastecimiento de agua fluctuarán de acuerdo con la demanda de agua del área de servicio. Los tablones de desbordamiento se utilizan a veces para elevar permanentemente o temporalmente el nivel del embalse.
- Reparación de muelles: vegetación acuática y escorrentía de primavera. El nivel del embalse se reduce en el invierno para facilitar la reparación de los muelles de los barcos, para retardar el crecimiento de la vegetación acuática a lo largo de la costa o para permitir el almacenamiento adicional para la escorrentía de primavera.
- Recreación: energía hidroeléctrica y gestión de aves acuáticas y peces. Los niveles de los embalses a veces se ajustan para la recreación, la energía hidroeléctrica o la gestión de las aves acuáticas y los peces.
- Derechos ribereños: Los propietarios deben tener cuidado al liberar o represar agua para proteger los derechos de los propietarios aguas abajo. El sistema de derechos ribereños se ha establecido a través de los tribunales y permite a cada propietario ribereño hacer un uso "razonable" del agua, teniendo en cuenta los mismos derechos que existen para los demás propietarios ribereños aguas abajo, un propietario podría ser legalmente responsable si una liberación repentina de agua causara daños aguas abajo (Downey, 1999).

Erosión y sedimentación

La erosión y la sedimentación son procesos geológicos naturales que implican el desprendimiento de partículas del suelo y su transporte por el agua. La velocidad del agua es el principal factor que determina la cantidad de sedimento que puede transportar, cuando el agua corriente entra en un lago, su velocidad disminuye repentinamente, lo que provoca que las partículas de sedimento se depositen en el fondo del lago (Palmieri et al., 2001). La sedimentación ocurre en todos los lagos, independientemente de su origen, las tasas de

sedimentación varían en función de una serie de factores, entre los que se incluyen el tipo de suelo, la cobertura vegetal, la pendiente del terreno, el uso del suelo, la pendiente del cauce, el tamaño de la cuenca hidrográfica, la precipitación anual, la intensidad de las tormentas, el material del lecho del cauce y el volumen del lago (Gonzalez Rodriguez et al., 2023). Los depósitos de sedimento suelen ser visibles en primer lugar en forma de deltas en la desembocadura de los arroyos que entran en el lago, la vegetación acuática, como las espadañas y los nenúfares, pronto se desarrolla en las aguas poco profundas sobre estos deltas y a medida que continúa la sedimentación, el delta se eleva por encima del nivel normal del agua (Wright, 1998). La mejor manera de evitar problemas de sedimentación es reducir la erosión en la cuenca hidrográfica, sin embargo, como la mayoría de los propietarios de presas no controlan la tierra de la cuenca hidrográfica, es necesario encontrar otros medios para minimizar los efectos de la sedimentación. Una forma es mediante el dragado, este es un proceso costoso y que requiere de permisos especiales, además, el material dragado debe ser eliminado de forma adecuada para evitar que contamine el medio ambiente (WEDA, 2021). Otra forma de controlar la sedimentación es bajar el nivel del lago durante el invierno y principios de la primavera, esto permite que los sedimentos se depositen en zonas más profundas del lago, donde no causan problemas. Para estanques con áreas de drenaje más pequeñas, las franjas de vegetación alrededor del estanque pueden actuar como filtros y atrapar gran parte del sedimento (Alvarez et al., 2021). En conclusión, la sedimentación es un proceso natural que puede causar problemas en los lagos. Existen una serie de medidas que pueden adoptarse para minimizar los efectos de la sedimentación, como la reducción de la erosión en la cuenca hidrográfica, el dragado, el descenso del nivel del lago y la plantación de vegetación alrededor del estanque.

La erosión y la sedimentación son procesos geológicos naturales que implican el desprendimiento de partículas del suelo y su transporte por el agua. La velocidad del agua es el principal factor que determina la cantidad de sedimento que puede transportar, cuando el agua corriente entra en un lago, su velocidad disminuye repentinamente, lo que provoca que las partículas de sedimento se depositen en el fondo del lago (Palmieri et al., 2001). La sedimentación ocurre en todos los lagos, independientemente de su origen, las tasas de sedimentación varían en función de una serie de factores, entre los que se incluyen el tipo de suelo, la cobertura vegetal, la pendiente del terreno, el uso del suelo, la pendiente del cauce, el tamaño de la cuenca hidrográfica, la precipitación anual, la intensidad de las tormentas, el material del lecho del cauce y el volumen del lago (Gonzalez Rodriguez et al., 2023). Los depósitos de sedimento suelen ser visibles en primer lugar en forma de deltas en la

desembocadura de los arroyos que entran en el lago, la vegetación acuática, como las espadañas y los nenúfares, pronto se desarrolla en las aguas poco profundas sobre estos deltas y a medida que continúa la sedimentación, el delta se eleva por encima del nivel normal del agua (Wright, 1998). La mejor manera de evitar problemas de sedimentación es reducir la erosión en la cuenca hidrográfica, sin embargo, como la mayoría de los propietarios de presas no controlan la tierra de la cuenca hidrográfica, es necesario encontrar otros medios para minimizar los efectos de la sedimentación. Una forma es mediante el dragado, este es un proceso costoso y que requiere de permisos especiales, además, el material dragado debe ser eliminado de forma adecuada para evitar que contamine el medio ambiente (WEDA, 2021). Otra forma de controlar la sedimentación es bajar el nivel del lago durante el invierno y principios de la primavera, esto permite que los sedimentos se depositen en zonas más profundas del lago, donde no causan problemas. Para estanques con áreas de drenaje más pequeñas, las franjas de vegetación alrededor del estanque pueden actuar como filtros y atrapar gran parte del sedimento (Alvarez et al., 2021). En conclusión, la sedimentación es un proceso natural que puede causar problemas en los lagos. Existen una serie de medidas que pueden adoptarse para minimizar los efectos de la sedimentación, como la reducción de la erosión en la cuenca hidrográfica, el dragado, el descenso del nivel del lago y la plantación de vegetación alrededor del estanque.

Mantenimiento

Vegetación

El establecimiento y control de la vegetación adecuada es un componente esencial del mantenimiento de las presas (Auble et al., 2007). La vegetación bien mantenida puede ayudar a prevenir la erosión de las superficies del terraplén y del canal de tierra, y también puede ayudar en el control de los roedores y las plagas. El crecimiento descontrolado de la vegetación puede dañar los terraplenes y las estructuras de hormigón, y dificultar la inspección minuciosa.

Vegetación herbácea

La vegetación herbácea es una forma eficaz y económica de prevenir la erosión de las superficies de los terraplenes, también mejora la apariencia de la presa y proporciona una superficie que puede inspeccionarse fácilmente (Jiang et al., 2021). Las raíces y los tallos de las plantas herbáceas tienden a atrapar la arena fina y las partículas de suelo, formando una capa resistente a la erosión una vez que las plantas están bien establecidas. La vegetación herbácea es menos eficaz en las zonas de escorrentía concentrada, como el contacto del terraplén con los

estribos, o en las zonas sujetas a la acción de las olas. Durante la construcción de una presa, puede ser necesario realizar una siembra o un acolchado temporal para proporcionar un control temporal de la erosión y los sedimentos (Yan et al., 2022). Una excelente guía para la preparación de una especificación de siembra temporal es la Norma de Práctica 6.10, Siembra Temporal, que se encuentra en el "Manual de Planificación y Diseño del Control de la Erosión y los Sedimentos" del NCDENR. Cuando se necesita una especificación de siembra permanente para una presa recién construida, modificada o reparada, la Norma de Práctica 6.11, Siembra Permanente, que se encuentra en el mismo Manual de Diseño, puede utilizarse como guía para la preparación de la especificación. Los pastos de raíz profunda, son la mejor opción para la vegetación de las presas. Estos pastos son resistentes a la erosión y proporcionan una superficie uniforme que facilita la inspección. Antes de sembrar, se debe preparar el suelo para crear un entorno favorable para el crecimiento de las plantas. Esto incluye la aplicación de fertilizante y cal, así como la escarificación o el gradado del suelo para romper la costra superficial.

Vegetación hidrobiológica

La vegetación acuática se clasifica en tres grupos principales: vegetación flotante, vegetación sumergida y vegetación emergente, la vegetación flotante más común es el alga filamentosa, una masa flotante y densa de fibras similares a cabellos (Landucci et al., 2015). Según la Organización de agricultura y alimentación (FAO), la mayoría de las especies pueden controlarse con concentraciones muy bajas de sulfato de cobre, 2,7 libras por acre-pie de agua, o para aguas duras (más de 200 mg/l de dureza total), 5,4 libras por acre-pie de agua. La vegetación sumergida está adherida al fondo del lago y la mayor parte de su crecimiento se encuentra debajo de la superficie del agua. Las especies incluyen Potamogetons (ondinas), Ceratophyllum (cola de caballo), Myriophyllum (milenrama de agua), Elodea (hierbas acuáticas) y Najas (Biedunkiewicz et al., 2020). Los herbicidas granulares liberan sus ingredientes activos más lentamente y deben usarse temprano en la temporada de crecimiento y/o como tratamiento puntual. La vegetación emergente se encuentra a lo largo de la costa y en aguas poco profundas, donde los tallos y las hojas se extienden fuera del agua. Las totoras, los juncos y los ninfeas se encuentran con frecuencia en estas áreas. Un método de control no químico es aumentar la profundidad del agua en el área de crecimiento manteniendo una pendiente pronunciada, de al menos 3H:1V, a lo largo de la orilla. La mayoría de los herbicidas utilizados para el control de malezas terrestres también pueden utilizarse para la vegetación emergente si se combinan con un agente humectante y adherente. Además de los agentes

humectantes y adherentes disponibles comercialmente, se pueden usar dos cucharadas de detergente líquido para el hogar por galón de herbicida. La mezcla se rocía a continuación hasta que una fina película cubra las hojas. Chara (muskgrass, stonewart), lenteja de agua y lemna son crecimientos que no encajan en las categorías anteriores. Chara crece en densos grupos en áreas poco profundas y es una forma de alga. La lenteja de agua tiene pequeñas hojas trilobuladas con raicillas que cuelgan en el agua. La lemna consiste en pequeños granos verdes que flotan en el agua. Para el control de Chara, se pueden usar herbicidas que contengan fluridona o endothal. Para el control de la lenteja de agua y la lemna, se pueden usar herbicidas que contengan glifosato. Es importante señalar que el uso de herbicidas químicos puede tener efectos negativos en el medio ambiente, por lo que es importante seguir las instrucciones de la etiqueta cuidadosamente y usar los herbicidas solo cuando sea necesario.

Erosión

La erosión es uno de los problemas de mantenimiento más comunes de las estructuras de terraplén, ya sea en una pendiente, en una zona de espigón o en la salida de un aliviadero. La erosión es un proceso natural, y sus fuerzas continuas acabarán desgastando casi cualquier superficie o estructura (Nebraska Department of Natural Resources, 2022). El mantenimiento periódico y oportuno es esencial para prevenir el deterioro continuo y el posible fallo.

Superficies vegetadas

Una cubierta vegetal robusto, libre de malas hierbas y arbustos, es uno de los medios más eficaces de protección contra la erosión. Las pendientes de los terraplenes suelen diseñarse y construirse de forma que el drenaje de la superficie se extienda en finas capas como "flujo laminar" sobre la cubierta de hierba. Cuando la cubierta vegetal está en mal estado o los flujos se concentran en uno o varios puntos, la erosión resultante dejará surcos y cárcavas en la pendiente del terraplén. El propietario o inspector debe buscar estas áreas y ser consciente de los problemas que pueden desarrollarse.

Reparación de superficies vegetadas

La reparación inmediata de las zonas vegetadas que desarrollan erosión es necesaria para prevenir daños más graves en el terraplén. Los surcos y las cárcavas deben rellenarse con tierra adecuada (las 4 pulgadas superiores deben ser de tierra vegetal, si está disponible), compactarse y luego sembrarse. Los métodos descritos en la sección sobre vegetación deben

utilizarse para establecer adecuadamente la superficie de césped. La construcción de presas de rocas a través de la cárcava hasta que se puedan realizar reparaciones permanentes puede ralentizar la erosión en las cárcavas grandes.

Problemas causados por el tránsito

Los senderos creados por el tránsito peatonal son problemas comunes en muchos terraplenes. Si se ha establecido un sendero, la vegetación en esta área no proporcionará una protección adecuada y se requerirá una cubierta más duradera, a menos que se elimine el tránsito. Pequeñas piedras, asfalto o hormigón se han utilizado eficazmente para cubrir los senderos. Una de las formas más exitosas y económicas de proporcionar un sendero protegido es incrustar traviesas de ferrocarril u otras vigas de madera tratada en la pendiente de un terraplén para formar escalones.

Erosión en el contacto entre el terraplén y las estructuras de hormigón

Otra área donde comúnmente ocurre la erosión es el contacto entre el terraplén y los muros de hormigón del aliviadero u otras estructuras. Una mala compactación adyacente al muro durante la construcción y el subsiguiente asentamiento podrían dejar un área más baja que la pendiente del terraplén. La escorrentía suele concentrarse a lo largo de estas estructuras, lo que provoca erosión. La gente que camina a menudo a lo largo de estos muros desgasta la cubierta vegetal. Las posibles soluciones incluyen remodelar el área para que tenga una pendiente alejada del muro, añadir una protección de la superficie más resistente o construir escalones de vigas de madera.

Dispositivos de monitoreo de represas

El monitoreo de terraplenes y estructuras de gravedad de hormigón es importante para garantizar su seguridad y durabilidad. Se utilizan diversos dispositivos para realizar este monitoreo, que pueden clasificarse en dos categorías: dispositivos de monitoreo visual e instrumental (Khabibullin & Suleimanov, 2018).

Dispositivos de monitoreo visual

Los dispositivos de monitoreo visual son los más utilizados por los propietarios privados. Estos dispositivos incluyen:

- Vertederas: Se utilizan para medir las tasas de flujo de agua subterránea.

- Reglas plegables: Se utilizan para medir grietas, escarpas, cárcavas, asentamientos, árboles, áreas húmedas y movimiento de losas o muros.
- Cámaras: Se utilizan para documentar el estado de la estructura.

Dispositivos de monitoreo instrumental

Los dispositivos de monitoreo instrumental requieren asistencia profesional para su instalación y mantenimiento. Estos dispositivos incluyen:

- Piezómetros: Se utilizan para medir la presión del agua en el suelo del terraplén y la cimentación.
- Monumentos de asentamiento: Se utilizan para medir el movimiento vertical de la estructura.
- Pozos de observación: Se utilizan para medir el nivel del agua subterránea.
- Inclinómetros: Se utilizan para medir el movimiento horizontal de la estructura.

Es importante que el monitoreo se realice de forma periódica y precisa. Los propietarios privados deben realizar inspecciones visuales periódicas y tomar fotografías con fechas y etiquetas identificativas. Las presas grandes suelen requerir un monitoreo más intensivo, que puede incluir el uso de dispositivos de monitoreo instrumental.

1.3.2. Modelos de evaluación de impacto ambiental en represas

La construcción de represas altera no solo el régimen hidrológico, sino también la salud y el bienestar de las comunidades locales, dimensiones que deben abordarse de forma integral en la evaluación ambiental. Según Gwimbi et al. (2020) advierten que, aunque los estudios ambientales incluyen evaluaciones de salud, su implementación efectiva suele verse limitada por la falta de seguimiento, el incumplimiento de compromisos y compensaciones inadecuadas. Estas fallas, especialmente cuando se reducen a pagos monetarios, no reemplazan los medios de vida perdidos. Por ello, es fundamental que los aspectos de salud se integren de manera vinculante en todas las fases del proyecto, con participación activa de las comunidades y mecanismos que aseguren el cumplimiento de sus derechos y expectativas.

1.3.3. Análisis de operación y mantenimiento

El análisis conjunto de los aspectos vinculados a la operación y mantenimiento de presas, que se expone en la Tabla 3, revela la necesidad de una gestión integral, preventiva y

técnicamente rigurosa que trascienda la simple funcionalidad hidráulica. Más allá de los procedimientos técnicos específicos —como el control de compuertas, el monitoreo instrumental o el manejo de vegetación—, se evidencia que el desempeño sostenible de estas infraestructuras depende de la articulación entre factores estructurales, ambientales y sociales (Yoosefdoost et al., 2022; Liu et al., 2018; Yaseen et al., 2020). En este sentido, el mantenimiento adecuado no solo garantiza la estabilidad física de la obra, sino que también mitiga riesgos a largo plazo como la pérdida de capacidad útil por sedimentación, la erosión progresiva de superficies críticas o los daños por fallos mecánicos (Palmieri et al., 2001; Nebraska Department of Natural Resources, 2022).

A su vez, la operación exige una lectura constante del entorno: desde los cambios hidrológicos hasta la adaptación a demandas recreativas, ecológicas o legales (Guo et al., 2004; Koel & Sparks, 2002; Downey, 1999). Asimismo, se destaca la importancia del monitoreo como eje transversal, tanto para detectar desviaciones estructurales como para legitimar socialmente la intervención (Khabibullin & Suleimanov, 2018). Finalmente, el enfoque ambiental de la operación cobra relevancia no solo como requisito normativo, sino como imperativo ético en relación con las comunidades y ecosistemas afectados, lo cual exige que los sistemas de gestión incorporen componentes de participación, evaluación permanente y cumplimiento efectivo de compromisos sociales (Gwimbi et al., 2020).

Tabla 3

Operación y mantenimiento

Subtema	Síntesis interpretativa
Operación de la presa	Comprende el ajuste de niveles de embalse, control de válvulas, registros meteorológicos y medidas de seguridad. La existencia de protocolos claros es vital, especialmente en presas pequeñas o sin operadores permanentes (Yoosefdoost et al., 2022; Tonitto & Riha, 2016).
Drenaje del embalse	Es clave para liberar excedentes y evitar daños estructurales. Las compuertas deben mantenerse operativas y notificarse a las comunidades aguas abajo sobre descargas importantes (Liu et al., 2018).
Equipo mecánico	Incluye válvulas, compuertas, bombas y sistemas de emergencia. Su mantenimiento debe ser periódico, en condiciones reales de operación, para garantizar seguridad y funcionalidad (Yaseen et al., 2020; Zanoli et al., 2023; Ma et al., 2023).
Niveles del reservorio	Los niveles fluctúan por demanda, mantenimiento o factores climáticos. Su regulación debe considerar aspectos ecológicos, recreativos, legales y de seguridad estructural (Guo et al., 2004; Koel & Sparks, 2002; Downey, 1999).
Erosión y sedimentación	La sedimentación disminuye la capacidad útil del embalse y altera ecosistemas. Se recomienda controlar la erosión en la cuenca, realizar dragado cuando sea necesario y manejar niveles para reducir acumulación (Palmieri et al., 2001; Wright, 1998; WEDA, 2021).
Manejo de vegetación	La vegetación controlada previene erosión y facilita la inspección. Se recomienda el uso de especies herbáceas de raíz profunda y técnicas de siembra específicas para estabilizar taludes y bordes (Auble et al., 2007; Jiang et al., 2021; Yan et al., 2022).
Vegetación hidrobiológica	El crecimiento excesivo de vegetación acuática debe manejarse mediante control químico y morfológico. El uso responsable de herbicidas es necesario para evitar daños ambientales (Landucci et al., 2015; Biedunkiewicz et al., 2020).
Erosión y mantenimiento de superficies	La erosión es frecuente en zonas de tránsito, contacto con estructuras o pendientes inestables. Requiere reparaciones inmediatas, estabilización vegetal y uso de recubrimientos o escalones en senderos (Nebraska DNR, 2022).
Monitoreo de presas	Se realiza visualmente o con instrumentos como piezómetros e inclinómetros. Permite detectar filtraciones, asentamientos o movimientos, siendo clave para la seguridad estructural (Khabibullin & Suleimanov, 2018).
Evaluación ambiental de operación	Los impactos de la operación deben evaluarse con enfoque de derechos y salud comunitaria. La participación de poblaciones afectadas y el cumplimiento de compromisos sociales son esenciales (Gwimbi et al., 2020).

Nota. Elaboración propia

1.4. Impacto ambiental y restauración

1.4.1. Impacto ambiental

Las presas, al alterar los procesos fisicoquímicos y biológicos, tienen impactos hídricos y ambientales asociados que tienen consecuencias sociales y económicas de largo alcance (Maavara et al., 2020). El impacto de cada presa es único y depende no solo de la estructura de la presa y de las características de la biota local, sino también de las condiciones climáticas y geomorfológicas. Dado el número de presas existentes (más de 45 000 presas grandes) y la gran cantidad que se pueden construir en el futuro cercano, está claro que la humanidad debe vivir con las consecuencias ambientales y sociales durante muchas décadas por venir (Ehsani et al., 2017).

Análisis de impacto ambiental en las represas

Las represas son estructuras artificiales construidas para almacenar agua, generar energía hidroeléctrica o controlar inundaciones. Su construcción tiene un impacto significativo en el medio ambiente, alterando el flujo de agua, la calidad del agua y la sedimentación (Jannsendzimir, n.d.; Wu et al., 2019). Por lo tanto, es importante realizar un análisis de impacto ambiental (EIA) antes de la construcción de una presa para evaluar los posibles impactos y tomar medidas para mitigarlos (ANA, 2010).

Objetivos de un EIA sobre represas según ANA 2010

Los objetivos de un EIA sobre represas son los siguientes:

- Identificar y evaluar los posibles impactos ambientales de la construcción de la presa.
- Desarrollar medidas para mitigar los impactos ambientales negativos.
- Proporcionar información a los decisores para que puedan tomar una decisión informada sobre la construcción de la presa.

Etapas de un EIA sobre represas según ANA 2010

El proceso de un EIA sobre represas se puede dividir en las siguientes etapas:

- **Identificación de los impactos ambientales potenciales:** En esta etapa, se identifican los posibles impactos ambientales de la construcción de la presa. Esto se puede hacer mediante una revisión de la literatura científica, el análisis de datos de campo y la consulta con expertos.
- **Evaluación de los impactos ambientales:** En esta etapa, se evalúa la magnitud y el alcance de los posibles impactos ambientales identificados. Esto se puede hacer

mediante el uso de modelos y simulaciones, el análisis de datos de campo y la consulta con expertos.

- **Desarrollo de medidas de mitigación:** En esta etapa, se desarrollan medidas para mitigar los impactos ambientales negativos identificados. Estas medidas pueden incluir cambios en el diseño de la presa, la implementación de programas de restauración ambiental o la compensación financiera.
- **Presentación del informe del EIA:** En esta etapa, se presenta un informe del EIA a los decisores. El informe debe incluir una descripción de los impactos ambientales potenciales, una evaluación de los impactos ambientales y una descripción de las medidas de mitigación propuestas.

Impactos ambientales de las represas según ANA 2010

Los impactos ambientales de las represas pueden ser directos o indirectos. Los impactos directos son aquellos que son causados directamente por la construcción de la presa. Los impactos indirectos son aquellos que son causados por los cambios en los sistemas fluviales que resultan de la construcción de la presa.

Impactos directos de las represas

Los impactos directos de las represas incluyen:

- Cambios en el flujo de agua: Las presas modifican el régimen natural de flujo de los ríos, reduciendo el caudal aguas abajo. Esto puede tener consecuencias negativas para los ecosistemas fluviales, que dependen de un flujo variable para su funcionamiento.
- Cambios en la calidad del agua: Las presas pueden afectar la calidad del agua de varias maneras. Pueden atrapar sedimentos y otros contaminantes, lo que puede mejorar la calidad del agua aguas abajo. Sin embargo, también pueden favorecer la proliferación de algas y otros organismos acuáticos, lo que puede provocar eutrofización. Además, las presas pueden aumentar la temperatura del agua, lo que puede ser perjudicial para algunas especies.
- Cambios en la sedimentación: Las presas alteran el ciclo natural de la sedimentación, reduciendo la cantidad de sedimentos que se depositan aguas abajo. Esto puede tener consecuencias negativas para las llanuras de inundación, que dependen de los sedimentos para su fertilidad.

Impactos indirectos de las represas según ANA 2010

Los impactos indirectos de las represas incluyen:

- **Cambios en los ecosistemas fluviales:** Los cambios en el flujo de agua, la calidad del agua y la sedimentación pueden tener un impacto negativo en los ecosistemas fluviales. Esto puede afectar la biodiversidad, la productividad biológica y los servicios ecosistémicos proporcionados por los ríos.
- **Cambios en el uso del suelo:** La construcción de una presa puede dar lugar a cambios en el uso del suelo en la zona de influencia de la presa. Esto puede afectar la vegetación, la fauna y la calidad del aire.
- **Cambios en el clima:** Las presas pueden tener un impacto en el clima local. Por ejemplo, pueden aumentar la humedad y la temperatura del aire.

Medidas de mitigación de los impactos en el flujo de agua según ANA 2010.

Las presas modifican el régimen natural de flujo de los ríos, reduciendo el caudal aguas abajo. Esto puede tener consecuencias negativas para los ecosistemas fluviales, que dependen de un flujo variable para su funcionamiento.

- **Pasos de peces:** Los pasos de peces son estructuras que permiten a los peces pasar por encima o debajo de una presa. Esto ayuda a mitigar el impacto de las presas en la migración de los peces.
- **Aumento de la descarga de agua:** Las presas pueden aumentar la descarga de agua durante los períodos de sequía para ayudar a mantener el flujo natural del río.
- **Reducción de la altura de la presa:** Las presas de menor altura tienen un impacto menor en el flujo de agua.

Medidas de mitigación de los impactos en la calidad del agua según ANA 2010

Las presas pueden afectar la calidad del agua de varias maneras. Pueden atrapar sedimentos y otros contaminantes, lo que puede mejorar la calidad del agua aguas abajo. Sin embargo, también pueden favorecer la proliferación de algas y otros organismos acuáticos, lo que puede provocar eutrofización. Además, las presas pueden aumentar la temperatura del agua, lo que puede ser perjudicial para algunas especies.

- **Filtros de sedimentos:** Los filtros de sedimentos pueden ayudar a atrapar los sedimentos que transportan las presas. Esto ayuda a mantener la calidad del agua aguas abajo.

- **Tratamiento de aguas residuales:** Las presas pueden almacenar las aguas residuales, lo que puede contribuir a la eutrofización. El tratamiento de las aguas residuales antes de su almacenamiento puede ayudar a mitigar este impacto.
- **Diseño de la presa:** Las presas pueden diseñarse de manera que minimicen la temperatura del agua aguas abajo. Por ejemplo, las presas pueden tener una forma más redondeada para aumentar la disipación del calor.

Medidas de mitigación de los impactos en la sedimentación según ANA 2010

Las presas alteran el ciclo natural de la sedimentación, reduciendo la cantidad de sedimentos que se depositan aguas abajo. Esto puede tener consecuencias negativas para las llanuras de inundación, que dependen de los sedimentos para su fertilidad.

- **Descarga de sedimentos:** Las presas pueden descargar sedimentos acumulados en el embalse para ayudar a mantener las llanuras de inundación.
- **Reforestación de las llanuras de inundación:** La reforestación de las llanuras de inundación puede ayudar a mantener la fertilidad del suelo.
- **Diseño de la presa:** Las presas pueden diseñarse de manera que minimicen la sedimentación. Por ejemplo, las presas pueden tener un revestimiento que facilite el deslizamiento de los sedimentos.
- Otras medidas de mitigación
- Además de las medidas específicas para mitigar los impactos ambientales de las represas, también se pueden tomar otras medidas para ayudar a reducir los impactos negativos.
- **Participación pública:** La participación pública en el proceso de planificación de las represas puede ayudar a garantizar que se consideren los impactos ambientales.
- **Investigación:** La investigación sobre los impactos ambientales de las represas puede ayudar a desarrollar nuevas medidas de mitigación.
- **Monitoreo:** El monitoreo de los impactos ambientales de las represas puede ayudar a evaluar la eficacia de las medidas de mitigación.

1.4.2. Alteración del régimen hidrológico

Las represas modifican profundamente el régimen hidrológico natural de los ríos, generando alteraciones que afectan tanto la dinámica del caudal como la conectividad ecológica. Según Jardim et al. (2020), estos cambios incluyen la atenuación de crecidas y el aumento de caudales mínimos, lo cual repercute en la interacción del río con su planicie de

inundación, alterando la frecuencia e intensidad de las inundaciones estacionales. Esta disrupción compromete procesos ecológicos fundamentales, como la renovación de nutrientes y el mantenimiento de hábitats para especies acuáticas y ribereñas. Aunque estos sistemas de regulación hidrológica ofrecen beneficios económicos y sociales —como el control de inundaciones y la generación de energía—, también implican desafíos ambientales que requieren el desarrollo de estrategias operativas equilibradas. En este sentido, los modelos hidrológicos se convierten en herramientas esenciales para evaluar, más allá de los datos de estaciones de aforo, los impactos a diferentes escalas espaciales y temporales.

Complementariamente, Lu et al. (2018) destacan que las represas modifican indicadores clave del régimen hidrológico, como los caudales extremos, la duración de pulsos y la velocidad de cambio de los flujos. Estas alteraciones reducen la variabilidad natural del sistema fluvial, que es vital para la resiliencia ecológica. La diferenciación de estos impactos respecto a otras influencias, como el cambio climático, se ha logrado mediante modelos acoplados con métodos de corrección de sesgo, lo que permite aislar con mayor precisión el efecto específico de las infraestructuras hidráulicas. Así, el análisis de las modificaciones hidrológicas cobra relevancia no solo en grandes proyectos, sino también en pequeñas represas, que a menudo son subestimadas en sus efectos acumulativos. La planificación de caudales ecológicos, por tanto, se vuelve crucial para garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas asociados a los ríos regulados.

1.4.3. Impacto sobre la biodiversidad acuática y ribereña

La alteración del régimen hidrológico derivada de la construcción de represas no solo modifica la dinámica del caudal de los ríos, sino que genera consecuencias ecológicas profundas, especialmente en regiones tropicales donde los ecosistemas son altamente sensibles. Según Jones y Bull (2020) estas infraestructuras constituyen una amenaza considerable para la biodiversidad debido a la complejidad de los sistemas naturales afectados y a la dificultad de implementar medidas eficaces de compensación. Las modificaciones en el flujo reducen la frecuencia e intensidad de inundaciones naturales, alteran la conectividad entre el cauce y las zonas inundables, y afectan procesos clave como la reproducción de especies y la dispersión de nutrientes. Frente a este panorama, los autores resaltan la importancia de establecer escenarios de referencia bien definidos, llevar a cabo monitoreos independientes a largo plazo e incorporar medidas correctivas durante todas las fases del proyecto.

Por otro lado, la modificación del régimen hidrológico conlleva impactos directos sobre la fauna acuática, especialmente sobre aquellas especies que dependen de ríos de flujo continuo para completar sus ciclos biológicos. Cutler et al. (2020) explican que muchas especies de peces necesitan migrar grandes distancias para reproducirse, alimentarse o crecer, y que las represas interrumpen estas rutas esenciales, provocando la pérdida de hábitats adecuados y la fragmentación de los ecosistemas. Esto puede llevar a una disminución en la diversidad biológica, desequilibrios ecológicos y, en casos extremos, la desaparición local de especies sensibles. Además, estas alteraciones impactan negativamente en la seguridad alimentaria y en la economía de las poblaciones que dependen de la pesca.

1.4.4. Calidad del agua y eutrofización

La construcción de represas altera profundamente el régimen hidrológico de los ríos, afectando no solo el caudal y su temporalidad, sino también la calidad del agua y los procesos ecológicos asociados. Winton et al. (2019) advierten que la estratificación térmica en embalses tropicales provoca la acumulación de agua fría y pobre en oxígeno en las capas profundas, las cuales, al ser liberadas río abajo, deterioran la vida acuática e impactan negativamente en la provisión de servicios ecosistémicos. Esta situación se agrava por la falta de registros previos sobre las condiciones naturales de los cuerpos de agua, lo que dificulta una evaluación precisa de los cambios.

En la misma línea, Dębska et al. (2021) resaltan que las represas modifican la estructura térmica de los cuerpos de agua, generando capas profundas anóxicas que, al ser liberadas, degradan la calidad del agua aguas abajo. Estos cambios no solo afectan la biodiversidad acuática, sino que también comprometen la integridad de los ecosistemas fluviales en su conjunto. La complejidad de los impactos, producto de la interacción entre múltiples factores físicos, químicos y biológicos, exige una gestión ambiental rigurosa basada en información científica actualizada. En este sentido, ambos estudios coinciden en que es indispensable fortalecer los sistemas de monitoreo continuo, así como adaptar las medidas de mitigación a las particularidades de cada embalse.

1.4.5. Emisión de gases de efecto invernadero

Prairie et al. (2018) profundizan en esta problemática al destacar cómo la conversión de un río en una masa de agua estancada promueve la descomposición intensiva de materia orgánica, especialmente aquella procedente de los suelos y biomasa sumergidos. Este proceso eleva considerablemente las emisiones de metano y dióxido de carbono, particularmente en

embalses con grandes volúmenes y escasa circulación. Además, las emisiones no se limitan al cuerpo del embalse, ya que el metano acumulado en las profundidades puede liberarse súbitamente a través de las turbinas, generando desgasificaciones intensas aguas abajo. Si bien parte del carbono puede quedar atrapado en los sedimentos, este almacenamiento rara vez compensa el total de gases liberados. Por tanto, distinguir entre los flujos naturales y los inducidos por la intervención humana se convierte en un paso esencial para una contabilidad climática rigurosa. La alteración hidrológica, vista bajo esta óptica, implica no solo un reordenamiento del agua en el paisaje, sino también una transformación profunda en el balance de carbono de los ecosistemas acuáticos.

1.4.6. Restauración ecológica post-cierre

La alteración del régimen hidrológico provocada por las represas afecta no solo la dinámica fluvial aguas arriba y abajo, sino también los ecosistemas costeros vinculados al sistema fluvial. Anne et al. (2017) señalan que la remoción de represas, especialmente a gran escala, requiere una planificación anticipada centrada en la restauración de hábitats cercanos, mediante modelos predictivos y evaluaciones de campo. Esta intervención debe considerar obstáculos como la degradación del hábitat o prácticas humanas que dificulten la recuperación natural, y aplicarse con un enfoque de gestión adaptativa que incorpore nuevos conocimientos para garantizar resultados ecológicos sostenibles.

1.4.7. Análisis de impacto ambiental y restauración

En la Tabla 4 se muestra la síntesis para el análisis del impacto ambiental asociado a las represas revela una complejidad multiescalar que trasciende la mera modificación hidráulica. Estos efectos no solo son diversos en su manifestación, sino también prolongados en el tiempo, lo que obliga a considerar enfoques de gestión ambiental integrales y adaptativos, como los propuestos en los lineamientos del Estudio de Impacto Ambiental (ANA, 2010; Wu et al., 2019). La interacción entre componentes físicos, biológicos y sociales exige medidas diferenciadas que respondan a contextos específicos, sin perder de vista la sostenibilidad a largo plazo (Jardim et al., 2020; Lu et al., 2018).

Asimismo, las represas alteran condiciones esenciales para la vida acuática, generando estratificación térmica, zonas anóxicas y afectando la migración de especies (Winton et al., 2019; Dębska et al., 2021; Cutler et al., 2020). Frente a este escenario, la restauración ecológica post-cierre no debe verse como un acto final, sino como parte esencial del ciclo de vida de estas infraestructuras, mediante una planificación anticipada y adaptativa (Anne et al., 2017).

Además, el aporte de gases de efecto invernadero generados por la descomposición de materia orgánica en los embalses añade una dimensión climática al debate (Prairie et al., 2018), lo cual refuerza la necesidad de monitoreo constante, participación pública e investigación continua (ANA, 2010).

Tabla 4

Impacto ambiental y restauración

Tema	Aporte
Impacto ambiental general	Las presas afectan procesos fisicoquímicos, ecológicos y sociales a largo plazo. El impacto varía según las características locales, lo que exige planificación sostenible (Maavara et al., 2020; Ehsani et al., 2017).
Análisis de impacto ambiental	El EIA permite prever y mitigar impactos antes de construir una represa. Incluye identificación, evaluación, medidas correctivas y presentación formal del informe (ANA, 2010; Jannsendzimir, n.d.; Wu et al., 2019).
Impactos directos	Cambios en flujo, calidad del agua y sedimentación son efectos inmediatos de las represas que alteran la dinámica natural de los ríos y afectan su productividad (ANA, 2010).
Impactos indirectos	Las modificaciones impactan los ecosistemas, el uso del suelo y hasta el clima local, comprometiendo la biodiversidad y calidad ambiental en el área de influencia (ANA, 2010).
Mitigación del flujo de agua	Estrategias como pasos de peces, regulación del caudal y diseño estructural buscan mantener condiciones ecológicas y ciclos de vida acuáticos (ANA, 2010).
Mitigación de la calidad del agua	Filtros de sedimentos, tratamiento de aguas y diseño adaptado reducen los efectos negativos como la eutrofización o el aumento de temperatura (ANA, 2010).
Mitigación de la sedimentación	Acciones como descarga de sedimentos o reforestación de llanuras ayudan a conservar fertilidad y funcionamiento ecosistémico (ANA, 2010).
Medidas transversales	Participación pública, monitoreo e investigación constante son claves para prevenir daños acumulativos y ajustar medidas de forma oportuna (ANA, 2010).
Alteración del régimen hidrológico	Las represas reducen la variabilidad del caudal, alterando inundaciones estacionales y procesos ecológicos como la dispersión de nutrientes (Jardim et al., 2020; Lu et al., 2018).
Biodiversidad acuática y ribereña	Las barreras afectan la migración, reproducción y conectividad de especies acuáticas, reduciendo la diversidad y afectando a comunidades dependientes (Jones & Bull, 2020; Cutler et al., 2020).
Calidad del agua y eutrofización	Embalses generan estratificación térmica y zonas anóxicas que impactan negativamente la vida acuática y degradan ecosistemas aguas abajo (Winton et al., 2019; Dębska et al., 2021).
Gases de efecto invernadero	La descomposición de materia orgánica bajo embalses eleva emisiones de metano y CO_2, alterando el balance de carbono del ecosistema acuático (Prairie et al., 2018).
Restauración post-cierre	La remoción de represas debe incluir planificación ecológica adaptativa, modelos predictivos y acciones concretas para rehabilitar hábitats (Anne et al., 2017).

Nota. Elaboración propia

2. Análisis de Antecedentes Investigativos

2.1. Antecedentes nacionales

La investigación realizada por (Bello et al., 2023) se centra en examinar los efectos de la regulación de un embalse en la operación de una planta hidroeléctrica en el lago Sibinacocha, ubicado en Perú, sobre los recursos hídricos. Este estudio se enmarca en un enfoque correlacional y explicativo, cuyo propósito es identificar los factores determinantes que influyen en los flujos de agua durante las temporadas seca y húmeda que alimentan la central hidroeléctrica Machu Picchu.

El estudio evidenció que tras la operación de la represa Sibinacocha desde 1988, se produjo una alteración significativa del régimen hidrológico: durante la temporada seca (JJA), se generó un ecosuperávit superior al 30%, mientras que en la temporada húmeda (DJF) se observó un ecodeficit cercano al 20%, en comparación con el flujo natural. Las precipitaciones anuales y estacionales (DJF) aumentaron desde 1998–99, y en los meses de agosto, octubre y noviembre el caudal medio se incrementó entre 11.7% y 23.8%. Los caudales mínimos de 1, 3, 7 y 30 días crecieron más de 20%, mientras que los máximos subieron hasta en 7.2%. Asimismo, el número y duración de pulsos de bajo caudal disminuyó, lo que refleja una regulación artificial del flujo. Las alteraciones no solo fueron hidrológicas sino también temporales: la fecha del caudal mínimo se adelantó en seis días y el número de reversos en la corriente aumentó en 9.4%. Estos cambios responden más a la operación del embalse que a la variabilidad climática, indicando impactos potenciales en la ecología fluvial y subrayando la necesidad de monitoreo hidrometeorológico más robusto en los Andes peruanos.

La investigación de Alzamora et al. (2019) se centra en que la tecnología hidroeléctrica de baja cabeza está permitiendo la expansión de los sistemas de energía distribuida en regiones aisladas que resultan difíciles de conectar a la red eléctrica convencional. Dicha tecnología puede proporcionar recursos de energía renovable a una población más amplia, especialmente en países en desarrollo.

El estudio evaluó una planta piloto de energía hidroeléctrica por vórtice gravitacional (GVHP) de 10 kW en una zona rural de Perú, operando con una altura mínima de 1 m y caudales entre 1.0 y 1.35 m^3/s. Se alcanzó una potencia máxima de 3.3 kW a 1.35 m de altura y 55 rpm, con una eficiencia del sistema de 17.5% y eficiencia estimada de la turbina de hasta 23.1%. La inversión total fue de 44,700 USD, siendo el costo de mano de obra el mayor (17,500 USD),

seguido de materiales (7,400 USD) y consumibles (7,300 USD); se requirieron aproximadamente 548 jornadas laborales. Se estima una generación anual de 27 MWh (valorada en 2,700 USD), lo que implica un retorno de inversión de 16 años, reducible a 8 años si se optimiza la eficiencia al 30%. El sistema demostró ser viable en contextos rurales gracias a su bajo costo, facilidad de construcción con materiales locales y potencial para futuras mejoras en eficiencia y transmisión, aunque aún presenta limitaciones en el diseño de la turbina y la caja de transmisión.

Según Philip (2013) el río Madeira, un afluente del Amazonas que drena partes de Bolivia, Perú y Brasil, presenta una de las cargas de sedimentos más altas del mundo. Las preguntas sobre cómo estos sedimentos afectarían a las presas hidroeléctricas de Santo Antonio y Jirau, actualmente en construcción en Brasil, y cómo las presas afectarían los flujos de sedimentos, han sido objeto de una larga controversia relacionada con la licencia ambiental de las presas. Poco antes de otorgar la licencia de las presas, el escenario oficial cambió por completo, pasando de uno en el cual los sedimentos se acumularían rápidamente, pero podrían ser contenidos sin causar daños a la operación de la presa, a uno en el que no habría acumulación de sedimentos en absoluto.

El estudio evidencia que, pese a que el río Madeira transporta una de las mayores cargas de sedimentos del mundo, las represas Santo Antônio y Jirau fueron licenciadas sin resolver impactos clave: modelos como el HEC-6 proyectaron sedimentación sustancial en 50 años incluso con el embalse operando a 87 m s.n.m., elevando el lecho fluvial y provocando inundaciones río arriba que afectarían la localidad de Abunã (Brasil) y áreas protegidas en Bolivia. A esto se suma la afectación a la pesca, de la cual dependen 2400 pescadores cooperativistas brasileños, y la posible extinción del bagre gigante (B. vaillantii y B. rousseauxii) por interrupción de rutas migratorias. El costo social incluyó el desplazamiento de poblaciones, deforestación, urbanización descontrolada e impactos sobre pueblos indígenas aislados. A pesar de que el personal técnico del IBAMA emitió opiniones de hasta 221 páginas en contra del licenciamiento por incumplimiento de hasta 33 condicionantes ambientales, las licencias se otorgaron en lapsos de 8 a 10 días, bajo presión política directa, siendo ignoradas las advertencias técnicas. Actualmente, la generación comenzó en Santo Antônio en diciembre de 2011 y en Jirau se programó para junio de 2013, mientras las dudas sobre el manejo de sedimentos, contaminación por mercurio metilado y la validez de los créditos de carbono bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio siguen sin resolverse

Chávez et al. (2013) en su investigación nos detalla sobre los impactos económicos directos, los proyectos de desarrollo conllevan una serie de impactos sociales y medioambientales de naturaleza compleja, donde la sostenibilidad desempeña un papel fundamental. El embalse Gallito Ciego se erigió con el propósito de fomentar y optimizar la producción agrícola en el valle de Jequetepeque, Perú. Se llevó a cabo un análisis de costo-beneficio centrado en la producción de arroz durante el período comprendido entre 1992 y 2007, con el fin de cuantificar el impacto económico inmediato del proyecto.

El estudio sobre el impacto del embalse Gallito Ciego en el sector arrocero del valle del Jequetepeque estimó un Valor Actual Neto (VAN) positivo de US$ 69,500,051 frente a un escenario sin proyecto con VAN de US$ -4,201,119, con una relación beneficio-costo del 40%. Sin embargo, la salinidad del suelo aumentó un 6%, casi el doble de lo previsto, y la tasa de crecimiento poblacional en la zona fue de solo 1.7%, muy por debajo del 3.25% estimado. Además, la sedimentación anual del río Jequetepeque pasó de 1.7 MMC a 2.9 MMC en el periodo 1943–1998, y a 3.4 MMC entre 1968–1998, lo que redujo la vida útil del embalse de 50 a 33 años. Este incremento se atribuyó principalmente al fenómeno El Niño de 1997. Los resultados evidencian beneficios económicos para la producción agrícola, pero también impactos ambientales y sociales subestimados, como la erosión del 66% del área con intensidad moderada a alta y un aumento en la presión sobre los recursos naturales, lo que plantea la necesidad de futuras inversiones en mitigación y una valoración ambiental más rigurosa.

La investigación llevada a cabo por Swiech et al. (2012) aborda la evaluación de los efectos resultantes de la introducción de un embalse con fines de riego en la región de Yarabamba, ubicada en Arequipa. Este estudio adopta una aproximación de estudio de caso con un enfoque explicativo.

El estudio sobre el reservorio Yanaorco–Paltaorco en la cuenca de Yarabamba muestra que, si bien su implementación puede mitigar el déficit hídrico, su efectividad depende de mejoras paralelas en la eficiencia de riego. Según el modelo WEAP, sin reservorio (escenario 1), el caudal perdido anual alcanzó solo 19.1 millones de m^3, mientras que con eficiencias mayores (escenario 2), se incrementó a 68.5 millones de m^3. En los escenarios con reservorio y sin mejoras en eficiencia (escenario 5), la demanda no satisfecha alcanzó los 45,451 mil m^3; en cambio, con eficiencia y sin expansión agrícola (escenario 6), el volumen del reservorio se mantuvo estable y cubrió las necesidades de riego anuales. Aumentar la frecuencia de turnos de riego de 25 a 15 días favorecería el cambio a cultivos de mayor valor. Las zonas más críticas

en déficit de agua fueron Bajo Yarabamba y Bajo Sogay, mientras que Polobaya y Bajo Quequeña presentaron menores niveles de demanda insatisfecha. El almacenamiento en el reservorio mostró comportamiento contrastante: en escenarios sin expansión, el volumen se acumuló año tras año, mientras que al incrementar cultivos y área regada sin eficiencia, el agua almacenada disminuyó progresivamente. En conclusión, el reservorio puede mejorar la seguridad hídrica, pero solo será sostenible si se acompaña de riego tecnificado, reorganización institucional y cooperación entre usuarios, especialmente para evitar la persistente inequidad entre sectores aguas arriba y abajo.

2.2. Antecedentes internacionales

Según Kondolf y Yi (2022), las presas son fundamentales para la sociedad, pero tienen impactos ambientales significativos, lo que ha generado un creciente interés en las medidas de mitigación. Al mismo tiempo, la sedimentación amenaza la sostenibilidad del almacenamiento en embalses y de las funciones de los mismos.

El estudio subraya que la renovación de represas es crucial ante el envejecimiento de infraestructuras diseñadas con una vida útil de 50–100 años y frente al aumento de la variabilidad hidrológica por el cambio climático. La acumulación de sedimentos amenaza su funcionalidad: por ejemplo, remover mecánicamente sedimentos puede costar al menos USD 2.50 por m^3, mientras que grandes rehabilitaciones pueden ser muy costosas, como el caso del BF Sisk Dam en California, donde las alternativas de mejora estructural costaron entre USD 830 millones y USD 1134 millones. Casos como el del embalse Chimoni en India implicaron inversiones menores (USD 1.2 millones) para solucionar filtraciones. Algunas renovaciones han sido exitosas: en los ríos Murray y Penobscot, la instalación de múltiples escalas para peces permitió la migración efectiva de especies. En contraste, el proyecto de paso para peces en la represa Pelton fracasó, ya que los juveniles no lograron cruzar el embalse. Otros enfoques incluyen la reoperación de represas: en el río Savannah se lograron reactivar parcialmente las llanuras de inundación y en el Roanoke se redujo el ahogamiento de árboles ribereños. El estudio concluye que, aunque la remoción de represas podría revertir muchos impactos geomorfológicos y ecológicos, la mayoría permanecerán, por lo que renovar sus estructuras, restaurar la continuidad sedimentaria y ajustar sus operaciones es fundamental para extender su vida útil, mejorar su desempeño ambiental y reducir riesgos futuros.

La investigación de Lucas-Borja et al. (2021) detalla los impactos geomorfológicos, ecológicos e hidrológicos generados por los embalses tipo "check" y el material utilizado en su

construcción. Este estudio se caracteriza por su enfoque descriptivo y explicativo. La metodología se basa en la investigación cualitativa y una extensa revisión bibliográfica. La investigación se centra en proporcionar información sobre cómo la construcción de embalses, su tipo, manejo y material de construcción afectan de manera diversa la actividad ecosistémica en el lugar de operación de un embalse.

El análisis de 153 documentos científicos publicados entre 1955 y 2019 reveló que el 55% de los estudios sobre diques de retención (check dams) se realizaron en climas áridos, 25% en climas fríos, 14% en templados y 6% en tropicales, sin registros en climas polares; geográficamente, Asia concentró 61 estudios (29 en China), Europa 52 (16 en España), y América 11 (todos en EE. UU.). El 48.4% de los documentos reportaron funciones geomorfológicas (como retención de sedimentos), 30.7% funciones hidrológicas (control de escorrentía y recarga de acuíferos), y 20.9% funciones ecológicas (restauración vegetal y recuperación de tierras). En la meseta de Loess (China), 110,000 diques almacenan 21 mil millones de m^3 de sedimentos y han reducido la erosión de más de 200 a 20–25 t/ha/año, así como el escurrimiento y el sedimento en 39% y 85%, respectivamente. En India, terrenos agrícolas generados por estos diques produjeron de 6 a 16 veces más que los de ladera. No obstante, solo el 9% de los estudios reportaron el material de construcción y el 29% no evaluó la eficacia de los diques. Se identificaron también efectos adversos como colapsos por falta de mantenimiento, escorrentía erosiva aguas abajo, o estructuras mal diseñadas, especialmente en eventos extremos. La eficiencia de retención de sedimentos supera el 40% en algunos casos, pero puede disminuir rápidamente sin dragado o nuevos diques. La infiltración de agua puede alcanzar más del 50% del escurrimiento, contribuyendo a la recarga subterránea y a la mejora de la vegetación ribereña, lo cual a su vez estabiliza los sedimentos almacenados.

Según los autores Kuriqi et al. (2021) la percepción general de las pequeñas centrales hidroeléctricas de flujo continuo como fuentes de energía renovable con impactos ambientales mínimos o nulos ha llevado a una proliferación global de esta tecnología hidroeléctrica. Sin embargo, tales esquemas de hidroeléctricas pueden alterar el régimen de flujo natural y perjudicar el ecosistema fluvial en diferentes niveles tróficos.

Este estudio revisó 1568 casos y 153 publicaciones sobre los impactos ecológicos de las pequeñas plantas hidroeléctricas de pasada (RoR), encontrando que el 40% se centraron en peces, 24% en macroinvertebrados, 15% en calidad del agua, 9% en geomorfología, 7% en alteración hidrológica y solo 5% en vegetación. Europa lidera con el mayor número de estudios y casos, seguida de Asia, Norteamérica y América Latina, mientras que África y Oceanía

presentan menor desarrollo y escasa investigación. Se identificaron 19 parámetros biofísicos frecuentemente alterados, destacando la pérdida de conectividad longitudinal, el aumento de temperatura del agua, la retención de sedimentos y contaminantes aguas arriba, y la disminución de oxígeno disuelto, velocidad del flujo y profundidad aguas abajo. En China, por ejemplo, la retención de sedimentos por esquemas tipo "pondage" ha sido significativa, y a nivel global se reportan impactos como disminución del 39% en caudales y pérdidas en la abundancia, riqueza y diversidad de peces y macroinvertebrados. Los esquemas tipo "pondage" (retención de agua por hasta 17 días) presentan mayores impactos ecológicos que los de tipo “dam-toe” (sin almacenamiento). El estudio concluye que los impactos ecológicos más comunes son la alteración del régimen de caudales, la pérdida de hábitats, la degradación de comunidades acuáticas y la falta de conectividad, especialmente por ausencia de medidas regulatorias, monitoreo y diseño ambiental adecuado en países en desarrollo.

La investigación de Suwal et al. (2020) presenta un estudio orientado a establecer directrices para la toma de decisiones que aborden la salud del ecosistema ribereño, considerando la variabilidad natural en el caudal de los ríos. Esta investigación empleó un enfoque metodológico que combina aspectos cuantitativos y cualitativos. El enfoque cuantitativo se refleja en el análisis del caso del embalse tipo cascada Liujiaping-Yumitan, con la implementación de un sistema de optimización destinado a maximizar la eficiencia hidroeléctrica mientras se minimiza el impacto asociado al flujo de entrada y salida de agua.

Este estudio aplicó el algoritmo NSGA-II para optimizar la operación del sistema de embalses Liujiaping-Yumitan en función de cinco clases de manejo ambiental (EMC), mostrando que al incrementar la protección ecológica (pasando de clase F a B), la generación anual de energía se mantuvo relativamente estable entre 1.103 y 1.121 $\times 10^8$ kWh, pero la escasez de caudales ecológicos (e-flows) aumentó drásticamente de 0.004×10^4 m³ en clase F a 2060.82×10^4 m³ en clase B. Por ejemplo, en la clase C se generaron 1.109×10^8 kWh con una escasez de 616.5×10^4 m³, mientras que en la clase D se generaron 1.103×10^8 kWh con 200.5×10^4 m³ de escasez. Los caudales ecológicos mínimos mensuales oscilaron entre 0.302 m³/s (dic., EMC F) y 3.114 m³/s (jun., EMC B) en Liujiaping; y entre 3.156 m³/s (dic., EMC F) y 32.541 m³/s (jun., EMC B) en Yumitan. El análisis evidencia un claro conflicto entre producción hidroeléctrica y conservación del ecosistema fluvial, y aunque los beneficios energéticos son similares entre clases, los costos ecológicos aumentan significativamente al priorizar la generación. Se concluye que es necesario sacrificar parte de la producción

energética para evitar la degradación ecológica, recomendando que los responsables de gestión consideren este equilibrio en futuras decisiones operativas.

La investigación de Maavara et al. (2020) se enfoca en analizar los impactos en el ciclo biogeoquímico del agua causados por la construcción de embalses en ecosistemas de agua dulce. Este estudio adopta un enfoque descriptivo y utiliza una metodología basada en la recopilación de datos relacionados con nutrientes, retención hidráulica, sedimentación de nutrientes y cambios en el estado de nutrientes en los embalses debido a la retención del agua. El tiempo y el flujo de liberación de agua son factores críticos que tienen un impacto significativo en los ecosistemas, ya que alteran los parámetros normales del agua. El estudio compara la construcción de embalses como una fuente importante de emisión de gases de efecto invernadero debido a la retención del agua, así como su impacto en el ciclo biogeoquímico del agua.

El estudio estima que los embalses hidroeléctricos emiten anualmente entre 36.8 y 273 TgC como CO_2 y entre 3 y 52 TgC como CH_4, dependiendo del área de superficie considerada (de 3.05×10^5 a 1.5×10^6 km²); adicionalmente, el enterramiento de carbono orgánico varía de 26 a 290 TgC/año, con flujos por unidad de área entre 120–181 $gCCO_2/m^2$/año y 35–44 $gCCH_4/m^2$/año. A nivel regional, las emisiones en embalses tropicales alcanzan 92.6×10^4 $\mu gC/m^2$/día como CO_2 y 16.0×10^4 $\mu gC/m^2$/día como CH_4, mientras que en regiones templadas estas bajan a 34.8×10^4 y 1.38×10^4 $\mu gC/m^2$/día, respectivamente. En contraste, algunos embalses amazónicos como Balbina y Tucuruí reportan emisiones de hasta $1{,}172\times10^4$ $\mu gC/m^2$/día (CO_2), atribuibles a la falta de desbroce previo a la inundación. En cuanto al N_2O, las emisiones globales oscilan entre 20 y 71.5 GgN/año, siendo sus tasas areales (0.94–1.6 gN/m^2/año) más de diez veces superiores a las de lagos y ríos. El estudio también advierte que la remoción de represas puede liberar nutrientes legados y generar emisiones que superen hasta 9 veces las generadas durante su vida útil, como lo evidencian casos en EE.UU. y Canadá con aumentos de hasta 200 veces en amonio o 6 veces en fósforo tras la liberación de sedimentos. Finalmente, se concluye que los embalses pequeños pueden tener mayor reactividad biogeoquímica por unidad de área, y que su integración en estrategias de gestión puede mejorar la eliminación de nutrientes, aunque con el riesgo de trasladar los problemas río arriba si no se aplican enfoques de cuenca completos.

Nautiyal y Goel (2020) nos menciona en s investigación que se ha encontrado que la evaluación de impacto ambiental de proyectos de energía hidroeléctrica debe llevarse a cabo

teniendo en cuenta todos los aspectos y factores que afectan los impactos ambientales relacionados con estos proyectos. La mayoría de los estudios anteriores se han centrado en la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero, por lo que es necesario dar énfasis a otros impactos ambientales, como la acidificación, el uso de la tierra, el consumo de energía, etc., y también considerar la descomposición de la biomasa en tierras sumergidas.

El estudio revisa críticamente la literatura sobre impactos ambientales de los proyectos hidroeléctricos y concluye que, aunque se han estimado factores de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) en rangos que van de 6 a 74.88 g CO_2-eq/kWh, los análisis son incompletos por no incluir emisiones de embalses, descomposición de biomasa, uso de suelo o etapas como reciclaje y demolición. La vida útil del proyecto (30 a 100 años) introduce gran variabilidad en los resultados, al igual que la metodología empleada (modelos de insumo-producto versus modelos de procesos). Se destaca el potencial del análisis emergético con indicadores como el ELR (razón de carga ambiental), donde valores mayores a 10 indican impactos severos. También se observa que muchas evaluaciones ignoran beneficios colaterales como riego o control de inundaciones, así como impactos indirectos por transmisión eléctrica, desplazamiento de comunidades o uso de tierras. En cuanto a pequeños proyectos hidroeléctricos (SHP), aunque emiten menos GEI, también pueden causar deterioro ecológico, sobre todo por caudales interrumpidos. La escasez de datos fiables obliga a asumir múltiples supuestos que comprometen la precisión de los análisis. Por tanto, el estudio concluye que no es posible evaluar la sostenibilidad de la hidroelectricidad solo con indicadores como las emisiones de GEI; se requiere un enfoque más integral y estandarizado que incluya múltiples dimensiones ambientales, sociales y operativas.

Según Winton et al. (2019) el impacto de las grandes presas es un tema popular en la ciencia ambiental, pero la importancia de la calidad del agua alterada como factor de impacto ecológico a menudo se pasa por alto en tales discusiones. Esto se debe en parte a que la información sobre la relación entre las presas y la calidad del agua es relativamente escasa y fragmentaria, especialmente en los países en desarrollo de baja latitud, donde se concentra actualmente la construcción de presas. En este artículo, revisamos y sintetizamos información sobre los efectos del represamiento en la calidad del agua con un enfoque especial en las bajas latitudes.

El estudio concluye que la construcción de represas en regiones tropicales amenaza gravemente la calidad del agua en los sistemas fluviales de baja latitud, con impactos que pueden extenderse por cientos de kilómetros aguas abajo y deteriorar servicios ecosistémicos

clave. Se identificó que el 79% de los embalses estudiados en zonas subtropicales liberan agua con menos de 5 mg/L de oxígeno disuelto y en 37% de los casos con menos de 2 mg/L, generando condiciones hipóxicas durante meses y afectando la biodiversidad fluvial. En casos extremos, como el Bakun en Malasia, estos efectos se detectaron hasta 150 km río abajo. La estratificación térmica estacional es común en estos embalses y conlleva la liberación de aguas frías, anóxicas y ricas en compuestos reducidos como H_2S y amoníaco, lo que agrava el estrés ecológico. Además, el estudio advierte sobre la removilización de fósforo desde sedimentos bajo condiciones anóxicas, lo que promueve episodios de eutrofización, como se observó en el Lago Kariba, donde hasta el 15% de la superficie estuvo cubierta por *Salvinia molesta*. Las represas también retienen sedimentos, lo que altera físicamente los hábitats y provoca oligotrofización aguas abajo. Se recomienda implementar evaluaciones ambientales obligatorias y monitoreo continuo, especialmente en países en desarrollo donde estas prácticas aún son limitadas, a fin de mitigar estos efectos mediante soluciones contextuales y basadas en evidencia científica.

La investigación de Dong et al. (2019) La producción de energía más limpia es la aplicación constante de una estrategia medioambiental preventiva e integrada que enfatiza la importancia del medio ambiente y de las personas. Aunque la aplicación de la producción más limpia se está volviendo cada vez más madura en diversas industrias, debido a la complejidad de la operación minera en sí y sus impactos extensos y complejos en el entorno ecológico, la aplicación de la producción más limpia en la industria minera enfrenta desafíos significativos.

El estudio señala que la reutilización y tratamiento de los relaves mineros aún es insuficiente, dado que el volumen reciclado sigue siendo pequeño frente al total almacenado, a pesar de su potencial como recurso secundario. Por ejemplo, los relaves pueden reutilizarse para fabricar materiales de construcción, fertilizantes compuestos magnéticos e incluso recuperar elementos metálicos con nuevas tecnologías de beneficio. Sin embargo, el reciclaje de metales de tierras raras, presentes en dispositivos como celulares (que contienen hasta 65 elementos distintos), enfrenta barreras técnicas y económicas que pueden generar más impactos que la extracción primaria. En cuanto al tratamiento, se destacan tres métodos: uso de tajos subterráneos como depósitos (lo cual requiere evitar afectaciones a las operaciones mineras adyacentes), uso de tajos abiertos para disposición de relaves secos, y el apilamiento sin represa con recuperación sincrónica mediante pasta de relaves (con 76–82% de masa sólida). Para abordar riesgos, se desarrolló un sistema de monitoreo en tiempo real (PSRMNS-IOTCC) basado en IoT y computación en la nube que opera 24/7 e integra predicciones de línea freática,

nivel de agua y desplazamiento del dique. Esta solución busca prevenir fallas como las observadas en represas que liberaron aguas hipóxicas (<5 mg/L de oxígeno) durante meses, afectando ecosistemas aguas abajo. En resumen, el desarrollo hacia una minería sin relaves, con reciclaje más eficiente y monitoreo automatizado, se plantea como la vía clave para lograr una producción más limpia y sostenible.

Marques et al. (2019) menciona que, debido al incremento de las temperaturas globales, se prevé que muchas cuencas hidrográficas experimenten una disminución en la disponibilidad de recursos hídricos, lo que dará lugar a conflictos relacionados con la gestión del agua. Esta problemática ya es característica en zonas semiáridas, donde se han construido una gran cantidad de embalses para el almacenamiento de agua. El aumento en la demanda de energía y el impacto del cambio climático han ejercido una presión cada vez mayor sobre los sistemas acuáticos.

Discusión sintetizada en un párrafo con cifras y conceptos clave:

La gestión del agua en Brasil presenta aún limitaciones importantes, principalmente por la falta de articulación entre fronteras administrativas e hidrológicas, lo que genera inconsistencias legales y operativas, según la OCDE. En el caso del embalse de Itaparica, construido hace más de 30 años sin estudios ambientales adecuados, hoy se observan graves problemas: salinización del suelo, eutrofización del agua por aporte de nutrientes desde suelos inundados y acuicultura intensiva sin control ambiental, además de contaminación por aguas residuales. La eutrofización es acelerada por procesos como la mineralización de vegetación inundada y la pérdida de oxígeno por estratificación térmica, lo que ha provocado condiciones hipóxicas (<5 mg/L) incluso a más de 150 km aguas abajo, como se documentó en casos similares. A nivel institucional, aunque existen comités de cuenca como el del São Francisco, su representatividad y participación no son homogéneas. Además, la migración y uso intensivo de las márgenes del embalse han promovido la eutrofización cultural y el deterioro de la calidad del agua. Frente a esta complejidad, se recomienda implementar sistemas de gobernanza hídrica integrados, reforzar el tratamiento de aguas residuales, establecer zonas de amortiguamiento sin uso en las orillas y aplicar tecnologías como riego eficiente y reutilización de agua, especialmente ante escenarios de sequías prolongadas asociadas al cambio climático.

La investigación de De Boer et al. (2018) sitúa en primer lugar, los suelos circundantes del Lago Nasser, es decir, Kalabsha, Toshka, El-Dakka, Abu Simbel en el lado occidental del lago y el área de Allaqui en el lado oriental, se depositaron debido a la acción del agua (la acción

del viento no se evaluó en este estudio). Los suelos de wadi son heterogéneos y estratificados y están compuestos por granos subredondeados; esto puede estar relacionado con la distancia de transporte. Los materiales parentales de estos suelos son sedimentos de wadi, esquistos y areniscas nubias.

Desde su fundación en 1980 por Otto Hutzinger, *The Handbook of Environmental Chemistry* se ha consolidado como una referencia científica clave en el estudio interdisciplinario de las transformaciones químicas en el ambiente. Con más de 70 volúmenes publicados, esta serie ha abordado tanto los aspectos físico-químicos como biológicos, geológicos e ingenieriles de los contaminantes, priorizando el enfoque en "ciencias duras" sin dejar de incluir temas relevantes como el desarrollo sostenible o la gestión ambiental. En esta línea, los editores Damià Barceló y Andrey Kostianoy destacan la relevancia actual de la contaminación plástica, especialmente los riesgos asociados a los químicos peligrosos presentes en microplásticos y pellets en entornos marinos. Tras años de trabajo experimental y de divulgación, decidieron reunir en un solo volumen investigaciones sobre la química de los polímeros, su degradación, la distribución global de microplásticos, los procesos de adsorción y desorción de contaminantes, y su interacción con organismos, incluyendo implicancias potenciales para la salud humana. Este libro busca ofrecer herramientas sólidas y advertencias metodológicas a nuevos investigadores, promoviendo rigor científico ante la creciente urgencia del problema ambiental del plástico.

La investigación de Hunt et al. (2018) se centra en la comparación de cómo los servicios de almacenamiento de energía y agua, como la generación de energía hidroeléctrica, la red eléctrica y la gestión del agua, se proporcionan mediante plantas de almacenamiento estacional por bombeo (SPS) y plantas convencionales de embalses (CRD). La región de estudio es Brasil, un país con una extensa capacidad de energía hidroeléctrica y planes de desarrollo. El análisis compara los costos, los requisitos de tierra y los impactos sociales entre las plantas CRD y las potenciales plantas SPS.

Este estudio compara los embalses convencionales de represas (CRD) con los sistemas de almacenamiento por bombeo estacional (SPS) en el contexto del nexo agua-energía-tierra en Brasil. Se destaca que los CRD, aunque permiten almacenar todo el caudal del río, requieren grandes extensiones de tierra, presentan pérdidas significativas por evaporación y tienen impactos socioambientales elevados, especialmente en regiones como el Amazonas con topografía plana. En contraste, los SPS permiten almacenar agua y energía utilizando entre 10

y 100 veces menos superficie, con menores pérdidas por evaporación y menos afectación a los ecosistemas, ya que no implican represar directamente el río principal. El estudio propone reemplazar el actual embalse de Sobradinho (CRD) por el proyecto Muquém SPS, el cual permitiría ciclos de almacenamiento estacional, semanal y diario, con beneficios económicos netos estimados en 670 millones de dólares frente a las pérdidas proyectadas de 1.460 millones en Sobradinho. Además, los SPS pueden integrarse con energías renovables intermitentes y contribuir a múltiples servicios, desde control de inundaciones hasta la transferencia intercuencas. Se concluye que los SPS representan una solución más sostenible y eficiente para el almacenamiento hídrico y energético, especialmente en regiones con limitaciones topográficas.

CAPÍTULO II.
METODOLOGÍA

1. Técnicas, instrumentos

1.1.Técnica: Observación directa

1.2.Instrumento: Matriz de Leopold

2. Campo de verificación

2.1. Ubicación Espacial

- **País:** Perú
- **Región:** Sur del Perú (Arequipa-Puno-Cusco)
- **Represas de la Cuenca del Río Sumbay:**
  - ✓ Presa Chalhuanca: Latitud 15° 47’ 48’’ sur y Longitud 71° 20’ 09’’ oeste.
  - ✓ Presa Bamputañe: Latitud 15° 24’ 45’’ sur y Longitud 71° 01’ 58’’ oeste.
  - ✓ Presa Pillones: Latitud 15° 58’ 60’’ sur y Longitud 71° 13’ 00’’ oeste.

2.2. Ubicación Temporal

- La presente investigación se ejecutó entre los meses de agosto 2023 y diciembre del 2025.

3. Cuadro de variables

Se asignaron valores a cada celda de la matriz para los diferentes criterios. Esto implica una escala numérica.

Tabla 5

Cuadro de variables

Variables	Dimensiones	Indicadores
VI: Operación y cierre de represas	Fase de mantenimiento	Inspección y monitoreo regular Mantenimiento de equipos electromecánicos Mantenimiento y limpieza de estructuras, desagües Mantenimiento de vías de acceso Mantenimiento de la vegetación Gestión de residuos y materiales excedentes Gestión de campamentos y almacenes Capacitación y educación ambiental Medidas de mitigación y control ambiental Inspección y monitoreo regular
	Fase de reparación	Reparación de estructuras dañadas Reparación de equipos electromecánicos Reacondicionamiento de compuertas y válvulas
	Fase de desmantelamiento	Desactivación de equipos y sistema Desmantelamiento y gestión de campamentos y almacenes Desmantelamiento de plantas chancadoras Remoción de construcciones provisionales Desmantelamiento de estructuras
	Fase de restauración	Restauración de áreas utilizadas como Depósitos de Material Excedente Renivelación y revegetación de terrenos compactados
	Fase de disposición	Disposición final de aceites, combustibles y residuos peligrosos Retiro de residuos no municipales y de sedimentos Monitoreo a largo plazo
VD: Impacto ambiental	Medio físico	Agua Aire Suelo
	Medio biológico	Flora Fauna
	Medio socio-cultural	Económico Cultural

Nota. Elaboración propia

4. Unidades de estudio

Las unidades de estudio que se consideran en la presente investigación se dividen en dos: las unidades primarias que son propiamente la etapa de operación y cierre de las represas, ya que son el objeto donde se va a centrar el estudio y las secundarias que están constituidas por los impactos generados en el ecosistema aledaño.

5. Población y muestra

El corpus está constituido por la Represas Pillones, Chalhuanca y Bamputañe pertenecientes a la Cuenca del Río Sumbay. La muestra no corresponde para el presente estudio,

porque se considerará parámetros ambientales para determinar la presencia o ausencia de impactos ambientales.

6. Limitaciones

Dificultad en el acceso a la zona por la distancia y por los problemas económicos-sociales que atraviesa el país.

7. Estrategia de recolección de datos

La investigación se dividió en tres etapas. La primera fue una etapa de gabinete, en la que se realizó la recopilación, procesamiento y análisis de información proveniente de estudios existentes en el área de influencia de las represas. La segunda etapa fue de campo, durante la cual se visitó la zona en tres oportunidades, con el propósito de comprobar el estado de los parámetros ambientales, evaluar la situación ambiental del entorno e identificar a los afectados por la construcción de las represas.

La aplicación del instrumento se llevó a cabo en distintos días, en un intervalo aproximado de 7 días, considerando las distancias considerables entre el centro poblado y las estancias. Finalmente, en la tercera etapa se trabajó con los resultados, en función a los datos recopilados en las dos primeras fases. La metodología de aplicación se basó en el uso de la matriz. Se consideró fundamental el juicio de expertos, ya que de no haberse contado con este criterio, los análisis y conclusiones sobre los impactos positivos y negativos en la etapa de operación y cierre habrían estado marcados por una alta subjetividad, reduciendo el nivel de confianza de la investigación. Para el análisis de datos, se utilizaron estadígrafos descriptivos como tablas de frecuencias y gráficos estadísticos, con el fin de contrastar las hipótesis y obtener conclusiones que enriquecieran el estudio.

8. Proyecto de construcción civil

Para la realización de la investigación es importante tener clara la definición de lo qué es un proyecto de construcción civil, según (Chitkara 2019), un proyecto de construcción civil es un proceso planificado y sistemático que incluye la concepción, diseño, ejecución y gestión de estructuras e infraestructuras físicas.

Comprende una serie de actividades y tareas organizadas para producir una infraestructura específica, cumpliendo con las normas de ingeniera y construcción, y gestionando los recursos de manera eficiente (Gould y Joyce, 2021).

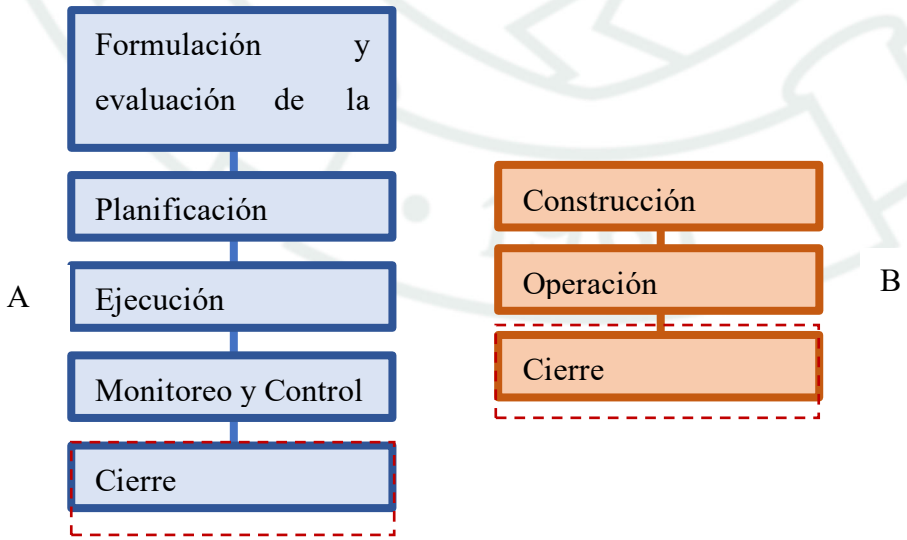
8.1. Etapas de un proyecto: represa

- **Formulación y evaluación de la inversión:** que involucra la identificación del proyecto, el estudio de perfil, el estudio de pre-inversión a nivel de factibilidad.
- **Formulación y evaluación de la inversión:** que involucra la identificación del proyecto, el estudio de perfil, el estudio de pre-inversión a nivel de factibilidad.
- **Ejecución:** que involucra la contratación de la ejecución de la obra, el inicio de construcción y supervisión de obras.
- **Monitoreo y control:** que involucra el control de calidad, seguimiento del cronograma y presupuesto y la gestión de cambios.
- **Cierre:** que involucra la recepción de la obra, la liquidación del proyecto y la entrega y puesta en operación.

De manera general y en algunos textos se simplifican las etapas de un proyecto de construcción de represas, especialmente en contextos donde se busca una visión general o una explicación concisa. Es común resumir las etapas de construcción de una represa en tres fases principales: construcción, operación y cierre.

Figura 8

Etapas de un proyecto de construcción de represa



Nota. Elaboración propia

Como podemos apreciar en el Esquema 1, en el lado A se aprecian las 5 etapas generales de la construcción de una represa, estas etapas y su normativa asociada aseguran que los proyectos de construcción de represas en el Perú se realicen de manera ordenada, eficiente y conforme a los estándares de calidad y requisitos legales. Y en el lado B, estas etapas proporcionan una visión general del ciclo de vida de un proyecto de construcción de represas, desde su concepción hasta su desmantelamiento. Sin embargo, es importante tener en cuenta que dentro de cada una de estas etapas pueden existir subetapas y procesos específicos que deben ser gestionados adecuadamente para garantizar el éxito del proyecto.

En el Esquema 1 se observa que la etapa de cierre está presente en ambos procesos, por lo tanto, se considera que esta no es solo una etapa más en la elaboración de proyectos, sino que es una etapa importante en la ejecución de los mismos. Esta etapa de "cierre" tiene una falta de énfasis que puede ser atribuida a varias razones. Algunas se detallan a continuación:

- **Enfoque en la construcción y operación:** muchas veces, los desarrolladores de proyectos y las entidades responsables están más centrados en las fases de construcción y operación de la represa, ya que son las etapas en las que se intervienen la mayor parte de los recursos financieros y humanos. Como resultado, la etapa de cierre puede ser descuidada o considerada como una preocupación secundaria.
- **Falta de conciencia sobre impactos a largo plazo:** a menudo, los impactos ambientales y sociales asociados a la construcción y operación de una represa son más evidentes y reciben una mayor atención pública que los impactos a largo plazo, y a las responsabilidades asociadas a su cierre. Esto puede llevar a una subestimación de la importancia de la etapa de cierre en la planificación y gestión del proyecto.
- **Presión:** en algunos casos existe la presión para completar la construcción y poner en operación la represa lo más rápido posible, debido a consideraciones financieras, políticas o de seguridad/producción energética.
- **Falta de regulaciones y supervisión efectiva:** la ausencia de regulaciones claras y efectivas relacionadas con la etapa de cierre de represas puede contribuir al descuido de esta fase en los proyectos. Sin una supervisión adecuada por parte de las autoridades competentes, los ejecutores pueden tener menos incentivos para abordar adecuadamente los aspectos de cierre de proyecto.

- **Desafíos financieros y técnicos:** el cierre de una represa puede plantear desafíos financieros y técnicos significativos, especialmente en términos de costos de desmantelamiento, rehabilitación del sitio y gestión de riesgos ambientales. La falta de recursos financieros o la percepción de que los riesgos asociados con el cierre son menores pueden llevar a una postergación o minimización de esta etapa.

9. ¿Qué comprende la etapa de operación y cierre de una represa?

- **Operación:** una vez completada la etapa de construcción, la represa entra en fase de operación, se pone en funcionamiento el sistema hidroeléctrico y se comienza a regular el flujo de agua según las necesidades de generación de energía, el riego agrícola, suministro de agua potable, entre otros.
- **Cierre:** Cuando una represa llega al final de su vida útil o cuando ya no es económicamente viable operarla, se procede a su cierre. Durante esta fase, se llevan a cabo actividades como la desactivación de equipos, la gestión de residuos y la restauración del entorno natural afectado por la construcción y operación de la represa. El cierre también puede implicar la demolición o desmantelamiento de algunas estructuras, dependiendo de las regulaciones ambientales y de seguridad.

10. Matriz de Leopold

La matriz de Leopold es una herramienta utilizada en la evaluación de impacto ambiental (EIA) para identificar y evaluar los posibles impactos de un proyecto sobre el medio ambiente. Esta matriz fue desarrollada en 1971 por Luna B. Leopold et. al., y es ampliamente utilizada debido a su capacidad para organizar y sistematizar la información sobre los impactos ambientales de manera clara y comprensible.

10.1. Componentes de la matriz de Leopold

- Acciones del proyecto: en la fila de la matriz se enumeran todas las acciones y actividades específicas del proyecto que pueden tener un impacto ambiental. Estas pueden incluir la preparación del sitio, excavaciones, construcción de infraestructuras, operación y mantenimiento, entre otras.
- Factores ambientales: en la columna de la matriz se listan los componentes del medio ambiente que pueden verse afectados por las acciones del proyecto. Estos

factores pueden incluir aspectos físicos, biológicos, socioeconómicos y culturales, como el aire, el agua, la flora, la fauna, el paisaje, la salud humana, entre otros.

- Evaluación de impacto ambiental: en cada celda de la matriz, se evalúan los impactos específicos de cada acción sobre cada factor ambiental, esta evaluación puede incluir una descripción cualitativa del impacto y/o una cuantificación de este, considerando su magnitud, duración, reversibilidad y significancia.

10.2. Uso y aplicación de la matriz de Leopold

La Matriz de Leopold permite a los evaluadores identificar rápidamente que acciones del proyecto tienen más probabilidades de causar impactos significativos y en que componentes del medio ambiente. Esto facilita la priorización de los esfuerzos de mitigación y gestión ambiental (Sánchez & hacking, 2018).

10.3. Ventajas y desventajas de la matriz de Leopold

10.3.1. Ventajas:

- Organización sistemática: la matriz proporciona una estructura clara y organizada para la identificación y evaluación de impactos.
- Flexibilidad: puede ser adaptada a diferentes tipos de proyectos y contextos ambientales.
- Claridad visual: la matriz permite una visualización clara de las interacciones entre actividades del proyecto y los componentes ambientales (Glasson, Therivel & Cahdwick, 2020).

10.3.2. Desventajas:

- Complejidad: puede volverse muy compleja y difícil de manejar para proyectos grandes con muchas acciones y factores ambientales.
- Subjetividad: la evaluación de los impactos en cada celda puede ser subjetiva, dependiendo de la interpretación de los evaluadores (Glasson, Therivel & Chadwick, 2020).

10.4. Desarrollo de matriz de Leopold

10.4.1. Identificación de actividades del proyecto y factores ambientales.

a. Identificación de actividades del proyecto

Las acciones del proyecto se refieren a todas las actividades que se llevaran a cabo durante las distintas fases del proyecto, desde la planificación hasta el cierre. Para identificar estas actividades:

- Revisión de actividades: realizar el listado de todas las actividades descritas del proyecto.
- División por fases: clasificación de las actividades según las fases del proyecto.
- Detallado de acciones: para cada fase, desglosar las acciones en actividades específicas.

b. Identificación de factores ambientales:

Los factores ambientales son los componentes del entorno que pueden verse afectado por las acciones del proyecto. Para identificar estos factores, se puede realizar:

- Categoría de factores: división de los factores ambientales en categorías
  - Físicos: agua, aire, suelo
  - Biológicos: flora, fauna, ecosistemas
  - Sociales y económicos: comunidad local, empleo, economía regional
  - Culturales: sitios arqueológicos, patrimonio cultural

- Revisión de impactos potenciales: se deben de identificar los impactos potenciales en cada categoría
  Agua: Ej.: calidad del agua, disponibilidad de recursos hídricos, etc.
  Aire: Ej,: emisiones de polvo y gases, calidad del aire, etc.
  Suelo: Ej.: erosión, contaminación del suelo, etc.

10.4.2. Definición de criterios de evaluación

- **Magnitud:** este criterio evalúa la extensión o grado del impacto ambiental. La magnitud puede ser medida en una escala del 1 al 5, donde 1 representa un impacto

muy bajo y 5 un impacto muy alto. Un impacto de alta magnitud podría afectar significativamente un componente ambiental importante (Glasson et al., 2012).

- **Importancia:** este criterio considera la relevancia del impacto en términos de sus consecuencias para el entorno y la sociedad. También puede ser medida en una escala del 1al 5. Un impacto de alta importancia es aquel que podría tener consecuencias graves para el medio ambiente o la salud (Pope et al., 2013).

- **Naturaleza:** la naturaleza del impacto puede ser positiva o negativa. Los impactos negativos deterioran las condiciones ambientales, mientras que los positivos mejoran el ambiente. Este criterio es cualitativo, indicando simplemente si el impacto es beneficioso o perjudicial (Sánchez, 2015).

- **Duración:** este criterio se refiere al periodo durante el cual el impacto será perceptible. Los impactos pueden ser temporales (durante la construcción) o permanentes (a lo largo de la vida útil del proyecto). La duración puede clasificarse como corta, media o larga (Glasson et al., 2012).

- **Reversibilidad:** este criterio indica si el impacto puede ser revertido o no. Un impacto reversible es aquel que puede ser mitigado o compensado hasta el punto de retornar a las condiciones iniciales, mientras que un impacto irreversible es permanente y no puede ser restaurado (Pope et al., 2013).

- **Probabilidad:** la probabilidad de que el impacto ocurra. Puede ser medida en una escala del 1 al 5, donde 1 representa una probabilidad muy baja y 5 una probabilidad muy alta. Este criterio ayuda a priorizar los impactos más probables sobre aquellos menos probables (Sánchez, 2015).

10.4.3. Asignación de valores a cada criterio

Se asignaron valores a cada celda de la matriz para los diferentes criterios. Esto implica una escala numérica.

Tabla 6

Criterios aplicativos a la Matriz de Leopold

Magnitud	Importancia	Naturaleza
1: impacto muy bajo	1: Impacto de poca importancia	Positivo: Impacto positivo
2: impacto bajo	2: Impacto de baja importancia	Negativo: Impacto negativo
3: impacto moderado	3: Impacto de importancia moderada	
4: impacto alto	4: Impacto de alta importancia	
5: impacto muy alto	5: Impacto de muy alta importancia	
Duración	**Reversibilidad**	**Probabilidad**
Temporal: Impacto que dura solo durante la construcción o una fase específica.	Sí: El impacto es reversible o revertido con acciones correctivas.	1: Muy baja probabilidad
Permanente: Impacto que perdura a lo largo de la vida del proyecto o más allá.	No: El impacto es irreversible, no pueden ser mitigados completamente.	2: Baja probabilidad
		3: Probabilidad media
		4: Alta probabilidad
		5: Muy alta probabilidad

Nota. Elaboración propia

10.4.4. Cálculo de la evaluación total

El cálculo de la evaluación total en una matriz de Leopold implica combinar los valores asignados a los diferentes criterios (magnitud, importancia, naturaleza, duración, reversibilidad y probabilidad) para obtener una puntuación que refleje el impacto de una acción del proyecto sobre un factor ambiental. Este cálculo permite priorizar los impactos más significativos y

tomar decisiones informadas sobre las medidas de mitigación. El cálculo de la evaluación total se hace de la siguiente manera:

- **Asignar valores a los criterios:** primero, asignamos valores numéricos a cada criterio para cada acción del proyecto y factor ambiental, como se describió anteriormente.

- **Ponderación de los criterios:** en algunos casos, los criterios pueden tener diferentes pesos según su relevancia en el contexto del proyecto. Por ejemplo, la magnitud y la importancia podrían tener más peso que la probabilidad. Si se utilizan ponderaciones, estas deben ser claramente definidas.

- **Fórmula para el cálculo total:** se utiliza una fórmula para combinar los valores de los criterios. Ver Ecuación 1:

$$\text{Puntuacion Total} = (\text{Magnitud} + \text{Importancia} + \text{Probabilidad}) * \text{Duracion} * \text{Reversibilidad} \ldots. \text{Eq. 1}$$

- **Evaluación de la naturaleza del impacto:** la naturaleza del impacto (positivo o negativo) puede influir en la puntuación total. Un impacto negativo puede restar puntos de la evaluación total, mientras que un impacto positivo puede sumar puntos.

- **Consideración de la duración y reversibilidad:** estos criterios pueden ser utilizados como multiplicadores o factores de ajuste en la formula. Por ejemplo, un impacto permanente puede multiplicar la puntuación total, mientras que un impacto reversible puede dividir la puntuación total. En el caso de no usar multiplicadores o factores, se puede considerar la duración y reversibilidad de manera descriptiva y ajustar las medidas de mitigación en base a la naturaleza cualitativa de estos criterios. El uso de los multiplicadores solo es una manera de cuantificar la influencia adicional de estos criterios.

Esta sección del presente documento pretende desarrollar una identificación y evaluación de impactos ambientales en algunas actividades de la etapa de operación y cierre de una represa a través de una Matriz de Leopold.

11. Aplicación de la matriz

Los proyectos de la Represas Pillones, Chalhuanca y Bamputañe declaran que solo cuentan con las etapas de planificación, etapa de construcción y etapa de operación, sin embargo, no especifican ninguna etapa de cierre, a excepción de medidas de mitigación al término de obra. Esto demuestra la falta de importancia que se mencionó al inicio de este apartado.

Para realizar una matriz de Leopold para el proyecto las represas, primero se identificó las acciones del proyecto y los factores ambientales relevantes del Estudio de Impacto Ambiental, no se declaran todas las actividades debido a que la información brindada cuenta con un documento de confidencialidad. Aquí tenemos algunas de las acciones y factores ambientales.

11.1. Identificación de actividades del proyecto

Tabla 7

Actividades de Proyecto

Etapa del proyecto	Fase de la etapa	Actividades específicas
Etapa de Operación	Mantenimiento	- Inspección y monitoreo regular - Mantenimiento de equipos electromecánicos - Mantenimiento y limpieza de estructuras, desagües - Mantenimientos de vías de acceso - Mantenimiento de la vegetación - Gestión de residuos y materiales excedentes - Gestión de campamentos y almacenes - Capacitación y educación ambiental - Medidas de mitigación y control ambiental - Inspección y monitoreo regular
	Reparación	- Reparación de estructuras dañadas - Reparación de equipos electromecánicos - Reacondicionamiento de compuertas y válvulas
Etapa de Cierre	Desactivación y desmontaje/Desmantelamiento de equipos y sistemas	- Desmontaje de equipos o sistemas de monitoreo y control de operación de represa
	Retiro de sedimentos y residuos	- Limpieza de residuos o material depositado en las estructuras de la represa
	Desmantelamiento de estructuras	- Desmontaje, demolición y disposición final de residuos de estructuras
	Restauración del entorno	- Restauración de hábitats naturales y paisajes
	Monitoreo a largo plazo	- Evaluación continua de los impactos ambientales, sociales y de seguridad asociados con el cierre de la represa - Monitorear la estabilidad de las estructuras remanentes y cualquier cambio en las condiciones hidrológicas y ambientales en el área afectada - Implementar medidas de gestión adaptativa según respuesta a los resultados del monitoreo a largo plazo

Nota. Elaboración propia

Tabla 8

Actividades de Proyecto

Fase de la etapa	Factores	Medio	Actividades	Factores ambientales
Mantenimiento	Factores físicos	Agua	Inspección y limpieza de compuertas y válvulas	- Posible alteración temporal de la calidad del agua debido a la remoción de sedimentos y desechos
			Revisión y mantenimiento de sistemas de drenaje	- Prevención de obstrucciones y mejoras en la calidad del agua al reducir la acumulación de contaminantes
			Mantenimiento de sistemas de tratamiento de agua	- Aseguramiento de la calidad del agua tratada y minimización de descargas de contaminante
			Mantenimiento de equipos electromecánicos	- Posible contaminación del agua por derrames de lubricantes
		Aire	Inspección y limpieza de compuertas y válvulas	- Emisión de polvo y partículas durante las actividades de limpieza
			Revisión y mantenimiento de sistemas de drenaje	- Posible emisión de olores durante la limpieza de sistemas de drenaje
			Mantenimiento de equipos electromecánicos	- Emisión de vapores y aerosoles de lubricantes utilizados, así como la emisión de polvo y partículas durante el mantenimiento
		Suelo	Inspección y limpieza de compuertas y válvulas	- Posible contaminación del suelo por derrames de aceites y lubricantes utilizados en el mantenimiento adecuado de sistemas de drenaje
			Revisión y mantenimiento de sistemas de drenaje	- Prevención de la erosión del suelo mediante el mantenimiento adecuado de sistemas de drenaje
			Mantenimiento de caminos y accesos	- Posible compactación y erosión del suelo debido a la actividad de vehículos
	Factores biológicos	Flora y fauna	Inspección y limpieza de compuertas y válvulas	- Perturbación de la fauna local debido al ruido y la presencia de trabajadores
			Revisión y mantenimiento de sistemas de drenaje	- Impacto en hábitats locales si se realizan actividades cerca de áreas sensibles
			Mantenimiento de caminos y accesos	- Posible alteración de la flora y fauna local debido a la actividad de mantenimiento
Reparación	Factores físicos	Agua	Reparación de estructuras dañadas	- Posible contaminación del agua por sedimentos y residuos de construcción
			Reacondicionamiento de compuertas y válvulas	- Reducción de fugas y mejora en la gestión del agua a largo plazo
			Reparación de equipos electromecánicos	- Posible contaminación del agua por derrames accidentales de lubricantes y aceites
		Aire	Reparación de estructuras dañadas	- Emisión de polvo y partículas durante la demolición y construcción
			Reparación de equipos electromecánicos	- Emisión de vapores y aerosoles de lubricantes

Nota. Elaboración propia

Tabla 9

Identificación de factores ambientales de la etapa de cierre (parte I)

Fase de la Etapa	Factores	Medio	Actividades	Factores Ambientales
Desactivación de equipos y sistemas	Factores físicos	Agua	- Apagar y desconectar equipos electromecánicos - Desmontar y retirar equipos de monitoreo y control	- Posible contaminación del agua por derrame de aceites y lubricantes (calidad del agua) - Riesgo de vertido accidental de líquidos de los sistemas de monitoreo
		Aire	- Apagar y desconectar equipos electromecánicos - Desmontar y retirar equipos de monitoreo y control	- Emisión de polvo y partículas durante la remoción de equipos grandes (calidad del aire) - Emisión de polvo y partículas durante la remoción de equipos, especialmente de áreas cerradas (calidad del aire)
		Suelo	- Apagar y desconectar equipos electromecánicos - Desmontar y retirar equipos de monitoreo y control	- Contaminación del suelo debido a posibles derrames de aceites y otros líquidos (calidad del suelo) - Alteración del suelo en áreas donde se retiran equipos grandes o realizan excavaciones (calidad del suelo)
	Factores Biológicos	Flora y fauna	- Apagar y desconectar equipos electromecánicos - Desmontar y retirar equipos de monitoreo y control	- Perturbación de flora local debido al ruido y movimiento de equipos - Alteración de hábitats cercanos debido al desmontaje
Retiro de sedimentos y residuos	Factores Físicos	Agua	- Drenaje y extracción de sedimentos - Tratamiento y disposición de residuos acuáticos y - Control de escorrentía y filtración	- Aumento de la turbidez del agua (calidad del agua) - A la falta de tratamiento de residuos antes de su disposición puede existir contaminación - Modificaciones en el flujo y calidad del agua por cambios en la escorrentía
		Aire	- Drenaje y extracción de sedimentos - Tratamiento y disposición de residuos acuáticos	- Generación de polvo por extracción y transporte de sedimentos secos - Generación de polvo y posibles emisiones de compuestos volátiles durante el tratamiento de residuos
		Suelo	- Drenaje y extracción de sedimentos - Tratamiento y disposición de residuos acuáticos - Control de escorrentía y filtración	- Alteración del suelo y erosión en áreas, debido a la movilización de maquinaria pesada - Incorrecto manejo de residuos - Cambios en la estructura del suelo
	Factores biológicos	Flora y fauna	- Drenaje y extracción de sedimentos - Tratamiento y disposición de residuos acuáticos - Control de escorrentía y filtración	- Perturbación de hábitats acuáticos y terrestres debido a la extracción de sedimentos - Impacto en la fauna acuática debido a la alteración de los sedimentos y calidad del agua - Alteración de hábitats por la incorrecta disposición de residuos - Cambios en los hábitats debido a la modificación de la escorrentía

Nota. Elaboración propia

Tabla 10

Identificación de factores ambientales de la etapa de cierre (parte II)

Fase de la etapa	Factores	Medio	Actividades	Factores ambientales
Desmelenamiento de estructuras	Factores físicos	Agua	- Demolición y remoción de estructuras de concreto - Retiro de compuertas y otros componentes hidráulicos	- Contaminación de agua por escombros - Alteración de la calidad del agua por la liberación de materiales y residuos químicos
		Aire	- Demolición y remoción de estructuras de concreto - Retiro de compuertas y otros componentes hidráulicos	- Emisión de polvo y partículas durante las actividades de demolición - Emisiones de polvo y partículas durante el desmantelamiento de componentes
		Suelo	- Demolición y remoción de estructuras de concreto - Retiro de compuertas y otros componentes hidráulicos	- Alteración y posible contaminación del suelo debido a escombros y residuos de construcción - Contaminación del suelo con aceites, grasas y otros productos
	Factores biológicos	Flora y fauna	- Demolición y remoción de estructuras de concreto - Retiro de compuertas y otros componentes hidráulicos	- Perturbación de la fauna local debido al ruido y la presencia de maquinaria - Alteración de hábitats acuáticos y terrestres debido a la remoción de componentes
Reestructuración del entorno	Factores físicos	Agua	- Revegetación de áreas perturbadas - Construcción de sistemas de filtraciones naturales	- Mejora de la calidad del agua al reducir la erosión y escorrentía de sedimentos hacia cuerpos de agua - Mejora de la calidad del agua mediante la implementación de humedales artificiales y barreras vegetales
		Aire	- Revegetación de áreas perturbadas	- Captura de polvo a través de la plantación de vegetación
		Suelo	- Revegetación de áreas perturbadas	- Prevención e la erosión del suelo y mejora de la estructura y fertilidad del suelo
	Factores biológicos	Flora y fauna	- Revegetación de áreas perturbadas	- Incremento de la biodiversidad al proporcionar hábitats adecuados para diversas especies de plantas y animales
		Agua	- Monitoreo de la calidad del agua	- Aseguramiento de la calidad del agua mediante la identificación y control de contaminantes a largo plazo
Monitoreo a largo plazo	Factores físicos	Aire	- Monitoreo de la calidad del aire	- Identificación de fuentes de contaminación aérea y evaluación de la efectividad de medidas de mitigación
		Suelo	- Monitoreo de la calidad del suelo	- Detección temprana de problemas de contaminación del suelo, permitiendo acciones correctivas oportuna
	Factores biológicos	Flora y fauna	- Monitoreo de la biodiversidad	- Evaluación de la salud de la flora y fauna local, permitiendo la detección de cambios en las poblaciones y ecosistemas

Nota. Elaboración propia

CAPÍTULO III.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuadro 1

Matriz de Leopold

VALORAZION DE RESULTADOS				
CALIFICACION NEGATIVA			CALIFICACION POSITIVA	
Irrelevantes:	0	-25	Poco importante:	0 25
Moderados:	-25	-50	Importante:	25 50
Severos:	-50	-75	Muy importante:	>50
Criticos:		>-75		

MEDIO	CATEGORIA	IMPACTOS AMBIENTALES	ACTIVIDADES DEL PROYECTO — ETAPA DE OPERACIÓN — FASES DE LA ETAPA — MANTENIMIENTO — ACCIONES DE LA FASE DE MANTENIMIENTO: Inspección y monitoreo regular	Mantenimiento de equipos electromecánicos	Mantenimiento y limpieza de estructuras.	Mantenimiento de vías de acceso	Mantenimiento de la vegetación	Gestión de residuos y materiales excedentes	Gestión de campamentos y almacenes	Capacitación y educación ambiental	Medidas de mitigación y control ambiental	REPARACION — ACCIONES DE LA FASE DE REPARACION: Reparación de estructuras dañadas	Reparación de equipos electromecánicos	Reacondicionamiento de compuertas y	ETAPA DE CIERRE — FASES DE LA ETAPA — DESMANTELAMIENTO — ACCIONES DE FASE DE DESMANTELAMIENTO: Desactivación de equipos y sistema	Desmantelamiento y gestión de campamentos y	Desmantelamiento de plantas chancadoras	Remoción de construcciones provisionales	Desmantelamiento de estructuras	RESTAURACION — ACCIONES DE FASE DE RESTAURACION: Restauración de áreas utilizadas como Depósitos de Material Excedente	Renivelacion y revegetacion de terrenos compactados	DISPOSICION — ACCIONES DE FASE DE DISPOSICION: Disposición final de aceites, combustibles y residuos	Retiro de residuos no municipales y de sedimentos	Monitoreo a largo plazo	AFECTACIONES +	AFECTACIONES -	IMPACTO DEL AGREGADO
FACTORES AMBIENTALES — MEDIO FISICO	AGUA	Alteración de la calidad del agua por sedimentos y residuos	+2 4		-1 1									-3 1												1	2	4
		Alteración de la calidad del agua por derrames de lubricantes y aceites	+3 4	-3 1																						1	3	-9
		Alteración de la calidad del agua por liberación de materiales y residuos químicos	+2 4	-1 2	-2 1	+2 1								-2 1										-3 4	-3 2		2	3	4
		Alteración de la calidad del agua por aumento de la turbidez del agua	+2 2																						-1 2		1	1	2
		Alteración de la calidad del agua por cambios de escorrentía	+1 2																								1	0	2
		Erosión de taludes del embalse	+1 2																								1	0	2
		Afectación a la calidad de aguas superficiales	+1 2																								1	0	2
		Mejora de la calidad del agua al reducir la erosión de sedimentos a cuerpos de agua	+1 2								+3 4						-1 2								+5 5	3	1	37
	AIRE	Perdida de la calidad del aire por aumento de polvo y partículas en suspensión	+2 4					-3 3	-1 2		+3 4							-2 1	-2 2	-3 2	-2 2			-4 3		2	5	-19
		Alteración de la calidad del aire por la emisión de olores	+1 4																					-5 3		1	1	-11
		Alteración de la calidad del aire por emisión de vapores y aerosoles	+1 4																					-4 3	+3 2	2	1	-2
		Perdida de la calidad del aire por aumento de gases contaminantes	+3 2																					-4 3	+3 2	2	1	0
		Disminución de la cantidad de polvo y partículas	+3 2				+3 4															+3 2		-4 2	+5 4	4	1	36
	SUELO	Contaminación del suelo por derrames	+4 4	-3 2									-3 1											-4 4	-4 3	1	4	-21
		Contaminación del suelo por residuos	+4 4	-2 3				-2 2	+2 4			-3 2	-2 1			-3 2	-3 2	-2 2	-3 3	-3 2				-3 2	+4 3	3	10	-22
		Perdida del suelo por erosión	+1 2		-4 5		+2 3			+2 3												+2 3		+2 3		5	1	6
		Perdida de la capa superficial del suelo	+1 2		-4 5														-1 2				-3 4			1	3	-32
		Prevención de la erosión del suelo	+2 3		-2 1		+3 3		+3 2	+4 3												+4 3		+2 3	+5 4	7	1	69
MEDIO SOCIO-CULTURAL — MEDIO BIOLOGICO	FLORA	Eliminación de la cobertura vegetal	+1 2			+3 4		-1 2		+2 4							-1 1		-1 2	-1 1						3	4	16
		Incremento de biodiversidad	+2 2			+3 3																+4 3				3	0	25
		Perturbación de la fauna local	+2 2																							1	0	4
		Ahuyentamiento de la fauna local	+2 3																							1	0	6
		Disminución de especies con importancia económica	+2 3						+3 3																+4 4	3	0	31
	ECONOMICO	Mejora de la economía regional																							+1 4	1	0	4
		Incremento del nivel de empleo													-4 2			+2 3							+1 4	2	1	2
		Incremento en la oferta del mercado eléctrico													-4 2										+1 4	1	1	-4
		Reducción del espacio de pastoreo				+3 4				+2 3												+3 5			+5 3	4	0	48
	CULTURAL	Reasentamiento de comunidades																									0	0
		Construcción de infraestructura cultural																									0	0
		Programas de formación técnica							+3 4																+2 3	2	0	18
		Conservación de ecosistemas				+3 4																			+5 3	2	0	27
		+	23	0	0	1	5	2	0	4	6	0	0	0	0	0	1	0	0	1	4	2	3	10	62	44	225	62
		-	0	3	3	3	0	1	3	0	0	1	2	2	2	3	2	3	4	2	0	4	6	0				44
		IMPACTO DEL AGREGADO	132	-11	-9	-40	57	6	-8	35	56	-6	-5	-5	-16	-9	-2	-10	-18	-7	45	-34	-55	129				225

FACTORES	-55	El retiro de residuos no municipales y sedimentos afecta mas negativamente
	129	El monitoreo a largo plazo afecta más positivamente
ACTIVIDADES	-32	La pérdida de la capa superficial del suelo se ve más afectada negativamente
	69	La prevención de la erosión del suelo se ve más afectada positivamente

Nota. Elaboración propia

1. Interpretación de resultados

Tabla 11

Interpretación de resultados

VALORIZACIÓN DE RESULTADOS					ACTIVIDADES DEL PROYECTO																		
					ETAPA DE OPERACIÓN												ETAPA DE CIERRE						
					FASES DE LA ETAPA												FASES DE LA ETAPA						
					MANTENIMIENTO									REPARACION				DESMANTELAMIENTO				RESTAURACION		DISPOSICION
CALIFICACION NEGATIVA			CALIFICACION POSITIVA		ACCIONES DE LA FASE DE MANTENIMIENTO									ACCIONES DE LA FASE DE REPARACION				ACCIONES DE FASE DE DESMANTELAMIENTO				ACCIONES DE FASE DE RESTAURACION		ACCIONES DE FASE DE DISPOSICION
Irrelevantes:	0	-25	Poco importante:	0	25																			
Moderados:	-25	-50	Importante:	25	50																			
Severos:	-50	-75	Muy importante:		>50																			
Críticos:		>-75																						
					Inspección y monitoreo regular	Mantenimiento de equipos electromecánicos	Mantenimiento y limpieza de estructuras, desagües	Mantenimiento de vías de acceso	Mantenimiento de la vegetación	Gestión de residuos y materiales excedentes	Gestión de campamentos y almacenes	Capacitación y educación ambiental	Medidas de mitigación y control ambiental	Reparación de estructuras dañadas	Reparación de equipos electromecánicos	Reacondicionamiento de compuertas y válvulas	Desactivación de equipos y sistema	Desmantelamiento y gestión de campamentos y almacenes	Desmantelamiento de plantas chancadoras	Remoción de construcciones provisionales	Desmantelamiento de estructuras	Restauración de áreas utilizadas como Depósitos de Material Excedente	Renivelación y revegetación de terrenos compactados	Disposición final de aceites, combustibles y residuos peligrosos	Retiro de residuos no municipales y de sedimentos	Monitoreo a largo plazo
					132	-11	-9	-40	57	6	-8	35	56	-6	-5	-5	-16	-9	-2	-10	-18	-7	45	-34	-55	129
					M. importante	Irrele-vante	Irrele-vante	moderado	M. importante	P. importante	irrelevante	importante	M. importante	Irrele-vante	Irrele-vante	Irrele-vante	Irrele-vante	Irrele-vante	Irrele-vante	Irrele-vante	Irrele-vante	Irrele-vante	Impor-tante	Mode-rado	Seve-ro	M. importante

Nota. Elaboración propia

Tabla 12

Medición de Impactos

VALORIZACIÓN DE RESULTADOS					
CALIFICACION NEGATIVA			CALIFICACION POSITIVA		
Irrelevantes:	0	-25	Poco importante:	0	25
Moderados:	-25	-50	Importante:	25	50
Severos:	-50	-75	Muy importante:		>50
Críticos:		>-75			

FACTORES AMBIENTALES			IMPACTOS AMBIENTALES	+	-	AFECTACIONES	IMPACTO DEL AGREGADO
Medio físico		Agua	Alteración de la calidad del agua por sedimentos y residuos	1	2	4	Poco importante
			Alteración de la calidad del agua por derrames de lubricantes y aceites	1	3	-9	Irrelevante
			Alteración de la calidad del agua por liberación de materiales y residuos químicos	2	3	4	Poco importante
			Alteración de la calidad del agua por aumento de la turbidez del agua	1	1	2	Poco importante
			Alteración de la calidad del agua por cambios de escorrentia	1	0	2	Poco importante
			Erosión de taludes del embalse	1	0	2	Poco importante
			Afectación a la calidad de aguas superficiales	1	0	2	Poco importante
			Mejora de la calidad del agua al reducir la erosión de sedimentos a cuerpos de agua	3	1	37	Importante
		Aire	Perdida de la calidad del aire por aumento de polvo y partículas en suspensión	2	5	-19	Irrelevante
			Alteración de la calidad del aire por la emisión de olores	1	1	-11	Irrelevante
			Alteración de la calidad del aire por emisión de vapores y aerosoles	2	1	-2	Irrelevante
			Perdida de la calidad del aire por aumento de gases contaminantes	2	1	0	Poco importante
			Disminución de la cantidad de polvo y partículas	4	1	36	Importante
		Suelo	Contaminación del suelo por derrames	1	4	-21	Irrelevante
			Contaminación del suelo por residuos	3	10	-22	Irrelevante
			Perdida del suelo por erosión	5	1	6	Poco importante
			Perdida de la capa superficial del suelo	1	3		Moderado
			Prevención de la erosión del suelo	7	1	69	Muy importante
Medio biológico		Flora	Eliminación de la cobertura vegetal	3	4	16	Poco importante
			Incremento de biodiversidad	3	0	25	Importante
		Flora	Perturbación de la fauna local	1	0	4	Poco importante
			Ahuyentamiento de la fauna local	1	0	6	Poco importante
			Disminución de especies con importancia económica	3	0	31	Importante
Medio socio-cultural		Económico	Mejora de la economía regional	1	0	4	Poco importante
			Incremento del nivel de empleo	2	1	2	Poco importante
			Incremento en la oferta del mercado eléctrico	1	1	-4	Irrelevante
			Reducción del espacio de pastoreo	4	0	48	Importante
		Cultural	Reasentamiento de comunidades		0	0	Poco importante
			Construcción de infraestructura cultural		0	0	Poco importante
			Programas de formación técnica	2	0	18	Poco importante
			Conservación de ecosistemas	2	0	27	Importante

Nota. Elaboración propia

A partir de los resultados obtenidos mediante la aplicación de la matriz de Leopold, la cual integró criterios de magnitud e importancia para cada interacción actividad-factor, se identificaron los impactos más significativos tanto en sentido negativo como positivo. Respecto a las actividades evaluadas, se evidenció que el retiro de residuos no municipales y sedimentos obtuvo un valor de –55, lo que representa el impacto negativo más alto dentro del conjunto analizado. En contraste, la actividad de monitoreo a largo plazo alcanzó un valor de 129, constituyéndose como la intervención con mayor efecto positivo sobre el ambiente.

En cuanto a los factores ambientales considerados, la pérdida de la capa superficial del suelo resultó ser el impacto negativo más relevante, con un valor de –32, reflejando un perjuicio directo al componente físico del medio (suelo). Por otro lado, la prevención de la erosión del suelo obtuvo una valoración positiva de 69, indicando un efecto ambiental beneficioso sobre el mismo componente. Estos resultados evidencian la utilidad de la matriz de Leopold para jerarquizar impactos en función de su intensidad y dirección.

Las actividades que generan un impacto ambiental negativo pero irrelevante, dentro del rango de 0 a −25, comprenden acciones rutinarias o asociadas al cierre de instalaciones, cuya incidencia sobre los factores ambientales es mínima. Entre ellas se incluyen el mantenimiento de equipos electromecánicos, la limpieza de estructuras y desagües, la gestión de campamentos y almacenes, así como la reparación de estructuras dañadas y de equipos electromecánicos. También figuran el reacondicionamiento de compuertas y válvulas, la desactivación de equipos y sistemas, el desmantelamiento y gestión de campamentos, plantas chancadoras y otras estructuras provisionales, además de la restauración de áreas utilizadas como depósitos de material excedente.

Por otro lado, las actividades que generan un impacto negativo de magnitud moderada, ubicándose entre −25 y −50, son más sensibles desde el punto de vista ambiental. En esta categoría se encuentran el mantenimiento de vías de acceso y, en particular, la disposición final de aceites, combustibles y residuos peligrosos, cuya gestión deficiente puede representar un riesgo considerable.

Cuando esta última actividad no se realiza bajo condiciones adecuadas o implica volúmenes significativos, el impacto puede escalar a severo, ubicándose en el rango de −50 a −75, lo que la convierte en la acción con mayor efecto negativo potencial identificado en la evaluación.

En contraste, algunas acciones generan impactos positivos. Por ejemplo, la gestión de residuos y materiales excedentes tiene una influencia positiva, aunque poco importante (rango de 0 a 25). En un nivel más relevante, con un rango entre 25 y 50, se encuentran actividades como la capacitación y la educación ambiental, así como la renivelación y revegetación de terrenos compactados, que contribuyen de forma significativa a mejorar las condiciones del entorno. Finalmente, aquellas prácticas que logran un efecto altamente beneficioso, con un valor superior a 50, son la inspección y el monitoreo regular, el mantenimiento de la vegetación, la implementación de medidas de mitigación y control ambiental, y el monitoreo a largo plazo.

Respecto a los factores ambientales involucrados, algunos se ven afectados negativamente de forma irrelevante. Tal es el caso de la alteración de la calidad del agua por derrames de lubricantes y aceites, la pérdida de calidad del aire por aumento de polvo y partículas en suspensión, la emisión de olores, vapores y aerosoles, así como la contaminación del suelo tanto por derrames como por residuos. También se menciona, de forma marginal, el incremento en la oferta del mercado eléctrico. En cuanto al impacto negativo moderado, el único factor identificado es la pérdida de la capa superficial del suelo, asociada principalmente a procesos de erosión no controlados.

Por su parte, los factores que se ven impactados positivamente, aunque de forma poco importante, son variados. Entre ellos se encuentran alteraciones menores en la calidad del agua por sedimentos, residuos químicos, aumento de turbidez o cambios en la escorrentía; erosión de taludes del embalse; afectación leve a la calidad de aguas superficiales; incremento de gases contaminantes; pérdida de suelo por erosión; eliminación de cobertura vegetal; perturbación y ahuyentamiento de la fauna local; además de impactos indirectos como la mejora de la economía regional, el aumento del empleo, el reasentamiento de comunidades, la construcción de infraestructura cultural y la implementación de programas de formación técnica.

A un nivel más alto, los factores que registran impactos positivos importantes incluyen la mejora de la calidad del agua al reducir la erosión de sedimentos hacia cuerpos receptores, la disminución de polvo y partículas en el aire, la prevención activa de la erosión del suelo, el incremento de biodiversidad, la reducción de especies con valor económico (por menor presión extractiva), la disminución del espacio de pastoreo y la conservación de ecosistemas. Finalmente, el factor ambiental que concentra el mayor impacto positivo en el conjunto del proyecto es la prevención de la erosión del suelo, destacada como una contribución muy importante dentro del análisis general.

Dado que la disposición final de aceites, combustibles y residuos peligrosos puede generar impactos severos si no se maneja adecuadamente, se propone implementar un conjunto de medidas de control ambiental orientadas a minimizar sus riesgos:

- Almacenamiento seguro.
- Manejo y transporte adecuados.
- Disposición y tratamiento en condiciones controladas.
- Prevención de derrames y filtraciones.
- Panes de emergencia y respuesta rápida.
- Monitoreo y seguimiento continuo.
- Educación y concienciación de los involucrados.

2. Discusión

Los valores obtenidos mediante la matriz de Leopold, especialmente el impacto negativo del retiro de residuos y sedimentos (-55) y la pérdida de la capa superficial del suelo (-32), concuerdan con la evidencia reportada en casos peruanos donde la gestión deficiente de sedimentos y suelo ha sido crítica: en el lago Sibinacocha, Bello et al. (2023) detectaron un ecodefícit cercano al 20 % en la estación húmeda y modificaciones extremas del régimen de caudales que, al igual que la extracción de sedimentos en Sumbay, alteran la dinámica fluvial y arrastran finos que debilitan la estructura del suelo aguas abajo; de forma parecida, Chávez et al. (2013) documentaron que la sedimentación acumulada en Gallito Ciego creció de 1.7 a 3.4 MMC año^{-1} y aceleró la erosión moderada-alta en el 66 % del valle del Jequetepeque, reduciendo la vida útil del embalse a 33 años, lo que corrobora la magnitud del problema identificado en la matriz como mayor impacto negativo.

En contraste, la valoración positiva del monitoreo a largo plazo (+129) y de la prevención de la erosión del suelo (+69) se alinea con prácticas que demuestran beneficios ambientales tangibles en otros proyectos peruanos confirmando que acciones de seguimiento y control, equivalentes a nuestro “monitoreo a largo plazo”, pueden revertir o evitar procesos erosivos y déficits de caudal si se sostienen operativamente.

La comparación pone de relieve un patrón nacional: los proyectos de represamiento en el Perú tienden a registrar beneficios productivos o energéticos iniciales, pero cuando los procesos de cierre o las rutinas operativas descuidan el manejo de sedimentos, suelo y caudales ambientales, tal como advierte Philip (2013) en el Madeira transfronterizo, emergen impactos que superan los costos de mitigación posteriores; en cambio, aquellos casos donde se incorporan

programas de monitoreo robusto y prácticas de conservación del suelo muestran efectos netos positivos, lo que respalda la necesidad de institucionalizar, desde la etapa de operación hasta el cierre, actividades continuas de seguimiento y control como las que la matriz de Leopold ha identificado como de mayor contribución favorable en la cuenca del río Sumbay.

En la cuenca del río Sumbay, la aplicación de la matriz de Leopold ubicó el retiro de sedimentos como el impacto negativo más alto (-55) y la pérdida de la capa superficial del suelo como el factor físico más sensible (-32). Estos resultados son congruentes con tendencias ampliamente descritas en la literatura internacional: múltiples revisiones muestran que la gestión deficiente de sedimentos acaba comprometiendo la vida útil de la infraestructura, encareciendo las operaciones de mantenimiento y desencadenando procesos erosivos en serie (Kondolf & Yi, 2022; Lucas-Borja et al., 2021). Los análisis sobre estructuras de retención en cuencas semiáridas y montañosas subrayan, además, que la eficacia inicial en captura de sedimentos se desvanece rápidamente sin dragado, mantenimiento periódico o manejo coordinado de descargas, condiciones que también resultan críticas en sistemas de pequeña escala similares a los presentes en Sumbay (Lucas-Borja et al., 2021).

La experiencia acumulada en proyectos hidroeléctricos de pasada indica que aún modestos cambios en el régimen de almacenamiento o derivación pueden alterar el transporte de sedimentos y reducir los caudales aguas abajo, con efectos ecológicos acumulativos sobre hábitat y conectividad (Kuriqi et al., 2021). Aunque las configuraciones tecnológicas difieren entre cuencas, el mensaje operativo es consistente: la gestión de sedimentos no puede separarse de la gestión de caudales.

Las puntuaciones altas asignadas al monitoreo de largo plazo (+129) y a las acciones de prevención de la erosión del suelo (+69) refuerzan esa idea. Estudios de reoperación en represas existentes muestran que ajustar reglas de descarga, coordinar pulsos con la estacionalidad hidrológica y acompañar con seguimiento ecosistémico mejora el desempeño físico y biológico sin requerir obras mayores (Kondolf & Yi, 2022).

Los antecedentes internacionales también advierten sobre límites operativos. Optimizar la operación para maximizar energía sin considerar umbrales ecológicos puede degradar los caudales ambientales aun cuando la generación apenas varíe (Suwal et al., 2020). A ello se suma el riesgo de deterioro de la calidad del agua derivado de estratificación térmica, bajas concentraciones de oxígeno disuelto y liberación de compuestos reducidos desde aguas de fondo si no se controla la forma y el momento de las descargas (Winton et al., 2019). Estos

aspectos amplían la discusión más allá del sedimento: la operación hidráulica, la integridad del suelo y la calidad del agua forman un sistema acoplado.

En conjunto, la evidencia disponible converge en tres lineamientos aplicables a la gestión de represas en la cuenca del río Sumbay: (1) integrar la remoción y redistribución de sedimentos a la operación regular, evitando intervenciones tardías y costosas; (2) proteger y reconstruir la capa superficial del suelo en zonas intervenidas para cortar la fuente de aporte particulado y estabilizar taludes; y (3) sostener un esquema de monitoreo adaptativo que vincule caudal, turbidez, morfología, calidad de agua y respuesta ecológica, a fin de permitir ajustes operativos oportunos.

Como implicancias teóricas, la valoración de impactos en la cuenca del río Sumbay sitúa el retiro de residuos y sedimentos como el efecto negativo más alto (-55) y la pérdida de la capa superficial del suelo como el factor físico más sensible (-32). Estas puntuaciones refuerzan, en términos teóricos, la centralidad del sitio y de la carga sedimentaria de la cuenca de aporte en el desempeño de largo plazo de una represa: los lineamientos de localización y dimensionamiento advierten que el embalse debe equilibrar disponibilidad hídrica y control de sedimentos para no perder capacidad útil prematuramente (ANA, 2015a; MVOTMA, 2011; Córdova-Carmen, 2015). La evidencia nacional apunta en la misma dirección: las alteraciones hidrológicas y arrastre de finos registradas en Sibinacocha muestran cómo los pulsos estacionales modificados comprometen la dinámica fluvial (Bello et al., 2023), mientras que la rápida acumulación de sedimentos en Gallito Ciego redujo la vida útil proyectada y expandió áreas con erosión moderada-alta en el valle del Jequetepeque (Chávez et al., 2013). Teóricamente, estos casos respaldan que el manejo de sedimentos y la protección del suelo deben tratarse como variables estructurales del diseño, no como correctivos posteriores.

La alta valoración del monitoreo a largo plazo (+129) y de las acciones de prevención de la erosión del suelo (+69) subraya la necesidad de marcos operativos adaptativos, en los que la observación continua del comportamiento del embalse retroalimente decisiones de descarga, mantenimiento y conservación de taludes. Las guías de supervisión y cierre de obras ya plantean la importancia de registros sistemáticos, inspecciones y documentación para sostener la seguridad y funcionalidad en el tiempo (ANA, 2015b; Yoosefdoost et al., 2022).

Finalmente, las implicancias de gobernanza y ciclo de vida son claras: cuando el control de sedimentos, la conservación de suelos y las reglas de operación no se articulan desde el inicio, los costos ambientales y sociales pueden superar los beneficios de almacenamiento,

como lo ilustra el conflicto sedimentario y regulatorio asociado al sistema Madeira en la Amazonia (Philip, 2013). Los criterios de emplazamiento, topografía, capacidad de aporte y volumen muerto diseñados para alojar sedimentos pierden sentido si no se acompañan de mantenimiento y seguimiento que aseguren su funcionalidad (MVOTMA, 2011; Córdova-Carmen, 2015). Al integrar estas dimensiones—localización adecuada, balance hídrico-sedimentario, estabilidad de suelos y monitoreo documentado—se fortalece un marco teórico de gestión de represas de pequeña y mediana escala aplicable a contextos andinos, donde la variabilidad climática y la fragilidad edáfica exigen estrategias preventivas más que correctivas (ANA, 2015a; ANA, 2015b).

CAPÍTULO IV.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Conclusiones

Primera. Con respecto al objetivo general, la evaluación con la matriz de Leopold confirmó que, durante la operación y el cierre de las represas en la Cuenca del Río Sumbay, los impactos ambientales varían desde efectos severos (–55 en el retiro inadecuado de residuos no municipales y sedimentos) hasta beneficios muy altos (+129 por el monitoreo a largo plazo). Esto demuestra que la gestión durante ambas etapas puede agravar o mitigar significativamente la huella del proyecto, de modo que las actividades de control, seguimiento y restauración resultan decisivas para reducir los riesgos y potenciar los efectos positivos.

Segunda. En cuanto al objetivo específico 1, el análisis de los procedimientos reveló que la mayoría de las rutinas de operación y cierre (mantenimiento de equipos, limpieza de estructuras, desmantelamiento de instalaciones) generan impactos negativos irrelevantes (0 a –25), mientras que la disposición final de aceites, combustibles y residuos peligrosos alcanza niveles moderados (–25 a –50) o severos (–50 a –75) si se ejecuta sin controles estrictos. En contraste, las acciones de monitoreo, revegetación y educación ambiental aportan beneficios importantes, lo que subraya la necesidad de reforzar las prácticas de manejo de residuos y, simultáneamente, mantener programas continuos de inspección y capacitación.

Tercera. En cuanto al objetivo específico 2, la magnitud e importancia de los impactos sobre los ecosistemas señalaron la pérdida de la capa superficial del suelo (–32) como el efecto negativo más crítico, seguida por alteraciones menores en la calidad del agua y del aire. Por el lado positivo, la prevención de la erosión del suelo (+69) y la vigilancia ambiental destacan como factores de mayor beneficio. Estos hallazgos indican que el componente edáfico y los procesos de erosión son los más sensibles y que la aplicación sostenida de medidas de control puede revertir tendencias degradantes y favorecer la conservación de la biodiversidad local.

2. Recomendaciones

- Considerando que la matriz de Leopold es una herramienta cualitativa dependiente del juicio experto, se recomienda complementar futuras evaluaciones con estudios cuantitativos específicos, como modelamientos hidrosedimentológicos o mediciones directas en campo, que permitan validar y fortalecer los resultados obtenidos.

- Dado que la disposición final de aceites, combustibles y residuos peligrosos fue identificada como una de las actividades con mayor impacto negativo, se recomienda implementar protocolos específicos de manejo y seguimiento para estos residuos desde la etapa operativa, priorizando la prevención de filtraciones y la capacitación del personal a cargo.

- Realizar estudios más profundos en referencia a los análisis para la toma de acciones preventivas, considerando estudios de modelamiento numéricos para poder mitigar los impactos y su monitoreo in situ.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarez, X., Cancela, Á., Rodríguez, A., Valero, E., & Sanchez, Á. (2021). Green filters of Eucalyptus globulus for microalgae harvesting from freshwater reservoir and reuse of biomass harvested for pellet production. *Process Safety and Environmental Protection*, *147*, 497–504. https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.11.037

Alzamora Guzmán, V. J., Glasscock, J. A., & Whitehouse, F. (2019). Design and construction of an off-grid gravitational vortex hydropower plant: A case study in rural Peru. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *35*, 131–138. https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.06.004

Ambrosio Spada. (1994). *Las presas en material suelto*.

ANA. (2010). *"Estudio de Impacto Ambiental de la Represa de Angostura y Gestión Ambiental a Nivel Definitivo."*

ANA. (2015a). *Inventario de presas en el Perú*. https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/inventario_de_presas.pdf

ANA. (2015b). *Seguridad de presas*. https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/2624/ANA0001334.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Anne, S., Higgs, E., Walls, C., & Juanes, F. (2017). Large-scale Dam Removals and Nearshore Ecological Restoration: Lessons Learned from the Elwha Dam Removals. *Ecological Restoration*, *35*(2), 87–101. https://doi.org/10.3368/er.35.2.87

Auble, G. T., Shafroth, P. B., Scott, M. L., & Roelle, J. E. (2007). Early vegetation development on an exposed reservoir: Implications for dam removal. *Environmental Management*, *39*(6), 806–818. https://doi.org/10.1007/s00267-006-0018-z

Autoridad Nacional del Agua. (2017). *Normas y reglamentos de seguridad de presas en el Perú*.

Bello, C., Suarez, W., Drenkhan, F., & Vega-Jácome, F. (2023). Hydrological impacts of dam regulation for hydropower production: The case of Lake Sibinacocha, Southern Peru. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *46*. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101319

Biedunkiewicz, A., Sucharzewska, E., Kulesza, K., Nowacka, K., & Kubiak, D. (2020). Phyllosphere of Submerged Plants in Bathing Lakes as a Reservoir of Fungi—Potential Human Pathogens. *Microbial Ecology*, *79*(3), 552–561. https://doi.org/10.1007/s00248-019-01447-y

Bureau Of Reclamation U. S. (1970). *Proyecto de Presas Pequeñas. Madrid: Dossat.*

Chavez, H., Nadolnyak, D., & Saravia, M. (2013). Andes Basin Leader, Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR)-Challenge Program on Water and Food (CPWF). In *Agribusiness Management Review* (Vol. 16, Issue 1).

Córdova-Carmen, J. (2015). *Diseño de embalse teniendo en consideración los impactos ambientales*. https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2387/ICI_219.pdf;jsessionid

Cutler, J., Olivos, J., Sidlauskas, B., & Arismendi, I. (2020). Habitat loss due to dam development may affect the distribution of marine-associated fishes in Gabon, Africa. *Ecosphere*, *11*(2). https://doi.org/10.1002/ecs2.3024

De Boer, J., Garrigues, P., Gu, J.-D., Jones, K. C., Knepper, T. P., Newton, A., & Sparks, D. L. (2018). *The Handbook of Environmental Chemistry*. http://www.springer.com/series/698

Dębska, K., Rutkowska, B., & Szulc, W. (2021). The influence of a dam reservoir on water quality in a small lowland river. *Environmental Monitoring and Assessment*, *193*(3), 123. https://doi.org/10.1007/s10661-021-08905-6

Dong, L., Tong, X., Li, X., Zhou, J., Wang, S., & Liu, B. (2019). Some developments and new insights of environmental problems and deep mining strategy for cleaner production in mines. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 210, pp. 1562–1578). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.291

Downey, T. (1999). *Riparian Rights and Manufacturing in Antebellum South Carolina: William Gregg and the Origins of the "Industrial Mind."*

Ehsani, N., Vörösmarty, C. J., Fekete, B. M., & Stakhiv, E. Z. (2017). Reservoir operations under climate change: Storage capacity options to mitigate risk. *Journal of Hydrology*, *555*, 435–446. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.008

Fattorelli, S., & Fernandez, P. C. (2011). *Diseño Hidrológico*.

Gonzalez Rodriguez, L., McCallum, A., Kent, D., Rathnayaka, C., & Fairweather, H. (2023). A review of sedimentation rates in freshwater reservoirs: recent changes and causative factors. In *Aquatic Sciences* (Vol. 85, Issue 2). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/s00027-023-00960-0

Guo, S., Zhang, H., Chen, H., Peng, D., Liu, P., & Pang, B. (2004). A reservoir flood forecasting and control system for China. *Hydrological Sciences Journal*, *49*(6), 959–972. https://doi.org/10.1623/hysj.49.6.959.55728

Gwimbi, P., Lebese, P., & Kanono, K. (2020). Mainstreaming health impact assessments in environmental impact statements into planning obligations in post dam construction in Metolong, Lesotho: A qualitative investigation. *Heliyon*, *6*(7), e04362. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04362

Hīkina, W. (2022). *Measuring and calculating the height and volume of agricultural dams*. www.building.govt.nz

Hunt, J. D., Byers, E., Riahi, K., & Langan, S. (2018). Comparison between seasonal pumped-storage and conventional reservoir dams from the water, energy and land nexus perspective. *Energy Conversion and Management*, *166*, 385–401. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.044

Jannsendzimir, S. (n.d.). *Aquatic Ecology Series Riverine Ecosystem Management Science for Governing Towards a Sustainable Future*. http://www.springer.com/series/5637

Jardim, P., Melo, M., Ribeiro, L., Collischonn, W., & Paz, A. (2020). A Modeling Assessment of Large-Scale Hydrologic Alteration in South American Pantanal Due to Upstream Dam Operation. *Frontiers in Environmental Science*, *8*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.567450

Jiang, W., Liu, L., Xiao, H., Zhu, S., Li, W., & Liu, Y. (2021). Composition and distribution of vegetation in the water level fluctuating zone of the Lantsang cascade reservoir system using UAV multispectral imagery. *PLoS ONE*, *16*(3 March). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247682

Jones, I., & Bull, J. (2020). Major dams and the challenge of achieving "No Net Loss" of biodiversity in the tropics. *Sustainable Development*, *28*(2), 435–443. https://doi.org/10.1002/sd.1997

Khabibullin, M. Y., & Suleimanov, R. I. (2018). Selection of Optimal Design of a Universal Device for Nonstationary Pulse Pumping of Liquid in a Reservoir Pressure Maintenance System. *Chemical and Petroleum Engineering*, *54*(3–4), 225–232. https://doi.org/10.1007/s10556-018-0467-2

Koel, T. M., & Sparks, R. E. (2002). Historical patterns of river stage and fish communities as criteria for operations of dams on the Illinois River. *River Research and Applications*, *18*(1), 3–19. https://doi.org/10.1002/rra.630

Kondolf, M., & Yi, J. (2022). Dam Renovation to Prolong Reservoir Life and Mitigate Dam Impacts. In *Water (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 9). MDPI. https://doi.org/10.3390/w14091464

Kuriqi, A., Pinheiro, A. N., Sordo-Ward, A., Bejarano, M. D., & Garrote, L. (2021). Ecological impacts of run-of-river hydropower plants—Current status and future prospects on the brink of energy transition. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 142). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110833

Landucci, F., Tichý, L., Šumberová, K., & Chytrý, M. (2015). Formalized classification of species-poor vegetation: A proposal of a consistent protocol for aquatic vegetation. *Journal of Vegetation Science*, *26*(4), 791–803. https://doi.org/10.1111/jvs.12277

Liu, C., Shen, Z., Gan, L., Xu, L., Zhang, K., & Jin, T. (2018). The seepage and stability performance assessment of a new drainage system to increase the height of a tailings dam. *Applied Sciences (Switzerland)*, *8*(10). https://doi.org/10.3390/app8101840

Lu, W., Lei, H., Yang, D., Tang, L., & Miao, Q. (2018). Quantifying the impacts of small dam construction on hydrological alterations in the Jiulong River basin of

Southeast China. *Journal of Hydrology*, *567*, 382–392. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.034

Lucas-Borja, M. E., Piton, G., Yu, Y., Castillo, C., & Antonio Zema, D. (2021). Check dams worldwide: Objectives, functions, effectiveness and undesired effects. In *Catena* (Vol. 204). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105390

Ma, C., Xu, X., Yang, J., & Cheng, L. (2023). Safety Monitoring and Management of Reservoir and Dams. In *Water (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 6). MDPI. https://doi.org/10.3390/w15061078

Maavara, T., Chen, Q., Van Meter, K., Brown, L. E., Zhang, J., Ni, J., & Zarfl, C. (2020). River dam impacts on biogeochemical cycling. In *Nature Reviews Earth and Environment* (Vol. 1, Issue 2, pp. 103–116). Springer Nature. https://doi.org/10.1038/s43017-019-0019-0

Marques, É. T., Gunkel, G., & Sobral, M. C. (2019). Management of tropical river basins and reservoirs under water stress: Experiences from northeast Brazil. *Environments - MDPI*, *6*(6). https://doi.org/10.3390/environments6060062

Martínez Ruiz, F. J. (2019). *El problema de la selección del tipo de presa en un proyecto: criterios y métodos de apoyo a la toma de decisiones*. https://repositorio.upct.es/xmlui/bitstream/handle/10317/8145/tfm-mar-pro.pdf?sequence=1&isAllowed=y

MVOTMA. (2011). *Manual Pequenas Presas*.

Nautiyal, H., & Goel, V. (2020). Sustainability assessment of hydropower projects. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 265). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121661

Nebraska Department of Natural Resources. (2022). *An informational booklet for dam owners in Nebraska Inspection and Maintenance of Your Earthen Dam*. https://dnr.nebraska.gov/dam-safety/dam-

Palmieri, A., Shah, F., & Dinar, A. (2001). Economics of reservoir sedimentation and sustainable management of dams. *Journal of Environmental Management*, *61*(2), 149–163. https://doi.org/10.1006/jema.2000.0392

Philip M., F. (2013). Decision Making on Amazon Dams: Politics Trumps Uncertainty in the Madeira River Sediments Controversy. *Water Alternatives*, *6*.

Prairie, Y., Alm, J., Beaulieu, J., Barros, N., Battin, T., Cole, J., del Giorgio, P., DelSontro, T., Guérin, F., Harby, A., Harrison, J., Mercier-Blais, S., Serça, D., Sobek, S., & Vachon, D. (2018). Greenhouse Gas Emissions from Freshwater Reservoirs: What Does the Atmosphere See? *Ecosystems*, *21*(5), 1058–1071. https://doi.org/10.1007/s10021-017-0198-9

Ramiro, W., & Erazo, S. (2018a). *Capítulo 1: Presas y Embalses*. https://www.researchgate.net/publication/326560488

Ramiro, W., & Erazo, S. (2018b). *Capítulo 3: Presas de hormigón sobre roca*. https://www.researchgate.net/publication/326560498

Sarkardeh, H. (2017). Minimum Reservoir Water Level in Hydropower Dams. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, *30*(4), 1017–1024. https://doi.org/10.1007/s10033-017-0156-7

Scott Winton, R., Calamita, E., & Wehrli, B. (2019). Reviews and syntheses: Dams, water quality and tropical reservoir stratification. In *Biogeosciences* (Vol. 16, Issue 8, pp. 1657–1671). Copernicus GmbH. https://doi.org/10.5194/bg-16-1657-2019

Sebastian, J., & Betancourt, G. (2014). *Operación óptima de una cadena de plantas hidraúlicas de generación con embalses*.

Suwal, N., Huang, X., Kuriqi, A., Chen, Y., Pandey, K. P., & Bhattarai, K. P. (2020). Optimisation of cascade reservoir operation considering environmental flows for different environmental management classes. *Renewable Energy*, *158*, 453–464. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.161

Swiech, T., Ertsen, M. W., & Pererya, C. M. (2012). Estimating the impacts of a reservoir for improved water use in irrigation in the Yarabamba region, Peru. *Physics and Chemistry of the Earth*, *47–48*, 64–75. https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.06.008

Tonitto, C., & Riha, S. J. (2016). Planning and implementing small dam removals: lessons learned from dam removals across the eastern United States. *Sustainable Water Resources Management*, *2*(4), 489–507. https://doi.org/10.1007/s40899-016-0062-7

Wan Mohtar, W. H. M., Sharil, S., Samion, M. K. H., Mohamad, M. F., Hamzah, S. B., Mohd Razali, S. F., Muhammad, N. S., & Md Desa, S. (2020). Assessment of dam appurtenant structures under multiple flow discharge scenarios. *Ain Shams Engineering Journal*, *11*(4), 913–922. https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.03.009

WEDA. (2021). *WEDA Technical Report - Practical Guide to Reservoir Dredging*.

Winton, R., Calamita, E., & Wehrli, B. (2019). Reviews and syntheses: Dams, water quality and tropical reservoir stratification. *Biogeosciences*, *16*(8), 1657–1671. https://doi.org/10.5194/bg-16-1657-2019

Wright, L. D. (1998). *River Deltas*.

Wu, H., Chen, J., Xu, J., Zeng, G., Sang, L., Liu, Q., Yin, Z., Dai, J., Yin, D., Liang, J., & Ye, S. (2019). Effects of dam construction on biodiversity: A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 221, pp. 480–489). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.001

Yan, M., Zhang, L., Ren, Y., Zhang, T., Zhang, S., Li, H., Chen, Y., & Zhang, S. (2022). The Higher Water Absorption Capacity of Small Root System Improved the Yield and Water Use Efficiency of Maize. *Plants*, *11*(17). https://doi.org/10.3390/plants11172300

Yaseen, Z. M., Ameen, A. M. S., Aldlemy, M. S., Ali, M., Afan, H. A., Zhu, S., Al-Janabi, A. M. S., Al-Ansari, N., Tiyasha, T., & Tao, H. (2020). State-of-the art-powerhouse, dam structure, and turbine operation and vibrations. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 4). MDPI. https://doi.org/10.3390/su12041676

Yoosefdoost, I., Basirifard, M., & Álvarez-García, J. (2022). Reservoir Operation Management with New Multi-Objective (MOEPO) and Metaheuristic (EPO) Algorithms. *Water (Switzerland)*, *14*(15). https://doi.org/10.3390/w14152329

Zanoli, S. M., Pepe, C., Astolfi, G., & Luzi, F. (2023). Reservoir Advanced Process Control for Hydroelectric Power Production. *Processes*, *11*(2). https://doi.org/10.3390/pr11020300

ANEXOS

Anexo 1.

Matriz de Consistencia

OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES		
		VARIABLE 01: Operación y Cierre de represas		
		DIMENSIONES	**INDICADORES**	**ITEMS**
OBJETIVO GENERAL Evaluar el impacto ambiental generado por las actividades de la etapa de operación de las represas en la Cuenca del Río Sumbay.	**Hi** Las actividades de la etapa de operación y mantenimiento de represas generan impactos ambientales negativos en el ecosistema. **Ho** Las actividades de la etapa de operación y mantenimiento de represas no generan impactos ambientales negativos en el ecosistema.	Fase de Mantenimiento	Inspección y monitoreo regular	01, 02, 03, 04 ,05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 19, 20, 21, 22 y 23.
			Mantenimiento de equipos electromecánicos	02, 03 y 14.
			Mantenimiento y limpieza de estructuras, desagües	01, 03 y 15.
			Mantenimiento de vías de acceso	03, 16 y 18.
			Mantenimiento de la vegetación	13, 19, 20, 27 y 31
			Gestión de residuos y materiales excedentes	09, 16 y 18.
			Gestión de campamentos y almacenes	09, 15 y 19.
			Capacitación y educación ambiental	15, 18, 23, 30.
			Medidas de mitigación y control ambiental	08, 09, 16, 18, 19 y 27.
OBJETIVOS ESPECÍFICOS Analizar los procedimientos utilizados en las actividades de operación de las represas construidas en la Cuenca del Río Sumbay.		Fase de Reparación	Reparación de estructuras dañadas	15.
			Reparación de equipos electromecánicos	14 y 15.
			Reacondicionamiento de compuertas y válvulas	01 y 03
		Fase de Desmantelamiento	Desactivación de equipos y sistema	25 y 26.
			Desmantelamiento y gestión de campamentos y almacenes	8, 15 y 19.
			Desmantelamiento de plantas chancadoras	9, 15 y 25.
			Remoción de construcciones provisionales	9, 15 y 19.
			Desmantelamiento de estructuras	9, 15, 17 y 19.

OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES		
		VARIABLE 01: Operación y Cierre de represas		
		DIMENSIONES	**INDICADORES**	**ITEMS**
Identificar la magnitud e importancia de la afectación de los ecosistemas del área de influencia de las represas.		Fase de Restauración	Restauración de áreas utilizadas como Depósitos de Material Excedente	9, 13 y 15
			Renivelación y revegetación de terrenos compactados	16, 18, 20 y 26.
		Fase de Desmantelamiento	Disposición final de aceites, combustibles y residuos peligrosos	2, 11, 12, 14, 15 y 17.
			Retiro de residuos no municipales y de sedimentos	2, 4, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 y 18.
			Monitoreo a largo plazo	8, 13, 17, 23, 24, 25, 26 y 27.
		VARIABLE 02: Impacto Ambiental		
		DIMENSIONES	**INDICADORES**	**ITEMS**
		Medio Físico	Agua	01, 02, 03, 04 ,05, 06, 07 y 08.
			Aire	09, 10, 11, 12 y 13.
			Suelo	14, 15, 16, 17 y 18.
		Medio Biológico	Flora	19 y 20.
			Fauna	21, 22 y 23.
		Medio Socio-Cultural	Económico	24, 25, 26 y 27.
			Cultural	28, 29, 30 y 31.

Anexo 2.

Matriz Leopold

VALORAZION DE RESULTADOS					
CALIFICACION NEGATIVA			CALIFICACION POSITIVA		
Irrelevantes:	0	-25	Poco importante:	0	25
Moderados:	-25	-50	Importante:	25	50
Severos:	-50	-75	Muy importante:		>50
Críticos:		>-75			

| | | | ACTIVIDADES DEL PROYECTO | | | | |

MEDIO BIOLOGICO	FLORA	Contaminación del suelo por derrames	4 2								1										4 3											
		Contaminación del suelo por residuos	+4 4	- 2 3				- 2 2	+2 4		- 3 2	- 2 1			- 3 2	-3 2	- 2 2	- 3 3	-3 3		-3 2	+4 3		3	10	-22
		Perdida del suelo por erosión	+1 2		-4 5		+2 3			+2 3										+2 3		+2 3		5	1	6
		Perdida de la capa superficial del suelo	+1 2		-4 5												- 1 2				-3 4			1	3	-32
		Prevención de la erosión del suelo	+2 3		-2 1		+3 3		+3 2	+4 3										+4 3		+2 3	+5 4	7	1	69
		Eliminación de la cobertura vegetal	+1 2			+3 4		- 1 2		+2 4					- 1 1		- 1 2	- 1 1						3	4	16
		Incremento de biodiversidad	+2 2			+3 3														+4 3				3	0	25
		Perturbación de la fauna local	+2 2																					1	0	4
	FLORA	Ahuyentamiento de la fauna local	+2 3																					1	0	6
		Disminución de especies con importancia económica	+2 3						+3 3														+4 4	3	0	31
		Mejora de la economía regional																					+1 4	1	0	4
	ECONOMICO	Incremento del nivel de empleo											- 4 2		+2 3								+1 4	2	1	2
		Incremento en la oferta del mercado eléctrico											- 4 2										+1 4	1	1	-4
		Reducción del espacio de pastoreo				+3 4				+2 3										+3 5			+5 3	4	0	48
MEDIO SOCIO-CULTURAL	CULTURAL	Reasentamiento de comunidades																							0	0
		Construcción de infraestructura cultural																							0	0
		Programas de formación técnica							+3 4														+2 3	2	0	18
		Conservación de ecosistemas				+3 4																	+5 3	2	0	27
		+	23	0	0	1	5	2	0	4	6	0	0	0	0	0	1	0	0	1	4	2	3	10	62	44	225	62
		-	0	3	3	3	0	1	3	0	0	1	2	2	2	3	2	3	4	2	0	4	6	0				44
		IMPACTO DEL AGREGADO	132	-11	-9	-40	57	6	-8	35	56	-6	-5	-5	-16	-9	-2	-10	-18	-7	45	-34	-55	129				225

FACTORES	-55	El retiro de residuos no municipales y sedimentos afecta mas negativamente
	129	El monitoreo a largo plazo afecta mas positivamente
ACTIVIDADES	-32	La perdida de la capa superficial del suelo se ve mas afectada negativamente
	69	La prevencion de la erosion del suelo se ve mas afectada positivamente

Anexo 3.

Valoración de actividades

VALORAZION DE RESULTADOS					
CALIFICACION NEGATIVA			CALIFICACION POSITIVA		
Irrelevantes:	0	-25	Poco importante:	0	25
Moderados:	-25	-50	Importante:	25	50
Severos:	-50	-75	Muy importante:		>50
Criticos:		>-75			

ACTIVIDADES DEL PROYECTO																					
ETAPA DE OPERACIÓN													ETAPA DE CIERRE								
FASES DE LA ETAPA													FASES DE LA ETAPA								
MANTENIMIENTO									REPARACION				DESMANTELAMIENTO					RESTAURACION		DISPOSICION	
ACCIONES DE LA FASE DE MANTENIMIENTO									ACCIONES DE LA FASE DE REPARACION				ACCIONES DE FASE DE DESMANTELAMIENTO					ACCIONES DE FASE DE RESTAURACION		ACCIONES DE FASE DE DISPOSICION		
Inspección y monitoreo regular	Mantenimiento de equipos electromecanicos	Mantenimiento y limpieza de estructuras, desagües	Mantenimiento de vías de acceso	Mantenimiento de la vegetación	Gestión de residuos y materiales excedentes	Gestión de campamentos y almacenes	Capacitación y educación ambiental	Medidas de mitigación y control ambiental	Reparación de estructuras dañadas	Reparación de equipos electromecánicos	Reacondicionamiento de compuertas y válvulas	Desactivación de equipos y sistema	Desmantelamiento y gestión de campamentos y almacenes	Desmantelamiento de plantas chancadoras	Remoción de construcciones provisionales	Desmantelamiento de estructuras	Restauración de áreas utilizadas como Depósitos de Material Excedente	Renivelación y revegetación de terrenos compactados	Disposición final de aceites, combustibles y residuos peligrosos	Retiro de residuos no municipales y de sedimentos	Monitoreo a largo plazo
132	-11	-9	-40	57	6	-8	35	56	-6	-5	-5	-16	-9	-2	-10	-18	-7	45	-34	-55	129
M. importante	irrelevante	irrelevante	moderado	M. importante	P. importante	irrelevante	importante	M. importante	irrelevante	irrelevante	irrelevante	irrelevante	irrelevante	irrelevante	irrelevante	irrelevante	irrelevante	importante	moderado	severo	M. importante

Anexo 4.

Valoración de Factores

VALORAZACIÓN DE RESULTADOS					
CALIFICACION NEGATIVA			**CALIFICACION POSITIVA**		
Irrelevantes:	0	-25	**Poco importante:**	0	25
Moderados:	-25	-50	**Importante:**	25	50
Severos:	-50	-75	**Muy importante:**		>50
Críticos:		>-75			

	MEDIO	CATEGORIA	IMPACTOS AMBIENTALES	AFECTACIONES +	AFECTACIONES -	IMPACTO DEL AGREGADO	
FACTORES AMBIENTALES	MEDIO FISICO	AGUA	Alteración de la calidad del agua por sedimentos y residuos	1	2	4	Poco importante
			Alteración de la calidad del agua por derrames de lubricantes y aceites	1	3	-9	Irrelevante
			Alteración de la calidad del agua por liberación de materiales y residuos químicos	2	3	4	Poco importante
			Alteración de la calidad del agua por aumento de la turbidez del agua	1	1	2	Poco importante
			Alteración de la calidad del agua por cambios de escorrentia	1	0	2	Poco importante
			Erosión de taludes del embalse	1	0	2	Poco importante
			Afectación a la calidad de aguas superficiales	1	0	2	Poco importante
			Mejora de la calidad del agua al reducir la erosión de sedimentos a cuerpos de agua	3	1	37	Importante
		AIRE	Perdida de la calidad del aire por aumento de polvo y partículas en suspensión	2	5	-19	Irrelevante
			Alteración de la calidad del aire por la emisión de olores	1	1	-11	Irrelevante
			Alteración de la calidad del aire por emisión de vapores y aerosoles	2	1	-2	Irrelevante
			Perdida de la calidad del aire por aumento de gases contaminantes	2	1	0	Poco importante
			Disminución de la cantidad de polvo y partículas	4	1	36	Importante
		SUELO	Contaminación del suelo por derrames	1	4	-21	Irrelevante
			Contaminación del suelo por residuos	3	10	-22	Irrelevante
			Perdida del suelo por erosión	5	1	6	Poco importante
			Perdida de la capa superficial del suelo	1	3	-32	Moderado
			Prevención de la erosión del suelo	7	1	69	Muy importante
	MEDIO BIOLOGICO	FLORA	Eliminación de la cobertura vegetal	3	4	16	Poco importante
			Incremento de biodiversidad	3	0	25	Importante
		FLORA	Perturbación de la fauna local	1	0	4	Poco importante
			Ahuyentamiento de la fauna local	1	0	6	Poco importante
			Disminución de especies con importancia económica	3	0	31	Importante
	MEDIO SOCIO-CULTURAL	ECONOMICO	Mejora de la economía regional	1	0	4	Poco importante
			Incremento del nivel de empleo	2	1	2	Poco importante
			Incremento en la oferta del mercado eléctrico	1	1	-4	Irrelevante
			Reducción del espacio de pastoreo	4	0	48	Importante
		CULTURAL	Reasentamiento de comunidades		0	0	Poco importante
			Construcción de infraestructura cultural		0	0	Poco importante
			Programas de formación técnica	2	0	18	Poco importante
			Conservación de ecosistemas	2	0	27	Importante