



CRHIAM
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA
ANID/FONDAP/1523A0001



Universidad de Concepción



SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM



LEY N° 20.304 DE EMBALSES Y EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS: EL CASO DEL EMBALSE BULLILEO

Gonzalo Espíndola-Elgueta / José Luis Arumí / Lisandro Farías / Octavio Lagos

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

Ley N° 20.304 de embalses y eventos climáticos extremos:
el caso del Embalse Bullileo.

Gonzalo Espindola-Elgueta, José Luis Arumí, Lisandro Farías y Octavio Lagos.

Enero 2025.

Agradecimientos:

Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/1523A0001

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl

Este documento debe citarse como:

Espindola-Elgueta, G., Arumí, J., Farías, L., Lagos, O. 2025. Ley N° 20.304 de embalses y eventos climáticos extremos: el caso del Embalse Bullileo. Serie Comunicacional CRHIAM, Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (ANID/FONDAP/1523A0001). ISSN 0718-6460 (versión impresa), ISSN 0719-3009 (versión online), No. 85, 27pp. Disponible en: <https://www.crhiam.cl/publicaciones/series-comunicacionales/>



Universidad de Concepción



SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM



LEY N° 20.304 DE EMBALSES Y EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS: EL CASO DEL EMBALSE BULLILEO

Gonzalo Espíndola-Elgueta / José Luis Arumí / Lisandro Farías / Octavio Lagos

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU-Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



Gonzalo Espíndola-Elgueta

Ingeniero Ambiental,
Universidad de Concepción.



José Luis Arumí

Ingeniero Civil.
Doctor of Philosophy.
Major on Engineering.
Profesor Titular, Departamento de Recursos Hídricos,
Facultad de Ingeniería Agrícola,
Universidad de Concepción.
Investigador Principal CRHIAM.



Lisandro Farías

Ingeniero Civil Agrícola.
Gerente Junta de Vigilancia Río Longaví.



Octavio Lagos

Doctor of Philosophy Engineering,
University of Nebraska Lincoln, USA.
Profesor Asociado Facultad de Ingeniería Agrícola,
Universidad de Concepción.
Director Consorcio Tecnológico del Agua CoTH2O.
Investigador Asociado CRHIAM.

RESUMEN

El aumento en la intensidad de las lluvias y la creciente variabilidad de eventos extremos han estado afectando gravemente la infraestructura hidráulica del país, sobre todo en la región de Chile Central. Un claro ejemplo de esto son las extremas precipitaciones que afectaron al Embalse Bullileo durante junio y agosto de 2023. Durante estos eventos, el embalse, ubicado en la cuenca mayor del Río Maule, experimentó precipitaciones diarias de hasta 319 mm y 249 mm, superando su capacidad de almacenamiento en ambas ocasiones.

La Ley N° 20.304 en Chile establece directrices para la gestión de embalses de control, como planes de contingencia, monitoreo en tiempo real y evacuación anticipada para manejar crecidas y emergencias. Aunque el Embalse Bullileo no se rige bajo esta ley, la gestión de los eventos extremos de 2023 ilustra la necesidad de aplicar principios de gestión adaptativa y la importancia de seguir las normativas para mejorar la resiliencia frente a fenómenos climáticos extremos. Las simulaciones realizadas para el manejo de caudales en el embalse muestran que, aunque las estrategias adoptadas fueron efectivas en algunos aspectos, la gestión proactiva y la adaptación a eventos extremos son esenciales para mejorar la resiliencia en un contexto de cambio climático. La implementación rigurosa de estas normativas podría mejorar significativamente la capacidad de respuesta ante eventos extremos y asegurar una gestión del agua más efectiva en el futuro.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha ocasionado alteraciones significativas en el ciclo hidrológico a nivel mundial. Estas alteraciones no solo impactan directamente en la disponibilidad del recurso hídrico, sino que también aumentan la frecuencia de eventos climáticos extremos con posibles repercusiones significativas en los embalses y su gestión (Yasarer & Sturm, 2015; Granados *et al.*, 2021).

En ese sentido, de acuerdo con el Banco Mundial (World Bank, 2021), Chile es un país altamente vulnerable a los impactos del cambio climático. Según Fuentes *et al.* (2021), se han registrado cambios en los patrones de precipitación, proyectándose un incremento en la intensidad de las lluvias y una disminución en su frecuencia. Estos cambios podrían resultar en un incremento del escurrimiento superficial y una reducción en la infiltración del suelo, lo que afectaría la disponibilidad de agua para la vegetación y prolongaría los periodos de sequía.

En respuesta a esta situación, resulta imperativo que Chile adapte sus embalses y represas para enfrentar estos desafíos. De acuerdo con Arumi *et al.* (2020), los planes gubernamentales propuestos para la construcción de nuevos embalses buscan no solo mejorar la seguridad del suministro de agua y apoyar la agricultura, sino también integrar medidas de protección contra aluviones y crecidas. Sin embargo, es crucial que estos embalses sean diseñados con una visión integral que considere la minimización del impacto ambiental y la eficiencia en el uso del agua. A su vez, este menciona que la planificación debe incluir una gestión del agua que valore los servicios ecosistémicos y adapte las estrategias a las condiciones cambiantes del clima.

La relevancia de estas adaptaciones se manifiesta claramente en la frecuencia de eventos climáticos extremos, que han llevado a inundaciones y crecidas que han afectado a varios embalses en diversas regiones del país. Este contexto subraya la urgencia de implementar medidas resilientes y sostenibles en la gestión de los recursos hídricos para mitigar y reducir los efectos negativos del cambio climático.

FACTORES QUE INFLUYEN EN LOS EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS EN CHILE CENTRAL

El clima de Chile está profundamente influenciado por fenómenos climáticos globales como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y la Oscilación Antártica (AAO) (CCKP, 2021). Entre estos fenómenos, el ciclo global del ENSO juega un papel crucial en la variabilidad climática de Chile Central, siendo responsable de aproximadamente el 40% de las fluctuaciones en las precipitaciones de la región (Garreaud *et al.*, 2017). Durante la fase cálida del ENSO, el transporte de humedad subtropical se intensifica, lo que resulta en un aumento significativo de la precipitación y en la presencia de ríos atmosféricos más húmedos y prolongados cuando llegan a la zona de Chile Central (Campos & Rondanelli, 2017).

a) Impacto de los Ríos Atmosféricos

Los ríos atmosféricos (AR, por sus siglas en inglés) son responsables de entre el 40% y el 60% de la precipitación anual en la región subtropical de Chile (32-37°S), especialmente de junio a septiembre (Viale *et al.*, 2018). Algunas investigaciones sugieren que el cambio climático podría intensificar los AR's y desplazarlos hacia los polos, aumentando el riesgo de precipitación y crecidas extremas en el futuro (Espinoza *et al.*, 2018). Este potencial aumento en la intensidad de los ríos atmosféricos es un aspecto crucial a considerar para planificar el cuidado del recurso hídrico en el país, así como para prepararse ante eventos climáticos extremos.

Los ríos atmosféricos se definen como grandes masas de aire cargadas con vapor de agua que se desplazan horizontalmente a lo largo de una latitud (Garreaud, 2023). Hasta hace poco, no existía un método estandarizado para evaluar los impactos de los AR's. En respuesta a esta necesidad, el Centro para el Clima y el Agua en la Región Occidental y Eventos Extremos (CW3E, por sus siglas en inglés) de la Universidad de San Diego, Estados Unidos, desarrolló una escala para categorizar la magnitud y el impacto de estos fenómenos. Esta escala busca proporcionar una herramienta similar a las utilizadas para clasificar huracanes, facilitando así la evaluación y respuesta ante este tipo de eventos.

Para aquello, se utilizaron las variables de Transporte Integrado de Vapor de Agua Vertical y el Vapor de Agua Integrado Verticalmente (IVT y IWV respectivamente, por sus siglas en inglés). El IVT es una medida de cuánta agua es capaz de mover una columna de aire a lo largo del tiempo, mientras que el IWV indica la cantidad de agua precipitable en dicha columna de aire (Ralph *et al.*, 2019). A su vez, la intensidad y el impacto de AR también depende del periodo durante el cual sus condiciones permanecen constantes en una región específica. En la Figura 1 se puede observar la escala para categorizar AR's desarrollada por el CW3E.

b) Influencia de la altitud de la isoterma 0°C

La altitud de la isoterma 0°C es otro factor que influye en el impacto de los eventos climáticos extremos en el país. Esta línea delimita las áreas propensas a recibir precipitación líquida o sólida. Para estimar la altitud de la isoterma 0°C, la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) emplea observaciones de altura desde radiosondas basadas en los valores de temperatura medidos verticalmente.

Según un estudio de Vásquez (2020) basado en registros históricos de la radiosonda en Santo Domingo, la altitud promedio de la isoterma 0°C durante periodos de precipitación en la zona central de Chile es de aproximadamente 2.750 msnm. Esto quiere decir que, si la altura promedio de la isoterma durante un evento de precipitación se encuentra por encima de este valor, es probable que haya un mayor arrastre de sedimentos desde las zonas altas de la cordillera debido a que caería agua líquida en zonas donde suele caer en forma sólida, intensificando así el impacto de la crecida y los daños causados aguas abajo.

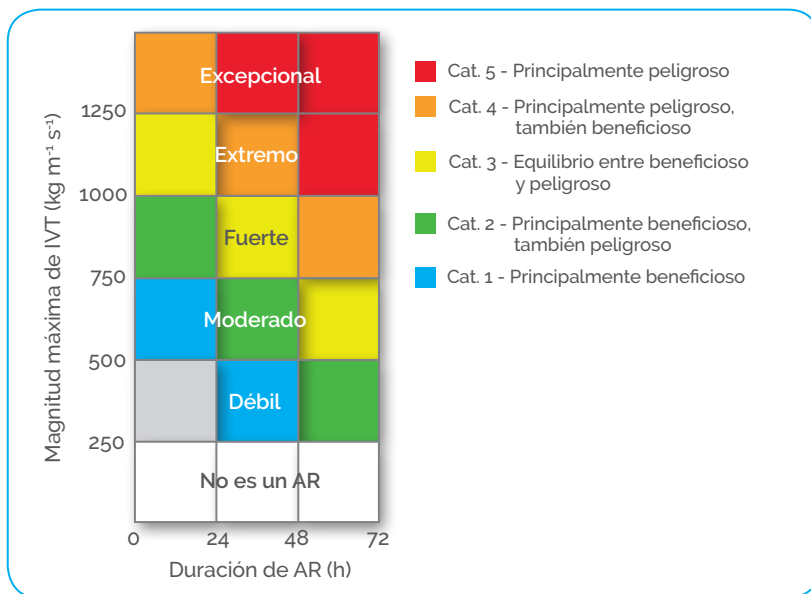


Figura 1.

Una escala que categoriza los eventos de AR basándose en el IVT máximo instantáneo asociado con un período de condiciones de AR (es decir, $\text{IVT} \geq 250 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) y la duración de esas condiciones en un punto. Fuente: Adaptado de Ralph *et al.* (2019).

EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTREMA EN LA REGIÓN DE CHILE CENTRAL

A lo largo de los años, los eventos de precipitación extrema en la zona de Chile Central han tenido impacto significativo en la infraestructura hidráulica y las comunidades locales. Un ejemplo de este tipo de eventos son las precipitaciones que afectaron al Embalse Bullileo en junio y agosto de 2023. De acuerdo con los datos del sistema hidrométrico en línea de la Dirección General de Aguas (DGA), el embalse experimentó acumulaciones de precipitaciones diarias que alcanzaron hasta 319,1 mm y 249 mm, respectivamente, lo que provocó que la capacidad máxima del embalse se viera sobrepasada en ambas ocasiones.

En ese sentido, el estudio de prefactibilidad realizado en 2012 para la construcción del sistema de riego del Longaví estimó los períodos de retorno para eventos de precipitación en el sector. Para ponerlo en perspectiva, según este estudio, la probabilidad de que ocurra una precipitación acumulada diaria de 319,1 mm en el Embalse Bullileo es de entre 1000 y 5000 años, mientras que una acumulada diaria de 249 mm podría ocurrir cada 100 a 200 años.

A su vez, de acuerdo con el análisis realizado por Vicencio (2023), el AR de junio mostró un IVT de entre 500 y 960 $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ y un IWV superior a 30 mm, lo cual está muy por encima de la media climatológica en invierno en la región (~10 mm). Del mismo modo, se registró una distribución horaria de 100 horas continuas frente a la región de Chile Central. Esta duración, combinada con la medida de IVT, le valió para ser clasificado como un evento de categoría 3 o 4, lo que puede corroborarse al ubicar estas variables en la Figura 1. Esto significa que, si bien fue un AR mayormente peligroso, también resultó ser benéfico, contribuyendo con el almacenamiento de agua en el subsuelo.

Del mismo modo, la altitud de la isoterma 0°C se mantuvo entre 2750 y 3250 msnm en las regiones del Maule, Ñuble y Biobío (Vicencio, 2023), lo que sugiere que la isoterma estuvo ligeramente por encima del promedio, intensificando el impacto de las crecidas aguas abajo.

En términos generales, las inundaciones derivadas de este tipo de eventos a menudo afectan numerosas rutas y puentes, complicando la movilidad y el comercio. Además, el sector agrícola suele sufrir pérdidas considerables debido a los daños en las tierras de cultivo y en las infraestructuras de riego, exacerbando el impacto de estas condiciones extremas en la región. Las imágenes presentadas en las Figuras 2 y 3 ilustran las consecuencias derivadas del evento anteriormente mencionado en la región de Chile Central.



Figura 2.

Crecida del Río Ñuble en el sector del puente ferroviario durante las precipitaciones extremas de junio de 2023.

Fuente: Pcartes (2023), foto extraída de Wikipedia.

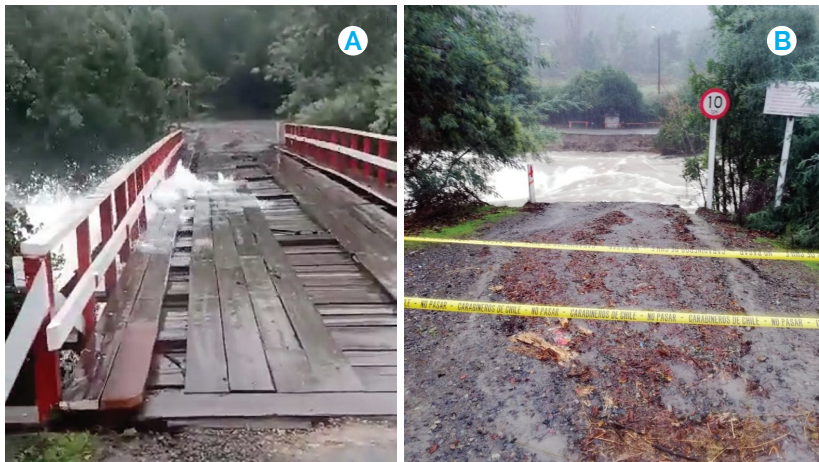


Figura 3.

Instantes antes (A) y después (B) del colapso del Puente Vejar en el sector de Bullileo durante las precipitaciones extremas de junio de 2023.

Fuente: @Carab_Maule (2023), foto extraída de X App.

REGULACIÓN DE CRECIDAS SEGÚN LA LEY DE EMBALSES N° 20.304

La Ley N° 20.304, publicada el 13 de diciembre de 2008 por el Ministerio de Obras Públicas, establece un marco normativo para la operación de embalses frente a alertas y emergencias de crecidas causadas, en su mayoría, por eventos de precipitación extrema.

Según esta ley, un "embalse de control" se define como aquel que contribuye a la regulación de crecidas para evitar o mitigar riesgos para la vida, la salud y los bienes de la población. Estos embalses son identificados y clasificados por la DGA en función de su capacidad de regulación y ubicación dentro de la cuenca hidrográfica. De acuerdo con el catálogo documental de la DGA, solo los embalses Colbún y Ralco se encuentran clasificados en esta categoría.

El artículo 6° de la ley establece que los operadores de embalses de control deben elaborar un Manual de Operación que incluya un Plan de Contingencia para crecidas. Este manual debe ser presentado y aprobado por la DGA, el cual, entre otras cosas, debe incluir estrategias específicas para manejar crecidas, tales como:

- Hidrograma de crecidas: Esto permite una mejor planificación y respuesta ante eventos de lluvias intensas que podrían generar crecidas significativas.
- Programación de evacuación anticipada: Es esencial que el manual contemple planes para la evacuación anticipada de agua con tal de mitigar el impacto de crecidas afluentes. Dada la mayor variabilidad de los patrones de precipitación, los operadores deben tener estrategias flexibles para diferentes condiciones de volumen y tiempos de evacuación.
- Monitoreo y ajuste en tiempo real: Este aspecto es importante para adaptarse a condiciones cambiantes y gestionar el caudal afluente y el nivel del embalse.
- Análisis para situaciones de retorno: Este análisis permite planificar eventos extremos con una mayor certeza. En ese sentido, considerando un aumento en la intensidad de los eventos en el último tiempo, es necesario que los operadores estén preparados para todo tipo de situaciones.

Bajo este aspecto, la ley es clara en la importancia de la adaptación continua de los embalses para manejar las crecidas y otras condiciones climáticas extremas. Además, la ley obliga a los operadores a adaptarse a las nuevas disposiciones y medidas que la DGA pueda imponer durante un evento de crecida extrema. Esta medida es esencial para manejar adecuadamente estas situaciones. Es necesario mencionar que, de acuerdo con el artículo 12º, la ley prevé compensaciones por haber evacuado aguas en circunstancias que estaban en condiciones de conservarlas. Si este es el caso, el Fisco deberá indemnizar al operador, siempre que éste pruebe un daño o perjuicio efectivo y avaluable en dinero.

EL CASO DE LAS PRESAS AL-BILAD Y ABU MANSOUR

Un ejemplo una gestión deficiente de embalses se observa en el caso de las presas Al-Bilad y Abu Mansour durante la tormenta Daniel que afectó a la ciudad de Derna en Libia entre el 10 y el 13 de septiembre de 2023. Durante este evento, ambas presas colapsaron, liberando aproximadamente 30 hm³ de agua sobre la ciudad (ACAPS, 2023).

Según Al-Ansari (2023), la causa principal del colapso fue una gestión inadecuada. El autor menciona que, de haberse abierto las compuertas para mantener el agua dentro de la capacidad de carga y haber existido una comunicación constante con los meteorólogos, se podría haber evitado la catástrofe. Los problemas claves identificados incluyen la falta de monitoreo adecuado y la ausencia de información en tiempo real sobre el caudal y el nivel del agua.

En contraste, la Ley N° 20.304 en Chile establece la obligación de instalar sistemas de monitoreo para informar a la DGA sobre el estado de los embalses, permitiendo una intervención oportuna si se supera la capacidad de carga. A su vez, la DMC debe informar a la DGA y a SENAPRED (Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres) sobre los pronósticos meteorológicos, permitiendo a SENAPRED declarar estados de alerta para crecidas.

Al-Bilad (2023) señaló que la falta de comunicación y coordinación contribuyó al colapso de las presas lo que, en contraste, subraya la relevancia de los mecanismos establecidos en la ley chilena para asegurar una adecuada coordinación y emisión de alertas en eventos climáticos extremos en el país. El caso de Libia enfatiza la importancia de implementar protocolos para evitar este tipo de tragedias en un futuro.



Figura 4.

Registro antes (A) y después (B) de Derna tras el colapso de las presas.

Fuente: Fotos capturadas por Planet Labs PBC (2023).

EL CASO DEL EMBALSE BULLILEO

Aunque el Embalse Bullileo no está clasificado como un embalse de control bajo la Ley N° 20.304 dada su capacidad y ubicación en la hoya hidrográfica, su gestión durante los eventos climáticos extremos de junio y agosto de 2023 ofrece una valiosa perspectiva sobre cómo enfrentar tales desafíos.

Este embalse está situado en la sub-subcuenca del Río Longaví, que a su vez forma parte de la cuenca mayor del Río Maule. Se encuentra unos 10 km aguas arriba de la confluencia entre los ríos Bullileo y Longaví, y cuenta con 250 hectáreas que inundan las áreas de Valle Hermoso, Lara y Amargo. El área de captación de la cuenca del embalse abarca alrededor de 100 km², y para su monitoreo se emplean las estaciones de Santa Filomena y Bullileo Embalse de la DGA, que recopilan datos como el volumen de agua, la cota del embalse y la cantidad de precipitación. Estos datos son esenciales para la toma de decisiones en la gestión operativa del embalse.

La administración y conservación de este embalse depende de la Junta de Vigilancia del Río Longaví y sus Afluentes, cuyo propósito es gestionar y distribuir equitativamente las aguas a que tienen derechos sus miembros. En este contexto, la función principal del embalse es regular el caudal del Río Longaví para satisfacer las necesidades de riego de aproximadamente 25.000 hectáreas durante el verano.

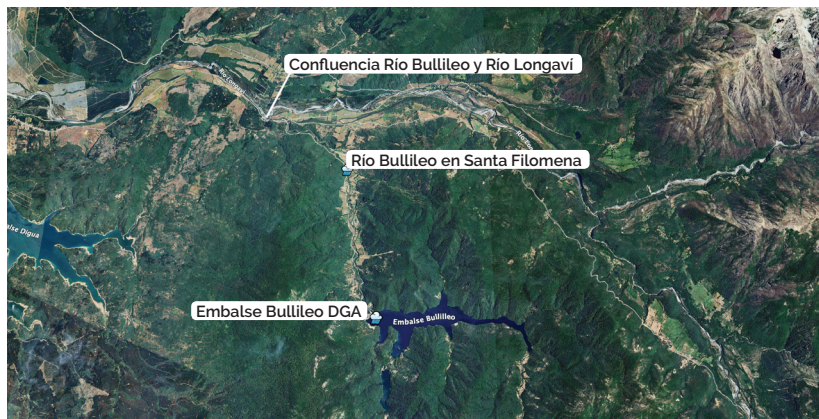


Figura 5.

Estaciones de monitoreo del sector del Embalse Bullileo.

Fuente: Google Earth.

En condiciones normales, el Embalse Bullileo tiene una capacidad de almacenamiento de hasta 60 hm³ de agua sin operar el vertedero. En caso de operar el vertedero para aliviar excedentes de agua, este puede operar hasta una cota máxima de evacuación de 50,08 mca. A la fecha de los eventos anteriormente mencionados, contaba con 5 válvulas del tipo aguja. Sin embargo, para garantizar la seguridad de la sala de válvulas, solían abrirse entre tres y media y cuatro válvulas simultáneamente, permitiendo una liberación máxima de 7,5 m³/s por cada una.

En este sector las precipitaciones oscilan entre 1.800 y 2.600 mm al año, lo que asegura su llenado entre abril y septiembre y la generación de un margen de seguridad de 15 hm³ para evitar posibles desbordamientos. Sin embargo, durante el evento de junio de 2023, el embalse pasó de 21 hm³ a 64 hm³ en solo 4 días, superando su capacidad máxima normal en la madrugada del 25 de junio y obligando a verter el exceso de agua a través del vertedero. La Tabla 1 presenta el balance de caudales y el volumen asociado en diferentes momentos durante estas crecidas.

Tabla 1.

Balance de caudales y volumen del Embalse Bullileo en diferentes instantes de tiempo de junio y agosto de 2023.

Fecha de medición	Q entrada (m ³ /s)	Q válvulas (m ³ /s)	Q vertedero (m ³ /s)	V embalse (hm ³)
21-06	-	0,0	0,0	21,0
24-06	416,2	15,6	143,6	48,7
25-06	343,2	15,6	327,6	64,8
30-06	59,4	15,6	50,7	62,0
01-08	16,0	16,0	0,0	52,0
02-08	8,4	7,5	0,0	52,0
05-08	5,1	6,0	0,0	52,0
07-08	0,0	0,0	0,0	51,8
16-08	0,0	7,5	0,0	54,7
19-08	141,7	15,0	0,0	54,6
20-08	295,7	15,0	211,3	61,6
21-08	315,1	15,0	300,1	64,8
22-08	147,8	15,0	160,6	63,4
31-08	24,1	15,0	9,1	60,6

Al inicio del evento de junio, el embalse estaba al 30% de su capacidad, lo que le permitió amortiguar el 62% del caudal máximo de entrada de 416,2 m³/s registrado el 24 de junio. Las válvulas se abrieron ese día a un caudal de 15,6 m³/s y permanecieron abiertas durante los próximos meses para generar un margen de seguridad y proteger el embalse. Al inicio del segundo evento, el embalse se encontraba al 91% de su capacidad, y se esperaba alcanzar el margen de seguridad a fines de septiembre según los pronósticos. Sin embargo, las lluvias de ese mes hicieron que el embalse volviera a llenarse el 21 de agosto, por lo que no pudo amortiguar el caudal máximo de entrada de 315,1 m³/s registrado ese mismo día.

El evento de agosto presentó mayores desafíos que el de junio ya que hubo un instante en que el agua que ingresaba al embalse era la misma que la que salía. Cabe destacar que el pronóstico del clima consultado el 20 de junio indicaba un máximo acumulado aproximado de 530 mm entre el 21 y 25 de junio, por tanto, las medidas adoptadas se basaron en dicho pronóstico. Sin embargo, dicho evento registró un máximo acumulado de más de 800 mm.

La Figura 6 muestra el volumen de agua ingresada al embalse durante el evento de junio y su impacto en el volumen almacenado, evidenciando cómo el embalse alcanzó la cota de vaciado a través del vertedero y mantuvo un volumen constante desde entonces. Del mismo modo, la Figura 7 ilustra esta situación pero para el evento de agosto, donde el embalse, completamente lleno durante la máxima crecida, no pudo amortiguar su intensidad.

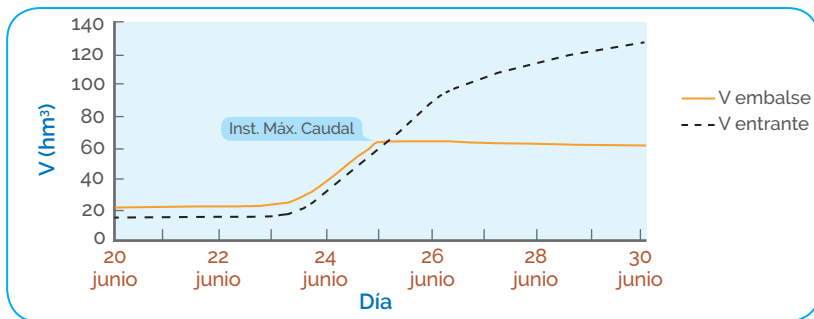


Figura 6.

Volumen del embalse y volumen de agua entrante al embalse (V) durante el evento de junio indicando el instante de máximo caudal de entrada. Fuente: Elaboración propia.

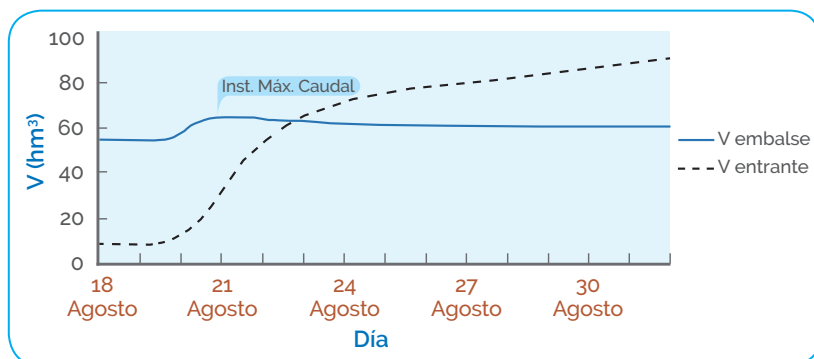


Figura 7.

Volumen del embalse y volumen de agua entrante al embalse (V) durante el evento de agosto indicando el instante de máximo caudal de entrada. Fuente: Elaboración propia.

MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL EMBALSE BULLILEO

Como complemento técnico a la gestión del Embalse Bullileo durante los eventos climáticos extremos de 2023, se desarrolló un modelo de simulación para explorar cómo el embalse podría haber respondido bajo diferentes condiciones de manejo. Este análisis proporciona perspectivas sobre la gestión de caudales y la capacidad de respuesta ante crecidas.

Se creó un modelo de simulación considerando las condiciones del embalse en términos de capacidad y manejo de caudales. Utilizando datos registrados por las estaciones de monitoreo, se realizó un balance de masas para calcular el caudal de entrada durante los eventos. El modelo incluyó una condición de borde que asumía un aumento sostenido del volumen y la cota del embalse sin liberación de agua a través de las válvulas y el vertedero, permitiendo la simulación de diversos escenarios de manejo.

El caudal del vertedero se calculó en tiempo real, asociando la carga del vertedero con su curva de gasto, lo que permitió actualizar el volumen del embalse en cada paso del cálculo.

Para el evento de junio, la comparación entre las curvas simuladas y las reales mostró que el embalse logró contener la crecida alrededor de 38 horas antes de abrir las válvulas el 24 de junio. Luego, logró regular el cau-

dal de salida por otras 11 horas más hasta que comenzó a operar el vertedero.

La simulación S5 sugiere haber comenzado a vaciar el embalse el 1 de junio para después, una vez llegado el AR, abrir las 5 válvulas a su máxima capacidad. Esto habría contenido la crecida durante 21 horas más que en la realidad, sumando un total de 59 horas. Aún así, el vertedero habría operado de todos modos, lo que pone de manifiesto la excepcionalidad del evento de junio ya que incluso con el embalse vacío y las válvulas operando a su máxima capacidad, no se habría regulado la crecida en su totalidad. Esto puede observarse en la Figura 8, donde EJ representa el caudal de salida sin la existencia del embalse, RJ corresponde a la gestión real durante el evento, y S5 muestra el escenario simulado mencionado con anterioridad.

Cabe señalar que vaciar el embalse desde el 1 de junio no era viable, ya que no se preveían precipitaciones de tal magnitud en ese momento. Esto habría comprometido el propósito real del embalse de almacenar agua para la temporada estival, afectando la temporada de riego. En un supuesto donde el embalse estuviera sujeto bajo la Ley N° 20.304, la evacuación anticipada podría haber requerido compensación del Fisco según el artículo 12°. Además, abrir las 5 válvulas simultáneamente no era factible debido a las limitaciones de la infraestructura, lo que podría haber comprometido la integridad de la sala de válvulas.

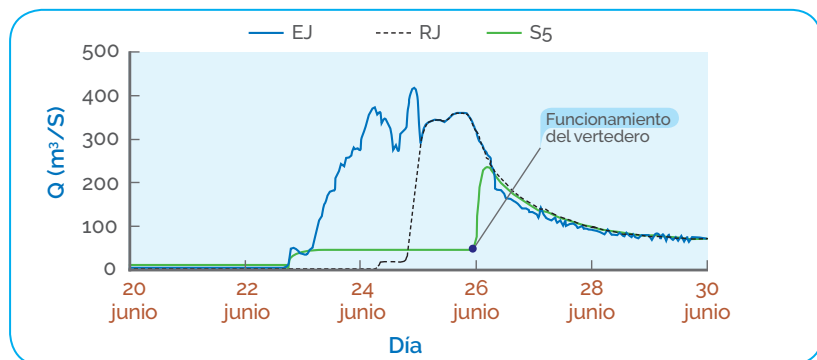


Figura 8.

Curvas de salida (Q) bajo diferentes escenarios de manejo simulados en el Embalse Bullileo (Sn) durante el evento de junio. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 9 hace el mismo ejercicio, pero para el evento de agosto, donde EA representa un escenario sin la existencia del embalse, RA refleja lo llevado a cabo en la realidad, y S1 describe cómo habría sido el comportamiento del embalse si se hubieran tomado las mismas medidas que en junio.

La simulación reveló que mantener las válvulas abiertas luego del evento de junio permitió regular la crecida de agosto durante 8 horas más en comparación con haberlas abierto durante el evento, tal como se hizo en junio. Aunque esta estrategia no fue planificada deliberadamente, la gestión accidental ayudó a mitigar el impacto de la crecida de agosto. Sin embargo, el embalse, lleno luego de la crecida de junio, no pudo manejar adecuadamente la crecida de agosto debido a la falta de tiempo para vaciarlo antes de la llegada del nuevo AR. Este análisis subraya que una gestión proactiva en eventos anteriores puede mejorar la respuesta a futuras crecidas, pero también destaca las limitaciones debido a las condiciones del clima y del embalse en el momento del evento.

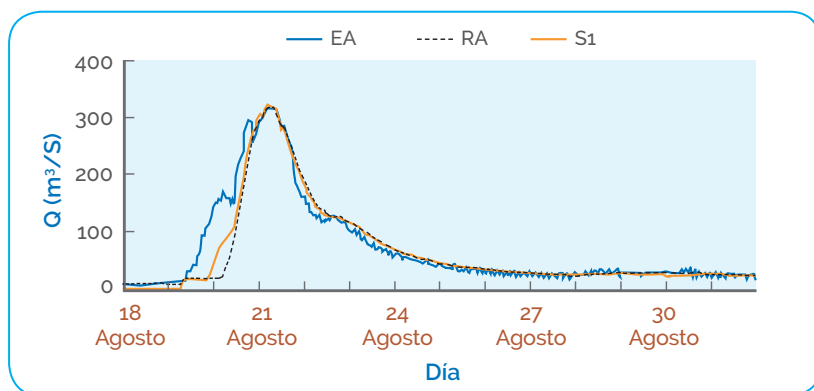


Figura 9.

Curvas de salida (Q) bajo diferentes escenarios de manejo simulados en el Embalse Bullileo (S_n) durante el evento de agosto. Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Existe la necesidad de adaptar la gestión de embalses en Chile ante un cambio importante en los patrones atmosféricos y la intensidad de evento climáticos extremos. La Ley N° 20.304 juega un rol crucial al establecer directrices para los embalses de control, incluyendo la elaboración de planes de contingencia, monitoreo en tiempo real y evacuación anticipada para manejar crecidas y emergencias.

El caso del Embalse Bullileo, aunque no está regulado bajo esta ley, demuestra la importancia de aplicar principios de gestión adaptativa. La construcción de un modelo de simulación permitió evaluar alternativas operativas y ajustar la gestión del embalse para regular las crecidas de caudales. Los resultados mostraron que, dadas las condiciones operacionales y el propósito del embalse, la gestión real se adaptó de manera efectiva a las circunstancias, priorizando tanto la seguridad como el llenado del embalse.

Comparado con el colapso de las presas en Libia, la ley chilena muestra ser una herramienta valiosa para prevenir desastres. Por consiguiente, implementar y seguir rigurosamente estas normativas puede mejorar significativamente la resiliencia de los embalses y la gestión del agua en un contexto de cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su gratitud a los colaboradores de la Junta de Vigilancia del Río Longavi y Sus Afluentes por su apertura en la realización de este trabajo. Su generosidad al proporcionar información y permitir visitas a terreno fue fundamental para el desarrollo de este estudio.

REFERENCIAS

- Al-Ansari, N. 2023. Libya dam collapse: engineering expert raises questions about management. Disponible en: <https://theconversation.com/libya-dam-collapse-engineering-expert-raises-questions-about-management-213546>>.
- Arumí, J. L., Delgado, V., Stehr, A., Sandoval, M. I., & Urrutia, R. 2020. Los embalses y su gestión sustentable bajo el escenario de escasez hídrica [en línea]. Serie Comunicacional N°13. Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería. Disponible en <https://www.crhiam.cl/publicaciones/series-comunicacionales/page/5/>.
- Assessment Capacities Project (ACAPS). 2023. Update on the impact of Storm Daniel in Derna district. Thematic report. Disponible en: <https://reliefweb.int/report/libya/acaps-thematic-report-libya-update-impact-storm-daniel-derna-district-15-september-2023>
- Beça, P., Rodrigues, A.C., Nunes, J.P. et al. 2023. Optimizing Reservoir Water Management in a Changing Climate. *Water Resour Manage* 37, 3423–3437. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03508-x>
- Boulangé, J., Hanasaki, N., Yamazaki, D., & Pokhrel, Y. 2021. Role of dams in reducing global flood exposure under climate change. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20704-0>
- Boulange, J., Hanasaki, N., Yamazaki, D. et al. 2021. Role of dams in reducing global flood exposure under climate change. *Nat Commun* 12, 417. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20704-0>
- Climate Change Knowledge Portal (CCKP). 2021. Chile – Historical Data. Disponible en: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/chile/climate-data-historical>
- Dirección General de Aguas (DGA). 2023a. Informe Hidrometeorológico Semanal, 27 de junio de 2023 [en línea]. Disponible en: <https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Paginas/default.aspx>

- Dirección General de Aguas (DGA). 2023b. Informe Hidrometeorológico Semanal, 21 de agosto de 2023 [en línea]. Disponible en: <https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Paginas/default.aspx>
- Dirección General de Aguas (DGA). s.f. Sistema Hidrométrico en Línea. Datos de Estaciones. Disponible en: <https://dga.mop.gob.cl/Paginas/hidrolineasatel.aspx>
- Espinoza, V., Waliser, D. E., Guan, B., Lavers, D. A., & Ralph, F. M. 2018. Global analysis of climate change projection effects on atmospheric rivers. *Geophysical Research Letters*, 45, 4299–4308. <https://doi.org/10.1029/2017GL076968>
- Fuentes, I., Fuster, R., Avilés, D., & Vervoort, W. 2021. Water scarcity in central Chile: the effect of climate and land cover changes on hydrologic resources. *Taylor & Francis*, 66(6), 1028–1044. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1903475>
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. 2017. The 2010–2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 6307–6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>.
- Garreaud, R. 2023. Análisis (CR)2 | Vuelven los gigantes: un análisis preliminar de la tormenta ocurrida entre el 21 y 26 de junio de 2023 en Chile Central [en línea]. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. Disponible en: <https://www.cr2.cl/analisis-cr2-vuelven-los-gigantes-un-analisis-preliminar-de-la-tormenta-ocurrida-entre-el-21-y-26-de-junio-de-2023-en-chile-central/>
- Granados, A., SordoWard, Á., Paredes-Beltrán, B. E., & Garrote, L. 2021. Exploring the Role of Reservoir Storage in Enhancing Resilience to Climate Change in Southern Europe. <https://doi.org/10.3390/w13010085>

- Hernández, M. A., & Naudon, C. 2010a. Ley 20.304 sobre operación de embalses frente a alertas y Emergencias de crecidas y otras medidas que indica: definición de embalse Colbún como Embalse de Control. División de Estudios y Planificación. Catálogo Documental DGA. Disponible en: <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/5>
- Hernández, M. A., & Naudon, C. 2010b. Ley 20.304 sobre operación de embalses frente a alertas y Emergencias de crecidas y otras medidas que indica: definición de embalse Ralco como Embalse de Control. División de Estudios y Planificación. Catálogo Documental DGA. Disponible en: <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/5>
- Ley No. 20304, Sobre operación de embalses frente a alertas y emergencias de crecidas y otras medidas que indica. Diciembre 13, 2008. Diario Oficial [D.O.] (Chile).
- Ralph, F M., Rutz, J J., Cordeira, J M., Dettinger, M D., Anderson, M L., Reynolds, D W., Schick, L J., & Smallcomb, C. 2019. A Scale to Characterize the Strength and Impacts of Atmospheric Rivers. *American Meteorological Society*, 100(2), 269-289. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/bams-d-18-0023.1>
- Vásquez, R. 2020. Climatología y tendencia de la altura de la isoterma cero. Sección Climatológica, Dirección Meteorológica de Chile. Disponibñe en:<https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/publicacionesb/isotermaCero>.
- Viale, M., Valenzuela, R., Garreaud, R. D., & Ralph, F. M. 2018. Impacts of Atmospheric Rivers on Precipitation in Southern South America. *Journal of Hydrometeorology*, 19(10), 1671-1687. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0006.1>
- Vicencio, J. 2023. Potente río atmosférico desencadena históricas lluvias e inundaciones en Chile Central luego de 12 años de megasequia. Disponible en: <https://josevicenciov.wordpress.com/>.

- Voiland, A. 2023. Atmospheric Rivers Swamp Central Chile. NASA Earth Observatory. Disponible en: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/151783/atmospheric-rivers-swamp-central-chile>
- World Bank. 2021. Chile – Country Summary. Climate Change Knowledge Portal. Disponible en: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/chile>.
- Yasarer, L., & Sturm, B. 2015. Potential impacts of climate change on reservoir services and management approaches. *Taylor & Francis*, 32(1), 13-26. <https://doi.org/10.1080/10402381.2015.1107665>



CRHIAM
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA
ANID/FONDAP/1523A0001



Universidad de Concepción



SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM



LEY N° 20.304 DE EMBALSES Y EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS: EL CASO DEL EMBALSE BULLILEO



Universidad de Concepción



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia

