

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL DIMENSIONAMIENTO DE
EMBALSES**

TOMÁS RAMMSY¹
CRISTIÁN CHADWICK I.²
JORGE GIRONÁS³

RESUMEN

El dimensionamiento de embalses bajo un contexto de cambio climático, es un problema poco estudiado, el cual se analiza por medio de relacionar las variaciones en los caudales y la demanda con el impacto de estos sobre la capacidad ideal de almacenamiento necesaria. Como método de dimensionamiento de embalses se utiliza Rippl, una herramienta clásica en hidrología que realiza un balance simplificado entre los flujos de entrada y salida, determinando el tamaño óptimo del embalse. La metodología de Rippl, al igual que otras metodologías de dimensionamiento de embalses asume estacionaridad, por lo que se evalúa su desempeño bajo condiciones no estacionarias. Debido al cambio climático, los caudales de entrada al embalse cambiarán, fenómeno que es evaluado con la generación de series sintéticas de caudales, sensibilizando cambios en la media y desviación estándar, tanto en escenarios estacionarios como no estacionarios. Los resultados muestran que una disminución en los caudales de entrada, conllevan un aumento del tamaño del embalse óptimo, mientras que un incremento en la variabilidad de los caudales de entrada también genera un aumento del tamaño de embalse óptimo. De existir un cambio en el valor esperado del caudal y su variabilidad al mismo tiempo, el cambio predominante es el cambio sobre el valor esperado. En términos generales se puede apreciar cómo el asumir estacionaridad en procesos de dimensionamiento de embalses, deja de ser válido en muchos escenarios de cambio.

¹ Magister en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Adolfo Ibáñez– trammsy@alumnos.uai.cl

² Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Adolfo Ibáñez– cristian.chadwick@uai.cl

³ Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile– jgironas@uc.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos son fundamentales para el desarrollo humano, siendo esenciales en actividades como la agricultura, la generación de energía hidroeléctrica y el consumo humano (Shiklomanov, 1991; Dey & Mishra, 2017). Sin embargo, la disponibilidad de agua enfrenta desafíos debido al crecimiento poblacional, la sobreexplotación de acuíferos y el cambio climático (UN Water, 2020). Este último modifica el ciclo hidrológico al alterar los patrones de precipitación y aumentar las temperaturas, lo que incrementa la incertidumbre sobre los caudales de los ríos y el almacenamiento de agua terrestre (Pokhrel et al., 2021). Estas alteraciones generan una hidrología no estacionaria que afecta los recursos hídricos naturales y las infraestructuras de almacenamiento, como los embalses (Mianabadi, 2020; Casado & Gil, 2006).

Ante estos desafíos, la gestión de los recursos hídricos debe enfocarse en estrategias que permitan garantizar la seguridad hídrica en el largo plazo. Esto incluye la optimización del almacenamiento y distribución del agua, la implementación de tecnologías para mejorar la eficiencia del uso del recurso y la planificación de infraestructuras adaptables al clima. En este sentido, los embalses juegan un rol crucial al actuar como reguladores del agua disponible, mitigando la variabilidad hidrológica y asegurando un suministro continuo para distintos sectores. Sin embargo, su diseño requiere adaptaciones para enfrentar los efectos del cambio climático de manera eficiente y sostenible.

Los embalses son herramientas esenciales para mitigar los efectos de sequías e inundaciones, especialmente ante el aumento de eventos extremos causado por el cambio climático (Gómez, 2009). Estas estructuras permiten almacenar agua en periodos de abundancia y distribuirla en épocas de escasez (Armengol et al., 2009). Además, cumplen funciones clave en el tratamiento de agua, el abastecimiento humano y la generación de energía (CEPAL, 2012). El diseño tradicional de embalses no siempre considera la creciente incertidumbre climática, lo que puede generar infraestructuras ineficientes o vulnerables ante eventos hidrológicos extremos. La variabilidad en la disponibilidad de agua, producto de sequías prolongadas o precipitaciones intensas concentradas en cortos períodos, requiere modelos más flexibles que permitan evaluar distintos escenarios futuros. En este contexto, es fundamental incorporar herramientas de modelación hidrológica y climática que permitan anticipar cambios en los patrones de caudal y mejorar la planificación del almacenamiento de agua.

En la actualidad el diseño y operación de los embalses deben evolucionar para adaptarse a las nuevas condiciones climáticas. Tradicionalmente, su dimensionamiento se ha basado en métodos como el diagrama de Rippl y la sucesión de peaks, que asumen una hidrología estacionaria (Skertchly, 1989). Con los cambios actuales en los patrones de caudal y precipitación, estos métodos resultan insuficientes para garantizar un diseño adecuado (Schlef et al., 2022).

En este contexto, la necesidad de adaptar el dimensionamiento de embalses se vuelve aún más crítica. La variabilidad y cambios hidrológicos inducidos por el cambio climático exige un replanteamiento en la gestión de los recursos hídricos, especialmente en regiones vulnerables donde la disponibilidad de agua ya es un desafío recurrente. El aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos, como sequías prolongadas e inundaciones repentinas, afecta el funcionamiento de los sistemas de almacenamiento de agua. Adaptar estas infraestructuras a un clima cambiante requiere integrar nuevos modelos que no solo consideren la incertidumbre en los

patrones de caudal y precipitación, sino que también incorporen análisis probabilísticos, simulaciones hidrológicas y herramientas de optimización.

En regiones como Chile, el cambio climático ha intensificado los desafíos en la gestión de recursos hídricos. Estudios han mostrado cómo el derretimiento temprano de nieve y la reducción de precipitaciones afectan las cuencas hidrográficas, disminuyendo los caudales disponibles para embalses (Vicuña et al., 2012; Chadwick et al., 2023). Esto subraya la importancia de diseñar embalses más flexibles y re-evaluar la necesidad de almacenamiento. La implementación de herramientas avanzadas, como modelos de simulación hidrológica, permite evaluar escenarios futuros y tomar decisiones más informadas sobre el diseño, la operación y el manejo sostenible de los embalses (Turner et al., 2020).

El objetivo principal de este trabajo es analizar el impacto del cambio y la variabilidad climática en el dimensionamiento de embalses. A través del uso de modelos y simulaciones hidrológicas, se busca identificar cómo los cambios en la media y la desviación estándar de los caudales de entrada afectan el diseño, la capacidad de los embalses y el periodo en que se notarán los efectos del cambio climático sobre los embalses.

2. METODOLOGÍA

Dimensionamiento de embalses

En el dimensionamiento de embalses se utilizó el método de Rippl, también conocido como diagrama de masas (Satriani et al, 2021). El enfoque se basa en calcular la capacidad de almacenamiento necesaria para satisfacer las demandas de agua de una región o cuenca específica. Para aplicar este método, se requiere tener datos hidrológicos, como los caudales de entrada y salida, así como la información sobre la demanda de agua. Con los flujos de entrada se construye una curva de volumen acumulado, en función del tiempo (línea azul, Figura 1). En un segundo paso se traza una recta desde el punto inicial al final de la curva acumulada de entrada (AB, Figura 1). En un tercer paso se trazan líneas paralelas a la recta del paso anterior que sean tangenciales a la curva acumulada en un solo punto y no se crucen con la curva acumulada, de tal manera de trazar una curva máxima (i.e., tangente en Q Figura 1) y una curva mínima (i.e., tangente en T Figura 1). Finalmente, se estima la distancia vertical entre las dos líneas paralelas, que representa el volumen de almacenamiento (QU, Figura 1).

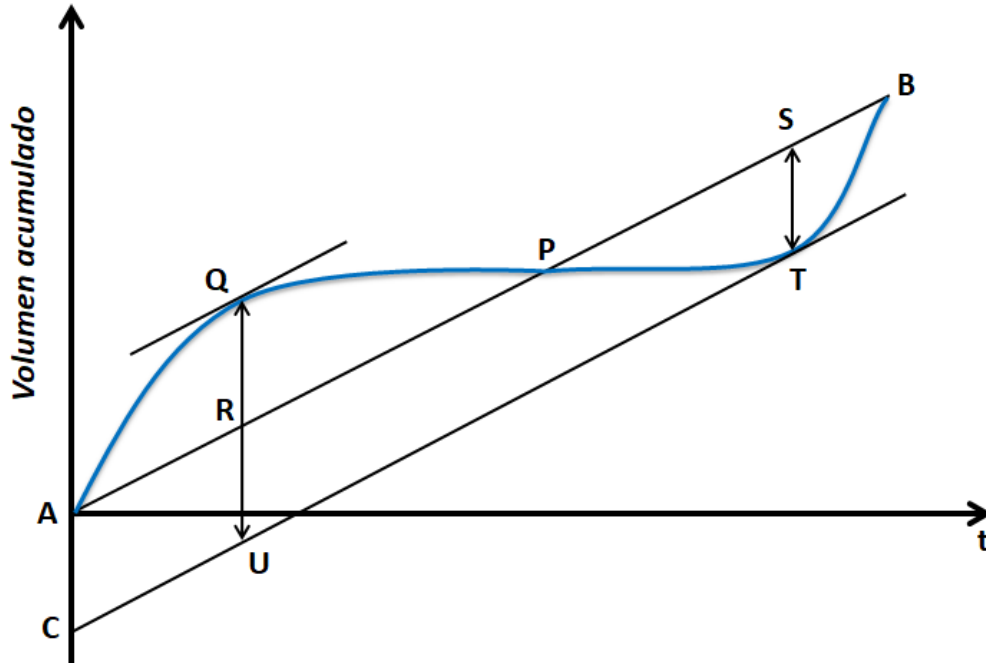


Figura 1. Ejemplo esquemático del método de Rippl

Generación de series de tiempo sintéticas

Se requiere evaluar cómo funciona el dimensionamiento de embalses, ante escenarios no estacionarios, para lo cual se generarán series sintéticas de caudales. Dado que los caudales suelen tener una asimetría positiva, es que se adoptará una distribución log-normal para normalizar los caudales sintéticos de entrada al embalse. Luego de normalizar los caudales, se utiliza un modelo autorregresivo AR(p) (Ec. 1), para simular una memoria temporal. Por último, por simplicidad, se asumirá que no hay estacionalidad (lo que ocurre con caudales anuales o en zonas sin estaciones marcada a lo largo del año).

$$X_t = \phi X_{t-1} + \varepsilon_t \quad (1)$$

Los modelos AR(p) simulan series de tiempo con memoria temporal, es decir simulan la relación entre un valor y lo que ha ocurrido en instantes de tiempo anteriores (Casas y Mejía, 2017). En este trabajo se utilizará un modelo autorregresivo de orden 1 (AR1), lo que asume que existe memoria lineal por un solo instante de tiempo (siendo ϕ el parámetro de la memoria). El asumir un AR1 implica que el valor actual de la serie de tiempo (X_t) es una combinación lineal del valor previo (X_{t-1}) y un término de error (ε_t , que distribuye normal), expresado mediante la Ec. (1). En este caso, X corresponde al logaritmo natural de Q siendo Q el caudal; por lo tanto, el modelo AR(1) se aplica el dominio log-transformado, lo que asegura que los caudales simulados mantengan una distribución log-normal positiva. En este estudio se adoptó un valor de $\phi = 0.1$, lo que refleja que la memoria temporal en caudales anuales, la cual suele ser relativamente baja, razón por la cual no se consideró necesario simular escenarios con valores más altos de ϕ .

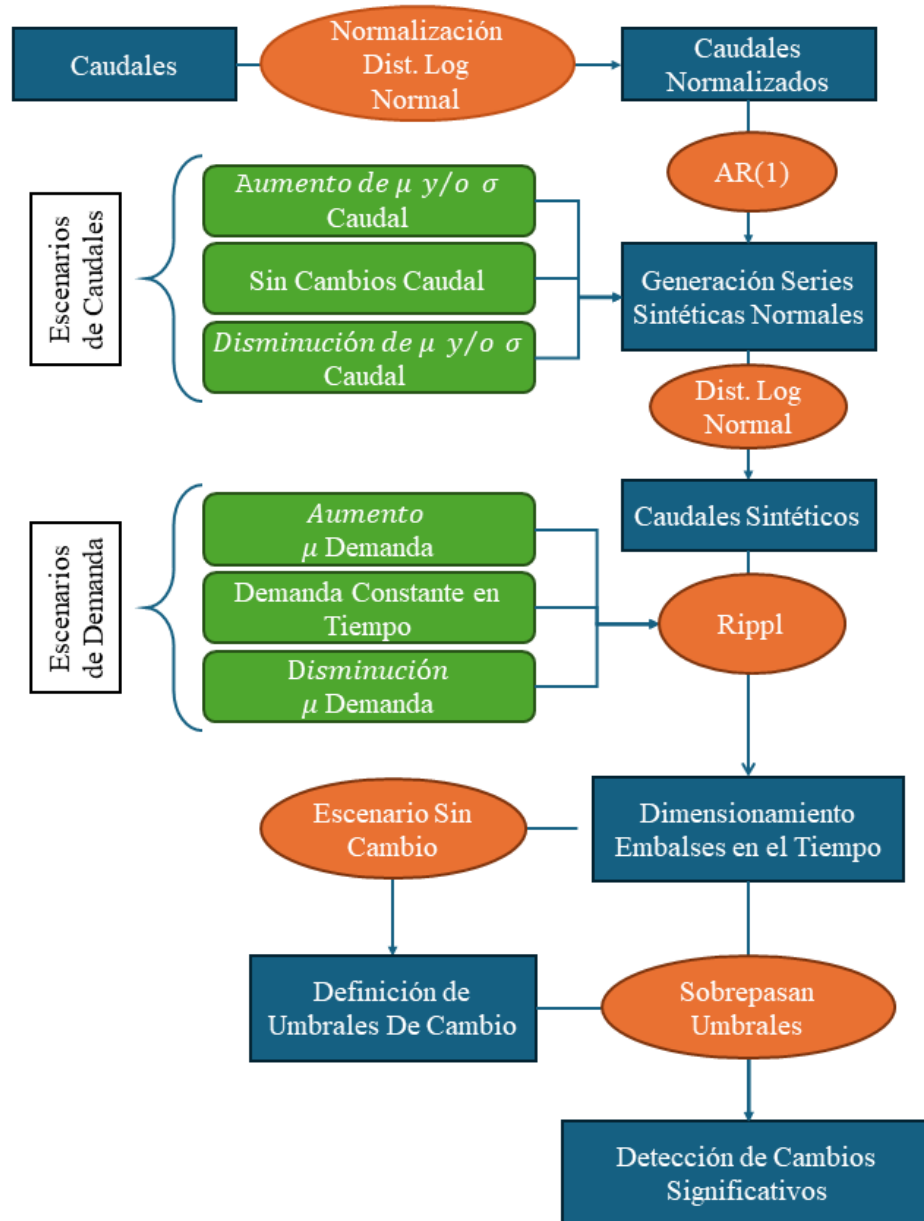


Figura 2. Esquema metodológica

Para poder analizar el comportamiento del dimensionamiento de embalses, en diversos escenarios cambiantes, se utilizarán los escenarios descritos en el esquema de la Figura 2. En particular, se analizan posibles cambios en la media y desviación estándar del caudal de entrada, así como cambios en la demanda o caudal de salida. Las combinaciones de estos cambios se muestran en la Figura 2, teniendo escenarios con demanda constante, o una demanda que presentará una variación lineal en el tiempo (en este resumen solo se presentarán los resultados del escenario con demanda variable). Para ambos escenarios se simularán 3 situaciones: primero un cambio lineal en la media del caudal de entrada, segundo un cambio lineal en la desviación estándar del caudal de entrada y tercero un cambio lineal en ambas (el mismo cambio en la media y desviación estándar del caudal de entrada) al mismo tiempo.

Todos los casos de la Figura 2 inician con una distribución log-normal con valores de caudales de entrada con medias de 1 [m³/s], una desviación estándar de 0,5 [m³/s] y una autocorrelación igual a 0,1 (notar que el parámetro ϕ de la Ec. (1) es igual a la autocorrelación). Estos parámetros son de referencia, se hacen diversos análisis de sensibilidad en la desviación estándar, para entender cómo estos parámetros afectan los resultados. Se analizarán 7 casos de variaciones en los caudales de entrada ya sea para cambio en la media o la desviación estándar, siendo el caso 1 una disminución del 4% por década, el caso 2 una disminución del 2% por década, el caso 3 una disminución del 1% por década, el caso 4 no presenta variación en el tiempo, el caso 5 un aumento del 1% por década, el caso 6 un aumento del 2% por década y el caso 7 un aumento del 4% por década. Cada simulación presentará 1000 series con 120 años en cada una, partiendo con 20 años sin cambios, seguido de un cambio lineal, con las tasas ya mencionadas durante los siguientes 100 años.

Para identificar cambios temporales en el dimensionamiento de embalses (Figura 2), se emplearán ventanas móviles de 20 años. Dado que se analizan 120 años en total (incluyendo los primeros 20 años estacionarios), se obtienen 101 ventanas de 20 años cada una. En cada una de estas ventanas, se aplicará el método de Rippl para calcular el dimensionamiento del embalse. Típicamente se consideran 30 años al minuto de evaluar un embalse, sin embargo, los primeros 20 años son los que más pesan en la evaluación económica, por lo que considerar ventanas de 20 años permite una detección temprana de cambios hidrológicos. En el escenario estacionario sin cambios, se determinan los umbrales de dimensionamiento asociados a los percentiles 99,5 y 0,5 (i.e., dado que son 1000 escenarios sintéticos esto corresponde a la serie cuyo dimensionamiento está en el percentil 99,5 o 0,5, lo que captura la incertidumbre natural), correspondientes a un nivel de significancia del 1%. Estos umbrales de referencia se aplican posteriormente a los escenarios con cambios para detectar el porcentaje de casos que exceden dichos límites. Si un escenario con cambios sobrepasa estos umbrales, se considera que ha ocurrido un cambio significativo. Finalmente, se representará el porcentaje anual de series que exceden estos umbrales, lo que permitirá observar el comportamiento de los diferentes escenarios y determinar en qué momento el 50% de estas 1000 series simuladas supera el umbral. Además, se calculará el tiempo de transición, definido por el tiempo que se tarda en sobrepasar el intervalo comprendido entre el percentil 20% y 80% como se puede observar en la Figura 3.

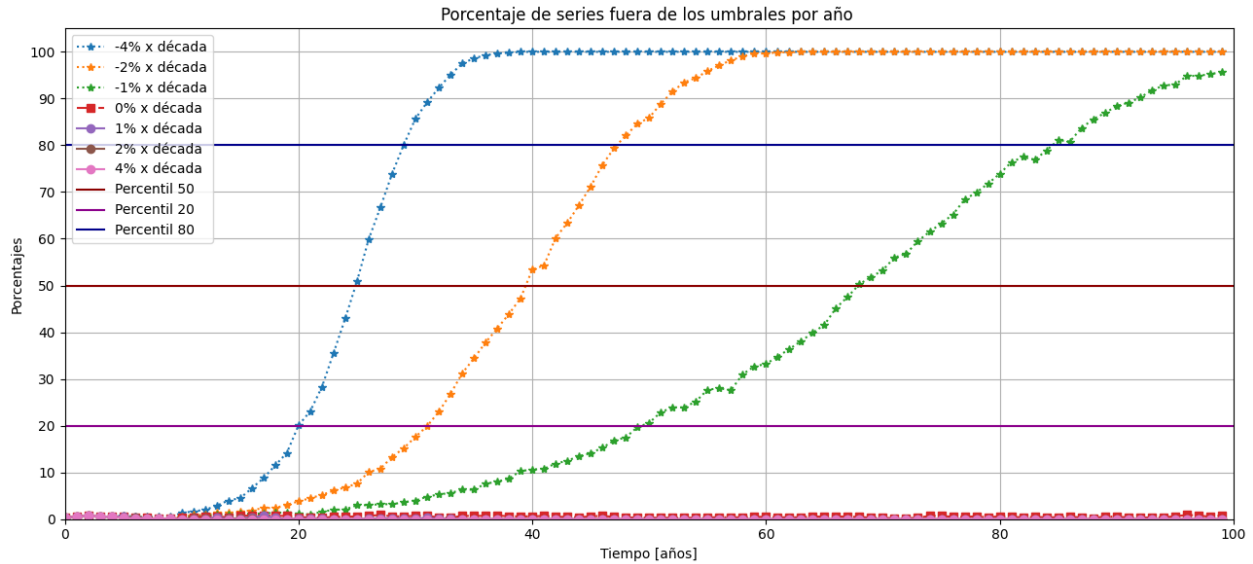


Figura 3. Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal de entrada y demanda constante (caso en amarillo de la Tabla 1).

3. RESULTADOS

La Tabla 1 muestra el resultado de las diversas simulaciones al realizar un análisis de sensibilidad de la demanda que va variando su valor a lo largo de la simulación, mientras que la Tabla 2 sensibiliza la desviación estándar. En ambas tablas los valores se presentan el año en que más del 50% de las series simuladas superan los umbrales definidos por los percentiles 99,5 y 0,5. Además, se presentan los tiempos de transición en paréntesis, donde se representa la cantidad de años en los que tarda cada caso en pasar del percentil 20 al percentil 80. Notar que una detección de por ejemplo 27 años para demanda constante y 4% de reducción del caudal de entrada por década (Tabla 1), quiere decir que la ventana que se ha detectado cambio está 27 años después de la inicial (i.e., considerando los 20 años estacionarios iniciales).

Los números de color rojo presentes entre paréntesis junto con el símbolo “↑” en las Tablas 1 y 2, indican los casos donde el dimensionamiento de embalses ha sido subdimensionado, lo que quiere decir que las series sobrepasan el umbral superior (percentil 99,5) y requerirá embalses de mayor tamaño. Mientras que el color azul junto con el símbolo “↓”, indica que los embalses podrían ser más pequeños, es decir, se sobrepasa el límite inferior (percentil 0,5).

Además, los números que presentan el signo “+” indican aquellos casos que sobrepasan el percentil 20 y 50, pero no se alcanzan el percentil 80, por lo tanto, se toma la diferencia entre el último año de simulación y el año en el cual se alcanza el percentil 20 como transición. En aquellas combinaciones que quedan vacías (-), se debe a que la serie no alcanza a llegar al percentil 50. Estas tablas presentan un valor constante en la desviación estándar y una demanda que tendrá una variación de un 1,5% o 3% por década en su valor, partiendo desde un valor base de 0,4 [m³/s].

Tabla 1: Detección de años para el cambio en dimensionamiento de embalses (en negro), con análisis de sensibilidad en la demanda (caso base en amarillo). Con las duraciones de los periodos de transición en años entre paréntesis (color rojo indica aumento de tamaño de embalse, mientras que el azul es disminución).

		Cambios del caudal de entrada en el tiempo						
		Valor Desv. Estándar	Valor Demanda	-4% por década	-2% por década	-1% por década	1% por década	2% por década
Análisis Sensibilidad de Demanda	Cambio lineal en MU	SIGMA X = 0,5 Demanda 3% por década	44 (5) ↑	61 (9) ↑	79 (12) ↑	-	-	-
		SIGMA X = 0,5 Demanda 1,5% por década	35 (6) ↑	51 (12) ↑	73 (17) ↑	-	-	-
		SIGMA X = 0,5 Demanda constante	27 (9) ↑	42 (17) ↑	72 (36) ↑	-	-	-
		SIGMA X = 0,5 Demanda -1,5% por década	27 (12) ↑	52 (30) ↑	-	-	-	-
		SIGMA X = 0,5 Demanda -3% por década	30 (17) ↑	-	-	-	-	-
	Cambio lineal en SIGMA	SIGMA X = 0,5 Demanda 3% por década	-	-	-	97 (+12) ↑	81 (14) ↑	64 (10) ↑
		SIGMA X = 0,5 Demanda 1,5% por década	-	-	-	98 (+18) ↑	76 (20) ↑	54 (15) ↑
		SIGMA X = 0,5 Demanda constante	-	-	-	-	78 (42) ↑	45 (21) ↑
		SIGMA X = 0,5 Demanda -1,5% por década	-	-	-	-	-	63 (49) ↑
		SIGMA X = 0,5 Demanda -3% por década	-	-	-	-	-	-
	Cambio lineal en MU y SIGMA	SIGMA X = 0,5 Demanda 3% por década	59 (8) ↑	78 (11) ↑	94 (+15) ↑	-	-	-
		SIGMA X = 0,5 Demanda 1,5% por década	49 (10) ↑	71 (16) ↑	95 (+20) ↑	-	-	-
		SIGMA X = 0,5 Demanda constante	40 (16) ↑	69 (31) ↑	-	-	-	-
		SIGMA X = 0,5 Demanda -1,5% por década	49 (25) ↑	-	-	-	-	-
		SIGMA X = 0,5 Demanda -3% por década	-	-	-	-	-	-

Tabla 2: Detección de años para el cambio en dimensionamiento de embalses (en negro), con análisis de sensibilidad en la desviación estándar (caso base en amarillo). Con la duración en años de los periodos de transición entre paréntesis (color rojo indica aumento de tamaño de embalse, mientras que el azul es disminución).

		Cambios del caudal de entrada en el tiempo							
		Valor Desv. Estándar	Valor Demanda	-4% por década	-2% por década	-1% por década	1% por década	2% por década	4% por década
Análisis Sensibilidad de Sigma	Cambio lineal en MU	SIGMA X = 0,7	Demanda 1,5% por década	39 (7) ↑	55 (13) ↑	77 (18) ↑	-	52 (37) ↓	26 (14) ↓
		SIGMA X = 0,7	Demanda constante	28 (10) ↑	44 (18) ↑	76 (37) ↑	64 (41) ↓	38 (21) ↓	25 (10) ↓
		SIGMA X = 0,7	Demanda -1,5% por década	28 (14) ↑	62 (39) ↑	-	74 (23) ↓	54 (15) ↓	37 (10) ↓
		SIGMA X = 0,5	Demanda 1,5% por década	35 (6) ↑	51 (12) ↑	73 (17) ↑	-	-	-
		SIGMA X = 0,5	Demanda constante	27 (9) ↑	42 (17) ↑	72 (36) ↑	-	-	-
		SIGMA X = 0,5	Demanda -1,5% por década	27 (12) ↑	52 (30) ↑	-	-	-	-
		SIGMA X = 0,3	Demanda 1,5% por década	54 (7) ↑	83 (14) ↑	-	-	-	-
		SIGMA X = 0,3	Demanda constante	61 (10) ↑	-	-	-	-	-
		SIGMA X = 0,3	Demanda -1,5% por década	71 (12) ↑	-	-	-	-	-
	Cambio lineal en SIGMA	SIGMA X = 0,7	Demanda 1,5% por década	42 (25) ↓	-	-	98 (+16) ↑	77 (18) ↑	56 (14) ↑
		SIGMA X = 0,7	Demanda constante	35 (17) ↓	58 (32) ↓	-	-	74 (42) ↑	43 (20) ↑
		SIGMA X = 0,7	Demanda -1,5% por década	49 (12) ↓	70 (19) ↓	91 (+21) ↓	-	-	65 (57) ↑
		SIGMA X = 0,5	Demanda 1,5% por década	-	-	-	98 (+17) ↑	76 (20) ↑	54 (15) ↑
		SIGMA X = 0,5	Demanda constante	-	-	-	-	78 (42) ↑	45 (21) ↑
		SIGMA X = 0,5	Demanda -1,5% por década	-	-	-	-	-	63 (49) ↑
		SIGMA X = 0,3	Demanda 1,5% por década	-	-	-	-	-	-
		SIGMA X = 0,3	Demanda constante	-	-	-	-	-	-
		SIGMA X = 0,3	Demanda -1,5% por década	-	-	-	-	-	-
	Cambio lineal en MU y SIGMA	SIGMA X = 0,7	Demanda 1,5% por década	57 (12) ↑	79 (17) ↑	-	-	-	63 (54) ↓
		SIGMA X = 0,7	Demanda constante	46 (18) ↑	79 (36) ↑	-	-	72 (46) ↓	42 (25) ↓
		SIGMA X = 0,7	Demanda -1,5% por década	68 (37) ↑	-	-	99 (+16) ↓	79 (24) ↓	57 (17) ↓
		SIGMA X = 0,5	Demanda 1,5% por década	49 (10) ↑	71 (16) ↑	95 (+19) ↑	-	-	-
		SIGMA X = 0,5	Demanda constante	40 (16) ↑	69 (31) ↑	-	-	-	-
		SIGMA X = 0,5	Demanda -1,5% por década	49 (25) ↑	-	-	-	-	-
SIGMA X = 0,3		Demanda 1,5% por década	72 (8) ↑	-	-	-	-	-	
SIGMA X = 0,3		Demanda constante	86 (11) ↑	-	-	-	-	-	
SIGMA X = 0,3		Demanda -1,5% por década	-	-	-	-	-	-	

Una disminución en el promedio del caudal de entrada (Tabla 1 y 2), generan un aumento en el dimensionamiento de embalses, mientras que un aumento en la desviación estándar del caudal de entrada también genera un aumento en el dimensionamiento de embalses. A su vez, cuando se analiza un aumento del promedio y de la desviación estándar en el caudal de entrada, el cambio que predomina es el del promedio, por lo que una disminución en ambos cambios genera un aumento en el tamaño de embalses dimensionados.

Al analizar cambios lineales en la demanda (Tabla 1), se observa que un aumento del 1,5% y 3% por década retrasa el tiempo en el que el dimensionamiento de embalses tiene un cambio. Por ejemplo, en el caso con una disminución del 4% por década en el valor de la media del caudal, un aumento de 3% por década de la demanda genera un retraso de 17 años. Mientras que para la disminución del 1% por década, el retraso es menor (7 años). Curiosamente, una disminución en la demanda también genera un retraso, aunque menor en el tiempo de cambio. Además, los tiempos de transición muestran que las reducciones en la disponibilidad de agua generan una necesidad de embalses más grandes (color rojo), con transiciones más rápidas. En cuanto a la desviación estándar del caudal de entrada (Tabla 2), un sigma inicial menor tiende a retrasar la detección de cambio. Finalmente, los resultados de la Tabla 2 indican que, en escenarios con disminuciones por década en la media del caudal, se requieren embalses más grandes, mientras que aumentos en la demanda reducen los tiempos de transición, a diferencia de los aumentos en la media del caudal, que los extienden.

Aumentos en la desviación estándar, de los caudales de entrada, provocan cambios significativos, siendo más pronunciados con aumentos del 2% y 4% por década, aunque el impacto se posterga al aumentar la demanda (Tabla 1). Sin embargo, una disminución en la desviación estándar del caudal de entrada no genera cambios significativos en el dimensionamiento de embalses (Tabla 1), ni siquiera para variaciones en la demanda de 1,5% o 3% por década. En términos de transición en la Tabla 1, un aumento en la desviación estándar genera la necesidad de embalses más grandes. Además, una disminución por década en la demanda aumenta los periodos de transición, mientras que un aumento en la demanda reduce dichos periodos. En los escenarios con variaciones simultáneas en demanda y desviación estándar (Tabla 2), un sigma inicial menor retrasa la detección de cambios significativos. Finalmente, en los resultados de la Tabla 2, un aumento en la desviación estándar y la demanda incrementa los periodos de transición. Es relevante destacar que aumentos en la desviación estándar requieren embalses más grandes, en contraste con aumentos en la media del caudal de entrada, que tienden a requerir embalses más pequeños.

Un aumento de la demanda de agua de 1,5% y 3% por década retrasa la detección de cambios significativos en el dimensionamiento de embalses, fenómeno que es más relevante, con una mayor disminución de la media y desviación estándar del caudal (Tabla 1). Este efecto es más notorio en el período de transición en la Tabla 1, donde un aumento en la demanda acorta los años de transición. En la Tabla 2 principalmente se destaca que al tener cambios en la media y desviación estándar del caudal de entrada, lo que predomina es el cambio en la media del caudal. Este análisis destaca cómo la demanda y las condiciones climáticas influyen en el diseño de embalses, proporcionando herramientas relevantes para futuras decisiones de dimensionamiento.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo, se analizó el impacto del cambio climático en el dimensionamiento de embalses mediante el método de Rippl, utilizando escenarios con variaciones en los caudales de entrada y la demanda. Se generaron series sintéticas que simulan cambios en la media y desviación estándar de los caudales para evaluar cómo estos afectan el tamaño ideal de los embalses, analizar en cuánto tiempo ocurren cambios significativos y los períodos de transición. Los resultados muestran que una disminución en la media del caudal adelanta la necesidad de aumentar la capacidad de los embalses, mientras que un aumento en la desviación estándar, genera un aumento en la necesidad o tamaño de embalses. Cuando ambos momentos (media y desviación estándar) cambian simultáneamente, el impacto de la media predomina.

La investigación sugiere que los embalses del futuro deberán ser más grandes para adaptarse a los nuevos escenarios hídricos en Chile (de menor caudal proyectado). Además, el uso de hidrología reciente y la reevaluación periódica del diseño de los embalses se destacan como estrategias de adaptación clave. Por ejemplo, una disminución del -4% por década en la media del caudal de entrada genera cambios significativos en 26 años, mientras que una tasa de -1% por década retrasa esta detección más de cuatro décadas. Los escenarios de demanda variable presentan desafíos adicionales, con diferencias significativas en los períodos de transición. Por lo que uno podría diseñar un embalse y fijar una ventana de re-evaluación, por ejemplo, una vez por década. En el caso de Chile, las proyecciones de cambio climático indican una reducción sostenida de los caudales en la zona centro y centro-sur, con disminuciones del orden del 20% al 30% hacia mediados del siglo XXI, lo que concuerda con los escenarios de reducción de caudal evaluados en este trabajo. Estos resultados sugieren que los embalses futuros en dichas regiones deberían considerar diseños con mayor capacidad de almacenamiento, lo que permitiría mantener su funcionamiento frente a sequías prolongadas y cambios en el régimen hidrológico.

Por lo tanto, los resultados que se han obtenido sugieren que los embalses del futuro necesitarán un tamaño mayor para hacer frente a los efectos negativos del cambio climático, en zonas de disminución de caudales.

- Al disminuir el valor de la media del caudal de entrada, se adelanta el momento en el cual se verán afectados los embalses y deberán aumentar su tamaño tanto para el escenario de demanda constante, como variable.
- Al aumentar la desviación estándar del caudal de entrada se adelanta el momento en que se verán afectados los embalses y una mayor variabilidad genera la necesidad de embalses de mayor tamaño. Un aumento en la tasa de cambio de la desviación estándar disminuye los periodos de transición.
- Para todos los escenarios de demanda constante y una reducción en los caudales de entrada el pasar de una tasa de un -4% por década a una de un -2% por década, permite retrasar la reducción de cambio en al menos 15 años. Si esta tasa se reduce a un -1% por década, la detección se atrasa hasta 4 décadas o más en la mayoría de los escenarios. Esto destaca la importancia de implementar medidas de mitigación, las cuales permitirían reducir el impacto del cambio climático sobre los caudales.

- La detección más temprana de cambios significativos se detecta entre los 24 y 26 años, dependiendo del caso analizado. Dado que la infraestructura, como embalses, se evalúa a 30 años, el usar hidrología reciente parece un camino adecuado de adaptación al cambio climático. Es importante al diseñar un embalse con la hidrología existente reevaluar el diseño cada cierto periodo de tiempo para adaptar los objetivos de esta a una hidrología cambiante.
- En algunos casos, los cambios pueden detectarse en el mismo año, sin embargo, el período de transición puede variar. Esto podría reducir el tiempo de reacción disponible para responder a los cambios provocados por el cambio climático.
- Cuando hay una disminución en la media y desviación estándar del caudal de entrada de manera simultánea, los cambios sobre el valor de la media del caudal son dominantes, tanto con demanda constante como variable. Esto conlleva requerir embalses más grandes cuando se presentan disminuciones en ambos momentos del caudal.
- Reducciones en la media del caudal incluso moderadas (-2%/déc) pueden gatillar detección de cambios 40-70 años, con transiciones de 17-36 años.

Esta investigación resalta la necesidad de explorar métodos más avanzados, como simulaciones de embalses o el algoritmo de sucesión de peaks, que permitan integrar variables climáticas adicionales y realizar un análisis más completo y realista. Asimismo, futuros estudios deberían considerar escenarios que combinen aumentos en la media del caudal con disminuciones en la desviación estándar y viceversa, además de evaluar los resultados en contextos específicos como Chile u otras regiones.

Los hallazgos de este trabajo demuestran que el cambio climático tendrá un impacto significativo en el dimensionamiento de embalses, evidenciando la urgencia de desarrollar estrategias de adaptación para enfrentar las nuevas condiciones hídricas. La evaluación de escenarios climáticos mediante modelos como el de Rippl permitió identificar patrones de cambio y proponer ajustes al dimensionamiento de la infraestructura y funcionamiento, destacando la importancia de contar con embalses más adaptables y flexibles. Además, este estudio sienta las bases para investigaciones futuras que incorporen metodologías más complejas, optimicen la gestión de los recursos hídricos e integren la estacionalidad en los cálculos, asegurando así una operación más eficiente y flexible ante un contexto de cambio y variabilidad climática. Resultando fundamental considerar con mayor detalle el efecto de la evaporación, ya que este proceso podría adquirir una mayor importancia en un escenario de temperaturas crecientes debido al cambio climático, condicionando la capacidad de los embalses.

AGRADECIMIENTOS

Se expresa un especial agradecimiento al proyecto FONDECYT de Iniciación 11220952 por su apoyo. Se agradece también al FONDECYT 1241163, FONDAP 1523A0004 y 1523A0009. Se agradece al Proyecto Puente FONDECYT 2025 de la UAI.

REFERENCIAS

- Armengol, J., Rodríguez, J. J., García, J. C., Ordóñez, J., & Marcé, R. (2009). La gestión de los embalses en relación a la calidad del agua en condiciones de sequía extrema. *Ingeniería del agua*, 16(4), 285-294.
- Casado, A. L., & Gil, V. (2006). Consecuencias de la variación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del arroyo El Belisario, Buenos Aires, Argentina.
- CEPAL (2012). Análisis de la vulnerabilidad del sector hidroeléctrico frente a escenarios futuros de cambio climático en Chile. Disponible en: <http://repositorio.cepal.org/handle/11362/5687>
- Chadwick, C., Gironás, J., González-Leiva, F., & Aedo, S. (2023). Bias adjustment to preserve changes in variability: the unbiased mapping of GCM changes. *Hydrological Sciences Journal*, 1-18. <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2201450>
- Dey, P., & Mishra, A. (2017). Separating the impacts of climate change and human activities on streamflow: A review of methodologies and critical assumptions. *Journal of Hydrology*, 548, 278-290.
- Gómez-Limón, J. A. (2009). Implicaciones de la nueva planificación hidrológica para la agricultura de regadío. Gómez-Limón, JA; Garrido, A.; Calatrava, J, 22-53. https://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_documento/documentacion/documentos/economia_riegos.pdf#page=33
- Huang, L., Zhou, M., Lv, J., & Chen, K. (2020). Trends in global research in forest carbon sequestration: A bibliometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119908.
- Mianabadi, A., Davary, K., Pourreza-Bilondi, M., & Coenders-Gerrits, A. M. J. (2020). Budyko framework; towards non-steady state conditions. *Journal of Hydrology*, 588, 125089.
- Pokhrel, Y., Felfelani, F., Satoh, Y., Boulange, J., Burek, P., Gädeke, A., ... & Wada, Y. (2021). Global terrestrial water storage and drought severity under climate change. *Nature Climate Change*, 11(3), 226-233.
- Satriani, S., Lopa, R., & Maricar, F. (2021, March). Storage capacity analysis of Nipa Nipa regulation pond using Ripple method. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1098, No. 2, p. 022054). IOP Publishing.
- Schlef, K. E., Kunkel, K. E., Brown, C., Demissie, Y., Lettenmaier, D. P., Wagner, A., ... & Yan, E. (2022). Incorporating Non-Stationarity from Climate Change into Rainfall Frequency and Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves. *Journal of Hydrology*, 128757.
- Shiklomanov, I. A. (1991). The world's water resources. In *Proceedings of the international symposium to commemorate* (Vol. 25, pp. 93-126). Paris, France: Unesco.
- Skertchly Molina, L. (1989). Métodos para calcular capacidades de embalse. http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1246/RIH_050.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Turner, S. W., Doering, K., & Voisin, N. (2020). Data-driven reservoir simulation in a large-scale hydrological and water resource model. *Water Resources Research*, 56(10), e2020WR027902.
- UN Water (2020). Water Scarcity. Recuperado de <https://www.unwater.org/water-facts/scarcity/>
- Velasco, Israel, Ochoa, Leonel, & Gutiérrez, Carlos. (2005). Sequía, un problema de perspectiva y gestión. *Región y sociedad*, 17(34), 35-71. Recuperado en 13 de marzo de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-39252005000300002&lng=es&tlng

Vicuña, S., McPhee, J., & Garreaud, R. D. (2012). Agriculture vulnerability to climate change in a snowmelt-driven basin in semiarid Chile. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(5), 431-441.