

ALGUNAS REFLEXIONES SOBRE LA INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL EN EL DISEÑO DE ALVIADEROS DE GRANDES PRESAS ARGENTINAS

RAFAEL SEDANE Y RAÚL A. LOPARDO



ALGUNAS REFLEXIONES SOBRE LA INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL EN EL DISEÑO DE ALIVIADEROS DE GRANDES PRESAS

RAFAEL SEOANE ⁽¹⁾ Y RAÚL A. LOPARDO ⁽²⁾

⁽¹⁾ CENTRO DE ESTUDIOS TRANSDISCIPLINARIOS DEL AGUA (CETA). FACULTAD DE CIENCIAS VETERINARIAS. UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

⁽²⁾ DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA, FACULTAD DE INGENIERÍA. UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático global puede afectar de varias formas el proceso de generación del caudal que escurre en una cuenca. La cantidad de precipitación, particularmente la precipitación intensa, influye en la magnitud de los caudales máximos de los cursos de agua que incrementará la vulnerabilidad de las poblaciones.

En Hidrología, una pregunta importante se relaciona con los efectos del calentamiento y la posible intensificación del ciclo del agua y, de ser así, la naturaleza y características de ese proceso sobre los caudales. La intensificación del ciclo del agua puede conducir a cambios en la disponibilidad de recursos hídricos, un aumento en la frecuencia e intensidad de las tormentas, inundaciones y sequías, y una amplificación del calentamiento a través de la retroalimentación del vapor de agua (Huntington, 2006) y (Koutsoyiannis, 2020).

Este trabajo tiene como objetivo presentar el problema que describen las nuevas investigaciones realizadas con los modelos de cambio climático y mostrar su utilidad para evaluar los riesgos de los aliviaderos en el presente y en un futuro cercano. , en particular para la Argentina, aunque puede resultar de utilidad para otros países.

El interés de este tema está vinculado con los resultados de un análisis realizado que muestran que la mayoría de los embalses en Argentina se clasifican como grandes presas y ya alcanzaron una media desde su construcción de algo superior a los 50 años, existiendo veintiocho embalses con 68 años. Este resultado muestra que numerosas obras en el país se han calculado a partir de datos hidrológicos, modelos y métodos desarrollados antes de los años setenta. El análisis de la antigüedad de las presas de embalse debe considerarse como un aspecto de mucha importancia, debido entre otras cosas, a que resulta sustantivo para poder evaluar los riesgos de los pobladores que se han asentado aguas abajo de los embalses y se han acostumbrado a un control de los caudales que podrían generar una falsa sensación de seguridad.

Tomando el caso de las metodologías es posible advertir que a partir de esa década se han observado importantes avances en la tecnología de estimación en la meteorología, la climatología, la hidrología y la probabilidad y estadística, que obviamente no fueron aplicadas en la época de proyecto y construcción de las obras actuales.

Una hipótesis básica de las estimaciones de los caudales de diseño utilizados en las obras y en los cálculos ha sido considerar que los procesos hidrológicos son estacionarios. Sin embargo, es fuertemente probable que las alteraciones proyectadas debido al cambio climático afecten a diferentes factores que incrementen el riesgo de sobrepaso de los aliviaderos de las presas. Es de destacar que más del 50% de las fallas de presas en el mundo han sido debidas al sobrepaso, asociado a grandes crecidas (Malinow, 1991). Distintas instituciones ya han desarrollado recomendaciones para incorporar modelos no estacionarios y el cambio climático global en las evaluaciones de seguridad de embalses.

La presencia de cambios de una serie temporal en sus momentos estadísticos (por ejemplo, media y varianza), definen un problema de identificación complejo, relacionado con los procesos no estacionarios. En el caso de las series de caudales máximos esta situación hace pensar que se deberían verificar las crecidas de diseño, que fueron calculadas con series reducidas y con metodologías superadas, y aplicarse nuevos métodos de estimación que incorporen los resultados de los modelos del cambio climático global. Los estudios hidrológicos actuales proponen metodologías para incorporar los cambios estimados con modelos climáticos en la estimación de la crecida máxima probable (CMP) y definir la capacidad de los aliviaderos para evacuar las crecidas extremas.

Además de su utilización para controlar las crecidas máximas, otra función positiva de las presas de embalse ante el cambio climático global estará vinculada a los casos de una posible disminución de las precipitaciones que impliquen una mayor cantidad de valores de caudales mínimos, aún menores que los calculados en la actualidad con los datos históricos.

Para esa eventualidad, las presas podrían mantener la capacidad de almacenar agua en tiempos de excesos y paliar los efectos de las dramáticas sequías que se pronostican con extremos de caudales mínimos en

zonas áridas. Este efecto debe ser considerado para el mantenimiento y cuidado de los embalses, en particular por la sedimentación de los mismos, que se ha incrementado en muchas zonas por los efectos antrópicos como la deforestación y el cambio de los usos del suelo.

Los procesos no estacionarios en una cuenca también incluyen además de las características mencionadas en el párrafo anterior las poblaciones que se ven afectadas por los cambios. Por lo tanto, una idea que debe ser considerada es que las condiciones no estacionarias incluyen los cambios del suelo, la sedimentación y poblaciones que se acercan a las áreas más seguras y que podrían verse afectadas por las nuevas condiciones del clima distintas a las originales.

Lo expuesto implica la importancia del seguimiento de las grandes obras que incluya su revisión, pero que además tenga en cuenta los nuevos desarrollos en climatología, meteorología, hidrología y estadística.

MARCO TEÓRICO

Las presas de embalse son infraestructuras críticas cuyo riesgo asociado debe ser adecuadamente gestionado en un proceso continuo y con nuevos datos y modelos actualizados. En forma general y por el análisis de la antigüedad de las obras se puede afirmar que, por lo general, los diseños realizados en Argentina se han realizado con la hipótesis de que las condiciones climáticas e hidrológicas se mantienen estacionarias.

Es probable que las alteraciones proyectadas debido al cambio climático afecten a diferentes factores asociados al riesgo de los embalses. En los últimos años se han desarrollado guías para incluir al cambio climático en las estrategias de apoyo a la toma de decisiones. Publicaciones recientes (Fluixá-Sanmartín et al., 2018) indican que las evaluaciones de seguridad siguen siendo un desafío a partir que aun los métodos no tienen una aceptación generalizada por la comunidad técnica.

Los nuevos modelos de cambio climático, en escala regional, RCM (Regional Climate Model), permiten una mayor precisión en las estimaciones de las principales variables del sistema hidrometeorológico, que son la entrada a los modelos hidrológicos de transformación entre precipitación y caudal en escala de cuenca. Los avances en la modelación del sistema climático han llevado a desarrollar nuevos modelos de circulación general, que, asociados con los regionales, permiten describir las variables del sistema que se simula en una cuenca.

Los modelos hidrológicos utilizan las estimaciones de distintas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, Representative Concentration Pathways). Las cuatro trayectorias de concentraciones de gases de efecto invernadero son: RCP2.6, RCP4.5, RCP6 y RP8.5, que llevan la denominación para el año 2100 (2,6, 4,5, 6,0, y 8,5 W m/2). La trayectoria RCP2.6 es la más optimista en el sentido que supone que las concentraciones de Gases Efecto Invernadero (GEI) alcanzan su punto máximo entre 2010 y 2020 y luego disminuye. La trayectoria RCP8.5 considera un incremento sostenido para fines del siglo XXI y representa al escenario más desfavorable posible en términos de emisiones.

Boulange, et al. (2021) aplican una combinación de modelos para describir el efecto de los embalses en la mitigación de inundaciones y en la regulación del caudal. Si no se considerara la regulación del caudal el número promedio de personas expuestas a inundaciones, ubicadas aguas abajo de los embalses, se estima entre 9,1 y 15,3 millones por año, para fines del siglo XXI, con los escenarios RCP2.6 y RCP6.0. La inclusión de los embalses puede reducir el número de personas expuestas a inundaciones en un 20,6 % y en un 12,9 % (para RCP2.6 y RCP6.0).

Los modelos hidrológicos definen las estimaciones para distintas Trayectorias de Concentración Representativas, Representative Concentration Pathways (RCP), por sus siglas en inglés). Así, las cuatro trayec-

torias: RCP2.6, RCP4.5, RCP6 y RP8.5, llevan la denominación de sus forzamientos para el año 2100 (+2,6, +4,5, +6,0, y +8,5 W m/2). La trayectoria RCP2.6 es el más optimista en el sentido de que supone que las concentraciones de Gases Efecto Invernadero (GEI) alcanzan su punto máximo entre 2010 y 2020 y luego disminuye. La trayectoria RCP8.5 es más pesimista ya que supone que las concentraciones de GEI continuarán aumentando a lo largo del siglo XXI.

Boulange et al., (2021), aplican una combinación de modelos para describir el efecto de los embalses en la mitigación de inundaciones y señalan no considerar el efecto de la regulación de caudal. El número promedio de personas expuestas a inundaciones ascenderá a una cifra entre 9,1 y 15,3 millones por año, para fines del siglo XXI (manteniendo la población constante), para dos escenarios de concentración. La inclusión de los embalses puede reducir el número de personas expuestas a inundaciones en un 20,6 % y en un 12,9 % (para RCP2.6 y RCP6.0, respectivamente).

En la figura N° 1, muestra los cambios proyectados en la frecuencia de ocurrencia de caudales máximos para un periodo de un retorno de 100 años y considerando distintos escenarios del cambio climático.

Los resultados mencionados muestran cambios para importantes zonas de la Argentina como el Litoral y la Patagonia, donde están ubicadas grandes obras de generación hidroeléctricas (Yacretá, Salto Grande, El Chocón, Alicura, Piedra del Águila y Pichi Picún Leufú).

A partir de estas ideas, el presente trabajo centra su atención en los riesgos de los aliviaderos de las presas asociados con las nuevas condiciones del clima y los cambios en las tecnologías de cálculo de los parámetros de diseño. Este análisis de algunos de los aspectos del problema para las obras puede ser útil a otros países con condiciones semejantes de desarrollo tecnológico y condiciones socioeconómicas.

Además, los efectos del cambio climático

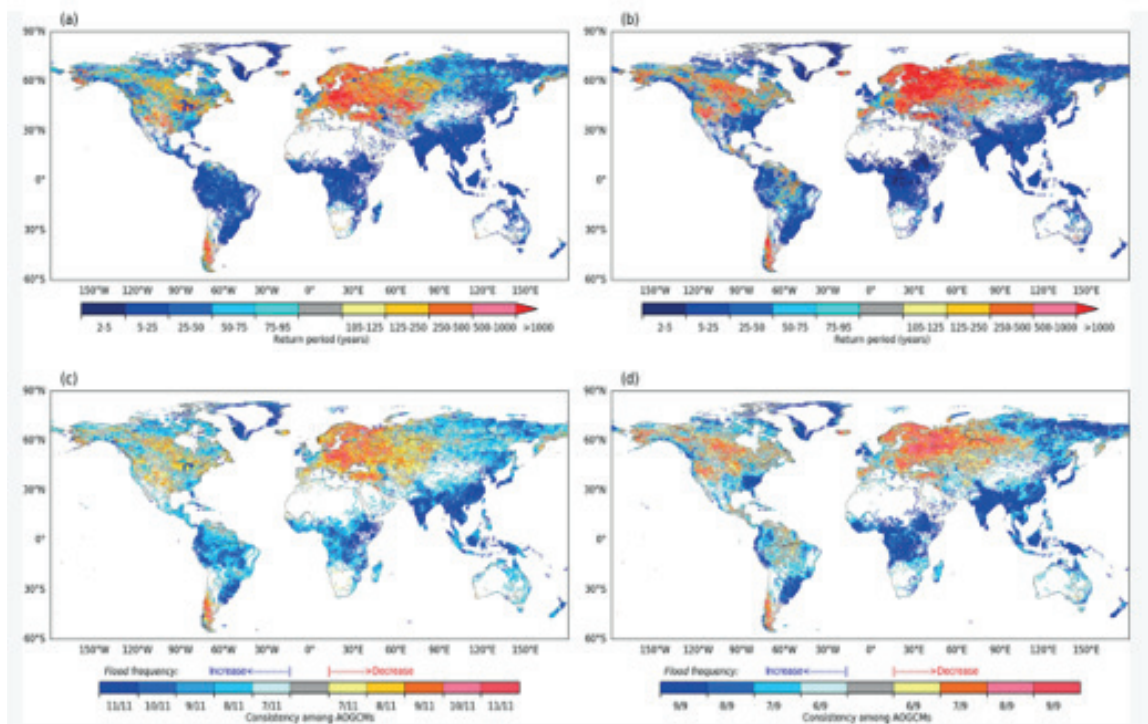


Figura 1. Cambios en las frecuencias de ocurrencia de los caudales para distintos escenarios de cambio climático. Fuente: Hirabayashi et al. (2021).

ya están ocurriendo en Argentina, tal como lo indican estudios de orden internacional y nacional. Existe una importante bibliografía en el tema, (IPCC, 2021) que señala cambios en distintas zonas de América del Sur.

ALIVIADEROS

Las obras hidráulicas se diseñan y construyen para aprovechar con diversos propósitos las corrientes de cursos de agua y ellas deben necesariamente disponer de estructuras que permitan evacuar los caudales excedentes en las mejores condiciones posibles. El aliviadero es fundamentalmente responsable de asegurar que el pasaje de las crecidas no produzca el sobrepaso de la obra de retención, con lo que se transforma en el elemento de seguridad de todas las estructuras componentes.

"Pesados como paquidermos o altivos como águilas, los evacuadores de crecidas están allí, en el acceso a la garganta de un río o en la desembocadura de un extenso espejo de embalse, a la vez guardabarreras y gen-

darmes de la circulación hidráulica. Para la mayor parte de ellos, su vida es desesperadamente vacía y aparentemente inútil. Como esfinges bajo el sol, sus grandes cuerpos pesados preguntan al destino sobre la estadística de los extremos. Luego, un buen día, o más bien una mala noche, todo se explica; luchan contra Niágaras, abrazan ríos de lodo, son golpeados por grandes árboles desgarrados que aferran sus pies en la roca o el hormigón, y son violentamente desgastados por la furia de las aguas" (Gruat, Thirriot y Trivellato, 1983).

El aliviadero tiene entonces por misión básica derivar y transportar el agua sobrante del embalse y amortiguar su energía al reintegrarla al cauce para evitar perjuicios a la propia presa y a los bienes y personas de aguas abajo. La necesidad del aliviadero da un carácter esencialmente hidráulico al diseño de la presa, que de otra forma hubiera quedado reducida a una pura estructura resistente. Las obras de alivio, con sus exigencias funcionales y espaciales, influyen y hasta condicionan la estructura resistente, motivando

en ocasiones la elección de su tipología (Vallarino, 1998).

En términos generales, un aliviadero sirve para uno o más de los tres propósitos principales siguientes: dar seguridad contra el sobrepaso de la presa, limitar la sobrecarga del embalse durante las crecidas menos severas que la de diseño y permitir la regulación del almacenamiento del embalse.

Para el caso de vertederos de perfil normal el caudal de diseño erogado resulta directamente proporcional a la longitud efectiva de vertimiento y en relación a la potencia $3/2$ de la carga hidráulica sobre la cresta.

De acuerdo con la expresión de cálculo el caudal máximo Q_{max} que eroga un vertedero para alivio de crecidas, dada una carga hidráulica máxima H_{max} , que de ser superada produciría el sobrepaso de la obra y su casi segura falla. La única solución previa en caso de que por las razones hidrológicas y climáticas antes tratadas se estimara un caudal mayor, debería ser aumentar la longitud "L" del vertedero. Ello podría ser posible mediante una obra auxiliar, un vertedero fusible u otro medio de descarga de excedentes. Para tener en consideración un incremento de longitud de vertimiento en cauces angostos, se han desarrollado proyectos de aliviaderos novedosos, que tratan de resolver ese aspecto con formas especiales, por ejemplo, los vertederos en laberinto o los denominados "piano key weirs" (Schlösser A.J., 2011), (Hosseini et al., 2016).

ANTIGÜEDAD DE LAS PRESAS

El problema de la antigüedad de los embalses relaciona la obsolescencia de las tecnologías de diseño y construcción con la variabilidad climática natural y el cambio climático global. Por otra parte, los cálculos muestran que las obras se diseñaron y construyeron en una época que los caudales utilizados estaban asociados a otras condiciones hidrológicas.

La necesaria tarea de la revisión de las obras, está relacionada con el proceso de envejeci-

miento natural que afecta, en forma diferenciada, las distintas componentes de una presa y su embalse. También, se debe señalar la importancia de las inversiones necesarias para resolver los problemas y disminuir el riesgo de falla de estas obras, que pueden afectar severamente a la población.

La mayoría de las 58.700 grandes presas en todo el mundo se construyeron entre 1930 y 1970 con una vida útil de diseño de 50 a 100 años. Si bien a los 50 años una gran presa de hormigón probablemente pueda comenzar a mostrar signos de envejecimiento, debe destacarse que las presas que estén bien diseñadas, construidas y mantenidas pueden alcanzar fácilmente los cien años de servicio. Los signos de envejecimiento incluyen el aumento de los casos de fallas, el aumento progresivo de los costos de reparación y mantenimiento de las presas, el aumento de la sedimentación de los embalses y la pérdida de la funcionalidad y eficacia de la obra, manifestaciones fuertemente interconectadas. Como ejemplo, se cita la destrucción de las presas de Edenville y Stanford en Estados Unidos. La primera, de 16 m de altura, fue construida el año en 1924 en la confluencia de los ríos Tittabawassee y Tobacco en Michigan, con los objetivos de generar energía hidroeléctrica y servir al control de inundaciones. La estructura falló en mayo del año 2020, luego de la ocurrencia de fuertes precipitaciones. Se recuerda (Malinow, 1991), que la mayor cantidad de fallas de presas en el mundo se debe a un sobrepaso de las mismas por una creciente de aguas arriba que supera la calculada en el diseño de la obra. La presa de Edenville era una presa de tierra con aliviadero de hormigón, que fue superada y seriamente destruida, vertiendo sin control el volumen del lago Wixom hacia aguas abajo. Debido a ese motivo, el lago Sanford aumentó más rápidamente de lo que podrían gestionar los aliviaderos de la presa del mismo nombre (uno regulado con compuertas y otro vertedero fusible para emergencias) por lo que la capacidad combinada no resultó suficiente (American Society of Civil Engi-

neers, 2021).

Este ejemplo muestra la importancia de la verificación de las obras ante nuevos escenarios de los forzantes climáticos, interés que probablemente, es compartido por distintos países. Por tal motivo en China, con cien mil embalses de varias diferentes tipologías (Huang et al., 2021), han realizado un estudio de los efectos de los cambios no estacionarios sobre las precipitaciones, aplicando un modelo de cambio climático para evaluar las variaciones de los riesgos considerando las dos condiciones (estacionaria y no estacionaria) y sus efectos sobre los embalses.

Se ha observado un cambio en los modelos aplicados para estimar las crecidas máximas que generan el caudal de ingreso a los embalses o "Inflow Design Flood" (IDF). En la década del setenta se comenzó a definir un nuevo paradigma que avanzó en la comprensión de los procesos del ciclo hidrológico y su formulación matemática, mejorando las estimaciones de los caudales que se aplican en el diseño de ingeniería.

Una teoría central para explicar la transformación precipitación-caudal es el modelo del hidrograma unitario instantáneo. Ese modelo está configurado por una expresión matemática que relaciona las precipitaciones efectivas (precipitación total menos las pérdidas en el suelo debidas a la infiltración) con el caudal directo. Por lo tanto, en la época de la construcción de la obra norteamericana mencionada (década de los años veinte del siglo pasado), no se habían desarrollado aún las principales teorías que se utilizaron posteriormente en la estimación de los parámetros de diseño de aliviaderos, como el hidrograma unitario (Clark, 1945), el hidrograma unitario instantáneo de Nash (1960), el modelo de valores de extremos (Gumbel, 1958) y la estimación de la Precipitación Máxima Probable PMP (WMO, 2009).

En Argentina, durante la década del ochenta, se realizó una aplicación del modelo de la PMP y la estimación de la CMP utilizando un modelo determinístico continuo para el diseño del embalse de Piedra del Águila

(Devoto et al, 1982). La obra fue construida sobre el río Limay para la atenuación de crecidas y generación eléctrica, aduna presa de hormigón de gravedad con una altura de 172 m y un aliviadero que permite erogar hasta 10.000 m³/s. Esta crecida fue verificada, veinte años después, con un modelo determinístico por eventos e incorporando nuevas tormentas. En la componente meteorológica se analizaron en el Instituto Nacional del Agua las tormentas de los años 1944, 1945, 1981, 1985 y 1993, incorporándolas al proceso de estimación de la crecida máxima probable (INA, 2002).

La aplicación del modelo de la precipitación máxima probable (PMP) y un modelo determinístico para calcular la crecida máxima probable (CMP) muestran un cambio de la metodología de estimación de la crecida de diseño para esta cuenca: así, por ejemplo, el complejo El Chocón-Cerros Colorado, es una obra construida con una crecida estimada con un modelo probabilístico y se utilizaron los caudales observados en el periodo 1903-1958.

La aplicación del modelo PMP-CMP muestran un cambio de las metodologías de estimación de la crecida de diseño para esta cuenca: Así, por ejemplo, el complejo El Chocón-Cerros Colorado, es una obra construida con una crecida estimada con un modelo probabilístico y se utilizaron los caudales del periodo 1903-1958. Estos valores fueron verificados con la técnica PMP-CMP, AIC (2006). Devoto 2022 (Comunicación personal).

Cabe mencionar que en Argentina ya se han estimado las crecidas de diseño del río Santa Cruz para los aprovechamientos hidroeléctricos actualmente en construcción en su cauce, incluyendo los posibles impactos del cambio climático (UNLP, 2021). Otros autores (Catalini et al., 2022), estiman las precipitaciones extremas que se pueden utilizar para la aplicación en el diseño de obras hidráulicas pequeñas y medianas.

Catalini et al., (2022), estiman las precipitaciones extremas que se pueden utilizar para la aplicación en el diseño de obras hidráulicas pequeñas y medianas.

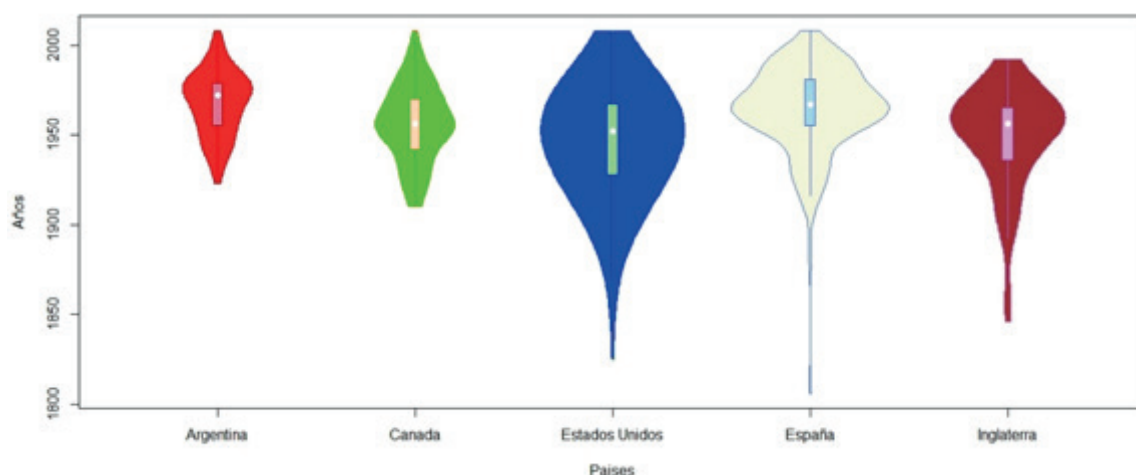


Figura 2. Diagramas de violín para los años de finalización de las obras ubicadas en distintos países.

Debe destacarse que en la Argentina, desde el desastre del dique Frías sobre el arroyo mendocino del mismo nombre en 1937 (Capitanelli, R.G., 1970), que produjo veintiún muertos, sesenta desaparecidos y cuantiosas pérdidas, no hubo que lamentar la destrucción de grandes presas (de más de quince metros de altura). Sin embargo, cuando ya se contaba con mayor conocimiento de la hidrología, en julio de 2000 se produjo la rotura de una pequeña presa en Anillaco, provincia de La Rioja, construida diez años antes para agua de uso industrial y riego y

con anterioridad, en octubre de 1999, se había producido la rotura de otra presa construida con propósitos similares en Fiambalá, provincia de Catamarca (ORSEP, 2010). Para describir cuantitativamente el problema de la antigüedad se presentan resultados de comparación en forma gráfica de los sistemas de presas de: Argentina, Canadá, España, Inglaterra y Estados Unidos (FAO, 2015). La figura N° 2 muestra las características de las funciones de densidad y los cuartiles respectivos de las fechas de finalización de las obras. Se ha utilizado el gráfico de violín que

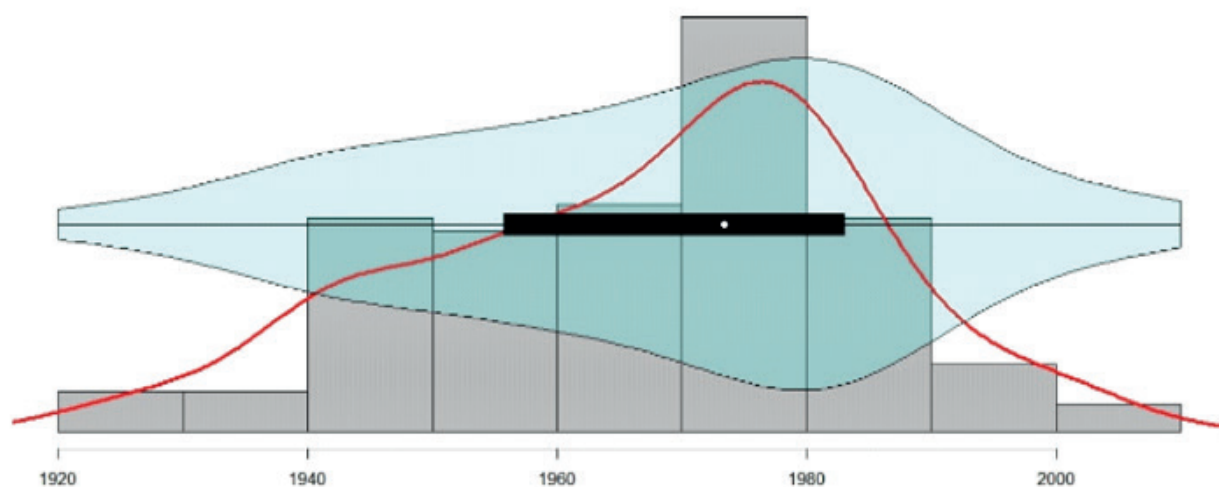


Figura 3. Diagrama de violín para el año de finalización de las obras en la Argentina.

combina distintas informaciones de la estadística descriptiva. Se puede observar que los casos de Argentina y Canadá son diferentes, las construcciones de presas comenzaron años después de España, Inglaterra, y Estados Unidos. La estimación del tercer cuartil resulta: Argentina (68 años), Canadá (81 años), España (68 años), Inglaterra (87 años) y Estados Unidos (95 años).

Se observa que, para las obras construidas en los cinco países mencionados, la edad media desde la finalización de las mismas muestra una antigüedad que en todos los sistemas supera los cincuenta años. Para la Argentina, el análisis indica la importancia de la década de los setenta para la construcción y la cantidad significativa de obras anteriores a esa década (Figura N° 3). Este análisis muestra: una media de 56 años y una mediana de 51 años. En el tercer cuartil hay 28 embalses que con 68 años ya han superado una vida útil estimada de 50 años. Se han considerado los 108 embalses definidos por la base de datos ya indicada.

En definitiva, la mayoría de las presas de embalse argentinas presentan una altura mayor a quince metros, por lo que son “grandes presas de embalse”, cuya vida media ha superado los 50 años. Un análisis del problema de las presas antiguas en Argentina se puede consultar en una referencia reciente (Malinow, 2020).

En un análisis de los caudales extremos (Meigh et al., 1997), han demostrado que existe una mayor incertidumbre para las estimaciones de los caudales máximos anuales en las regiones áridas y semiáridas que en las regiones húmedas ubicadas en distintas regiones del mundo. Estos resultados fueron incorporados para estimar un índice de impacto potencial para veinte embalses de Argentina; Devoto y Seoane (2010).

Dada la importancia del tema, en noviembre del 2021, Estados Unidos promulgó la Ley de Empleo e Inversión en Infraestructura. Esta ley describe la financiación de varios programas de seguridad de presas y se puede citar algunas líneas de inversiones relacionadas

con los motivos de esta investigación. En este caso se habrían destinado inversiones para la rehabilitación de presas de alto riesgo potencial y para la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica, (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA), para estudios sobre la Precipitación Máxima Probable (PMP).

UN EJEMPLO DE DETECCIÓN DE CAMBIOS EN LA CUENCA DEL PARANÁ (CORRIENTES)

Algunos autores (Beaulieu et al., 2012) han descripto que el cambio en la estructura de una serie temporal climática puede incluir formas combinadas, señalando además la posibilidad de su detección en series climáticas. Por lo tanto, es necesario contar con métodos que permitan identificar estos casos, que se pueden presentar en series hidrológicas asociadas a variables climáticas, como pueden ser las de los caudales máximos anuales que se utilizan en la teoría de valores extremos.

En el influente libro sobre la teoría de valores extremos, (Coles, 2001), se analizan los modelos matemáticos para las secuencias de extremos no estacionarios. Este autor señala que: ‘los procesos no estacionarios presentan características que cambian sistemáticamente con el tiempo’.

Luego otros, Villarini et al., (2009), orientan su investigación a estudiar la validez de la hipótesis de la estacionariedad. En la investigación definen que una serie de tiempo hidrológica es estacionaria cuando no presenta tendencias, cambios o periodicidad.

Entonces, el problema a resolver consiste en comprobar la presencia de cambios que varían lentamente (análisis de tendencias) o puntos de cambio (es decir, la ocurrencia de cambios abruptos en la media y/o la varianza de la distribución de la variable de interés). La principal diferencia entre los dos análisis es que cuando se detecta una tendencia, es probable que continúe en el futuro. Por otro lado, la presencia de un punto de cambio in-

dica distintas características presentes en dos partes de la serie, y es probable que el estatus siga siendo el mismo hasta que se produzca un nuevo cambio de régimen.

Estas ideas se han utilizado para realizar un análisis de una serie de caudales máximos observados en el río Paraná y se ha seleccionado y aplicado la metodología propuesta por Villarini et al. (2009).

La secuencia de aplicación de las pruebas consiste en utilizar primero la prueba de Pettitt y luego la de Mann-Kendall. La primera prueba permite identificar un único punto de cambio (en la media o varianza). Si hubiera un único punto de cambio la segunda prueba, permite identificar la presencia de tendencias en cada una de las sub-series.

La prueba de Pettitt, (Pettitt, 1979) se aplica comúnmente para detectar la presencia de un solo punto de cambio en series hidrológicas con datos continuos. En la primera (H_0) las variables siguen una o más distribuciones que tienen el mismo parámetro de ubicación (sin cambio), y según la hipótesis alternativa (H_A), existe un punto de cambio. La prueba de Mann-Kendall (Mann, 1945;

Kendall, 1975) es la prueba estadística más utilizada para detectar la presencia de tendencias temporales en los datos de series hidrológicas.

La aplicación de la prueba de Pettitt para la serie temporal de caudales máximos observada en la estación Corrientes, río Paraná y el resultado muestra un punto de cambio (72, año 1976) con un valor $p = 0,06445$.

Luego, se ha aplicado la prueba de Mann-Kendall a las dos sub-series. La prueba tiene como H_0 (hipótesis nula) que no hay tendencia presente en los datos. La H_A (hipótesis alternativa) es considerar que una tendencia está presente en los datos. Si el valor "p" de la prueba es inferior a algún nivel de significación (por ejemplo, entre 0,05 y 0,01), entonces hay evidencia estadísticamente significativa que los datos de la serie temporal presentan una tendencia. La prueba de Mann Kendall aplicada a cada una de las sub-series muestran que ambos valores p son superiores a 0.05 y 0.10 utilizado generalmente para analizar la significación. En este caso no se ha detectado tendencias en las dos sub-series.

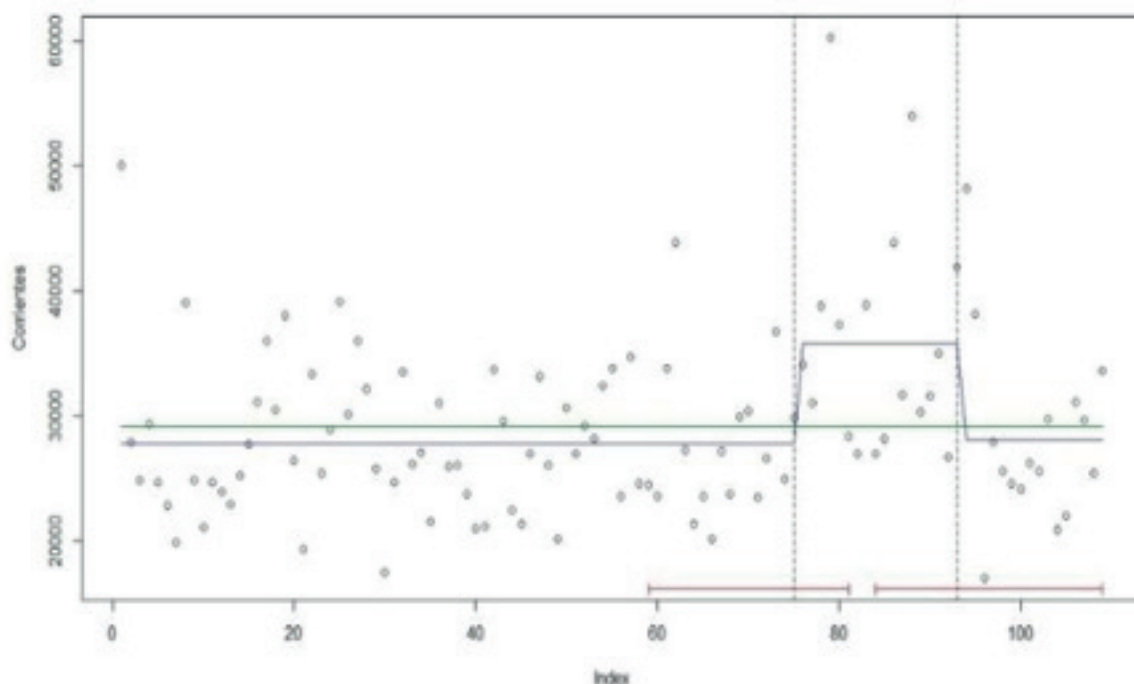


Figura 4. Gráfico de identificación de puntos de cambio en la serie de los caudales máximos diarios en Corrientes.

Periodo de Retorno (años)	Longitud del vertedero Sub serie 1 (m)	Longitud del vertedero Sub serie 2 (m)	Incremento longitud del vertedero (%)
5	160,3	182,4	13,8
10	178,4	206,4	15,7
20	196,0	230,2	17,5
50	219,1	262,4	19,7

Tabla 1. Estimación de las longitudes de vertederos requeridas para evacuar las crecidas para distintos periodos de retorno para dos periodos.

Para describir gráficamente los cambios en la serie de extremos se ha aplicado el programa denominado "strucchange" (software R), Zeileis, et al. (2002). que proporciona un conjunto de métodos para detectar cambios, estimar las medias de las sub-series y los puntos de cambio. El resultado de su aplicación en la serie de caudales máximos de Corrientes muestra que la descripción gráfica (Figura N° 4) coincide con la idea presentada por Beaulieu et al., (2012).

A continuación se presenta un ejemplo diseñado para mostrar la importancia de analizar la presencia de cambios en una serie hidrológica extensa. Se evalúan los cambios que significa utilizar la primera parte de la serie hidrológica (1904-1975) respecto de los cálculos realizados con la información del periodo siguiente (1976-2012).

A partir de los resultados obtenidos por la prueba de Pettitt y que permitió identificar dos sub-series se ha aplicado un modelo de valores extremos, función de densidad de probabilidades Gumbel (Gumbel, 1958). Con este modelo y para las dos muestras se han estimado, las dos relaciones de periodos de retorno-caudal. Luego, se calculó para diferentes periodos de retorno, las longitudes de los aliviaderos asociados con las estimaciones realizadas a partir de las dos sub-series. La Tabla N° 1 muestra la influencia que los cambios en la relación entre periodo de retorno y caudal tienen sobre la dimensión de un vertedero para las dos series de máximos

analizados: sub-series 1 y 2. En la segunda columna de la Tabla N° 1 se muestra que para la segunda sub-serie se necesita una mayor longitud del aliviadero para las nuevas condiciones hidrológicas. Por ejemplo, se observa que para un periodo de retorno de 100 años la longitud del vertedero se incrementaría en 21.4%. En la bibliografía existen métodos adecuados para estimar los extremos en casos no estacionarios. Coles (2001) señala que es posible relacionar la variación de los parámetros de las funciones de densidad de probabilidades de extremos con el tiempo o con otra variable, por ejemplo, con algún indicador de la variabilidad climática.

Este esquema implica que se podría representar una serie de extremos con un modelo GEV (Generalized Extreme Value), donde $Z_t \sim \text{GEV}(\mu(t), \sigma, \xi)$ e incorporar la serie del Índice de Oscilación del Sur (IOS) con la siguiente expresión, $\mu(t) = \beta_0 + \beta_1 \times \text{IOS}(t)$, que modifica el parámetro de ubicación de la función. El modelo inicial es $Z_t \sim \text{GEV}(\mu, \sigma, \xi)$, con tres parámetros: ubicación, escala y forma y fue propuesto por Jenkinson, (1955).

A su vez (Villarini et al., 2009) proponen un modelo lineal generalizado. Este modelo se puede completar con un método de estimación robusta. De esta forma se podría resolver otro problema subyacente: la presencia de observaciones atípicas en la muestra. Esta solución se aplicó para la serie de caudales del río Neuquén (Seoane y García Ben,

2011) y (Bianco et al., 2005).

El primer análisis mostró la posibilidad de la identificación de puntos de cambio y tendencias utilizando nuevos modelos de detección. La aplicación de estas pruebas permite la detección de componentes no estacionarias en las series. El caso presentado, con ciertas simplificaciones, es útil para comprender algunas de las componentes del problema. El ejemplo anterior muestra la posibilidad de estudiar el efecto de los cambios hidrológicos sobre las dimensiones del aliviadero de crecidas. Finalmente, se ha incorporado una descripción de algunas de las soluciones propuestas (Coles, 2001), que permiten la estimación en un contexto no estacionario al utilizar una relación que vincula un parámetro con un indicador de la variabilidad climática.

RIESGO DE UNA OBRA (ESTACIONARIO Y NO ESTACIONARIO)

Los conceptos de riesgo y periodo de retorno son fundamentales en el análisis de los eventos hidrológicos extremos tanto para la planificación como la gestión de sistemas mediante el modelo más adecuado para los casos estacionarios y no estacionarios en el diseño y verificación de obras. Este tema es importante porque el riesgo permite relacionar la vida útil con la probabilidad de ocurrencia de un evento. Un ejemplo sencillo muestra que si la ocurrencia de un evento es de 50 años y el caudal máximo tiene un periodo de retorno de 500 años entonces el riesgo es del 10 %. Sin embargo, si se considera un cálculo para una obra de 75 años entonces el riesgo se elevaría al 14%. Bras (1989) presenta interesantes aplicaciones de los modelos de variables aleatorias discretas en la estimación de la información necesaria para el diseño de obras; bajo condiciones estacionarias.

Por otra parte, se señala que los enfoques tradicionales asumen que los procesos hidrológicos evolucionan en un ambiente donde el ciclo hidrológico es estacionario (Salas et

al., 2018). Sin embargo, en los últimos años, se ha vuelto cada vez más evidente que en muchas áreas las actividades antropogénicas y factores estresantes inducidos por el clima causan condiciones no estacionarias. Por ello, es posible señalar la importancia de una nueva mirada que tienda a estudiar la relación entre la sociedad y la Hidrología, que en este caso esté asociada a los cambios del clima, las obras y las personas. Este aspecto de la no estacionariedad se puede consultar bibliografía muy actualizada (Koutsoyiannis, 2021).

Otros autores (Rootzen et al., 2013) presentan un ejemplo que es útil para entender el papel del clima en el problema del diseño y la verificación de obras. Ellos señalan que una obra de ingeniería que se planifique para estar en servicio entre los años 2015 y 2064 debería poder resistir a riesgos diferentes a los que tuvo una construcción similar entre los años 1961 y 2010. Un comportamiento con estas propiedades no se puede representar usando el concepto inherentemente estacionario de los niveles de retorno, y los riesgos no se pueden evaluar si solo se conoce la duración de la vida útil proyectada de una construcción. Para una evaluación con estas propiedades también se debe especificar durante cuantos años se planifica que esté en servicio un embalse.

Albertini et al. (2020) señalan que en los últimos años, varios estudios sociales e hidrológicos han investigado el riesgo generados por las complejas interacciones entre las inundaciones y las sociedades. Se propone un nuevo modelo socio hidrológico de las interacciones hombre-inundación que represente tanto los cambios en el embalse como en las estrategias de manejo y actualización del sistema.

Estos conceptos muestran la importancia de considerar el riesgo mediante la aplicación de distintos modelos. En el siguiente parágrafo se analiza la aplicación conjunta de modelos de cambio climático y uno hidrológico para una descripción de las condiciones futuras en la cuenca del Plata.

MODELOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y LA EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DE CAUDALES

Los efectos del cambio climático ya están ocurriendo en Argentina, tal como lo indican estudios nacionales e internacionales. Existe una importante bibliografía en el tema, (IPCC, 2021) que señala cambios en distintas zonas del país. El desarrollo de nuevos modelos de cambio climático, en escala regional, RCM (Regional Climate Model), permite una mayor precisión en las estimaciones de las principales variables del sistema hidrometeorológico. Esta serán las variables de entrada a los modelos hidrológicos de transformación entre precipitación y caudal.

La modelación del sistema climático con los modelos regionales permite describir las variables del sistema que se simulan en una cuenca, poniendo el énfasis en el escurrimiento superficial, que interesa en este trabajo. Debido a que la resolución espacial es amplia en los GCM (cuadrícula horizontal entre 100 y 300 km), se reduce su salida a una resolución más fina, usando un modelo climático regional (RCM).

En los últimos treinta años se han desarrollado nuevos modelos regionales, con una resolución del orden de 25 a 50 km. En Argentina, un ejemplo de estos avances fue

la incorporación del PRECIS en el marco de un proyecto de investigación, CLARIS, de los efectos del cambio climático global en la cuenca del Plata. Otros autores (Boulanger et al., 2016) presentan una descripción de distintas componentes del proyecto CLARIS, que fue desarrollado entre 2008 y 2012 y tuvo como objetivo proyectar los impactos regionales del cambio climático en la Cuenca del Plata para los períodos 2010-2040 y 2070-2100.

El modelo PRECIS permite la estimación de los campos de distintas variables meteorológicas en una escala areal pequeña y utiliza un modelo de circulación general como condición de borde. El modelo climático PRECIS (Providing REgional Climates for Impacts Studies), fue desarrollado por el Hadley Centre de la Oficina Meteorológica del Reino Unido y es un modelo atmosférico y de superficie terrestre de área limitada y alta resolución que se puede ubicar en cualquier parte del mundo.

Directamente relacionado con el tema de este trabajo se puede señalar la aplicación del modelo determinístico de transformación precipitación caudal "Variable Infiltration Capacity (VIC)", asociado con el PRECIS para la estimación de los efectos de los cambios en las entradas sobre los caudales en la cuen-

Serie de caudales	Periodo de retorno (2 años)	Periodo de retorno (10 años)	Periodo de retorno (20 años)
Observados 1904-1969	26684,9	35457,6	38809,7
Observados 1970-2011	29575,2	40519,0	44700,7
Modelo 2021-2140 (futuro cercano)	29505,0	45970,5	52262,0
Modelo 2071-2098 (futuro lejano)	29620,4	42422,1	47313,6

Tabla 2. Estimación, con un modelo de extremos Gumbel, datos de una simulación de caudales en Corrientes (m³/s). Modelo IPSL.

ca del Plata (Saurral et al., 2013) (Camillioni et al., 2013). Esta asociación permite la estimación de caudales en escala diaria como la utilizada en la discusión del siguiente caso.

A continuación, se presenta un análisis de extremos de una serie de caudales máximos “futuros” que fueron estimados con las variables de entrada definidas con el modelo IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace). El modelo IPSL-CM5 es una versión del modelo IPSL de sistema terrestre completo. Los caudales se han estimado, a partir de los escenarios hidrológicos futuros, considerando los datos de distintos modelos regionales para los períodos 2021–2040 (futuro cercano) y 2071–2090 (futuro lejano), (Saurral et al., 2013), Se aplica un modelo de extremos para estimar una variación futura y describir, solamente a un nivel didáctico, los efectos estudiar una serie generada con un modelo de cambio climático regional y un modelo hidrológico. Para una estimación orientada a fines de diseño o verificación se sugiere consultar otros trabajos (Hirabayashi et al., 2013) (Lawrence, 2020).

Como ejemplo, se ha seleccionado una función de densidad de probabilidades Gumbel para estimar los caudales futuros. En la tabla N° 2 se comparan las estimaciones para el periodo 2021–2040 y para el periodo 2071–2090, estas son comparadas con las obtenidas con dos series observadas, periodos (1904-1969) y (1970-2011). Los resultados del experimento numérico anterior muestran un incremento de los caudales máximos tanto para el futuro cercano (2021-2040) como del lejano (2071-2098). La utilización de datos de otros modelos climáticos asociados con el modelo hidrológico VIC han definido otras estimaciones distintas, y por lo tanto, los resultados presentados corresponden, solamente, a un experimento numérico realizado en el marco del citado proyecto. En Camillioni et al., (2022) se presentan resultados más actuales de la aplicación de nuevos modelos y que permiten contar con caudales estimados para distintas sub-cuencas de la cuenca Del Plata.

CONCLUSIONES

La mayor frecuencia y severidad de las crecidas pueden llevar al límite a los parámetros de diseño de un embalse y por lo tanto acelerar el proceso de envejecimiento de las presas.

El análisis de la información de las presas construidas en Argentina muestra que ellas tienen una antigüedad media de cincuenta y seis años y una mediana de 51 años (superando su “vida útil” clásica). Se ha estimado el tercer cuartil de la antigüedad, y son veintiocho embalses lo que superan los 68 años, Además, un porcentaje significativo de estas obras presentan una altura mayor a 15 metros, por lo que son consideradas internacionalmente como “grandes presas”, lo que define condiciones más exigentes para su dimensionamiento, verificación y operación. Varias de estas obras están ubicadas en una zona árida o semiárida, que las hace aún más vulnerables a la ocurrencia de extremos hidrológicos.

Claramente, desde los años sesenta, época de diseño de las numerosas obras construidas en los setenta, se ha incrementado el desarrollo de nuevas investigaciones en distintas áreas del conocimiento. Por ejemplo, las explicaciones climatológicas sobre la variabilidad climática (ENSO, PDO) que son procesos que presentan una baja frecuencia de ocurrencia.

Por otra parte, se espera que el aumento del contenido de vapor de agua en la atmósfera, debido al calentamiento global, altere las propiedades de las precipitaciones y el comportamiento de sus valores extremos. Esto plantea la necesidad de aplicar modelos no estacionarios y modelos de cambio climático para estimar la precipitación máxima probable (PMP).

Para la verificación de las obras existentes y los diseños de las que se construirán en el futuro, se señala la importancia de estudiar la relación entre los resultados de los modelos del cambio climático global y los parámetros de diseño de las obras de alivio de las presas. El análisis realizado advierte que

existen numerosas obras que no fueron proyectadas con la técnica de la precipitación máxima probable, modelo estándar, y que actualmente se puede aplicar asociado con los resultados de los modelos de cambios climático global.

En consecuencia, se debería efectuar el cálculo tomando en consideración escenarios climáticos futuros, obtenibles a partir de los modelos climáticos específicos existentes. Sería entonces de interés revisar las crecidas de diseño de distintas obras, grandes y pequeñas, para tener la certeza de que permitirán el pasaje por sus aliviaderos en los casos críticos.

Ante la evidente presencia de alteraciones importantes del clima terrestre, que tiene una tendencia a generar un fenómeno de incremento en la severidad de valores extremos (máximos y mínimos) de caudales de los ríos, el aprovechamiento del efecto regulador de los embalses será una confiable alternativa de mitigación tanto para disminuir los riesgos de graves inundaciones en el caso de extremos positivos, como para garantizar un volumen de agua necesario para la vida de las comunidades afectadas por sequías. En definitiva, es al menos cuestionable que se nieguen las virtudes de obras hidráulicas que han sido, son y seguirán siendo motivo de desarrollo y mejoramiento de la calidad de vida y sólo se discutan como alternativas negativas en el caso de aquellas destinadas a la generación eléctrica (por otra parte, limpia y renovable), sin tener en cuenta su importancia para paliar los efectos de crecidas depredadoras y sequías extraordinarias que parecen ser inevitables por el calentamiento global.

Los embalses existentes generalmente funcionan según lo previsto para otras condiciones climáticas. Las futuras condiciones pueden incluir nuevas características de la estacionalidad de los caudales y también la ubicación de las crecidas dentro del ciclo anual, lo que implicaría cambiar los criterios de optimización para los caudales a lo largo del año. En nuestro país el almacenamiento total se mantiene constante desde la última

gran obra. Sin embargo, la capacidad de almacenamiento, que disminuye por el proceso de colmatación de sedimentos, es un aspecto significativo para mitigar los efectos de los extremos hidrológicos presentes y futuros.

Los nuevos modelos de cambio climático regional asociados con los hidrológicos de escala global y regional ya permiten realizar estudios para evaluar los impactos y mejorar la adaptación a las condiciones climáticas futuras. Por lo tanto, se considera importante la aplicación de estas nuevas técnicas de modelación hidrológica para el análisis y verificación de los aliviaderos. El presente trabajo pretende haber llamado la atención sobre la importancia de las variaciones del clima, su interacción con la antigüedad y con los cambios en los riesgos de las obras y sus efectos sobre la sociedad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albertini, C., M. Mazzoleni, V. Totaro, V. Iacobellis, and G. Di Baldassarre (2020). Socio-Hydrological Modelling: The Influence of Reservoir Management and Societal Responses on Flood Impacts. *Water*, 2(5), 1384.
- American Society of Civil Engineers (2021). Edenville and Sanford Dam Failures Field Reconnaissance Report". Geotechnical Special Publication No. 327. Embankments, Dams, and Slopes Committee of the Geo-Institute. Ed. by Pradel, D. and , A. Lobbstaël.
- Beaulieu, C., J. Chen, and J. L. Sarmiento (2012). Change-point analysis as a tool to detect abrupt climate variations. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1962), 1228–1249.
- Bianco, A.M., M. García Ben and V.J. Yohai (2005). Robust estimation for linear regression with asymmetric errors. *Canadian Journal of Statistics*. 33(4). 511-528.
- Boulanger, J., A. F. Carril, E. Sanchez (2016). CLARIS-La Plata Basin: regional hydroclimate variability, uncertainties and climate change scenarios. *Climate Research, Inter Research*, 68 (2-3), 93-94.
- Boulange, J., N. Hanasaki, D. Yamazaki and Y. Pokhrel (2021). Role of dams in reducing global flood exposure under climate change. *Nat Commun*. 12, 417.
- Bras, R. L. (1989). *Hydrology: An Introduction to Hydrologic Science* (Addison-Wesley series in Civil Engineering). Addison-Wesley.
- Camilloni, I., R. Saurral, N. B. Montroull (2013). Hydrological projections of fluvial floods in the Uruguay and Paraná basins under different climate change scenarios; Taylor and Francis; *International Journal of River Basin Management*; 11; 4; 12-2013; 389-399.
- Camilloni, I., N. Montroull, C. Gulizia, and R. Saurral (2022). La Plata Basin hydroclimate response to solar radiation modification with Stratospheric Aerosol Injection. *Frontiers in Climate*, en prensa.
- Capitanelli, R.G. (1970). Causas de la destrucción del dique Frías y bases para nuevos sistemas de defensas. *Boletín de Estudios Geográficos*, vol. XVII, N° 67.

- Catalini, C. G., N. F. Guillén, C. M. García, F. Bazzano, M. M. Baraguet (2022). Aplicación en línea para el mapeo en Argentina de información de lluvias extremos para diseño hidrológico. IN-GENIUM. Revista de la Academia de Ingeniería de la Provincia de Buenos Aires.39-55. ISSN 2796-7042.
- Coles, S. (2001). An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer-Verlag London. ISSN0172-7397.
- Clark, C. C. (1945). Storage and the unit hydrograph. Trans. ASCE. 110. (2261):1419-1446.
- Devoto, G., R. Manzano, I. Obertello and R. Seoane (1982). Probable maximum flood for the design of Piedra del Aguila project. Commission International des Grande Barrages, San Francisco,1543 1560.
- Devoto, G. y R. Seoane (2010). Indicador de riesgo y análisis hidrológico de la vulnerabilidad de presas ante escenarios del cambio climático. Criterios para la determinación de crecidas de diseño en sistemas climáticos cambiantes. Universidad Nacional del Litoral. Ediciones UNL. ISBN 978-987-657-371-9, 23-31.
- FAO (2015). <https://www.fao.org/aquastat/en/databases/dams>.
- Fluixá-Sanmartín, J., LAltarejos-García, A. Morales-Torres, and I. Escuder-Bueno (2018). Review article: Climate change impacts on dam safety, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 18, 2471–2488.
- Gruat, J., Thirriot, C. y D. Trivellato (1983). Trente ans d'évacuateurs de crues au laboratoire. La Houille Blanche, N° 3/4, 209-220.
- Gumbel, E.J. (1958). Statistics of Extremes, Columbia University Press, New York.
- Hirabayashi, Y., R. Mahendran, S. Koirala, L. Konoshima, D. Yamazaki, S. Watanabe, H. Kim and S. Kanae (2013). Global flood risk under climate change. Nature Climate Change 3(9), 816–821.
- Hirabayashi, Y., M. Tanoue, O. Sasaki, X. Zhou, and D. Yamazaki (2021). Global exposure to flooding from the new CMIP6 climate model projections. Sci. Rep. 11, 3740.
- Hosseini, K., E. J., Nodoushan, R. Barati and H. Shahheydari (2016). Optimal design of labyrinth spillways using meta-heuristic algorithms. KSCE Journal of Civil Engineering 20 (1), 468–477.
- Huang, H., Cui, H. and Q. Ge (2021). Assessment of potential risks induced by increasing extreme precipitation under climate change. Nat Hazards 108, 2059–2079.
- Huntington, T. G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis, J. Hydrol., 319, 83–95.
- Instituto Nacional del Agua (2002). Estudio de la Crecida Máxima Probable para el río Limay. Convenio entre el Instituto Nacional del Agua y el Ente Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP).
- IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Jenkinson, A.F. (1955). The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. Q.J.R. Meteorol. Soc., 81: 158-171.
- Kendall, M. G. (1975). Rank Correlation Methods, Charles Griffin, London.
- Koutsoyiannis, D. (2020) Revisiting the global hydrological cycle: is it intensifying?, Hydrol. Earth Syst. Sci., 24, 3899–3932.
- Koutsoyiannis, D. (2021). Stochastics of Hydroclimatic Extremes-A Cool Look at Risk, ISBN: 978-618-85370-0-2, 333, Kallipos Open Academic Editions, Athens.
- Lawrence, D. (2020). Uncertainty introduced by flood frequency analysis in projections for changes in flood magnitudes under a future climate in Norway. Journal of Hydrology: Regional Studies, 28.
- Malinow, G.V. (1991). La seguridad de presas existentes durante crecidas extraordinarias, D C, Ministerio de Defensa, Dirección Nacional de Defensa Civil, Año I, N° 1.
- Malinow, G.V. (2020). Consideraciones hidrológicas en relación con añosas presas argentinas. Comunicación personal.
- Mann, H. B. (1945). Non-parametric tests against trend, Econometrica, 13, 245-259.
- Meigh, J. R., F. A. K. Farquharson and J. V. Sutcliffe (1997). A worldwide comparison of regional flood estimation methods and climate, Hydrological Sciences Journal, 42:2, 225-244.
- Nash, J. E. (1960). A unit hydrograph study with particular reference to British catchments. Proc. Inst. Civil Engrs. 17:249-282.
- ORSEP (2010). Más de 10 años fiscalizando la seguridad estructural y operativa de las presas. Organismo de Seguridad de Presas. 1a Edición. Buenos Aires.
- Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change point problem. Journal of the Royal Statistical Society Series C, Applied Statistics 28, 126-135.
- Rootzen, H. and R. W. Katz (2013). Design Life Level: Quantifying risk in a changing climate, Water Resour. Res., 49, 5964–5972.
- Salas, J. D., J. Obeysekera and R. M. Vogel (2018). Techniques for assessing water infrastructure for nonstationary extreme events: a review, Hydrological Sciences Journal, 63:3, 325-352.
- Saurral, R. I., N. B. Montroull and I. A. Camilloni (2013) Development of statistically unbiased twenty-first century hydrology scenarios over La Plata Basin, International Journal of River Basin Management, 11:4, 329-343.
- Seoane, R. y M. García Ben (2011). Modelo de regresión Gamma y la detección de no estacionariedad en variables hidrológicas. Terceras Jornadas Interdisciplinarias de la Universidad de Buenos Aires. Programa Interdisciplinario de la Universidad de Buenos Aires sobre Cambio Climático.
- Schleiss, A. J. (2011). From Labyrinth to Piano Key Weirs- A historical review. In: Proceedings of the International Conference on Labyrinth and Piano Key Weirs (PKW 2011). 3–15. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- UNLP (2021). Crecidas de diseño del río Santa Cruz. Informe para Integración Energética Argentina S.A., Universidad Nacional de La Plata, diciembre 2021.
- Vallarino, E. (1998). Tratado básico de presas, Tomo II, Aliviaderos, construcción y explotación de presas, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 4a. edición, Madrid.
- Villarini, G., F. Serinaldi, J. A. Smith and W. F. Krajewski (2009). On the stationarity of annual flood peaks in the continental United States during the 20th century, Water Resour. Res., 45(8).
- WMO (2009). World Meteorological Organization. Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation, 3rd edition, WMO No 1045. Geneva.
- Zeileis, A., F. Leisch, K. Hornik and C. Kleiber (2002). Strucchange: An R Package for Testing for Structural Change in Linear Regression Models. Journal of Statistical Software, 7(2), 1–38.