

Metodología estocástica para la determinación de resguardos estacionales en presas

Gabriel-Martin, I.^{a1}; Sordo-Ward, A.^{a2} y Garrote, L.^{a3}

^a Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica, Energía y Medio Ambiente, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Profesor Aranguren 3, 28040, Madrid. E-mail: ^{a1}i.gabrielmartin@caminos.upm.es, ^{a2}alvaro.sordo.ward@upm.es, ^{a3}l.garrote@upm.es.

Línea temática B | Hidrología, usos y gestión del agua.

RESUMEN

El estudio presenta una metodología de carácter estocástico para la definición de Normas de Explotación optimizando tanto la explotación ordinaria como la gestión de avenidas. Además, la metodología permite la evaluación de la seguridad hidrológica de presas teniendo en cuenta la variabilidad del nivel inicial en el embalse en el momento de avenida. El caso de estudio es una presa bóveda clasificada como tipo A en función del riesgo potencial cuyo principal uso es el regadío. En el caso de estudio, se ha determinado un conjunto de resguardos maximizando la demanda máxima atendible para una garantía volumétrica del 90 %. Se ha observado que al tener en cuenta la variabilidad del nivel inicial en el momento de avenida, la presa del caso de estudio no necesita resguardos para cumplir la normativa, mientras que si se supone embalse lleno el volumen de resguardo es de 70 hm³ en una de las estaciones. La metodología presentada puede ser de utilidad para el análisis y priorización de inversiones en seguridad hidrológica de presas existentes.

Palabras clave | presas; embalses; resguardos; seguridad hidrológica; explotación ordinaria; hidrología; análisis estocástico; Normas Técnicas de Seguridad de Presas y Embalses.

INTRODUCCIÓN

Las nuevas regulaciones y normativas tienden a aumentar las exigencias de seguridad hidrológica de las grandes presas, influyendo tanto en el diseño como en la adaptación de las presas existentes a los nuevos criterios exigidos (San Mauro et al., 2016). Es necesario por tanto definir metodologías de evaluación que puedan aplicarse al conjunto de presas existentes con la finalidad de identificar aquellas que resulten menos seguras y requieran actuación. Esta necesidad se ha visto reflejada en el primer tomo de la Guía Técnica nº8 de explotación de presas y embalses: análisis de riesgos aplicado a la gestión de seguridad de presas y embalses (SPANCOLD, 2012), así como en el borrador de las Normas Técnicas de Seguridad de Presas y Embalses (en adelante NTS) (MARM, 2011).

Existen una serie de factores que afectan a la seguridad hidrológica que generalmente no son contemplados simultáneamente, como la distribución temporal de las precipitaciones (p.e. Kuczera et al., 2006; Sordo-Ward et al., 2014), el nivel inicial en el embalse (p.e. Carvajal et al., 2009; Gabriel-Martin et al., 2017) o la operación de los órganos de desagüe (p.e. Sordo-Ward et al., 2017). Se puede considerar que las leyes de frecuencia de niveles máximos en el embalse y de caudales máximos desaguados son las variables más representativas de la seguridad hidrológica tanto de la presa como aguas abajo de ésta (p.e. Bianucci et al., 2013; Michailidi y Bacchi, 2017; Sordo-Ward et al., 2017), ya que incorporan de manera agregada todas las circunstancias que condicionan la seguridad.

En el caso de la protección frente a sobrevertido en presas existentes, suele adoptarse una serie de resguardos estacionales que permiten mitigar el efecto de las avenidas (Solera-Solera et al., 2012). Por lo general, estos resguardos se analizan con la hipótesis de que el embalse se encuentra completamente lleno (Nivel Máximo Normal) en el momento de la avenida (Jiménez Álvarez, 2016). Si bien en el proyecto de nuevas presas tiene sentido la adopción de esta hipótesis, en el caso

del análisis de la seguridad hidrológica de presas existentes es interesante considerar la variabilidad del nivel inicial en el momento de avenida.

Cabe destacar la relación entre la determinación de los resguardos y la explotación ordinaria del embalse. La ampliación de los primeros conlleva una reducción de los recursos disponibles para el suministro de las demandas y, por consiguiente, las consecuencias económicas derivadas (Solera-Solera et al., 2012). En la literatura y en la práctica profesional, ambos aspectos son generalmente estudiados de manera independiente. Sin embargo, existen trabajos en los que sí se han estudiado ambas variables. Liu et al. (2015) proponen una metodología para la definición de resguardos estacionales teniendo en cuenta la operatividad del embalse. Chang et al. (2017) utilizan una metodología similar pero definen resguardos variables dentro de las distintas estaciones para incrementar el potencial hidroeléctrico de un sistema de embalses mediante técnicas de lógica difusa. Así mismo, en ambas investigaciones, el tratamiento de las avenidas se hace con una metodología determinística consistente en la definición de hidrogramas de proyecto estacionales para la evaluación de la seguridad hidrológica de la presa.

El objetivo principal de este trabajo es presentar una metodología de carácter estocástico para el análisis de los efectos de los resguardos estacionales sobre la seguridad de la presa y la explotación ordinaria del embalse. Para ello, en primer lugar, se analizan los resultados suponiendo el embalse a Nivel Máximo Normal en el comienzo de las avenidas. Seguidamente se analiza la adopción de resguardos estacionales en la presa para la definición de sus Normas de Explotación asegurando el cumplimiento de las NTS. En este caso, el nivel inicial en el embalse en el momento de las avenidas se adopta igual al establecido en los resguardos, dependiendo este nivel de la estación de ocurrencia de los distintos eventos. Por último, se analiza la influencia de la variabilidad del nivel inicial en el embalse, obteniendo así una caracterización más realista de la seguridad hidrológica y se propone una metodología para la definición de resguardos teniendo en cuenta esta variable.

MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología consta de distintos pasos asociados a cada uno de los tres objetivos principales:

- a) **Análisis del cumplimiento de la normativa actual.** A partir de un conjunto de hidrogramas generados estocásticamente, se realiza el tránsito en el sistema embalse-presa suponiendo nivel inicial constante e igual al Nivel Máximo Normal en el momento de ocurrencia de las avenidas. Analizando la evolución de los niveles en el embalse se obtiene el nivel máximo alcanzado para cada uno de los eventos y, obteniendo la ley de frecuencia de niveles máximos en el embalse, se analiza el cumplimiento de la normativa.
- b) **Determinación de resguardos suponiendo embalse lleno hasta el resguardo estacional asignado.** Se asigna a cada hidrograma de entrada del conjunto anterior una estación de ocurrencia, obtenida del análisis estacional de la serie de caudales medios diarios entrantes al embalse. Una vez se han caracterizado los hidrogramas de manera estacional, se les asigna un nivel inicial fijo igual al establecido en el resguardo asignado a cada estación de ocurrencia. Se simula la operación del embalse en avenidas con ese conjunto de resguardos, así como la explotación ordinaria del embalse condicionada por esos mismos resguardos, con la finalidad de establecer la máxima demanda que se puede atender. El proceso se repite tantas veces como conjuntos de resguardos se van a estudiar; obteniendo la ley de frecuencia de niveles máximos en el embalse junto a la demanda máxima atendible para cada conjunto de resguardos estudiado.
- c) **Análisis de la seguridad hidrológica con resguardos definidos teniendo en cuenta la variabilidad del nivel inicial en el embalse.** Se realiza un análisis similar al anterior pero, en este caso, el nivel inicial en el momento de ocurrencia de la avenida es variable. Para ello, se simula para cada conjunto de resguardos la explotación ordinaria en el embalse, modificando sólo los resguardos respecto a la situación actual de explotación. A partir de esta simulación, se obtiene la distribución empírica de niveles en el embalse para cada estación de ocurrencia. Mediante un entorno de Monte Carlo, se asigna el nivel inicial en el embalse para cada avenida a partir de las distintas distribuciones estacionales y se simula la operación del embalse en situación de avenida. El proceso se repite para cada set de resguardos, obteniendo para el análisis de resultados las mismas variables que en el caso anterior (ley de frecuencia de niveles máximos y demanda máxima atendible para cada combinación).

Se procede a explicar a continuación los distintos procesos involucrados en cada uno de los pasos de la metodología expuesta.

Generación estocástica de los hidrogramas de entrada

En la mayoría de países, para el estudio de la seguridad hidrológica de presas es necesario analizar avenidas representativas hasta un periodo de retorno de 10,000 años (Ren et al., 2017). En el presente trabajo se utiliza una muestra de 100,000 hidrogramas, con la finalidad de obtener resultados representativos hasta un periodo de retorno de 10,000 años (Loukas, 2002; Blazkova y Beven, 2004; Sordo-Ward et al., 2012). A partir de la serie histórica de caudales medios diarios disponible, se han obtenido hidrogramas representativos de las distribuciones de duración, volumen y caudales punta observados mediante una metodología de tipo estocástico previamente utilizada en Gabriel-Martín et al. (2017).

Caracterización estacional

A cada hidrograma se le ha asignado una estación mediante la técnica de series parciales. Partiendo de la serie histórica de caudales medios diarios, se han seguido los siguientes pasos:

- a) **Selección de eventos independientes.** En primer lugar, se define un umbral que garantice la independencia de los eventos. Para ello existen distintas técnicas en la literatura (Lang et al., 1999), utilizándose en el presente estudio el criterio de independencia propuesto por Jiménez Álvarez (2016) (Ecuación (1)):

$$U = E(Q) + F(Var(Q))^{1/2} \quad (1)$$

donde U es el valor del umbral en m^3/s , $E(Q)$ es la media de la serie de caudales medios diarios en m^3/s , $Var(Q)$ es la varianza de dicha serie y F es el factor de frecuencia; determinado este último por Jiménez Álvarez (2016) en función de la región a la que pertenece la estación de aforos en la España Peninsular. Una vez se ha determinado el umbral, se seleccionan los eventos independientes superiores a éste. Para ello, se aplica la metodología del U.S. Water Resources Council (USWRC, 1976; Lang et al., 1999). Este criterio considera que dos picos no pertenecen al mismo evento cuando no cumplan alguna de las siguientes condiciones (Ecuación (2), Ecuación (3)):

$$\theta < 5 + \log(0.3861A) \quad (2)$$

$$Q_{min} > 0.75 \min(Q_{p1}, Q_{p2}) \quad (3)$$

donde θ es la distancia en días entre dos picos sucesivos de caudal Q_{p1} y Q_{p2} (m^3/s), A es el área de la cuenca (km^2) y Q_{min} (m^3/s) representa el caudal mínimo entre ambos picos.

- b) **Caracterización estacional.** Se han determinado las estaciones atendiendo a la frecuencia de aparición de los eventos, asumiendo como hipótesis que la magnitud de éstos es independiente de la estación del año. Para ello se ha aplicado el test del método de POT propuesto por Ouarda et al. (1993). Este test consiste en graficar el número medio de excedencias acumulado sobre el umbral U para los distintos días del año frente a los días de un año. Cada estación queda representada por las partes de la gráfica con pendiente similar, cambiando la estación cuando se producen cambios de pendiente bruscos. Esta metodología permite determinar las estaciones en las que la frecuencia de aparición de los eventos es similar.
- c) **Cumplimiento de la hipótesis de homogeneidad estadística en la magnitud de los eventos a lo largo del año.** Con el fin de comprobar esta hipótesis, se ha utilizado el test homogeneidad estadística propuesto por Jiménez Álvarez (2016). Este test consiste en la determinación de un intervalo de confianza en función de la media muestral del valor de las excedencias existentes en cada uno de los meses del año. Si la desviación de la media muestral mensual respecto a la media anual queda dentro de estos intervalos, se cumplirá la hipótesis de homogeneidad estadística en la magnitud de los eventos a lo largo del año. Los intervalos de confianza asociados a la estimación de la media μ para un determinado nivel de significancia α a partir de cada muestra mensual quedan determinados por:

$$\bar{x} - z_{\alpha/2} \frac{s}{m^{1/2}} \leq \mu \leq \bar{x} + z_{\alpha/2} \frac{s}{m^{1/2}} \quad (4)$$

donde $\bar{x}$ es la estimación de la media a partir de la muestra mensual, $z_{\alpha/2}$ es la variable normal estándar para una probabilidad acumulada de $\alpha/2$, $\hat{s}$ es la desviación típica muestral mensual y m es el número de excedencias mensuales. El intervalo de confianza por tanto será variable en función del número de eventos que superen el umbral en cada mes.

Simulación de las reglas de operación en situación avenidas y en situación de explotación ordinaria

Se simula tanto la operación en situación de avenidas como en explotación ordinaria. La simulación de la operación de los órganos de desagüe en situación de avenida es necesaria para la obtención de la ley de frecuencia de niveles máximos. En lo referente a la simulación de la explotación ordinaria del embalse, ésta permite analizar la influencia de los resguardos estacionales adoptados y la afección de éstos sobre la cantidad de agua disponible para satisfacer las demandas asociadas al embalse. Además, permite obtener la distribución de niveles iniciales en el embalse para las distintas estaciones de ocurrencia de las avenidas.

Se expone a continuación la metodología de simulación empleada en cada una de las situaciones:

- a) **Simulación de las reglas de operación en situación de avenidas.** Se aplica Método de Evaluación Volumétrica (MEV) (Girón, 1988) para el tránsito por el embalse y la simulación del funcionamiento de las compuertas en la presa. El método se basa en los siguientes principios: el caudal vertido debe ser inferior al entrante al embalse mientras nos encontremos en la parte creciente del hidrograma; si el caudal de entrada al embalse aumenta, también lo hará el caudal de salida en función del de entrada; y cuanto más alto sea el nivel del embalse, mayor será el incremento porcentual del caudal vertido respecto al caudal entrante.

El MEV va agotando el volumen de resguardo de manera progresiva, aumentando los caudales vertidos según va disminuyendo el volumen de resguardo disponible. Una vez que el volumen de resguardo ha sido agotado, este método trata de mantener fijo el nivel de embalse igualando entradas a salidas, hasta que todos los órganos de desagüe estén completamente abiertos.

La aplicación del MEV permite obtener la ley de frecuencia de niveles máximos alcanzados en el embalse; utilizada para la evaluación de la seguridad hidrológica de la presa.

- b) **Simulación de las reglas de explotación en situación ordinaria.** Se ha utilizado un modelo de explotación sencillo, en el que se tiene en cuenta el embalse únicamente sin interactuar con el resto de elementos del sistema de explotación. A partir de una serie de aportaciones mensuales, se simula el comportamiento del embalse para satisfacer las demandas medias mensuales, teniendo en cuenta los caudales ecológicos, evaporación, volúmenes mínimo y máximo en el embalse. El volumen máximo en el embalse viene dado por el volumen a Nivel Máximo Normal menos el volumen de resguardo; produciéndose vertido cuando el volumen en el embalse es superior a éste.

El modelo de explotación del embalse se aplica de forma reiterada con valores variables de demanda para obtener la máxima demanda que puede atenderse con un criterio de garantía determinado. La simulación de la explotación del embalse permite por tanto analizar la influencia de los resguardos estacionales adoptados y la máxima demanda atendible con una garantía volumétrica determinada. Además, permite obtener la distribución de niveles iniciales en el embalse para las distintas estaciones de ocurrencia de las avenidas, que permite asociar un nivel inicial a cada avenida entrante en un entorno de Monte Carlo.

Determinación del conjunto de resguardos de estudio y análisis de resultados

Las combinaciones posibles de resguardos a estudiar dependen tanto del número de estaciones n (resultantes de la aplicación del test expuesto anteriormente) como del tamaño de la batería de resguardos a estudiar k . El número de conjuntos de resguardos VR_k^n a estudiar vendrán definidos por:

$$VR_k^n = k^n \quad (5)$$

Por ello, el tamaño de resguardos a estudiar ha de ser lo suficientemente grande para ser representativo sin ser inabordable computacionalmente. Una vez se han definido el conjunto de resguardos estacionales a estudiar, se obtiene la ley de frecuencia de niveles máximos alcanzados en el embalse mediante la metodología anteriormente expuesta para cada conjunto. Además, para cada conjunto de resguardos estacionales se obtiene la máxima demanda atendible para una determinada garantía volumétrica mediante la simulación de la explotación ordinaria del embalse. Para analizar los resultados, se busca el cumplimiento de la normativa optimizando la explotación ordinaria del embalse, proponiéndose la siguiente metodología para los distintos objetivos:

- a) **Determinación de resguardos suponiendo embalse lleno hasta el resguardo estacional asignado.** Se grafica la demanda máxima atendible frente a la diferencia del Nivel de Avenida de Proyecto menos el nivel máximo alcanzado en el embalse asociado al periodo de retorno 1000 años para cada conjunto de resguardos estacionales. De entre todos los casos, se descartan aquellos en los que el signo de la diferencia es negativo, dado que no cumplen la normativa. Del resto de casos, se selecciona como óptimo aquel que maximice la demanda máxima atendible con una garantía volumétrica determinada.
- b) **Análisis de la seguridad hidrológica con resguardos definidos previamente teniendo en cuenta la variabilidad del nivel inicial en el embalse.** Se realiza el mismo análisis que en el apartado anterior, pero en este caso asignando un nivel inicial variable en el momento de la avenida a partir la distribución de niveles iniciales en el embalse para las distintas estaciones de ocurrencia de las avenidas. La solución, al igual que antes, será aquella que maximice la demanda máxima atendible con una garantía volumétrica determinada.

Limitaciones de la metodología

La metodología expuesta tiene las siguientes limitaciones:

- a) En lo referente a los hidrogramas de entrada, se tienen las limitaciones presentadas en Gabriel-Martin et al. (2017).
- b) La caracterización estacional por el método de series de duración de parcial no es válida en el caso de que comportamiento estacional de las avenidas sea marcadamente heterogéneo (p.e. el caso de cuencas del levante peninsular, donde la hipótesis de homogeneidad estadística en la magnitud de los eventos a lo largo del año no se cumple, por la influencia de tormentas de carácter convectivo (Jiménez Álvarez, 2016)).
- c) La simulación de la explotación ordinaria del embalse en el presente trabajo no ha tenido en cuenta la interconexión entre los distintos elementos del sistema de explotación del que el embalse forma parte. Sin embargo, la metodología sería igualmente aplicable si se hubiera tenido en cuenta este factor, mediante el uso de modelos simulación de sistemas de explotación (p.e. AQUATOOL (Andreu et al., 1996)).
- d) Esta metodología ha sido aplicada a una determinada cuenca y configuración de embalse. Esto puede limitar la generalización de los resultados obtenidos.

Caso de estudio

La metodología expuesta se aplica a una presa de tipo bóveda, clasificada como tipo A en función del riesgo potencial, situada en zona de baja sismicidad. La presa tiene un aliviadero principal de dos compuertas. La función principal de la presa es el suministro de aguas destinadas a las demandas de regadío. En consecuencia, los niveles en el embalse a lo largo del año tienen una gran variabilidad de tipo estacional. Para la generación de hidrogramas se dispone de una serie de caudales medios diarios de 30 años de longitud. En lo referente a la simulación de la explotación ordinaria del embalse, se utiliza la serie larga de caudales medios diarios obtenidos del modelo SIMPA. Se muestran en la tabla 1 las principales características de la presa y de la cuenca utilizadas en el trabajo.

Tabla 1 | Características de la cuenca y presa de estudio.

Area (km ²)	Tiempo de concentración (h)	Volumen de embalse a NMN (hm ³)	Demanda bruta anual total (hm ³)	Capacidad de los aliviaderos de superficie	
				Compuertas a NMN (m ³ /s)	Labio fijo a NAP (m ³ /s)
582	11	651	545	2 x 310.5	98.7

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización estacional de los hidrogramas de entrada

Se muestra en la figura 1 los resultados de la caracterización estacional de los hidrogramas. En la figura 1 a) se observa la determinación de las estaciones aplicando el test de POT de Ouarda et al. (1993). Se detectan cuatro cambios de pendiente, definiéndose las siguientes estaciones:

- Estación 1: Definida por los meses de noviembre, diciembre y enero (representada por la línea azul en la figura 1 a)).
- Estación 2: Definida por los meses de febrero, marzo y abril (en morado en la figura 1 a)).
- Estación 3: Definida únicamente por el mes de mayo (en verde en la figura 1 a)).
- Estación 4: Definida por los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre (en naranja en la figura 1 a)).

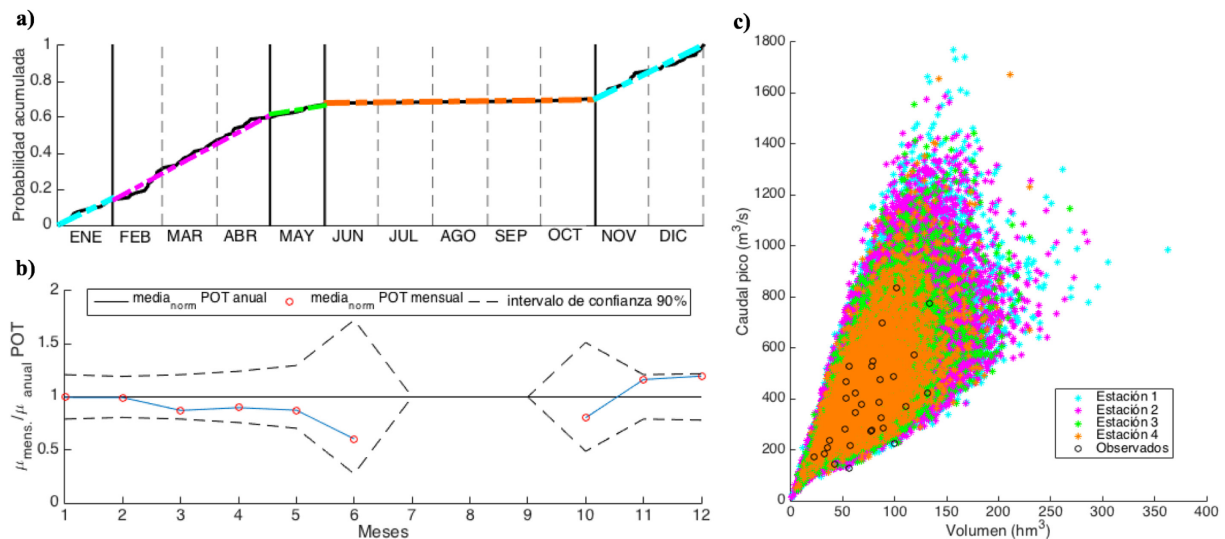


Figura 1 | Caracterización estacional de los hidrogramas de entrada: a) Test de POT de Ouarda et al. (1993). Se representa en distintos colores la parte de la gráfica con pendiente similar, definiéndose así las distintas estaciones de ocurrencia de las avenidas. b) Test de homogeneidad estadística en la magnitud de los eventos a lo largo del año. Los puntos rojos representan la media de cada muestra mensual normalizada, mientras que en línea discontinua se representan los intervalos de confianza del 90% para cada mes. c) Representación de los caudales pico y volúmenes observados (círculos) y simulados (asteriscos), representado los colores la asociación de cada uno de los hidrogramas a cada una de las estaciones.

En lo referente al cumplimiento de la hipótesis de homogeneidad estadística en la magnitud de los eventos a lo largo del año, se ha aplicado el test expuesto en la metodología (figura 1 b)). Se puede observar que todos los valores se encuentran dentro del intervalo de confianza del 90 % para cada mes. En el caso de los meses de julio, agosto y septiembre al no disponer de ningún evento por encima del umbral, no existen valores para el análisis. Así mismo, se puede observar como en los meses de junio y octubre el intervalo de confianza es más amplio debido a un tamaño muestral pequeño.

En la figura 1 c) se muestra el resultado de los caudales pico y volúmenes de los 100,000 hidrogramas simulados, asociados cada uno de ellos a las estaciones previamente definidas. Se observa como reproducen correctamente los valores de los hidrogramas máximos anuales observados.

Análisis del cumplimiento de la normativa actual

Se ha analizado el cumplimiento de normativa para la presa de estudio. Para ello, en primer lugar, se ha obtenido la ley de frecuencia de niveles máximos alcanzados en el embalse, suponiendo un nivel inicial constante e igual al Nivel Máximo Normal (figura 2).

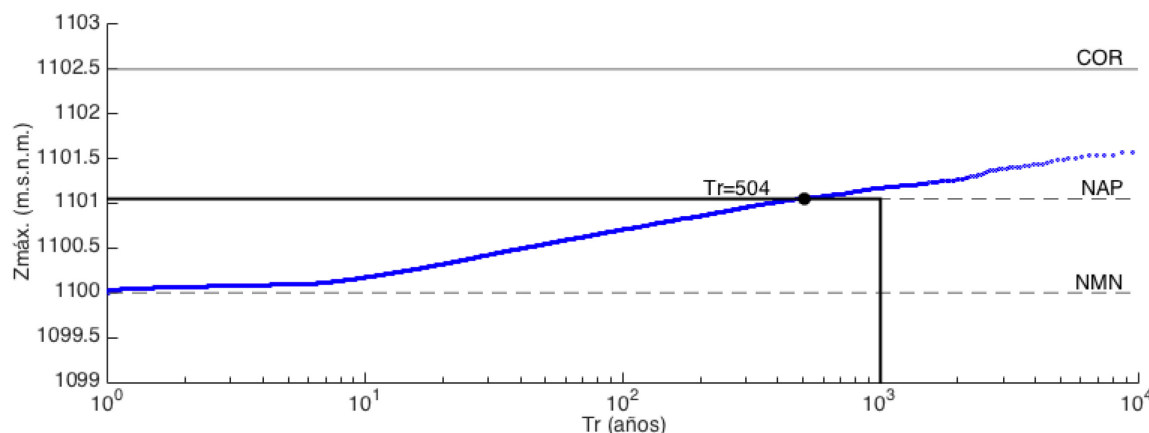


Figura 2 | Ley de frecuencia de niveles máximos alcanzados en el embalse. El punto negro representa el periodo de retorno asociado al nivel de avenida de proyecto (NAP), mientras que las líneas continuas negras representan el límite de cumplimiento de la normativa. Las líneas grises representan los niveles principales de la presa: coronación (COR), Nivel de Avenida de Proyecto (NAP) y Nivel Máximo Normal (NMN).

En el presente trabajo se entiende que el Nivel de Avenida de Proyecto es el nivel límite que se debe obtener para el periodo de retorno fijado para la avenida de proyecto según la normativa evaluada. Según la Instrucción de Grandes Presas (MOP, 1967), el Nivel de Avenida de Proyecto es aquel definido por la avenida máxima, que es aquella con periodo de retorno igual a 500 años. En este caso, entendiendo que el Nivel de Avenida de Proyecto ha de tener un periodo de retorno igual o superior que el de la avenida, la presa cumpliría la normativa vigente cuando fue diseñada; dado que el periodo de retorno para el Nivel de Avenida de Proyecto es igual a 504 años (figura 2).

Cuando se analiza el borrador de las NTS (MARM, 2011), se definen dos avenidas de estudio: la Avenida de Proyecto, que es la correspondiente a un periodo de retorno mínimo de 1,000 años; y la Avenida Extrema, que es aquella correspondiente a un periodo de retorno mínimo de 5,000 años para presas de fábrica. Haciendo la interpretación anterior del concepto de periodo de retorno, se observa que la presa no cumple con las NTS en lo referente a la Avenida de Proyecto, debiéndose adoptar medidas para su cumplimiento. En lo que se refiere al Nivel de Avenida Extrema, se observa que no compromete la seguridad hidrológica al no alcanzarse la coronación para periodos de retorno inferiores a 10,000 años, cumpliendo así con las NTS (en el caso de presas de fábrica, se admiten vertidos por coronación siempre que se justifique que estos no comprometen la seguridad hidrológica de la presa).

Determinación de resguardos suponiendo embalse lleno hasta el resguardo estacional asignado

Para la determinación de los resguardos, se analizó hasta un máximo de 85 hm³ de resguardo, discretizado en valores de 5 hm³, siendo la batería de resguardos a estudiar (k) igual a 18. Por tanto, dado que existen cuatro estaciones diferenciadas, el número de conjuntos de resguardos a estudiar es (Ecuación 6):

$$VR_k^n = k^n = 18^4 = 104,976 \text{ conjuntos} \quad (6)$$

Se muestra en la figura 3 a) los resultados de analizar los 104,976 casos, obtenidos asociando los 100,000 hidrogramas con nivel inicial constante e igual al máximo establecido por los resguardos en cada estación para cada conjunto. Para ello, se ha graficado la diferencia del NAP y el nivel máximo alcanzado en el embalse para un periodo de retorno igual a 1,000 años frente a la máxima demanda atendible con cada conjunto de resguardos con una garantía volumétrica del 90 %. De entre todos los casos, primero se descartan aquellos que no cumplen la normativa. De los casos restantes, se selecciona aquél que maximice la demanda máxima atendible en el embalse. En este caso, el conjunto óptimo es el mostrado en la tabla 2.

En la figura 3 b) se muestra la ley de frecuencia obtenida para el conjunto de resguardos óptimo. Se puede observar cómo cumple justo con la normativa.

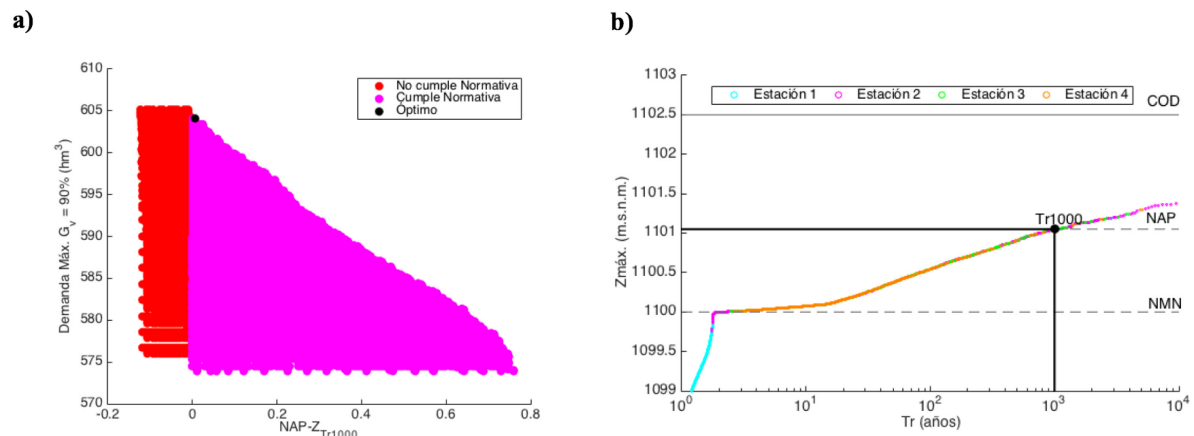


Figura 3 | a) Diferencia del Nivel de Avenida de Proyecto (NAP) menos el nivel máximo alcanzado en el embalse asociado al periodo de retorno 1000 años (Z_{Tr1000}) frente a la demanda máxima atendible con una garantía volumétrica del 90 % para las 104,976 combinaciones de resguardos estacionales estudiadas. En rojo se representan las soluciones que no cumplen la normativa, en morado aquellas que sí cumplen, y en negro la solución óptima. b) Ley de frecuencia de niveles máximos alcanzados en el embalse para la situación de resguardos óptima. El punto negro representa el periodo de retorno asociado al nivel de avenida de proyecto (NAP), mientras que las líneas continuas negras representan el límite de cumplimiento de la normativa. Las líneas grises representan los niveles principales de la presa: coronación (COR), NAP y Nivel Máximo Normal (NMN).

Tabla 2 | Conjunto de resguardos óptimo para las Normas de Explotación, suponiendo nivel inicial constante e igual al máximo establecido por el resguardo adoptado para cada estación.

Resguardo				Tr_{NAP}	Demanda bruta máxima atendible con $G_v=90\%$
Estación 1	Estación 2	Estación 3	Estación 4		
(hm^3)	(hm^3)	(hm^3)	(hm^3)	(Años)	(hm^3)
70	5	0	0	1000	604

Análisis de la seguridad hidrológica con resguardos definidos previamente teniendo en cuenta la variabilidad del nivel inicial en el embalse

Como se indicó en la introducción, es importante tener en cuenta la variabilidad del nivel inicial en el momento de avenida para evaluar los resguardos adoptados. Siguiendo la metodología expuesta, se analizan los 104,976 casos de resguardos previamente definidos, pero en este caso, para cada hidrograma de entrada se asigna un nivel inicial determinado de forma probabilística. Para ello, se simula el comportamiento del embalse con el conjunto de resguardos estudiado, se obtiene la probabilidad de superación de niveles en el embalse para ese conjunto en cada estación y se obtiene un nivel inicial en el momento de avenida a partir de la ley de probabilidad empírica según la estación asociada al hidrograma de entrada. Se muestran en la figura 4 los resultados obtenidos. En la figura 4 a) se puede observar un gráfico similar al de la figura 3 a). En este caso, al tener en cuenta la variabilidad del nivel inicial, todos los casos cumplen con las NTS. De entre ellos; el óptimo es

aquel que maximiza la demanda máxima atendible para una garantía volumétrica del 90%. El punto azul de la figura 4 a) muestra la solución determinada en el apartado anterior, mientras que en este caso el óptimo sería el punto negro, que representa la situación en la que no se toman resguardos para ninguna de las estaciones y cuyas características se muestran en la tabla 3.

En la figura 4 b) se muestran las leyes de probabilidad empírica acumulada del grado de llenado inicial para cada una de las estaciones determinadas; tanto para la solución determinada en el apartado anterior (en azul) como para la solución sin resguardos (en negro). Estas leyes son las que permiten obtener de manera probabilística el nivel inicial en el momento de avenida. Por último, en la figura 4 c) (correspondiente a la solución del apartado anterior) y 4 d) (correspondiente a la solución sin resguardos) se muestran las leyes de frecuencia de niveles máximos en el embalse teniendo en cuenta la variabilidad del nivel inicial. Se observa como ambas cumplen con la normativa, siendo el periodo de retorno asociado al NAP de 3130 años para el conjunto de resguardos de la situación anterior y 2350 años para la situación sin resguardos.

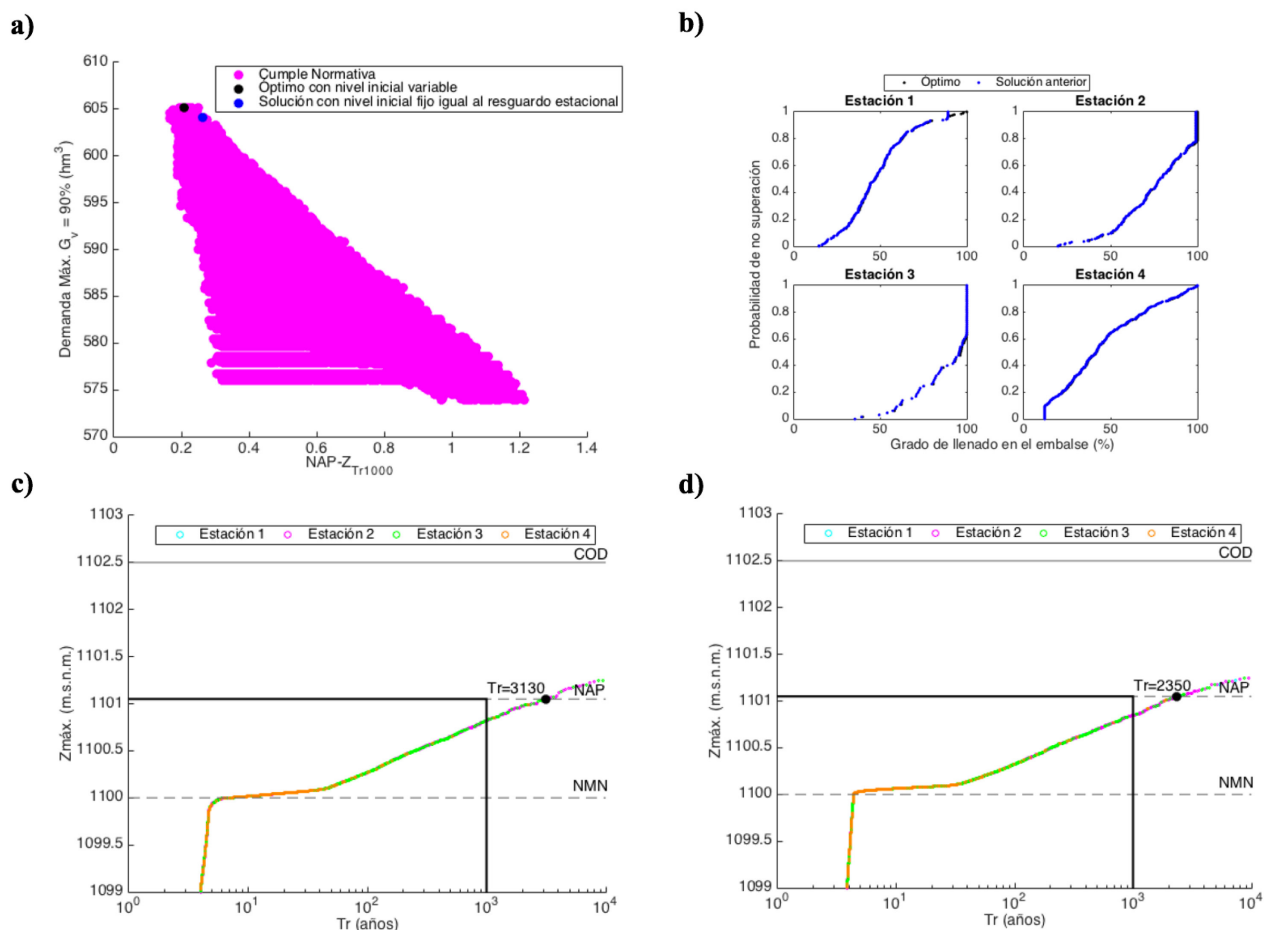


Figura 4 | a) Diferencia del Nivel de Avenida de Proyecto (NAP) menos el nivel máximo alcanzado en el embalse asociado al periodo de retorno 1000 años (Z_{Tr1000}) frente a la demanda máxima atendible con una garantía volumétrica del 90 % para las 104,976 combinaciones de resguardos estacionales estudiadas. En morado se representan las soluciones que cumplen la normativa, en negro la solución óptima (la cuál es sin resguardos) y en azul la solución obtenida en el apartado anterior (Figura 3). b) Leyes empíricas de probabilidad de superación de grado de llenado en el embalse (para caracterizar el nivel inicial) para la situación sin resguardos (negro) y la solución obtenida en el apartado anterior (azul) c) Ley de frecuencia de niveles máximos alcanzados en el embalse con niveles iniciales variables para la situación óptima obtenida en el apartado anterior d) Ley de frecuencia de niveles máximos alcanzados en el embalse con niveles iniciales variables para la situación sin resguardos.

Tabla 3 | Conjunto de resguardos óptimo para las Normas de Explotación, suponiendo nivel inicial variable para cada estación.

Resguardo				Tr_{NAP}	Demanda bruta máxima atendible con $G_v=90\%$
Estación 1	Estación 2	Estación 3	Estación 4		
(hm^3)	(hm^3)	(hm^3)	(hm^3)	(Años)	(hm^3)
0	0	0	0	2350	605

Respecto a los resultados obtenidos, cabe destacar distintos aspectos. El primero de ellos es que, al no tener en cuenta la variabilidad del nivel inicial en la definición de las Normas de Explotación para el caso de estudio, los resultados de resguardos son conservadores desde el punto de vista de la seguridad hidrológica de la presa. Este resultado es positivo de cara a la reducción de la probabilidad de sobrevertido. Sin embargo, una definición demasiado conservadora puede conllevar una reducción de la demanda máxima atendible en el embalse, por lo que puede tener efectos negativos en términos de explotación.

Otro factor importante que se debe tener en cuenta es que los caudales máximos desaguados no han sido analizados. En muchas ocasiones, los gestores de la presa se ven limitados por esta variable. Esta variable se podría incluir en el análisis, y buscar una solución de compromiso entre la seguridad hidrológica de la presa, la seguridad aguas abajo de esta y la explotación ordinaria en el embalse.

Por último, se quiere destacar la utilidad de esta metodología de cara al análisis de riesgos de un conjunto de presas. Una presa analizada con nivel inicial constante e igual al nivel máximo fijado por los resguardos estacionales puede resultar menos segura (desde el punto de vista hidrológico) que otra analizada con la misma metodología. Sin embargo, si se tiene en cuenta la variabilidad del nivel inicial en el momento de avenida, la situación podría ser la opuesta. Por ejemplo, éste podría ser el caso de comparar una presa de uso hidroeléctrico que a priori pueda parecer más segura con una de regadío en la que, al tener en cuenta la variabilidad del nivel inicial, la presa hidroeléctrica resulte menos segura. Por tanto, esta metodología dota a la Administración de una herramienta para priorizar las inversiones en presas existentes.

CONCLUSIONES

Del presente trabajo se han obtenido las siguientes conclusiones:

- La metodología expuesta permite una caracterización más realista de la seguridad hidrológica de las presas, teniendo en cuenta la variabilidad del nivel inicial en el embalse en el momento de ocurrencia de la avenida.
- Con la metodología propuesta, se puede determinar el conjunto de resguardos óptimo combinando la explotación del embalse y la seguridad hidrológica de la presa.
- La variabilidad del nivel inicial aporta un factor de seguridad que generalmente no se tiene en cuenta al delimitar los resguardos en las Normas de Explotación. En el caso de estudio, este factor repercute positivamente desde el punto de vista de la seguridad hidrológica de la presa. Sin embargo, al no tenerse en cuenta la variabilidad del nivel inicial, los resguardos definidos no son óptimos desde el punto de vista de la explotación ordinaria del embalse.
- Para el caso de estudio se comprueba que si se tiene en cuenta la variabilidad del nivel inicial no sería necesario definir resguardos en ninguna de las estaciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los recursos informáticos y asistencia técnica proporcionada por el Centro de Supercomputación y Visualización de Madrid (CeSViMa). La investigación ha sido posible gracias a los fondos de la Fundación José Entrecanales Ibarra en el marco del programa “Becas para el Fomento de la Investigación” y del programa “Ayudas de Movilidad de Profesores Jóvenes” de la misma fundación.

REFERENCIAS

- Andreu, J., Capilla, J., Sanchis, E., 1996. AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology* 177(3-4), 269-291, doi: 10.1016/0022-1694(95)02963-X.
- Bianucci, P., Sordo-Ward, A., Perez, J.I., Garcia-Palacios, J., Mediero, L., Garrote, L., 2013. Risk-based methodology for parameter calibration of a reservoir flood control model. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13 (4), 965-981, doi:10.5194/nhess-13-965-2013.
- Blazkova, S., Beven, K., 2004. Flood frequency estimation by continuous simulation of subcatchment rainfalls and discharges with the aim of improving dam safety assessment in a large basin in the Czech Republic. *Journal of Hydrology* 292 (1-4), 153-172, doi: 10.1016/j.jhydrol.2003.12.025.
- Carvajal, C., Peyras, L., Arnaud, P., Boissier, D., Royet, P., 2009. Probabilistic modeling of floodwater level for dam reservoirs. *Journal of Hydrologic Engineering* 14 (3), 223-232, doi: 10.1061/(asce)1084-0699(2009) 14:3(223).
- Chang, J., Guo, A., Du, H., Wang, Y., 2017. Floodwater utilization for cascade reservoirs based on dynamic control of seasonal flood control limit levels. *Environmental Earth Sciences* 76(6), 260, doi:10.1007/s12665-017-6522-z
- Gabriel-Martin, I., Sordo-Ward, A., Garrote, L., G. Castillo, L., 2017. Influence of initial reservoir level and gate failure in dam safety analysis. Stochastic approach. *Journal of Hydrology* 550, 669-684, doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.05.032
- Girón, F., 1988. The evacuation of Floods during the Operation of Reservoirs. *Transactions Sixteenth International Congress on Large Dams*. June 13-16, San Francisco, USA, 1261-1283.
- Jiménez Álvarez, A. 2016. *Desarrollo de metodologías para mejorar la estimación de los hidrogramas de diseño para el cálculo de los órganos de desagüe de las presas*. Tesis Doctoral, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM), doi: 10.20868/UPM.thesis.39115.
- Kuczera, G., Lambert, M., Heneker, T., Jennings, S., Frost, A., Coombes, P., 2006. Joint probability and design storms at the crossroads. *Australian Journal of Water Resources* 10(1), 63-79.
- Lang, M., Ouarda, T. B. M. J., Bobée, B., 1999. Towards operational guidelines for over-threshold modeling. *Journal of Hydrology* 225(3), 103-117, doi: 10.1016/S0022-1694(99)00167-5
- Liu, P., Li, L., Guo, S., Xiong, L., Zhang, W., Zhang, J., Xu, C. Y., 2015. Optimal design of seasonal flood limited water levels and its application for the Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydrology* 527, 1045-1053, doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.05.055
- Loukas, A., 2002. Flood frequency estimation by a derived distribution procedure. *Journal of Hydrology* 255 (1-4), 69-89, doi: 10.1016/S0022-1694(01)00505-4.
- MARM, 2011. *Normas técnicas de Seguridad de Presas y Embalses (borrador julio, 2011)*. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, Madrid, España
- Michailidi, E. M., Bacchi, B., 2017. Dealing with uncertainty in the probability of overtopping of a flood mitigation dam. *Hydrology and Earth System Sciences* 21(5), 2497, doi: 10.5194/hess-21-2497-2017, 2017.
- MOP, 1967. *Instrucción para proyecto, construcción y explotación de grandes presas* (BOE, 27 de octubre, 1967). Ministerio De Obras Públicas, Madrid, España.
- Ouarda, T. B. M. J., F. Ashkar, N. El-Jabi, 1993. Peaks over threshold model for seasonal flood variations. *Engineering Hydrology: Proceedings of the Symposium (American Society of Civil Engineering)*, Reston, USA, 341-346
- Ren, M., He, X., Kan, G., Wang, F., Zhang, H., Li, H., Cao, D., Wang, H., Sun, D., Jiang, X., Wang, G., Zhang, Z., 2017. A Comparison of Flood Control Standards for Reservoir Engineering for Different Countries. *Water* 9 (3), 152.

- San Mauro, J., Salazar, F., Toledo, M., Caballero, F., Ponce-Farfán, C., Ramos, T. 2016. Modelación física y numérica de aliviaderos en laberinto con fondo poliédrico. *Ingeniería del agua*, 20(3), 127-138, doi:10.4995/ia.2016.4614
- Solera-Solera, A., Morales-Torres, A., Serrano-Lombillo, A., 2011. Cost estimation of freeboard requirements in water resources management, in: *Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management*. CRC Press, pp. 9–14. doi:10.1201/b11588-4
- Sordo-Ward, A., Garrote, L., Martin-Carrasco, F., Bejarano, M.D., 2012. Extreme flood abatement in large dams with fixed-crest spillways. *Journal of Hydrology* 466, 60–72, doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.08.009.
- Sordo-Ward, A., Bianucci, P., Garrote, L., Granados, A., 2014. How safe is hydrologic infrastructure design? Analysis of factors affecting extreme flood estimation. *Journal of Hydrologic Engineering* 19 (12), doi: 10.1061/(asce)he.1943-5584.0000981.
- Sordo-Ward, A., Gabriel-Martin, I., Bianucci, P., Garrote, L., 2017. A Parametric Flood Control Method for Dams with Gate-Controlled Spillways. *Water* 9 (4), 237, doi:10.3390/w9040237.
- Spanish National Committee on Large Dams (SPANCOLD), 2012. *Análisis de riesgos aplicado a la gestión de seguridad de Presas y embalses*. Explotación de Presas y Embalses. Guía Técnica de Seguridad de Presas, vol. 8(1). Madrid, España.
- USWRC, 1976. *Guidelines for determining flood flow frequency*. United States Water Resources Council, Bulletin 17, of the Hydrology Subcommittee. Washington D.C., USA