

E-10-2023

Comunicación científico-técnica

Contribución al comportamiento hidráulico de aliviaderos tipo canal para balsas

Contribution to the hydraulic behavior of channel spillways for water reservoirs.

Sánchez-Romero, F.J.^{a1}, Pérez-Sánchez, M.^b, Redón-Santafé, M.^{a2}, Torregrosa Soler J.B. ^{a3}, Ferrer Gisbert, C.^{a4}, Ferrán Gozávez, J. J.^{a5}, Ferrer Gisbert, A.^{a6}, Zapata Raboso, F.A.^c;

a Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n 46022. España.^{a1} fcosanro@agf.upv.es ^{a2} miresan@agf.upv.es, ^{a3} jbtorreg@fis.upv.es, ^{a4} caferrer@agf.upv.es, ^{a5} jjferran@agf.upv.es, ^{a6} aferrerg@agf.upv.es

b. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n 46022. España. mopesan1@upv.es.

c. Consellería de Agricultura, Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica. C/Profesor Sala,2 Alicante. zapata_fra@gva.es

Resumen:

Los aliviaderos tipo canal son un tipo de estructura muy utilizada en balsas para el vertido de los volúmenes sobrantes, y como elemento de protección frente a posibles sobrevertidos. En este sentido el dimensionado de este tipo de elementos y el cálculo del caudal máximo de salida está sujeto al caudal máximo de operación del sistema y al caudal máximo de lluvia sobre la superficie de la balsa. El caudal de diseño se verá afectado por la laminación que ejerce la superficie de la balsa.

En el presente artículo se analiza el funcionamiento de un aliviadero tipo canal con el objetivo de obtener expresiones simplificadas para el cálculo de:

- Tiempo para que el caudal de salida por el aliviadero sea igual al caudal de entrada a la balsa (suponiendo este caudal constante en el tiempo).
- Cálculo del volumen vertido para un determinado tiempo.
- Análisis de efecto laminador de la balsa, para entrada de caudal de lluvia con o sin caudal de funcionamiento de la balsa.

Para todos estos aspectos se presentan una serie de ejemplos de aplicación de estas metodologías simplificadas.

Palabras clave: Balsas, aliviadero, seguridad.



Abstract:

Channel spillways are a type of structure widely used in water reservoirs for the discharge of surplus volumes, and as a protection element against possible overflows. In this sense, the sizing of this type of element and the calculation of the maximum outlet flow is subject to the maximum operating flow of the system and the maximum flow of rainfall on the surface of the basin. The design flow rate will be affected by the lamination exerted by the surface of the basin. This paper analyzes the operation of a channel spillway with the objective of obtaining simplified expressions for the calculation of:

- Time for the outflow through the spillway to be equal to the inflow to the basin (assuming this flow constant in time).
- Calculation of the volume discharged for a given time.
- Analysis of the laminating effect of the basin, for rainfall inflow with or without the basin's operating flow.

For all these aspects, a series of examples of application of these simplified methodologies are presented.

Keywords: Water reservoirs, spillway, security

1. Introducción

Los aliviaderos son los elementos que permiten evacuar los caudales de agua, que entran a la balsa por encima del Nivel Máximo Normal. Los aliviaderos cumplen por tanto una importante función de seguridad, evitando que, en ningún caso, el agua pueda desbordar por la coronación de la balsa. Para este tipo de obras de tierra, un desbordamiento por coronación, supondría la rotura de la misma inevitablemente. Para presas el sobrevertido por coronación es una de las causas más importante de rotura, ya que es inherente a la dificultad para determinar con seguridad los caudales máximos de vertido necesarios para el dimensionamiento de los aliviaderos, por lo tanto el diseño de aliviaderos para presas de tierra adquiere una importancia fundamental. Para balsas, donde los caudales de entrada están perfectamente definidos, el riesgo de vertido por coronación es prácticamente inexistente. Aunque existen balsas que se alimentan de aguas superficiales de escorrentías, pero prácticamente en todos los casos estas captaciones se realizan con limitaciones hidráulicas por la conducción, desde los puntos de toma hasta la balsa. Por lo tanto, incluso en estos casos el caudal máximo de entrada posible es conocido, y por consiguiente el caudal de diseño del aliviadero.

Lo comentado anteriormente, no debe hacer pensar que el aliviadero es una obra de menor importancia frente a la seguridad como los demás elementos comentados anteriormente. El aliviadero se debe considerar como un elemento de igual importancia frente a la seguridad que otros elementos, diseñándose con los mismos criterios de garantías y fiabilidad establecidos para otros elementos de mayor responsabilidad.

El funcionamiento de los aliviaderos ha sido correcto, en general, a pesar de estar la mayoría dimensionados para unos caudales inferiores a los que serían razonables (caudal máximo en régimen de funcionamiento más caudal de lluvia). Esto es debido a la muy baja probabilidad de que coincidan las lluvias históricas con la balsa llena y con la entrada del caudal máximo. Además no se suele considerar el efecto de laminación que tiene la superficie de la balsa tanto para los caudales de entrada como para los de lluvia.

La tipología de los aliviaderos en balsas es bastante variada siendo la tipología en canales rectangulares con aporte frontal del caudal de vertido la más utilizada. Este tipo de aliviadero consiste en un canal de hormigón armado y sección rectangular, cuya solera se encuentra a la cota fijada como nivel máximo de la balsa. El canal cruza perpendicularmente el camino de coronación hasta el talud exterior, cubriéndose con losas de hormigón armado para mantener la continuidad del camino de coronación. El agua una vez recogida en un cuenco receptor sale frontalmente al canal de vertido [1].



Figura 1. Esquema y fotografías de aliviaderos de canal rectangular (aporte frontal del caudal de vertido). Balsa “El Toscar” Monóvar [2].

2. Materiales y métodos.

A continuación se desarrollan las expresiones de cálculo que caracterizan el funcionamiento hidráulico de aliviaderos de tipo canal, así como el efecto de laminación que la superficie de la balsa realiza.

Cálculo del tiempo para un caudal constante de entrada.

Se supone que el nivel del agua en la balsa llega justo al labio del aliviadero y que entra un caudal de entrada constante el tiempo que debe estar vertiendo el aliviadero para llegar a igual al caudal de entrada, se podrá calcular como:

El volumen instantáneo de líquido que entra a la balsa menos el volumen instantáneo que sale por el aliviadero será igual a:

$$V = Q \cdot dt = (Q_e - Q_s) \cdot dt \quad (1)$$

dt : Incremento de tiempo en segundos.

Q_e : Caudal de entrada en m^3/s . Para este caso suponemos que el caudal de entrada Q_e es igual al caudal de régimen en funcionamiento $Q_e = Q_r$.

Q_s : Caudal de salida por el aliviadero en m^3/s . Este caudal es variable y depende del nivel h instantáneo en la balsa. Para cada tipo de aliviadero tendremos una formulación diferente. Para aliviadero tipo canal será:

$$Q_s = C_d \cdot L \cdot h^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

C_d : Coeficiente de descarga.

L : Longitud del aliviadero en metros.

h : Altura instantánea sobre el labio del aliviadero en metros.

El volumen instantáneo equivaldrá al aumento de volumen de líquido en la balsa para un mismo instante de tiempo, es decir:

$$V = Q \cdot dt = A \cdot dh \quad (3)$$

A : Área media de la balsa en m^2 a nivel del aliviadero. Se supone constante, ya que su variación desde el labio del aliviadero hasta cuando se produce el calado de vertido para el caudal entrante es despreciable, simplificando enormemente el análisis.

dh : Incremento de calado dentro de la balsa, en metros.

Q : Caudal total $Q = Q_e - Q_s$, para nuestro caso $Q = Q_r - Q_s$

Por lo tanto el tiempo desde que comienza el vertido hasta que por el aliviadero se vierte un caudal determinado será de:

$$T = \int_0^T dt = \int_0^{h_1} \frac{A}{Q} \cdot dh \quad (4)$$

T : Tiempo en el que se llega un caudal determinado de vertido en el aliviadero o una altura sobre el labio del aliviadero de h_1 .

h_1 : Altura sobre labio de aliviadero para un caudal determinado.

La altura h_1 sobre el aliviadero para un caudal dado será igual a:

$$h_1 = \left(\frac{K_r \cdot Q_r}{C_d \cdot L} \right)^{2/3} \quad (5)$$

K_r : Proporción del caudal de entrada Q_r . Los valores que puede adoptar este coeficiente son $0 < K_r < 1$.

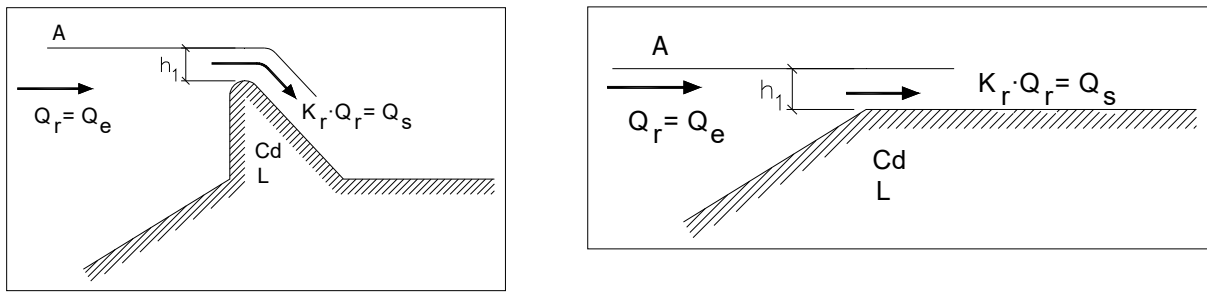


Figura 2. Esquemas de variables consideradas para funcionamiento con entrada de caudal constante.

Variando este coeficiente se puede calcular la variación del caudal de salida por el aliviadero respecto del tiempo.

$$T = \int_0^T dt = \int_0^{h_1} \frac{A}{Q} \cdot dh = \int_0^{h_1} \frac{A}{Q_r - Q_s} \cdot dh = \int_0^{h_1} \frac{A}{Q_r - C_d \cdot L \cdot h^{3/2}} \cdot dh = \int_0^{\left(\frac{K_r \cdot Q_r}{C_d \cdot L}\right)^{2/3}} \frac{A}{Q_r - C_d \cdot L \cdot h^{3/2}} \cdot dh$$

La integral no tiene solución analítica. Para su solución se supone que:

$$Q_r - C_d \cdot L \cdot h^{3/2} = \beta \cdot C_d \cdot L \cdot h^{3/2} \quad (6)$$

β : Coeficiente de ajuste.

Por lo tanto quedará de la siguiente forma:

$$T = \int_0^{\left(\frac{K_r \cdot Q_r}{C_d \cdot L}\right)^{2/3}} \frac{A}{\beta \cdot C_d \cdot L \cdot h^{3/2}} \cdot dh = \frac{-2 \cdot A}{\beta \cdot (C_d \cdot L)^{2/3} \cdot (K_r \cdot Q_r)^{1/3}}$$

El coeficiente β se ha ajustado resolviendo el modelo en incrementos de tiempo de 1 segundo, comprobándose que el coeficiente β depende significativamente de los valores de K_r y T . Se ha obtenido un coeficiente negativo, que reordenando el signo en la ecuación, quedará de la siguiente forma, siempre y cuando se introduzca β como positivo.

$$T = \frac{2 \cdot A}{\beta \cdot (C_d \cdot L)^{\frac{2}{3}} \cdot (K_r \cdot Q_r)^{\frac{1}{3}}} \quad (7)$$

El coeficiente β es un coeficiente que como se ha comentado depende principalmente de K_r y T , quedando la variable $K_r \cdot \beta^3$:

$$K_r \cdot \beta^3 = \left(\frac{2 \cdot A}{(C_d \cdot L)^{\frac{2}{3}} \cdot T \cdot (Q_r)^{\frac{1}{3}}} \right)^3 \quad (8)$$

La expresión (8) proporciona para un tiempo T y caudal Q_r , el valor del porcentaje de salida K_r que vendrá dado según la siguiente relación con $K_r \cdot \beta^3$.

$$K_r = \frac{e^{2.1566 - 1.0078 \cdot \ln(K_r \cdot \beta^3) + 0.0871 \cdot (\ln(K_r \cdot \beta^3))^2 - 0.00553 \cdot (\ln(K_r \cdot \beta^3))^3}}{1 + e^{2.1566 - 1.0078 \cdot \ln(K_r \cdot \beta^3) + 0.0871 \cdot (\ln(K_r \cdot \beta^3))^2 - 0.00553 \cdot (\ln(K_r \cdot \beta^3))^3}} \quad R^2 = 0.9999 \quad (9)$$

Cálculo del volumen vertido para un caudal constante de entrada.

Volumen vertido por el aliviadero en m^3 , para un tiempo T quedará como:

$$V_{vertido} = A \cdot \left(\frac{Q_r}{C_d \cdot L} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{2 - \beta \cdot K_r}{\beta \cdot (K_r)^{\frac{1}{3}}} \right) \quad (10)$$

Funcionamiento del aliviadero tipo canal con entrada de lluvia sobre la balsa.

Para este caso se considera que el caudal de salida por el aliviadero es igual al caudal de entrada Q_r . En este régimen comienza a caer sobre la superficie (A) de la balsa una lluvia con un caudal máximo de Q_{ll} y con una duración de T_{ll} .

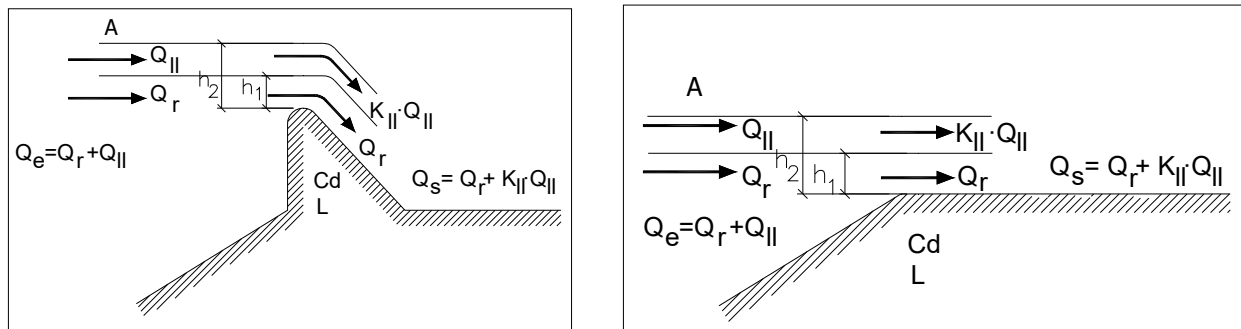


Figura 3. Esquemas de variables consideradas para funcionamiento con entrada de lluvia.

Las variables para este caso quedarán como:

Q_r : Caudal de régimen en m^3/s . Caudal de funcionamiento de la balsa, que está saliendo constante por aliviadero en el momento que empieza la lluvia; h_1 : Calado existente sobre el aliviadero para un caudal saliente de Q_r igual a $h_1 = \left(\frac{Q_r}{C_d \cdot L} \right)^{\frac{2}{3}}$; C_d : Coeficiente de descarga; L : Longitud del aliviadero en metros; Q_{ll} : Caudal de lluvia en m^3/s . Este caudal se calculará en función de la intensidad de lluvia de la zona; T_{ll} : Tiempo de duración de la lluvia en segundos; K_{ll} : Coeficiente de laminación de la

lluvia. Su valor variará entre $0 < K_{ll} < 1$; Q_e : Caudal de entrada total en la balsa en m³/s, que será igual a $Q_e = Q_r + Q_{ll}$; Q_s : Caudal de salida total por el aliviadero en m³/s, que será igual a $Q_s = Q_r + K_{ll} \cdot Q_{ll}$; h_2 : Calado existente sobre el aliviadero para un caudal de salida por el aliviadero de Q_s $h_2 = \left(\frac{Q_s}{C_d \cdot L}\right)^{2/3} = \left(\frac{Q_r + K_{ll} \cdot Q_{ll}}{C_d \cdot L}\right)^{2/3}$

Se supone que para el instante cero $t = 0$, está entrando un caudal Q_r , en la balsa y saliendo por el aliviadero este mismo caudal, por lo tanto en el labio del aliviadero existirá un calado h_1 . Para el instante cero, comienza la lluvia mediante un hidrograma rectangular de caudal máximo Q_{ll} , y duración T_{ll} . Para el tiempo T_{ll} , finaliza la lluvia, y para este tiempo el caudal que sale por el aliviadero será igual a $Q_s = Q_r + K_{ll} \cdot Q_{ll}$, por lo tanto la incógnita a resolver será K_{ll} .

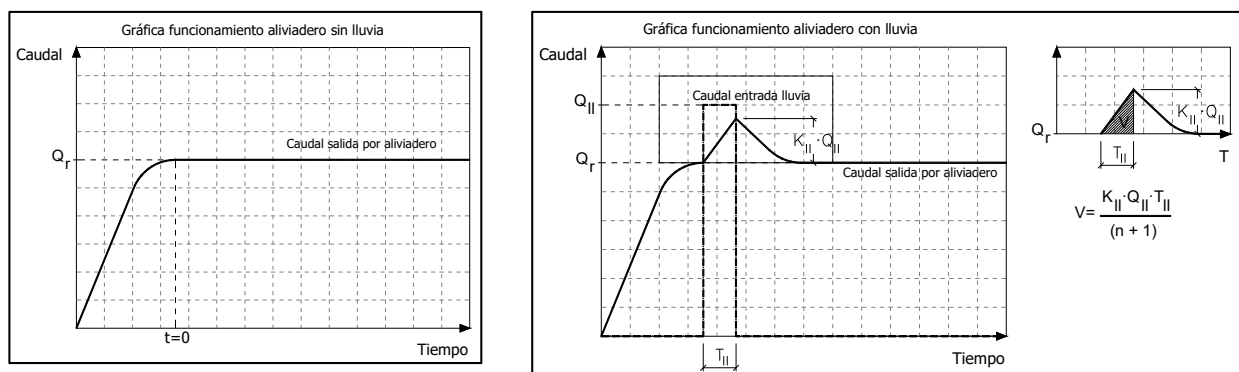


Figura 4. Izquierda Funcionamiento del aliviadero para un caudal constante de entrada Q_r sin lluvia. Derecha Funcionamiento del aliviadero para un caudal constante de entrada Q_r con entrada de lluvia, según un hidrograma rectangular de caudal Q_{ll} y duración T_{ll} .

Este coeficiente de laminación K_{ll} es variable con el tiempo, siendo:

$$t = 0 \quad K_{ll}(t) = 0; \quad t = T_{ll} \quad K_{ll}(t) = K_{ll}$$

Se supone que este coeficiente de laminación sigue la siguiente ley de variación:

$$K_{ll}(t) = K_{ll} \cdot \left(\frac{t}{T_{ll}}\right)^n \quad 0 \leq t \leq T_{ll} \quad (11)$$

El coeficiente n , es un coeficiente de forma de la función, para $n = 1$ la función es triangular, para otros valores de n toma otras formas.

Planteando balance de volúmenes en un determinado instante:

$$Q_{ll} \cdot T_{ll} - \frac{K_{ll} \cdot Q_{ll} \cdot T_{ll}}{n + 1} = A \cdot \left(\left(\frac{Q_r + K_{ll} \cdot Q_{ll}}{C_d \cdot L}\right)^{2/3} - \left(\frac{Q_r}{C_d \cdot L}\right)^{2/3} \right) \quad (12)$$

De la (12), se conocen todos los parámetros excepto n y K_{ll} , conociendo n , se puede resolver la ecuación, y calcular K_{ll} .

Se ha programado un modelo numérico en hoja de cálculo, que resuelve el sistema mediante incrementos de tiempo, obteniéndose el valor de K_{ll} , y paralelamente los valores de n , aplicándose a valores más usuales de balsas, obteniéndose para el parámetro n :

$$n = 0.6615 \cdot (Q_r + 0.1)^{-0.18776} \cdot (A)^{0.7627} \cdot (C_d \cdot L)^{-0.4557} \cdot (Q_{ll})^{-0.07669} \cdot (T_{ll})^{-0.81224} \quad (13)$$

La forma de operar para obtener el valor de K_{ll} , será la siguiente:

- Se calculará el valor de n , según (13).
- Se resolverá la (12), obteniendo el valor de K_{ll} . Esta ecuación se puede resolver mediante métodos numéricos, o convertirla en una ecuación de tercer grado, con solución directa (método de Cardano y Tartaglia).
- En algún caso se pueden obtenerse valores ligeramente mayores que 1, para estos casos $K_{ll} = 1$.

3. Resultados

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para la validación de la formulación propuesta para un conjunto de balsas representativas por área y caudal, aplicándose un modelo completo que resuelve paso por paso, y los modelos simplificados propuestos. Se considera un coeficiente de descarga de $C_d = 1.7$, $K_r = 0.9999$ y un tiempo en modelo completo de 60 segundos.

Tabla 1. Resultados obtenidos para entrada de caudal constante

Nombre Balsa	Área de coronación (m ²)	Long. labio vertido (m)	Caudal máximo (l/s)	Tiempo		Volumen	
				Modelo completo (hr)	Formulación Propuesta (hr)	Vertido Modelo completo (m ³)	Vertido formulación (m ³)
San Pascual	61 517	5.80	150	46.22	46.47	21 198	21 320
San Joaquín	23 780	2.60	150	30.45	30.67	13 969	13 991
Raspay I	5 459	3.00	300	4.90	5.09	4 501	4 643
Cerro de las Águilas	96 930	2.90	1 000	61.15	61.42	186 986	186 776
La Boquera	36 120	4.20	150	33.60	33.84	15 412	15 436
El Federal	90 947	1.50	550	109.42	109.77	184 004	183 593

Se aplica la formulación propuesta para el caso en el que sobre la superficie de una balsa existe una lluvia con un caudal determinado y un tiempo determinado, calculándose el caudal máximo que se vierte por el aliviadero, sin que exista otro tipo de caudal de entrada en la balsa.

Tabla 2. Resultados obtenidos para entrada de caudal producido por la lluvia en un tiempo T_{ll}

Nombre Balsa	Área de coronación (m ²)	Long. labio vertido (m)	Coefficiente de Descarga a C_d	Caudal máximo lluvia Q_{ll} (m ³ /s)	Tiempo lluvia T_{ll} (seg)	Caudal máximo según modelo completo (m ³ /s)	Caudal máximo según formulación (m ³ /s)
La Cuesta	79 000	17.5	1.7	3.34	3 600	1.315	1.299
Salse III	72 000	4	2.2	2.75	3 600	0.408	0.395
Salse II	43 600	4	1.7	1.64	3 600	0.300	0.293
Salse I	33 914	4	1.7	1.28	3 600	0.292	0.286
José García Antón	47 771	7	3.2	1.60	3 600	0.681	0.670
Relleu	25 131	5	2.6	0.88	3 600	0.408	0.403

Se aplica la formulación propuesta para el caso de que en la balsa entre un caudal constante e igual al caudal de régimen máximo, suponiendo que por el aliviadero sale ese mismo caudal. Simultáneamente sobre la superficie de la balsa cae una lluvia con un caudal Q_{ll} y tiempo T_{ll} .

Tabla 3. Resultados obtenidos para entrada de caudal contantes y caudal producido por la lluvia en un tiempo T_{ll}

Nombre Balsa	Caudal Régimen máximo Q_r (m ³ /s)	Caudal máximo lluvia Q_{ll} (m ³ /s)	Tiempo lluvia T_{ll} (seg)	Valor según modelo completo K_{ll}	Valor según formulación K_{ll}	Caudal máximo Según modelo completo (m ³ /s)	Caudal máximo según formulación (m ³ /s)
La Cuesta	12	3.34	3 600	0.809	0.7800	14.702	14.605
Salse III	0.4	2.75	3 600	0.2595	0.2586	1.113	1.111
Salse II	0.8	1.64	3 600	0.3806	0.3792	1.424	1.421
Salse I	0.8	1.28	3 600	0.4551	0.4536	1.382	1.380
José García Antón	0.15	1.60	3 600	0.5193	0.5190	0.981	0.980
Relleu	0.2	0.88	3 600	0.6045	0.5929	0.731	0.7217

Como se puede observar los resultados obtenidos con la formulación propuesta son válidos en comparación con un modelo más complejo, y en el que se necesita medios informáticos para su resolución.

Análisis del efecto laminador

Para evaluar este efecto se han elaborado una serie de gráficas, con los datos calculados según el modelo numérico completo y valores más usuales para balsas, donde se muestran los ratios de laminación promedio (para diferentes valores L) según el índice:

$$i_{laminación} = \frac{Q_{max}}{Q_r + Q_{ll}}$$

Q_{max} : Máximo caudal vertido por el aliviadero $Q_{max} = Q_r + K_{ll} \cdot Q_{ll}$; K_{ll} : Valor de $K_{ll}(t)$ para $t = T_{ll}$

Los valores de $i_{laminación}$ se han obtenido para diferentes valores de Q_r/Q_{ll} . Para una mejor comprensión de las gráficas a partir de valores $\frac{Q_r}{Q_{ll}} > 5$, se ha variado la escala de ordenadas.

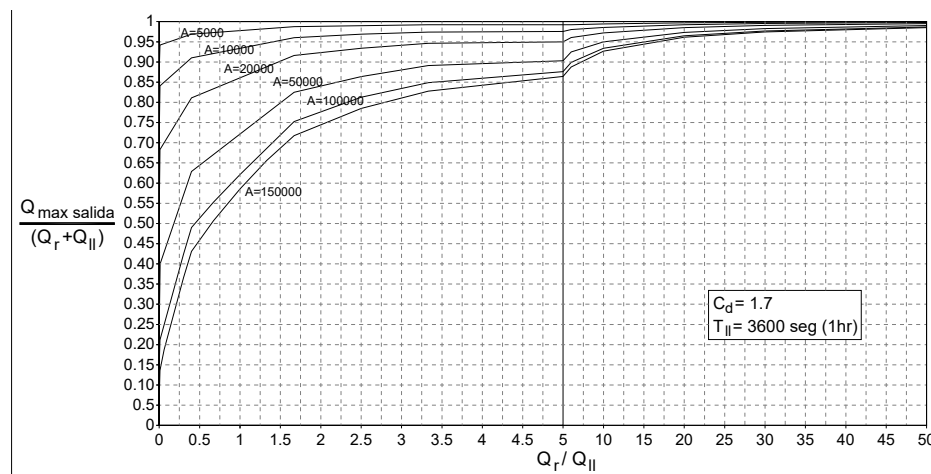


Figura 6. Ejemplo de laminación para un $C_d = 1.7$ y diferentes Áreas de coronación, para un tiempo de lluvia de 3600 segundos.

4. Conclusiones

Las conclusiones más importantes que podemos obtener de la formulación propuesta (método simplificado) para el análisis de aliviaderos tipo canal son:

La formulación propuesta para el cálculo del tiempo y el volumen vertido en el que se llega a un determinado caudal de salida por un aliviadero tipo canal, resulta robusta y simple de aplicar, obteniéndose resultados con errores despreciables frente a modelos más complejos y difíciles de manejar sin herramientas informáticas.

El cálculo del tiempo y volumen vertido proporciona información muy útil, que puede ser utilizada por ejemplo para:

- Prueba del funcionamiento del aliviadero, determinando el tiempo necesario para un caudal determinado, y el volumen vertido. Lo que permite planificar esta tarea.
- Explotación de la balsa, ya que permite el manejo de los recursos de un manera simple y fácil, pudiéndose aplicar por ejemplo cuando existen sistemas de llenado a una balsa por vertido del aliviadero de obra balsa cercana, permitiendo el cálculo de volúmenes y caudales entrantes en función del tiempo.

Cálculo de caudal máximo de vertido cuando existe un caudal constante de regimen y un hidrograma rectangular de lluvia, comprobándose que existe una laminación, que a efectos del dimensionamiento tanto del aliviadero, como de las conducciones de aguas abajo, puede ser significativa.

A partir de áreas de 10 000 m², el efecto laminador empieza a ser importante, dependiendo del valor Q_r/Q_u .

Con el fin de fijar criterios el estudio de valores laminados en balsas se podrá tener en cuenta a partir de balsas con una superficie de 10 000 m².

5. Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el proyecto SISIFO (Desarrollo de herramientas analíticas para caracterizar la Sostenibilidad de los sistemas hidráulicos Indicadores que definen Objetivos de desarrollo sostenible) PID2020-114781RA-I00 del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica e Innovación 2017-2020.

Referencias

- [1] F.A. Zapata Raboso, Análisis del comportamiento histórico de balsas de tierra en la Provincia de Alicante. Criterios de Diseño., Universidad Politécnica de Valencia, 2003.
- [2] F.-J. Sánchez-Romero, Criterios de seguridad en balsas de tierra para riego, Universitat Politècnica de València, 2014. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/38448>.