

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

**COMPARACIÓN DE CRITERIOS DE DISEÑO DE UN DESAGÜE DE FONDO EN UNA
PRESA HIDRÁULICA.
ANÁLISIS PARTICULAR DE LOS DESAGÜES DE FONDO DE ALGUNAS PRESAS
CHILENAS.**

**RICARDO GONZÁLEZ V.¹
ARTURO JORQUERA A.²**

RESUMEN

Se describen en el presente trabajo diversos criterios de diseño que han establecido organismos e investigadores para los desagües de fondo e intermedios de presas hidráulicas. A partir de dichos criterios, se efectúan algunos análisis de la capacidad de evacuación de esta obra, para diversas presas hidráulicas en Chile. Los autores enfatizan la relevancia de analizar, dentro de las obras de seguridad de la presa, la incorporación de un desagüe de fondo como un elemento facilitador de la operación y construcción de las presas siendo además una herramienta eficaz para manejar y controlar los riesgos de falla de la obra frente a eventos imprevistos.

¹Ingeniero Civil, Especialidad Hidráulica Gerencia de Ingeniería, ENDESA. Profesor Jornada Parcial, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile - mail: rjgv@endesa.cl.

²Ingeniero Civil, Jefe Especialidad Hidráulica Gerencia de Ingeniería, ENDESA. Profesor Jornada Parcial, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile - mail: aja@endesa.cl.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los temas de mayor relevancia al momento de definir un proyecto de la presa de un embalse es el de proveer las seguridades adecuadas para el buen funcionamiento y control de los riesgos que su existencia podría implicar para las personas y obras de infraestructura de las zonas ubicadas hacia aguas abajo de la estructura.

Hemos visto en los últimos años una creciente tendencia mundial hacia un aumento de los períodos de retorno de diseño de las obras de seguridad de las presas y ya nos resulta mucho más habitual el hablar de caudales de verificación asociados a crecidas de muy altos períodos de retorno e incluso a la crecida máxima probable (CMP). También, ya nos resulta más familiar hablar de estudios de inundaciones asociados a caudales enormes de rotura, a Planes de Emergencia asociados a estas inundaciones y a que en definitiva, no podemos soslayar el riesgo incremental que nuestras obras le producen a la comunidad. Consecuentemente con esto vemos también que las autoridades de agua están exigiendo con mucho mayor celo la evaluación de estos riesgos y la incorporación de mecanismos y planes de contingencia al momento de otorgar los permisos de construcción de estas obras.

Frente a esta problemática, debemos actuar con prontitud y eficacia. Una vía lógica es enfrentar el problema mejorando las estructuras tradicionales de manejo de crecidas como son los vertederos o aliviaderos. Ello parece adecuado y necesario. Sin embargo, estas obras de primera relevancia al momento de manejar crecidas hidrológicas, están por definición asociadas a la evacuación controlada de las porciones superiores de los embalses evitando el sobrepaso incontrolado de las obras, pero no necesariamente serán concebidas para enfrentar posibles daños asociados a otros fenómenos que afecten directamente a la integridad del cuerpo de la presa. Para ello, en este trabajo, se retoma la importancia de revisar la implementación de una obra de importancia capital al momento de otorgar mecanismos de acción para prevenir y afrontar aspectos de seguridad de las presas como son los desagües de fondo (o intermedios). Estas obras, adecuadamente diseñadas y operadas, serán valiosos aliados al momento de querer enfrentar y manejar situaciones de mayor o menor riesgo para las presas y su entorno.

Para enfrentarse al diseño hidráulico de esta obra, nos debemos plantear primeramente cuales son los riesgos que intentaremos controlar o mitigar con la obra, las condicionantes hidrológicas y luego deberemos establecer los criterios o reglas que la obra deberá satisfacer. Este es un proceso particular de cada obra, pretendiendo este trabajo entregar un abanico amplio de posibles criterios para evaluación y apoyo a los ingenieros hidráulicos encargados de estos diseños.

El objetivo básico de un desagüe de fondo es el de poder controlar el volumen embalsado a un nivel favorable a definir por el operador de la obra, bajo ciertas normas de actuación previas, y como apoyo a los vertederos y obras de toma. Algunos de los criterios específicos de manejo involucran aspectos de seguridad como el de poder controlar el nivel de agua durante el proceso de llenado de los embalses, proveer de un apoyo al manejo de crecidas (conjuntamente con el vertedero) y, en caso de emergencias de diversa índole, poder efectuar un vaciado parcial o total del cuerpo de agua. Otros aspectos operativos de relevancia son el de poder satisfacer requerimiento de entregas de agua a pie de presa y aumentar la vida útil de los embalses mediante purgas de los sedimentos acumulados en su vaso.

2. ASPECTOS GENERALES

La necesidad de incluir el desagüe de fondo en una presa puede basarse en aspectos de seguridad, operacionales u de otra índole, tal como se señala en los acápites siguientes.

2.1 Aspectos de seguridad.

La utilización de un desagüe de fondo permite obtener mejoras en la seguridad de las presas tales como el controlar la velocidad de llenado del embalse (de acuerdo a los especificaciones técnicas del diseñador de la presa), deprimir el nivel del embalse ante eventos imprevistos que pongan en riesgo las obras y proveer de un resguardo en el embalse frente a crecidas y colaborar para su evacuación.

2.2. Aspectos Constructivos.

Uno de los aspectos de mayor utilización de los desagües de fondo, especialmente para presas implantadas en cajas de río de ancho reducido y caudales de desvío elevados es el de poder colaborar con el Túnel de Desvío durante el cierre del río.

2.3. Aspectos operacionales.

Entre los aspectos operativos que se obtienen beneficios con la incorporación de un desagüe de fondo están los de proveer de flexibilidad para el manejo de los niveles de los embalses, permitir la entrega de caudal para cubrir demandas aguas abajo de la presa (demandas de riego, caudal ecológico, etc.), permitir la inspección y reparación periódica de las obras sumergidas, y controlar la acumulación de sedimentos mediante purgas (sluicing y flushing).

Desde el punto de vista ambiental, el desagüe de fondo debería permitir la entrega de caudal mínimos en cualquier situación de nivel del embalse, tal como podría ser en una situación crítica en que la central esté detenida y el vertedero no tenga carga suficiente para entregar dicho caudal.

3. ASPECTOS RELACIONADOS CON LA EXPERIENCIA NACIONAL E INTERNACIONAL EXISTENTE.

A nivel normativo, en la experiencia internacional y nacional no existen criterios unificados para el dimensionamiento de la capacidad de los desagües de fondo, existiendo solamente recomendaciones y una serie de criterios generales. A continuación, se discuten aspectos relacionados con la experiencia internacional y nacional en relación a este tema:

3.1. EXPERIENCIA INTERNACIONAL

A nivel internacional, el Corps of Enginneers, en su manual denominado “Hydraulic Design of Reservoir Outlet Structures” (EM 1110-2-1602 de 1980) entrega recomendaciones generales de la aplicabilidad de esta obra y provee de una guía de diseño general para poder determinar las curvas de descarga de la obra y también recomendaciones en relación al diseño de las estructuras de aireación requeridas para prevenir la cavitación. Este manual no define criterios específicos de diseño.

Más completas resultan, en relación a aspectos de diseño, las Guías Técnicas del Comité Nacional Español de Grandes Presas (www.spancold.es) donde se entregan diversas recomendaciones en relación a la seguridad de Presas.

En la Guía Técnica “Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de grandes presas” (IPCEGP, MOPT, 1967), que en su artículo 20 establece define a los desagües de fondo, indicando los criterios generales a considerar para definir su capacidad así como también indica la necesidad de que en cada presa se proyecten, como mínimo, dos desagües de fondo (Artículo 20.4).

Posteriormente dicho instructivo fue sustituido por el Reglamento Técnico de Seguridad de Presas con el objeto de “...*fijar los criterios de seguridad que han de tenerse en cuenta para prevenir y limitar social y ambientalmente los riesgos potenciales que estas infraestructuras (presas) pueden representar*”. Este reglamento indica en su Artículo 14 los criterios a considerar para establecer la capacidad de los órganos de desagüe y en su Artículo 15 los criterios a considerar para definir el control de los órganos de desagüe, manteniendo, en este último artículo, el requerimiento del Instructivo de que en las presas mayores los desagües profundos deban contar con, al menos, dos conductos cada uno y, como mínimo, con dos elementos de cierre colocados en serie (Artículo 15.4 del Reglamento). Por presas mayores, dicho reglamento las clasifica como Ay B y que, en términos generales, son aquellas presas cuya rotura o mal funcionamiento pudiese producir daños ambientales mayores y/o “*afectar a un reducido número de viviendas*” (Artículo 3.2).

Otra institución de carácter internacional que se ha preocupado del tema es la International Commission on Large Dams (ICOLD), que en su publicación “Spillways for dams”, (ICOLD, 1987) se refiere a este tipo de obras como elemento de evacuación de crecidas y presenta recomendaciones generales en cuanto a la funcionalidad y características que debe tener este tipo de obras y se enuncian criterios para la disposición de válvulas y compuertas, de control y de emergencia, a disponer en estas obras.

En otra de las guías técnicas del Comité Español de Grandes Presas, la Guía Técnica 5 de “Aliviaderos y desagües”, se entregan una serie de criterios de operación de los desagües de fondo de forma de permitir el vaciado del embalse considerando la ocurrencia de eventualidades que exijan el descargar la presa en algunos días o semanas según cada criterio.

En la publicación “Dam hydraulics” (Vischer y Hager, 1999) se indica que “en muchos países, el diseño de un desagüe de fondo es obligatorio, y su inclusión es fuertemente recomendada en otras instancias”. Dicha publicación indica que el llenado inicial del primer tercio de embalse debe ser efectuado cuidadosamente y que observaciones y mediciones deben ser ejecutadas durante varios días o semanas. Por otra parte, señala criterios para el vaciado del embalse e indica que el caudal durante maniobra no debe provocar inundaciones en sectores ribereños aguas abajo ni provocar inestabilidad de las riberas del embalse.

3.2. EXPERIENCIA NACIONAL

Analizando las grandes presas existentes en nuestro país se aprecia que en general es una obra de uso relativamente extendido pero sin que exista una claridad o uniformidad en relación a los criterios de diseño utilizados en cada caso, resultando que tanto sus capacidades como características son muy disímiles (ver numeral 4). A nivel de normativas, no existe a la fecha algún instructivo o reglamento que defina su uso.

Interesante resulta destacar la experiencia exitosa del proyecto Colbún donde se construyó un desagüe de fondo que permitió postergar el llenado del embalse mientras se estudiaban las filtraciones sufridas por una presa secundaria (“Pretil El Colorado”) requiriéndose su operación por 329 días de los cuales 5 días estuvo cerrado ya que los caudales fueron descargados por el evacuador de crecidas. La obra funcionó satisfactoriamente no encontrándose signos de cavitación en la superficie de la canalización. (Alvarado, Mery y L. de S. Pinto, 1986).

A nivel de la normativa nacional, no existe actualmente un cuerpo de prácticas usual ni normativo al respecto. Está pendiente la publicación oficial del Reglamento a que se refiere el artículo 295 inciso 2°, del Código de Aguas, que debería establecer las condiciones técnicas que deberán cumplirse en el proyecto, construcción y operación de las obras hidráulicas identificadas en el artículo 294 del referido texto legal donde se insertan las presas y los desagües de fondo.

Dicho reglamento, aún en etapa de revisión, fue enviado a consulta técnica de la SOCHID e ICOLD y actualmente continúa en período de revisión. Del documento enviado a consulta se puede destacar el Artículo 28, que indica:

“El diseño estructural de los embalses de agua, a que se refiere el artículo 26 del presente Reglamento, deberá considerar lo siguiente:....

...d) Obras de evacuación y desagüe. Las obras de evacuación y desagüe deberán considerar un elemento disipador de energía para las condiciones más adversas y su comportamiento debe asegurar el correcto funcionamiento de las obras para la crecida de diseño y evitar el colapso o avería grave de la presa para el caso de la crecida de verificación. No se deberá considerar la capacidad de evacuación de las tomas o captaciones definidas para la explotación, salvo que se justifique adecuadamente.

Sin perjuicio de las excepciones legales, la operación de los órganos de evacuación y desagüe no podrá generar caudales superiores a los afluentes del embalse, de manera tal que se aumenten los daños que se habrían producido, en un determinado evento, en la situación sin proyecto.

e) Vaciado rápido. Para los embalses provistos de dispositivos que permitan un vaciado rápido, se deberá presentar un análisis donde se determinen los efectos estructurales en la presa asociados a esta característica. Por otra parte, se deberá realizar un análisis de estabilidad de las laderas de la cubeta del embalse con el fin de evitar efectos perjudiciales debido a eventuales deslizamientos, en el caso de variaciones bruscas del nivel de la poza. Además, deberán establecerse las medidas derivadas del análisis antes mencionado, para obtener un funcionamiento seguro de la obra, en las letras f) y g) del artículo 17 del presente Reglamento.

En el artículo 28 si bien se hace mención a los “dispositivos que permitan un vaciado rápido”, no se incluyen en el referido texto, cláusulas específicas que acoten el diseño de la obra, manteniéndose la ausencia de indicaciones oficiales que pudieran guiar y normar su diseño y funcionamiento.

Aparte de este cuerpo legal, aún no publicado, en el año 2008 se publicó en el diario oficial el Reglamento de la Ley 20.304 sobre la Operación de Embalses frente a Alertas y Emergencias de Crecidas, más conocida como la “Ley de Embalses”, mientras que en el año 2010 se publicó a su vez el correspondiente Reglamento donde se establecen condiciones y características de los resguardos y de la magnitud de las crecidas posibles para los denominados “Embalses de Control”. En estos cuerpos legales tampoco se hace mención específica del uso de los desagües de fondo si bien se define la necesidad de establecer un “Volumen de Resguardo Adicional” para los embalses y con ello poder enfrentar las crecidas, haciendo alusión a los vertederos sin mencionar explícitamente, a pesar de su evidente posible colaboración, a los desagües de fondo.

Por lo anterior, se puede apreciar, la Autoridad de Aguas aún no ha incluido requisitos especiales para el uso y diseño de esta obra dentro su normativa.

En la Tabla 1 se indican los criterios específicos establecidos por los autores y organismos ya mencionados (así como los descritos por otras publicaciones técnicas en relación a este tema) para las etapas de construcción y de puesta en carga o llenado de una presa. En la Tabla 2 por su parte se incluyen los criterios para la etapa de operación de una presa.

Tabla 1. Criterios diseño de un Desagüe de Fondo para las etapas de construcción y puesta en carga.

Crit.	Fase	Condición	Función	Recomendación
1	Construcción	Normal	Colaboración en el cierre del desvío del río.	Los desagües deben tener una capacidad superior a la Avenida de Proyecto durante la Fase de Cierre del Desvío del río (crecida que se podría producir durante el corto período asociado al cierre del desvío del río). Dado el corto período, el probablemente bajo período de retorno de la avenida y la poca carga hidráulica disponible, este criterio podría ameritar la disposición de conductos de desagüe provisionales (Ramos et al, 2008).
2				Colaborar en la faena de cierre del túnel de desviación permitiendo que una parte del caudal se evacue por él (Alvarado et al, 1986).
3	Puesta en Carga	Normal	Control del llenado.	De acuerdo a la Guía Técnica N°5 de la Autoridad Española, durante el llenado del embalse se permite llenar el embalse en un período relativamente corto siendo preciso extremar las precauciones a partir del 60-70% de la altura máxima. Superado este nivel, es recomendable que los desagües profundos sean capaces de mantener el nivel del embalse e incluso bajarlo se observa alguna anomalía (suponiendo en el embalse caudales normales) por lo que "el conjunto de los desagües y con un caudal entrante igual al medio, se consiga rebajar un 15% la carga en el curso de unos días" (Ramos et al, 2008).
4				A partir de la recomendación de la Guía Técnica N° 5 de la Autoridad Española, Ramos, Chichío et al., proponen simplificar el criterio considerando que la capacidad de los desagües sea aproximadamente el doble del mayor de los caudales medios mensuales (Ramos et al, 2008).
5				En primer llenado, el Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses especifica para este caso que <i>"los desagües profundos de las presas, incluyendo los desagües de fondo, estarán dimensionados para facilitar conjuntamente con las tomas de agua, el control del nivel del embalse, en particular durante su primer llenado"</i> (MOPTT-España, 1996).

Crit.	Fase	Condición	Función	Recomendación
6			Entrega de un Caudal Mínimo permanente.	Entrega del 100% del caudal mínimo permanente que la obra deba satisfacer, considerando las labores propias de la secuencia constructiva de la presa (Criterio Endesa, 2011).
7		Eventual	Evacuación de avenidas	La capacidad de los desagües debiera ser suficiente para evacuar el volumen de la avenida de proyecto para la fase crítica de la puesta en carga (una vez superado el 60% de la altura del embalse total, en menos de 15 días y con un incremento de la carga hidráulica inferior al 15%, adoptando la más restrictiva de las dos condiciones (Ramos et al, 2008).

Tabla 2. Criterios diseño de un Desagüe de Fondo para la etapa de operación

Crit.	Fase	Cond.	Función	Recomendación
8	Operación	Normal	Creación de resguardos estacionales	En el caso que el embalse deba proveer resguardos estacionales y se disponga de un aliviadero de capacidad limitada o bien sin compuertas, los desagües de fondo deben ser capaces de reducir el volumen embalsado hasta conseguir el máximo resguardo estacional en el curso de 7 días, suponiendo un caudal de entrada igual al mayor de los caudales medios mensuales y partiendo del Nivel Máximo Normal (Ramos et al, 2008).
9			Inspección de Obras Sumergidas	Debe permitir el vaciado hasta la cota donde esas obras puedan ser accesibles en períodos de bajos caudales (ICOLD, 1987; Minor y Bodenmann, 1979).
10			Vaciado Normal	Con el nivel del embalse a la mitad de la altura de la presa, la capacidad de los desagües profundos será al menos el caudal medio del río
11				Con el nivel del embalse a la mitad de la altura de la presa, la capacidad total de los desagües profundos (incluyendo las tomas y la central eléctrica si fuese el caso) será al menos tres veces el caudal medio del río (MOPTT-España, 1967)
12				Durante el vaciado del embalse permitir el tránsito de una crecida menor (1:10 a 1:50 años) con un aumento de nivel limitado, permitiendo bajar el nivel al valor inicial una vez pasada la crecida (Alvarado et al, 1986).
13			Entrega de un Caudal Mínimo permanente.	Entrega del 100% del caudal mínimo permanente, considerando como cota de operación la asociada a la cota mínima o inferior del denominado volumen útil del embalse. Para un mejor control del caudal entregado y también para disminuir el riesgo de bloqueo de los ductos, se deben disponer varios dispositivos equivalentes que permitan repartir y/o redundar el caudal mínimo de entrega mediante las correspondientes válvulas de control y emergencia. (Criterio Endesa, 2011).
14			Daño por Cavitación	Para prevenir la cavitación se recomienda considerar un revestimiento de acero en caso de disponerse de velocidad elevadas (Minor Bodenmann, 1979; ICOLD 1987). Se reportan velocidades entre 5 y 44 m/s en el DF de Colbún con buenos resultados (Minor y Bodenmann, 1979).
15		Eventual	Bajada total o parcial del embalse	Que con el conjunto de los desagües pueda lograrse, en el curso de una semana, reducir a la mitad la carga sobre la presa, supuestos nulos los caudales de entrada al embalse (MOPTT-España, 1996).

Crit.	Fase	Cond.	Función	Recomendación
16				Que con el conjunto de los desagües y con un caudal entrante igual al medio, se consiga rebajar un 15% la carga en el curso de unos días (MOPTT-España, 1996).
17				Que durante el trimestre más seco del año el desagüe de fondo permita bajar el embalse hasta el nivel mínimo de explotación en un tiempo razonable (MOPTT-España, 1996).
18				Que durante ese trimestre, y partiendo del nivel mínimo de explotación, el desagüe de fondo pueda vaciar totalmente el embalse y mantenerlo así (MOPTT-España, 1996).
19			Existe un riesgo latente que pudiere generar alguna inestabilidad de la presa, como por ej. taludes potencialmente inestables del vaso.	Ser posible deprimir el embalse a un nivel mínimo el cual permita la operación normal de la planta y mantener este nivel en un período deseable superior a un mes. Esto debería ser posible dentro de un razonable período de tiempo e independiente de las condiciones hidrológicas prevalecientes tanto como sea posible (Minor y Bodenmann, 1979).
20				Limitar la elevación del nivel del embalse mientras por el embalse transita una crecida de período de retorno menor (1:10 a 1:50). Después que dicha crecida ha pasado la superficie debería ser reducida al nivel deseado dentro de un período razonable de tiempo (Minor y Bodenmann, 1979).
21				En casos particulares, puede ser deseable bajar el embalse a un muy bajo nivel o aun requerirse bajarlo completamente. En este caso, debería agregarse a las reglas R1 y R2 una tercera relación, R3, que permita que durante los períodos de buen tiempo, sea posible bajar el embalse a un muy bajo nivel o aún bajarlo completamente (Minor y Bodenmann, 1979).
22			Colaboración durante crecidas	Para presas bajas que dispongan de volúmenes de regulación importantes y vertederos sin compuertas, sería posible usar el desagüe de fondo para colaborar con la capacidad de evacuación del vertedero para crecidas entre 1:10 a 1:200. Este desagüe podría ser usado al inicio de la crecida con una disminución de los caudales peak totales evacuados de un 20 a un 30%. Para ello el desagüe de fondo debería ser diseñado con una capacidad cercana al 10 al 20% del caudal total de evacuación.(ICOLD, Committee on cost saving dams, Reviewings of Bulletins 73 and 83, 2008).
23				El aliviadero será diseñado considerando el 100% de la Avenida de Proyecto, pero los desagües de fondo deberán ser capaces de absorber un 10% del caudal de la Avenida de Proyecto (laminado) a modo de margen de seguridad (Minor y Bodenmann, 1979).
24			Necesidad de proveer resguardos frente a crecidas.	Para el caso de aliviaderos sin compuertas o en caso que no baste sólo con el aliviadero, es necesario complementar esa función con los desagües profundos. En este caso dichos órganos deberían ser capaces de evacuar del embalse un volumen igual a un quinto del volumen de la Avenida de Proyecto en un tiempo máximo de 12 horas, suponiendo el nivel del embalse a su Nivel Máximo Normal y un caudal de entrada igual a 3 veces el caudal medio del río (Ramos et al, 2008).
25			Limpieza de sedimentos	-Disponer al menos dos conductos de diámetro igual a 2 m.
26				Un embalse cuya presa dispondrá de un desagüe de fondo podrá ser utilizado para hacer limpiezas de sedimento si el volumen de escorrentía anual en relación al volumen embalsado no sobrepasa el valor 50 (HR Wallinford, 1996)

Crit.	Fase	Cond.	Función	Recomendación
27				El desagüe de fondo podrá ser usado para efectuar "flushing" si su capacidad sobrepasa en al menos dos veces el caudal medio anual considerando que el embalse se encuentre 50% lleno (HR Wallinford, 1996).
28				El desagüe de fondo debe permitir un vaciado completo para asegurar una limpieza efectiva por flushing (HR Wallinford, 1996)
29			Verificación del caudal frente a sabotaje o error operación.	El caudal desaguado con el embalse a su Nivel Máximo Normal por la suma de los aliviaderos y desagües, cuya apertura simultánea sea posible, será inferior a la máxima avenida normal, que se estimará en la de 50 años de período de retorno sin laminación.

4. ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE ALGUNOS DESAGÜES DE FONDO DE PRESAS EN CHILE.

En este numeral se recopilan antecedentes relacionados con el dimensionamiento y operación de los desagües de fondo existentes en el país. Para fines del presente trabajo se ha procedido según se indica en los acápite 4.1 y 4.2.

4.1. Recopilación de antecedentes.

En Chile existen una cantidad importante de embalses que han sido construidos u operados por el estado de Chile (MOP, a través de la ex - Dirección de Riego, actual Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) o por empresas particulares (ENDESA, COLBUN, etc.), los cuales han operado en el país durante los últimos 80 años. En la Tabla N° 3 se presenta un listado de los principales embalses existentes en Chile.

En particular, para los fines del presente trabajo, es de interés recopilar las principales características de los desagües de fondo que poseen los embalses que se encuentran en operación en Chile. Para lo anterior, se recurrió a los antecedentes disponibles en el archivo técnico de ENDESA), en el centro de información de recursos hídricos (CIRH) de la Dirección General de Aguas (DGA) y en el archivo técnico del Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), éstas dos últimas dependientes del ministerio de Obras Públicas (MOP). La revisión bibliográfica realizada sólo consideró los embalses ya construidos o en proceso de construcción.

Tabla 3: Embalses considerados en la Revisión Documental.

Región	Embalse	Año puesta en Servicio	Volumen [mill m³]	Estado
II	Conchi	1975	22	Construido
III	Santa Juana	1995	160	Construido
IV	La Laguna	1937	42	Construido
IV	Paloma	1967	755	Construido
IV	Cogotí	1951	148	Construido
IV	Recoleta	1934	97	Construido
IV	Puclaro	2000	80	Construido
IV	Corrales	2007	50	Construido

Región	Embalse	Año puesta en Servicio	Volumen [mill m³]	Estado
V	El Bato	-	25,5	en construcción
V	Aromos	1978	35	Construido
RM	El Yeso	1964	253	Construido
VI	Convento Viejo (Etapa II)	1993	237	en construcción
VI	Rapel	1967	695,7	Construido
VII	Laguna del Maule	1957	1420	Construido
VII	Digua	1968	87	Construido
VII	Bullileo	1948	70	Construido
VII	Colbún	1985	1500	Construido
VII	Melado (CH Pehuenche)	1991	133,6	Construido
VII	Ancoa	-	80	en construcción
VIII	Ralco	2004	1222	Construido
VIII	Pangue	1996	175	Construido
VIII	Angostura	-	100	en construcción

Los resultados de la revisión bibliográfica realizada se presentan en la Tabla 4, en la cual se describen las principales características de las obras de desagüe de distintos embalses en Chile. En los embalses de riego, es usual que las obras de desagüe actúen en conjunto con las obras de entrega a riego (válvulas o compuertas), en tanto que, en los embalses de uso hidroeléctrico se utilizan obras tales como: desagüe de fondo (Colbún) o de medio fondo como en el caso de Rapel y Melado. Los embalses que se presentan en la Tabla 4 fueron seleccionados considerando distintos aspectos, tales como: disponibilidad de la información, representatividad desde el punto de vista de su ubicación regional y el tipo de uso de cada reservorio.

Tabla 4: Principales características de las obras de desagüe.

Embalse	Obra de aducción	Qd (m³/s)	Desagüe de fondo (obra de entrega)
Santa Juana	- Tubería de acero, D = 1.600 mm, L = 280 m desde el tapón de cierre en el túnel de desvío hasta la casa de válvulas exterior.	30	- Dos válvulas de chorro cónico hueco de D = 1200 mm.
Puclaro	Válvula mariposa y tubería principal de D = 1,8 m, L = 175 m desde la torre de captación.	60	-Tubería de alimentación de las válvula de entrega de D = 1 m, válvulas de guardia y H-B de D = 0,9 m. - Desagüe de fondo: dos compuertas tipo Bureau of Reclamation de B = 1,0 m y H= 1,2 m.
Rapel	Dos pasadas por el cuerpo de la presa que terminan en orificios de B = 2,75 m y H = 4,4 m	700	- Dos compuertas de segmento de de B = 2,75 m y H = 4,4 m. (descarga de medio fondo)
Laguna del Maule	torre de captación de H = 32 m aprox y túnel de sección circular, D = 6,5 m y L = 120 m aprox.	100	2 válvulas mariposa de seguridad de D = 1,5 m y dos válvulas de servicio tipo chorro hueco de D = 1,1 m.
Digua	- túnel de aducción, L = 250 m	60	- 2 compuertas planas de servicio y de emergencia de B = 2,5 m y H = 3,65 m.
Colbún	Ubicado en uno de los túneles de desviación (sección ovoidal: H = 16.1 m, y B = 13.2 m) = 426 m, D	730	Dos compuertas planas de servicio y de emergencia de B = 2,5 m y H = 3,65 m.
Melado	Túnel de sección herradura, D = 6 m y L = 110 m aprox.	280	- 2 compuertas planas de servicio y de emergencia de B = 1,65 m y H = 3,0 m.

Embalse	Obra de aducción	Qd (m³/s)	Desagüe de fondo (obra de entrega)
			(descarga de medio fondo)
Ralco	Ubicado en túnel by-pass del túnel de desvío, sección herradura de fondo plano, D = 6,7 m, y L = 350 m,	165	- Compuerta plana deslizante de B = 2,4 m y H = 2,8 m y válvula H-B de D = 2,4 m.
Angostura	Túnel sección herradura de fondo plano, D = 8 m.	900	una compuerta de servicio tipo vagón y de una compuerta de emergencia, ambas de B = 6 m y H = 9 m.

Nomenclatura: H: altura, B: ancho, D: diámetro, L: largo, H-B: Howell - Bunger

Para cada embalse analizado, se recopiló la siguiente información: niveles característicos de la presa, niveles de operación del embalse, caudales medios mensuales afluentes, características de las obras de desagüe, curva de descarga de las obras de desagüe, curva de descarga del evacuador de crecidas y la curva de almacenamiento del embalse (nivel v/s volumen) .

4.2. Adopción de Criterios adoptados.

Sobre la base de los criterios señalados en el acápite anterior, y que se presentan en las Tablas 1 y 2, se han seleccionado criterios. Distinguiendo el caso del llenado y del vaciado de los embalses.

Para el caso del **llenado controlado del embalse**, se adoptaron los Criterios 3 y 4 indicados en la Tabla N° 1. Por otra parte, como criterios para evaluar la capacidad de los desagües frente a la **maniobra de vaciado del embalse**, se seleccionaron los Criterios 10, 15, 16, 17 y 18 de la Tabla N° 2.

Para efectuar la simulación de los procesos de llenado y vaciado de los embalses, se consideró la ecuación de continuidad : $\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_e - Q_s$, con ΔV : variación de volumen en el intervalo de tiempo Δt , Q_e : caudal afluente al embalse (m³/s) y Q_s caudal que sale del embalse.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

Al aplicar la metodología expuesta en el acápite 4.2 a cada uno de los embalses señalados en la Tabla 4.2, se obtienen los resultados que se presentan en las Tablas 5 y 6, para el caso de los criterios de llenado y vaciado respectivamente.

Tabla 5: Cumplimiento criterios para el llenado del embalse.

Embalse	Qa (m ³ /s)	Qmáxm (m ³ /s)	H presa (m)	Qd (m ³ /s)	C3		C4	
					Nº días	Cumple?	Q _{maxm} / Qd	Cumple?
Santa Juana	3	4	113	30	8.3	No	7.4	Si
Puclaro	10	13	83	60	6.3	Si	4.6	Si
Rapel	190	399	112	700		Si	1.8	No
Laguna del Maule	13	22	40	100	26.2	No	4.6	Si
Digua (*)	6	10	89	60	8.3	No	6.0	Si
Colbún	282	524	116	730	4.8	Si	1.4	No
Melado	185	323	90	281	-	No	0.9	No
Ralco	259	423	155	165	-	No	0.4	No
Angostura	458	708	50	900	1.2	Si	1.3	No

(*). Caudal medio anual referido al río Cato

Tabla 6: Cumplimiento criterios para el vaciado del embalse.

Embalse	(s/m ³) Qa	H presa (m)	(s/m ³) PQ	C10		C15		C16		C17		C18	
				Cap. con carga media (m ³ /s)	Cumple?	Nº días	Cumple?	Nº días	Cumple?	Nº días	Cumple?	Nº días	Cumple?
Santa Juana	3	113	30	28	Si	45	No	20	No	60	No	5	Si
Puclaro	10	83	60	49	Si	33	No	16	No	51	Si	1	Si
Rapel	190	112	700	100	No	10	No	11	No	2	Si	10	Si
Laguna del Maule	13	40	100	81	Si	85	No	30	No	117	No	87	No
Digua (*)	6	89	60	36	Si	45	No	16.9	No	65	No	4	Si
Colbún	282	116	730	492	Si	16	No	5.5	Si	16	Si	15	Si
Melado	185	90	281	170	No	4.0	Si	2.95	Si	2	Si	14	Si
Ralco	259	155	165	107	No	76	No	-	No	12	Si	120	No
Angostura	458	50	900	681	Si	0.9	Si	0.1	Si	0.1	Si	2	Si

6. COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES.

Existe una tendencia mundial en relación a mejorar el manejo y control de los riesgos en la construcción y operación de las presas hidráulicas. Actualmente en Chile, la Dirección General de Aguas, DGA, exige que previo a la construcción de las obras hidráulicas se presente la documentación técnica del proyecto que garantice que las obras hidráulicas...*“cumplan con estrictas normas de seguridad para proteger los derechos, la seguridad de terceros y el medio ambiente, en especial al agua como un recurso natural, dada la magnitud o ubicación de éstas con respecto a zonas urbanas, o bien por su vinculación con cauces naturales”*. Consistente con esta preocupación, se indican en este trabajo las bondades del uso de un desagüe de fondo en una

presa, tanto para las etapas de construcción como de puesta en servicio, así como la flexibilidad de operación y seguridad que otorga disponer de ella para efectos de controlar favorablemente los niveles del embalse.

De esta manera, se muestran en este trabajo una serie de directrices de diseño que puedan servir de apoyo para los ingenieros hidráulicos que participan en el diseño de una obra compleja como esta donde deben conjugarse funcionalidades muy diferentes para diferentes etapas de la vida del proyecto y con riesgos y condicionantes locales tan variables que dificultan el llegar a un criterio eventualmente único y válido para todos los casos. Los autores quisieron mostrar la gran variabilidad de posibles criterios para que sean en definitiva los proyectistas de cada obra los que seleccionan aquellos que se puedan adecuar mejor a la realidad de cada proyecto.

De los resultados presentados en el acápite 5, se desprende que el dimensionamiento de los desagües de fondo debe considerar el tipo y magnitud del régimen hidrológico a que esta afecta el embalse. Es así, que en el caso de los embalses ubicados en las regiones III y IV, las obras de desagüe de fondo son reemplazadas por las obras de entrega a riego, y dicha capacidad es suficiente si se considera la baja cuantía de los caudales afluentes a los embalses. Por otra parte, en los embalses ubicados en la zona centro – sur de Chile, las obras de desagüe son de mayor magnitud que en la zona norte, ya que los caudales afluentes a los embalses son mucho mayores.

Finalmente, es importante notar que aparte de los criterios de capacidad esbozados en el trabajo, un criterio elemental a adoptar al momento de considerar un desagüe de fondo es el de mantener en el tiempo la disponibilidad operativa de la obra, pues de otra manera, se puede dar la coyuntura, por lo demás habitual, de que la falta de operación y de verificación de los elementos civiles y electromecánicos de la obra inhiban su uso por parte de los operadores, al enfrentarse a una emergencia. Es responsabilidad de los operadores implementar inspecciones periódicas.

REFERENCIAS

Alvarado, L. y Mery, H. 1989. Diseño de la zona de compuertas del Desagüe de Fondo de Colbún. IX Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.

Alvarado, L., Mery, H. y Pinto, N. 1986. Desagüe de Fondo de la presa Colbún. Diseño, Experimentación y Seguimiento de su Operación, XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica.

Arcadis – Geotecnica. 2008. Ingeniería Básica. Proyecto Central Angostura. Colbún S.A.

Blind, H. 1985. Design criteria for reservoir bottom outlets. Water Power & Dam Construction. Comité Nacional Español de Grandes Presas (CNEGP): Guías Técnicas de Seguridad de Presas, Guía N°5, Aliviaderos y Desagües, 1997. (www.spancold.es)

Comité Nacional Español de Grandes Presas. 1997. Criterios para la evaluación de la capacidad necesaria de los desagües profundos. Guías Técnicas de Seguridad de Presas, Guía N°5, Aliviaderos y Desagües. ([www. spancold.es](http://www.spancold.es))

Consorcio Ingendesa – Edic Ltda. 1994. Proyecto Embalse Puclaro. Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Obras Hidráulicas. Chile.

Diario Oficial de la República de Chile. 06.02.2010. Aprueba Reglamento sobre operación de embalses frente a alertas y emergencias de crecidas y otras medidas que indica. Páginas 8-10.

ENDESA. 1967. Central Hidroeléctrica Rapel. Gerencia de Explotación. ODIC. International Commission on Large Dams. 1987. Bulletin N° 58. Spillway for Dams.

HR Wallinford. Report OD 137. 1996. The Feasibility of Flushing Sediment from Reservoirs.

Ingendesa. 1991. Proyecto Pehuenche. Descripción general del Estado final de las obras. Empresa Eléctrica Pehuenche S.A.

Ingendesa. 2004. Proyecto Ralco. Fichas técnicas de las Obras. ENDESA.

Ingendesa. 2008. Proyecto Hidroeléctrico Aysén. Análisis de los desagües de Fondo.

Ingendesa. 2010. Factibilidad Proyectos Hidroeléctricos Área Guaiquivilo. Presa Guaiquivilo. Desagüe de Fondo.

MN Ingenieros Ltda. 1994. Proyecto Embalse Santa Juana. . Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Obras Hidráulicas. Chile

Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1996. “Reglamento Técnico sobre seguridad de presas y embalses”. España

Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1967. “Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presa”. España.

Ministerio de Obras Públicas. Sin fecha. Catalogo informativo del Embalse Paloma. Dirección de Obras Hidráulicas. Chile.

Minor H.E., Bodenmann, H. 1979. Considerations about the determination of capacity and structural design of a bottom outlet for large dams. Electrowatt Engineering Services. Commission International des Grandes Barrages.

Ramos, F., Chiachio, J, Chiachío, M. 2008. Criterios para la evaluación de la capacidad necesaria de los desagües profundos. Comité nacional español de grandes presas.

Sandoval, J. 2003. El Riego en Chile. Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Obras Hidráulicas. Chile.

US Army Corps of Engineers. 1982. Engineer Manual EM 1110-2-1602.

Vischer, D. y Hager, W.H. .1998. Dam Hydraulics. Ed. Wiley.