

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**MODELACIÓN HIDRÁULICA DE ROTURA DEL EMBALSE CHACRILLAS Y
EVALUACIÓN DE LA AMENAZA ASOCIADA**

**DIEGO BELLO¹, HERNÁN ALCAYAGA¹, DIEGO CAAMAÑO², MARCO SOTO-
ALVAREZ¹**

RESUMEN

La falla de una presa implica una amenaza debido a los volúmenes de agua que se liberan rápidamente desde su reservorio. Esto se traduce en rápidas y extensas inundaciones que pueden afectar de manera importante a las personas, el medio ambiente y la infraestructura existente. En Chile, el embalse Chacrillas corresponde a uno de estos casos, y este estudio caracteriza la rotura de la presa, estableciendo una metodología a partir de una extensa revisión bibliográfica, con fines de cuantificar el flujo resultante.

La metodología propuesta se divide en cinco etapas, i) análisis determinístico de la rotura (se obtienen los parámetros de rotura a partir de ecuaciones empíricas) y se modelan los escenarios hidráulicos por medio de un enfoque 1D preliminar (esto define los rangos de valores para los parámetros de rotura), ii) se genera un escenario de inundación sin rotura (caso de una crecida máxima evacuada por el vertedero), iii) análisis probabilístico donde se asocian los parámetros de rotura a eventos con diferentes probabilidades de ocurrencia, definición de escenarios (para esto se utiliza el software Mc Breach), iv) obtención de zonas inundadas aguas abajo de la rotura por medio de una simulación 2D de los escenarios previamente definidos y v) la identificación de las estructuras alcanzadas por las diferentes inundaciones.

Los resultados muestran que la extensión de la zona de inundación es similar para los diferentes escenarios y la diferencia entre éstos radica en las magnitudes de velocidad y altura de las aguas, esto se debe a la topografía plana de la zona de estudio y los altos caudales simulados.

El software Mc Breach, utilizado en el análisis probabilístico de los parámetros de rotura, permite asociar los escenarios simulados a probabilidades de excedencia, sin embargo, no se conoce la dependencia que existe entre las distribuciones estadísticas y los valores de los parámetros estadísticos que las definen. Esto abre las posibilidades para un próximo estudio de análisis de sensibilidad de los parámetros de rotura de presa frente a los parámetros estadísticos considerados.

¹Departamento de Obras Civiles, Universidad Diego Portales. – diego.bello@mail.udp.cl

²Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción.

INTRODUCCIÓN

En distintos países se han desarrollado una serie de guías y normativas acerca de la regulación e implementación de análisis de rotura de presas, además de la creación de planes de acción ante algún tipo de falla. Nuestro país considera este tipo de análisis en el año 2015, a través de el Reglamento de Obras Mayores del Ministerio de Obras Públicas (Ministerio de Obras Públicas Chile, 2015). Este documento exige el estudio de análisis de rotura para todas las presas cuya altura de muro sea superior o igual a 15 metros. Sin embargo, la metodología para el análisis de rotura y la creación de mapas de amenaza de inundaciones no se encuentran definidos, por lo que la estructura del documento depende de cada institución pública o privada que realice el análisis. Por lo anterior, es importante estudiar la literatura extranjera, y de esta manera establecer los parámetros mínimos con los que debe contar una metodología de análisis de rotura, adaptada al contexto nacional.

El presente estudio de análisis de rotura para el embalse Chacrillas, apunta a la necesidad de cuantificar los escenarios hidráulicos para una condición de falla evaluada por *overtopping* o desbordamiento. Este tipo de falla corresponde al más común según lo describe FEMA en su guía *Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risk Associated with Dam Incidents and Failures* (FEMA, 2013). En esta guía se presenta la información de 656 casos analizados entre el periodo de 1975 - 2011, donde un 70,9% de las fallas se produjo por *overtopping* y sólo el 14.3% de los registros se indican del tipo *pipping* (segundo más común).

En Chile, según la información obtenida desde la base de datos de la Infraestructura de Datos Geoespaciales (Infraestructura de Datos Geoespaciales, 2016), se cuenta con un total de 1367 embalses administrados por el estado hasta el año 2016. De estas estructuras, 38 son clasificados como grandes embalses según lo establecido por el Reglamento de Obras Mayores (Ministerio de Obras Públicas Chile, 2015), ya que la altura de su muro es mayor o igual a 30 metros y/o su volumen de almacenamiento es mayor o igual a 60 millones de m³. La mayoría de los embalses grandes tienen un uso de riego, exceptuando uno cuyo uso corresponde a agua potable.

En este trabajo se estimarán las posibles amenazas, creando mapas de inundación, determinando los tiempos de llegada de la onda de crecida a las zonas críticas del valle de Putaendo. Estas zonas críticas son escogidas tanto por su peligrosidad debido a las posibles pérdidas de vidas humanas, como por los daños a la infraestructura presente en la zona.

ESTADO DEL ARTE

Planes de acción durante emergencia y análisis de rotura.

Para el contexto europeo, en el caso de España se cuenta con la Guía técnica para la Clasificación de presas en función del riesgo potencial (Ministerio del Medio Ambiente España, 1996). En esta guía se desarrollan los criterios de clasificación para las presas existentes y futuras, estableciendo una metodología de aplicación general y estipulando los requerimientos mínimos que deben contener los documentos solicitados para la propuesta de

clasificación. Todo lo anterior con la finalidad de mejorar la gestión y la seguridad en las presas del país.

También existe la Guía técnica para la elaboración de los planes de emergencias de presas (Ministerio del Medio Ambiente España, 2001), donde inicialmente se establece la clasificación de la presa según su riesgo asociado, tanto en daños materiales, ambientales y pérdidas de vida. Utilizando una clasificación de las presas (A, B y C) según nivel de riesgo, donde el primero corresponde a una presa de gran riesgo y la última a una de bajo riesgo, exigiendo para las clasificaciones A y B la realización de un plan de emergencias.

Según lo establecido en la guía técnica, un plan de emergencias corresponde a un documento que sintetice las actividades que se deben realizar para detectar las situaciones de riesgo y su tratamiento en base a dos puntos. Lo anterior, primero permitir analizar las condiciones de seguridad de la presa y su entorno, reduciendo las posibilidades de generar riesgos y segundo, en caso de que si ocurra el accidente, reducir al máximo sus consecuencias. En el marco de los planes de emergencia, se estipula el contenido mínimo que debe considerar el documento, con dos puntos de principal interés para el presente proyecto que corresponden al análisis de seguridad de la presa, además de la zonificación territorial y análisis de los riesgos generados por la rotura de la presa.

En la misma línea de lo estipulado en la guía mencionada anteriormente, es que se crea la Guía para la implantación de Plan de Emergencia de presa (Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2017). En este plan se establecen los criterios a considerar, al igual que las posibles recomendaciones que ayudan a lograr implantar los planes de emergencia para los distintos tranques presas presentes en el país. La guía no establece obligaciones, si no que sólo consideraciones que se basan en la literatura legal disponible en España, de manera de poder apoyar al titular de las obras en cuestión.

Para el caso de Francia, la seguridad de los embalses se encuentra incluida en el Código del Medioambiente (Artículos R-214-115 y 116), donde se indica que los estudios de peligrosidad de obras como embalses deben ser realizado por instituciones ad-hoc, es decir los profesionales deben cumplir con ciertos criterios técnicos. En estos estudios se debe explicitar el nivel de riesgos que se toma en cuenta y del detalle de las medidas para reducirlos, precisando los niveles residuales, una vez puesta en marcha las medidas propuestas para minimizarlos. Los estudios de peligrosidad deben ser actualizados al menos cada 10 años. Una actualización de la Ley fue realizada en el año 2008, donde se definió el plan de estudios de peligrosidad de embalses y diques, precisando su contenido (*Arrêté du 12 juin 2008*). En 2010, una modificación a la ley de medioambiente (*Arrêté du 18 février 2010*) incluyó las categorías y criterios de ordenamiento de los organismos que intervienen en la seguridad de obras hidráulicas, así como también la organización administrativa de sus responsabilidades (esta última mediante el *Arrêtés Ministériels du 7 avril 2011*). Una reciente actualización de la Ley del año 2018 (*Arrêté du 3 septembre 2018*) modificó las definiciones de los planes de estudios de peligrosidad de embalses y diques, y detallo aún más su contenido. Pero el documento guía para estudios de peligrosidad de embalses del 2012 (*Guide de lecture des études de danger de barrages*) es la que actualmente se utiliza (https://aida.ineris.fr/sites/default/files/gesdoc/91370/guide_lecture_edd_barrages_v20120807.pdf).

En América, específicamente en EE.UU. se encuentra la guía *Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects* (FERC, 2015) que presenta un capítulo donde se desarrolla la estructura de los *Emergency Action Plans* (EAP). Este corresponde a un documento formal que identifica posibles condiciones de emergencia en una presa y especifica las acciones planificadas previamente a seguir para minimizar el daño a la propiedad y la pérdida de vidas. Además, debe contener mapas de inundación con la finalidad de ayudar a las autoridades con el manejo de emergencias, de manera de identificar infraestructura crítica y sitios de población en riesgo.

La FERC en su guía recomienda para el caso de falla de tipo *pipping*, ecuaciones y valores para obtener el ancho de la brecha (BR), el talud de la brecha (TZ) y el tiempo de falla hasta que la brecha generada alcance la cota de coronamiento (TFH), todo para los distintos tipos de presas existentes. Además, se entregan recomendaciones de uso para los parámetros señalados anteriormente.

En EE.UU. también se desarrolló la guía *Federal Guidelines for Inundations Mapping of Flood Risk Associated with Dam Incidents and Failures* (FEMA, 2013), cuyo objetivo es ser un recurso para desarrollar pautas para la seguridad de presas. Esta guía Federal es un manual de referencia para el mapeo de inundación, pero también es utilizada para una amplia variedad de propósitos, como el diseño de presas, clasificación de peligro potencial, planificación de manejo de emergencias, la evaluación de consecuencias y el comunicar los posibles riesgos.

En el contexto nacional, se desarrolló un Plan de Acción Durante Emergencias, PADE (Ingendesa, 2012), en el proyecto de la Central Hidroeléctrica Angostura, donde se estipulan los puntos sobre la organización general de medios y recursos, el actuar ante la emergencia, además del estudio y la modelación sobre los escenarios de rotura y los mapas de inundación. El objetivo del PADE, 2012 fue conocer los posibles tipos de emergencia que se podrían presentar durante el funcionamiento de la central, y de establecer con los resultados de la modelación los mapas de inundación asociados al tránsito de onda de crecida generado.

ÁREA DE ESTUDIO

Ubicación

El embalse Chacrillas se ubica en la V Región de Valparaíso, específicamente en la Provincia de San Felipe, 16 km al nororiente de la ciudad de Putaendo, como se presenta en la Figura 1. El muro del embalse se encuentra a 2.5 km aguas arriba de la confluencia del río Rocín y el Estero Chalaco.

La superficie de la cuenca en que se define el emplazamiento del embalse (Norte: 6403115.5, Este: 354221.7) es de 630 km². 2.5 km aguas abajo del muro el estero Chalaco confluye con el Río Putaendo el cual tiene una pendiente media de 0.8% y presenta un lecho de grava. El asentamiento urbano más importante corresponde al pueblo de Putaendo (16754 habitantes), 13 km aguas arriba de la confluencia del río Putaendo con el río Aconcagua. La precipitación media anual en el área de estudio de es 307.7 mm (estación Resguardo de los Patos, DGA).

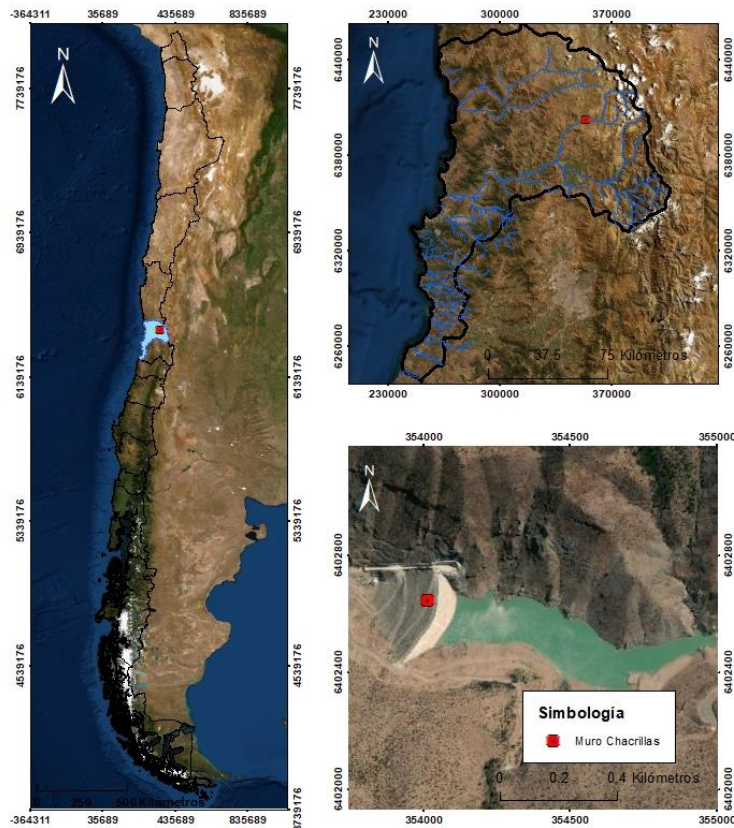


Figura 1: Ubicación Embalse Chacrillas

Fuente: Elaboración propia, 2020

El valle del río Putaendo cuenta con recursos de suelo y clima que permiten el aprovechamiento de dichos recursos para el desarrollo de la actividad agropecuaria, lo que facilita la producción de frutas, tanto para el comercio exterior como para el consumo interno del país. Por lo anterior, es que se decide la construcción del embalse Chacrillas, con el fin de aprovechar de manera eficiente el recurso hídrico, y de esta forma poder asegurar un 85% de riego para un total de 7100 hectáreas, beneficiando así a los agricultores de la zona (EDIC, 2002).

Características del embalse Chacrillas

El diseño considerado para la construcción del embalse, corresponde a uno del tipo CFRD (por sus siglas en inglés de *Concrete Face Rockfill Dam*), el que fue diseñado por la empresa EDIC. La presa fue construida a partir de rellenos obtenidos a partir de las excavaciones del vertedero; túnel y aluviales gruesos permeables que se obtuvieron de yacimientos próximos a la confluencia del río Rocín con el Estero Chalaco.

Las características constructivas del muro del embalse Chacrillas se observan en la **Tabla 1**, los parámetros físicos del muro son de gran importancia para el análisis de rotura que se presenta más adelante.

Tabla 1:Características físicas embalse Chacrillas

Elemento o característica de la presa	Valor	Unidad
Cota coronamiento	1338.5	m.s.n.m
Longitud coronamiento	319	m
Ancho coronamiento	10	m
Altura presa	102.5	m
Capacidad embalse	31	Hm3
Volumen de regulación	27	Hm3
Nivel agua máximo	1337.5	m.s.n.m
Nivel agua min	1264	m.s.n.m
Talud aguas arriba	1.5:1	H:V
Talud aguas abajo	1.65:1	H:V

Fuente: Elaboración propia, 2020

METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos propuestos para este trabajo, se establece una metodología que consiste en cinco etapas, i) el análisis determinístico para los parámetros de rotura, con la modelación y simulación unidimensional preliminar del tránsito de la crecida máxima probable. El dominio espacial de esta modelación comprende, desde la cola del embalse hasta 1 km aguas abajo del muro para el análisis de rotura de este mismo. Para facilitar el lenguaje en el desarrollo de la memoria, esta etapa recibe el nombre de método determinístico, para la realización de este tipo de análisis, se utilizan ecuaciones empíricas presentadas en la publicación de Wahl (1988), que se indicaran más adelante (Tabla 2), para estimar los parámetros de rotura, además de las características del muro del embalse Chacrillas presentadas en la Tabla 1.

A partir de estas ecuaciones se obtienen los rangos máximos y mínimos que pueden tomar los parámetros de rotura para el presente estudio y entregan una primera aproximación. Estos parámetros son: el ancho de la brecha (B), el tiempo de formación de la brecha (tf) y las pendientes del talud de la brecha (Z). Estas ecuaciones base se encuentran en la publicación *Prediction of Embankment Dam Breach Parameters* de Wahl (1998). A lo anterior se suma lo recomendado por la Guía Técnica para la Elaboración de los Planes de Emergencias de Presas (Ministerio del Medio Ambiente España, 2001). En la Tabla 2 se observan los distintos autores mencionados anteriormente, y las ecuaciones propuestas por cada uno.

Tabla 2: Ecuaciones empíricas para calcular parámetros de rotura.

Autor	Ecuaciones Propuestas (metros, m³/s, horas)
Singh & Snorrason (1982, 1984)	$2H < B < 5H$ $0.25 < t_f < 1.0$
USBR (1988)	$B = 3H$ $t_f = 0.011B$
Von Thun & Gillette (1990)	$B^\circ = 2.5H + C_b$ $t_f = 0.015H$
FERC (1993)	$H < B^\circ < 5H$ $0.25 < Z < 1$ $0.1 < t_f < 1$
Froehlich (1995)	$B^\circ = 0.1803 K_0 V^{0.32} H^{0.19}$ $K_0 = 1.4$ overtopping, 1 otros casos. $t_f = 0.00254 V^{0.53} H^{-0.9}$
GTPEP (2001)	$B = 20 * (V * H)^{0.5}$ $T_f = 4.8 * V^{0.5} / H$ $Z = 1:1$

Fuente: Wahl, (1998) y GTPEP (2001).

En la etapa ii) la simulación con el hidrograma afluente al embalse de la crecida decamilenaria ($T = 10000$ años), obteniendo así el hidrograma liberado por el vertedero de crecidas en una simulación sin rotura del muro, esta etapa será llamada escenario sin rotura, iii) el análisis probabilístico para los parámetros de rotura utilizando el software Mc Breach, el cual permite realizar un análisis probabilístico de los parámetros de rotura, utilizando el método de Monte Carlo con la simulación 1D final, será llamada método probabilístico.

En el análisis probabilístico realizado con Mc Breach, se iteraron 10 mil combinaciones aleatorias de los parámetros de rotura, y cada una de las combinaciones de parámetros fue simulada en el modelo 1D de HEC-RAS, en función de poder asignar la probabilidad de excedencia a cada uno de los resultados obtenidos. El haber realizado un total de 10 mil iteraciones, cumple con los criterios de las recomendaciones de los autores del Mc Breach (Kleinschmidt, 2019).

En la Tabla 3 se presentan los parámetros con los que trabaja Mc Breach para iterar y realizar las combinaciones aleatorias, los cuales coinciden con los parámetros que utiliza HEC-RAS, también se presenta el tipo de distribución de probabilidades que se utilizó para cada uno de ellos para la falla por desbordamiento (*overtopping*).

Tabla 3: Parámetros de entrada para análisis en Mc Breach.

Notación	Parámetros de Rotura	Distribución
[Inv]	Cota final de la brecha	Normal
[B]	Ancho final de la brecha	Normal
[LSS]	Pendiente izquierda de la brecha	Normal
[RSS]	Pendiente derecha de la brecha	Normal
[Tf]	Tiempo de formación de la brecha	Normal
[Init]	Cota mínima de elevación del agua para que se produzca la falla.	Normal
[Cd]	Coefficiente de descarga	Uniforme
[Prog]	Progresión de la brecha	Normal

Fuente: Elaboración propia, 2020

Los resultados entregados por Mc Breach corresponden a la distribución de los caudales máximos, las probabilidades de excedencia asociadas y la distribución de los parámetros de rotura para las 10 mil iteraciones realizadas. Con la modelación 1D final se obtienen los hidrogramas de rotura utilizados para la cuarta etapa.

Etapa iv) modelación bidimensional (modelación 2D) del enrutamiento de la onda debido a la rotura del embalse, con un dominio espacial que va desde el muro hasta la confluencia del Río Putaendo con el Río Aconcagua, a esta etapa se le denomina obtención de zonas inundadas, donde se obtiene la amenaza de inundación asociada a cada uno de los distintos escenarios propuestos.

Finalmente, en la etapa v), se conocen la cantidad de diferentes tipologías de infraestructura dentro de la zona de interés alcanzadas por la inundación, la última etapa recibe el nombre de cuantificación de estructuras alcanzadas por inundación. La metodología empleada para lograr este objetivo se compone de cuatro pasos esenciales: a) identificar estructuras, zonas y focos de interés posiblemente expuestos a la amenaza, b) se confirmó en terreno su existencia y ubicación, posteriormente c) se construyeron los mapas de ubicación espacial, y finalmente d) se realizó el cruce de información acoplando los mapas de ubicación espacial con las áreas de inundación determinadas con los resultados entregados por la etapa iv), obteniendo así la cantidad de estructuras alcanzadas por la onda de crecida.

Para el presente informe se utiliza la terminología de amenaza y exposición presentada en el trabajo *Risk assessment and dams – Recent developments and aplicaciones* (Lacasse et al., 2019), donde se entiende por amenaza, como la probabilidad de que ocurra un fenómeno, en este caso la inundación, para un periodo de tiempo, y la exposición como la condición de estar expuesto a una amenaza.

En la Figura 2 se presenta un esquema ilustrativo de la metodología a seguir de manera general.

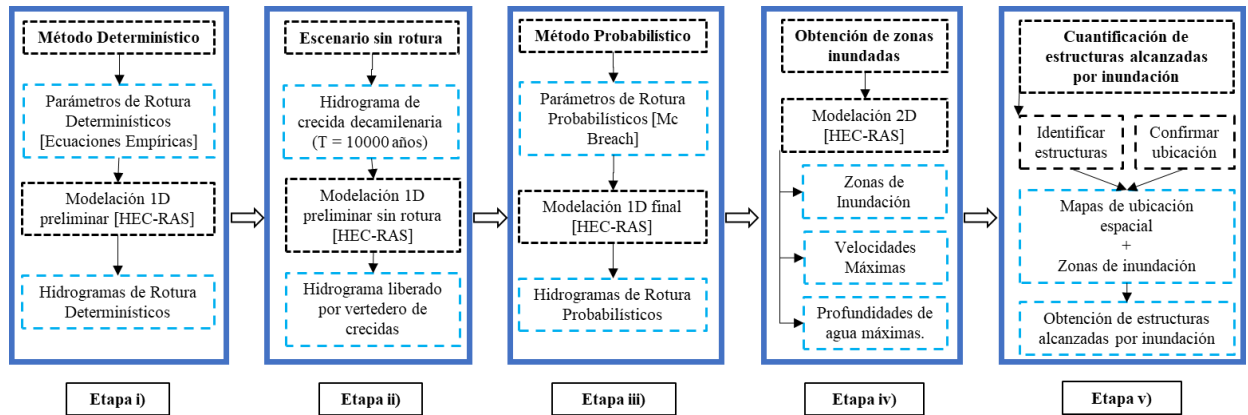


Figura 2: Esquema Metodológico

Fuente: Elaboración propia, 2020

RESULTADOS

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos a partir del desarrollo del esquema metodológico presentado en la Figura 2.

Análisis Probabilístico [Mc Breach]

Como se mencionó previamente, los parámetros de rotura obtenidos de forma determinística por las ecuaciones, ayudan a definir los valores mínimos y máximos que pueden ser asignados a los parámetros de rotura. En la Tabla 4, se observan los valores extremos que fueron definidos en el software Mc Breach para la realización del análisis probabilístico de los parámetros de rotura.

Tabla 1: Rangos de valores para los parámetros de rotura en el análisis probabilístico.

Notación	Parámetros de Rotura	Valor Mínimo	Valor Máximo
[Inv]	Cota final de la brecha [m.s.n.m]	1244	1300
[B]	Ancho final de la brecha [m]	8	55
[LSS]	Pendiente izquierda de la brecha [xH : 1V]	0	1.6
[RSS]	Pendiente derecha de la brecha [xH : 1V]	0	1.6
[Tf]	Tiempo de formación de la brecha [hrs]	0.1	3
[Init]	Cota mínima de elevación del agua para que se produzca la falla. [m.s.n.m]	1338.5	1339.82
[Cd]	Coefficiente de descarga	2.6	3
[Prog]	Progresión de la brecha	Linear	Sine

Fuente: Elaboración propia, 2020

Luego de obtener las diez mil combinaciones de parámetros iterados por el software Mc Breach, y tras haber simulado todas las combinaciones mediante el modelo 1D de HEC-RAS, se obtienen los caudales máximos generados a partir de cada hidrograma de rotura simulado, asociados a una probabilidad de ocurrencia.

Las combinaciones de parámetros de rotura que se seleccionaron para el modelo final de tránsito de la CMP (modelo 1D final), corresponden a las combinaciones de parámetros que generaron caudales con una probabilidad de excedencia de 99, 50, 10 y 1%, de esta forma se pueden comparar distintos escenarios de rotura. Estos hidrogramas de rotura servirán como datos de entrada para la tercera etapa de la modelación que en este trabajo se denomina obtención de zonas inundadas.

Modelación 1D Final

Con los parámetros de rotura resultantes y las combinaciones de estos, se realizó la modelación 1D final mediante el software HEC-RAS. Se obtuvieron los cinco hidrogramas de rotura probabilísticos que se presentan en la Figura 3.

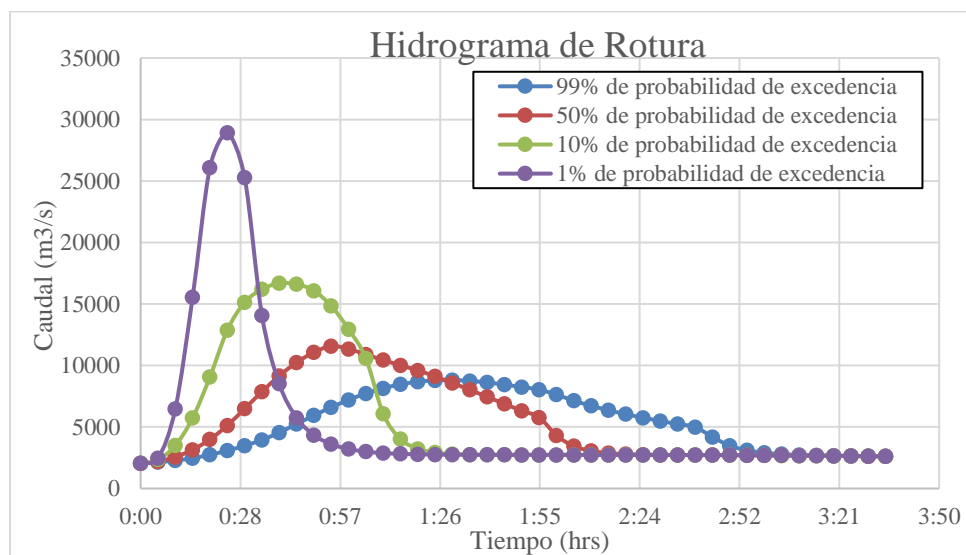


Figura 3: Hidrogramas de Rotura Probabilístico

Fuente: Elaboración propia, 2020

Obtención de zonas inundadas

Modelación 2D

Los resultados de las modelaciones obtenidos a partir de los hidrogramas del método probabilístico son presentados en la figura 4 para la distribución espacial de las profundidades de aguas y las velocidades, se presenta como ejemplo el escenario de 99%.

En relación las velocidades de agua para cada uno de los cuatro escenarios se tiene que la velocidad máxima asociada al caudal máximo de 99% de probabilidad de excedencia alcanzó los 13.5 m/s y la mayor velocidad para el caudal máximo con una probabilidad de excedencia de 50% fue de 14.7 m/s. En el caso de los otros dos escenarios, el caudales con una probabilidad de excedencia de 10% y 1%, las velocidades máximas fueron de 18.4 m/s y 19.1 m/s, respectivamente.

Al igual que en el caso de las profundidades de agua, la mayor velocidad se alcanza con el hidrograma del caudal de una menor probabilidad de excedencia, y el menor valor de velocidad se obtiene a partir de la simulación del hidrograma que tiene un caudal máximo con una probabilidad de excedencia mayor.

Las máximas profundidades asociadas a los cuatro hidrogramas (probabilidades de excedencia de 99, 50, 10 y 1%) y al escenario sin rotura del muro, se presentan justo aguas arriba de la confluencia del río Rocín con el Estero Chalaco. Es este tramo, el cauce presenta planicies de inundación muy pequeñas (cauce y planicie es de 100 m aproximadamente) y con un confinamiento lateral alto, debido su emplazamiento en una zona montañosa. Hacia aguas abajo de la confluencia del río Rocín con el estero Chalaco, se desarrolla un río de valle donde las planicies de inundación son más amplias, aumentando el ancho del cauce considerablemente (cauce y planicie es de 500 m aproximadamente) y consecuentemente las profundidades máximas disminuyen.

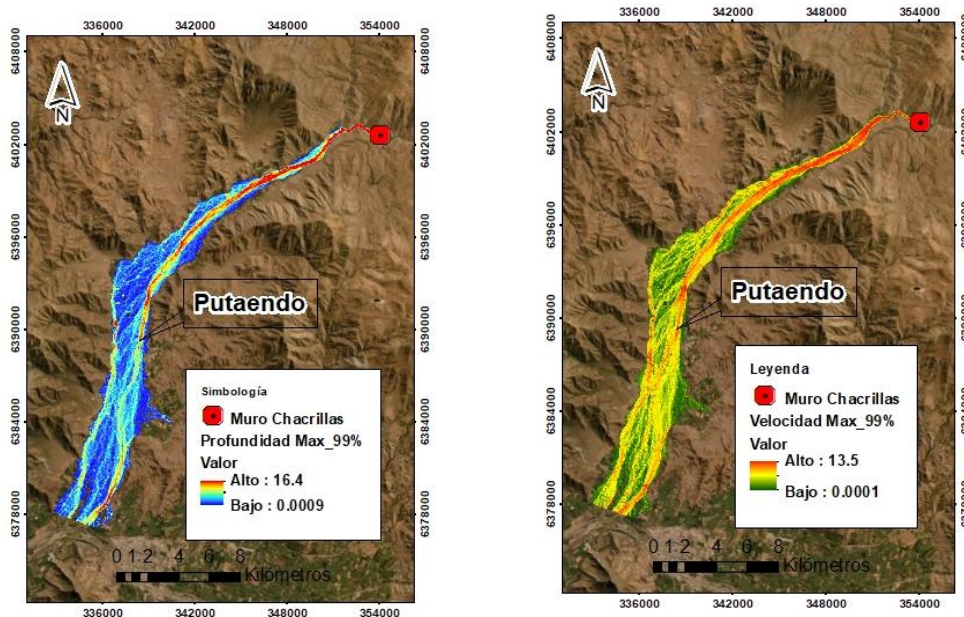


Figura 4: Profundidades y velocidades obtenidas de simulación 2D en HEC-RAS, escenario 99%.

Fuente: Elaboración propia, 2020

Cuantificación de estructuras alcanzadas por inundación

Finalmente se realiza el cruce de información entre las áreas inundadas y el catastro de la infraestructura expuesta, con la finalidad de cuantificar la cantidad de estructuras alcanzadas por la inundación.

Las estructuras alcanzadas por la inundación se presentan en la Tabla 5, para cada probabilidad de excedencia y para el escenario sin rotura, como es de esperar el total de estructuras alcanzadas, es proporcional al orden de magnitud de los caudales máximos de cada escenario.

De la Tabla 5 se puede desprender que, un 59.9% de las viviendas es alcanzada por la onda de rotura, frente a un caudal máximo de probabilidad de excedencia de 1%, para el caudal máximo asociado a una probabilidad de excedencia de 10 % se ven alcanzadas por la inundación un 55.2% de las viviendas, un 47.3% de las viviendas es alcanzada frente al caudal máximo de probabilidad de excedencia de 50%, para el menor caudal máximo de una probabilidad de excedencia de 99%, el 42.2% de las viviendas son alcanzadas por la inundación, finalmente para el escenario sin rotura, asociado al menor caudal máximo simulado, un 10.2% de las estructuras presentes en el AOI son alcanzadas por la onda de crecida generada por el vertedero.

Para el escenario sin rotura, las viviendas alcanzadas corresponden a un total de 522, asumiendo una cantidad de 3 habitantes por vivienda, serian un total de 1566 personas alcanzadas por la inundación en sus casas, lo que es un valor preocupante frente a un escenario donde ni siquiera se ha roto el embalse. Es necesario realizar un estudio de riesgo estructural para las estructuras presentes en la zona debido a la gran cantidad de tipologías alcanzadas por la inundación.

Tabla 5: Estructuras amenazadas por inundaciones máximas

	Catastro 1%	Catastro 10%	Catastro 50%	Catastro 99%	Sin Rotura
Infraestructura	Cantidad	Cantidad	Cantidad	Cantidad	Cantidad
Acueducto	1	1	1	1	1
Administración Embalse	4	4	4	4	4
Bancos	0	0	0	0	0
Bencineras	0	0	0	0	0
Bomberos	0	0	0	0	0
Centro de educación y trabajo (CET)	0	0	0	0	0
Carabineros de Chile	1	1	1	1	0
Centro Educacional	4	3	2	1	0
Centro de Salud	1	1	1	1	0
Estación Fluviométrica	1	1	1	1	1
Estadio Municipal	1	1	1	1	1
Gimnasio Municipal	1	1	1	0	0
Iglesia/Capilla	2	1	1	1	0
Municipalidad	0	0	0	0	0
Puentes	7	7	7	7	7
Sistema de Agua Potable Rural	5	5	5	5	1
Viviendas	3074 (60%)	2879 (55%)	2468 (47%)	2205 (42%)	522 (10%)
Total Estructuras	3102	2905	2493	2228	537
Estimado de habitantes	9222	8637	7404	6615	1566

Fuente: Elaboración propia, 2020

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Al finalizar el desarrollo de la presente memoria, se desprenden una serie de conclusiones que se explican a continuación.

El software HEC-RAS permitió modelar el tránsito de la CMP mediante un modelo 1D, realizando el rastreo de la onda a partir de los resultados obtenidos de las simulaciones en

cada una de las secciones transversales, además del módulo de análisis de rotura de presas. HEC-RAS también funcionó de manera correcta ante la modelación 2D del rastreo de los escenarios, lo que se evidencia en las variaciones de profundidad, velocidad y caudal que se producen a medida que avanza la onda de crecida por el AOI, siguiendo la lógica de lo esperado, además de obtener las zonas de inundación, velocidades y profundidades de agua máximas para las zonas de interés. Cabe destacar la facilidad del manejo de resultados para ambos tipos de modelación, debido a la compatibilidad de archivos con los softwares de Sistema de Información Geográfica (SIG).

Los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en 2D, para los diferentes escenarios de probabilidad de excedencia, mostraron que las superficies de inundación no presentaron diferencias significativas. Las diferencias en los resultados de estas simulaciones radican principalmente en las magnitudes de las velocidades, profundidades de agua y del tiempo de llegada de la onda a cada punto de interés.

Las estructuras alcanzadas por la inundación son principalmente las que se encuentran aledañas al eje del río y no el resto de la ciudad.

Para el escenario de la simulación sin rotura, a pesar de obtener una superficie de inundación, y valores de profundidad y velocidad máxima menores a los 4 escenarios de rotura propuestos, no dejan de ser valores importantes frente a un acontecimiento que no produce la rotura del muro, si no que logra ser evacuado por el vertedero de crecida, obteniendo una profundidad y velocidad máxima de 7.5 m y 8.1 m/s respectivamente.

Según los resultados de estructuras alcanzadas por la inundación, se pone en evidencia que un gran porcentaje de viviendas y servicios básicos, están expuestos ante la crecida producida por la rotura del muro, y por ende también una gran cantidad de habitantes. También se observó que, ante la simulación sin la rotura del muro, la inundación producida por el vertedero de descarga sigue alcanzando un número importante de estructuras, las cuales en función a su estabilidad estructural podrían o no colapsar. Lo anterior hace fundamental que se tomen medidas para la creación de planes de acción durante emergencias (PADE), y un sistema de alarma temprana ante la presencia de alguna irregularidad en el muro del embalse Chacrillas, ya que no se cuenta con ningún método de aviso ni de organización frente a este tipo de situaciones.

Con respecto a los parámetros de rotura utilizados para la simulación 1D en HEC-RAS, estos deben ser un punto de principal interés, debido a la sensibilidad de los resultados de hidrogramas de rotura frente a dichos parámetros. Utilizar las ecuaciones empíricas propuestas en la Tabla 5 sirven como una primera aproximación, sin embargo, no como valores definitivos, debido a que el método de cálculo consiste en uno determinístico, donde sólo se basa en las características físicas del embalse en cuestión, y no presenta una aleatoriedad en sus resultados, obteniendo el mismo resultado siempre en cada ecuación para un mismo embalse.

Se observa de los parámetros obtenidos del método determinístico que, específicamente once de las 17 combinaciones presentadas en el Anexo 2, alcanzan un caudal superior al caudal máximo del hidrograma de probabilidad de 1% de excedencia que se presenta en la Figura 14. Esto deja en evidencia la sobre estimación de caudales que se puede producir si se considera como base de cálculo, sólo las ecuaciones empíricas propuestas por la literatura.

Es por lo anterior que se recomienda la realización del análisis probabilístico para la obtención de los parámetros de rotura, mediante el software Mc Breach, debido a la posibilidad de asociar los eventos de rotura a probabilidades de excedencia de cada

combinación de parámetros, y de esta forma analizar el riesgo también si se cuenta con la información de vulnerabilidad de las tipologías de estructuras presentes en el AOI.

Sin embargo, no basta solo con el análisis probabilístico, el siguiente paso debe ser un análisis de sensibilidad de cada parámetro de rotura y de las distribuciones probabilísticas escogidas para cada uno de ellos en el software Mc Breach, debido a cómo la variación de cada valor del promedio y la desviación estándar, para cada parámetro, afecta en los resultados, y así mismo en las zonas de inundación, pudiendo de esta manera establecer una serie de escenarios en función a los parámetros más sensibles y a las características de la presa en cuestión.

En términos de la modelación, la topografía utilizada para el estudio fue de un DEM de 2.5 m de resolución (alta resolución), por lo que se recomienda el trabajar con datos topográficos con resolución más fina. Esto permitirá mejorar los resultados de las simulaciones y de esta forma caracterizar de mejor el comportamiento del flujo frente a las estructuras presentes en el AOI, pudiendo así efectuar un catastro de estructuras en amenaza de inundación aún más preciso que el realizado. Incluso podría determinarse si estas están en condición de colapso o no.

Otro punto de interés para el desarrollo de la modelación corresponde a la calibración de esta. Hubiera sido de gran relevancia el contar con registros de crecidas de magnitudes importantes durante la operación del embalse, y de esta forma poder calibrar el modelo frente a este tipo de condiciones.

Finalmente, la metodología utilizada para el estudio de rotura del embalse Chacrillas, establecida a partir de la literatura expuesta en la revisión bibliográfica, puede ser aplicada al análisis de rotura de cualquier tipo de presa, pudiendo establecer los escenarios de rotura a partir del método determinístico y finalmente el probabilístico, mediante la herramienta de Mc Breach, simular el tránsito de crecida de la onda generada por la rotura, y realizar el catastro de amenaza de inundación de cualquier tipología de estructura presentes dentro de un área de particular interés.

BIBLIOGRAFIA

Arrêté du 18 février 2010 précisant les catégories et critères des agréments des organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques ainsi que l'organisation administrative de leur délivrance. Descargable en:

<https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2010/2/18/DEVP1005353A/jo/texte>

Arrêté du 7 avril 2011 portant agrément d'organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques. Descargable en:

<https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2011/4/7/DEVP1109878A/jo/texte>

Arrêté du 3 septembre 2018 modifiant l'arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu. Descargable en:

<https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2018/9/3/TREP1800558A/jo/texte>

Ataia Energia. (2013). Informe Técnico: Central Hidroelectrica Rucalhue - Proyecto Basico Estudios de Ruptura de la Presa.

Delgado Parra, A. (2016). Modelización 1D, 1D/2D y 2D de la inundabilidad en el meandro de Saint Boi De Llobregat mediante la nueva aplicación Hec-Ras 5.0. Barcelona: Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental.

- Dirección General de Protección Civil y Emergencias España. (2017). Guía para la implantación del Plan de Emergencia de Presa. Madrid: Ministerio del Interior.*
- EDIC. (2002). Diseño Embalse Chacrillas - Informe Final. Santiago.*
- Federal Emergency Management Agency. (2013). Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risk Associated with Dam Incidents and Failures. Washington Dc: FEMA.*
- Federal Energy Regulatory Commission. (2015). Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Project. Washington DC: FERC.*
- French Ministry of Ecology, Sustainable development and Energy, General Direction on Risks Prevention (2015). Dam risk assessment guideline. Descargable en:*
- https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/risk_assessment_french_guidelines.pdf*
- Ingendesa. (2012). Informe Técnico: Plan de Acción Durante Emergencias - CH Angostura.*
- Kleinschmidt Group. (26 de 12 de 2019). Kleinschmidt. Obtenido de Kleinschmidt Group: <http://kleinschmidtgroup.com>*
- Lacasse, s. (2019). Risk assessment and dams - Recent developments and applications*
- Ministerio del Medio Ambiente España. (1996). Clasificación de presas en función del riesgo potencial. Madrid: Ministerio del Medio Ambiente.*
- Ministerio del Medio Ambiente España. (2001). GUÍA TÉCNICA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS PLANES DE EMERGENCIA DE PRESAS. Madrid: Ministerio del Medio Ambiente.*
- Ministerio de Obras Públicas. (2014). Manual de Carreteras: Vol. 3 - Instrucciones y criterios de diseño. Santiago.*
- Ministerio de Obras Publicas Chile. (2015). D.S. MOP 50/2015 - Reglamento de Obras Mayores. Diario Oficial.*
- MN Ingenieros. (2019). INFORME SEMANAL DE MONOLITOS DE CONTROL (08-08-2019).*
- Pierce, M. W., Thornton, S. R. y Abt, S. R. (2010): "Predicting Peak Outflow from Breached Embankment Dams", National Safety Review Board Steering Committee on Dam Breach Equations, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.*
- Russo et al. (2011). Experimental approach to determine flood hazard criteria in urban areas. Porto Alegre, Brazil: 12th International Conference of Urban Drainage*
- Tsai, C. W., Yeh, J.-J., & Huang, C.-H. (2019). Development of probabilistic inundation mapping for dam failure induced floods*
- USACE. (2016). HEC-RAS River Analysis System – User's Manual*
- Wahl, T. (1998). Prediction of Embankment Dam Breach Parameter: A Literature Review and Needs Assessment. Water Resources Research Laboratory.*