

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**MODELACIÓN 2D DEL EVACUADOR DE CRECIDAS DEL EMBALSE
CHIRONTA**

JUAN PABLO TORO LABBÉ¹
SERGIO HUMBERTO GONZALEZ BARRERA²

RESUMEN

El presente trabajo corresponde a un estudio numérico del flujo sobre el evacuador de crecidas del Embalse Chironta, ubicado en la región de Arica y Parinacota. En particular, se estudiaron los perfiles de velocidad y presión a lo largo del canal de control, rápido de descarga y cuenco de lanzamiento. Se implementó el modelo numérico RANS acompañado con el modelo estándar de turbulencia k- ϵ , el cual permite modelar el transporte de propiedades turbulentas, así como la producción y destrucción de la turbulencia. Los resultados numéricos indican que, para el caudal asociado con la crecida milenaria, la capa límite no alcanza la superficie libre, por lo que se trata de un flujo no-aireado. Las alturas de agua fueron medidas cada 20 m a lo largo del evacuador, encontrándose diferencias de hasta un 4% con aquellas obtenidas por la Dirección de Obras Hidráulicas en memoria de cálculo realizada por SMI ingenieros. Las presiones a lo largo del rápido de descarga van aumentando en dirección del flujo, pero se mantienen en todas las secciones con valores superiores a la atmosférica con un rango que varía entre 1,02 y 1,15 veces la presión hidrostática. Los valores de las velocidades medias son levemente mayores que los valores presentados en la memoria de cálculo, con diferencias de aproximadamente 4,5% al inicio del evacuador y 4.7% al final del rápido de descarga. La velocidad máxima es de 33,7 m/s en la sección ubicada a 135 m. Se encontró que los valores máximos de energía cinética turbulenta se ubican cerca de la superficie libre con valores adimensionales que van desde 0,18 a 0,75. Los índices de cavitación calculados en base a la velocidad media del flujo indican que un aireador debiera ubicarse a unos 80 m aguas abajo del inicio del rápido de descarga, 20 m más que los calculados por SMI.

¹Profesor Asistente, Carrera Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Andres Bello– juan.toro.l@unab.cl

²Estudiante, Carrera Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Andres Bello– se.gonzalez.br@gmail.com

1. INTRODUCCION

Año a año, millones de litros de agua provenientes del río Lluta desembocan en el mar. El recorrido de estas aguas sustenta la vida en el valle de Lluta, permitiendo a sus pobladores desarrollar sus vidas en torno a la agricultura y la ganadería. El río Lluta es uno de los impulsores del desarrollo cultural, económico y social de la región de Arica y Parinacota, permitiendo el riego de cultivos de maíz, hortalizas y alfalfa, además de dar origen al humedal del río Lluta, catalogado como reserva natural municipal y santuario de la naturaleza (RNAP-MMA (2009)). Con la construcción del embalse Chironta, el Estado de Chile busca dar seguridad de riego al valle, mejorar la calidad del agua, y resguardar los predios rivereños de las crecidas del río producto del invierno altiplánico. El embalse Chironta es parte del Plan Nacional de Embalses, el cual es una iniciativa que considera la histórica construcción de 20 obras entre los años 2015 y 2025. Se proyecta embalsar un volumen de 1.900 kilómetros cúbicos de agua en todo territorio nacional, beneficiando con riego a 30.600 predios con una superficie equivalente a 191.000 ha en todo el territorio nacional (DOH-MOP (2016)). Se estima que Chile tiene una capacidad de embalsamiento de aproximadamente 15.000 millones de m³ entre las regiones de Arica y Parinacota y Araucanía (DOH, (2012)). El comienzo del Plan Nacional de Embalses da prioridad a 8 proyectos los cuales incluyen un volumen máximo de embalsamiento de 937 hm³ (Tabla 1).

Embalse	Región	Volumen [hm ³]
Valle Hermoso	IV	20
La Puntilla	VIII	625
Ampliación Aromos	V	30
Chironta	XV	17
Aconcagua	V	100
Las Palmas	V	55
Zapallar	VIII	80
Livilcar	XV	10
Total		937

Tabla 1: Embalses priorizados por la DOH (junio 2015).

El primer embalse de importancia construido en Chile fue la presa de Catapilco, (V Región) terminado en el año 1853 y cuyo propósito era regular el uso de las aguas para riego agrícola en la zona. Hoy en día, el uso de los recursos hídricos está principalmente dado por el riego con un 81% del total disponible (Escenarios hídricos 2030, (2018)).

El embalse Chironta está destinado a regular el uso de los recursos hídricos para riego, así como contener y atenuar los caudales extremos de las crecidas del río Lluta asociadas al invierno altiplánico. Las obras proyectadas para este embalse incluyen la construcción de una presa de 101,4 m de altura máxima, con un ancho base de 300 m, 274 m de longitud en el coronamiento y 10 m de ancho.

Durante la construcción de la presa principal, el río Lluta fue desviado a través de un túnel de desvío excavado en la ribera izquierda (ver Fig. 1). El evacuador de crecidas, por su parte, está ubicado en la ladera norte de la angostura y está constituido por un vertedero lateral de 70 m de longitud y una carga estimada de 4,3 m para la crecida milenaria; un canal colector

de 84 m., seguido de una transición de 13 m, un canal de control de 48 m, un rápido de descarga de 137 m y finalmente una cuchara de lanzamiento como estructura de disipación de energía al final del rápido que devuelve los excesos de agua al lecho del río. (Fig. 2).

El evacuador de crecidas esta dimensionado para evacuar un caudal de diseño de $1275 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente a un periodo de retorno de 1000 años.

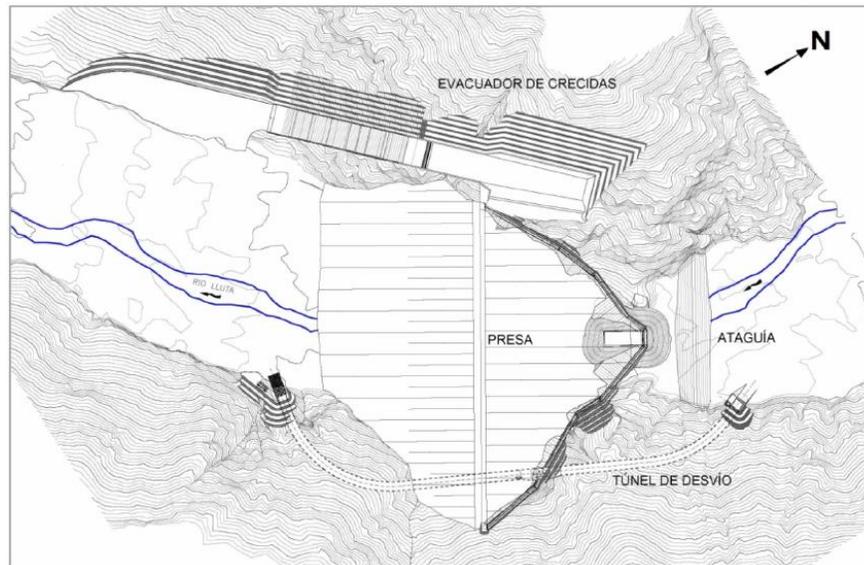


Fig. 1: Disposición general de las obras principales (Fuente: Luis San Martín – DOH, 2012. “Diseño Embalse Chironta, Valle de Lluta, Región de Arica y Parinacota”, Informe Final.)

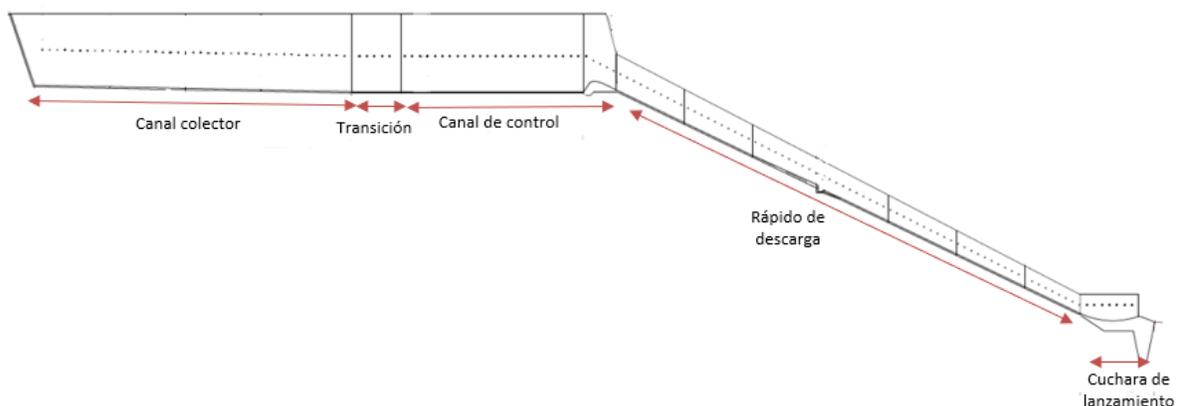


Fig. 2: Elevación evacuador de crecidas, dirección de obras hidráulicas, MOP.

En este estudio se realiza la simulación del flujo de agua en el evacuador de crecidas del embalse Chironta y se describen las distribuciones de variables de interés como lo son las alturas de escurrimiento, velocidades y presiones medias, así como las estadísticas de la

turbulencia. Los valores obtenidos se comparan con valores entregados por la Dirección de Obras Hidráulicas. Se espera que las conclusiones que se desprenden de este trabajo puedan ser un complemento de utilidad para futuros proyectos hidráulicos.

2. MARCO TEORICO

Ecuaciones que gobiernan el flujo y modelo matemático

Para la simulación del flujo sobre el evacuador de crecidas se utilizaron las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes (RANS, por sus siglas en inglés). A continuación, se escriben las ecuaciones que representan las leyes de conservación de la masa y conservación de la cantidad de movimiento, respectivamente.

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} + \tau_{ij}^R) \quad (2)$$

Donde:

\bar{u}_i es la velocidad promedio del flujo; ρ es la densidad del fluido; t es el tiempo; x_i es la i -ésima variable coordenada cartesiana; \bar{p} corresponde a la presión media; $\bar{\tau}_{ij}$ es el tensor medio de tensiones asociado con la viscosidad del fluido y τ_{ij}^R son las tensiones de Reynolds. Estas últimas se estimaron como:

$$\tau_{ij}^R = -\rho \overline{u'_i u'_j} = 2\rho \nu_T \bar{S}_{ij} - \frac{\rho}{3} (\overline{u'_k u'_k}) \delta_{ij} \quad (3)$$

donde, los superíndices “primas” indican fluctuaciones de velocidad debido a la turbulencia (las velocidades instantáneas están dadas por $u_i = \bar{u}_i + u'_i$), ν_T es la viscosidad turbulenta, \bar{S}_{ij} es la tasa de deformación media y δ_{ij} es el delta de Kronecker donde la convención de Einstein va implícita en índices repetidos.

El ampliamente utilizado modelo de turbulencia k - ϵ estándar (ver por ejemplo págs. 27-28 en Rodi, 1993) fue implementado. Este modelo predice el transporte de las variables energía cinética turbulenta (k) y tasa de disipación de energía cinética turbulenta (ϵ). A partir de ellas, se deduce la viscosidad turbulenta.

3. IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA

Descripción del dominio computacional

El dominio computacional incluye los últimos 20 m del canal de control, el rápido de descarga con su cuchara de lanzamiento y una extensión ficticia de canal horizontal de 50 m, de modo de representar de buena manera las condiciones de borde. El canal se modeló en AutoCAD y luego fue exportado a OpenFOAM como un archivo STL. La malla se realizó en el archivo blockMeshDict. Finalmente, con la herramienta SnappyHexMesh, se recortó la malla, eliminando las celdas que quedan fuera de la geometría definida por el archivo STL. La simulación se realizó en una estación de trabajo que cuenta con un procesador Intel Core i7-7700k con frecuencia de 4,2GHz y una memoria RAM de 16GB. La malla contiene un total de 136.669 celdas; el tiempo de simulación para la estabilización del fluido es de 60 s. El modelo final se configuró de tal manera que almacenó los datos del procesamiento cada 0,5 s configuración realizada en el archivo controlDict.

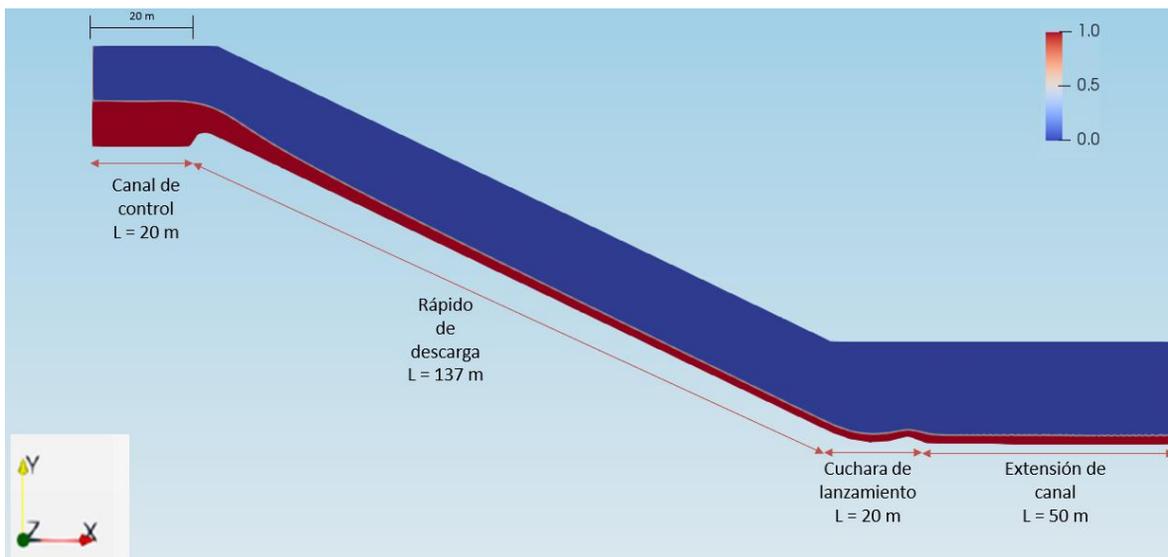


Fig. 3: Geometría del evacuador de crecidas incluida en el dominio computacional. El color azul representa el aire; el rojo representa el agua.

Condiciones de borde

En la entrada (*inlet*), se utilizó la condición de borde *fixedValue* para la velocidad de entrada, con un valor de 5,53 m/s, correspondiente a un caudal de 1275 m³/s. Para la presión se asignó la condición *fixedFluxPressure* y en las variables turbulentas *k* y ϵ se asignaron valores de 1×10^{-4} m²/s² y 1×10^{-2} m²/s³ respectivamente.

Para la frontera de salida (*outlet*) se asignó la condición de *pressureInletOutletVelocity* en la variable velocidad y *totalPressure* en la presión. En las variables *k* y ϵ se usó la condición *zeroGradient* y finalmente en la variable *nut* se usó la condición *calculated*.

Finalmente, a la frontera superior (atmosphere) se le impuso la condición de *pressureInletOutletVelocity* para la velocidad, *totalPressure* en la presión, *InletOutlet* en las variables k y ε y finalmente *calculated* en la variable ν .

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se presentan los resultados numéricos para las alturas de escurrimiento en diferentes secciones a lo largo del evacuador. Existe una diferencia aproximada de un 4% respecto a los valores obtenidos por la DOH en la memoria de cálculo realizada por SMI Ingenieros. Se observa también que la altura de agua va disminuyendo a medida que el fluido avanza, hasta llegar a su mínima altura de 1,61 m a los 120 m, correspondiente a la sección final del rápido de descarga.

x (m)	-20	20	40	60	80	100	120
h OpenFOAM (m)	9,20	4,09	2,68	2,16	1,92	1,72	1,61
h SMI (m)	9,28	3,61	2,61	2,19	1,97	1,80	1,55

Tabla 2: Tabla comparativa entre valores de la profundidad del agua entregados por la DOH y los obtenidos en simulación a lo largo del evacuador.

De la Fig. 4 se puede observar que la capa límite nunca se intercepta con la superficie libre, lo cual hace suponer que el flujo a lo largo del evacuador será un flujo no aireado.

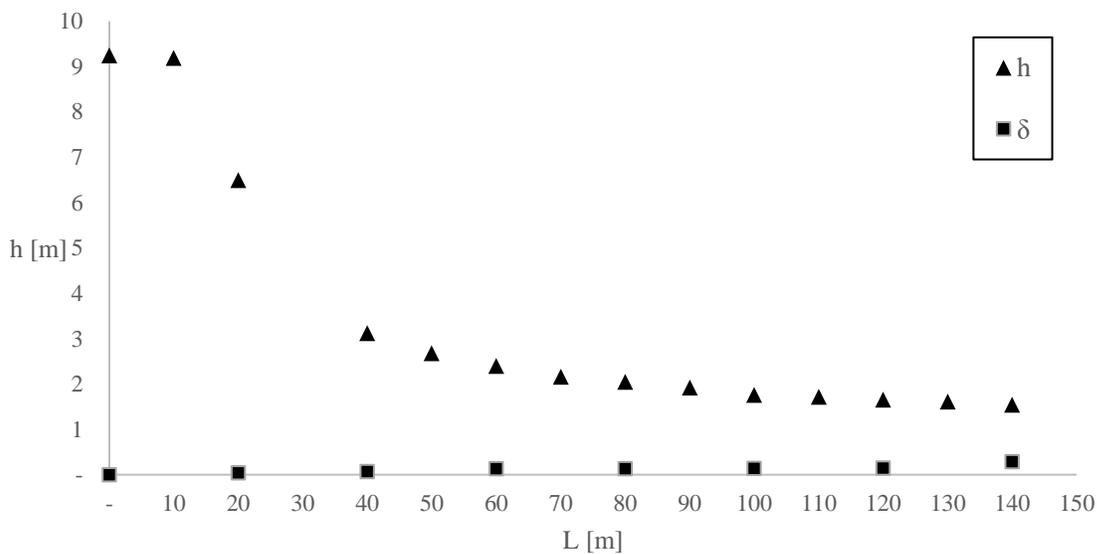


Fig. 4: Desarrollo de la capa límite y variación de la profundidad del agua.

X (m)	V OpenFOAM (m/s)	V SMI (m/s)
5	12,81	12,23
10	14,49	14,12
15	15,97	15,83
20	17,29	17,16
25	18,52	18,37
30	19,63	19,54
35	20,68	20,65
40	21,68	21,37
45	22,58	22,42
50	23,44	22,98
55	24,27	23,88
60	25,07	24,85
65	25,81	25,19
70	26,55	25,91
75	27,22	26,66
80	27,93	27,06
85	28,51	27,88
90	29,17	28,31
95	29,72	28,76
100	30,3	29,21
105	30,89	29,69
110	31,4	30,18
115	31,86	30,68
120	32,37	31,03
125	32,93	31,41
130	33,31	31,75
135	33,71	32,1

Tabla 3: Tabla comparativa entre valores de velocidad entregados por la DOH y los obtenidos en simulación a lo largo del evacuador.

Respecto a las velocidades medias (Tabla 3), se observa que los valores de las velocidades extraídos de la simulación son mayores que los encontrados en la memoria de cálculo, alcanzando la mayor diferencia a los 135 m, donde existe una diferencia de aproximadamente 5%.

En la Fig. 5 se puede ver la distribución de presiones adimensionales para cada perfil obtenido a lo largo del evacuador. Las presiones aumentan en dirección del flujo, siendo mayores que la hidrostática. A una distancia de 20 m del inicio del rápido de descarga las presiones alcanzan 1,02 veces la presión hidrostática, estas aumentan a lo largo del desarrollo del fluido 1,15 veces más en los 120 m. En el canal de control a los -20 m las presiones alcanzan un valor igual a la hidrostática.

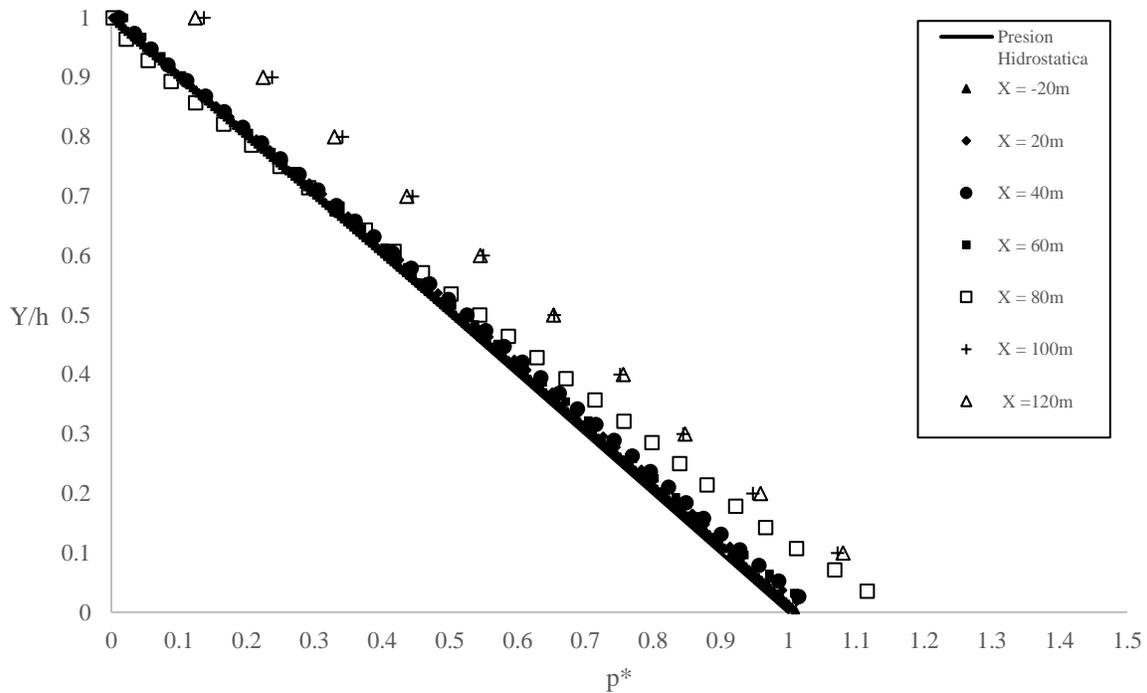


Fig. 5: Distribución de presiones adimensional ($p^* = p/\rho gh \cos(\theta)$).

La energía cinética turbulenta (TKE) adimensional (Fig. 6) aumenta en la dirección del flujo. Se puede observar que las curvas progresivamente se aproximan a una recta, donde a 40 m la curva es casi vertical, mientras que en la dirección del flujo la curva se acentúa a la derecha en los últimos valores de cada perfil hasta aproximándose a una tendencia lineal en la variación de TKE. Los valores mínimos encontrados se ubican a 40 m del evacuador de crecidas aumentando hasta 0,75 más a los 120 m, estos valores máximos se encuentran al final del rápido de descarga donde las alturas de agua son mínimas y las velocidades son las más altas. Las curvas de TKE para cada perfil presentan una mayor diferencia entre los datos a medida que el flujo avanza en el rápido de descarga, cuando el flujo presenta una mayor altura los datos obtenidos para ese perfil varían en menor grado, llegando a un valor de 0,18; cuando el flujo alcanza la menor altura los datos obtenidos presentan una mayor diferencia entre ellos y un aumento progresivo hasta llegar al máximo que es 0,75.

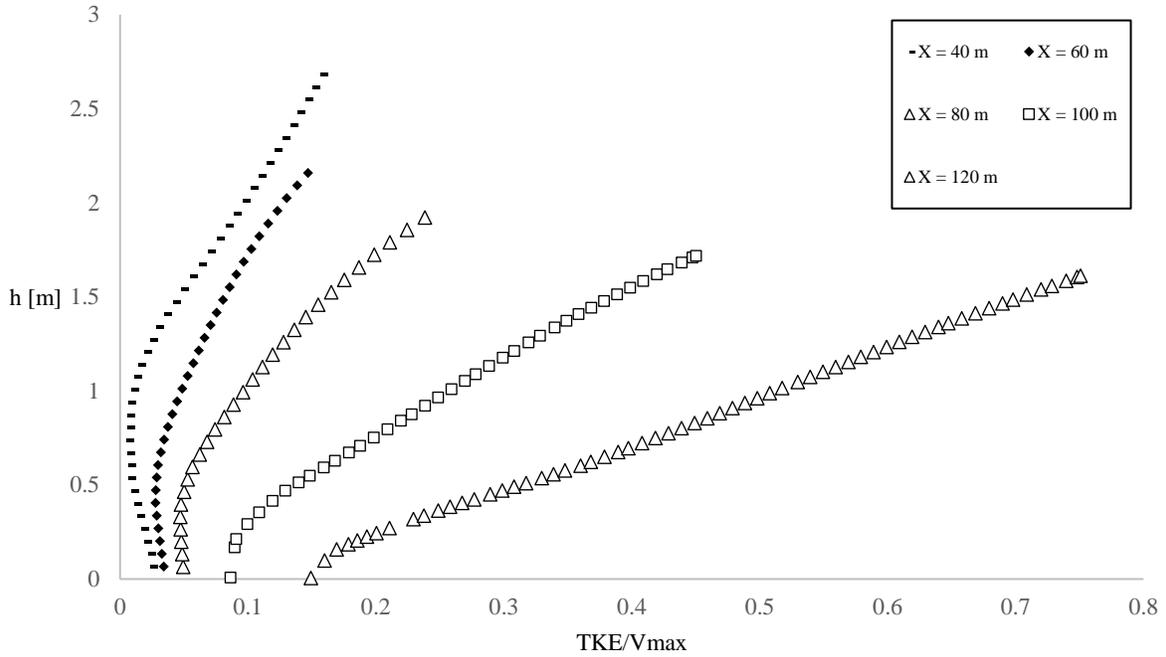


Fig. 6: Distribución de TKE/Vmax en dirección del flujo.

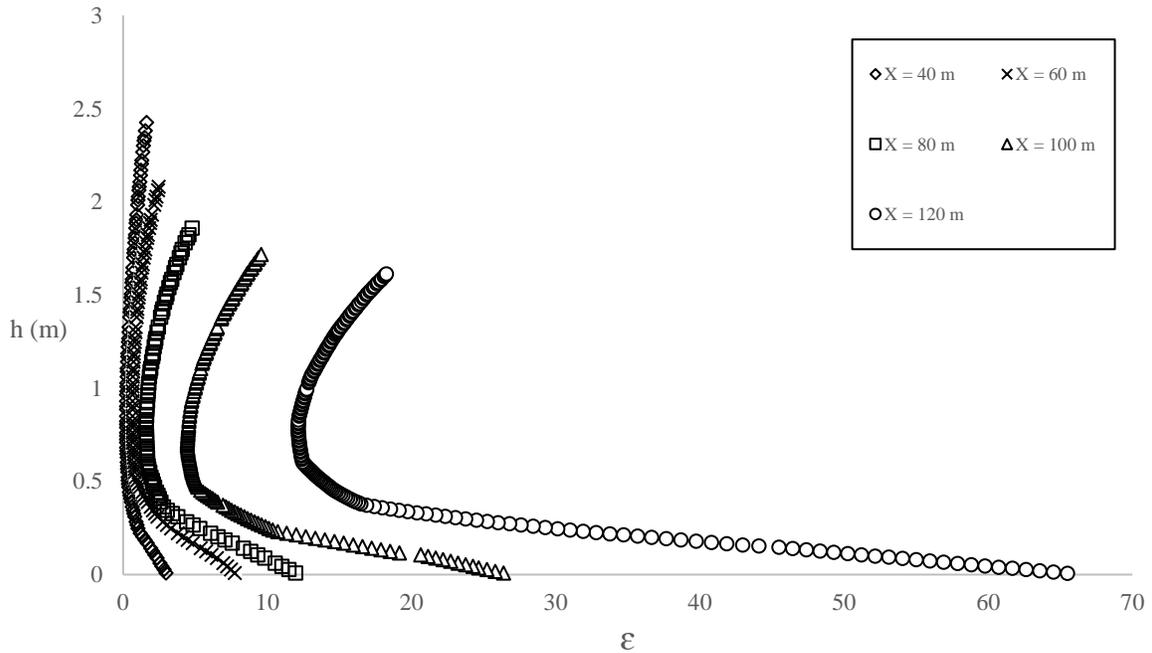


Fig. 7: Distribución de epsilon (m^2/s^3) en dirección del flujo.

La distribución de epsilon en dirección del flujo se muestra en la Fig. 7 donde $3.2 m^2/s^3$ es el menor valor en la superficie del agua, este se encuentra a los 40 m desde el inicio del rápido de descarga donde la altura del agua es de 2,68 m. Los valores aumentan hasta $20 m^2/s^3$ a medida que el flujo avanza hasta una distancia de 120m. En este punto, el agua tiene una

altura igual a 1,61 m. Los valores de ϵ para cada perfil cuando h se aproxima a 0 son hasta 3 veces el medido en la superficie, luego disminuyen hasta $h/2$, donde finalmente comienzan a aumentar hasta llegar a un valor máximo en la superficie. Esta tendencia se acentúa a medida que el flujo avanza a lo largo del canal.

X (m)	σ OpenFOAM	σ SMI
10	1,06	1,03
20	0,70	0,65
30	0,53	0,48
40	0,43	0,37
50	0,36	0,3
60	0,31	0,25
70	0,27	0,21
80	0,24	0,18
90	0,22	0,16

Tabla 4: Tabla comparativa entre valores del índice de cavitación σ entregados por la DOH y los obtenidos en simulación a lo largo del rápido de descarga.

Como la capa límite no alcanza la superficie libre, no es posible determinar la concentración de aire, es por esto que para determinar la ubicación de los aireadores se verifica que los valores del índice de cavitación sean menores a 0,25. Según la Tabla 4, los valores de σ disminuyen a lo largo del rápido. Basado en el cálculo empírico realizado por SMI, el aireador se debe ubicar a los 60 m desde el inicio del rápido de descarga, donde se encuentra un valor de 0,25 para el índice de cavitación. En la simulación realizada el aireador debe ser ubicado a 80 m desde el inicio del rápido, donde el índice de cavitación es 0,24, esto considerando que las velocidades simuladas son mayores a las entregadas por SMI, por lo que los valores deberían disminuir en vez de aumentar debido a la relación entre el índice de cavitación y las velocidades medidas. Por lo que cualquier irregularidad brusca a los 80 m mayor o igual a 1 mm en el hormigón producirá cavitación.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los resultados de una simulación numérica del flujo de agua sobre el evacuador de crecidas perteneciente al Embalse Chironta. La geometría simulada consta de 20 m de canal control, 137 m de rápido de descarga junto con la cuchara de lanzamiento (Fig. 3). El dominio computacional, incluyó, además del evacuador de crecidas, una extensión ficticia del canal después de la cuchara de lanzamiento para el desarrollo final del flujo, para definir la condición de salida. De acuerdo con los resultados numéricos obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- a) El desarrollo de la capa límite no alcanza la superficie libre por lo que no existe arrastre de aire a lo largo del evacuador, en consecuencia, los valores obtenidos para todos los perfiles a lo largo del evacuador se pueden utilizar para el análisis de las velocidades, presiones y TKE.

- b) Las alturas de agua obtenidas en la simulación presentan una variación de 4% con respecto a las entregadas por la DOH, estas disminuyen a lo largo del evacuador, comenzando con un valor igual a los 9,2 m a los -20 metros de longitud, terminando con una altura de 1,61 metros al final del rápido de descarga, manteniendo la tasa de disminución de altura en dirección del flujo.
- c) Para el caso de las velocidades, estas presentan un aumento a lo largo del evacuador, donde a los 5 m la velocidad es de 12,2 m/s alcanzando los 33,7 m/s a los 135 m, al final del rápido de descarga. Las velocidades medias obtenidas de la simulación son mayores que las entregadas por la DOH en la memoria de cálculo, con diferencias de hasta un 5%
- d) Las presiones adimensionales son mayores que la hidrostática, las presiones a lo largo del flujo aumentan, estas alcanzan un valor hasta 1,02 veces la hidrostática a los 20 m, llegando a ser 1,15 veces más a la hidrostática a los 120 m. Los valores máximos de presiones se presentan en los últimos 40 m del evacuador. Los valores en el canal de control en -20 m son de 1,4 veces la hidrostática.
- e) Los valores de TKE adimensionales observados presentan un aumento a lo largo del evacuador, presentando su menor valor a los 40 m con un valor de 0,15 y su mayor valor a los 120 m es de 0.75. El aumento de TKE se produce en la dirección del flujo, para cada perfil, donde se observa como la curva se aproxima a una recta a lo largo del evacuador.
- f) La distribución de épsilon a lo largo del canal muestra que, para cada perfil, los valores aumentan hasta una altura de $h/2$, para luego disminuir hasta la superficie. Los valores de épsilon en la superficie aumentan a medida que el flujo avanza en el canal, encontrándose un mínimo de $3,2 \text{ m}^2/\text{s}^3$ a los 40 m y un máximo a los 120 m con un valor de $20 \text{ m}^2/\text{s}^3$. Cuando la altura del agua tiene su máximo valor, los valores de épsilon son mínimos, mientras que cuando la altura de agua va disminuyendo épsilon aumenta hasta alcanzar el máximo a los 120 m.
- g) Los índices de cavitación en el rápido de descarga obtenidos con la simulación numérica son menores o iguales a 0,25 a una distancia de 80 m desde la cresta del rápido, por lo que los aireadores deben ser ubicados a esa distancia. Existe una diferencia de 20 m respecto a los resultados de SMI, donde indica que el índice de cavitación llega a 0,25 a los 60 m desde el inicio del rápido.

REFERENCIAS

Carrillo, J. C. S. José, & Gerardo, L. C. E. Luis. (2015, 16 julio). Consideraciones del mallado aplicadas al cálculo de fluidos bifásicos con las técnicas de dinámica de fluidos computacional [Investigación].

DGA. (2019, agosto). Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas hidráulicas. [Informe].

Dirección de Obras Hidráulicas. (2016, febrero). Moderación Física y Matemática LES de las Obras de Evacuación del Embalse Ancoa [Informe].

DOH. (2012, enero). Plan nacional de embalses dirección de obras hidráulicas. [Informe].

DOH-MOP. (2016, enero). Plan nacional de embalses dirección de obras hidráulicas [Informe].

Escenarios hídricos 2030, (2018). Modelo De Gestión Hídrica [Informe].

Jiménez, S. J, & Wainer, J. T. (2017, marzo). Realidad del Agua en Chile: ¿Escasez o falta de infraestructura? [Informe Económico].

OpenCFD Ltd. (2004, 5 marzo). User Guide.

Rodi, W. (1993). “Turbulence models and their application in hydraulics. A state of the art review”. IAHR Monograph.

RNAP-MMA. (2009). Santuarios de la naturaleza. [Informe].

Toro, J. P., Bombardelli, F. A., Paik, J., Meireles, I., Amador, A. (2016). “Characterization of turbulence statistics on the non-aerated skimming flow over stepped spillways: A numerical study.” Environ. Fluid Mech., 16(6), 1195–1221.

Wilcox, D. C. W. David. (1994, 16 julio). Turbulence Modeling for CFD [Libro].