

## **SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO EN UNA ESCALA DE PECES PARA VERIFICAR SU DISEÑO.**

### **NUMERICAL SIMULATION OF THE FLOW ON A FISH LADDER TO VERIFY THE DESIGN.**

**Guadalupe Iriarte<sup>1</sup>, Sofia Borsellino<sup>1</sup>, I. Matías Ragessi<sup>1</sup>, Laura E. Motta Milesi<sup>1</sup>  
Gabriela Pintos<sup>1</sup>, Gonzalo Moya<sup>1</sup> y Andrés Rodríguez<sup>1, II</sup>**

*I Laboratorio de Hidráulica - Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad  
Nacional de Córdoba (FCEFYN - UNC)*

*II Instituto de Estudios Avanzados de ingeniería y Tecnología (IDIT CONICET/UNC)*

[guadalupe.iriarte@mi.unc.edu.ar](mailto:guadalupe.iriarte@mi.unc.edu.ar)

[sofia.borsellino@mi.unc.edu.ar](mailto:sofia.borsellino@mi.unc.edu.ar)

[matias.ragessi@unc.edu.ar](mailto:matias.ragessi@unc.edu.ar)

**Palabras Clave:** escalas de peces, sustentabilidad, turbulencia, ambiente, hidráulica, fauna ictícola

**Resumen.** Este trabajo presenta el caso de estudio del prediseño de una escala de peces para el Azud de Villa María (sobre el río Tercero, provincia de Córdoba). El azud representa una barrera que impide la migración de la fauna ictícola. Esto genera un severo impacto en la preservación de las diferentes especies a lo largo de todo el sistema, y la interrupción de la cadena migratoria, tanto con fines reproductivos como alimentarios. La escala de peces por lo tanto significa una solución adecuada a la ruptura que produce el azud en la continuidad longitudinal del río. En base a datos bibliográficos y antecedentes disponibles, se definió un diseño de escala de peces con estanques sucesivos conectados por vertederos sumergidos, para las especies migratorias que habitan el lugar. En este trabajo se simuló mediante la fluidodinámica computacional (CFD) las condiciones de flujo en la escala.

**Keywords:** fish ladder, sustainability, turbulence, environment, hydraulic, fish fauna

**Abstract.** The present paper will show the study case of a fish ladder pre-design for the Villa María dam (on the Tercero river, Córdoba province). The dam represents a barrier that interrupts the migration of fish fauna. This situation affects the preservation of the different fish species in the system and interrupts the migration for the purpose of reproduction and feeding. The fish ladder is an adequate solution to the obstacle produced by the dam in the continuity of the river. Based on available bibliographic data and background information, a fish scale pre-design was defined with a pool sequence connected by submerged weirs, for the migratory species that inhabit the area. In this work, the flow conditions at the scale were simulated using computational fluid dynamics (CFD).

## 1. INTRODUCCIÓN

Las escalas de peces son una de las soluciones más utilizadas con el fin de mitigar el efecto barrera que se genera en la construcción de un azud o una presa, ofrecen a los peces un camino alternativo para sortear el obstáculo, discretizando en pequeños saltos la altura total a salvar.

Dentro de las distintas tipologías de dispositivos para permitir el paso de los peces se definió, de acuerdo a distintos factores tales como, topografía y especies de peces migratorias, estudiar las escalas de estanques sucesivos.

Las mismas, están compuestas por una serie de estanques dispuestos uno a continuación del otro, de modo que la altura total de la barrera queda dividida en pequeños desniveles, admisibles para el mayor número de ejemplares de peces. El flujo del agua de un estanque a otro se produce a través de vertederos, hendiduras verticales u orificios por los que también asciende el pez (Díaz, 2016). Los diseños consisten en una rampa de tabiques transversales y su respectivo paso.

En este trabajo se estudiará la caracterización hidráulica de una escala de peces de estanques sucesivos con vertederos sumergidos y hendiduras verticales, para el caso del azud de Villa María ubicado en el Río Tercero, provincia de Córdoba. La caracterización hidráulica se basa principalmente en los siguientes parámetros: los patrones de flujo, la velocidad media en los estanques, y la potencia disipada por unidad de volumen. Mediante el uso complementario de modelos numéricos se analizarán estos parámetros y se contemplarán posibles variaciones en las dimensiones geométricas, con el objetivo de seleccionar el diseño con mayor eficacia para las especies elegidas.

## 2. METODOLOGÍA

En este trabajo se utilizó el software de diseño AutoCAD en combinación con Gmsh® (Christophe Geuzaine, 2009), y las herramientas que proveen el paquete de librerías de OpenFOAM® (Open Field Operation and Manipulation, (OpenCFD, 2005)). Este último, es un software de uso gratuito y código abierto, que ofrece la libertad de crear o modificar un solver o código de resolución específico. El código es aplicable a un amplio rango de campos de la ingeniería. OpenFOAM® ofrece herramientas de pre y post-procesamiento, en este caso se utilizó el post-procesador, llamado paraView, que permite la visualización y análisis de datos.

La modelación numérica se dividió en tres etapas principales: definición de la geometría y construcción de la malla de volúmenes finitos, simulación del flujo (solución) y post-procesamiento de resultados.

### 2.1. Prediseño y variables a estudiar

#### Potencia disipada

La potencia disipada en cada uno de los estanques de la escala de peces es una de las variables más importantes en el momento del diseño de una escala de peces.

El pez debe encontrarse relativamente confortable dentro de la escala, es decir bajas velocidades y bajo nivel de turbulencia. Si la potencia hidráulica es grande, se produciría una excesiva intensidad de turbulencia en el flujo, que podría desorientar a los peces o exigirles demasiado esfuerzo para remontar al siguiente estanque.

Por este motivo, se debe estimar la intensidad de la turbulencia que se produce en cada estanque; esta medición se realiza por medio de la cuantificación de la pérdida de energía hidráulica generada en el salto de un estanque al siguiente (Diaz, 2016). La energía hidráulica disipada en cada estanque se calcula por la expresión:

$$P_t = \frac{\delta \cdot g \cdot Q \cdot \Delta H}{V} \quad (1)$$

Donde  $P_t$  es la potencia teórica disipada (watts/m<sup>3</sup>),  $\delta$  la densidad del agua (1000 kg/ m<sup>3</sup>),  $g$  la aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>),  $Q$  el caudal de paso (m<sup>3</sup>/s),  $\Delta H$  el desnivel (salto) entre dos estanques consecutivos (m) y  $V$  el Volumen de agua en el estanque considerado (m<sup>3</sup>).

En el caso de las especies Sábalo y Dorado debido a la ausencia de datos, se tomó como referencia los valores recomendados para ciprínidos ya que ambas especies poseen baja capacidad natatoria para, se sugiere que el límite máximo de la potencia disipada ( $P_t$ ) sea entre 125-150 Watt/m<sup>3</sup> (Diaz, 2016).

En el prediseño para dimensionar los estanques de vertederos sumergidos y hendiduras verticales se utilizaron como datos un salto ( $\Delta H$ ) de 0,25 m, un caudal ( $Q$ ) de 1 m<sup>3</sup>/s y un volumen ( $V$ ) de 17,52 m<sup>3</sup>. En función de estos datos y la pendiente se calculó con la Ec. (1) la potencia disipada ( $P_t$ ) para cada diseño propuesto.

Por otro lado, en base a los resultados de los modelos numéricos se calculó la potencia disipada considerando las propiedades de la turbulencia del flujo ( $P_m$ ). Para ello se aplicó la utilidad IntegrateVariables de paraView que integra la propiedad de interés de cada celda en un volumen determinado (en este caso, el volumen del estanque  $V$ ):

$$\begin{aligned} P_m &= \rho \int \varepsilon dV & (2) \\ \varepsilon &= c_\mu k \omega \\ P_m &= c_\mu \frac{k \omega \rho}{V} \end{aligned}$$

donde  $k$  es la energía cinética turbulenta en kg m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>,  $\varepsilon$  es la tasa de disipación de energía cinética turbulenta en m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>,  $\omega$  es la tasa específica de disipación de energía cinética turbulenta en s<sup>-1</sup>,  $c_\mu$ , el coeficiente estándar cuyo valor es igual a 0,09 para el modelo  $k - \omega$  SST y  $\rho$  la densidad del agua (1000 kg/m<sup>3</sup>). Los valores de  $k$  y  $\omega$  se obtienen de los resultados del modelo numérico.

### Velocidad de agua:

La segunda variable a estudiar en este trabajo es la velocidad del flujo donde se va a comparar la velocidad media en cada estanque, en particular en la zona de ascenso de los peces coincidente con los vertederos y las hendiduras, con los valores de capacidad natatoria de la especie (Borsellino, 2022). Se consideró la Velocidad de Crucero ( $u_c$ ), la Velocidad de sprint-punta ( $u_{sp}$ ) y la Velocidad sostenida ( $u_s$ ).

Siendo  $u_c$ , la máxima velocidad en la cual el pez puede nadar continuamente sin mostrar signos de fatiga (0,63 m/s),  $u_s$ , la mayor velocidad que puede mantenerse aeróbicamente durante horas (1,5 m/s), y  $u_{sp}$  la máxima velocidad que puede alcanzar un pez y puede ser sostenida en un tiempo muy breve (2,5 m/s).

### Zonas de recirculación y cortocircuito:

Las zonas de recirculación son aquellas en donde se presentan los menores valores de velocidad (o incluso negativos), que le sirven al pez para descansar. Por otro lado, se generan zonas de cortocircuitos en las cuales el chorro saliente de un vertedero tiene gran velocidad y llega al estanque inferior sin que haya disipado la suficiente energía cinética, por consiguiente, esta energía se transmite al estanque siguiente (Diaz, 2016). Es por ello que es necesario asegurar que en los lugares donde caiga el agua, no existan zonas de recirculación para prevenir que los peces queden atrapados. En las escalas existen ambas zonas, que deben ser estudiadas para optimizar el diseño.

## 2.2. Diseño de los estanques

En esta instancia se hizo uso de la herramienta de diseño de AutoCAD para esquematizar los estanques de la escala de peces.

Las dimensiones de la geometría (Tabla 1), ancho ( $B_e$ ), profundidad ( $H_e$ ), ancho de los vertederos y las hendiduras verticales ( $B_v$  y  $B_h$ ), se obtuvieron a partir de las recomendaciones bibliográficas para la especie objetivo teniendo en cuenta como variable limitante la potencia disipada teórica calculada según Ec. (1) en cada estanque. La pendiente se eligió en base al espacio disponible en la sección del azud de Villa María.

Tipología	Ancho del vertedero/hendidura [m]	Ancho del Estanque [m]	Largo del Estanque [m]	Pendiente
Vertederos sumergidos ( $V_s$ )	0,45	2,5	3,15	8%
Hendiduras Verticales ( $H_v$ )	0,45	2,5	3,15	8%

Tabla 1: Dimensiones de cada prediseño de las escalas de peces

### Construcción del mallado

La generación de la malla se realizó mediante Gmsh® y la herramienta snappyHexMesh proporcionada por OpenFOAM. El código abierto Gmsh® permite generar mallas de volúmenes finitos para delimitar las dimensiones del volumen que ocupa la geometría. La malla base se resolvió con hexaedros con una resolución de celdas de 10 cm.

Luego, los sólidos generados en AutoCAD se exportaron en formato .stl, y en conjunto con la herramienta snappyHexMesh se superpuso la malla base y el sólido para discretizar el dominio de estudio.

En las Figura 1 y Figura 2 se presenta una imagen de la malla base, la geometría de la alternativa estudiada y el esquema obtenido mediante la ejecución de la herramienta snappyHexMesh.

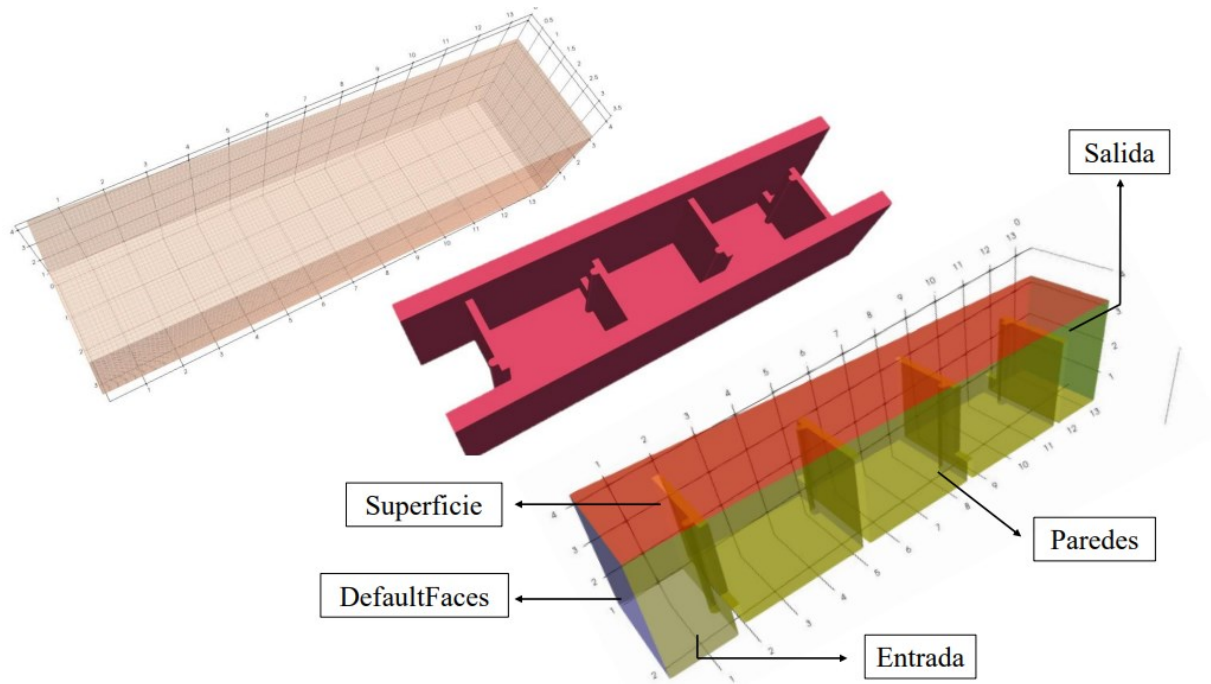


Figura 1: Malla de volúmenes finitos, geometría de los estanques con vertederos sumergidos y superposición de ambos

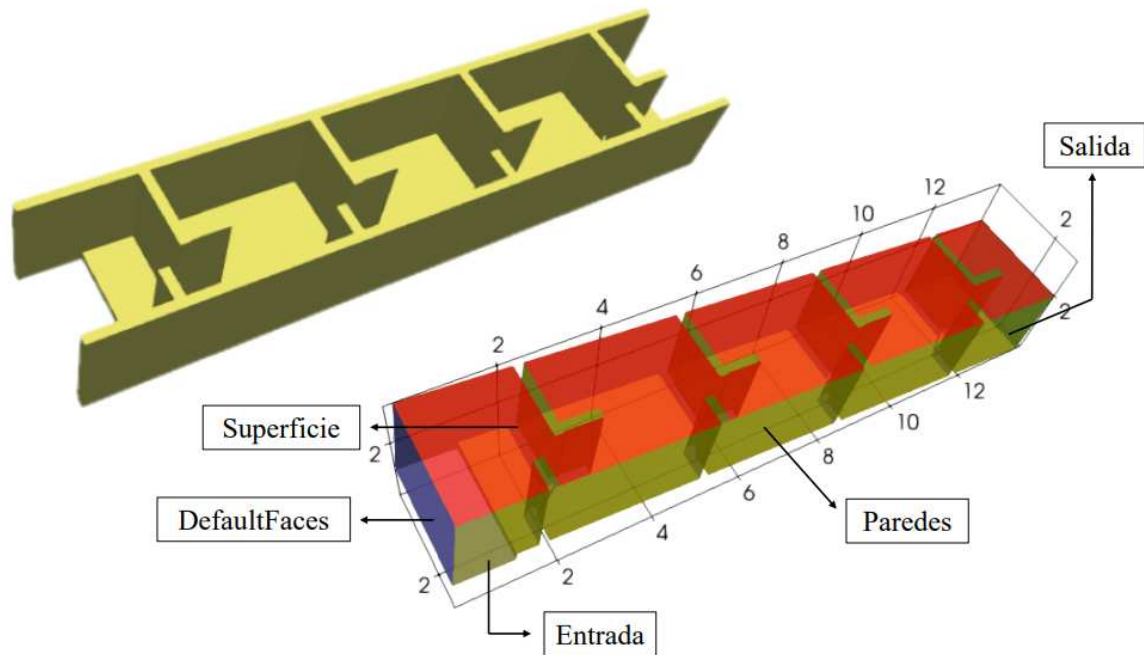


Figura 2: Geometría de los estanques con hendiduras verticales y superposición con la malla base

### Modelo matemático

En este trabajo se aplicó un modelo numérico basado en las ecuaciones promediadas de Reynolds (RANS: Reynolds-Averages Navier-Stokes). El código computacional utilizado para resolver numéricamente las ecuaciones RANS pertenece al paquete libre y abierto OpenFoam® (Open Field Operation and Manipulation, OpenCFD Ltd. 2005) (OpenCFD <http://www.opencfd.co.uk/openfoam/>).

Se utilizó el código InterFoam de OpenFoam® que aplica para una malla de volúmenes finitos y dos fluidos incompresibles, isotérmicos, y no miscibles ya que el interés es estudiar la interfaz basada en la fracción de fase. Se utilizó el algoritmo “Pressure Implicit with Splitting of Operators” (Issa, 1984) como esquema de cálculo para la presión y la velocidad, el cual se adapta con éxito para la solución iterativa de problemas de estado estacionario (Malalasekera, 2007). El cierre turbulento utilizado en el kOmegaSST (Menter y Esch, 2001) con coeficientes actualizados (F.R Menter, 2003). En este caso el término adicional F3 (Hellsten, 1997) para paredes rugosas es igual a cero.

### Condiciones iniciales y de borde

El esquema numérico requiere establecer condiciones iniciales y de borde para las variables fundamentales: presión ( $p$ ), velocidad media ( $U$  en sus tres componentes), energía cinética turbulenta ( $k$ ), tasa específica de disipación de energía cinética turbulenta ( $\omega$ ) y viscosidad turbulenta ( $\nu_t$ ).

ZONA	$\bar{U}$	$p$	$k$	$\omega$	$\nu_t$
<b>Entrada</b>	<i>fixedValue</i> $\bar{U}_{Vs} = (0, 0, 254, 0)$ $\bar{U}_{HV} = (0, 0, 345, 0)$	<i>fixedFlux Pressure</i>	$1,30E-06 \text{ m}^2/\text{s}^2$	<i>fixedValue</i> $0,018 \text{ s}^{-1}$	<i>calculated</i>
<b>Salida</b>	<i>fixedValue</i> $\bar{U}_{Vs} = (0, 18, 0, 0)$ $\bar{U}_{HV} = (0, 37, 0, 0)$	<i>zeroGradient</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>calculated</i>
<b>Superficie</b>	<i>pressureInlet</i> <i>Outlet Velocity</i>	<i>totalPressure</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>calculated</i>
<b>DefaultFaces  Paredes</b>	<i>fixedValue</i> $\bar{U} = (0, 0, 0)$	<i>zeroGradient</i>	<i>kqRWall Function</i>	<i>omegaWall Function</i>	<i>nutkWallFunction</i>

Tabla 2: Condiciones iniciales y de borde.

En la sección de entrada se estableció un valor de las tres componentes del vector velocidad de forma de lograr un caudal constante ( $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ) de interés. Esto constituye una condición de borde tipo Dirichlet.

El modelo de turbulencia SST requiere valores en la sección entrada. Estos valores (indicados en la Tabla 2) se estimaron en función de parámetros medios del flujo: velocidad media, área de la sección de entrada e intensidad de la turbulencia. En este caso se utilizó la calculadora de propiedades de la turbulencia de CFD-online (<https://www.cfd-online.com/Tools/turbulence.php>). Luego, el modelo calcula el valor de  $\nu_t$  utilizando los valores proporcionados para el vector velocidad,  $k$  y  $\omega$  (condición de borde *calculated*).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La simulación numérica se llevó a cabo en un segmento de una escala de peces compuesto por tres estanques más un estanque de entrada y uno de salida. Para el análisis de los resultados, nos enfocamos en el estanque central, dado que éste presenta una menor influencia de las condiciones de borde sobre los parámetros de interés.

El objetivo de este trabajo fue comparar los resultados numéricos de velocidad y potencia con los valores calculados de forma teórica según la bibliografía recomendada y, también las capacidades natatorias del pez con las exigidas por la escala.

Tipología	Pendiente	Potencia teórica (Watt/m <sup>3</sup> )	Potencia CFD (Watt/m <sup>3</sup> )	Velocidades Máximas (m/s)
Vertederos sumergidos	8%	142	22,87	2,4
Hendiduras Verticales	8%	292,5	91,80	2,5

Tabla 3: Resultados de la modelación

Con respecto al cálculo de la potencia disipada en un estanque, el modelo arrojó un valor de 22,87 Watt/ m<sup>3</sup> para vertederos sumergidos y un valor de 91,80 para hendiduras verticales. Ambas alternativas resultaron ser inferiores a los valores recomendados por la literatura (125-150 Watt/m<sup>3</sup>) para las especies objetivos y a los calculados por fórmula. Otra de las variables analizadas fue la velocidad del flujo con el fin de verificar que ésta sea lo suficientemente baja para que los peces puedan nadar de manera confortable dentro de los estanques. Además, comparar las velocidades máximas del flujo en la zona de los vertederos y hendiduras con la velocidad punta de los peces.

En las Figuras 3A y 3B se observan las vistas en planta y en corte transversal en el centro del estanque para la configuración de vertederos sumergidos. En la zona de los vertederos se observan velocidades que alcanzan valores de 2,4 m/s, valores compatibles con la velocidad punta del pez (2,5 m/s). Por otro lado, en la zona media del estanque, las velocidades son bajas o cercanas a cero, se debe tener en cuenta que las mismas presentan variaciones en el tiempo, estos valores se encuentran por debajo de la velocidad crucero del pez (0,63m/s). Esto nos permite decir que se cumplen las condiciones de velocidad para la migración de la fauna ictícola.

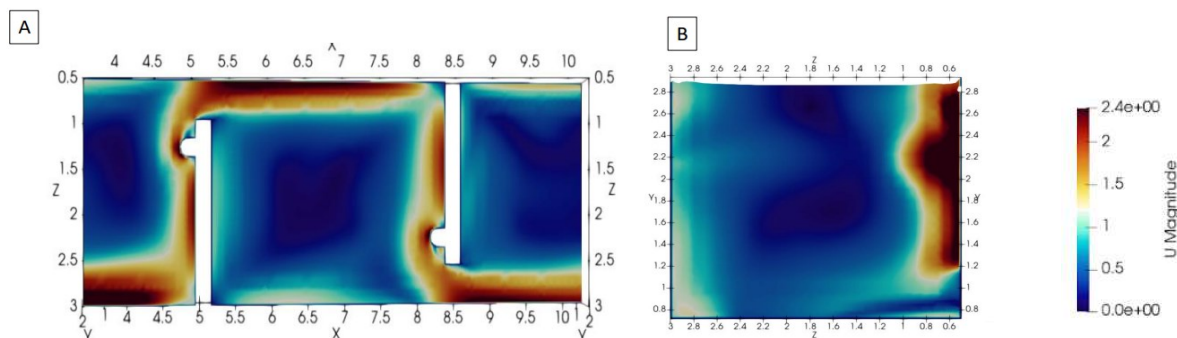


Figura 3: Campo de velocidades dentro del estanque de vertederos en [m/s]

En las Figuras 4A y 4B se observan las vistas en planta y en corte transversal en el centro del estanque para la configuración de hendiduras. En las zonas de las hendiduras se observan velocidades cercanas a 2,5 m/s que se encuentran en el límite de la velocidad punta del pez (2,5 m/s). Por otro lado, al igual que en los vertederos en la zona media de los estanques, las velocidades son bajas o cercanas a cero, estos valores se encuentran por debajo de la velocidad crucero del pez (0,63m/s).

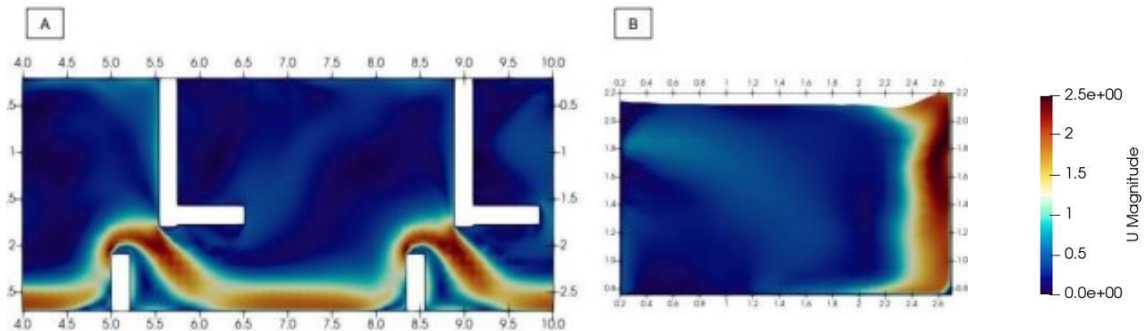


Figura 4: Campo de velocidades dentro del estanque de hendiduras verticales en [m/s]

Luego del análisis de las alternativas planteadas se puede observar que los vertederos se adecuan mejor que las hendiduras a las velocidades requeridas por el pez.

La Figura 5 muestra las zonas de energía turbulenta en la escala de peces. A partir de estas imágenes se observó que las zonas de alta turbulencia corresponden a las zonas de vertederos, y a sus áreas adyacentes, en dirección del flujo principal, donde las velocidades son más elevadas. Por otro lado, se observa que, las regiones de recirculación se presentan en el centro de los estanques donde se generan áreas de baja turbulencia.

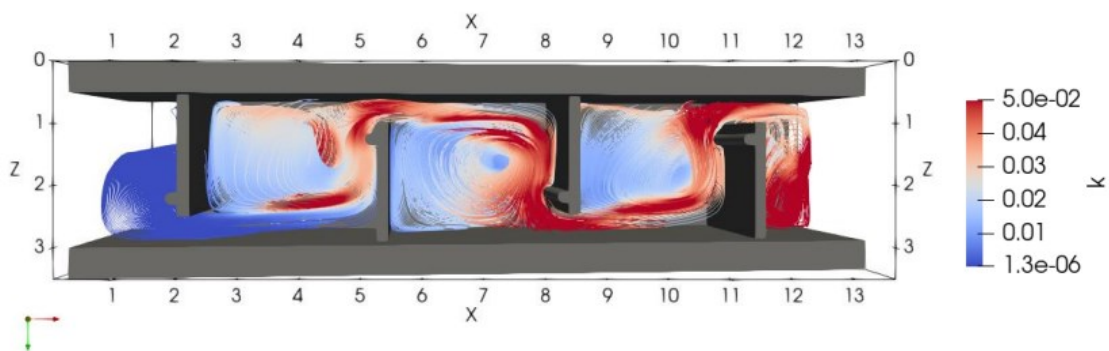


Figura 5: Líneas de flujo esquematizadas en base a la energía cinética turbulenta en vertederos [ $\text{m}^2/\text{s}^2$ ]



#### **4. CONCLUSIONES**

A partir del trabajo realizado se puede concluir que la geometría y la pendiente de diseño de la escala influyen de manera significativa en el cálculo de la potencia disipada. Una correcta elección de dichas variables garantizará la eficiencia de los sistemas de transferencia permitiendo la migración de la fauna ictícola.

Los resultados obtenidos mostraron que ambas alternativas están por debajo de los valores máximos requeridos de potencia disipada. Es importante destacar que no se han realizado estudios específicos sobre valores mínimos de potencia disipada para las especies objetivo, por lo que se puede esperar que los peces se estanquen debido a la ausencia de una llamada que los guíe al siguiente módulo.

En lo que respecta a la velocidad, ambas alternativas resultan adecuadas para la circulación de la fauna ictícola ya que la velocidad del flujo no supera el umbral máximo soportado por los peces.

A su vez en ambos casos se generan zonas de velocidades bajas que dan lugar a zonas de recirculación propicias para el descanso de los peces en su ascenso por los estanques.

En trabajos futuros, se plantea avanzar con el diseño de hendiduras verticales modificando algunos parámetros para mejorar la eficiencia de la escala de peces. Para asegurar la migración de los peces evitando su fatiga, se debe disminuir las velocidades máximas en las hendiduras. Para ello se pueden modificar variables tales como el ancho de las hendiduras, las aristas de los tabiques, así como también evaluar la posibilidad de disminuir la pendiente teniendo en cuenta que esto generaría cambios en la disposición de la escala sobre el azud de Villa María al aumentar la longitud misma.

Finalmente podemos decir que los datos numéricos obtenidos fueron satisfactorios y se resalta la importancia del modelo de turbulencia empleado utilizado en las simulaciones.

Resulta importante destacar que este tipo de simulaciones numéricas pueden considerarse una herramienta complementaria muy útil ya que es posible obtener características del flujo con un coste computacional relativamente bajo. Esto es de gran relevancia dado que hay escasos estudios sobre escalas de peces en Argentina.

**REFERENCIAS**

- Anon., s.f. <http://www.opencfd.co.uk/openfoam/>. [En línea].
- Borsellino, S., 2022. *Pre-diseño hidráulico de una escala de peces para el azud de San Marcos Sud (Rio Ctalamochita, provincia de Cordoba)*, Córdoba: s.n.
- Christophe Geuzaine, J.-F. R., 2009. Gmsh: a 3-D elements mesh generator with built-in pre- and post- processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 79(461-477).
- Diaz, R. G., 2016. *Escala y pasos de peces*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentacion y Medio Ambiente ed. España: s.n.
- F.R Menter, M. K. a. R. L., 2003. *Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model*. s.l.:s.n.
- Hellsten, A., 1997. *Some Improvements in Menter's k-omega-SST turbulence Model*. Finlandia, s.n.
- Issa, R., 1984. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. *Journal of Computational Physics*.
- Malalasekera, H. K. V. a. W., 2007. *An Introduction*. UK: s.n.
- Menter y Esch, F. y. T., 2001. *ELEMENTS OF INDUSTRIAL HEAT TRANSFER PREDICTIONS*. Brasil, s.n.
- Pita, M. B., 2013. *Evaluacion hidraulica y biologica de diseños de hendidura vertical para especies de baja capacidad natatoria*, Coruña: s.n.
- v3, G., 2005. *OpenFoam CFD*. [En línea]  
Available at: <https://www.openfoam.com/products-services/openfoam-code-development>