

Simulación hidrodinámica de un estanque raceway de baja profundidad para el cultivo del erizo rojo *Loxechinus albus* (Molina, 1782)

Hydrodynamic simulation of a shallow raceway tank for the culture of the red urchin

Loxechinus albus (Molina, 1782)

Ariel Araya Salinas , Pablo Bonati Díaz , Juan Manuel Estrada Arias 

Centro de Investigación Marina Quintay CIMARQ, Universidad Andrés Bello, Viña del Mar, Chile.

Correspondencia: Juan Manuel Estrada Arias, **E-mail:** mestrada@unab.cl

Artículo original | Original article

Palabras clave

Dinámica de fluidos
computacional
Cultivo de erizos en tierra
Calidad de agua

Keywords

Computational fluid dynamics
Onshore sea urchins` culture
Water quality

RESUMEN | Se hizo una simulación de la dinámica de fluidos computacional - CFD a un diseño de estanque de baja profundidad para cultivo del erizo rojo (*Loxechinus albus*), con el propósito de observar el comportamiento hidrodinámico respecto a la geometría, entrada de agua, homogenización, y potencial de remoción de los biosólidos, lo que tendría un efecto sobre la calidad del agua requerida para el cultivo. El diseño del estanque tiene una relación hidrodinámica largo-ancho de 6:1 y profundidad máxima de 0,28 m. Se simuló una situación con flujo estanque somero continuo y otra con descargas de 4 y 12 gpm (15,1 y 45,4 L min⁻¹, respectivamente) usando el software Autodesk® CFD 2021. Los resultados muestran que en ambos flujos se genera una alta turbulencia provocada por la velocidad de entrada, que se disipa rápidamente dando paso a velocidades entre 1 a 16 cm s⁻¹. El movimiento del agua dentro de la gran mayoría del sistema no supera los 2 cm s⁻¹. Las condiciones simuladas favorecen la mezcla y homogenización, pero el arrastre de partículas depende del caudal. Los resultados obtenidos permiten proponer e incorporar mejoras al diseño original antes de la realización de pruebas de campo en un estanque real, con el objetivo de mejorar tanto la calidad de agua como el bienestar de los ejemplares en cultivo.

ABSTRACT | A computational fluids dynamics - CFD simulation was carried out on a shallow tank design for the sea urchin (*Loxechinus albus*) culture, with the purpose of observing the hydrodynamic behavior regarding geometry, water inlet, homogenization, and removal potential of biosolids, which would influence the quality of the water required for the culture. The pond design had a length-width ratio of 6:1 and a maximum depth of 0.28 m. The simulation was performed with continuous flow and another with discharges of 4 and 12 gpm (15.1 and 45.4 L min⁻¹, respectively) using Autodesk® CFD 2021 software. The results showed that in both flows high turbulence caused by the inlet velocity was generated, which quickly dissipated giving way to velocities between 1 and 16 cm s⁻¹. The movement of water within most of the system did not exceed 2 cm s⁻¹. The simulated conditions favored mixing and homogenization, but the entrainment of particles depended on the flow rate. The results obtained allow us to propose and incorporate improvements to the original design before carrying out field tests in a real tank, with the aim of improving both the quality of the water and the well-being of the specimens in culture.

INTRODUCCIÓN

Los erizos de mar (Clase Echinoidea) son un grupo de organismos marinos que se encuentran ampliamente distribuidos en océanos polares, templados y tropicales, y que son importantes componentes de las comunidades bentónicas (Andrew et al. 2002; Harris y Eddy 2015), y solo 17 de las 850 especies descritas son consideradas de importancia comercial a nivel global, con un alto valor económico (Harris y Eddy 2015). Las principales pesquerías de erizos de mar se encuentran en Chile, Canadá, Japón, Corea del Sur, Rusia, E.E.U.U. y México (Andrew et al. 2002) y su principal mercado es Japón, que representa cerca el 90% de la demanda mundial (Sung y Chiang 2015). La mayoría de las poblaciones naturales de erizos de mar en las regiones donde estos se extraen han sufrido importantes disminuciones (Harris y Eddy 2015).

En el caso del erizo chileno, *Loxechinus albus* (Molina, 1782), es la especie más importante a nivel mundial en términos de volumen de extracción (FAO 2022). Se distribuye desde Perú, 6° 53'50" hasta el Estrecho de Magallanes, y también en las costas del sur de Argentina y las Islas Falkland o Malvinas (Clark

1948; Bernasconi 1953; Fenucci 1967; Larraín 1975; Dayton 1985; Pérez et al. 2008; Schuhbauer et al. 2010). Durante el periodo 2011-2020, el volumen promedio extraído en Chile ha representado el 47,4% del total de erizos de mar capturados en todo el mundo (FAO 2022). Históricamente el mayor desembarque ocurrió en 2002 alcanzando las 60.166 t, tras lo cual se ha producido un descenso y estabilización de las capturas en torno a las 30.000 t anuales. Actualmente en Chile, el erizo rojo es un recurso de extracción limitada por cuotas y con veda biológica entre los meses de octubre y enero (SERNAPESCA 2022). Aunque su cultivo en estanques ya es conocido, se deben mejorar las condiciones en función favorecer el crecimiento y manejo.

Los erizos son animales fisiológicamente muy primitivos y son sensibles a la calidad de agua, lo que requiere esfuerzos por entregar condiciones de cultivo de acuerdo con su biología (Mortensen et al. 2012). Para el cultivo de erizos y moluscos gasterópodos se usan regularmente estanques rectangulares (raceways) que pueden presentar patrones de flujo impredecibles, dificultan la eliminación de residuos y, requieren altos recambios de agua, por ende, son menos eficientes que los estanques circulares usados en cultivo de peces (Arriagada 2012). En estos estanques se generan mezclas heterogéneas entre el agua del estanque y el agua fresca del sistema de entrada, con marcadas zonas de baja calidad del agua producto de baja circulación y zonas muertas, así como en la acumulación de sedimentos. Las herramientas más usadas por los acuicultores para generar una mezcla eficiente del agua en el estanque son la interacción entre los dispositivos de entrada y salida de agua, el caudal y la geometría del estanque (Timmons et al. 2002).

Algunos autores, como Watten et al. (2000), Labatut et al. (2015), Stockton et al. (2016), Chanwoo et al. (2018), han incorporado a los raceways las ventajas de los estanques circulares, creando patrones con una serie de drenajes en medio de cada patrón circular. También se han desarrollado sistemas que ayudan a la eliminación de biosólidos dentro de los estanques (Wong & Piedrahita, 2003). Sin embargo, para ese u otro modelo nuevo de estanques, se debe analizar el comportamiento del agua, de los animales sometidos a esos patrones de flujo y velocidades, así como también en los refugios donde estén contenidos.

Los estanques de baja profundidad, como el desarrollado para diferentes especies de peces por Oiestad (1999), favorecen altas densidades de cultivo, reducen el requerimiento de agua, y facilitan el manejo, pero al tener un volumen de control menor, son más sensibles a cambios de temperatura y caídas de oxígeno en caso de fallas en el sistema de entrada de agua (White y Rigby 2003), aunque estos problemas se pueden solucionar implementando sistemas de recirculación (Timmons et al. 2002).

Ahora, observar, registrar y evaluar el comportamiento del flujo en el estanque permite inferir el efecto que el movimiento del agua tendría sobre los organismos en cultivo, la forma en cómo se mezcla y homogeniza el agua, el movimiento de los sedimentos que generan condiciones hipóxicas, entre otros.

Una forma de hacer análisis experimentales con altos grados de confianza es la simulación dinámica de fluidos computacional o CFD (Computational Fluid Dynamics) la cual ha sido utilizada para análisis en estanques de uso acuícola (Rasmussen y McLean 2004; Sompech et al. 2012; Hadiyanto et al. 2013; Labatut et al. 2015; Zhang et al. 2015; Liu et al. 2016; Stockton et al. 2016; Vallejos 2016; Chun et al. 2018; Li et al. 2019), ya que permite modificar y probar nuevos diseños sin la necesidad de construir modelos físicos. El CFD es un análisis numérico que se basa en la solución de las ecuaciones fundamentales en dinámica de fluidos, continuidad, momento y energía. El CFD divide la geometría en varias celdas computacionales (nodos), y en cada una se resuelve una forma algebraica discreta de ecuaciones diferenciales en espacio y tiempo. Además, el uso de CFD para diseñar reactores continuos y por lotes de tamaño comercial puede eliminar la experiencia subjetiva y empírica, y conducir a unidades mejor diseñadas y más eficientes (Labatut et al. 2015), lo que permite evaluar propuestas de diseño de acuerdo con criterios de producción y sobrevivencia, entre otros.

En este contexto, se presenta un diseño de estanque de baja profundidad y una caracterización hidrodinámica mediante software CFD, con el propósito de analizar el comportamiento del agua, y su potencial efecto sobre la homogenización, tasas de recambio y remoción de biosólidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño del estanque

Se diseñó un shallow raceway con una relación largo-ancho de 6:1, de 2.92 m longitud total, 0,45 m de ancho, profundidad máxima de 0,28 m; pendiente longitudinal de 2% y pendiente horizontal de 9% en su punto menos profundo. La parte final del estanque corresponde a un medio cono de 0,225 m de radio y pendiente de 35% (Fig. 1).

Simulación fluidodinámica

Se dibujó el prototipo del estanque con las características geométricas descritas mediante el software Autodesk® CFD 2021. Para analizar el comportamiento hidrodinámico, los modelos 3D corresponden físicamente a la masa de agua dentro de la piscina de cultivo. Para la descripción del comportamiento se revisan los perfiles de velocidad de acuerdo con la escala de color y los vectores de dirección.

Variables de entrada

Las variables cargadas al software corresponden a las dimensiones geométricas del estanque, los diámetros y longitud en la entrada y salida del agua, diámetro de las perforaciones de la barra de distribución (manifold), y 2 caudales diferentes. La temperatura se consideró uniforme (15°C)

Se simularon dos situaciones regulares en una operación de acuicultura en estanques: a) Modelo de flujo constante (flujo de entrada es igual al que sale), simulado en estanque provisto de un sifón de 2 m de largo (75 mm de diámetro) que mantiene el nivel y flujo constante, y b) Modelo en descarga, manteniendo las mismas dimensiones que el modelo anterior, pero quitando el sifón, dejando solamente un cilindro inferior que simula una salida del agua en caso de descarga (Fig. 2). Ambas situaciones fueron simuladas con flujos de 4 gpm y 12 gpm (15,1 y 45,4 L min⁻¹, respectivamente) para contrastar el efecto del flujo.

La entrada de agua simula un manifold horizontal de 40 mm instalado al inicio del estanque, con 5 aberturas equidistantes de 10 mm de diámetro para perturbar de igual forma el volumen.

RESULTADOS

El diseño del estanque y las dimensiones se presentan en la figura 1. El volumen es de 258 L para nivel a 0,28 m desde el punto más bajo (en la descarga) hasta el espejo de agua.

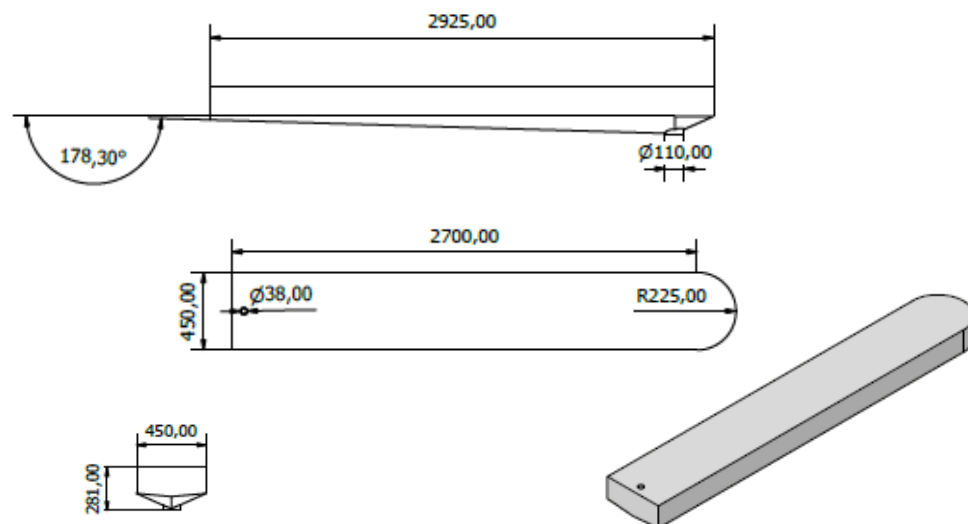


Figura 1. Dimensiones del estanque en análisis. El volumen de agua se estimó usando 0,28 m de altura (detalle en vista frontal). El modelo 3D corresponde físicamente a la masa de agua dentro de la piscina de cultivo.

Figura 1. Dimensiones del estanque en análisis. El volumen de agua se estimó usando 0,28 m de altura (detalle en vista frontal). El modelo 3D corresponde físicamente a la masa de agua dentro de la piscina de cultivo.

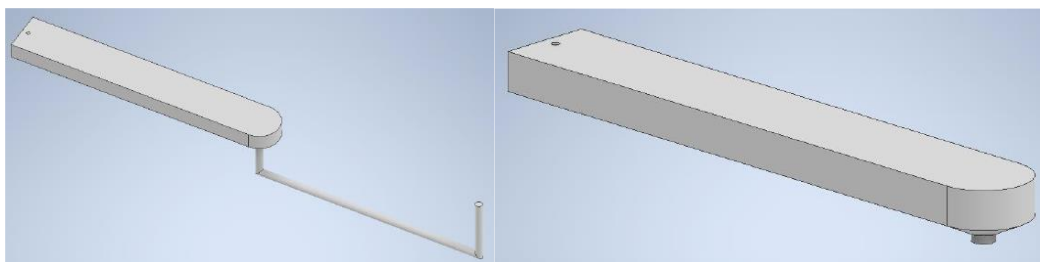


Figura 2. Modelo 3D con flujo constante (izq.) y modelo en descarga (der.)

Simulación Fluidodinámica

Análisis de flujo constante con entrada de 4 gal/min (15,1 L·min⁻¹)

Como primer resultado, se pudo observar que a la salida del manifold el agua alcanza una velocidad máxima de 84,82 cm·s⁻¹. La diferencia entre el agua del estanque y la velocidad del chorro de entrada crea una capa turbulenta que provoca arrastre del agua circundante que mejora la mezcla (entrada de agua fresca) y evita zonas muertas en esta sección del estanque (Fig. 3). A medida que avanza, el flujo se expande (por ende, la capa de mezcla también) y la velocidad de su eje central reduce su magnitud. La escala de colores de la figura 4 indica que el movimiento del agua dentro de la gran mayoría del sistema es cercano a 2 cm·s⁻¹.

Al observar los vectores de dirección, es notoria la formación de una cresta de onda y el retorno de parte del flujo (vórtice) en el centro del estanque, que provoca muy bajas velocidades en el fondo. También se observa retorno de parte del flujo al final del estanque, quizás debido a la geometría (Fig. 5a y 5b). Haciendo un cambio en la escala de velocidad con un límite máximo de 20 cm·s⁻¹, se puede observar como la velocidad del flujo en el primer tercio del estanque fluctúa entre 16 a 6 cm·s⁻¹, luego disminuye a valores menores a 2 cm·s⁻¹, incluso siendo muy próximo a cero en el fondo del estanque y aumenta cuando ingresa al sifón de descarga (7 cm·s⁻¹), aunque sin generar un vórtice de dimensiones destacables.

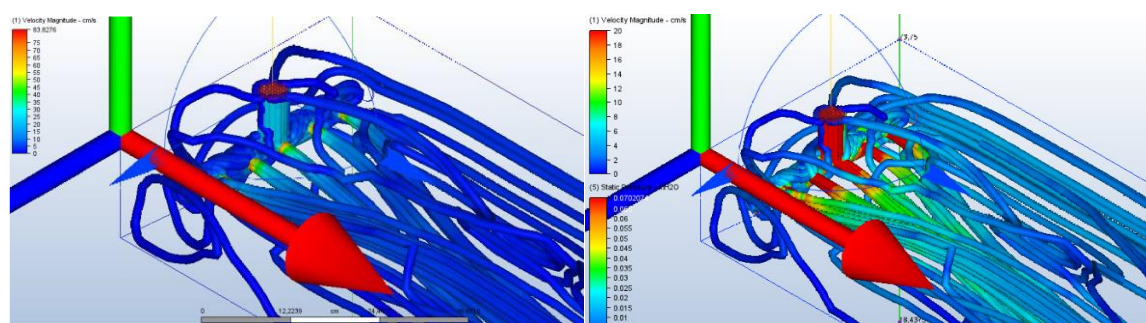


Figura 3. Velocidades máximas en la entrada, en el orificio central es el que obtiene su valor máximo de 83,82 cm·s⁻¹. En la imagen de la izquierda, la escala de velocidad se ajustó a 20 cm·s⁻¹

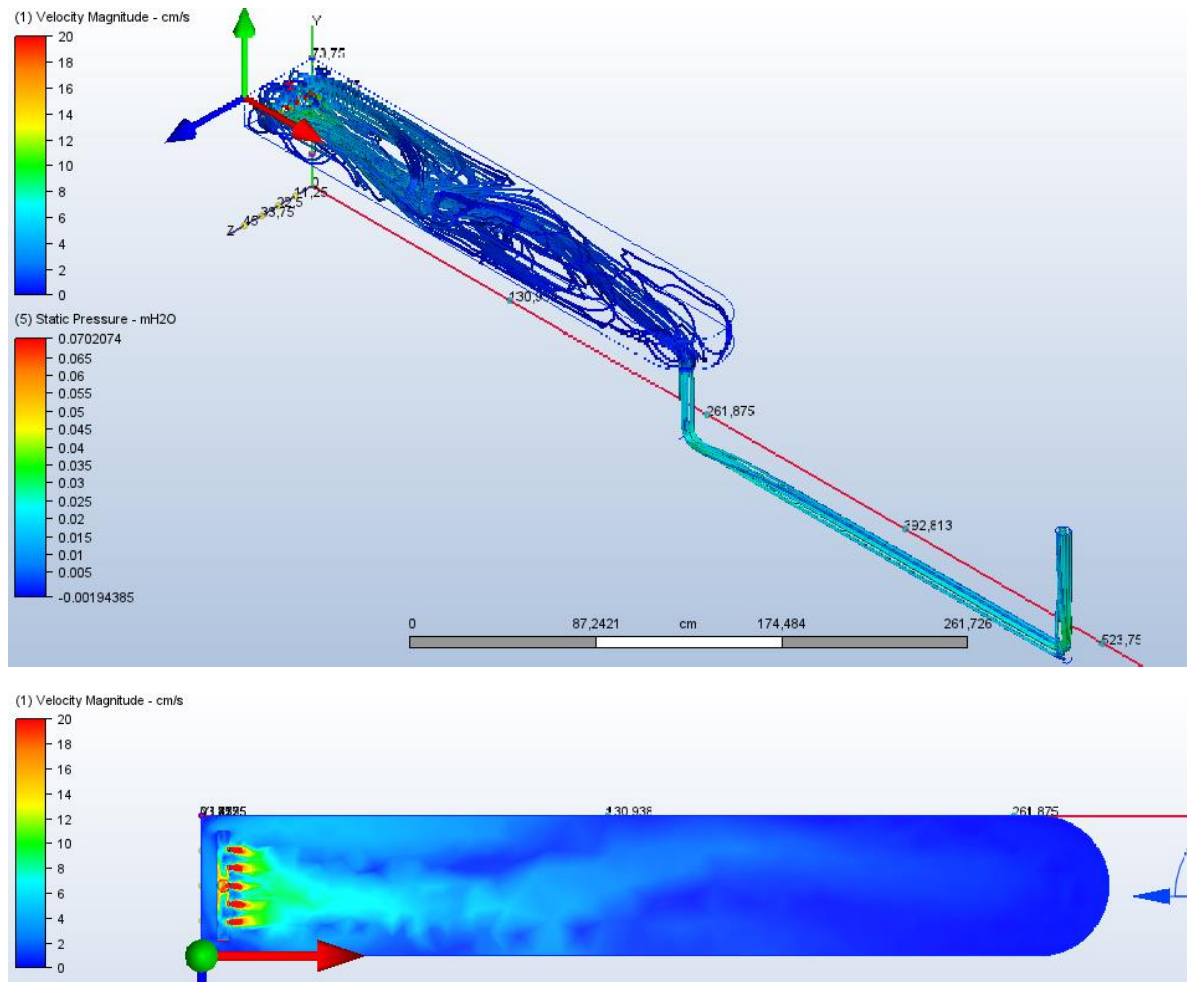


Figura 4. Perfil de velocidad y patrones de movimiento dentro del estanque con flujo de 4 gpm ajustando límite máximo a $0,20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

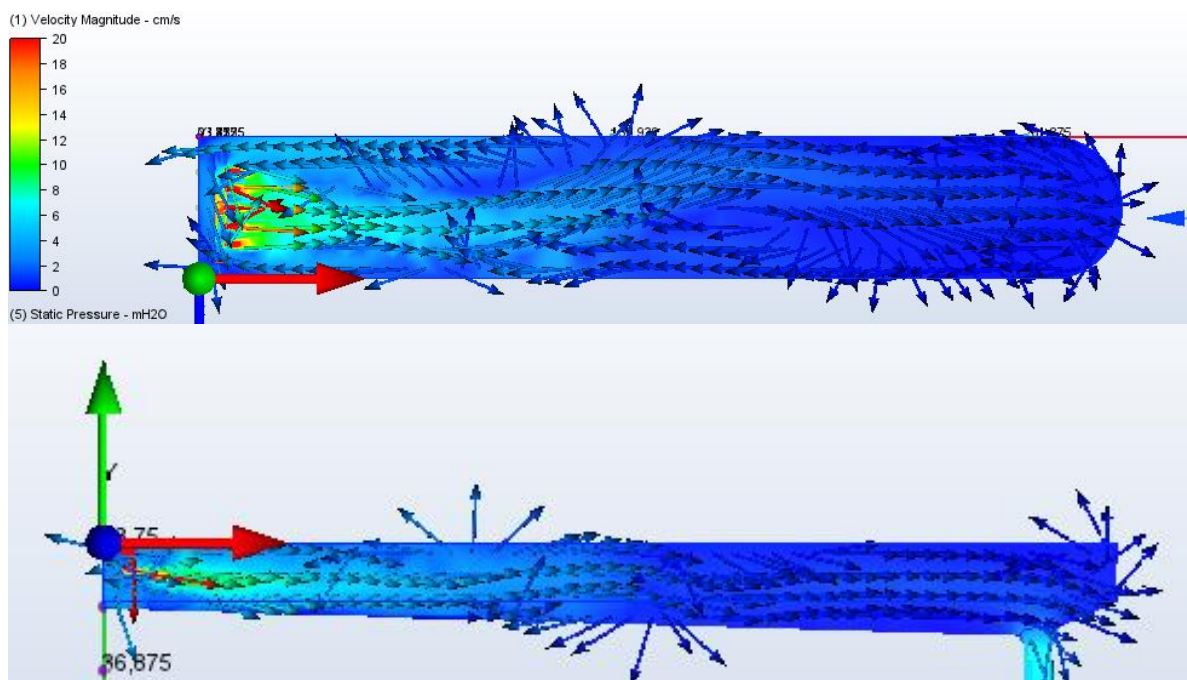


Figura 5. a) vectores de dirección en vista planta, b) vectores de dirección en vista elevación.

Respecto a la simulación en caso de descarga, pudimos observar que se provoca una mayor velocidad en la zona central del estanque y un vórtice de mayor tamaño sobre la salida de agua con velocidades entre 1 a 6 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. El patrón de dirección se mantiene, aunque no se observa la onda en la zona media, lo que provocaría algo de arrastre de fondo.

Análisis de flujo constante con entrada de 12 gpm (45,4 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)

Tras haber simulado con un flujo de entrada de 4 gpm, se ajustó el CFD a 12 gpm en el flujo de entrada. Este flujo provocó mayores turbulencias tanto al principio como al final del estanque llegando a una velocidad máxima de 265,5 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ a la salida del manifold. Haciendo un cambio en la escala de velocidad con un límite máximo de 20 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, se puede observar como la velocidad del flujo llega valores sobre a 12 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ hasta la zona media del estanque y disminuye a velocidades cercanas a 2 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (Fig. 6).

De acuerdo con los vectores de dirección, el patrón de movimiento longitudinal no muestra una onda como en la simulación anterior y el retorno de parte del flujo (vórtice) se desplaza hacia el final del estanque al parecer con una mayor influencia de la geometría (Fig. 7). En la parte posterior, el vórtice tiene velocidades cercanas a los 2 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ y aumenta al entrar al sifón (20 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) lo que provocaría arrastre en el fondo, evitando zonas muertas.

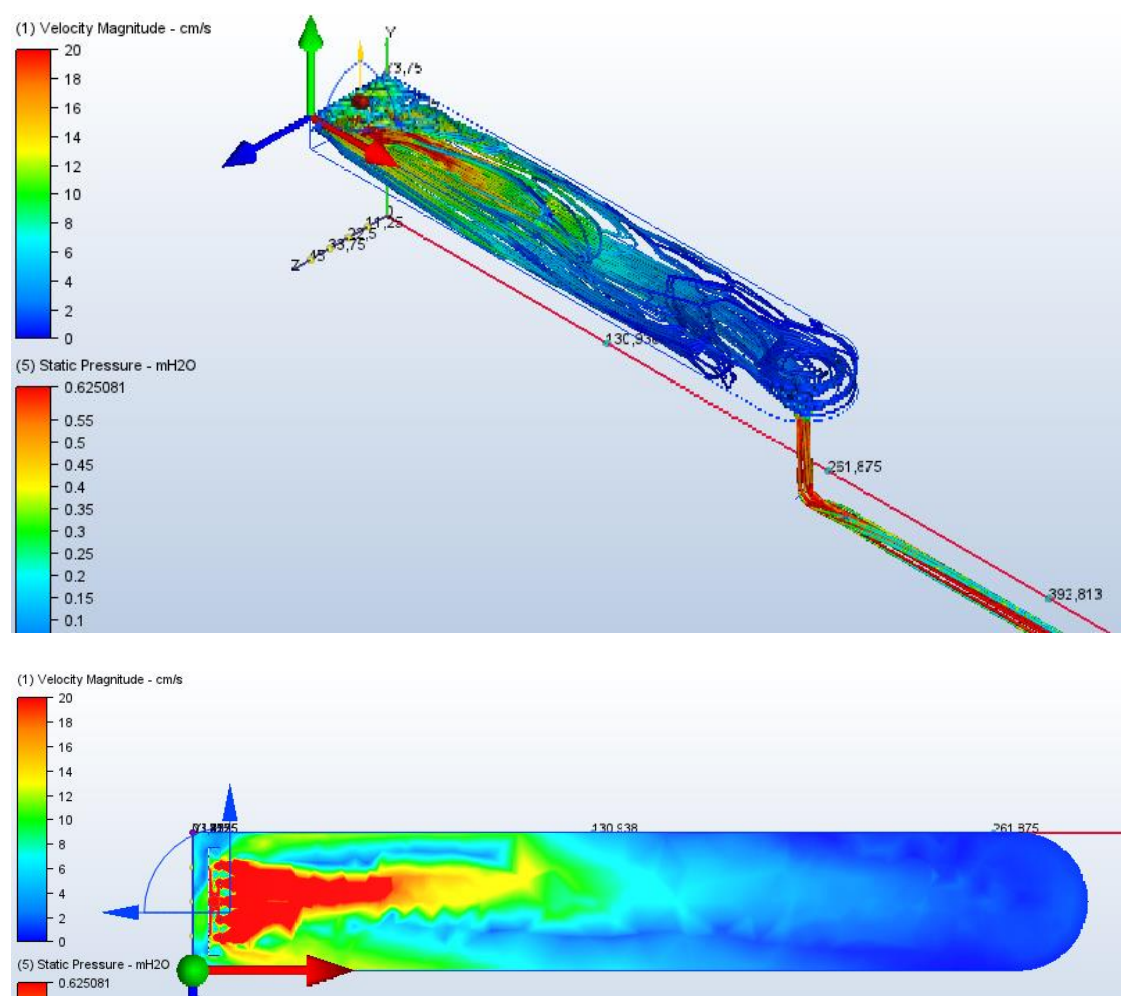


Figura 6. Perfiles de velocidad y patrón de movimiento a 12 gpm con límite máximo de 20 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$

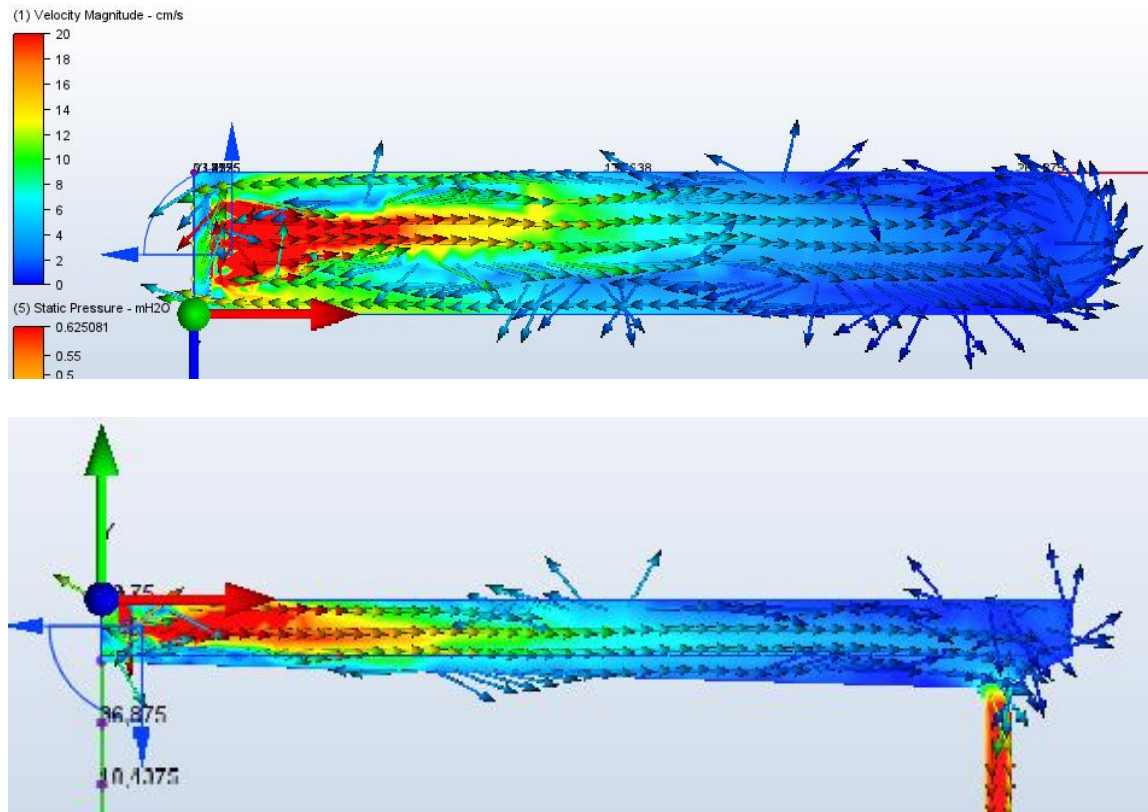


Figura 7. Vectores de dirección en vista planta y elevación que muestran el patrón de movimiento con un flujo de 12 gpm.

Respecto a la simulación en descarga (parcial) con flujo de 12 gpm, resulta notorio como la velocidad se disipa drásticamente a 1 m de la entrada, disminuyendo aproximadamente desde 12 a 6 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. En cuanto se provoca una descarga, esta tiende a generar movimientos más desorganizados y turbulentos que cuando existe un flujo continuo. Al cambiar la escala de velocidades (20 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$), se puede ver como la velocidad aumenta en todo el volumen de agua en comparación a la situación de flujo constante. En la zona posterior, al momento de aproximarse a la salida, se observa que se genera algo similar a 2 vórtices superiores y desordenados antes de salir del estanque, a diferencia de las situaciones anteriores que solo provocaron uno bien marcado (Fig. 8 y 9). Esto favorece la mezcla de agua, y el arrastre de partículas, evitando zonas muertas al final del estanque. Sin embargo, en ambas situaciones existe velocidad mínima principalmente en el fondo de la zona media del estanque que puede ser atribuido a la capa límite.

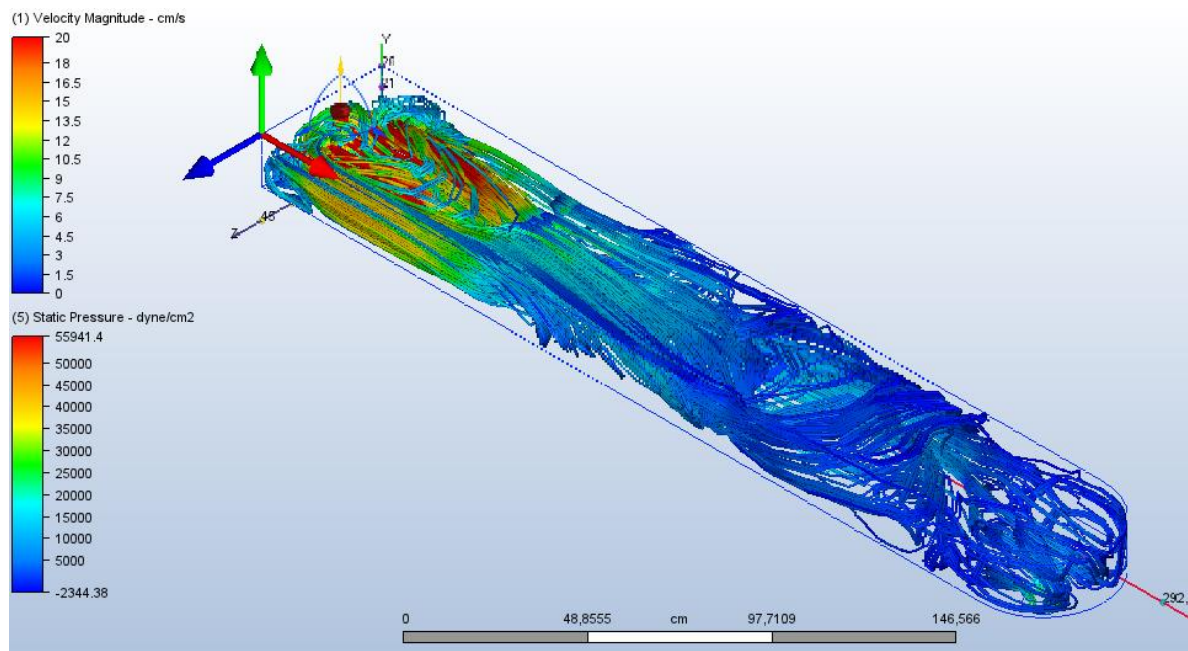


Figura 8. Perfiles de velocidad y patrón de movimiento a 12 gpm con límite máximo de $20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. En la zona posterior del estanque se muestran las líneas de los dos vórtices en la salida.

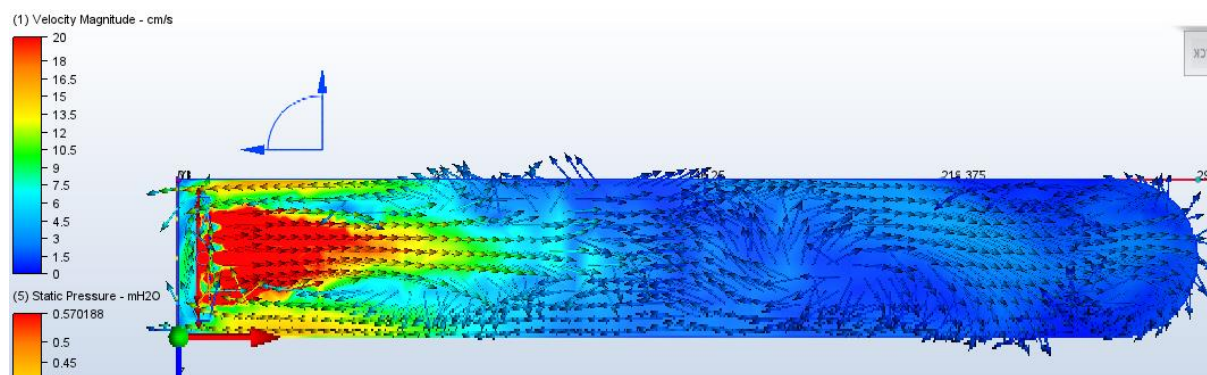


Figura 9. Vectores de dirección en vista planta con flujo de 12 gpm con límite máximo de $20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Se muestra la desorganización de las líneas de flujo.

DISCUSIÓN

Masaló (2008) indica que los estanques con relación longitud-ancho superior a 5:1 son muy usados porque facilitan el manejo y el uso del espacio. Daggett (2006) comprueba esto en la comparación de tres diferentes estanques. Este criterio es fundamental en operaciones acuícolas y fue considerado en nuestro prototipo (relación 6:1). La geometría, así como la configuración de entrada y salida, son relevantes en el comportamiento hidrodinámico, y por ende en el proceso de mezcla, lo cual es claramente visible al comparar los vectores de dirección y velocidad de los flujos simulados en este estudio. Si bien, el canal destinado a la eliminación de partículas y desechos no resulta de gran utilidad a velocidades mínimas (4 gal/min), si puede ser útil cuando se limpie el estanque, o bien dirigiendo parte del flujo de entrada en esa zona (cambio en el diseño de entrada).

Vallejo (2016) indica que, con un diseño correcto y una mezcla adecuada, todos los animales dentro del estanque tienen la misma calidad del agua, lo que permite que no se disminuya el límite de la producción cuando el sistema alcanza la capacidad de carga máxima. Arriagada (2012) también menciona que el caudal y la posición de la salida pueden generar cambios en la hidrodinámica del estanque. Este efecto es claro al comparar ambos flujos, dadas las perturbaciones que se provocan en el estanque y en el medio cono.

Se destaca que, si se reducen los tiempos de mezcla, implicaría directamente una reducción del consumo de agua ya que se necesitaría una menor tasa de recambio (Arriagada 2012).

En situaciones de cultivo, la velocidad del flujo tiene efecto sobre los animales, la dispersión del alimento y las heces, el transporte de oxígeno, la autolimpieza del estanque, entre otros. Oiestad (1999) recomienda velocidades entre 0,7 a 5 cm·s⁻¹, y Masaló (2008) entre 3 y 40 cm·s⁻¹, aunque indica que la presencia de animales la disminuye. En este estudio, aunque las velocidades a la entrada (máximas) parecen altas, se disipan rápidamente en el volumen, por lo que consideramos que el intervalo predominante deber ser entre 2 y 12 cm·s⁻¹, dependiendo de la zona del estanque. En el ambiente natural, los erizos son animales que frecuentemente se encuentran en zonas con velocidades cercanas a 100 cm·s⁻¹.

Como los flujos simulados (4 y 12 gal/min) tienden a generar flujos turbulentos ($Re \geq 4000$ sobre los 2 cm·s⁻¹ caracterizado por fluctuaciones de velocidad y movimiento también desordenado) en vez de laminares, y dado el volumen del estanque y la tasa de recambio (3 y 10, respectivamente), quizás se podría reducir la velocidad aumentando el diámetro de los orificios del manifold de entrada, siempre y cuando el caudal de entrada se mantenga constante (Timmons et al., 2002), sin afectar la tasa de mezcla. Aunque también se puede utilizar la velocidad a favor para airear el agua mediante un sistema tipo Venturi (Cengel, 2014).

Los resultados en la condición de descarga podrían ser útiles ante una eventual operación con descargas parciales de agua (flushing), los que conlleva complicaciones en la operación, pero da buenos resultados en términos de supervivencia y limpieza de los estanques (Daggett, 2006). La necesidad de realizar descargas parciales debería comprobarse con una simulación específica o bien con pruebas de campo para determinar el arrastre de partículas (auto limpieza) o la mejora en la calidad de agua.

Realizar análisis como la distribución del tiempo de residencia (RTD) u otras pruebas mediante uso de trazadores son útiles en estanques ya construidos, midiendo la intensidad de la mezcla y detectando anomalías de flujo como cortocircuitos o volúmenes muertos, pero no sirven para mejorar del diseño del estanque (Oca et al. 2004).

La simulación fluidodinámica permite simulaciones en condiciones y configuraciones operativas prácticamente ilimitadas. El software usado en este estudio (Autodesk® CFD) crea simulaciones para predecir el comportamiento de fluidos. Los resultados de velocidad y dirección convergen de manera estables tras 1000 iteraciones, en coherencia al tamaño de la unidad. Autores como Ranade (2002), Labatut (2015) y otros, validan modelos de turbulencia y su compensación entre precisión y esfuerzo computacional. Sin embargo, este estudio no pone el foco en el modelo de simulación, sino que lo usa como una herramienta que permita tomar decisiones de diseño críticas para mejorar las condiciones de cultivo, resolver posibles fallas durante el proceso de construcción de estanques y reducir los costosos modelos físicos. Respecto a pruebas de disipación de energía en presencia de animales o refugios de cultivo, se requiere de procesadores de mayor capacidad.

Como los erizos de mar son sensibles a los cambios en la calidad del agua e incapaces de regular su fisiología interna, es crucial comprender la hidrodinámica de la unidad de cultivo donde los niveles de sustancias nocivas pueden elevarse muy por encima de su tolerancia, y se debe tener en consideración que la relación entre crecimiento y calidad de agua está influenciada por el movimiento del agua (Mortensen et al. 2012). Zhang et al. (2015) utilizó deflectores y tolvas móviles dentro de un raceway para microalgas para mejorar la homogenización y eliminar zonas muertas, pero este tipo de dispositivos no es aplicable en este caso, donde los esfuerzos deben estar puestos tanto en la calidad del agua como en el bienestar de los animales en cultivo.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados, los flujos aseguran una buena tasa de mezcla, pero, aun así, es posible sugerir algunos cambios, como disminuir la velocidad de entrada, aumentar el diámetro y la distancia entre los orificios del manifold, destinar un flujo en dirección al canal de limpieza en la base del estanque y, quizás

disponer entradas de agua al inicio y al medio del estanque. La forma semi circular al final del estanque genera vórtices que ayudan en la mezcla y homogenización, pero es dependiente del caudal, ya que esta influencia sólo se observó con 12 gpm. La velocidad de entrada causa turbulencias al principio del sistema, y favorece la mezcla entre el agua de entrada y la del volumen y, se disipa rápidamente hasta velocidades que no afectarían a los erizos.

El uso de CFD otorga datos con altos grados de confiabilidad, pero son dependientes del esfuerzo computacional en tiempo y costo. Realizar simulaciones con animales o bien con refugios para erizo demanda una mayor capacidad de procesamiento de datos. En este estudio, el software utilizado realizó un número cercano a 1000 iteraciones de cálculo.

El uso de las variables simuladas y sus eventuales modificaciones determinan las pruebas de campo en estanque real para comprobar el efecto con y sobre los animales, sedimentos o cualquier variable de cultivo. Eventualmente, usar estanques de baja altura representa una ventaja operativa respecto a los tradicionales ya que, al tener menor volumen, la tasa de recambio es mayor, y podría resultar en una mejor calidad de agua y aumento de la densidad de cultivo. Sin embargo, siempre se debe evaluar en términos del bienestar animal, la calidad de agua y no solo con la simulación hidrodinámica.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada a través del Concurso “Pruebas de Concepto de Desarrollo aplicado - 2019”, Vicerrectoría de Investigación y Doctorado, Dirección de Innovación y Transferencia Tecnológica de la UNAB. “Desarrollo de una unidad de engorda intensiva en tierra, para el erizo rojo *Loxechinus albus*”, PdC (5) – CHL01-0000-404200-90.

REFERENCIAS

- Andrew N.L., Agatsuma Y., Ballesteros E. et al. (2002). Status and management of world sea urchin fisheries. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*. 40, 343–425.
- ANSYS. 2018. ANSYS FLUENT User's Guide Release 18.2. ANSYS Inc.
- Arriagada Salinas A.E. 2012. Evaluación del efecto de distintos sistemas de ingreso de agua, eductor y rociador vertical, sobre el tiempo de mezcla en un estanque circular. Tesis de pregrado. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile. 61 pp.
- Bernasconi I. 1953. Monografía de los equinoideos argentinos. *An. Mus. His. Nat. Mont.* 6:23–25.
- Cengel Y., Cimbala J., 2014. *Mecánica de Fluidos*. 4° edición. Mcgraw-Hill. 1024 pp.
- Chun C, Vinci B. y Timmons M. 2018. Computational fluid dynamics characterization of a novel mixed cell raceway design. *Aquacultural Engineering*. 81:19–32.
- Clark, H.L. 1948. A Report on the Echini of the Warmer Eastern Pacific, based on the collections of the "Velero III". *Allan Hancock Pac. Exp.* 8 (5): i-xii. 225-351, pls. 35-71.
- Daggett T, Pearce C. Robinson S. 2006. A comparison of three land-based containment systems for use in culturing green sea urchins, *Strongylocentrotus droebachiensis* (Müller) (Echinodermata: Echinoidea). *Aquaculture Research*. 37:339-350.
- Dayton P. 1985. The structure and regulation of some South American kelp communities. *Ecol Monogr.* 55:447–468.

- FAO. 2022. Estadísticas de pesca y acuicultura. Capturas mundiales 1950-2020 (FishStatJ). In: FAO División de Pesca y Acuicultura [en línea]. Roma. Actualización 2022. www.fao.org/fishery/statistics/software/fishstatj/es
- Fenucci J. 1967. Contribución al conocimiento del crustáceo decápodo brachiuro *Pinnaxodes chilensis* (M. Edwards) comensal de *Loxechinus albus* (Molina) (Echinodermata: Echinoidea). *Physis*. 27:125–133.
- Hadiyanto H., Elmore S., Van Gerven T., Stankiewicz A. 2016. Hydrodynamic evaluations in high rate algae pond (HRAP) design. *Chemical Engineering Journal*. 217:231–239.
- Harris L. y Eddy S. 2015. Sea Urchin Ecology and Biology. Pages 3-24 in Brown N., Eddy S. (eds). *Echinoderm Aquaculture*. Wiley-Blackwell. Hoboken, New Jersey. <https://docplayer.net/43621601-Water-quality-requirements-for-culture-of-the-green-sea-urchin-strongylocentrotus-droebachiensis.html>.
- Labatut R., Ebeling J., Bhaskaran R., Timmons M. 2015. Modeling hydrodynamics and path/residence time of aquaculture-like particles in a mixed-cell raceway (MCR) using 3D computational fluid dynamics (CFD). *Aquacultural Engineering*. 67:39–52.
- Larraín A. 1975. Los equinoideos regulares, fósiles y recientes de Chile. *Gayana Zoología (Chile)* 35:1-161.
- Li W., Cheng X., Xie J., Wang Z., Yu D. 2019 Hydrodynamics of an in-pond raceway system with an aeration plug-flow device for application in aquaculture: an experimental study. *R. Soc. Open Sci.* 6:182061. DOI: 10.1098/rsos.182061
- Liu Y., Liu B., Lei J., Guan C., Huang B. 2016. Numerical simulation of the hydrodynamics within octagonal tanks in recirculating aquaculture systems. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*. 35(4):912-920. DOI: 10.1007/s00343-017-6051-3.
- Masaló I. 2008. Hydrodynamic Characterization of aquaculture tanks and design criteria for improving self-cleaning properties. Doctoral thesis. Technical University of Catalonia, España. 109 p.
- Moreno C.A., Molinet C. 2013. El paradigma de la distribución batimétrica de *Loxechinus albus* (Molina) en Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*. 86:225-227.
- Mortensen A, Siikavuopio D., James P. 2012. Water quality requirements for culture of the green sea urchin, *Strongylocentrotus droebachiensis*. *World Aquaculture*. June: 46-50. <https://doczz.net/doc/672187/water-quality-requirements-for-culture-of-the-green-sea-u...>
- Oca J., Masaló I., Reig L. 2004. Comparative analysis of flow patterns in aquaculture rectangular tanks with different water inlet characteristics. *Aquacultural Engineering*. 31:221–236.
- Oiestad V. 1999. Shallow raceways as a compact, resource- maximizing farming procedure for marine fish species. *Aquaculture Research*, 30:831-840.
- Pérez A., Morriconi E., Boy C., Calvo J. 2008. Seasonal changes in energy allocation to somatic and reproductive body components of the common cold temperate sea urchin *Loxechinus albus* in a Sub-Antarctic environment. *Polar Biol*. 31:443–449
- Ranade V. 2002. *Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering*. Academic Press, pp. 452.
- Rasmussen M., McLean, E. 2004. Comparison of two different methods for evaluating the hydrodynamic performance of an industrial-scale fish-rearing unit. *Aquaculture*. 242:397–416.

- Schuhbauer A., Brickle P., Arkhipkin A. 2010. Growth and reproduction of *Loxechinus albus* (Echinodermata: Echinoidea) at the southerly peripheries of their species range, Falkland Islands (South Atlantic). Mar. Biol. 157:1837–1847
- SERNAPESCA. 2022. Anuario Estadístico de Pesca y Acuicultura 2021. <http://www.sernapesca.cl/informacion-utilidad/anuarios-estadisticos-de-pesca-y-acuicultura>
- Sompech K, Chisti Y., Srinophakun T. 2012. Design of raceway ponds for producing microalgae. Biofuel 3:387–397.
- Stockton K, Moffitt C., Watten B., Vinci B. 2016. Comparison of hydraulics and particle removal efficiencies in a mixed cell raceway and Burrows pond rearing system. Aquacultural Engineering. 74:52–61.
- Sun J., Chiang F-S. 2015. Use and Exploitation of Sea Urchins. Pages 25-45 in Brown N. and Eddy S. editors. Echinoderm Aquaculture. Wiley-Blackwell. Hoboken, New Jersey
- Timmons M, Ebeling J., Wheaton F., Summerfelt S., Vinci B. 2002. Sistemas de recirculación para la acuicultura. Fundación Chile. 748 p.
- Vallejos H. 2016. Análisis adimensional para determinar tiempos de mezcla y caracterización hidrodinámica en un estanque circular de uso acuícola. Tesis de pregrado. Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile. 81 p.
- Watten B., Honeyfield D., Schwartz M. 2000. Hydraulic characteristics of a rectangular mixed-cell rearing unit. Aquacultural Engineering. 24:59–73.
- White, P., Rigby M. 2003. Shallow raceways design. Akvaplan-niva SA, Berguen Office, Noruega. https://www.academia.edu/10232191/Shallow_raceway_design_for_aquaculture.
- Wong K., Piedrahita R. 2003. Prototype Testing of the Appurtenance for Settleable Solids In-raceway Separation (ASSIST). Aquacultural Engineering. 27:273 – 293.
- Zhang Q., Xue S., Yan C., Wu X., Wen S., Cong W. 2015. Installation of flow deflectors and wing baffles to reduce dead zone and enhance flashing light effect in an open raceway pond. Bioresource Technology. 198:150–156.

Recibido: 25-08-2022

Aprobado: 02-11-2022

Versión final: 10-12-2022

