



Sexto
Congreso Nacional de
Riego, Drenaje y Biosistemas
COMIIB- 2021 / Hermosillo, Sonora



Artículo: COMIIB-21048

Hermosillo, Son., del 9 al 11 de junio de 2021

USO DE CFD COMO HERRAMIENTA PARA LA MODELACIÓN Y PREDICCIÓN NUMÉRICA DE LOS FLUIDOS: APLICACIONES EN ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS Y AGRICULTURA

Cruz Ernesto Aguilar-Rodriguez^{1*}; Candido Ramirez-Ruiz²; Erick Dante Mattos Villarroel³

¹Tecnológico Nacional de México/ITS de Los Reyes. Carretera Los Reyes-Jacona, Col. Libertad. 60300. Los Reyes de Salgado, Michoacán. México.

ernesto.ar@losreyes.tecnm.mx - 3541013901 (*Autor de correspondencia)

²Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, UNAM. Cto. Exterior S/N, C.U., Coyoacán, 04510, Ciudad de México. México.

³Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

Resumen

En ingeniería, el comportamiento de los fluidos es un proceso extenso y complicado de describir, la Mecánica de Fluidos es una disciplina científica que permite analizar los fenómenos fluidodinámicos mediante ecuaciones que rigen el comportamiento de los fluidos, sin embargo, éstas ecuaciones no poseen una solución general. La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es una herramienta que permite aproximarse a las soluciones de las ecuaciones mediante técnicas numéricas, para obtener modelos computacionales confiables es necesario evaluarlos con datos experimentales a partir de un modelo físico. En estructuras hidráulicas se realizaron simulaciones en vertedores lineales y tipo laberinto, se analizó el comportamiento de la lámina de descarga y las condiciones de aireación presentes. En los sedimentadores es posible realizar la caracterización de los fluidos, modificando las fracciones de volumen muerto, pistón o mezclado dependiendo de las características requeridas. En la agricultura puede ser usado para caracterizar el ambiente de los invernaderos, encontrando relación entre el diseño, dirección y tipo de material sobre su ambiente. Entre los resultados más importantes encontrados es el efecto que puede tener la longitud del invernadero y su diseño sobre la tasa de ventilación, siendo recomendable que el invernadero tenga una longitud menor a 6 veces su altura.

Palabras claves: Dinámica de Fluidos Computacional, invernadero, Vertedor, Sedimentador



Introducción

CFD es una herramienta numérica que permite la visualización espacial, al obtener una solución numérica a los problemas de movimiento de fluidos, permitiendo una mejor comprensión de los fenómenos hidráulicos. Por ejemplo, en ingeniería hidráulica se ha hecho investigación en el análisis de mediciones de flujo de gas húmedo en venturí (Xu, Gao, Zhao, & Wang, 2014) bombeo de agua (ŞCHEAUA, 2016) o en la aplicación de canales abiertos (Wu et al., 2000).

La revisión de bibliográfica demuestra la efectividad de la herramienta CFD para el análisis hidráulico del comportamiento del flujo en vertedores una vez validado en estudios experimentales. Esta revisión demuestra la efectividad de la de CFD para el análisis hidráulico del comportamiento del flujo en vertedores. Crookston *et al.* (2012), realizaron pruebas en Flow 3D para un vertedor en laberinto, los resultados del coeficiente de descarga fueron aceptables con los obtenidos experimentalmente con errores que varían del 3% al 7%, sus estudios encontraron la existencia de zonas de baja presión en las paredes laterales del vertedor cuando trabaja de manera ahogada. Por su parte, Zuhair (2013) comparó los resultados de la modelación numérica, con los datos experimentales del prototipo del vertedor Mandali.

Estudios recientes han demostrado el potencial en la aplicación de la CFD utilizando diversos modelos de turbulencia, aplicándolo en estudios de sedimentadores rectangulares y circulares utilizados en el tratamiento de aguas residuales; y solo algunos han presentado casos de estudio de sedimentadores para tratamiento de agua potable, proponiendo algunas alternativas en la geometría, variando la temperatura del agua, entre otras variables de diseño. Por lo tanto, el desarrollo tecnológico ha hecho que la CFD, sea una herramienta cada vez más utilizada por los ingenieros de diseño para analizar el comportamiento del fluido.

En Agricultura protegida, CFD ha sido una técnica usada para modelar el ambiente del invernadero y con ello plantear estrategias para la gestión del microclima en invernaderos, mediante sistemas auxiliares de refrigeración o calentamiento (Aguilar-Rodríguez et al., 2020).

La simulación a escala real de invernaderos mediante modelos CFD en 2D y 3D ha sido utilizada para estudiar la distribución del microclima en invernaderos a través de la incorporación de modelos de radiación solar y submodelos de intercambio de calor sensible y latente (Majdoubi, Boulard, Fatnassi, & Bouirden, 2009). Así mismo, estos modelos fueron usados para evaluar el efecto ambiental en el invernadero causado por su diseño (Sethi, 2009), material de cubierta (Baxevanou, Fidaros, Bartzanas, & Kittas, 2018), la hora del día, estación del año (Tong, Christopher, Li, & Wang, 2013), el tipo de ventilación y su configuración (Bartzanas, Boulard, & Kittas, 2004).

Los programas comerciales de CFD son diseñados con una plataforma amigable para el usuario, facilitando su manejo y comprensión de los resultados.

Entre las ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos se encuentran:

Ecuación de transporte

La ecuación de transporte clásica que está regida por la ecuación 1.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + s_\phi \quad (1)$$

Donde u_j es la componente de velocidad en las tres direcciones (m s^{-1}), Γ_ϕ componente de difusión de la variable ϕ , s_ϕ término fuente.

El modelo de turbulencia estándar $k - \varepsilon$, establece las ecuaciones 2, 3, 4 y 5 sobre las ecuaciones de transporte para cada derivada física en función del término fuente.

Continuidad

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_j) = 0 \quad (2)$$

Momentum

$$\frac{\partial (\bar{\rho} u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_j u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\sigma}_{ij}) + \bar{\rho} \sigma_i - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_i' u_j') + s_m \quad (3)$$

Energía cinética turbulenta

$$\frac{\partial (\bar{\rho} k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \mu_t s^2 - \rho \varepsilon + s_k \quad (4)$$

Disipación de la energía cinética turbulenta

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\bar{\rho} \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_j \varepsilon) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - c_{1\varepsilon} \bar{\rho} \left(\mu_t s^2 - c_{3\varepsilon} g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) - c_{2\varepsilon} \bar{\rho} \varepsilon^2 + s_\varepsilon \end{aligned} \quad (5)$$

Como resultado de investigaciones realizadas en CFD y la información relacionada que de esta se deriva, es posible plantear modificaciones a los dispositivos de estudio con el fin de hacer más eficiente su uso, con la ventaja que, una vez probado el modelo, las modificaciones pueden hacerse en poco tiempo y sin la necesidad de montar experimentos lo que se traduce en un ahorro de tiempo y económico.

Materiales y Métodos

Construcción del modelo computacional

El proceso de solución utilizando CFD contempla tres etapas básicas: **i)** Pre-proceso, se introduce los datos de entrada al programa de resolución, esta fase comprende: la definición de la geometría a modelizar, la discretización espacial del dominio, identificación de los fenómenos físicos que se pretende modelar, definición de las propiedades del fluido y especificación de las condiciones iniciales y de contorno ; **ii)** Proceso, es el encargado de resolver de forma iterativa las ecuaciones que se han activado previamente en el pre-proceso; **iii)** Post-proceso, los resultados son visualizados en forma gráfica, mapas de contornos de las variables o de forma escalar.

Para la discretización espacial, es aconsejable emplear una malla predominantemente hexaédrica, la ventaja de la malla hexaédrica es la reducción del número de elementos y la mejora de la convergencia de la solución (Sánchez y Elsitdié, 2011).

La base de un desarrollo adecuado y ajustado a las condiciones físicas de un modelo conceptual es el esquema numérico que resuelva de forma aproximada las ecuaciones

que describen el flujo. La utilización de sistemas de discretización espacial simples asegura esquemas estables pero su característica lo hace sensible a errores de difusión numérica. Tales errores se pueden minimizar empleando esquemas de discretización de orden superior (Fernández, 2012). Finalmente se analizan los resultados de manera cualitativa (mapas, distribuciones, vectores) y cuantitativa (gráficas, integrales, valores, promedios).

Resultados y Discusión

Vertedor

Mediante la herramienta de CFD es posible predecir fenómenos hidrodinámicos en estructuras hidráulicas como son campos de presión y velocidades presentes en vertedores (figura 1). Se realizaron simulaciones en un vertedor rectangular de pared delgada para analizar las velocidades y presiones presentes, los resultados muestran que debajo de la lámina vertiente existe una zona muerta con presencia de vorticidad.

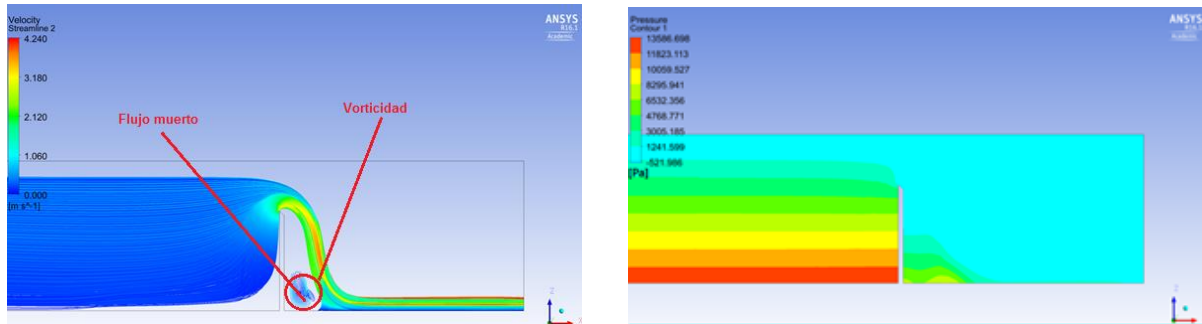


Figura 1. Distribución de presiones y velocidades en un vertedor de pared delgada.

Los perfiles de velocidad y presión en la cresta vertedora, figura 2, indican que la velocidad incrementa cuando el flujo se aleja de la pared del canal y la presión disminuye.

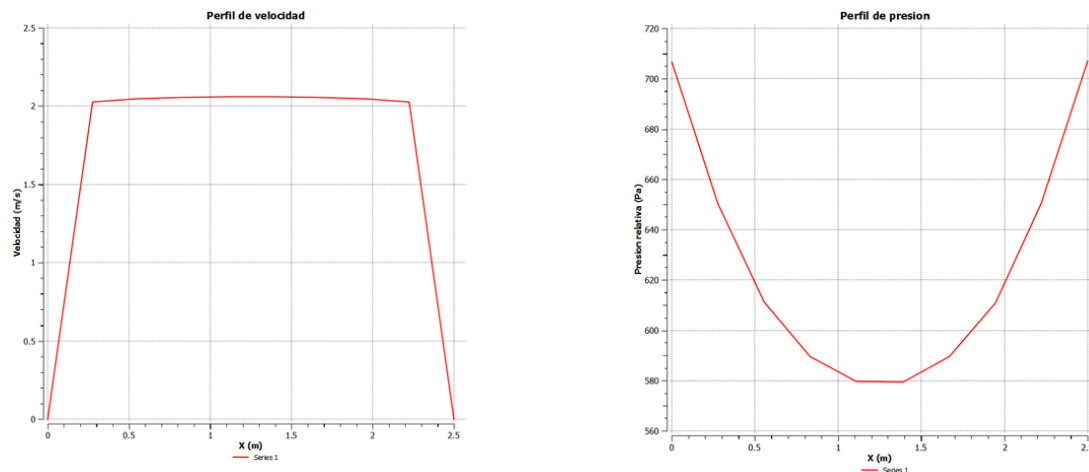


Figura 2. Perfiles de velocidad y presión en la cresta vertedora.

Las condiciones de aireación en vertedores son posibles analizarlos con ayuda del CFD y están influenciadas por la geometría del vertedor, la aproximación del flujo y la relación de la carga hidráulica; las simulaciones numéricas logran ajustarse a la realidad al predecir la presencia de turbulencia detrás de la lámina vertiente y presiones sub-atmosféricas (vertedores no aireados) o atmosféricas (vertedores aireados) junto con el aumento de la carga hidráulica. En simulaciones realizadas en vertedores tipo laberinto se encontraron cuatro condiciones de aireación pasando de lámina vertiente adherida a la pared del vertedor a una lámina aireada, conforme incrementa la carga hidráulica la lámina vertiente presenta una aireación parcial para estar totalmente ahogada y se caracteriza por ser una lámina vertiente mucho más ancha (figura 3).

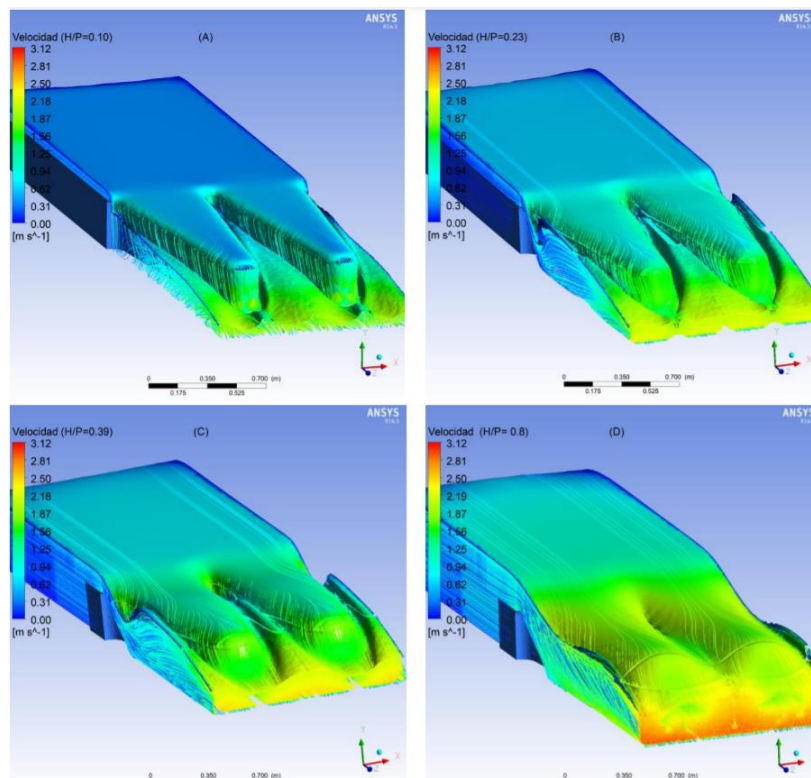


Figura 3. Condiciones de aireación en vertedor tipo laberinto. (A) lámina adherida a la pared del vertedor, (B) aireado, (C) parcialmente aireado, (D) ahogado.

Invernadero

CFD es útil para predecir la oscilación de temperatura del invernadero, siendo de factible para analizar el efecto que tiene el diseño sobre el ambiente. Para las simulaciones, el uso de datos de las normales climatológicas como condición de entrada del modelo permite predecir el desarrollo de temperaturas en diferentes regiones con condiciones climáticas que difieren entre sí. Como ejemplo, los resultados de la figura 4 muestran que CFD puede predecir correctamente el comportamiento térmico del invernadero (Aguilar-Rodriguez et al., 2020). A su vez, los resultados de las simulaciones pueden ser usados para caracterizar el manejo del invernadero durante los meses con mayor

temperatura exterior para reducir el gradiente térmico entre el interior y exterior según la zona de interés.

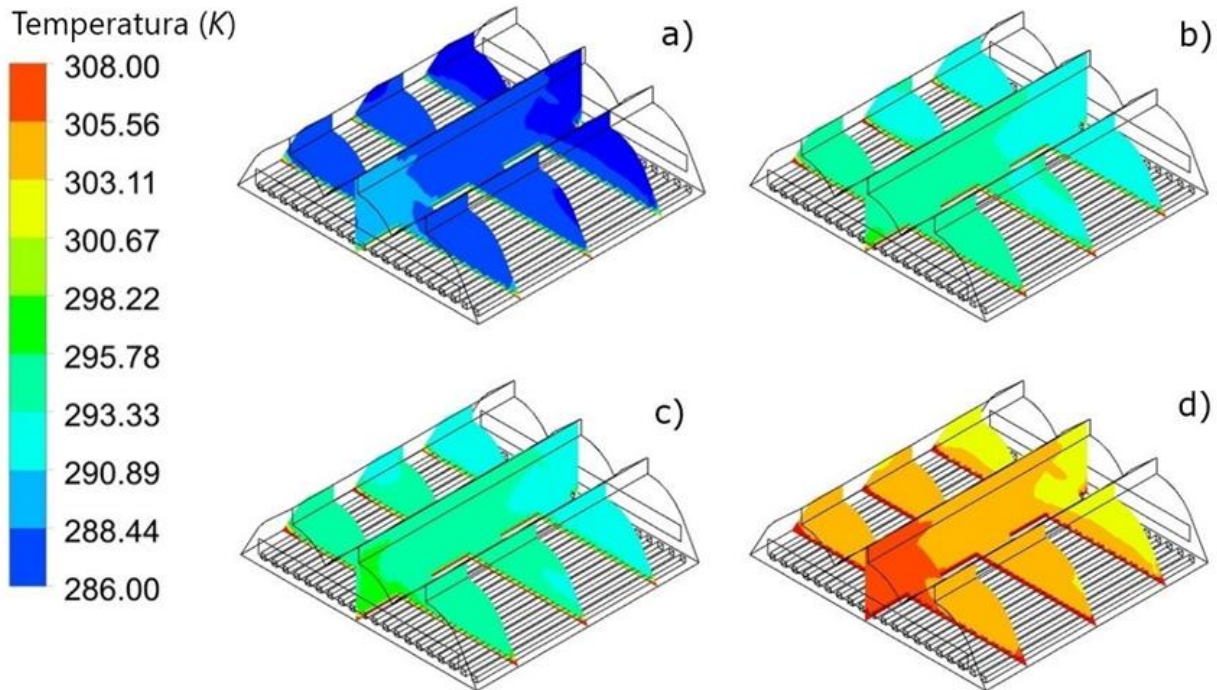


Figura 4. Realización de prueba de riego.

De la misma manera, CFD puede ser utilizado para inferir el efecto que pueden tener los sistemas de control climático de invernaderos como lo son los calefactores eléctricos (figura 5). Los resultados de las simulaciones (figura 5) pueden ser usados para establecer la posición de los calefactores, medir su eficiencia y establecer mejoras en el manejo de los sistemas de control climático (Aguilar-Rodriguez et al., 2020).

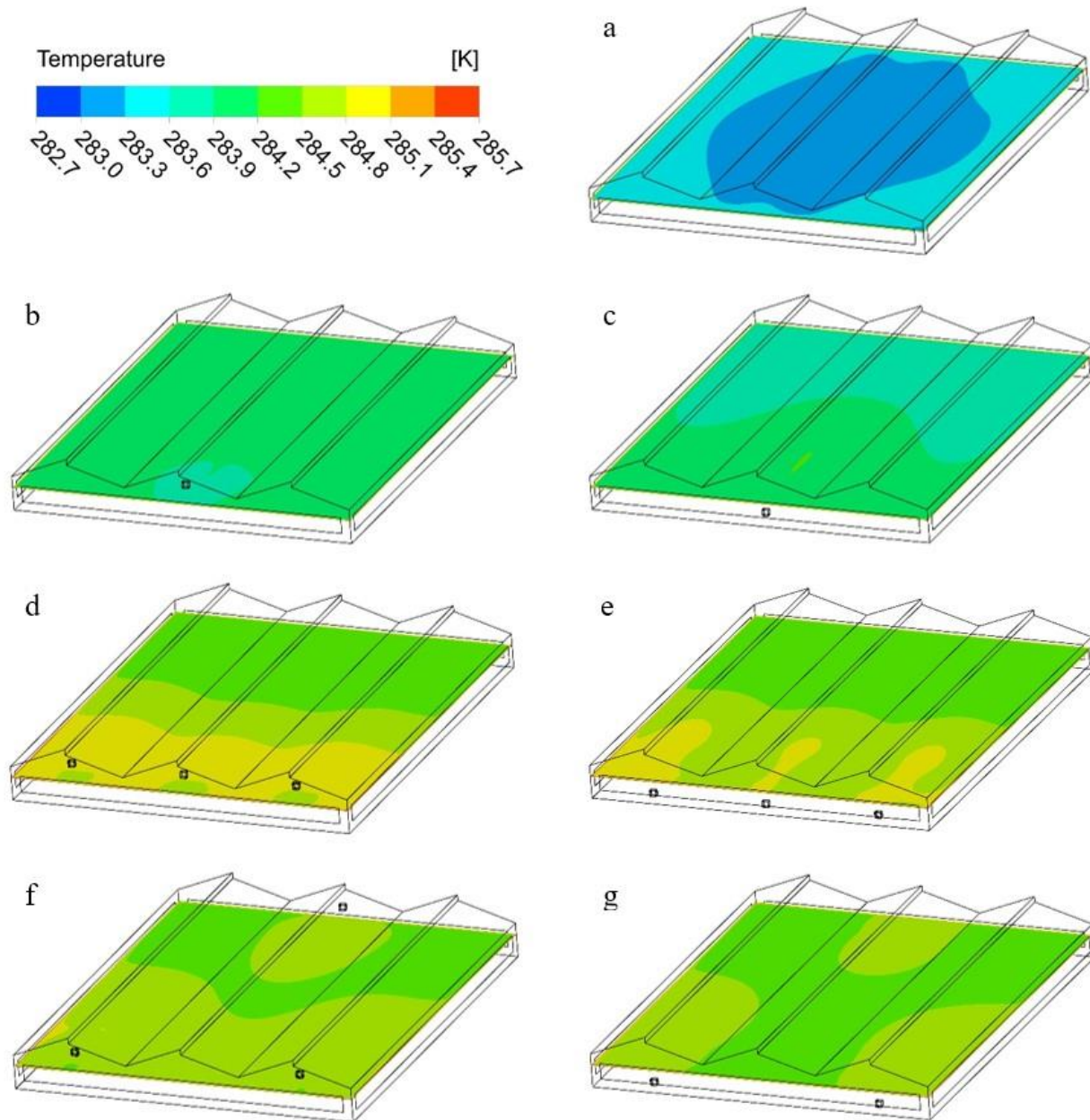


Figura 5. Efecto de la posición y dirección de los calefactores en un invernadero a 2 m del suelo.

Otras de las características que tiene CFD es que mediante los resultados obtenidos de las simulaciones y la programación es posible calcular a través de ecuaciones definidas por el usuario (UDF) variables de interés como lo son el déficit de presión de vapor (figura 6), indicador utilizado para medir el confort ambiental y para el manejo de los invernaderos.

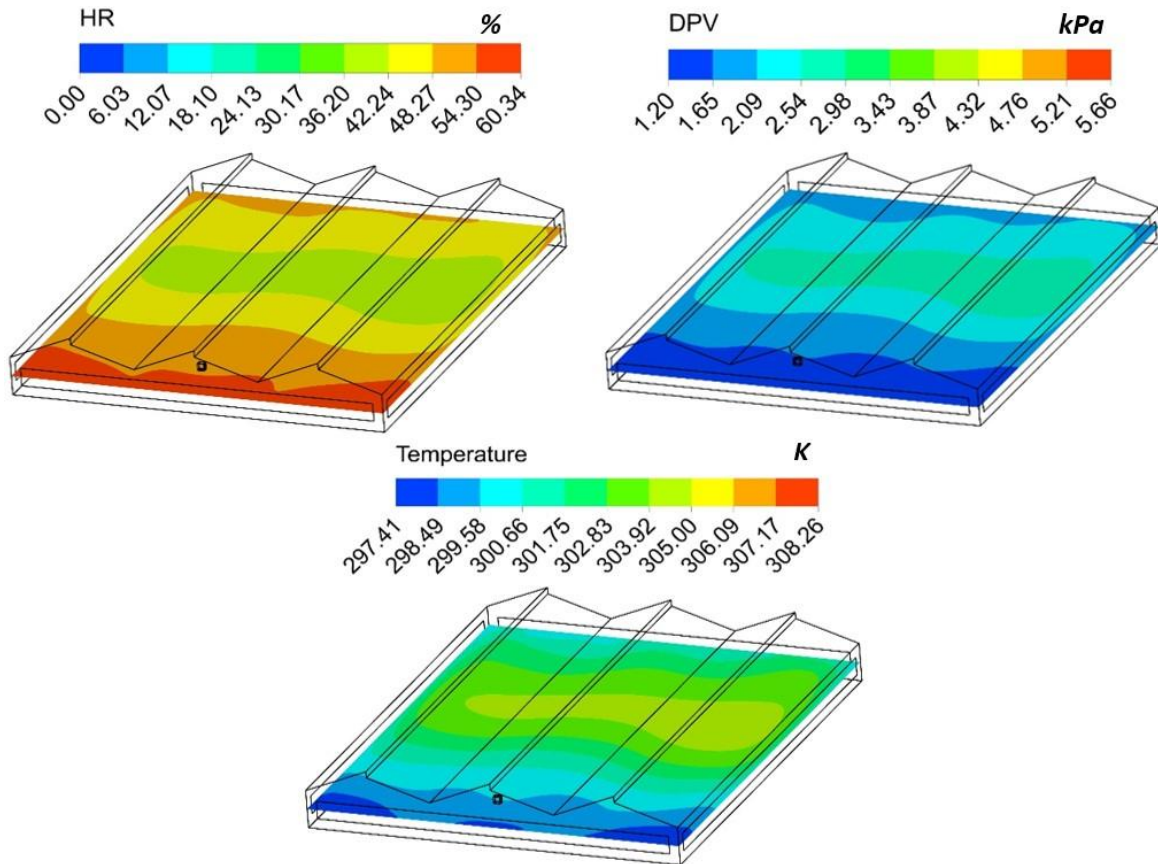


Figura 6. Indicadores ambientales para medir el confort ambiental de los cultivos.

Sedimentador

La eficiencia de la sedimentación (separación sólido-líquido) depende del diseño y operación del tanque sedimentador, teniendo como resultado una mejor calidad del agua potable si estos se optimizan. Para mejorar el diseño de estas unidades, se ha empleado durante la última década la modelación numérica con CFD. Diversos investigadores han realizado simulaciones con CFD para estudiar y analizar el comportamiento hidrodinámico y la eliminación de sólidos en tanques de sedimentación para el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, son escasas las aportaciones en utilizar la CFD para describir y analizar el comportamiento del fluido en tanques sedimentadores para plantas de potabilización del agua y además que relacionen el dimensionamiento (largo, ancho y profundidad) con el tipo de entrada y la posición de salida del sedimentador. (Goula, Kostoglou, Karapantsios, y Zouboulis, 2008) y (Al-Sammaraee y Chan, 2009).

Este tipo de herramientas facilita el análisis de varias propuestas de configuraciones geométricas del tanque sedimentador para seleccionar la más eficiente en función del tiempo de retención, volumen de zonas muertas y cortocircuitos hidráulicos. En la figura 7, se muestra el estudio de un tanque sedimentador de alta tasa que integran el proceso de clarificación convencional, con el apoyo de un prototipo experimental, donde se

estudió a detalle el comportamiento hidrodinámico del fluido, e identificar las perturbaciones que puedan afectar la eficiencia del proceso de sedimentación.

Las líneas de corriente representan la trayectoria de una partícula dentro del dominio, en este caso el interior del sedimentador experimental, esta herramienta es útil para observar las recirculaciones y su distribución (Figura 7), de esta forma es posible analizar cuáles son las causas que producen estos fenómenos, para así tratar de evitarlos modificando la geometría del modelo.

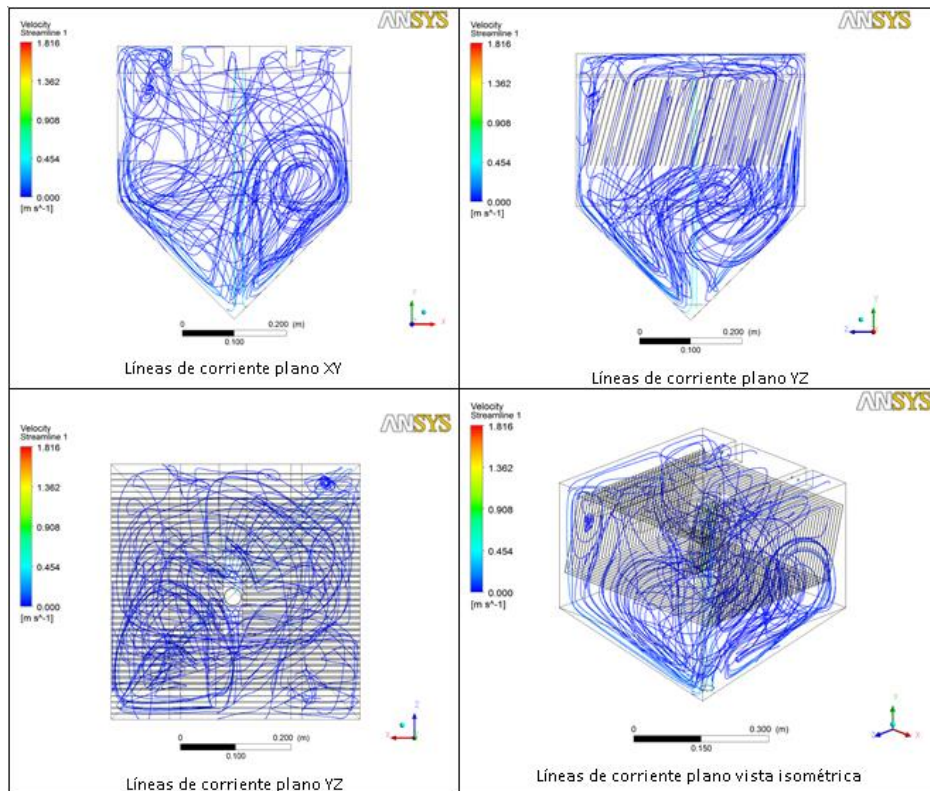


Figura 7. Líneas de corriente dentro del sedimentador experimental en estado estacionario (Ramirez-Ruiz, 2019).

Conclusiones

Una vez validado, CFD como herramienta para analizar y predecir el comportamiento fluidodinámico de un vertedor, sedimentador o invernadero, es posible estudiar el comportamiento hidráulico y térmico de los objetos de estudio y mejorar su funcionamiento realizando configuraciones en la geometría del concepto computacional. Los resultados numéricos muestran concordancia con los experimentales con errores menores al 10%, permitieron caracterizar el comportamiento de la descarga en los vertedores, el funcionamiento hidráulico de los sedimentadores y caracterizar el ambiente dentro de los invernaderos. Finalmente se concluye que CFD es una herramienta



poderosa que permite predecir los fenómenos fluidodinámicos que se presentan en estructuras agrícolas e hidráulicas.

Referencias Bibliográficas

- Aguilar-Rodriguez, C.; Flores-Velazquez, J.; Ojeda-Bustamante, W.; Rojano, F.; Iñiguez-Covarrubias, M. 2020. Valuation of the energy performance of a greenhouse with an electric heater using numerical simulations. *Processes*, 8, 600.
- Aguilar-Rodriguez, C.; Flores-Velazquez, J.; Rojano, F.; Ojeda-Bustamante, W.; Iñiguez-Covarrubias, M. 2020. Estimación del ciclo de cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero, con base en grados días calor (GDC) simulados con CFD. *Tecnología y ciencias del agua*, ISSN 2007-2422, 11(4), 27-57.
- Al-Sammarraee, M., y Chan, A. (2009). Large-eddy simulations of particle sedimentation in a longitudinal sedimentation basin of a water treatment plant. Part 2: The effects of baffles. *Chemical Engineering Journal*, 152(2-3), 315-321. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.01.052>.
- Bartzanas, T.; Boulard, T.; Kittas, C. 2004. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosystems Engineering*, 88(4).
- Baxevanou, C.; Fidaros, D.; Bartzanas, T.; Kittas, C. 2018. Yearly numerical evaluation of greenhouse cover materials. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 54–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.006>.
- Crookston, B. M., & Tullis, B. P. 2012. Labyrinth weirs: Nappe interference and local submergence. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(8), 757-765.
- Fernández, J. M. 2012. *Técnicas numéricas en Ingeniería de Fluidos: Introducción a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por el Método de Volumen Finito*; Reverté, Barcelona, pp. 98-294.
- Goula, A., Kostoglou, M., Karapantsios, T., y Zouboulis, A. (2008). The effect of influent temperature variations in a sedimentation tank for potable water treatment— A computational fluid dynamics study. *Water Research*, 42(13), 3405-3414. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.05.002>.
- Majdoubi, H.; Boulard, T.; Fatnassi, H.; Bouirden, L. 2009. Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: an experimental and CFD assisted study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(6-7), 1050-1062.
- Ramirez-Ruiz Candido (2019). Estudio hidrodinámico de sedimentadores de alta tasa en plantas potabilizadoras utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD). Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de maestría.
- Sánchez, J. M. C., & Elsitdié, L. G. C. 2011. Consideraciones del mallado aplicadas al cálculo de flujos bifásicos con las técnicas de dinámica de fluidos computacional. *J. Introd. Inv. UPCT.*, 4, 33-35.
- Sethi, V.P. 2009. On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation, *Sol. Energy*, 83, 21–38.
- ŞCHEAUA, F. 2016. AGRICULTURAL FIELD IRRIGATION SOLUTION BASED ON VENTURI NOZZLE γ 2 g γ 2 g. *JOURNAL OF INDUSTRIAL DESIGN AND ENGINEERING GRAPHICS*, 2(1), 31–35.



- Tong, G.; Christopher, D.; Li, T.; Wang, T. 2013. Passive solar energy utilization: a review of cross-section building parameter selection for Chinese solar greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 540-548.
- Xu, Y., Gao, L., Zhao, Y., & Wang, H. 2014. Wet gas overreading characteristics of a long-throat Venturi at high pressure based on CFD. *Flow Measurement and Instrumentation*, 40, 247–255. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.09.004>
- Wu, W., Rodi, W y Wenka, T. 2000. 3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channels. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*. Vol 126 Num 1.
- Zuhair al zubaidy, Riyadh. 2013. Numerical Simulation of Two-Phase Flow. En: *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*. Vol 2, No 3; 13p