

## Empleo de los modelos visuales en la enseñanza y la investigación

Alcides León Méndez

Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE

email: [aleonm@cih.cujae.edu.cu](mailto:aleonm@cih.cujae.edu.cu)

Ulises Herrera Tornés

EPROB, Ministerio de la Construcción, La Habana

### RESUMEN

La enseñanza de la hidráulica se basa en ecuaciones teóricas y soluciones empíricas dadas por investigadores. También se emplean resultados de modelación física y matemática de los problemas. Pero no siempre puede mostrarse a la vista el comportamiento del flujo o, como en los modelos físicos, se necesitan laboratorios especializados. Por tanto falta una herramienta que reproduzca, cualitativa y cuantitativamente, el movimiento del fluido al atravesar diferentes obras. El presente trabajo aborda el uso, por primera vez en Cuba, de modelos visuales para ejemplificar el comportamiento de obras bajo diferentes situaciones. Usando un programa de modelación visual como el Flow-3D, se obtienen soluciones de problemas relacionados con conducciones libres y forzadas y refuerza la acción del docente. Se favorece además la asimilación del estudiante al analizar el comportamiento de obras bajo distintas condiciones de trabajo.

**Palabras clave:** modelos visuales, simulación de flujos, enseñanza de la hidráulica, modelos matemáticos.

## Application of visual models in teaching and research

### ABSTRACT

Teaching in Hydraulics is based on theoretical equations and empirical solutions given by researchers. Also results from physical and mathematical models are used. But not always flow behavior can be clearly visualized or, as with physical models, specialized laboratories are required. Therefore, a tool is needed to reproduce, in quality and quantity, the movement of fluids across different types of conduits. This paper deals, for the first time in Cuba, with the application of visual models to visualize flow behavior under different situations. By applying the visual modeling software Flow-3D, solutions to flow problems in channels and pipes can be visually observed, thus enhancing the teacher's action. Also student comprehension is highly improved as he can watch different alternatives of flow under various working conditions.

**Keywords:** visual models, flow simulation, teaching of hydraulics, mathematical models.

## INTRODUCCIÓN

La carrera de Ingeniería Hidráulica ha tenido varios cambios en los planes de estudio, con el fin de incorporar las tendencias que se observan en el plano internacional, así como satisfacer las demandas actuales y futuras a nivel nacional. El plan de estudio D, es el encargado de preparar y desarrollar a los estudiantes con capacidad de diseñar, proyectar, planificar, gestionar y administrar los proyectos en el campo de la hidráulica y en construcciones a pie de obra.

La enseñanza hidráulica se basa en las ecuaciones teóricas, soluciones empíricas dadas por instituciones, personalidades y por los resultados de la modelación física y matemática de los problemas. Estas herramientas en algunos casos no permiten ejemplificar con nitidez el comportamiento del flujo y en otros, como es el caso de los modelos físicos está limitada a la enseñanza en laboratorios especializados. Por tanto falta una herramienta que, de forma ágil y convincente indique, tanto cualitativa como cuantitativamente, el comportamiento del fluido al atravesar diferentes obras.

Por tanto el objetivo del trabajo es el de implementar el uso de un programa dedicado a la modelación visual de fluidos para un uso en la docencia, tanto en pregrado como en posgrado y analizar sus potencialidades para su empleo en las investigaciones de equipos, dispositivos y obras hidráulicas.

## BASES DE LA MODELACIÓN VISUAL

La historia de las modelaciones visuales empieza aparecer a partir del siglo XVII con la introducción de los métodos científicos. Galileo creó un modelo para describir la caída de los cuerpos. Newton creó un modelo para describir la atracción de los cuerpos. Kepler creó un modelo para describir las órbitas planetarias. Bohr creó un modelo para describir la estructura atómica. A finales de siglo XX y comienzos de este siglo, se ha visto el avance de los modelos matemáticos con salidas visuales, técnica que se conoce con el nombre de modelación visual.

Esta herramienta informática se basa en la modelación matemática del flujo, a partir de las ecuaciones diferenciales que lo gobiernan (1)-(6) y de las soluciones empíricas obtenidas y validadas para la solución de los problemas que se abordan, Márquez y León (2002).

Según Vélez y León (2003), las ecuaciones matemáticas que se utiliza para resolver los problemas son:

- 1) La ecuación de continuidad se obtiene a partir de la ley de conservación de la masa.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

donde:

$V_x, V_y, V_z$ : Componentes de la velocidad en (x, y, z) respectivamente.  
 $\rho$ : densidad.

x, y, z: coordenadas cartesianas globales.  
t: tiempo.

2) La variación de la densidad respecto a la presión sale a partir de la ecuación de estado. Si se utiliza el algoritmo para fluido compresible entonces se supone un gas ideal.

$$\rho = \frac{P}{RT} \Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial P} = \frac{1}{RT} \quad (2)$$

donde:

P: presión  
R: constante del gas  
T: temperatura  
 $\rho$ : densidad

3) Conocer la turbulencia con que se está moviendo en un conducto cerrado, para este caso se utiliza la expresión del número de Reynolds.

$$Re = \frac{v \cdot l \cdot \rho}{\mu} \quad (3)$$

donde:

Re: número de Reynolds.  
 $\mu$ : viscosidad dinámica.  
l : longitud característica.  
 $\rho$ : densidad  
v: velocidad.

4) Las ecuaciones de momentum de Navier-Stokes:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_x}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_x)}{\partial z} &= \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + R_x + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) &+ T_x \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_y}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_y)}{V_x} + \frac{\partial(\rho V_y V_y)}{V_y} + \frac{\partial(\rho V_z V_y)}{V_z} &= \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + R_y + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) &+ T_y \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho V_z}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_z)}{V_x} + \frac{\partial(\rho V_y V_z)}{V_y} + \frac{\partial(\rho V_z V_z)}{V_z} = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + R_z + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) + T_z \quad (6)$$

$V_x, V_y, V_z$ : Componentes de la velocidad en (x, y, z) respectivamente.

$\rho$ : densidad

$\mu_e$ : viscosidad efectiva

Para el caso de flujo laminar la viscosidad efectiva es la viscosidad dinámica.

Los términos  $R_x, R_y, R_z$  representan cualquier término que el usuario desee agregar. Como ejemplo se tiene la resistencia distribuida, que se utiliza para modelar el efecto de algunas particularidades de la geometría sin tener que modelarla, como es el caso del flujo a través de mallas, o de un medio poroso. Los términos  $T_x, T_y$  y  $T_z$  son los términos de pérdidas debido a la viscosidad, los cuales pueden ser eliminados en el caso de flujo incompresible y propiedades constantes.

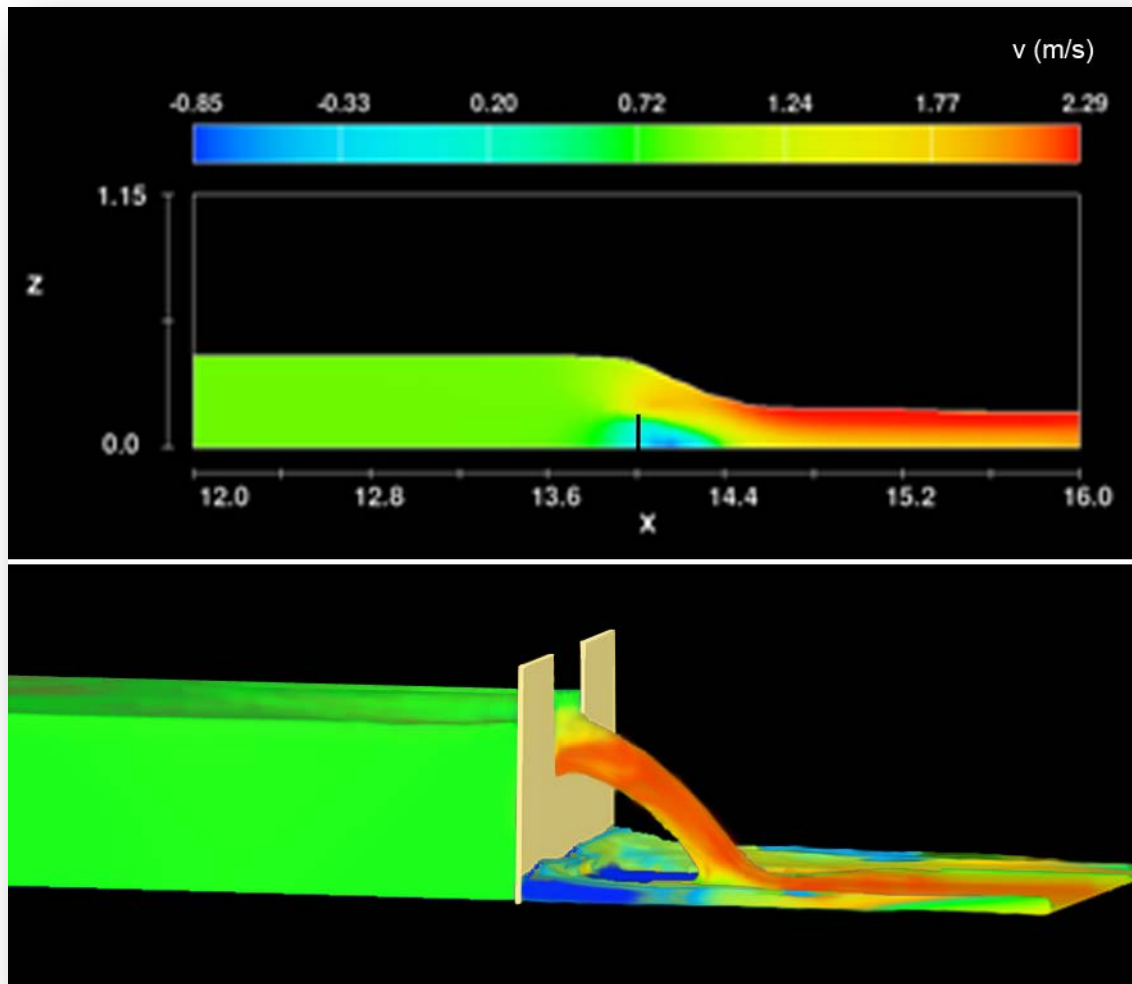
## EL EMPLEO DEL INVENTOR Y EL FLOW 3D

La modelación visual de flujos puede ejecutarse con diferentes programas propietarios dentro de los que se encuentran las versiones de ANSYS y Flow 3D. Existen ya a la disposición de los estudiantes y especialistas interesados, versiones realizadas sobre código libre, pero aún no están debidamente validadas y difundidas. Para el presente trabajo se ha empleado soluciones obtenidas con versiones del ANSYS y del Flow 3D.

El trabajo de modelación visual, figura 1, puede subdividirse en dos etapas: la preparación de la obra y la modelación del flujo a través de ella. Para ejemplificar lo antes dicho se tomará como ejemplo el empleo del programa Flow 3D para la modelación visual y el programa Inventor de la compañía Autodesk, productora también del muy empleado programa AutoCAD. En el caso del ANSYS ambos trabajos se realizan dentro del mismo ambiente.

En este caso de la explicación del trabajo de la primera etapa, que aparece a continuación, se emplea el programa Inventor de la Autodesk. Mientras que la explicación del trabajo para la segunda etapa, se basará en el uso del programa Flow 3D.

El programa Inventor en su versión 10, da la posibilidad de diseñar la obra según los requerimientos de la misma y del trabajo que se pretende con ella realizar, figura 2. Se pretende que, al final del diseño con el Inventor, las obras puedan ser importadas por el programa Flow-3D que será el responsable de realizar la modelación matemática del flujo y dar los resultados como salidas visuales en 2D, 3D y en formato de video. Debe destacarse que la potencialidad de dibujo paramétrico del Inventor es de gran ayuda, ya que con un solo dibujo el usuario puede cambiar sus dimensiones sin necesidad de crear otro.

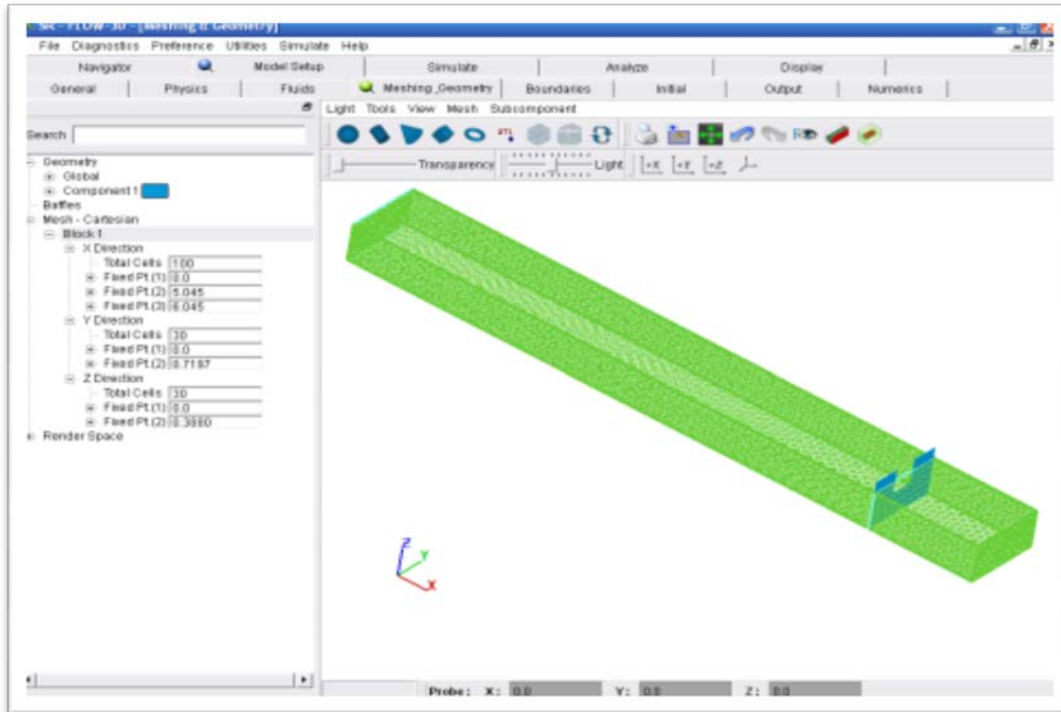


**Figura 1.** Representación visual 2D y 3D de un vertedor de pared delgada

Para el análisis visual del comportamiento de los parámetros del flujo en la obra estudiada se emplea el programa Flow-3D. Este programa de cálculo que se basa en el método de elementos finitos. Se utiliza para dar solución a gran variedad de problemas de fluidos ya sea estático o dinámico, con o sin análisis de intercambio térmico o presiones sobre objetos sumergidos.

Su facilidad de uso, capacidades de cálculo y prestigio le convierten en uno de los programas de elementos finitos que más se utiliza en la actualidad para la modelación visual en el campo de la hidráulica.

Hay dos métodos para utilizar Flow-3D. El primero es por medio del interfaz gráfico, el cual sigue las convenciones de Windows, por medio de ventanas el cual permite que el programa se utilice incluso por usuarios principiantes.



**Figura 2.** Preparación de la malla para el modelo de un vertedor de pared delgada

El segundo es por medio de archivos de comando. Este último es más complicado pero tiene la ventaja que un análisis entero se puede escribir en un pequeño archivo de texto, típicamente en menos de 50 líneas de comandos por lo cual minimiza los requerimientos de espacio, además permite realizar modificaciones al modelo de forma más sencilla.

Los resultados que se obtiene en este programa son muy satisfactorios. Si la finalidad del mismo es la enseñanza tanto en una conferencia, o su empleo está encaminado a que los estudiantes realicen sus propios modelos y saquen conclusiones a partir del ensayo con los mismos, el programa Flow 3D cumple con los requisitos de calidad que la enseñanza universitaria o tecnológica pueda demandar.

Por el contrario, si la necesidad del uso de esta herramienta se inclina hacia la investigación del funcionamiento de una obra el modelo debe ser calibrado previamente, como lo requiere cualquier otro modelo matemático. El tema calibración será abordado con más profundidad en próximos trabajos, pero no puede pasarse por alto algunas particularidades del mismo.

El proceso de calibración puede dirigirse en dos direcciones. La primera empleando ecuaciones empíricas validadas en laboratorios reconocidos, o extraídas de alguna Norma, que permita conocer las relaciones caudal-profundidad, o velocidad media-profundidad, a lo largo del perfil de la obra a estudiar. Este proceso no satisface todas las necesidades que la calibración de un modelo de flujo visual exige pero acerca la solución a la realidad.

Una segunda alternativa de calibración es modelando la obra en un laboratorio, o en su defecto

realizando mediciones en la obra real. En este caso no solo las relaciones caudal-profundidad, o velocidad media-profundidad deben ser medidas debido a que el programa reproduce la distribución de velocidades, tanto en perfil como en secciones, deben agregarse mediciones empleando un molinete hidrométrico direccional para obtener, como mínimo, la dirección y magnitud de la velocidad en diferentes puntos y preferiblemente las componentes de la velocidad en cada punto de medición.

En ambos casos las variables que pueden ser modificadas para calibrar estos modelos son: las propiedades del fluido, las condiciones de contorno, la malla empleada tanto en dimensiones como en densidad. En estos modelos una malla poco densa en zonas con cambios bruscos puede afectar la salida visual del modelo.

Uno de los resultados más importantes de este software es que guarda los dibujos en varios formatos, lo que permite el uso de varias herramientas de dibujo y programas de modelación visual. Ejemplo de las extensiones de dibujo con que guarda este software: Part Files (\*.ipt), BMP (\*.bmp), DWF Files (\*.dwf), IGES Files (\*.igs,\*.ige,\*.iges), SAT Files (\*.sat), STEP Files (\*.stp,\*.ste,\*.step), STL Files (\*.stl), XGL Files (\*.xgl), ZGL Files (\*.zgl), Assembly Files (\*.iam).

Este programa da la posibilidad de hacer modelaciones visuales de problemas en dos o tres dimensiones entregando los resultados sobre un modelo 3D o sobre modelo 2D, con o sin señalamiento de la magnitud y dirección de los vectores velocidad que caracterizan el flujo. Son capaces de excluir los efectos de la temperatura ambiental o las diferencias de presión y resuelve las ecuaciones de circulación turbulentas. Otros de los aspectos que caracterizan a este programa, es la convergencia de un proceso iterativo independiente para cada cuadrícula.

La herramienta CFD, empleada también en otros programas similares, es el eslabón principal con que trabaja el programa Flow-3D. Esta herramienta se apoya en el pre-processor, solver y post-processor para las modelaciones visuales, Márquez y León (2002) y Vélez y León (2003).

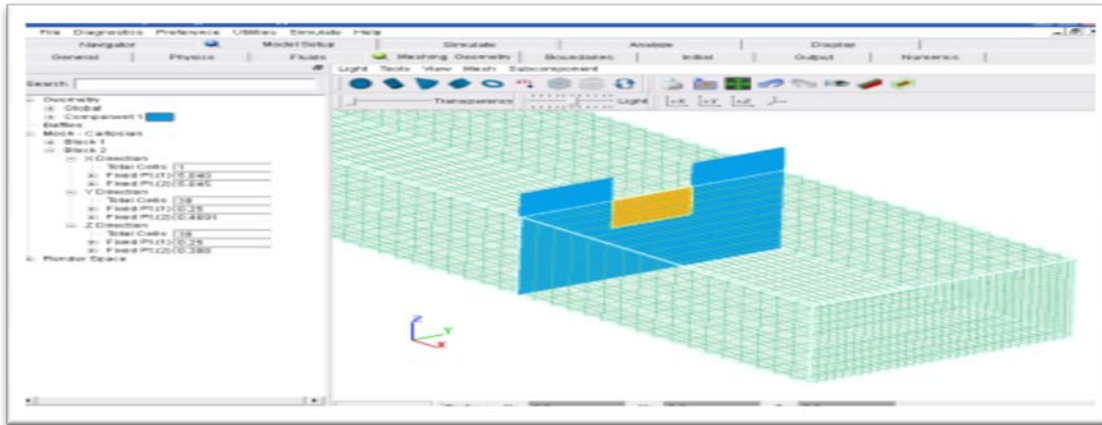
El pre-processor es el encargado de:

- ◆ Definir la geometría de la región de estudio, figura 3.
- ◆ Seleccionar los fenómenos físicos y químicos de una modelación dada.
- ◆ Definir las propiedades del flujo.
- ◆ Especificar las condiciones de contorno.
- ◆ Definir la velocidad, la presión y la temperatura en los puntos de los nodos dentro de la malla.

La exactitud de una solución de CFD es gobernada por el número de celdas en la cuadrícula. Las mallas óptimas son a menudo más finas, en las áreas donde se requiere de mayor precisión.

Por su parte el Solver es el encargado de dar soluciones numéricas a los problemas que se plantean. Utiliza tres métodos de trabajo para la simulación que en ese momento esté en proceso.





**Figura 3.** Detalle de la construcción del modelo de un vertedor de pared delgada en un canal de sección rectangular.

Los métodos posibles a emplear son:

- ◆ Método de diferencia finita.
- ◆ Método de elementos finito.
- ◆ Método espectral.

Por último el el post-processor es el módulo del Flow 3D donde el usuario visualiza los resultados que se obtiene.

- ◆ Geometría del dominio y de la cuadrícula.
- ◆ Tramas de vector.
- ◆ Línea y límite de contorno.
- ◆ Resultado en forma tridimensional.
- ◆ Agrupación según rendimiento de partícula.
- ◆ Animación para el resultado dinámico.

Para la modelación del flujo en conducciones libres y forzadas se utiliza una malla que está definida por cuatro nodos (cuadrilátero). También la malla puede estar definida por tres puntos de forma de triángulo. Las propiedades del elemento; densidad, viscosidad, conductividad térmica y calor específico se introducen al programa a partir de una serie de comandos. Estas propiedades pueden ser variables en función de la temperatura, las dos últimas solo son relevantes si el problema es de naturaleza térmica.

Deben tomarse en cuenta las siguientes consideraciones:

- ◆ El sistema de coordenadas de los nodos debe coincidir con el sistema de coordenadas global.
- ◆ El dominio del problema y la malla no debe cambiar durante el análisis.
- ◆ La malla que se construye debe ser homogénea, para obtener una mayor precisión de los resultados.



## RESULTADOS

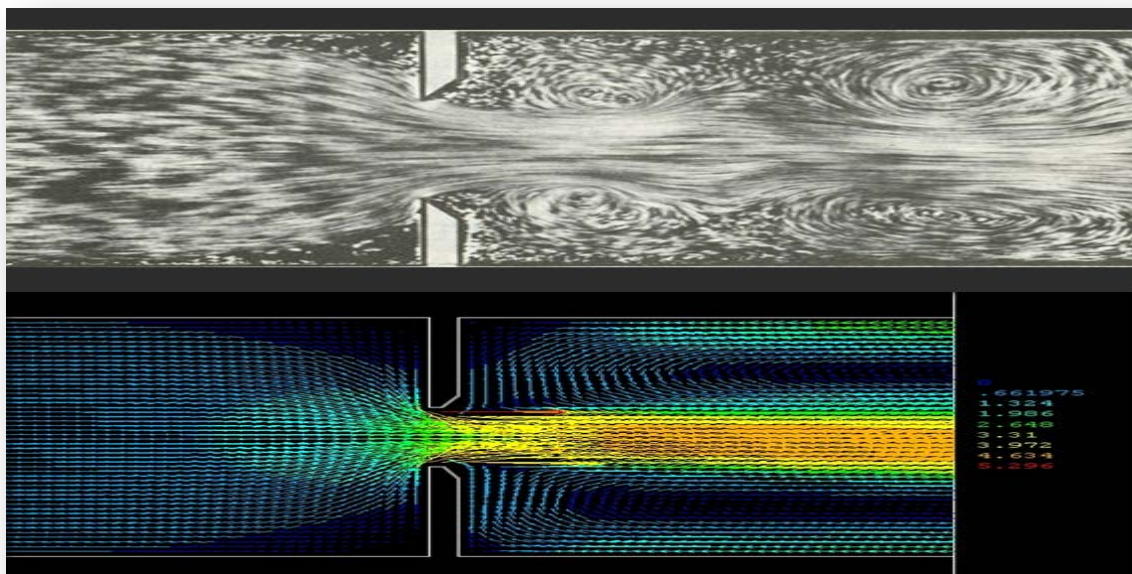
La modelación visual, a diferencia con otras herramientas, entrega sus resultados en forma gráfica y de esta forma permite al usuario, de forma rápida y precisa, comprender el fenómeno que simula y obtener de él sus principales características, Márquez y León (2002).

Su implementación en la docencia es de suma importancia en asignaturas donde el flujo de fluidos sea el objeto de estudio. Tanto en conductos a presión como en conductos que tienen una superficie libre en contacto con la atmosfera su campo de aplicación es muy amplio. A continuación aplicaciones realizadas en conductos forzados.

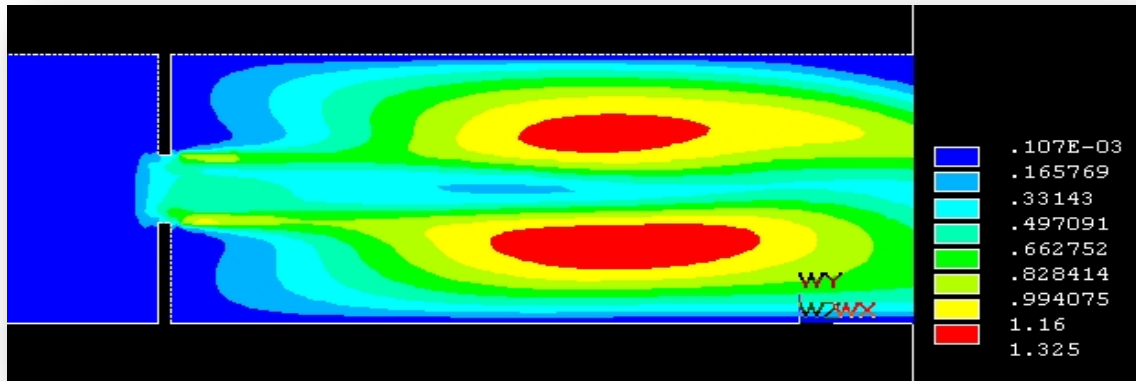
### Conducciones forzadas.

Caso de Estudio 1: Comportamiento del flujo ante un estrechamiento brusco de la sección transversal de un conducto forzado por el cual circula agua, figuras 4, 5, 6, 7 y 8.

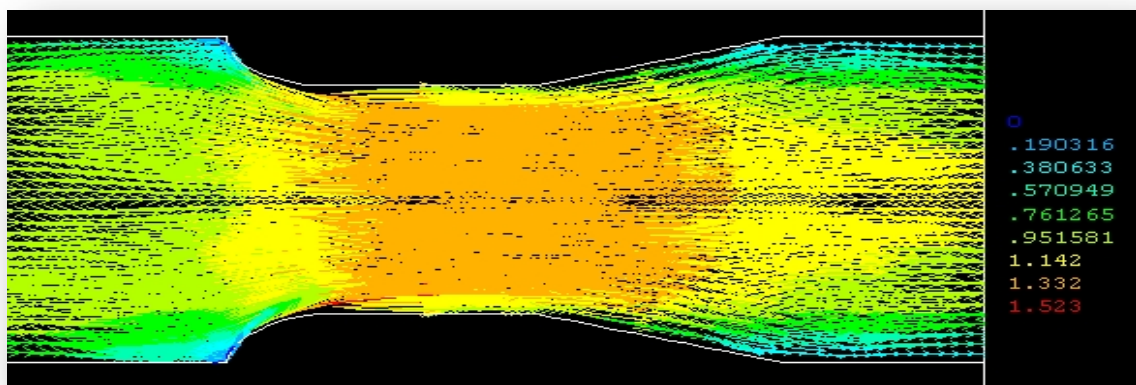
Se presenta los efectos que presentan la obstrucción de un plato orificio y una tobera Venturi colocados en el mismo conducto para las mismas condiciones de circulación, León (2008). El uso de este caso en el estudio de la Hidrometría de las conducciones forzadas ha permitido a los estudiantes y docentes comprender mejor el fenómeno que representa el obstáculo y poder interpretar con mayor conocimiento de causa el porqué de los resultados numéricos provenientes de las formulaciones empíricas que aparecen en la literatura especializada.



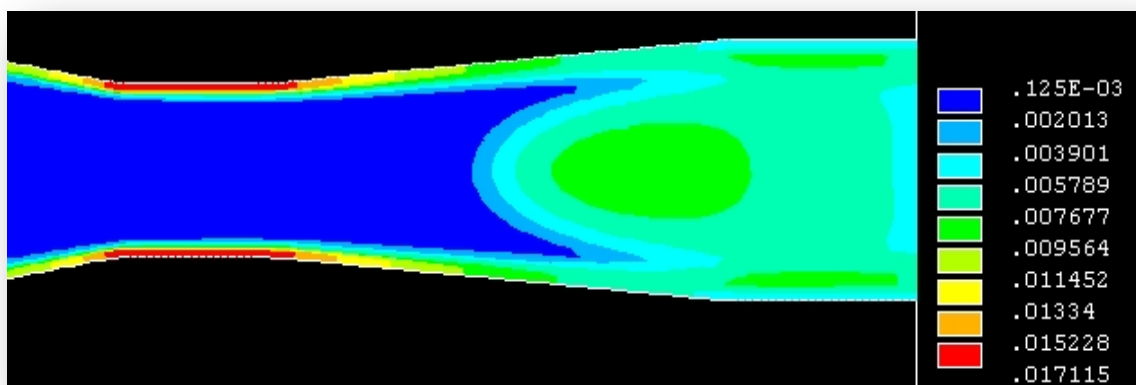
**Figura 4.** Características visuales de la velocidad del flujo, representada vectorialmente, del agua atravesando una Placa Orificio comparada con un resultado que aparece en el libro de Rouse (1961).



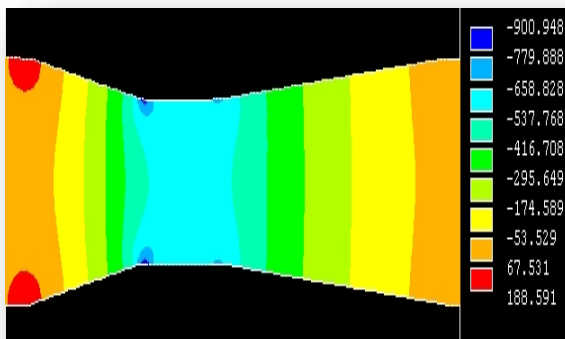
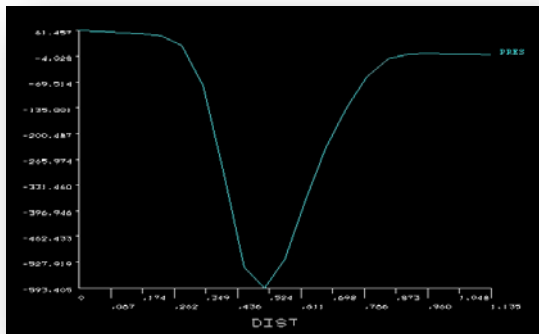
**Figura 5.** Características visuales de la energía cinética turbulenta zonificada para un flujo de agua atravesando una placa orificio



**Figura 6.** Características de la vector velocidad de un flujo de agua que pasa a través de una tobera Venturi



**Figura 7.** Características visuales de la energía cinética turbulenta zonificada para un flujo de agua que pasa a través de una Tobera Venturi



**Figura 8.** Dos formas de visualizar la distribución de presiones aplicadas al caso de la Tobera Venturi del ejemplo anterior.

Note el lector en las figuras 4 y 6, las zonas donde la velocidad crece hasta los máximos valores y compárese esto con las características, brusca en un caso y gradual en el otro, del estrechamiento. Un análisis semejante puede hacerse en las figuras 5 y 7 con los valores de la energía cinética turbulenta.

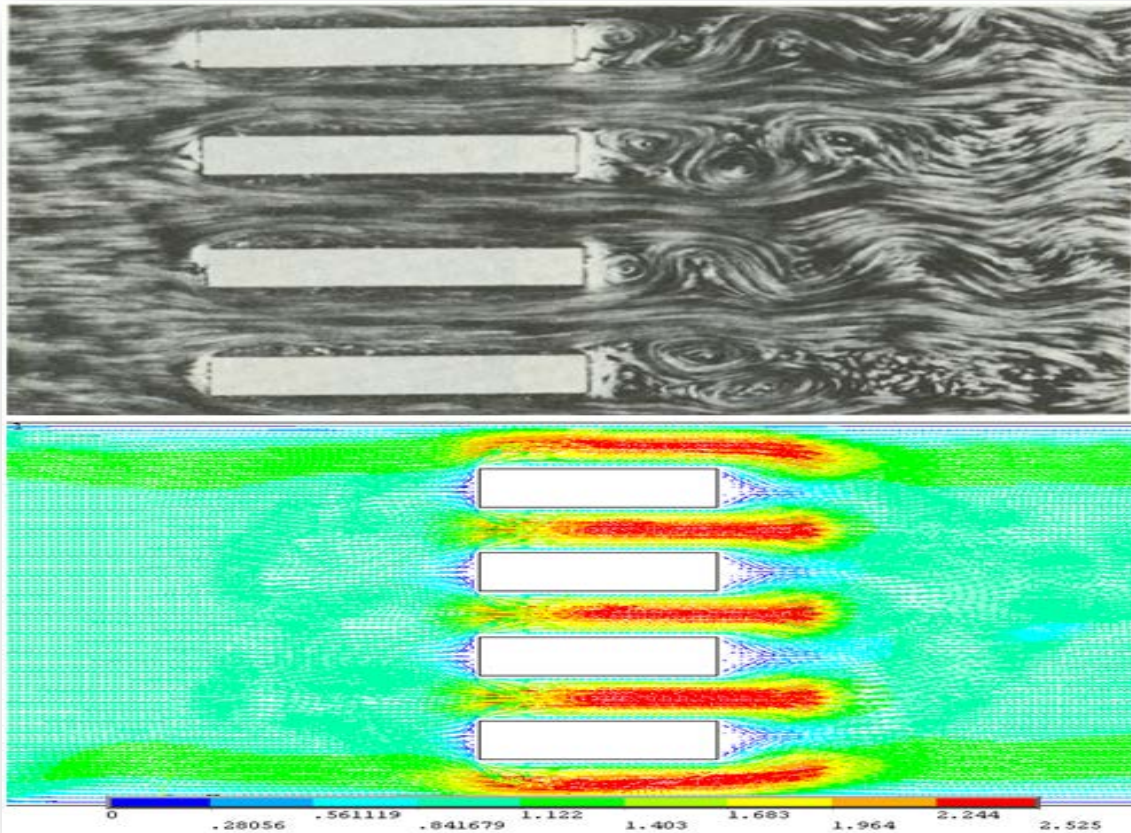
**Caso de Estudio 2:** Comportamiento del flujo atravesando Placas Planas, figuras 9 y 10.

Este caso es muy ilustrativo en la comprensión del fenómeno de turbulencia asociada con la colocación de placas dentro de un conducto. Especial atención tiene en su aplicación al estudio de alas de aviones, flujómetros de nuevo tipo llamados “de placa fija” y otras muchas más en el campo de la ingeniería, Vélez y León (2003).

En las figuras 9 y 10 se muestran resultados alcanzados en la modelación visual de placas planas, Vélez y León (2003).

En el caso que se presenta en la figura 9, se compara el resultado con los resultados de un modelo físico de placas planas que aparece en Rouse (1961). Comparando los resultados es notable la cantidad de información que trasmite el resultado del modelo visual, permitiendo comprender el fenómeno estudiado con rapidez y profundidad. Una vez realizado el primer ensayo el modelo puede ser sometido a diferentes condiciones de borde y comprobar en cada

caso el comportamiento de las placas y la consecuencia que trae su enfrentamiento a un flujo de agua. En los últimos años estos estudios han permitido el diseño de nuevos instrumentos para la medición de caudales en conductos cerrados a partir de la medición de los efectos en el patrón de distribución de la velocidad que produce el vórtice aguas abajo de las placas, Endress+Hauser (2004).



**Figura 9.** Comparación entre una solución visual y un ejemplo tomado del libro Rouse (1961) donde se visualiza en un experimento de laboratorio el comportamiento de Placas Planas.

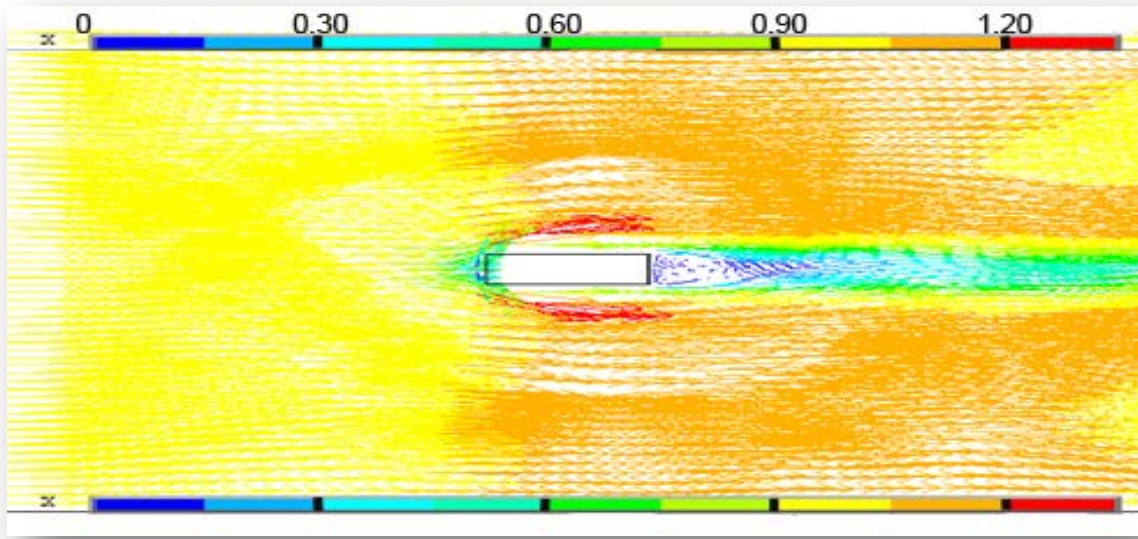
### Conducciones libres.

Caso de Estudio 3: Comportamiento del flujo ante una obra ubicada en la sección transversal de un canal por el cual circula agua, figuras 11 y 12.

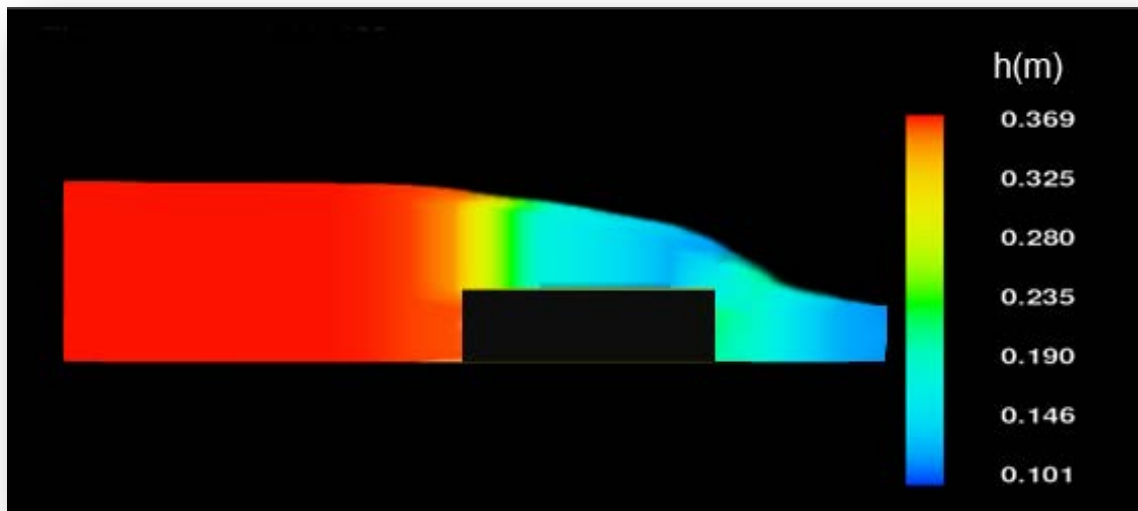
Este caso, aplicable a cualquier obra hidráulica, permite la comprensión a cabalidad de los complejos fenómenos que ocurren por efecto de insertar una obra en una conducción libre y su repercusión, aguas arriba y aguas abajo, del emplazamiento de la obra.

En el caso de las conducciones libre existen números ejemplos que pueden demostrar la validez de la aplicación de esta herramienta, Herrera y León (2010). A continuación un caso de estudio de un Umbral rectangular.

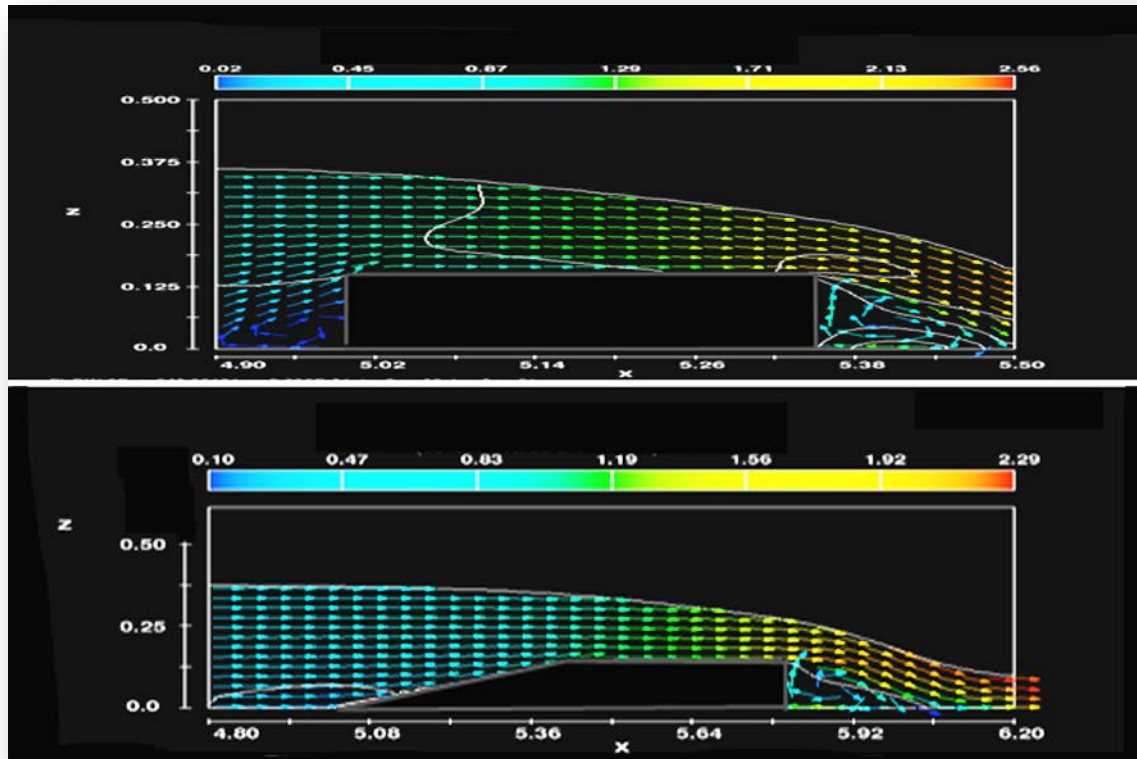




**Figura 10.** Detalles de la estela dejada por el flujo atravesando una Placa Plana.



**Figura 11.** Niveles del agua a lo largo del perfil de un Umbral rectangular con entrada abrupta.



**Figura 12.** Característica del vector velocidad, para un gasto dado, a lo largo del perfil de un Umbral rectangular con entrada abrupta y con rampa de entrada 3:1.

Comparando los resultados que aparecen en las figuras 11 y 12, se advierte el efecto positivo de la rampa de entrada en el patrón de distribución de velocidades. Esta característica permite arrastrar sobre el umbral los sedimento de fondo y transportarlos aguas en contra de lo que sucede en la obra con entrada abrupta, donde las muy bajas velocidades al pie de la entrada permiten la deposición de los sedimentos con consecuencias indeseables para el buen trabajo de la obra, León (2006).

### CAMPO DE APLICACIÓN.

Los modelos visuales tienen dos grandes campos de aplicación en la Hidráulica: la docencia y la actividad de investigación-proyecto.

En la docencia:

- Se emplea por el docente en la preparación de las actividades presenciales y no presenciales.
- Se emplea en la preparación de materiales didácticos de todo tipo
- Se emplea para la potenciación de los Laboratorios Virtuales
- Se emplea por los estudiantes en el análisis de procesos en el campo de estudio que se les indique

En la investigación-proyecto:

- Se emplea para el estudio previo de las soluciones factibles ante un problema específico.
- Se emplea para complementar los estudios en modelos a escala reducida o prototipos.

Esta herramienta se viene aplicando en el centro de Investigaciones Hidráulicas, del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, desde el año 2001, tanto en la formación de Ingenieros Hidráulicos como en trabajos de investigación asociados con el laboratorio de modelos físicos existente en el Centro.

## CONCLUSIONES

- El empleo de la modelación visual permite la interpretación rápida y veraz de los fenómenos que se presentan con el flujo en conducciones de agua y tanto forzadas como libres.
- Su empleo en la docencia, tanto para el docente como para los estudiantes, es de gran valor práctico y metodológico.
- Su empleo en el estudio de las conducciones permite al especialista eliminar numerosas alternativas mediante su estudio con esta herramienta y centrar su estudio más profundo en aquellas que mejor comportamiento presenten en los estudios visuales. Esto trae como resultado, ahorro en los gastos que representan la investigación en instalaciones de laboratorios y minimizar los estudios empleando modelos matemáticos con salidas numéricas.

## REFERENCIAS

- Endress+Hauser** (2004). "Flow Handbook". 2da. Edición, Suiza, ISBN 3-9520220-4-7
- Herrera, U. y León, A. J.** (2010). "Modelaciones para obras hidráulicas de canales y obras en canales en el plan de estudio D". Trabajo de Diploma, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana.
- León, A. J.** (2006). "Hidráulica de canales", Editorial Félix Varela, La Habana.
- León, A. J.** (2008). "Hidrometría", Segunda edición digital, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana.
- Márquez, J.M. y León, A. J.** (2002). "Modelación en conductos forzados utilizando el software ANSYS". Trabajo de Diploma, CUJAE, La Habana, Cuba.
- Rouse, H.** (1961). "Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers", Engineering Societies Monographs, Dover Publications Inc., New York, USA.
- Vélez, M. A. y León, A. J.** (2003). "Soporte informático a las asignaturas de la disciplina Hidráulica Básica". Trabajo de Diploma, CUJAE, La Habana, Cuba.