

Desarrollo de simulaciones de modelos hidráulicos como herramienta de soporte de la
enseñanza del laboratorio de hidráulica

Eliel David Malaver Nieto

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Ing. Sandra Rocío Villamizar Amaya, PhD.

Profesor Asistente EIC

Codirector

Ing. Andrés Almeyda Ortiz, MSC.

Profesor Cátedra EIC

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Dedico el desarrollo de este trabajo a mis padres Fredi Malaver, Shirley Nieto, Rebeca Arrieta y Luis Betancourt, como también a mi maravillosa pareja Marina Cantos, y a todas aquellas personas que han influido en mi desarrollo tanto personal como profesional, a mis familiares, amigos, profesores, auxiliares y a todos aquellos que me brindaron la mano en momentos de necesidad y me apoyaron con palabras de aliento y de ánimo cuando más lo necesitaba.

Eliel David Malaver Nieto

Agradecimientos

Agradezco a Dios nuestro señor por permitirme estar en este momento exacto de la historia, ya que me ha dado la posibilidad de aprender de excelentes personas a lo largo de la carrera universitaria; también a mis familiares por su impagable apoyo y contribución a mi formación tanto personal como profesional. Además de esto, agradezco a mis sorprendentes maestros ya que dedicaron su tiempo y energía a mi formación profesional, y también agradezco especialmente a la profesora Sandra Villamizar y al profesor Andrés Almeyda por su tiempo y guía en el desarrollo de este documento. Finalmente me gustaría agradecer a los auxiliares Andrés Felipe Rondón Chavarrío, Dayana Gómez Peñaranda, Valentina Angulo Cogua y Jhon Andrew Quintero Cárdenas, por su impagable apoyo en la revisión de este trabajo de grado.

Eliel David Malaver Nieto

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN.....	11
1. OBJETIVOS.....	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. METODOLOGÍA.....	14
2.1 Fase 1: Evaluación de herramientas computacionales.....	14
2.2 Fase 2: Diseño de los objetos virtuales.....	15
2.3 Fase 3: Implementación de las simulaciones computacionales.....	17
3. RESULTADOS.....	20
3.1 Evaluación de herramientas computacionales.....	20
3.1.1 Evaluación a los programas computacionales.....	20
3.2 Diseño de los objetos virtuales.....	27
3.3 Implementación de las simulaciones computacionales.....	29
3.3.1 Análisis de la Distribución de la Velocidad en un Canal (Apéndice D).....	30
3.3.2 Evaluación de la Energía Específica y el Régimen Crítico en un Canal Prismático (Apéndice E).....	31
3.3.3 Evaluación de la Transición en Flujo Subcrítico con Ancho Variable (Apéndice F).....	32
3.3.4 El Resalto Hidráulico en un Canal Rectangular (Apéndice G).....	33
3.3.5 El Flujo Uniforme y el Coeficiente de Rugosidad de Manning (Apéndice H).....	35
3.3.6 Evaluación del Flujo Gradualmente Variado Mediante el Cambio de Pendiente (Apéndice I).....	36
3.3.7 Análisis de una Compuerta de Descarga Libre, Plana y Vertical (Apéndice J).....	37
3.3.8 Caudal y Carga en un Vertedero Rectangular de Pared Delgada (Apéndice K).....	39
3.3.9 Diseño de Una Canaleta Parshall (Apéndice L).....	40
3.3.10 Implementación de las simulaciones en el curso de laboratorio de hidráulica.....	41

3.3.11 Encuestas de percepción realizadas a los estudiantes durante el semestre 2022-2 y 2023-1	43
3.3.12 Encuesta realizada a los auxiliares durante el semestre 2023-1	45
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

Lista de Tablas

Tabla 1 Tabla representativa de las decisiones acordadas para establecer las simulaciones a realizar	16
Tabla 2 Tabla resumen de la evaluación a los programas computacionales.....	21
Tabla 3 Desarrollos realizados en escenarios académicos con el programa HEC-RAS.....	22
Tabla 4 Desarrollos realizados en escenarios académicos con el programa OpenFOAM	23
Tabla 5 Desarrollos realizados en escenarios académicos con el programa HY8.....	24
Tabla 6 Desarrollos realizados en escenarios académicos con el programa H-Canales.....	25
Tabla 7 Desarrollos realizados en escenarios académicos con el programa Flow-3D	25
Tabla 8 Objetos virtuales que complementarán las prácticas del laboratorio.....	27

Lista de Figuras

Figura 1 Simulación 1. Análisis de la distribución de la velocidad en un canal.....	30
Figura 2 Simulación 2. Evaluación de la energía específica y el régimen crítico en un canal prismático	32
Figura 3 Simulación 3. Evaluación de la transición en flujo subcrítico con ancho variable ...	33
Figura 4 Simulación 4. El resalto hidráulico en un canal rectangular	34
Figura 5 Simulación 5. El flujo uniforme y el coeficiente de rugosidad de Manning.....	36
Figura 6 Simulación 6. Evaluación del flujo gradualmente variado mediante el cambio de pendiente.....	37
Figura 7 Simulación 7. Análisis de una compuerta de descarga libre, plana y vertical.....	38
Figura 8 Simulación 8. Caudal y carga en un vertedero rectangular de pared delgada.....	40
Figura 9 Simulación 9. Diseño de una canaleta Parchall.....	41
Figura 10 Integración de las simulaciones dentro del AVA del laboratorio de Hidráulica.....	42
Figura 11 Extracto de la encuesta de percepción sobre la guía de instalación de HEC-RAS (Semestre 2022-2).....	43
Figura 12 Extracto de la encuesta de percepción sobre la guía de simulación de la práctica No. 6 (Semestre 2022-2).....	44
Figura 13 Extracto de la encuesta de percepción sobre la guía de simulación de la práctica No.1 (Semestre 2023-1).....	45
Figura 14 Extracto de la encuesta realizada a los auxiliares acerca de la primera y segunda simulación aplicadas durante el semestre 2023-1.....	46

Lista de Apéndices

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la Biblioteca Uis

Apéndice A. Guía de descarga e instalación del programa HEC-RAS

Apéndice B. Guía de descarga e instalación del programa H-Canales

Apéndice C. Guía de descarga e instalación del programa OpenFOAM

Apéndice D. Simulación 1: Análisis de la distribución de la velocidad en un canal

Apéndice E. Simulación 2: Evaluación de la energía específica y el régimen crítico en una sección trapezoidal

Apéndice F. Simulación 3: Evaluación de la transición en flujo subcrítico con ancho variable

Apéndice G. Simulación 4: El resalto hidráulico en un canal rectangular

Apéndice H. Simulación 5: El flujo uniforme y el coeficiente de rugosidad de Manning

Apéndice I. Simulación 6: Evaluación del flujo gradualmente variado mediante el cambio de pendiente

Apéndice J. Simulación 7: Análisis de una compuerta de descarga libre, plana y vertical

Apéndice K. Simulación 8: Caudal y carga en un vertedero rectangular de pared delgada

Apéndice L. Simulación 9: Diseño de una canaleta Parshall

Resumen

Título: Desarrollo de simulaciones de modelos hidráulicos como herramienta de soporte de la enseñanza del laboratorio de hidráulica.*

Autor: Eliel David Malaver Nieto **

Palabras Clave: Flujo en canales abiertos, simulaciones, hidráulica, distribución de velocidad, energía, transición, momento, resalto hidráulico

Descripción: El componente práctico de la asignatura Hidráulica de Canales de la Escuela de Ingeniería Civil, está soportado por nueve prácticas de laboratorio que buscan acercar al estudiante con los conceptos básicos del curso. Sin embargo, las condiciones físicas actuales del laboratorio de Hidráulica tienen dos debilidades importantes: primero, se ha completado el tiempo de servicio de la mayoría del equipamiento en el laboratorio; segundo, la infraestructura existente no permite una diversificación de actividades, resultando en la repetición continua de las mismas experiencias, permitiendo así que los estudiantes recurran a estrategias facilistas para desarrollar las actividades del laboratorio. Se propuso, entonces, una nueva estrategia de diversificación del componente práctico del curso orientada al desarrollo de simulaciones computacionales que promovieran en los estudiantes el aprendizaje de herramientas aplicadas y, con ellas, indagar sobre los conceptos y aplicaciones básicas de la asignatura. Se desarrollaron nueve objetos virtuales que complementan los temas de cada una de las prácticas de laboratorio. Cada objeto virtual está compuesto de la guía de descarga e instalación de la herramienta computacional a usar y la guía de implementación de la simulación. A su vez, cada guía de simulación tiene una estructura definida (Título, Fuente del Recurso, Objetivos, Requerimientos computacionales, Introducción, Marco teórico específico, Implementación de la simulación, Descripción del entregable, y Referencias bibliográficas). En total, se usaron tres herramientas computacionales libres para desarrollar las simulaciones (OpenFOAM, H-Canales y HEC-RAS); la selección de la herramienta usada dependió de los objetivos específicos de cada simulación. Los productos desarrollados fueron integrados al aula virtual del Laboratorio de Hidráulica y han sido implementados en los semestres 2022-2 y 2023-1. Las encuestas de opinión aplicadas hasta la fecha a estudiantes y auxiliares indican que la estrategia ha resultado en una mejoría en los procesos de aprendizaje del curso en su componente teórico y práctico.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: Sandra Rocío Villamizar Amaya. Ph.D. Environmental Systems. Codirector: Andrés Almeyda Ortiz. Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Abstract

Title: Development of hydraulic model simulations as teaching support tools for the hydraulics laboratory. *

Author: Eliel David Malaver Nieto **

Key Words: Open channel flow, simulations, hydraulics, velocity distribution, energy, transition, momentum, hydraulic jump

Description: The practical component of the Hydraulics of Channels subject of the School of Civil Engineering, is supported by nine laboratory practices that seek to bring the student closer to the course's basic concepts and the most typical applications. However, the current physical conditions of the Hydraulics laboratory have two critical weaknesses: first, the lifetime of most of the equipment has been completed; second, the existing infrastructure does not allow diversification of activities, resulting in the continuous repetition of the same experiences, thus allowing students to resort to facile strategies to develop the laboratory activities. A new strategy of diversification of the practical component of the course was proposed, oriented to the development of computer simulations that would promote in the students the learning of applied tools and, with them, inquire about the basic concepts and applications of the subject. Nine virtual objects were developed that complement the themes of each laboratory experience. Each virtual object comprises the download and installation guide for the computational tool and the simulation implementation guide. Each simulation guide has a defined structure (Title, Resource Source, Objectives, Computational Requirements, Introduction, Specific Theoretical Framework, Simulation Implementation, Deliverable Description, and Bibliographic References). In total, three free computational tools were used to develop the simulations (OpenFOAM, HCanales, and HEC-RAS); the selection of the tool used depended on the specific objectives of each simulation. The products developed were integrated into the virtual classroom of the Hydraulics Laboratory and have been implemented in the 2022-2 and 2023-1 semesters. The results from the student and assistant surveys indicate that the strategy improved the learning processes of the course in its theoretical and practical components.

* Bachelor Thesis

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: Sandra Rocío Villamizar Amaya. Ph.D. Environmental Systems. Codirector: Andrés Almeyda Ortiz. Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Introducción

La incorporación de experiencias significativas en los procesos de enseñanza de una asignatura permite que los estudiantes tengan una mayor apropiación de su proceso académico al lograr una mejor comprensión de la justificación y aplicación de los contenidos y competencias propuestos (Vallejo et al., 2014). En las asignaturas teórico-prácticas, las prácticas de laboratorio, las visitas de campo guiadas y las simulaciones computacionales son ejemplos de este tipo de experiencias (Waldrop, 2013).

El curso de Hidráulica de la Escuela de Ingeniería Civil (EIC) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) es una asignatura teórico-práctica que históricamente se ha soportado en prácticas de laboratorio y visitas de campo. Sin embargo, estas estrategias fueron limitadas por el aislamiento impuesto por la pandemia del COVID-19 y últimamente por fallas operativas en la infraestructura de laboratorio.

En respuesta a estos retos descritos, en el periodo 2021 – 2022, se implementó una plataforma virtual que buscó centralizar información y facilitar la interacción docente-estudiante para las etapas pre- y post- del laboratorio, y proveyendo contenido y herramientas de evaluación estandarizadas que facilitaran la coordinación y gestión de las diferentes sesiones de laboratorio (Laiton Suárez, 2022).

Aunque la plataforma virtual ha sido exitosamente implementada desde su desarrollo, este producto es solo uno de los componentes identificados para solventar los retos existentes. Se requiere que la UIS solucione el problema de infraestructura física del laboratorio. Mientras que esto ocurre, se propuso el desarrollo de ejercicios de simulación que faciliten la comprensión de los conceptos presentados en clase y, a la vez, promover en los estudiantes las competencias de

uso de herramientas tecnológicas específicas de su futura profesión. Es claro que estas simulaciones no reemplazan la experiencia y beneficios que provee la ejecución del laboratorio físico. Sin embargo, se ha reconocido que el ejercicio virtual permite ampliar y diversificar los escenarios de trabajo y análisis que se pueden desarrollar en el proceso académico (Burian et al., 2009), (Mirauda et al., 2019).

Este trabajo propone nueve ejercicios de simulación que complementan las nueve experiencias de laboratorio que se desarrollan actualmente en el laboratorio de hidráulica de la EIC. Cada ejercicio cuenta con un marco teórico propio, el instructivo para su desarrollo, incluyendo guías detalladas de descarga e instalación del software requerido, y preguntas orientadoras para promover el análisis. Estos elementos han sido integrados a la plataforma virtual del laboratorio para contribuir a su continua evolución colaborativa.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar guías de utilización de simulaciones computacionales de hidráulica de flujo libre como herramientas didácticas de soporte del curso Hidráulica de Canales.

1.2 Objetivos Específicos

- Evaluar herramientas computacionales que permitan la implementación de simulaciones hidráulicas.
- Diseñar los objetos virtuales propuestos.
- Implementar las simulaciones computacionales de los objetos virtuales propuestos.

2. Metodología

La metodología de trabajo se desarrolló en tres fases de acuerdo con el plan de trabajo aprobado: Evaluación de herramientas computacionales, Diseño de objetos virtuales e Implementación de las simulaciones propuestas.

2.1 Fase 1: Evaluación de herramientas computacionales

En trabajo conjunto con los docentes de la asignatura se decidió desarrollar simulaciones que fueran complementarias a cada una de las experiencias de laboratorio que se desarrollan actualmente, y se definió la necesidad de trabajar con software de acceso libre, de tal manera que los estudiantes tuvieran la facilidad para acceder a estas herramientas. Se llevó a cabo una revisión de herramientas computacionales de uso potencial para realizar simulaciones hidráulicas, indagando diferentes tipos de fuentes de información como los libros de Hidráulica de Canales (Villón, 1995), y HEC-RAS Ejemplos (Máximo Villón Béjar, 2014); páginas web presentadas por los docentes del área como la página de HEC-RAS (*HEC-RAS*, 2008), EPA SWMM (US EPA, 2014), HY8 (U.S. Department of Transportation, 2022) y búsquedas independientes de programas como H-Canales (Rojas, 2013), Flow-3D (FLOW-3D® Version 12.0 [Computer software], 2019), OpenFOAM (*OpenFOAM*, 2004). A partir de esta información, se procedió a consultar sobre las características de los programas, de tal manera que se escogieran las mejores herramientas computacionales para llevar a cabo las simulaciones en el laboratorio de hidráulica. Para cada una de las herramientas identificadas se extrajo la siguiente información:

- Desarrollador
- Tipo de Licenciamiento

- Página web de descarga del modelo
- Vínculo de acceso a la documentación técnica
- Nivel de complejidad
- Simulaciones realizables

Adicionalmente, para las herramientas identificadas se indagó si existían desarrollos realizados en escenarios académicos que sirvieran de base para la realización de las simulaciones de este trabajo, identificando los requerimientos y productos de cada uno de esos desarrollos. Sumado a esto, con la información que se indagó sobre los desarrollos realizados, se pudo evidenciar el potencial de los programas computacionales para ser utilizados en las simulaciones del laboratorio de hidráulica.

2.2 Fase 2: Diseño de los objetos virtuales

En esta fase se propusieron los objetos virtuales a desarrollar, cada uno guardando una relación directa con las prácticas de laboratorio actuales. El objetivo y alcance de cada simulación fue definido en conjunto con los docentes de la asignatura, y con base en estos criterios, se definió la herramienta computacional a usar. Se determinó que era factible soportarse en simulaciones ya existentes, siempre y cuando se reconociera la autoría de cada fuente. Finalmente, para cada simulación se definieron los parámetros e información requerida, los resultados esperados, y las limitaciones.

Adicionalmente, se definieron los productos esperados:

- Manuales de descarga e instalación de las herramientas computacionales
- Guías de implementación de las simulaciones
- Videos que soportan la implementación de las simulaciones

Mediante el trabajo con los profesores de la asignatura se concertaron los elementos a trabajar en cada una de las simulaciones (ver Tabla 1).

Tabla 1

Tabla representativa de las decisiones acordadas para establecer las simulaciones a realizar

Simulaciones	Elementos que trabajar
S1 Análisis de la Distribución de la Velocidad en un Canal	<ul style="list-style-type: none"> - Distribución de velocidades - Representaciones gráficas - Visualización a lo largo del canal
S2 Evaluación de la Energía Específica y el Régimen Crítico en una Sección Trapezoidal	<ul style="list-style-type: none"> - Energía específica - Regímenes del flujo - Curva de energía específica
S3 Evaluación de la Transición en Flujo Subcrítico con Ancho Variable	<ul style="list-style-type: none"> - Energía en canales no prismáticos - Variación del perfil del flujo - Visualización de resultados de la simulación
S4 El Resalto Hidráulico en un Canal Rectangular	<ul style="list-style-type: none"> - El concepto de resalto hidráulico - Ecuaciones del resalto hidráulico - Clasificación del resalto hidráulico
S5 El Flujo Uniforme y el Coeficiente de Rugosidad de Manning	<ul style="list-style-type: none"> - Flujo uniforme - Ecuaciones de velocidad - Coeficiente de rugosidad de Manning
S6 Evaluación del Flujo Gradualmente	<ul style="list-style-type: none"> - Ecuación del flujo gradualmente

Variado Mediante el Cambio de Pendiente

variado

- Curvas de remanso
- Visualización de resultados de la simulación

S7 Análisis de una Compuerta de Descarga

Libre, Plana y Vertical

- Concepto de compuerta de admisión
- Clasificación de las compuertas
- Clasificación de los vertederos

S8 Caudal y Carga en un Vertedero

Rectangular de Pared Delgada

- Concepto de calibración de vertederos
- Visualización de resultados de la simulación

S9 Diseño de una Canaleta Parshall

- Historia de la canaleta Parshall
- Función de la canaleta Parshall
- Visualización de resultados de la simulación

2.3 Fase 3: Implementación de las simulaciones computacionales

La fase de implementación de las simulaciones incluyó primero, el estudio de las herramientas computacionales a usar, el desarrollo de los productos esperados, y la implementación de los objetos virtuales en el marco del desarrollo del laboratorio de Hidráulica del semestre 2022-2 y 2023-1. Durante el semestre 2022-2 se implementaron pilotos de las simulaciones 4 y 6 con los estudiantes de los grupos D1, D2 y D3 del laboratorio de Hidráulica. Durante el semestre 2023-1 se están implementando los pilotos de las simulaciones pendientes con la totalidad de los estudiantes del laboratorio de Hidráulica (grupos D, F, y L).

Se implementó un cuestionario para obtener retroalimentación de los estudiantes sobre su percepción del desarrollo de las simulaciones 1 (2023-1), 4 y 6 (2022-2), con las siguientes preguntas:

- Pregunta 1: En una escala del uno (1) al cinco (5), donde 1 es la menor valoración y 5 la mayor valoración; en cuánto calificaría la experiencia visual de la práctica del laboratorio de hidráulica (es decir, si la guía es amigable con el usuario y si se encuentra bien estructurada)
- Pregunta 2: En una escala del uno (1) al cinco (5), donde 1 es la menor valoración y 5 la mayor valoración; en cuanto a la escritura del documento, ¿piensa usted que el documento está bien escrito y cumple con las reglas gramaticales y ortográficas del español?
- Pregunta 3: En una escala del uno (1) al cinco (5), donde 1 es la menor valoración y 5 la mayor valoración; en cuanto al marco teórico presentado en el documento de la práctica, ¿piensa usted que es suficiente para comprender los conceptos teóricos de la misma y le permite entender y responder las preguntas de análisis presentes en el documento?
- Pregunta 4: En una escala del uno (1) al cinco (5), donde 1 es la menor valoración y 5 la mayor valoración; en cuanto a los recursos necesarios de consulta, ¿cree usted que el documento presenta los recursos necesarios para consultar en el caso de que sea necesario investigar sobre conceptos más detallados de la práctica? (es decir, el documento de la práctica presenta una sección de recursos suficiente para que el estudiante pueda ampliar el conocimiento del tema presentado independientemente)
- Pregunta 5: En una escala del uno (1) al cinco (5), donde 1 es la menor valoración y 5 la mayor valoración; en cuanto a las preguntas de análisis, ¿cree usted que las preguntas

formuladas para el análisis de la práctica son lo suficientemente claras para su desarrollo?

- Pregunta 6: En una escala del uno (1) al cinco (5), donde 1 es la menor valoración y 5 la mayor valoración; en cuanto a la eficiencia de la herramienta, ¿cree usted que la actividad desarrollada (simulación y análisis propuesto) le permitió ampliar la comprensión del tema trabajado?

Además de esto, para cada una de las preguntas se implementó un buzón de comentarios, en el cual los estudiantes podían expresar abiertamente sus opiniones acerca de cada una de las preguntas realizadas.

Así mismo, se buscó conocer la opinión de los auxiliares del laboratorio de Hidráulica sobre su percepción del desarrollo de la simulación 1. Las preguntas formuladas fueron:

- Pregunta 1: En una escala del uno (1) al cinco (5), donde 1 es la menor valoración y 5 la mayor valoración; en cuánto calificaría la calidad de los recursos entregados (es decir, si los recursos entregados son lo suficientemente claros para ser desarrollados)
- Pregunta 2: En una escala del uno (1) al cinco (5), donde 1 es la menor valoración y 5 la mayor valoración; en cuánto calificaría el marco teórico presentado (es decir, si el marco teórico presentado tiene la calidad y cantidad necesaria para llevar a cabo la simulación)
- Pregunta 3: En una escala del uno (1) al cinco (5), donde 1 es la menor valoración y 5 la mayor valoración; en cuánto calificaría el desarrollo de la simulación realizada (es decir, si es claro el problema propuesto y el desarrollo de este)
- Pregunta 4: En una escala del uno (1) al cinco (5), donde 1 es la menor valoración y 5 la mayor valoración; en cuánto calificaría la sección de descripción del entregable (es decir,

si los requerimientos para el estudiante son claros y están bien especificados, como también la calidad de estos)

- Pregunta 5: En una escala del uno (1) al cinco (5), donde 1 es la menor valoración y 5 la mayor valoración; en cuánto calificaría su experiencia con las guías desarrolladas.

De la misma manera, también se habilitó para cada una de las preguntas, un buzón de comentarios en el cual el auxiliar podía expresar abiertamente su opinión acerca de cada una de las preguntas realizadas.

3. Resultados

3.1 Evaluación de herramientas computacionales

La consulta bibliográfica sugiere que, en el área de Hidráulica de Canales, las herramientas computacionales más utilizadas son: HEC-RAS (*HEC-RAS*, 2008), OpenFOAM (*OpenFOAM*, 2004), H- Canales (Rojas, 2013), HY8 (U.S. Department of Transportation, 2022) y Flow-3D (FLOW-3D® Version 12.0 [Computer software], 2019). A continuación, se presentan las tablas en las cuales se evidencia el proceso de consulta bibliográfica para los programas computacionales antes mencionados.

3.1.1 Evaluación a los programas computacionales

Se realizó una consulta bibliográfica para cada uno de los programas computacionales en el área de Hidráulica de Canales mencionados anteriormente, de tal manera que se presentaran aspectos básicos como el nombre del programa, el desarrollador, si es un software libre o no, la página web de descarga, el vínculo de acceso a la documentación técnica, el nivel de complejidad y las posibles simulaciones realizables en cada uno de los programas (ver Tabla 2).

Tabla 2

Tabla resumen de la evaluación a los programas computacionales

Nombre	Desarrollador	Software libre o comercial	Página web de descarga	Acceso a documentación técnica	Nivel de complejidad	Simulaciones realizables
HEC-RAS	USACE	Libre	HEC-RAS Download	HEC-RAS Documentat ion	Medio	Prácticas 3-5-6-9
Open FOAM	OpenCFD Ltd.	Libre	Download blueCFD- Core	User Guide	Alto	Práctica 1
HY8	Federal Highway Administration	Libre	HY8	Incluida con el software	Medio	-
H-canales	Máximo Villón-Béjar	Libre	Descargar Hcanales v3	Incluida con el software	Bajo	Prácticas 2-4-7-8
Flow-3D	Flow Science Latin America	Comercial	Descarga FLOW-3D	Incluida con el software	Medio	-

Así mismo, también se realizaron consultas específicas para cada uno de los programas computacionales, de tal manera que se buscaron desarrollos realizados en escenarios académicos para cada uno de los programas, encontrando así los siguientes resultados.

- Desarrollos realizados en escenarios académicos con el programa HEC-RAS (*HEC-RAS*, 2008) (ver Tabla 3)
- Desarrollos realizados en escenarios académicos con el programa OpenFOAM (*OpenFOAM*, 2004) (ver Tabla 4)

- Desarrollos realizados en escenarios académicos con el programa HY8 (U.S. Department of Transportation, 2022) (ver Tabla 5)
- Desarrollos realizados en escenarios académicos con el programa H-Canales (Rojas, 2013) (ver Tabla 6)
- Desarrollos realizados en escenarios académicos con el programa Flow-3D (FLOW-3D® Version 12.0 [Computer software], 2019) (ver Tabla 7)

Presentando las tablas antes mencionadas a continuación:

Tabla 3

Desarrollos realizados en escenarios académicos con el programa HEC-RAS

¿Existen desarrollos de objetos virtuales en otros escenarios académicos?	Vínculos de demostración
En la Universidad Santo Tomás han desarrollado un tutorial de Resalto Hidráulico mediante HEC-RAS	Diseño de un dissipador de energía tipo resalto hidráulico en HEC-RAS
En la Universidad Peruana Unión se ha utilizado la simulación hidráulica bidimensional de HEC-RAS para determinar zonas inundables de un tramo del río Ramis	Determinación de zonas inundables de un tramo del río Ramis con HEC-RAS
En la Universidad Católica de Cuenca, en Ecuador, se han evaluado los modelos hidrodinámicos HEC-RAS 1D y 2D en un tramo del río Yanucay	Modelos hidrodinámicos 1D y 2D en HEC-RAS para un tramo del río Yanucay
En la Universidad Politécnica de Cataluña, en España, se ha estudiado la modelización bidimensional del flujo en lámina libre	Modelización bidimensional del flujo en lámina libre mediante HEC-RAS aplicado al río Anoia

mediante HECRAS aplicado al río Anoia La Universidad Politécnica de Cartagena, en España, ha analizado las capacidades de HEC-RAS en la resolución de pilas de puentes	Análisis de las capacidades de HEC-RAS en la resolución de pilas de puente (upct.es)
En la Universidad de Tennessee, en Estados Unidos, se han estudiado las inestabilidades con modelo de flujo inestable HEC-RAS para ríos regulados en etapas de flujo bajo	Investigating Instabilities with HEC-RAS Unsteady Flow Modeling for Regulated Rivers at Low Flow Stages (tennessee.edu)
Un estudio de la Universidad de Pune, en la India, ha hecho uso de HEC-RAS para el modelado de inundación del río Godavari	Flood modeling of river godavari using HEC-RAS
En la Universidad Libre de Colombia se ha hecho una modelación con HEC-RAS en la parte baja de la subcuenca río Frío Cundinamarca	Modelación he-ras en la parte baja de la subcuenca río frío Cundinamarca

Tabla 4

Desarrollos realizados en escenarios académicos con el programa OpenFOAM

¿Existen desarrollos de objetos virtuales en otros escenarios académicos?	Vínculos de demostración
La Universidad Politécnica de Valencia, en España, ha presentado un estudio sobre <i>Large Eddy Simulation</i> (LES) de perfiles en OpenFOAM para el estudio de la separación del flujo	Estudio sobre Large Eddy Simulation (LES) de perfiles en OpenFOAM para el estudio de la separación del flujo
La Universidad Politécnica de Cataluña, en	Estudio sobre la aerodinámica

España, ha desarrollado un estudio sobre la aerodinámica del flujo alrededor de un AHMED Body mediante OpenFOAM	del flujo alrededor de un AHMED Body mediante OpenFOAM
Usando OpenFOAM se estudió el flujo viscoso alrededor de un cilindro para el departamento de astronomía de la Universidad de Boston, en Estados Unidos	Estudio del flujo viscoso alrededor de un cilindro para el departamento de astronomía de la Universidad de Boston en Estados Unidos
En la Universidad Pública de Navarra, en España, se ha hecho uso de OpenFOAM para el estudio y el diseño de un aerogenerador Savonius	Se realizó un estudio y diseño de un aerogenerador Savonius con OpenFOAM

Tabla 5

Desarrollos realizados en escenarios académicos con el programa HY8

¿Existen desarrollos de objetos virtuales en otros escenarios académicos?	Vínculos de demostración
La Universidad Nacional de Córdoba, en Argentina, ha hecho una cuantificación de caudales excedentes escurridos superficialmente en la región sudeste de provincia de Córdoba usando el software HY8	Cuantificación de caudales excedentes escurridos superficialmente en la región sudeste de la provincia de Córdoba utilizando el programa HY8
La Universidad de Purdue junto al departamento de transporte de Indiana, en Estados Unidos, han hecho una evaluación de los modelos de puente HY8 y HEC-RAS para estructuras de encapsulación de	Assessment of HY-8 and HEC-RAS Bridge Models for Large-Span Water-Encapsulating Structures

agua de gran envergadura

En la Universidad Estatal de Kwara, en Nigeria, se realizó un estudio para evaluar la herramienta de modelado HY8 para el análisis hidráulico de alcantarillas a lo largo de una carretera

[Evaluation of hy-8 modeling tool for hydraulic analysis of selected culverts along ilorin -jebba road, kwara state, nigeria](#)

Tabla 6

Desarrollos realizados en escenarios académicos con el programa H-Canales

¿Existen desarrollos de objetos virtuales en otros escenarios académicos?	Vínculos de demostración
En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, en Perú, han hecho un estudio de un tramo del canal de derivación Choclococha mediante HCanales y HEC-RAS	Análisis académico de un tramo del canal de derivación choclococha a través de excel, hcanales y HEC-RAS

Tabla 7

Desarrollos realizados en escenarios académicos con el programa Flow-3D

¿Existen desarrollos de objetos virtuales en otros escenarios académicos?	Vínculos de demostración
La Universidad de Valparaíso, en Chile, ha aplicado el modelo Flow- 3D para el estudio del movimiento de un buque en el puerto de Valparaíso	Bermúdez Salazar, Dámaaris. Aplicación del modelo Flow-3D para el estudio del movimiento de un buque....pdf (uv.cl)
El departamento de ingeniería costera de la Universidad de Ciencias y Tecnologías	(PDF) Modeling of the Changes in Flow Velocity on Seawalls under

<p>Marinas de Khorramshahr, en Irán, ha hecho un estudio de modelado de los cambios en la velocidad del flujo en malecones bajo diferentes condiciones de uso con Flow-3D</p>	<p>Different Conditions Using FLOW-3D Software (researchgate.net)</p>
<p>La Universidad de Cuenca, en Ecuador, ha analizado el comportamiento del flujo a través de un vertedero y su subsecuente cuenco disipador mediante Flow-3D</p>	<p>https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/23110/1/Tesis.pdf</p>
<p>En la Escuela Politécnica Nacional, en Ecuador, han realizado una modelación numérica del flujo rasante en una rápida escalonada utilizando el programa Flow-3D</p>	<p>Vista de MODELACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO RASANTE EN UNA RÁPIDA ESCALONADA APLICANDO LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD). PROGRAMA FLOW-3D. (epn.edu.ec)</p>

Desde la Tabla 2 hasta la Tabla 7 se resume la información de interés para cada una de estas herramientas. Exceptuando Flow-3D (FLOW-3D® Version 12.0 [Computer software], 2019), todas las herramientas son de acceso libre; para todos los casos los ejecutables de instalación se pueden descargar de la web, hay disponibilidad de documentación técnica, y los requerimientos computacionales para ejecutar las simulaciones son mínimos. Esto es una gran ventaja, ya que permite su utilización en prácticamente cualquier computador.

La revisión de las experiencias previas identificadas permitió asignar un nivel de complejidad de uso de las herramientas: “Bajo” para H-Canales (Rojas, 2013); “Medio” para HEC-RAS (HEC-RAS, 2008), HY8 (U.S. Department of Transportation, 2022) y Flow-3D (FLOW-3D®

Version 12.0 [Computer software], 2019); y “Alto” para OpenFOAM (*OpenFOAM*, 2004). Aunque para todas las herramientas se percibió un potencial de aplicación para el propósito de este trabajo (exceptuando el software comercial Flow-3D (FLOW-3D® Version 12.0 [Computer software], 2019), se identificó que H-Canales (Rojas, 2013) y HEC-RAS (*HEC-RAS*, 2008) tenían el mayor potencial. Para el caso de la primera simulación, donde se buscaba visualizar la distribución de velocidades en el canal, se identificó que OpenFOAM (*OpenFOAM*, 2004), a pesar de su nivel de complejidad, podía ser implementado partiendo de una guía adecuada de descarga, instalación, e implementación de la simulación.

3.2 Diseño de los objetos virtuales

Los objetos virtuales planteados buscan complementar cada una de las nueve prácticas de laboratorio de Hidráulica actuales así:

Tabla 8

Objetos virtuales que complementarán las prácticas del laboratorio

Práctica actual del laboratorio	Simulación propuesta
P1 Medición de Caudales con Molinete	S1 Análisis de la Distribución de la Velocidad en un Canal
P2 Derivación de la Ecuación de Energía Específica	S2 Evaluación de la Energía Específica y el Régimen Crítico en una Sección Trapezoidal
P3 Transición en Flujo Subcrítico	S3 Evaluación de la Transición en Flujo Subcrítico con Ancho Variable
P4 Resalto Hidráulico	S4 El Resalto Hidráulico en un Canal

Rectangular	
P5 Coeficiente de Rugosidad de Manning	S5 El Flujo Uniforme y el Coeficiente de Rugosidad de Manning
P6 Flujo Gradualmente Variado	S6 Evaluación del Flujo Gradualmente Variado Mediante el Cambio de Pendiente
P7 Compuerta de Admisión Inferior	S7 Análisis de una Compuerta de Descarga Libre, Plana y Vertical
P8 Calibración de Vertederos	S8 Caudal y Carga en un Vertedero Rectangular de Pared Delgada
P9 Canaleta Parshall	S9 Diseño de una Canaleta Parshall

Los objetos virtuales planteados se basaron en ejemplos existentes. Estos fueron adaptados para los propósitos de este trabajo, pero en todos los casos se reconoció la fuente original que los soporta. Dado que se usaron tres herramientas computacionales, se desarrollaron las guías de descarga e instalación de cada una de ellas (ver Apéndices A, B, y C).

Cada objeto virtual está detallado en un documento (Guía de la simulación, ver Apéndices D al L) que tiene la siguiente estructura:

- Título
- Fuente del recurso
- Objetivos de la simulación
- Requerimientos computacionales y técnicos para la simulación
- Introducción

- Marco teórico específico
- Implementación de la simulación
- Descripción del entregable
- Referencias bibliográficas

La “Implementación de la Simulación” se compone de dos partes; la primera, presenta el caso o problema a trabajar, y la segunda contiene el procedimiento detallado (paso a paso) de la implementación. Como complemento, se realizaron videos explicativos del proceso para cada simulación, de tal manera que los estudiantes logren desarrollar los ejemplos propuestos y tengan más detalle sobre los comandos y procesos que no se detallan a profundidad en las guías, pero que permiten una mejor interacción dentro del programa. Estos videos están cargados en el canal de YouTube del laboratorio de Hidráulica de la Universidad Industrial de Santander (*Laboratorio Hidráulica UIS - YouTube, 2021*).

La “Descripción del Entregable” plantea, primero, las evidencias que el estudiante debe someter para demostrar que ha desarrollado exitosamente la simulación, y luego propone unas preguntas de análisis que buscan que el estudiante interactúe de forma más independiente con la herramienta para lograr una mayor apropiación de los conocimientos específicos trabajados a la par de fortalecer la competencia de uso de la herramienta aplicada.

3.3 Implementación de las simulaciones computacionales

Se implementaron nueve simulaciones computacionales con estudiantes de los semestres 2022-2 y 2023-1 de Hidráulica. Se presenta a continuación los objetivos y descripción de cada una de ellas.

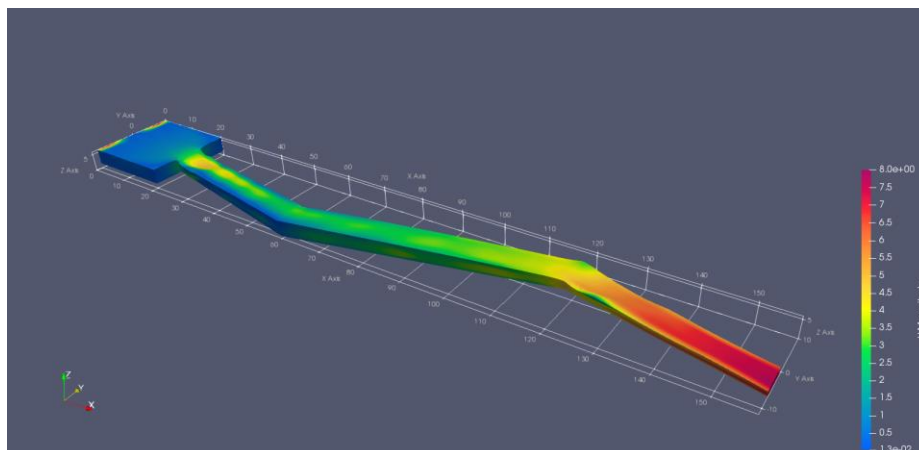
3.3.1 Análisis de la Distribución de la Velocidad en un Canal (Apéndice D)

OpenFOAM (*OpenFOAM*, 2004) permite visualizar la distribución de velocidad en las tres dimensiones. Este es un factor diferenciador importante pues en el laboratorio solo es posible realizar medidas puntuales (ver Figura 1). Los objetivos de esta simulación son:

- Profundizar en los conceptos de la distribución de velocidades de flujo en canales abiertos mediante la implementación de una simulación en la herramienta OpenFOAM (*OpenFOAM*, 2004)
- Analizar las características de la distribución de velocidades mediante la solución de preguntas orientadoras
- Desarrollar habilidades para la utilización de herramientas tecnológicas aplicadas a la ingeniería civil, en particular la herramienta OpenFOAM (*OpenFOAM*, 2004), fortaleciendo el conocimiento teórico-práctico de la mecánica de fluidos

Figura 1

Simulación 1. Análisis de la Distribución de la Velocidad en un Canal



3.3.2 Evaluación de la Energía Específica y el Régimen Crítico en un Canal Prismático (Apéndice E)

H-Canales (Rojas, 2013) permite realizar cálculos del régimen crítico bajo ciertas condiciones hidráulicas establecidas; esto complementa la práctica tradicional del laboratorio, ya que permite dar a conocer al estudiante de antemano los resultados de las variables en régimen crítico en un canal, y a partir de allí, complementar la comprensión de la ecuación de energía específica y la curva de Energía Específica (ver Figura 2). Los objetivos de esta simulación son:

- Comprender los conceptos de energía específica en canales abiertos mediante la implementación de una simulación en la herramienta H-Canales (Rojas, 2013)
- Ejercitar los conceptos adquiridos sobre energía específica mediante el desarrollo de un ejemplo orientador
- Analizar los conceptos de energía específica mediante la solución de preguntas orientadoras
- Fortalecer las capacidades del uso apropiado de herramientas tecnológicas aplicadas a la ingeniería civil, en particular la herramienta H-Canales (Rojas, 2013) fortaleciendo el conocimiento teórico-práctico de la evaluación de la energía específica y el régimen crítico en un canal prismático

Figura 2

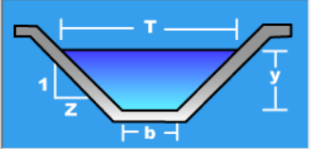
Simulación 2. Evaluación de la energía específica y el régimen crítico en un canal prismático

Cálculo del Tirante Crítico sección Trapezoidal, Rectangular, Triangular

Lugar: Laboratorio de Hidráulica Proyecto: Simulación 2
 Tramo: Primer Tramo Revestimiento: Concreto

Datos:

Caudal (Q): 4 m3/s
 Ancho de solera (b): 1 m
 Talud (Z): 1



Resultados:

Tirante crítico (y):	0.8786	m	Perímetro (p):	3.4851	m
Área hidráulica (A):	1.6506	m ²	Radio hidráulico (R):	0.4736	m
Espejo de agua (T):	2.7572	m	Velocidad (v):	2.4234	m/s
Número de Froude (F):	1.0000		Energía específica (E):	1.1779	m-Kg/Kg

Calcular Limpiar Pantalla Imprimir Menú Principal Calculadora

3.3.3 Evaluación de la Transición en Flujo Subcrítico con Ancho Variable (Apéndice F)

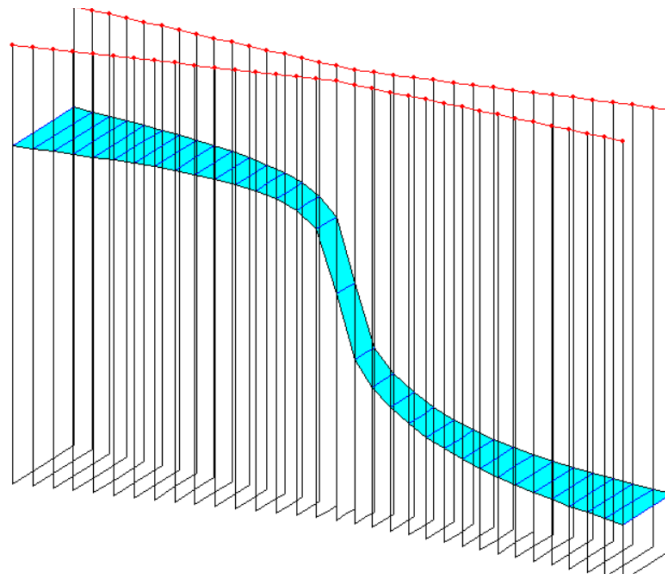
HEC-RAS (HEC-RAS, 2008) permite desarrollar varios ejemplos de las transiciones en flujo subcrítico (como las contracciones, expansiones, ascensos y descensos); esto es un factor diferenciador ya que, en las prácticas del laboratorio, la experiencia se limita a un solo caso (ascenso) (ver Figura 3). Los objetivos de la simulación son:

- Comprender los conceptos de las transiciones en flujo subcrítico en canales abiertos mediante la implementación de una simulación en la herramienta computacional HEC-RAS (HEC-RAS, 2008)
- Ejercitar los conceptos adquiridos sobre las transiciones en flujo subcrítico mediante el desarrollo de un ejemplo orientador
- Analizar los conceptos de las transiciones en flujo subcrítico mediante la solución de preguntas orientadoras

- Fortalecer las capacidades del uso apropiado de herramientas tecnológicas aplicadas a la ingeniería civil, en particular la herramienta HEC-RAS (HEC-RAS, 2008), fortaleciendo los conocimientos teórico-prácticos de las transiciones en flujo subcrítico

Figura 3

Simulación 3. Evaluación de la transición en flujo subcrítico con ancho variable



3.3.4 El Resalto Hidráulico en un Canal Rectangular (Apéndice G)

Con el programa H-Canales (Rojas, 2013) también se pueden desarrollar cálculos para distintas variaciones en el resalto hidráulico; es decir, se pueden variar aspectos como la forma de la sección transversal, la magnitud del caudal y el ancho del canal. Estos aspectos no pueden ser abordados en la práctica tradicional del laboratorio pues está limitada a una sección transversal rectangular, a un valor límite de caudal y a un ancho de canal constante, resultando en un rango reducido de resaltos hidráulicos desarrollables (ver Figura 4). Los objetivos de esta simulación son:

- Comprender los conceptos del resalto hidráulico en canales abiertos mediante la implementación de una simulación en la herramienta computacional H-Canales (Rojas, 2013)
- Ejercitar los conceptos adquiridos sobre el resalto hidráulico mediante el desarrollo de un ejemplo orientador
- Analizar los conceptos del resalto hidráulico mediante la solución de preguntas orientadoras
- Fortalecer las capacidades del uso apropiado de herramientas tecnológicas aplicadas a la ingeniería civil, en particular la herramienta H-Canales (Rojas, 2013), fortaleciendo el conocimiento teórico-práctico del resalto hidráulico

Figura 4

Simulación 4. El resalto hidráulico en un canal rectangular

Cálculo del Resalto Hidráulico Sección Rectangular

Lugar: Proyecto:
Tramo:

Datos:

Caudal (Q): m³/s
Ancho de solera (b): m
Tirante (y): m
tirante supercrítico

Resultados:

Tirante conjugado (y): m Número de Froude conjugado (F):
Altura del resalto: m Longitud del resalto (L): m
Pérdida de energía en el resalto: m

Calcular Limpiar Pantalla Imprimir Menú Principal Calculadora

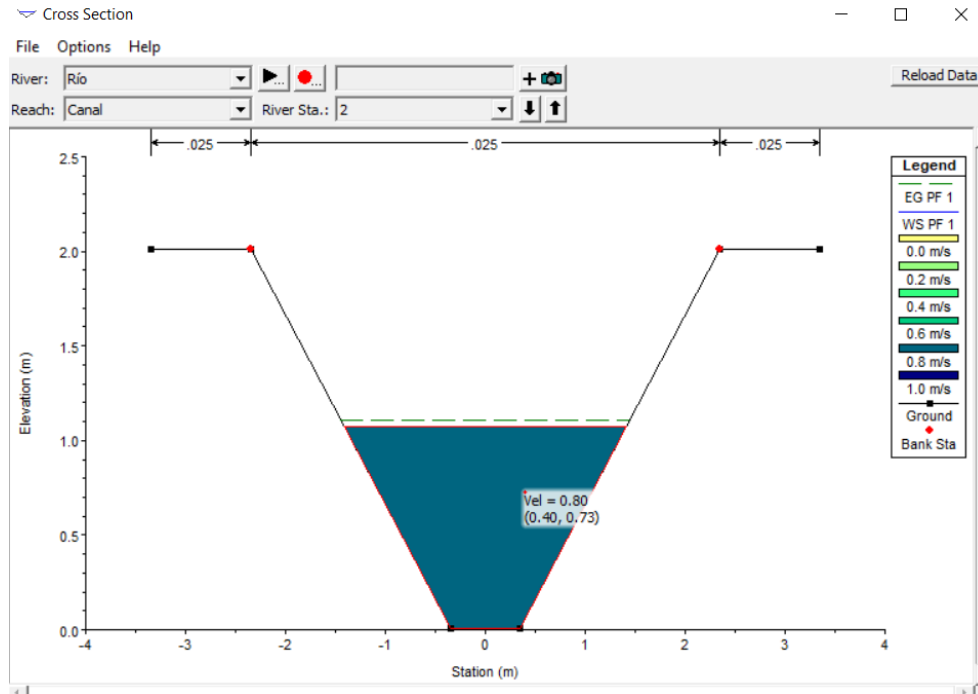
3.3.5 El Flujo Uniforme y el Coeficiente de Rugosidad de Manning (Apéndice H)

La práctica tradicional del laboratorio está limitada a una sección transversal específica, una rugosidad específica, y a una sola pendiente. El programa HEC-RAS (*HEC-RAS*, 2008) permite comprender el efecto de estas variables en la estimación de la velocidad, mediante la variación de la pendiente, la rugosidad y la sección transversal en el canal (ver Figura 5). Los objetivos de esta simulación son:

- Comprender los conceptos del flujo uniforme y los coeficientes de rugosidad en canales abiertos mediante la implementación de una simulación en la herramienta computacional HEC-RAS (*HEC-RAS*, 2008)
- Ejercitar los conceptos adquiridos sobre el flujo uniforme y los coeficientes de rugosidad mediante el desarrollo de un ejemplo orientador
- Analizar los conceptos del flujo uniforme y los coeficientes de rugosidad mediante la solución de preguntas orientadoras
- Fortalecer las capacidades del uso apropiado de herramientas tecnológicas aplicadas a la ingeniería civil, en particular la herramienta HEC-RAS (*HEC-RAS*, 2008), fortaleciendo el conocimiento teórico-práctico del flujo uniforme y los coeficientes de rugosidad de Manning.

Figura 5

Simulación 5. El flujo uniforme y el coeficiente de rugosidad de Manning



3.3.6 Evaluación del Flujo Gradualmente Variado Mediante el Cambio de Pendiente (Apéndice I)

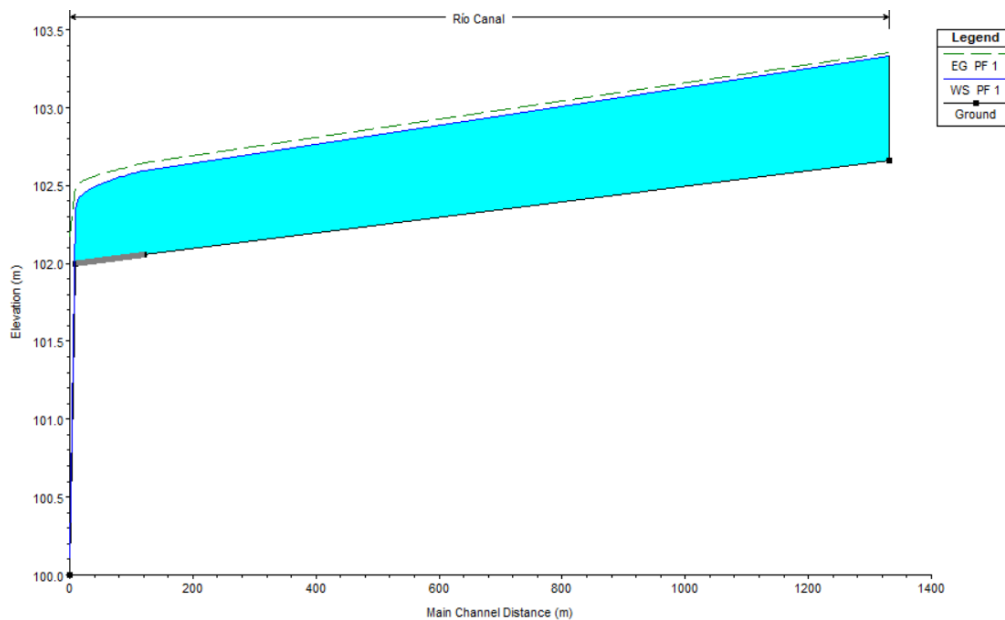
El programa HEC-RAS (HEC-RAS, 2008) a través de sus herramientas para el análisis de flujos mixtos, permite llevar a cabo simulaciones del flujo gradualmente variado en los cuales se pueden variar datos como el caudal, la pendiente del canal y la sección transversal. De esta manera se pueden visualizar más y mejores resultados del comportamiento del flujo a medida que se varían las propiedades físicas e hidráulicas del canal en estudio (ver Figura 6). Los objetivos de esta simulación son:

- Comprender los conceptos del flujo gradualmente variado en canales abiertos mediante la implementación de una simulación en la herramienta computacional HEC-RAS (HEC-RAS, 2008)

- Ejercitar los conceptos adquiridos sobre el flujo gradualmente variado mediante el desarrollo de un ejemplo orientador
- Analizar los conceptos del flujo gradualmente variado mediante la solución de preguntas orientadoras
- Fortalecer las capacidades del uso apropiado de herramientas tecnológicas aplicadas a la ingeniería civil, en particular la herramienta HEC-RAS (HEC-RAS, 2008), fortaleciendo el conocimiento teórico-práctico del flujo gradualmente variado

Figura 6

Simulación 6. Evaluación del flujo gradualmente variado mediante el cambio de pendiente



3.3.7 Análisis de una Compuerta de Descarga Libre, Plana y Vertical (Apéndice J)

El programa H-Canales (Rojas, 2013) se puede utilizar para realizar mediciones de caudal en compuertas de admisión inferior, teniendo en cuenta aspectos como el ancho de la compuerta, la abertura de la compuerta y el coeficiente de contracción (ver Figura 7). Los objetivos de esta simulación son:

- Comprender los conceptos de las compuertas de admisión en canales abiertos mediante la implementación de una simulación en la herramienta computacional H-Canales (Rojas, 2013)
- Ejercitar los conceptos adquiridos sobre las compuertas de admisión mediante el desarrollo de un ejemplo orientador
- Analizar los conceptos de las compuertas de admisión mediante la solución de preguntas orientadoras
- Fortalecer las capacidades del uso apropiado de herramientas tecnológicas aplicadas a la ingeniería civil, en particular la herramienta H-Canales (Rojas, 2013), fortaleciendo el conocimiento teórico-práctico de las compuertas de admisión

Figura 7

Simulación 7. Análisis de una compuerta de descarga libre, plana y vertical

Cálculos en compuertas y orificios

Compuerta
Orificio

Datos de la compuerta:

Ancho de la compuerta (b): m

Tirante aguas arriba (y1): m

Abertura de la compuerta (a): m

Coefficiente de contracción:

Ecuaciones:

$$Q = C_d b a \sqrt{2g y_1} \quad \text{m}^3/\text{s}$$

donde:

$$C_d = \frac{C_c C_v}{\sqrt{1 + \frac{C_c a}{y_1}}}$$

para fines prácticos:

$$C_c = 0.62$$

$$C_v = 0.96 + 0.079 \frac{a}{y_1}$$

b = ancho compuerta, m
a = abertura compuerta, m
y1 = tirante aguas arriba compuerta, m
Cd = coeficiente descarga
Cc = coeficiente contracción
Cv = coeficiente velocidad

Elementos de una compuerta

$y_2 = C_c \times a$

$L = \frac{a}{C_c}$

Resultados:

Coefficiente de velocidad (Cv):

Coefficiente de descarga (Cd):

Caudal (Q): m3/s

l/seg

Calcular

Limpiar Pantalla

Imprimir

Menú Principal

Calculadora

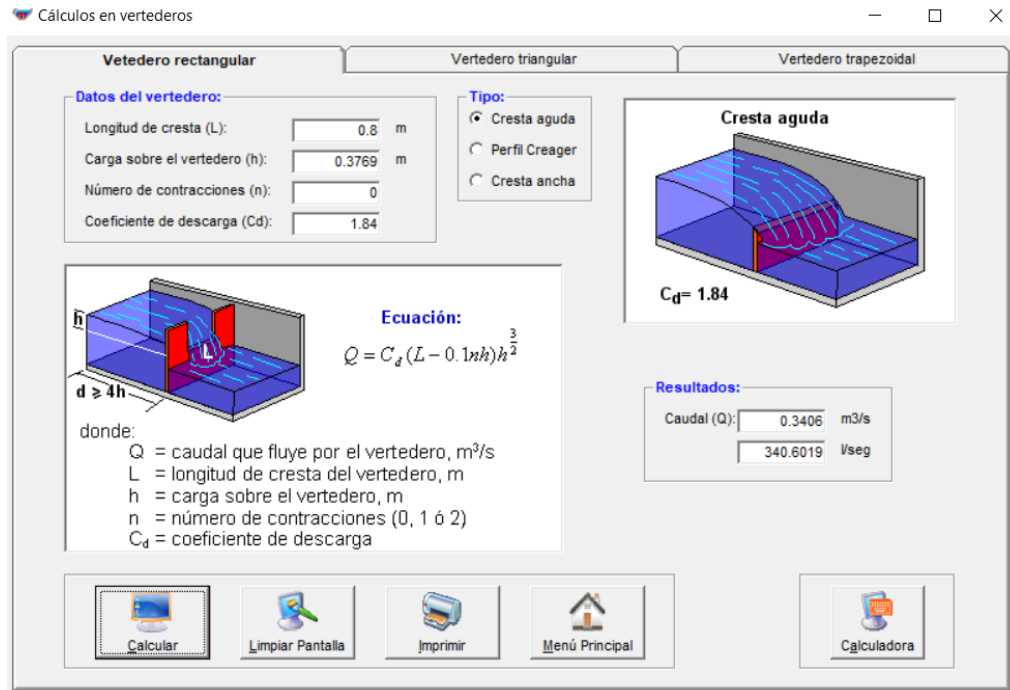
3.3.8 Caudal y Carga en un Vertedero Rectangular de Pared Delgada (Apéndice K)

El programa H-Canales (Rojas, 2013) puede ser usado para estimar el caudal en distintas configuraciones de vertederos. Estas configuraciones pueden ir desde vertederos rectangulares, triangulares, trapezoidales; distintos tipos de vertederos como el de cresta aguda, perfil Creager, de cresta ancha; y hasta tener en cuenta aspectos como el número de contracciones presentes en el vertedero. Además de esto también se pueden realizar análisis del flujo con para distintos valores de caudal en el vertedero. Estos son factores diferenciadores, ya que solo se pueden realizar mediciones para un vertedero tipo *Spillway* en el laboratorio y, debido a la limitación del de caudal circulante, no se puede realizar una gran variación en los caudales del laboratorio, resultando en una pobre variabilidad en los resultados a analizar (Ver Figura 8). Los objetivos de esta simulación son:

- Comprender los conceptos relacionados con los vertederos rectangulares de pared delgada en canales abiertos mediante la implementación de una simulación en la herramienta computacional H-Canales (Rojas, 2013)
- Ejercitar los conceptos adquiridos sobre los vertederos rectangulares de pared delgada mediante el desarrollo de un ejemplo orientador
- Analizar los conceptos de los vertederos rectangulares de pared delgada mediante la solución de preguntas orientadoras
- Fortalecer las capacidades del uso apropiado de herramientas tecnológicas aplicadas a la ingeniería civil, en particular la herramienta H-Canales (Rojas, 2013), fortaleciendo el conocimiento teórico-práctico de los vertederos rectangulares de pared delgada

Figura 8

Simulación 8. Caudal y carga en un vertedero rectangular de pared delgada



3.3.9 Diseño de Una Canaleta Parshall (Apéndice L)

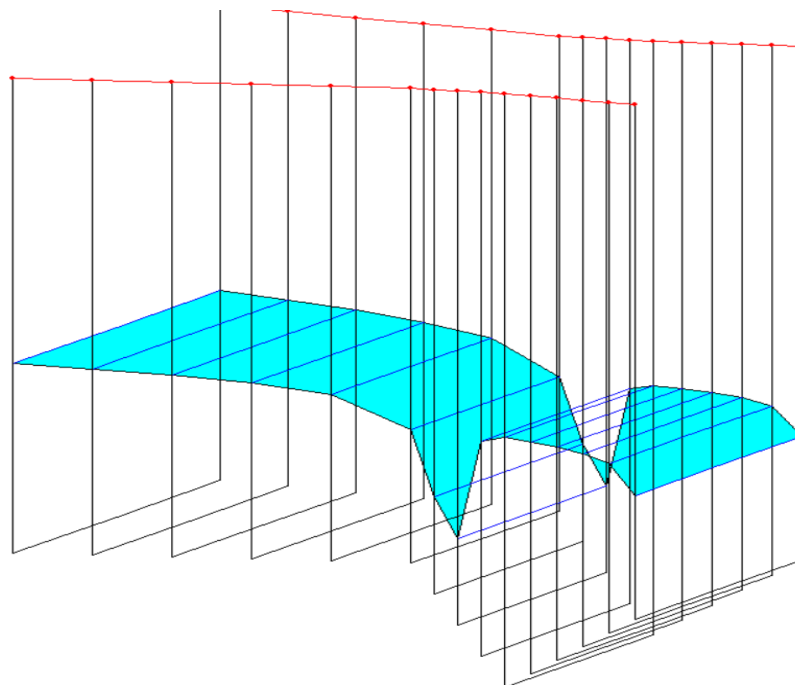
La versatilidad del programa HEC-RAS (HEC-RAS, 2008) permite al usuario correr casi cualquier simulación hidráulica en canales abiertos. Para el caso de la canaleta Parshall, se pueden implementar las diferentes geometrías y rugosidades, permitiendo la modelación de estructuras reales (ver Figura 9). Los objetivos de esta simulación son:

- Comprender los conceptos de las canaletas Parshall en canales abiertos mediante la implementación de una simulación en la herramienta computacional HEC-RAS (HEC-RAS, 2008)
- Ejercitar los conceptos adquiridos sobre las canaletas Parshall mediante el desarrollo de un ejemplo orientador

- Analizar los conceptos de las canaletas Parshall mediante la solución de preguntas orientadoras
- Fortalecer las capacidades del uso apropiado de herramientas tecnológicas aplicadas a la ingeniería civil, en particular la herramienta HEC-RAS (HEC-RAS, 2008), fortaleciendo el conocimiento teórico-práctico de las canaletas Parshall

Figura 9

Simulación 9. Diseño de una canaleta Parshall



3.3.10 Implementación de las simulaciones en el curso de laboratorio de hidráulica

Cada una de las simulaciones y manuales de descarga e instalación fueron integrados al aula virtual de aprendizaje (AVA) del laboratorio de Hidráulica en la temática correspondiente (ver Figura 10).

Figura 10

Integración de las simulaciones dentro del AVA del laboratorio de Hidráulica

Universidad Industrial de Santander
 AVA VIRTUAL DE APRENDIZAJE

Práctica 1 - Aforos

INTRODUCCIÓN

Existen diferentes equipos y técnicas que se usan para la medición del caudal. La selección del equipo y técnica depende de las necesidades propias del estudio y de la disponibilidad de recursos.

El molinete es un instrumento esencial que permite la medición del caudal en canales o ríos pequeños a través del método de área-velocidad. En principio, este equipo, es un conrotor y tiene una varita que tiene en un extremo una hélice y en el otro se encuentran conectados los cables terminales del dispositivo contador de revoluciones. El número de revoluciones de la hélice en un periodo de tiempo determinado se transforma, por medio de una ecuación de calibración, en un valor de velocidad.

Dado que las tecnologías han ido evolucionando, tenga en cuenta que la medición de velocidad en esta práctica se llevará a cabo con un medidor de flujo electromagnético marca H&C. Aunque la tecnología es diferente, el propósito del equipo es el mismo: medir la velocidad del flujo en diferentes puntos de la sección para así implementar el método área-velocidad para el cálculo del caudal.

OBJETIVOS

1. Determinar el caudal en el canal mediante el uso del método área-velocidad, utilizando el medidor electromagnético, y comparar el valor obtenido con el reportado por el medidor de flujo ubicado a la entrada del canal.
2. Conocer las partes y el funcionamiento del medidor de velocidad electromagnético.
3. Identificar posibles fuentes de error en el desarrollo de la práctica de laboratorio.

RECURSOS

Práctica 1 - Aforos por molinete

Aforo por MOLINETE

Mirar en [YouTube](#)

P1_Aforo por molinete hacer 28/10/2022 14:45

Hola! Este es el documento guía para el desarrollo de la práctica de laboratorio. Descárgalo y úsalo para prepararte para el desarrollo de la práctica y los análisis de datos.

P1_Aforo por molinete hacer 28/10/2022 14:50

[No mostrado a los estudiantes](#)

Este documento editable contiene la versión más actualizada de la guía para el desarrollo de la práctica de laboratorio. Este material es para uso de los instructores. Su modificación debe ser concertada con el equipo de trabajo del semestre.

P1_Cálculo hacer 28/10/2022 14:51

[No mostrado a los estudiantes](#)

Este hoja de cálculo contiene la versión más actualizada de los cálculos requeridos para el análisis de datos de la práctica. Este material es para uso de los instructores.

SIMULACIONES

V9 Instalación OpenFOAM

LABORATORIO HIDRÁULICA

Guía 3: Descarga e instalación de OpenFOAM

Mirar en [YouTube](#)

S1 - Guía de descarga e instalación OpenFOAM

S1 - Guía de descarga e instalación OpenFOAM

[No mostrado a los estudiantes](#)

P4 Distribución de Velocidades

LABORATORIO HIDRÁULICA

Práctica 1: Distribución de velocidades

Mirar en [YouTube](#)

S1 - Guía de la Simulación - Distribución de Velocidades

S1 - Guía de la Simulación - Distribución de Velocidades

[No mostrado a los estudiantes](#)

EVALUACIÓN

Simulación 1 - Distribución de velocidad - Grupo D1-C2-C3

Entregado No disponible hasta que concluya de:

- se pertenece al grupo 2023-1-24104-D1-Presencial - Sábado 6-8 am
- se pertenece al grupo 2023-1-24104-D2-Presencial - Sábado 8-10 am
- se pertenece al grupo 2023-1-24104-D3-Presencial - Sábado 10-12

Simulación 1 - Distribución de velocidad - Grupo F1-F2-F3

Entregado No disponible hasta que concluya de:

- se pertenece al grupo 2023-1-24104-F1-Presencial - Jueves 6-8 am
- se pertenece al grupo 2023-1-24104-F2-Presencial - Lunes 4-6 pm
- se pertenece al grupo 2023-1-24104-F3-Presencial - Lunes 12-2 pm

Simulación 1 - Distribución de velocidad - Grupo L2

Entregado No disponible hasta que se pertenece al grupo 2023-1-24104-L3-Presencial - Jueves 12-2 pm

P1 - Quiz Grupo D1

[No mostrado a los estudiantes](#)

3.3.11 Encuestas de percepción realizadas a los estudiantes durante el semestre 2022-2 y 2023-1

Los estudiantes del semestre 2022-2 expresaron conformidad sobre la guía de instalación de software HEC-RAS (HEC-RAS, 2008) en términos de la estructuración del documento y comprensión de las instrucciones. Sin embargo, se tuvo en cuenta los aportes específicos para el mejoramiento del documento (ver Figura 11). Con respecto a las simulaciones 4 y 6, hubo una percepción positiva de los estudiantes y, en este caso también se tuvo en cuenta los aportes específicos que ayudaron a mejorar la instrucción, asegurando que todos pudieran completar la experiencia sin dificultades (ver Figura 12).

Figura 11

Extracto de la encuesta de percepción sobre la guía de instalación de HEC-RAS (Semestre 2022-2)

En cuanto a la guía de instalación del programa **HEC-RAS**, ¿qué aspectos cree que se podrían mejorar?.

28 respuestas

- Indicar el idioma en que el el computador debe estar para no complicar los decimales y puntos
- Ninguno, fue muy explícito cada paso presente en la guía, dando un correcto asesoramiento en la instalación del programa. Se mantuvo el orden adecuado para facilitar el proceso
- Especificar para que sirve cada cosa
- Ninguna, me pareció organizado y claro
- No, todo estuvo muy bien
- Ser más específico en algunos pasos
- Mucho espacio entre ecuaciones, lo que genera ruido visual
- La guía de instalación es clara y concisa
- Estuvo bien explicada

Figura 12

Extracto de la encuesta de percepción sobre la guía de simulación de la práctica No. 6 (Semestre 2022-2)

En cuanto a la guía de la práctica N°6 del laboratorio, ¿qué aspectos piensa que se podrían mejorar?.

29 respuestas

Me parece que esta clara, aunque en unas partes debería explicarse como se realiza el paso a paso para mostrar todos los resultados, ya que si se tiene una diferente configuración de Hec Ras, podrá mostrar cosas diferentes

Que las preguntas sean más de tipo análisis sobre los resultados obtenidos

El instructivo me parece que estaba muy claro

Tal vez explicar un poco los resultados y el alcance de las respuestas que puede dar el programa

La guía se entendió bien, no tengo aspectos a mejorar

No siento que hayan aspectos por mejorar

Se podría mejorar el orden cuando menciona el tema de interpolación de las secciones transversales, ya que antes de explicar este paso muestra la figura del modelo 3D donde ya se había aplicado la interpolación, fue confuso el obtener la figura en 3D similar a la guía. En cuanto a los demás pasos y el contenido, fue muy claro y explícito, suficiente para entender el laboratorio en cuestión

De los 42 estudiantes que respondieron la encuesta de percepción para la implementación de la simulación 1 del semestre 2023-1, el 45% considera que la guía está bien estructurada y es amigable con el usuario; el 74% considera que el documento guía es adecuado en cuestiones de gramática y ortografía y el 67% respondió que el marco teórico es suficiente y de buena calidad. La encuesta realizada a los estudiantes ayudó a evidenciar si los estudiantes estaban comprendiendo el material que se les estaba entregando, y también evidenciar las falencias que podría presentar el material entregado al alumnado (ver Figura 13).


Figura 13

Extracto de la encuesta de percepción sobre la guía de simulación de la práctica No. 1

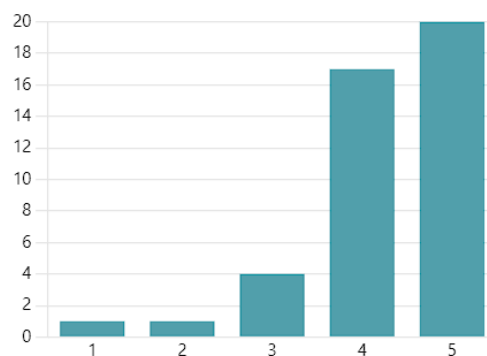
(Semestre 2023-1)

Pregunta 1: En una escala del uno (1) al cinco (5), donde 1 es la menor valoración y 5 la mayor valoración; en cuánto calificaría la experiencia visual de la **Práctica N°1** del laboratorio de hidráulica (es decir, si la guía es amigable con el usuario y si se encuentra bien estructurada)

[Más detalles](#)

 Información

4.26
Clasificación promedio



3.3.12 Encuesta realizada a los auxiliares durante el semestre 2023-1

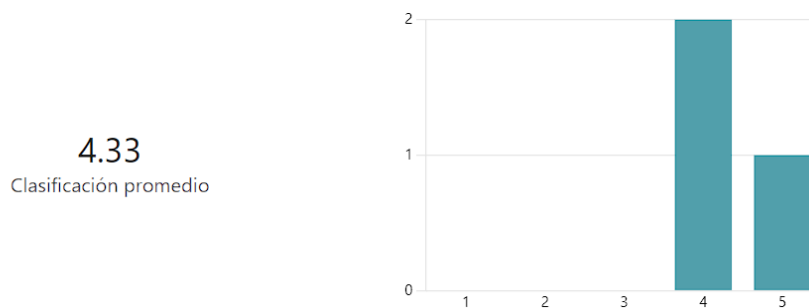
Se realizó una encuesta a los auxiliares del laboratorio de hidráulica durante el semestre 2023-1, donde se les preguntó por el contenido del material para la primera y segunda simulación aplicadas durante ese semestre, y se encontraron comentarios como que el proceso del desarrollo de las guías fue provechoso para ellos en su calidad de auxiliares, ya que les permitió interactuar con un material práctico, fácil de usar y que les permitió aprenderlo rápido para ser impartido a los estudiantes en el laboratorio de hidráulica. El proceso de realizar una encuesta a los auxiliares fue positiva, ya que permitió percibir desde el punto de vista de los auxiliares que califican los entregables de los estudiantes, la calidad del material, y si este era suficiente para que los estudiantes comprendieran los conocimientos asociados a cada una de las prácticas del laboratorio de hidráulica (ver Figura 14).

Figura 14

Extracto de la encuesta realizada a los auxiliares acerca de la primera y segunda simulación, aplicadas durante el semestre 2023-1

Pregunta 2: En una escala del uno (1) al cinco (5), donde 1 es la menor valoración y 5 la mayor valoración; en cuánto calificaría el marco teórico presentado (es decir, si el marco teórico presentado tiene la calidad y cantidad necesaria para llevar a cabo la práctica)

[Más detalles](#)



4. Conclusiones y Recomendaciones

De la evaluación de programas computacionales se concluyó que existe un gran potencial de aplicación de programas computacionales en las prácticas del laboratorio de hidráulica, de tal manera que ayudan al estudiante en el momento que requiera poner en práctica los conocimientos adquiridos. En cuanto al diseño de los objetos virtuales, se diseñaron simulaciones que lograron ir de la mano con las prácticas actuales del laboratorio, complementando entre ellas y los aspectos teóricos vistos en el aula de clase, los conocimientos necesarios en el estudiante, de tal manera que aborde desde diferentes perspectivas la comprensión de los conceptos adquiridos.

Se desarrollaron guías de descarga e instalación de los programas computacionales, guías prácticas de las simulaciones y videos orientativos, que ayudarán al desarrollo del componente práctico del laboratorio de hidráulica en la Universidad Industrial de Santander, desde el aula virtual de aprendizaje (AVA), y los videos desarrollados también se encuentran cargados en el canal de YouTube del laboratorio. Esto posibilita la edición y actualización del material si se considera necesario.

La consulta de percepción de las simulaciones a auxiliares y estudiantes, y la interacción con los directores, permitió mejorar el material en términos de redacción y síntesis de los documentos. Esto permitió una evolución natural de mejora en el desarrollo del nuevo material. La validación del material desarrollado por parte de los auxiliares del laboratorio fue clave para asegurar la calidad de los objetos virtuales producidos.

Finalmente, se recomienda a los futuros auxiliares del laboratorio de hidráulica preservar el material (presentado desde el Apéndice A hasta el Apéndice L), ya que serán los estarán principalmente expuestos al manejo de este material. También se deja abierta la posibilidad del mejoramiento del material, con la dirección de los profesores del área, de tal manera que se evolucione en el campo de las simulaciones computacionales para el laboratorio de Hidráulica, y se pueda adaptar todo este material según lo requiera la escuela de ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander.

Referencias Bibliográficas

- Burian, S., Kalyanapu, A., Houdeshel, D., Judi, D., & Pomeroy, C. (2009). *A Web Based Virtual Laboratory For Water Resources Engineering Education*. 14.146.1-14.146.11.
<https://peer.asee.org/a-web-based-virtual-laboratory-for-water-resources-engineering-education>
- FLOW-3D® Version 12.0 [Computer software]. (2019). *Flow Science Latin America | FLOW-3D Products | CFD Software*. Flow Science Latin America. <https://flow3d.co/>
- HEC-RAS. (2008, marzo). <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
- Laboratorio Hidráulica UIS - YouTube. (2021, noviembre 22). <https://www.youtube.com/>
- Laiton Suárez, B. D. (2022). *Práctica en docencia para mejorar la estrategia de laboratorio del curso de Hidráulica de la Escuela de Ingeniería Civil*.
<https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/10092>
- Máximo Villón Béjar. (2014). *Hec-Ras Ejemplos*. <https://uis-odilok-es.bibliotecavirtual.uis.edu.co/>.
<https://pdf7bbdb6cf9cdf96cf77150b9f68e8225.odilo.us/#/297a63f3d0ea4f45a0ecc477b8204095/5f022cb20ebda08e093fab8c80c3f2db97122ec83351de2d1e28270f97529a7c>
- Mirauda, D., Capece, N., & Erra, U. (2019). StreamflowVL: A Virtual Fieldwork Laboratory that Supports Traditional Hydraulics Engineering Learning. *Applied Sciences*, 9(22), Article 22. <https://doi.org/10.3390/app9224972>
- OpenFOAM. (2004). <https://www.openfoam.com/>
- Rojas, P. (2013, julio 25). Descargar Hcanales v3. *Ingeciv*. <https://ingeciv.com/descargar-hcanales-v3/>

- U.S. Department of Transportation. (2022, agosto 12). *Culvert Hydraulics—Hydraulics—Bridges & Structures—Federal Highway Administration*.
<https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/software/hy8/>
- US EPA, O. (2014, mayo 21). *Storm Water Management Model (SWMM)* [Data and Tools].
<https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- Vallejo, S. L.-A., Rodríguez, J. C.-A., & Duque, P. A.-A. (2014). *Prácticas pedagógicas y su relación con el desempeño académico*.
https://core.ac.uk/display/35215848?utm_source=pdf&utm_medium=banner&utm_campaign=pdf-decoration-v1
- Villón, B. (1995). *Hidráulica de canales*. <https://uis-odilotk-es.bibliotecavirtual.uis.edu.co/>.
<https://pdfb9c6919cf9985b759bfeca2ebb3e1fa1.odilo.us/#/e81c25ea3bb04acc86cfe4f557ac2fae/18955710ff93c4e1ea3445e0c6c773fc3fa6b9587e23c2b8572103ae049747ae>
- Waldrop, M. M. (2013). *Confronted with the explosive popularity of online learning, researchers are seeking new ways to teach the practical skills of science*.