

**Diseño de un Simulador de Flujos de Ríos Como Implemento de Laboratorio Para
la Universidad Santo Tomás – Sede Villavicencio**



Anny Michelle Ortiz Aguiar
Diana Carolina Pérez Romero

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Civil
Villavicencio

Mayo
2018

**Diseño de un Simulador de Flujos de Río Como Implemento de Laboratorio Para
la Universidad Santo Tomás – Sede Villavicencio**

Anny Michelle Ortiz Aguiar

Diana Carolina Pérez Romero

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de **Ingeniero Civil**

Director

Esp. Iván Darío Acosta Sabogal

Especialista en Recursos Hídricos

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ingeniería Civil

Villavicencio

Mayo

2018

AUTORIDADES ACADÉMICAS

P. FRAY JUAN UBALDO LÓPEZ SALAMANCA, O.P.

Rector General

P. FRAY MAURICIO ANTONIO CORTES GALLEGO, O.P.

Vicerrector Académico General

P. FRAY JOSE ARTURO RESTREPO RESTREPO, O.P.

Rector Sede Villavicencio

P. FRAY FERNANDO CAJICA GAMBOA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

Ph.D. JHON JAIRO GIL PELÁEZ

Decano Facultad de ingeniería civil

NOTA DE ACEPTACIÓN

JHON JAIRO GIL PELÁEZ

Decano de Facultad

IVÁN DARÍO ACOSTA SABOGAL

Director Trabajo de Grado

PAULA ANDREA SUÁREZ ALVARADO

jurado

JAIRO ALONSO ZORRO ROA

jurado

DEDICATORIA

Dedicamos esta tesis a Dios y a Santo Tomás de Aquino, patrono de los estudiantes, quienes inspiraron nuestro espíritu para la conclusión de esta tesis. A nuestros padres quienes nos dieron vida, educación, apoyo y consejos todo el tiempo. A nuestros amigos quienes de una u otra forma contribuyeron al desarrollo de esta tesis. A todos ellos agradecemos desde el fondo de nuestra alma. Para todos ellos hacemos esta dedicatoria.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar en estas líneas nuestro más profundo y sincero agradecimiento a nuestros padres quienes a lo largo de toda nuestra trayectoria nos han apoyado y motivado en nuestra formación académica, creyendo en nosotras en todo momento y no dudaron de nuestras habilidades.

A nuestros docentes de la Facultad de ingeniería Civil, a quienes les debemos gran parte de nuestros conocimientos, gracias por su paciencia y enseñanza; en especial al decano, ingeniero Jhon Jairo Gil, y tutor de tesis, ingeniero Iván Darío Acosta Sabogal, quienes sin su ayuda nunca hubiera podido hacer esta tesis.

A esta prestigiosa universidad por su formación inspirada en el pensamiento humanista cristiano de Santo Tomás de Aquino, instruyéndonos como profesionales íntegros capaces de responder de manera ética, creativa y crítica a las exigencias de la vida humana, con condiciones de aportar soluciones a la problemática y necesidades de la sociedad y del país. A todos ellos, muchas gracias.

RESUMEN

En la actualidad, la Universidad Santo Tomás, cuenta con espacios para laboratorios, en que los estudiantes podrán desarrollar sus habilidades mediante la relación teórico-práctica en los procesos de formación y aprendizaje de la educación superior.

Este proyecto de grado busca mejorar y aportar a las experiencias prácticas de los estudiantes de ingeniería civil, en el área de hidráulica, con la construcción de un equipo que permita simular el comportamiento de un flujo de río, teniendo en cuenta características particulares para efectuar trabajos esenciales en el área de hidráulica fluvial, hidrología, canales abiertos, entre otras.

La elaboración del instrumento está fundamentada en los estudios realizados en hidráulica, mecánica de suelos y sistemas estructurales.

La totalidad de las teorías expuestas hacen parte integral de las fases de estructuración del proyecto, investigación, construcción y puesta en funcionamiento del instrumento de laboratorio.

Durante la elaboración del mismo, se llevaron a cabo múltiples pruebas de ensayo con diferentes variaciones de caudal producto de velocidades de bombeo, pureza de los materiales utilizados y diferentes pendientes.

Como resultado de los estudios desarrollados, si bien se encontraron algunas dificultades para armonizar la potencia de bombeo en el muestreo seleccionado debido a problemas encontrados en la bomba y el potenciómetro que al final fueron superadas, se pudo constatar que efectivamente es mucho más económico la construcción del instrumento que la compra del mismo, donde la funcionalidad y utilidad será fundamental para las investigaciones y aprendizaje de toda la comunidad educativa tomasina.

Palabras Clave: *hidráulica, laboratorio, mecánica, fluidos, granulometría, canales*

ABSTRACT

Currently, the laboratory equipment of the University are basic, it has repercussion in the building of an elementary knowledge and a null ability to fathom in more complicated topics in order to pursue the good of the educative community.

The purpose of the following degree work is precisely to partially replace this issue by designing, developing and delivering an innovative laboratory instrument such as the river flow simulator.

That instrument has particularly characteristics to effectuate essential practices in the fluvial hydraulics area, hydrology, and open channels, among others, which will have a vital importance for the learning of the engineering students in the hydraulics field.

The making of the instrument is grounded in the hydraulics studies, soil mechanics and structural systems.

The totality of the exposed theories take an integral part of the structuration phases of the project, investigation, building and start-up of the laboratory instrument.

During the build-up of the instrument, multiple essay tests were done with different variations of discharge as a result of pumping variations, purity of the materials used and different slopes.

As a result of the studies developed, although some difficulties were found to harmonize the pumping power with the selected sample due to issues found in the pump and the potentiometer that were finally overcome. It was possible to prove that is cheaper to build the instrument than buying it, and it works perfectly and its utility will be fundamental to the investigation and learning of the whole educational community of the Santo Tomás University.

Key Word- *Hydraulics, laboratory, mechanics, fluids, granulometry, channels.*

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
TABLA DE CONTENIDO	9
1. INTRODUCCIÓN	16
1.1 Motivación y formulación del problema	16
1.2 Finalidad	17
1.2.1. Objetivo General	17
1.2.2. Objetivo Específicos	17
1.3 Aportes del trabajo	18
1.4 Organización del documento	18
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y CIENTÍFICA	19
2.1. Marco teórico	19
2.1.1. Mecánica de los suelos	19
2.1.1.1. <i>Procedimiento ensayo de análisis granulométrico</i>	19
2.1.2. Estructuras aporticadas	23
2.1.3. Hidráulica de canales abiertos.	24
2.1.4. HEC-RAS	26
2.2. Marco legal	28
2.3. Estado del arte	28
2.4. Conclusión del capítulo	29
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	31
3.1. Criterios de diseño	31
3.2. Descripción de etapas y tareas	38
3.2.1. Fase conceptual	38
3.2.2. Fase de planeación y diseño:	39
3.2.3. Fase empírica	53
3.2.3.1. <i>Cambio de equipo de bombeo e inclusión de instrumento de medición.</i>	60
3.2.4. Fase analítica y fase de difusión	65

3.3.	Descripción de los productos finales	72
3.3.1.	Proceso constructivo	72
3.4.	Conclusión del capítulo	83
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	85
4.1.	Análisis comparativo de la simulación en el instrumento de laboratorio y modelación en HEC-RAS.	89
4.1.1.	Modelación HEC-RAS	98
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	106
5.1.	Conclusiones	106
5.2.	Trabajos futuros	107
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
	ANEXOS	111

LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1. Características bomba de drenaje.....	33
Tabla 3-2. Medidas tanque de suministro hídrico.	34
Tabla 3-3. Medidas del tanque de arena.	36
Tabla 3-4. Convenciones ubicación de las minas.	40
Tabla 3-5. Medidas lámina de acero.....	42
Tabla 3-6. Medidas finales del tanque de arena.	43
Tabla 3-7. Detalles de los elementos estructurales.....	44
Tabla 3-8. Evalúo de cargas.....	44
Tabla 3-9. Evalúo de cargas.....	45
Tabla 3-10. Combinaciones de carga.....	45
Tabla 3-11. Diagramas de momentos y cortantes.....	47
Tabla 3-12. Características de la bomba.....	61
Tabla 3-13. Accesorios sistema de bombeo.	62
Tabla 3-14. Especificaciones técnicas del caudalímetro.	66
Tabla 3-15. Ensayos caudalímetro.....	67
Tabla 3-16. Resultados obtenidos.....	70
Tabla 3-17. Resultados obtenidos.....	72
Tabla 4-1. Resultados obtenidos.....	85
Tabla 4-2. Velocidades observadas	93
Tabla 4-3. Secciones transversales	97
Tabla 4-4. Cálculo del criterio de exactitud.....	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Ejemplo de grafica granulométrica. Fuente:.....	22
Figura 2-2. Ejemplo de un canal natural irregular.....	24
Figura 3-1. Lecho rugoso.	33
Figura 3-2. Material pétreo.	39
Figura 3-3. Ubicación Minas.....	40
Figura 3-4. Proceso de tamizaje.	41
Figura 3-5. Curva granulométrica.	42
Figura 3-6. Comprobación de la estructura.	46
Figura 3-7. Designación de los elementos estructurales.	47
Figura 3-8. Proceso completo tamizaje.	53
Figura 3-9. Mediciones previas.	54
Figura 3-10. Instalación para la disposición final del agua.	55
Figura 3-11. Material para reparar.	55
Figura 3-12. Instalación vertedero rectangular.	56
Figura 3-13. Potenciómetro acoplado al sistema de bombeo.	57
Figura 3-14. Ensayos de la bomba de agua.	57
Figura 3-15. Prueba del vertedero rectangular.	58
Figura 3-16. Aplicación de silicona.	59
Figura 3-17. Potenciómetro modificado.	60
Figura 3-18. Curva de rendimiento bomba Modelo AP-4.....	62
Figura 3-19. Presurizador y electrobomba.	63
Figura 3-20. Ensayo del sistema de bombeo.	64
Figura 3-21. Válvula de bola de bronce y sistema de purga.	65
Figura 3-22. Caudalímetro o rotámetro.	66
Figura 3-23. Ensayo caudalímetro.	67
Figura 3-24. Limpieza del material granular.	69
Figura 3-25. Probeta aforada.	69
Figura 3-26. Ensayo de densidades.	70
Figura 3-27. Densidad en húmedo.	71

Figura 3-28 Lámina de acero cortada y doblada.	73
Figura 3-29 Verificación de medida del espesor de la lámina de acero inoxidable.	73
Figura 3-30 Verificación de medida de pestaña del tanque de arena.	74
Figura 3-31 Verificación de medida del alto del tanque de arena.	74
Figura 3-32 Verificación de medida del largo del tanque de arena.	75
Figura 3-33 Verificación de medida del ancho del tanque de arena.	75
Figura 3-34 Puliendo aristas del tanque de arena.	76
Figura 3-35 Juntando las uniones o esquinas del tanque de arena.	76
Figura 3-36 Soldadura del tanque de arena.	77
Figura 3-37 Cortes tanque de arena.	77
Figura 3-38 Armadura de estructura de soporte.	78
Figura 3-39 Soldadura de estructura de soporte.	78
Figura 3-40 Soldadura de láminas de estructura de soporte.	79
Figura 3-41 Aplicación fosfatizante concentrado y desengrasante.	79
Figura 3-42 Proceso de pintura.	80
Figura 3-43 Proceso de pintura.	80
Figura 3-44 Tubos internos.	81
Figura 3-45 Vista frontal.	81
Figura 3-46 Vista lateral.	82
Figura 3-47 Construcción de estructura de soporte de tanque de agua.	82
Figura 3-48 Tubos para rigidización.	83
Figura 3-49. Áreas ingenieriles aplicadas.....	84
Figura 4-1. Sección transversal del canal.	86
Figura 4-2. Regleta para visualizar inclinación.	87
Figura 4-3. Modelación en ejecución.	88
Figura 4-4. Adecuación del lecho rugoso.	90
Figura 4-5. Tanque de almacenamiento de agua.	90
Figura 4-6. Creación de la sección del cuerpo hídrico.	91
Figura 4-7. Verificación de la pendiente.	91
Figura 4-8. Caudal de entrada	92
Figura 4-9. Transporte de sedimentos.	92

Figura 4-10. Cauce en evaluación.	94
Figura 4-11. Cambio en la batimetría.	95
Figura 4-12. Vaguada del cuerpo hídrico.	95
Figura 4-13. Puntos para levantamiento topográfico.	96
Figura 4-14. Secciones transversales AutoCAD.	96
Figura 4-15. Cambio de condiciones iniciales.	98
Figura 4-16. Curvas de nivel del canal.	99
Figura 4-17. Secciones transversales modelo HEC-RAS.	102
Figura 4-18. Perfil longitudinal.	102
Figura 4-19. Comparación visual del modelo (escalado vertical) y simulación.	103
Figura 4-20. Resultado de velocidades HEC-RAS.	104

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Planos de diseño del simulador de flujos de ríos	111
Anexo B. Manual de instrucciones del simulador de flujos de ríos	111
Anexo C. Guía de laboratorio de efectos del cambio de flujo en la morfología del canal	111
Anexo D. Cotización del equipo de laboratorio	111
Anexo E. Presupuesto del instrumento de laboratorio: simulador de flujos de ríos.....	111

1. INTRODUCCIÓN

El simulador de flujos de ríos es un instrumento de laboratorio aplicado en la Ingeniería Civil, más exactamente en el área de hidráulica. Con el que se pueden realizar diferentes prácticas orientadas al conocimiento del comportamiento dinámico de un fluido en un canal abierto. Este es un instrumento que muy pocas instituciones en el país cuentan con él, una de estas es la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito que posee el instrumento para alquilar a entidades o instituciones que lo soliciten.

La creación del simulador de flujos de ríos está determinada por tres etapas que se encuentran hiladas con los objetivos de este proyecto: recolección de información y revisión bibliográfica, creación del instrumento, y, validación de datos y creación de documentos instructivos.

Después de crear este instrumento y validar sus datos, será donado a la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio, para que la facultad de Ingeniería Civil en el espacio del laboratorio de hidráulica haga uso de él. Por tanto, la institución contará con un instrumento de complejidad media-alta que incentiva a la investigación en niveles de educación superior de alta calidad.

1.1 Motivación y formulación del problema

La facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio, ofrece sus servicios desde el primer semestre del año 2013 hasta el presente (2017-1) siendo está conformada como una extensión del programa de ingeniería civil de la sede principal de la Universidad Santo Tomás.

Actualmente la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio está ejecutando la ampliación de sus instalaciones, en la cual se contemplan espacios para los laboratorios de la facultad de Ingeniería Civil. Sin embargo, cabe resaltar que los equipos solicitados en las distintas áreas son de carácter básico, por lo que principalmente se suplirá un conocimiento elemental, lo

que descarta la posibilidad de profundizar en temas de complejidad mayor que se pueda desarrollar en los laboratorios.

Con base en lo anterior, se pretende realizar la entrega de un instrumento de laboratorio innovador como lo es el simulador de flujos de ríos, que cuenta con características particulares para efectuar prácticas esenciales en el área de hidráulica fluvial, hidrología, canales abiertos, entre otras; lo cual sería de vital importancia para el aprendizaje de los estudiantes en el área de hidráulica.

En estos momentos las instituciones de educación superior que cuentan con este equipo son muy pocas. La Universidad Santo Tomás sede Villavicencio contaría con un reconocimiento en el ámbito regional y en sus distintas sedes en todo el País al poseer este instrumento que, a su vez, propiciaría investigaciones más específicas y profundas en el área ya mencionada.

1.2 Finalidad

1.2.1. Objetivo General

Diseñar y construir un prototipo del instrumento de laboratorio simulador de flujos de ríos para la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio, con base en la metodología experimental cuantitativa.

1.2.2. Objetivo Específicos

- Definir las características específicas para el instrumento, como materiales y dimensiones, con base en asesorías de expertos en hidráulica y el método experimental cuantitativo, para garantizar el óptimo funcionamiento del equipo.
- Construir el instrumento de laboratorio simulador de flujos de ríos de acuerdo con los planos de diseño para realizar las pruebas de funcionamiento correspondientes.
- Analizar los resultados obtenidos en el proceso de ensayo sometidos a simulación para asegurar el adecuado funcionamiento del instrumento.

1.3 Aportes del trabajo

Este proyecto tiene como fin la creación del instrumento de laboratorio llamado Simulador de flujos de ríos quedará en la Universidad Santo Tomás y será ubicado en las nuevas instalaciones, en los espacios del laboratorio de hidráulica. Así, los estudiantes de la institución podrán hacer uso de este para ampliar sus conocimientos propuestos por las teorías de clase con la practica experimental que ofrecen los laboratorios. Además, este es un instrumento de complejidad media-alta, lo cual atrae entidades públicas o privadas para desarrollo de proyectos en la Universidad. Por ende, este equipo permitirá simular el comportamiento de los ríos de las cuencas hidrográficas de la región que se encuentre en estudio para mejorar la gestión de riesgo en esta región.

1.4 Organización del documento

Capítulo 2. *Fundamentación teórica y científica*, en este apartado se encuentra establecido la teoría empleada para el desarrollo de este proyecto, entre ellas la plateada por Ven Te Chow en su libro Hidráulica de canales abiertos. Igualmente, se describe las normas y técnicas que se enfocan al objeto de estudio y el estado de arte.

Capítulo 3. *Metodología experimental*, allí se describe los criterios de diseño que se tuvieron en cuenta para el desarrollo de este proyecto, además se detalla en las etapas y tareas del proceso de construcción y cuál fue el producto final.

Capítulo 4. *Análisis de Resultados*, en este capítulo se comparan los resultados del instrumento con el software HEC-RAS con el fin de demostrar que el instrumento creado funciona un adecuadamente y que las variaciones que presenta no son significativas.

Capítulo 5. *Conclusiones y trabajos futuros*, finalmente, se concluye el trabajo y se expresan las recomendaciones que se deben tener con respecto al instrumento creado.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y CIENTÍFICA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Mecánica de los suelos

Es la encargada del estudio de las fuerzas o cargas que puede resistir los suelos. En ella se aplican las leyes de la mecánica y la hidráulica a los problemas de ingeniería que tratan problemas relacionados a la consolidación de partículas subatómicas y de los sedimentos¹.

Juárez Badillo- Rico Rodríguez (2005), señalan en su libro Mecánica de Suelos que “*solamente en los suelos gruesos, cuya granulometría puede determinarse por malla, la distribución por tamaños puede revelar algo referente a las propiedades físicas del material (...)*” y también “*que el comportamiento mecánico e hidráulico esta principalmente definido por la compacidad de los granos y su orientación, características que destruye, por la misma manera de realizarse, la prueba de granulometría, de modo que en sus resultados finales se ha tenido que perder toda huella de aquellas propiedades tan decisivas (...)*” [1].

La mecánica de los suelos incluye la investigación de las propiedades físicas y químicas del suelo, la teoría del comportamiento de los suelos sujetos a cargas y la aplicación de los conocimientos en la práctica. Para ello, se realizan diferentes ensayos in-situ y en laboratorios a muestras representativas del suelo a estudiar.

2.1.1.1. Procedimiento ensayo de análisis granulométrico

Este ensayo tiene como finalidad obtener la distribución de las partículas de diferentes tamaños en una muestra de suelo. Esta clasificación es posible realizarla según lo reglamentado por la NORMA INV E 123-07, que esta a su vez está sujeta a la AASHTO T 88 00 (2004).

Por medio de este ensayo se obtiene datos para determinar constantes de suelos como coeficiente de uniformidad, coeficiente de curvatura, porcentaje de gravas, porcentaje de

¹ “Esta parte de la ingeniería fue inventada en el año 1925 por Karl von Terzaghi. Antes de realizar cualquier tipo de construcción uno de los pasos fundamentales es realizar un estudio característico del suelo, con el objetivo de conocer las propiedades del mismo y como se puede aprovechar para el uso que deseamos realizar”. [2]

[2]arenas, porcentaje de finos, clasificación de los suelos según el SUCS y la curva granulométrica.

Este ensayo es importante, ya que gran parte de los criterios de aceptación de suelos en obras de ingeniería como bases y sub-bases para conformación de carreteras, presas de tierra, drenajes, entre otras, que dependen del análisis granulométrico.

Para la realización de este ensayo de análisis granulométrico a una muestra de suelo, se debe tener los siguientes materiales y algunas recomendaciones:

- Juego de tamices que cumplan con la Norma ASTM E - 11/95. Es necesario que el juego de tamices cuente con el fondo y la tapa superior, y que se encuentren en buen estado (libre de golpes que alteren los movimientos del proceso de tamizado).
- Aparato agitador que permita realizar el proceso de tamizado. Si no se cuenta con este, puede realizarse manualmente, evitando el escape de material de la muestra.
- Horno de secado con capacidad de mantener temperaturas constantes de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ según lo establecido en la ASTM E77 (1998) y ASTM E 563-02.
- Dos balanzas con precisión de 0.01g y 0.1g, previamente calibradas.
- Cepillo de alambre
- Brocha de pelo delgado

El ensayo granulométrico se realiza en los siguientes pasos:

- Preparar la muestra, para ello se debe realizar el método del cuarteo y posteriormente el lavado. En la norma INV-123-13 se propone tomar una pequeña porción al horno y una vez seco, se romperá un pequeño terrón aplicando fuerza con los dedos. Si en el proceso de desmoronamiento se observa con claridad que los finos se pulverizan, no habrá necesidad de hacer lavado.
- Se seca el material ya sea al aire a temperatura ambiente, o bien dentro de un horno a una temperatura inferior a 60°C , hasta conseguir pesadas consecutivas constantes en la muestra cada 30 minutos.

- Se deposita el material en la criba superior del juego de tamices, los que deberán encontrarse limpios y ordenados en forma decreciente.
- Se hace vibrar el conjunto durante 5 a 10 minutos, tiempo después del cual se retira del vibrador
- Se retira cada uno de los tamices cuidadosamente y se registra el peso del material retenido en cada tamiz. A partir del tamiz número 10, con ayuda del cepillo y la brocha retiramos el material retenido, para que haya precisión en el peso del material.
- Con los datos obtenidos de los pesos. Se procede a calcular el porcentaje de retención, el porcentaje que pasa y hacer la gráfica de la curva granulométrica.

Para los cálculos y gráficos tenemos en cuenta las siguientes ecuaciones:

- Porcentaje retenido en las cribas (%RC):

$$\%RC = PRC / Mt * 100 (\%) \quad (1)$$

Donde:

PRC = peso retenido en cada criba (g)

Mt = peso total de la muestra seca (g)

- Porcentaje retenido en mallas (%RM):

$$\%RM = PRM * K / PM (\%) \quad (2)$$

Donde:

PRM = peso retenido en cada malla (g)

K = porcentaje de muestra que pasó el tamiz 3/8"

PM = peso de la muestra

- Porcentajes retenidos acumulados, suma acumulativa de los porcentajes retenidos en cribas y mallas.
- Porcentajes que pasa, los que consisten en restar a 100% el porcentaje retenido acumulado en cribas y mallas.
- Calcular el porcentaje de pérdida (% P) para cada fracción de material, mediante la siguiente expresión:

$$\%P = (M1 - M2) / M1 * 100 (\%) \quad (3)$$

Donde:

M 1 = peso del material (grava o arena) a ensayar (g)

M 2 = sumatoria de pesos retenidos (g)

- Graficar la curva granulométrica, donde la ordenada será el porcentaje que pasa en peso en cada tamiz en escala natural y la abscisa el tamaño (diámetro equivalente) de las partículas en escala logarítmica, como se muestra a continuación, véase figura 2-1.

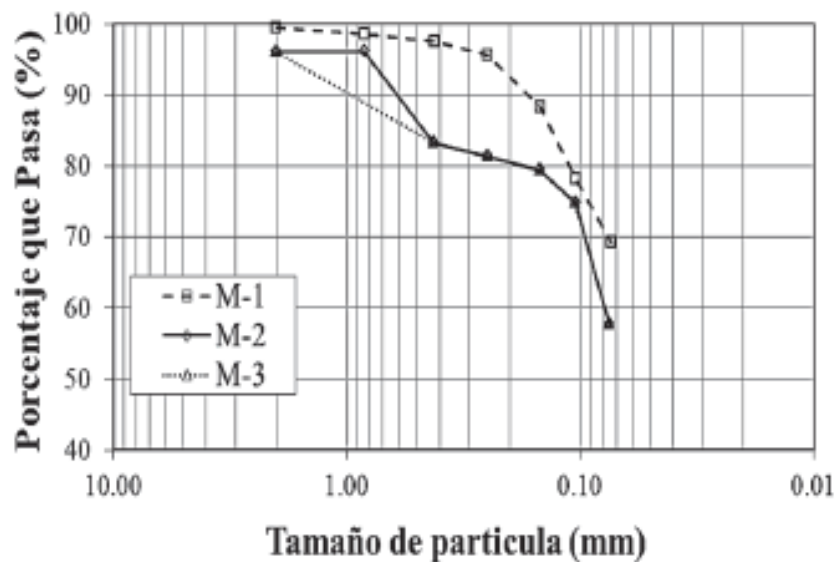


Figura 2-1 Ejemplo de grafica granulométrica. Fuente: Caracterización geotécnica de los limos de la terraza del municipio de Olaya, Antioquia, Colombia - Óscar Echeverri

- Calcular el coeficiente de uniformidad (C_u), el cual es una medida de uniformidad (graduación) del suelo y el coeficiente de curvatura (C_c), el cual es un dato complementario para definir la uniformidad de la curva, mediante las siguientes expresiones:

$$C_u = D_{60} / D_{10} \quad (4)$$

$$C_c = (D_{30})^2 / (D_{60} * D_{10}) \quad (5)$$

Donde:

D10 = tamaño donde pasa el 10% del material

D30 = tamaño donde pasa el 30% del material

D60 = tamaño donde pasa el 60% del material

2.1.2. Estructuras aporticadas

El sistema de estructuras aporticadas, es el sistema que está compuesto por vigas y columnas de una misma dosificación, donde se forman ángulos de 90° en el fondo, parte superior y lados laterales. Este sistema es también conocido como tradicional y es comúnmente utilizado en edificios.

Este sistema es sujeto a la Norma Sismo Resistente NRS-10, la cual se encarga de reglamentar las condiciones con las que deben contar las edificaciones capaces de manifestarse favorablemente ante un sismo.

Es el sistema de construcción más difundido en nuestro país y el más antiguo. Basa su éxito en la solidez, la nobleza y la durabilidad. Un sistema aporticado es aquel cuyos elementos estructurales principales consisten en vigas y columnas conectados a través de nudos formando pórticos resistentes en las dos direcciones principales de análisis (x e y).

Para el diseño de los sistemas aporticados, es necesario hacer combinaciones de las cargas existentes en la edificación, como las cargas vivas y cargas muertas, *que hacen referencia a cargas debidas al uso y edificación, incluyendo a las debidas a objetos móviles (...) y cargas consistentes al peso propio del elemento, peso de materiales incorporados en la construcción y peso del equipo permanente* [3];

Dentro de las combinaciones básicas según la NSR-10 se encuentra la siguiente:

$$1.2 (D + F + T) + 1.6 (L + H) + 0.5 (L_r \text{ ó } G \text{ ó } L_e) \quad (6)$$

Pero se simplifica de la siguiente manera debido a las cargas presentes en la estructura:

$$1.2 (D) + 1.6 (L) \quad (7)$$

Donde:

D = Carga muerta, también expresada como CM

L = Carga viva, también expresada como CV

2.1.3. Hidráulica de canales abiertos.

El estudio de canales abiertos es un tema de amplio alcance que permite a los ingenieros civiles contar con bases sólidas para la elaboración y mejoramiento de investigaciones o estudios que contribuyan a la gestión de riesgo, ordenamiento territorial y entre otros estudios en los cuales se puedan implementar conceptos hidráulicos. La investigación que se desea realizar con el presente proyecto contempla conocimientos básicos de canales abiertos naturales, con características específicas para las situaciones que se desean modelar.

Ven Te Chow plantea que *las propiedades hidráulicas de un canal natural por lo general son muy irregulares* [4] y por tal motivo en las investigaciones la experiencia desempeña un papel fundamental, a partir de esta se plantean hipótesis empíricas partiendo de la observación de los modelos específicos a trabajar. Estas irregularidades se pueden presentar desde una parábola hasta más o menos un trapecio, véase figura 2-2.

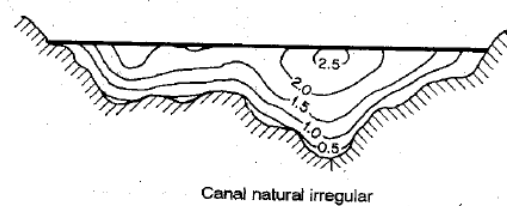


Figura 2-2. Ejemplo de un canal natural irregular. Fuente: Hidráulica de canales abiertos – Ven Te Chow

Dependiendo las características del canal natural se puede definir para este que *para corrientes sujetas a crecientes frecuentes, el canal puede constar de una sección principal del canal que conduce los caudales normales y una o más secciones laterales de canal para acomodar los caudales de desborde* [4], estos son factores fundamentales para la elaboración de estudios que puedan generar una modelación.

Para las modelaciones hidráulicas se deben plantear los riesgos de inundación en las áreas adyacentes a los ríos *relacionando el caudal de la corriente con la altura de la lámina de agua, la duración y la extensión del área inundada* [4], existen factores que limitan las modelaciones como lo son la topografía del cauce y la llanura de inundación que son fundamentales para la crecida modelizada y la extensión de área inundada.

La dinámica fluvial se considera en las simulaciones como factor esencial por su incidencia en las variaciones del cauce como lo son: movilidad y estabilidad del cauce y la presencia de islas fluviales; en esta área se considera el ciclo hidrológico, cuenca de un río, caudal, régimen fluvial, geometría hidráulica, cauce, perfil transversal, perfil longitudinal, régimen fluvial y régimen pluviométrico, la elevación del cauce en las llanuras sedimentarias y trazado del sistema fluvial. [6]

La modelación y simulación son técnicas que se pueden emplear simultáneamente en proyectos de investigación, gestión de riesgo y demás áreas que deseen determinar la incidencia, vulnerabilidad, alertas tempranas, zonas de riesgo, entre otros factores que contribuyan al desarrollo humano.

Algunas instituciones expertas en el tema como: Hidrogaia SL, Idrologia e Ambiente srl, Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, Confederación Hidrográfica del Júcar e Ingeniería y Promoción Bellver SL, realizaron conjuntamente la modelación hidráulica y análisis del riesgo de inundación en Alicante (España) exactamente la Marina Alta y la Marina Baja, de esta modelación se permite ejecutar una simulación la cual da como resultado cinco mapas de calado por cada zona de inundación evaluada.

En el estudio se llevó a cabo *una modelación hidráulica bidimensional de las zonas inundables consideradas [7], de esta manera se empleó el modelo matemático Infoworks RS 2D, que es un software para la gestión de sistemas hídricos en zonas fluviales, urbanas y rurales. Este programa ha sido desarrollado por Wallingford Software (MWH Soft). InfoWorks RS 2D combina una serie de características importantes, como la integración de modelación 1D – 2D y las múltiples posibilidades para el diseño de mallas de cálculo que permite optimizar la flexibilidad y precisión del modelo. El módulo InfoWorks RS 2D utiliza el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de flujo de aguas someras. Utiliza mallas triangulares, rectangulares e irregulares con elementos escalonados planos horizontales para modelar el terreno, lo cual permite una alta flexibilidad para describir geometrías complejas. También es posible seleccionar zonas de mayor precisión, zonas donde no se desea mallar como en los edificios (voids), líneas de rotura para modelar con mayor precisión zonas de cambios bruscos de pendiente, muros con una altura o cota fijada, muros porosos que permiten el paso parcial del agua y muros infinitos. La cota de cada triángulo se calcula a partir de las*

cotas de cada uno de sus vértices. Los resultados son los calados en el centro de cada celda de la malla y las velocidades en los lados. [7]

Por otro lado, se encuentra la simulación en la cual se define el polígono de simulación donde se establece la extensión del modelo y se define la extensión de simulación hidráulica y los tamaños máximos y mínimos de los elementos del mallado (200 m² y 40 m² respectivamente). Se definen también algunos polígonos de malla sobre las zonas que requieren de mayor precisión con elementos triangulares menores con un máximo de 10 m² y un mínimo de 2 m² para el polígono de malla del Portelles y río Alberca con sus afluentes y de 20 m² y 4 m² para el del Girona. También se ha definido una capa de edificio (voids), tratados como polígonos impermeables de altura infinita, y una capa de líneas de rotura, para reproducir con mayor precisión los cambios de pendiente, los resultados de estos estudios concluyen la evaluación del riesgo por inundación en las zonas de estudio, aportando mapas de calados máximos con un valor de probabilidad asociado, en términos de periodo de retorno, derivados de la modelación hidráulica bidimensional. Estos mapas indican la peligrosidad de las zonas estudiadas frente a eventos hidrometeorológicos extremos, y son de fundamental importancia en la planificación y en la ordenación del territorio [7].

2.1.4. HEC-RAS

El programa de computadora HEC-RAS, ha sido desarrollado para el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. (USACE). Fue creado con el fin de administrar los ríos, puertos y otras obras públicas bajo su jurisdicción. Sin embargo, el software desarrollado en el Centro de Ingeniería Hidrológica se pone a disposición del público cuando corresponde (...). Este software permite al usuario realizar un flujo continuo unidimensional, cálculos de flujo inestable de una y dos dimensiones, cálculos de transporte de sedimentos, lecho móvil y modelado de la temperatura del agua, calidad del agua [8].

El procedimiento computacional básico de HEC-RAS para flujo constante se basa en la solución de la ecuación de energía unidimensional. Las pérdidas de energía se evalúan por fricción y contracción / expansión. La ecuación de momento se puede usar en situaciones donde el perfil de la superficie del agua se varía rápidamente. Estas situaciones incluyen saltos hidráulicos, hidráulica de puentes y evaluación de perfiles en confluencias fluviales.

Ecuación de momento:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) - g(S_0 - S_f) = 0$$

(8)

Donde:

Q = Caudal

A = Área

y = Profundidad

x = Distancia

S₀ = Pendiente del canal

S_f = Pendiente de fricción

g = Gravedad

t = tiempo

Para el flujo inestable, HEC-RAS resuelve la ecuación completa, dinámica y en 1-D de Saint Venant utilizando un método implícito de diferencia finita. La ecuación de continuidad tiene en cuenta un balance de masa sobre un volumen de control.

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_{lat} \quad (9)$$

Donde:

Q = Caudal

A = Área

t = Tiempo

x = Distancia

q_{lat} = caudal externo

HEC-RAS está equipado para modelar una red de canales, un sistema dendrítico o un solo alcance del río. Deben hacerse algunas simplificaciones para modelar algunas situaciones complejas de flujo utilizando el enfoque unidimensional HEC-RAS. Es capaz de modelar el flujo de régimen de flujo mixto subcrítico, supercrítico y mixto junto con los efectos de puentes, alcantarillas, vertederos y estructuras.

Este tipo de programas requieren calcular los coeficientes de Manning, que se suele hacer mediante tablas. Este coeficiente de Manning depende del tipo de material.

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (10)$$

Donde:

V = Velocidad media del agua en canales con régimen uniforme (m/s)

n = Coeficiente de rugosidad Manning

R = Radio hidráulico

S = Pendiente (línea de energía)

2.2. Marco legal

El presente proyecto está fundamentado bajo las siguientes normas y técnicas enfocadas al objeto de estudio:

- Política Nacional para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (PNGIRH) que establece los objetivos, estrategias, metas, indicadores y líneas de acción estratégica para el manejo del recurso hídrico en el país, en un horizonte de 12 años [9].
- Ley 1523 de 2012 Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. [10]
- Estudio Nacional del Agua con enfoque para el estudio del agua en sus múltiples dimensiones y profundiza en el conocimiento de su uso y de la intervención humana sobre el ciclo hidrológico, sus impactos y efectos [11].
- NTC-ISO-IEC 17025: Establece los requisitos generales de competencia de laboratorios de ensayo y calibración [12].
- NORMA INV E 123-07, tiene como objeto el análisis granulométrico por el cual se determina cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo. Esta norma colombiana tiene como referencia ASTM D 422-63 (Reaprobada 1998) y AASHTO T 88 00 (2004) [13].

2.3. Estado del arte

Si bien es cierto que el estado del arte es la revisión de todos los antecedentes de la investigación, la realidad es que, luego de una revisión exhaustiva, se encontró que son pocos los avances en estudios anteriores, teorías y metodologías empleadas relacionadas con el

objeto del presente trabajo de grado, por lo que adquiere especial relevancia para futuros investigadores el desarrollo del mismo.

Al no encontrar un estado del arte amplio a nivel regional ni nacional, se analizó el contexto internacional, pero tampoco se encontró evidencia alguna de trabajos que coincidan, tanto en su teoría como en su metodología, con el presente trabajo de grado.

Así pues, fue imposible encontrar los 5 antecedentes mínimos que son necesarios para poder plantear la metodología del proyecto. Por consiguiente, nos encontramos ante un doble reto y motivación al emprender este trabajo que servirá como punto de partida metodológico para futuras investigaciones.

Sin embargo, se encontró una excepción con un trabajo de grado desarrollado en el 2016 en la facultad de Ingeniería civil de la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Villavicencio, en donde tres estudiantes realizaron el *Diseño y montaje del prototipo de una red cerrada para el laboratorio de hidráulica de dicho Claustro universitario* [14].

En el mencionado trabajo, se abordó una investigación para definir apartes tan importantes como una red cerrada y los materiales que en ella se debe utilizar para realizar el montaje en el laboratorio y el diseño para su ejecución.

La similitud en las necesidades que dieron pie a la iniciativa de la realización del presente trabajo de grado se ve plasmada en la misma introducción del elaborado en la Universidad Cooperativa, pues en el expusieron que la red cerrada forma un tipo de investigación proyectiva ya que consistió en la elaboración de una propuesta o un modelo, como solución a un problema o necesidad de tipo práctico ante la carencia del mismo y la obligación a acudir a terceros para poder realizar estudios hidráulicos

2.4. Conclusión del capítulo

El presente trabajo de grado está soportado sobre las bases de los estudios realizados en hidráulica por Ven Te Chow y Giles Ranald; en mecánica de suelos por Juárez Badillo- Rico Rodríguez y en sistemas aporticados por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

La totalidad de las teorías expuestas hacen parte integral de las fases de estructuración del proyecto, investigación, construcción y puesta en funcionamiento del instrumento de laboratorio.

Así mismo, es fundamental la aplicación del método científico como quiera que los ensayos que se deben realizar comprenden constantes pruebas experimentales hasta perfeccionar el diseño del instrumento de laboratorio.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología cuantitativa se implementó para la elaboración y desarrollo del simulador de flujos de ríos con su respectivo enfoque experimental que abarca la recreación y adaptación de un equipo de laboratorio, debido a que esta, *utiliza la recolección y análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis establecidas previamente.* [15]

El planteamiento de las hipótesis para el desarrollo del equipo de laboratorio establecían la reducción de costos por cambio de materiales en su construcción y la no variación significativa de los datos con relación a la modelación en el software HEC-RAS, la investigación experimental se implementa en la corroboración de lo planteado anteriormente, donde, *se presenta mediante la manipulación de una variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente contraladas, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento en particular.* [16]

3.1. Criterios de diseño

Los criterios de diseño se dividen en:

1. Lecho o fondo rugoso:
 - Arena de peña: mina Playa Rica.
 - Arena de planta: mina Río Ocoa.
2. Sistema de bombeo:
 - Bomba de agua.
 - Potenciómetro.
 - Manguera reforzada con fibra de 1”.
 - Tanque de suministro hidráulico.
3. Métodos de medición y regulación de velocidad.
 - Potenciómetro.
 - Vertedero rectangular.
4. Estructura del equipo:
 - Acero inoxidable (Bandeja de simulación).

- Acero al carbón (Base del equipo).

5. Sistema de elevación.

- Gato mecánico.

1. LECHO O FONDO RUGOSO.

Sobre este se realizan las simulaciones correspondientes que obedecen al objeto final del equipo de laboratorio, donde geomorfológicamente *los procesos de erosión y sedimentación son los responsables de las formas del lecho* [17]. El lecho que predominará en el simulador de flujos de ríos será el arenoso, donde en este *se forman rizaduras, dunas, lecho liso o antidunas, dependiendo del régimen de los caudales.* [11]

- Arena de peña lavada de Playa Rica:

Este tipo de arena debe estar suelta, limpia, lavada, libre de materia orgánica, mica, sales solubles dañinas y demás contaminantes que alteren sus características y no permitan una adecuada simulación del lecho rugoso de un río, véase Figura 3-1 (A). *El contenido de humedad óptimo para la arena debe estar entre un 6% y un 8%, es decir, ni seca, ni saturada.* [18] Su granulometría deberá ajustarse a la presencia de finos limitada al máximo con un porcentaje admisible en el tamiz 200 no mayor del 5%.

- Arena de planta del Río Ocoa:

En este tipo de lecho rugoso cuenta con características específicas para la adecuada simulación de ríos, esta, *es una arena que se obtiene a partir de un proceso de extracción y cribado de material de río. Es sometida a un proceso de lavado para la eliminación de limos y arcillas. Es la combinación de arena natural y manufacturada clasificada.* [19], véase Figura 3-1 (B).

Su peso específico varía desde 1300 Kg/m^3 y 1500 Kg/m^3 , donde granulométricamente se empleará arena media y arena fina. [20]



Figura 3-1. Lecho rugoso. Fuente: Autores

2. SÍSTEMA DE BOMBEO.

Desempeña un papel fundamental para el Simulador de flujos de ríos, *el sistema de bombeo tiene como objeto elevar la presión del fluido para vencer la resistencia que opondrá el circuito a su circulación.* [21]. Este deberá contar con una variación en su caudal de trabajo para poder simular los diferentes tipos de flujos de ríos que existen como: ríos rectilíneos, anastomosados y meándricos. Este sistema se encuentra conformado por los siguientes instrumentos y equipos:

- Bomba de drenaje referencia 04-SP2118A:

El motor de esta bomba es empleado principalmente industrial y comercialmente para el sistema centrífugo o de drenaje de lavadoras. Sus características principales se observan en la tabla 3-1.

Tabla 3-1. Características bomba de drenaje.

CARACTERÍSTICAS	
Potencia	60 Hz
Voltaje	110 – 127 V
Caudal	20 L/min

Fuente: Autores

Se decide emplear esta bomba por el caudal que trabaja y que se asemeja significativamente al del instrumento original. Su bajo costo y tamaño reducido representa peculiaridades que optimizarían la distribución del espacio para articular este, al equipo de soporte del simulador de flujos de ríos.

- Potenciómetro:

La variación de caudal por medio de un potenciómetro generará la asignación de flujo más acertada para las simulaciones que se realicen en el instrumento de laboratorio. *Un potenciómetro es un dispositivo conformado por 2 resistencias en serie, las cuales poseen valores que pueden ser modificados por el usuario.* [22]

- Manguera reforzada con fibra de 1”:

Esta manguera presenta una relación entre *presión y resistencia de alto grado y gran durabilidad con respecto a las inclemencias del tiempo* [23], por sus características reformadas, comparadas con la manguera convencional hacen de esta la mejor elección para garantizar la durabilidad del equipo en función del transporte del agua.

- Tanque de suministro hidráulico:

El tanque de abastecimiento hídrico para los laboratorios a elaborar en el simulador de flujos de ríos debe ser de un material resistente, que no permita escapes de agua, pero al mismo tiempo liviano para mejores las cualidades del equipo en todo sentido. El material apto, acorde a los requerimientos y acogiendo las sugerencias del director de tesis, se eligió el acrílico como elemento idóneo para la elaboración del tanque.

Las medidas iniciales estimadas con respecto al volumen de trabajo para el equipo de laboratorio son las siguientes, véase Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Medidas tanque de suministro hídrico.

MEDIDAS	
Largo	40 cm
Alto	40 cm
Ancho	30 cm
Espesor	5 mm

Fuente: Autores

3. MÉTODOS DE MEDICIÓN Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD:

En los procesos de simulación no solo se debe tener un control del flujo de agua que circula por este, es necesario conocer con gran precisión los datos que se establecieron con antelación para desarrollar los problemas que se puedan generar a partir de estos. La regulación de velocidad desempeña un factor fundamental para generar situaciones adecuadas en los laboratorios a efectuar; los cambios abruptos en los regímenes de flujo, (flujo laminar y flujo turbulento) [24] podrían generar cambios significativos en el lecho rugoso produciendo un cambio en la simulación, alterando los condiciones iniciales de diseño; el fluido va a ser transportado por una manguera de diámetro constante de 1", el número de Reynolds *viene dado por el cociente de las fuerzas de inercia por las fuerzas debidas a la viscosidad*, [24], la ecuación viene expresada de la siguiente manera:

Numero de Reynolds:

$$R_E = \frac{V d \rho}{\mu} \text{ o } \frac{V d}{\nu} = \frac{V (2r_0)}{\nu} \quad (10)$$

Donde

V = Velocidad medida en m/seg

d = r₀ = radio de la tubería medida en m

ν = viscosidad cinemática del fluido en m²/seg

ρ = densidad del fluido en Kg/m³

μ = viscosidad absoluta en Kg/m*s o Pa*s

Las variables constantes en este caso por tratarse del uso exclusivo de agua en el instrumento de laboratorio son: radio de la tubería, viscosidad cinemática y absoluta y densidad del fluido; la velocidad es la única susceptible a cambios, de esta manera se debe controlar para que no intervenga significativamente en las simulaciones a realizar.

- Potenciómetro:

Por medio de esta herramienta se suplirán dos requerimientos indispensables para el funcionamiento del equipo de laboratorio. Su función inicial abarca la regulación de caudal, pero a partir de pruebas se podrá implementar para asumir una medición precisa del flujo puesto en simulación.

- Vertedero rectangular:

Los vertederos de aforo es uno de los dispositivos más usados para la medición de flujos, el más conocido es el vertedero rectangular, estará ubicado en el lado superior del tanque de arena, de esta manera, al ser el primer contacto del flujo con el

simulador se comportará también como un disipador de energía que a su vez regulará la velocidad del fluido y no modificará las condiciones implementadas para cada laboratorio.

4. ESTRUCTURA DEL EQUIPO

Representa la instalación estructural completa del instrumento de laboratorio, está compuesto por el tanque de arena que es el área donde se encontrará el lecho rugoso y se llevarán a cabo las diferentes simulaciones correspondientes y la estructura de soporte que brindará estabilidad y apoyo al área de simulación.

- Tanque de arena: Acero inoxidable.

Este metal cuenta con una excelente ductilidad, elasticidad y dureza que hacen que sea ideal para cualquier tipo de proyecto. De igual manera, presentan una excelente resistencia al desgaste. [25] El alto contenido de cromo aumenta su resistencia a la corrosión y es capaz de generar naturalmente una capa protectora cuando entra en contacto con el ambiente [25]. Por tales características es el material adecuado para satisfacer los requerimientos del tanque de arena, el cual estará expuesto a condiciones de humedad por el paso directo del agua a través del lecho rugoso.

Su alta resistencia es apta para soportar el peso de la arena en todo momento y asimismo del agua que será empleada para realizar las simulaciones en el equipo de laboratorio, de tal manera se implementará una lámina con un espesor estimado de 6 mm con refuerzos transversales garantizando la rigidez y estabilidad del fondo del tanque de arena.

Las medidas propuestas iniciales, véase Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Medidas del tanque de arena.

MEDIDAS	
Largo	210 cm
Alto	10 cm
Ancho	180 cm
Espesor	6 mm

Fuente: Autores

- Estructura de soporte: Acero al carbono.

Debe brindar una estabilidad completa al equipo, desde su instalación y durante los diferentes ensayos, pruebas y laboratorios que se desarrollen en el simulador de flujos de ríos, las características de este material implementado en obras petroleras, elementos estructurales y demás usos industriales, demuestran su alto desempeño con particularidades como:

Templables, duros y resistentes al desgaste, difíciles de soldar, poco tenaces y Baratos [26].

La estructura contará con una altura de 1,10 m para disminuir el riesgo de inestabilidad del equipo y facilitar el acceso visual de los laboratoristas y practicantes durante el proceso de simulación en dicho instrumento.

5. SISTEMA DE ELEVACIÓN:

La pendiente desarrolla particularidades únicas en cada tipo de cuenca y existe una relación *entre la pendiente del cauce y la capacidad del flujo para erosionar y transportar sedimentos* [27] la recreación de esta característica desempeña un papel fundamental para establecer las características principales de la simulación a efectuar. Los sistemas de elevación o *máquinas de elevación son los aparatos o mecanismos utilizados para transportar verticalmente o por pendientes muy pronunciadas cargas o materiales de diversa naturaleza*, [28] los mecanismos de elevación elementales y de fácil implementación hallados es el gato mecánico.

- Gato mecánico:

Está compuesto por una cremallera, un piñón de ataque dentado, un trinquete y un brazo de palanca donde se ejerce la fuerza [28] la elección precisa del tipo de gato mecánico depende del evalúo de cargas realizado de igual manera para la modelación estructural en SAP 2000, de esta manera, conociendo la carga a elevar y su ubicación exacta en el instrumento, se podrá elegir el tipo de gato adecuado para desempeñar esta labor y que permita el funcionamiento óptimo en cada laboratorio a desarrollar.

3.2. Descripción de etapas y tareas

En las etapas de la investigación cuantitativa se establecen 5 etapas: *Fase conceptual, fase de planeación y diseño, fase empírica, fase analítica y fase de difusión.* [29]

3.2.1. Fase conceptual

La revisión bibliográfica estuvo guiada principalmente por el director del proyecto el ingeniero Iván Darío Acosta Sabogal que a través de su conocimiento en el área de hidráulica brindó asesorías acertadas que delimitaron libros y demás documentación bibliográfica en este proceso; por otra lado se realizó la investigación sobre que instituciones de educación superior, laboratorios y demás entidades cuentan con un simulador de flujos de ríos que faciliten un conocimiento más profundo acerca de este instrumento de laboratorio; al tener un enfoque definido se procederá a filtrar la información de cada uno de los textos elegidos anteriormente.

El diseño estructural se realizó mediante un software especializado, en este caso se empleó AutoCAD para todo el proceso de predimensionamiento, especificaciones técnicas y demás características establecidas en los planos del simulador de flujos de ríos, la modelación para el análisis estructural del simulador se realizó en SAP 2000 para lo relacionado con resistencia de materiales, fuerzas aplicadas, análisis dinámicos, cargas móviles y fijas, todo esto con el respectivo apoyo técnico de expertos en el tema; en el proceso de materialización se implementaron asesorías especializadas en el área hidráulica, eléctrica, estructural, y afines. El proceso de construcción de la estructura final se ejecutó en la empresa de ornamentación.

En la fase de simulación en el equipo totalmente finalizado se establecerán las características específicas necesarias del modelo a simular para efectuar satisfactoriamente dicho proceso, mediante el cual se podrán determinar, evaluar, analizar y validar los datos obtenidos experimentalmente en este.

Por último, se concebirá la entrega de los documentos instructivos para los estudiantes y docentes que deseen o requieran realizar laboratorios en el simulador de flujos de ríos, dentro de estos se encuentran contemplados una guía práctica de laboratorio y el manual instructivo del instrumento. Estos se ejecutarán de manera empírica debido al escaso conocimiento de laboratorios realizados en este instrumento del área de hidráulica.

3.2.2. Fase de planeación y diseño:

Se realiza la compra del material granular necesario para la elaboración de ensayos en el Simulador de flujos de ríos, véase Figura 3-2; se establece necesario la adquisición de dos tipos de arena de venta comercial, las cuales corresponden a: Arena de peña y arena de río, estas cuentas con características identificables a simple vista como: composición granulométrica, contenido de materia orgánica y color y asimismo su procedencia, la arena de peña proviene de la mina ubicada en el barrio Playa Rica de Villavicencio y la arena de río es extraída del Río Ocoa, véase Figura 3-3 y Tabla 3-4.

Inicialmente se realizarán las pruebas con la arena de planta y posteriormente se implementará la arena de peña realizando la debida comparación de resultados para identificar el tipo de arena correcta que deba ser usada finalmente en el equipo de laboratorio.



Figura 3-2. Material pétreo. Fuente: Autores

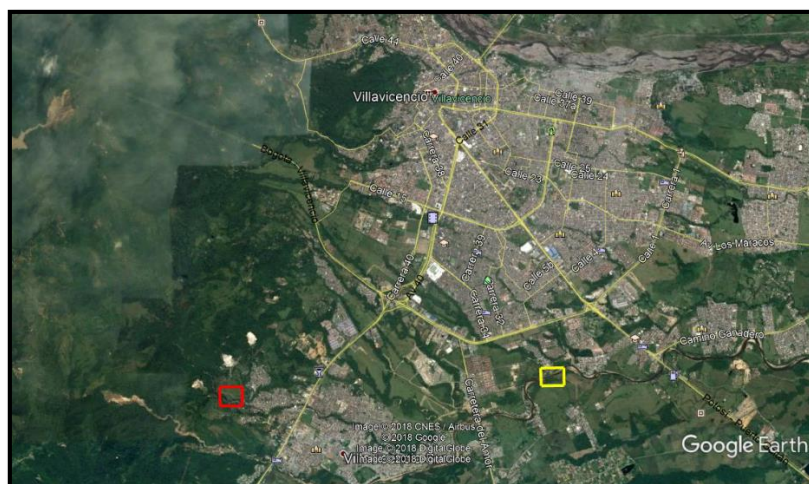


Figura 3-3. Ubicación Minas. Fuente: Reproducido de Google Earth

Tabla 3-4. Convenciones ubicación de las minas.

<i>Convención</i>	<i>Minas</i>
	Peña de Playa Rica
	Mina Río Ocoa

Fuente: Autores

El tamizado del material granular proveniente del Río Ocoa se realizó para determinar su respectiva curva granulométrica y realizar la selección del tamaño máximo del agregado con el que se va a trabajar, que presente características óptimas para la realización de los debidos ensayos, véase Figura 3-4.



Figura 3-4. Proceso de tamizaje. Fuente: Autores

El volumen tamizado se estima en $0,20 \text{ m}^3$, se realizó este proceso con los tamices del laboratorio de la Universidad Santo Tomás, sede Villavicencio, los cuales cumplen con la norma ASTM E-11. Realizando el procedimiento con aprobación del director se determina para trabajar el material retenido desde el tamiz N° 20 que cuenta con una abertura de 0,850 mm, donde se identifica que visualmente lo retenido en los tamices anteriores es un material un poco grueso para la simulación de ríos.

A continuación, se muestra la gráfica de la curva granulométrica obtenida luego de realizar el tamizado de una muestra con una masa de 1350 gramos, véase Figura 3-5.

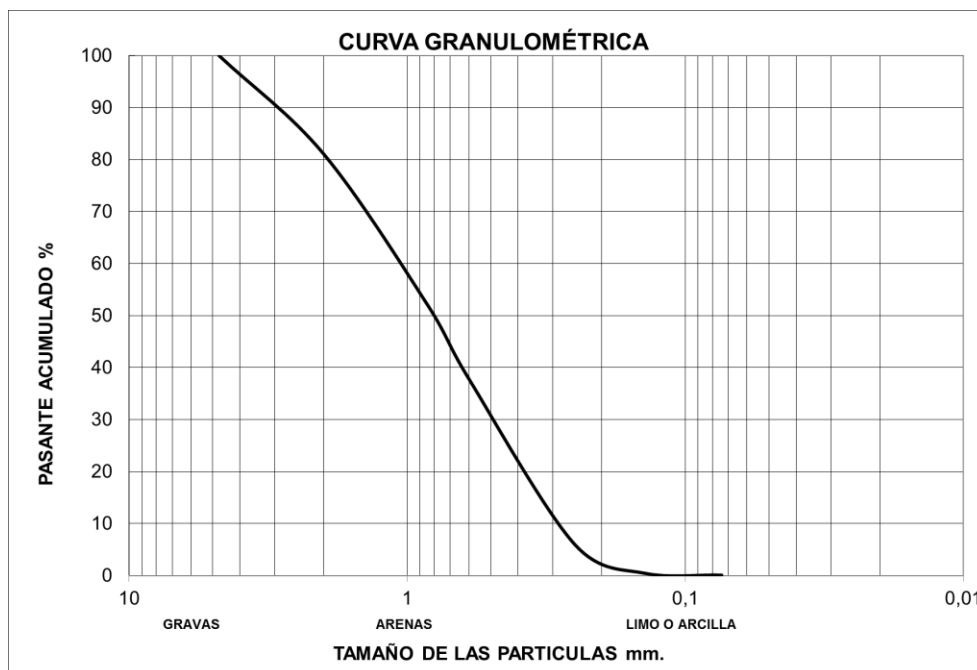


Figura 3-5. Curva granulométrica. Fuente: Autores

El trabajo de campo necesario para conocer en que taller especializado en estructuras metálicas se realizaría el proceso constructivo del instrumento de laboratorio surgieron algunos inconvenientes con respecto a las medidas previstas inicialmente para el simulador. Para establecer las medidas de 210*180 cm era necesario la compra de dos láminas de acero inoxidable lo cual incrementaba el riesgo de deformación al momento de tener el equipo de laboratorio listo y aumentaba significativamente los costos de materiales y construcción del tanque de arena.

La lámina de acero inoxidable de 6 mm comercialmente tiene las siguientes medidas, véase Tabla 3-5:

Tabla 3-5. Medidas lámina de acero

Lámina de acero espesor 6 mm	
Largo	210 cm
Ancho	120 cm

Fuente: Autores.

Presentamos la propuesta al director de tesis, donde, se expuso lo sucedido y se sugirió

cambiar las medidas ajustándolas a las de la lámina y asegurando la estabilidad del tanque de arena según las recomendaciones de expertos en esta área. El cambio de las medidas quedó de la siguiente manera, véase Tabla 3-6:

Tabla 3-6. Medidas finales del tanque de arena.

MEDIDAS	
Largo	180 cm
Alto	12 cm
Ancho	90 cm
Espesor	6 mm

Fuente: Autores.

El ingeniero Iván Acosta aprobó la solicitud al cambio de medidas garantizando el óptimo funcionamiento del simulador de flujos de ríos al momento de desarrollar los laboratorios en este.

Las asesorías de los ingenieros estructurales de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio recomendaron la implementación de acero al carbono en la base o soporte del equipo de laboratorio, por sus características generan un apoyo resistente para las exigencias impuestas por la carga aplicada.

La modelación para el análisis estructural del simulador de flujos de ríos se realizó en el software SAP 2000, para determinar la relación existente entre la resistencia de los materiales a implementar y la carga aplicada a este, el análisis dinámico, cargas móviles y fijas, todo esto con el pertinente apoyo técnico de expertos en el tema.

El análisis estructural se realizó para determinar la capacidad de carga del simulador de flujos de ríos sin que sufra algún tipo de deformación, avería o desplazamiento durante su vida útil. Las dimensiones ya establecidas anteriormente se implementaron para modelar la estructura en el software SAP2000. Las características de los materiales implementados para la modelación en el software son los siguientes, véase Tabla 3-7:

Tabla 3-7. Detalles de los elementos estructurales

ELEMENTO	MATERIAL	DIÁMETRO O MEDIDA	ESPESOR
Base o soporte	Tubo acero al carbón	2"	3 mm
Tanque de arena	Lámina de acero inoxidable	-	6 mm
Viga de borde	Ángulo L	1 ½ " x 3/16"	4,8 mm

Fuente: Autores.

El análisis de cargas evaluadas anteriormente, basados en asesorías de ingenieros estructurales, se calculó una carga mayorada de 1 TON (Tonelada) obtenida de la siguiente manera.

La CM (carga muerta) representa los elementos y materiales que siempre existirán en el simulador de flujos de ríos, es una carga fija indispensable para el diseño del este equipo y respectiva modelación en SAP 2000, este peso se transmite directamente a la estructura base que es la encargada de dar soporte y estabilidad al instrumento de laboratorio, véase Tabla 3-8.

Tabla 3-8. Evalúo de cargas.

Evalúo de carga "Simulador de Flujos de Ríos"						
Tanque de Arena Carga Muerta						
Materiales	Peso Especifico (Ton/m3)	Longitud (m)	Base (m)	Altura (m)	Volumen (m3)	Peso (Ton)
Arena Seca de planta	1,7	1,8	0,9	0,09	0,146	0,248
Agua	1,0	1,8	0,9	0,09	0,146	0,146
Acero inoxidable	7,9	-			0,015	0,115
					Σ	0,509

Fuente: Autores.

La CV (carga viva) es una carga variable, implementada por el uso mismo del simulador de flujos de ríos, considerada de esta manera, ya que, al momento de realizar los respectivos laboratorios, el flujo de agua para representar los ríos estará presente, pero al momento de no encontrarse en uso, será una carga no existente, de esta manera se plantea el escenario

extremo o crítico donde, el tanque de arena se encuentre saturado al 100% y represente una carga significativa para la estructura de soporte, véase Tabla 3-9.

Tabla 3-9. Evalúo de cargas.

Evalúo de carga "Simulador de Flujos de Ríos"						
Tanque de Arena Carga Viva						
Material	Peso Específico (Ton/m3)	Longitud (m)	Base (m)	Altura (m)	Volumen (m3)	Peso (Ton)
Agua	1,0	1,8	0,9	0,13	0,211	0,211
					Σ	0,211

Fuente: Autores.

Para la combinación de cargas se aplicó la “combinación de cargas mayoradas usando el método de resistencia” [30] donde solo se tuvo en cuenta la CM y la CV evaluadas anteriormente. Para manejar un peso o carga comercial se aproximó el resultado a la unidad entera más cercana, véase Tabla 3-10.

Tabla 3-10. Combinaciones de carga.

COMBINACIONES		
CM	0,509	Ton
CV	0,211	Ton
1,2 CM + 1,6 CV	0,95	Ton

Fuente: Autores.

La comprobación de esfuerzos y resistencias de la estructura, de acuerdo a lo obtenido en la modelación en el software SAP2000, permite observar que los materiales implementados cumplirán satisfactoriamente los requerimientos de cargas necesarios para el simulador de flujos de ríos, véase Figura 3-6. Este ejercicio contó con la asesoría del Ingeniero estructural Julio Franco y Oscar Chitiva docentes de la facultad de Ingeniería Civil, quienes sugirieron modelar la estructura en su punto más crítico el cual, es cuando el simulador de flujos de ríos se encuentra en su altura máxima determina previamente.

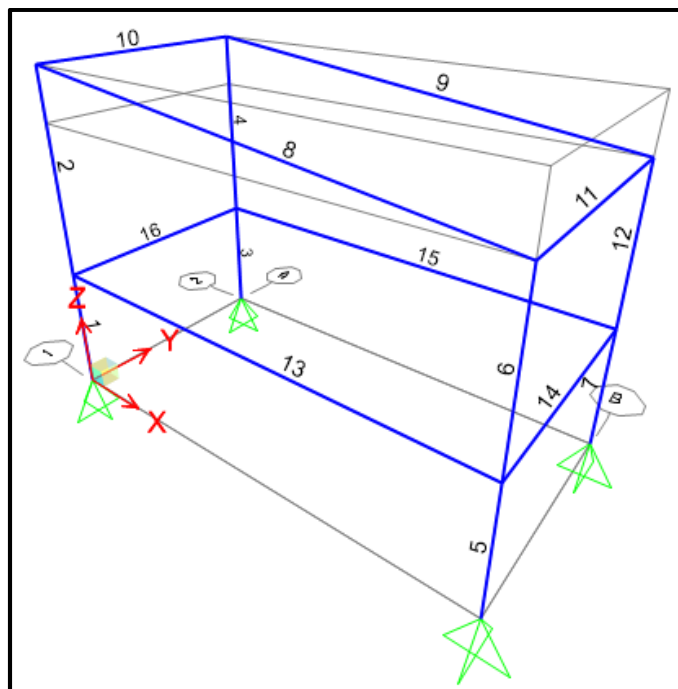


Figura 3-7. Designación de los elementos estructurales. Fuente: Autores.

Tabla 3-11. Diagramas de momentos y cortantes.

DIAGRAMAS DE MOMENTOS Y CORTANTES		
ELEMENTO	TIPO	DIAGRAMAS
1	Estructura de soporte	Dist Load (2-dir) 0, KN/m at 0,5 m Positive in -2 direction Shear V2 -0,013 KN at 0,5 m Moment M3 0,0063 KN-m at 0,5 m Deflection (2-dir) 1,770E-06 m at 0,25 m Positive in -2 direction

Tabla 3-11. Continuación

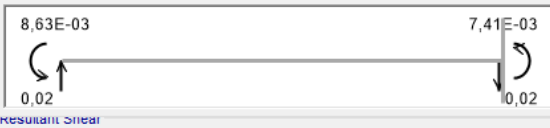
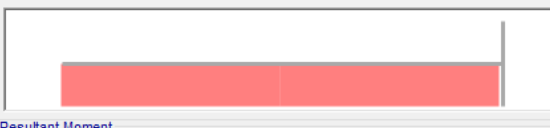
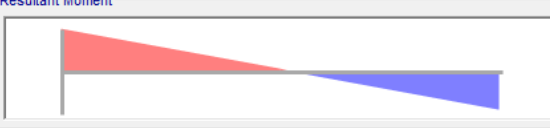
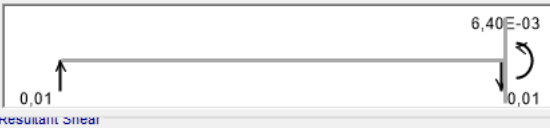
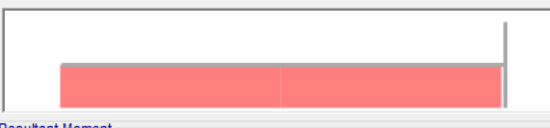
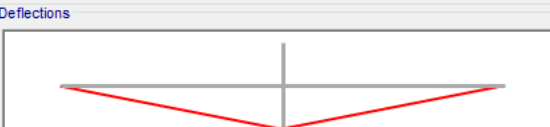
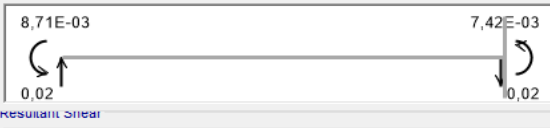
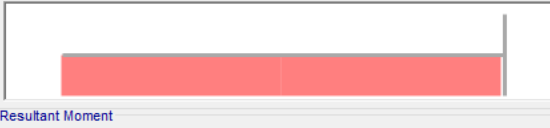
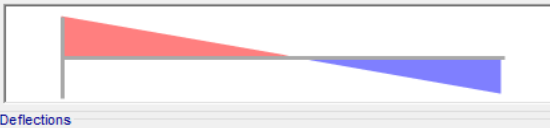
DIAGRAMAS DE MOMENTOS Y CORTANTES		
ELEMENTO	TIPO	DIAGRAMAS
2	Estructura de soporte	 Dist Load (2-dir) 0, KN/m at 0,8 m Positive in -2 direction
		 Shear V2 -0,02 KN at 0,8 m
		 Moment M3 -0,0086 KN-m at 0, m
		 Deflection (2-dir) -8,766E-07 m at 0,4 m Positive in -2 direction
3	Estructura de soporte	 Dist Load (2-dir) 0, KN/m at 0,5 m Positive in -2 direction
		 Shear V2 -0,013 KN at 0,5 m
		 Moment M3 0,0064 KN-m at 0,5 m
		 Deflection (2-dir) 1,803E-06 m at 0,25 m Positive in -2 direction
4	Estructura de soporte	 Dist Load (2-dir) 0, KN/m at 0,8 m Positive in -2 direction
		 Shear V2 -0,02 KN at 0,8 m
		 Moment M3 -0,0087 KN-m at 0, m
		 Deflection (2-dir) -9,271E-07 m at 0,4 m Positive in -2 direction

Tabla 3-11. Continuación

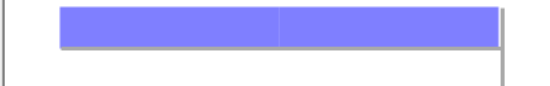
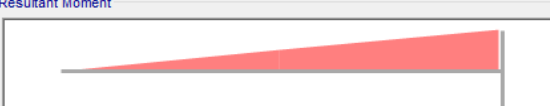
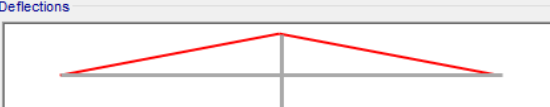
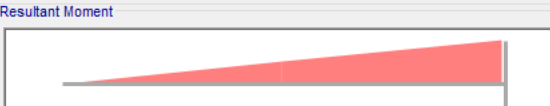
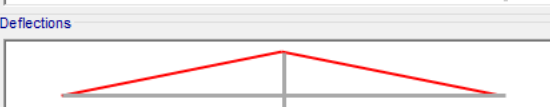
DIAGRAMAS DE MOMENTOS Y CORTANTES		
ELEMENTO	TIPO	DIAGRAMAS
5	Estructura de soporte	 Dist Load (2-dir) 0, KN/m at 0,5 m Positive in -2 direction
		 Shear V2 0,013 KN at 0,5 m
		 Moment M3 -0,0064 KN-m at 0,5 m
		 Deflection (2-dir) -1,796E-06 m at 0,25 m Positive in -2 direction
6	Estructura de soporte	 Dist Load (2-dir) 0, KN/m at 0,6 m Positive in -2 direction
		 Shear V2 0,02 KN at 0,6 m
		 Moment M3 -0,0066 KN-m at 0,6 m
		 Deflection (2-dir) -4,006E-07 m at 0,3 m Positive in -2 direction
7	Estructura de soporte	 Dist Load (2-dir) 0, KN/m at 0,5 m Positive in -2 direction
		 Shear V2 0,013 KN at 0,5 m
		 Moment M3 -0,0063 KN-m at 0,5 m
		 Deflection (2-dir) -1,776E-06 m at 0,25 m Positive in -2 direction

Tabla 3-11. Continuación

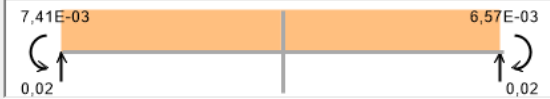
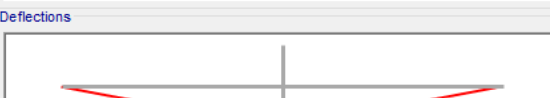
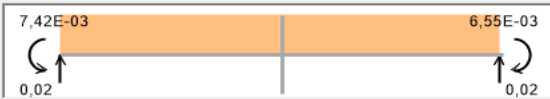
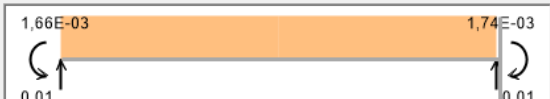
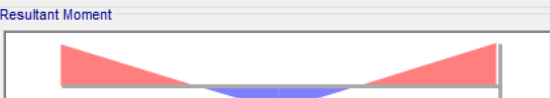
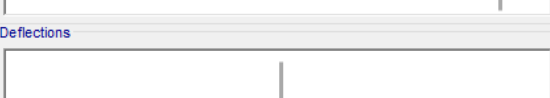
DIAGRAMAS DE MOMENTOS Y CORTANTES		
ELEMENTO	TIPO	DIAGRAMAS
8	Viga de borde	 Dist Load (2-dir) 2,620E-02 KN/m at 0,90554 m Positive in -2 direction
		 Resultant Shear Shear V2 -0,024 KN at 0, m
		 Resultant Moment Moment M3 -0,0074 KN-m at 0, m
		 Deflections Deflection (2-dir) 7,651E-06 m at 0,90554 m Positive in -2 direction
9	Viga de borde	 Dist Load (2-dir) 2,620E-02 KN/m at 0,90554 m Positive in -2 direction
		 Resultant Shear Shear V2 -0,024 KN at 0, m
		 Resultant Moment Moment M3 -0,0074 KN-m at 0, m
		 Deflections Deflection (2-dir) 7,821E-06 m at 0,90554 m Positive in -2 direction
10	Viga de borde	 Dist Load (2-dir) 2,637E-02 KN/m at 0,9 m Positive in -2 direction
		 Resultant Shear Shear V2 0,012 KN at 0,9 m
		 Resultant Moment Moment M3 -0,0017 KN-m at 0,9 m
		 Deflections Deflection (2-dir) 8,855E-07 m at 0,45 m Positive in -2 direction

Tabla 3-11. Continuación

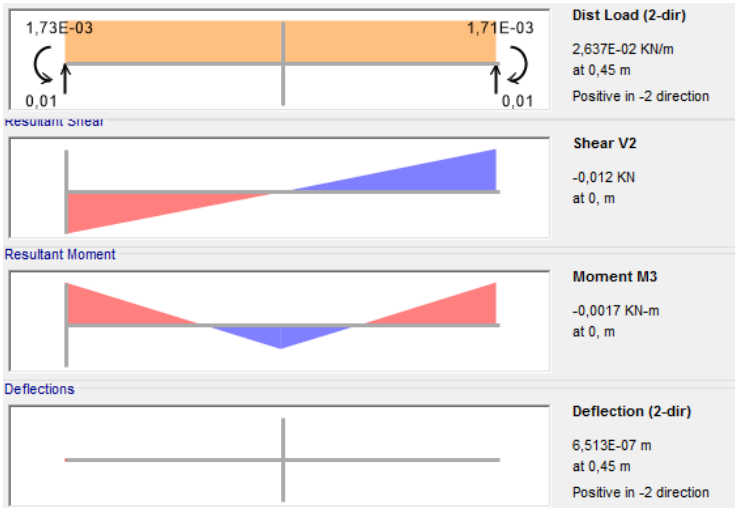
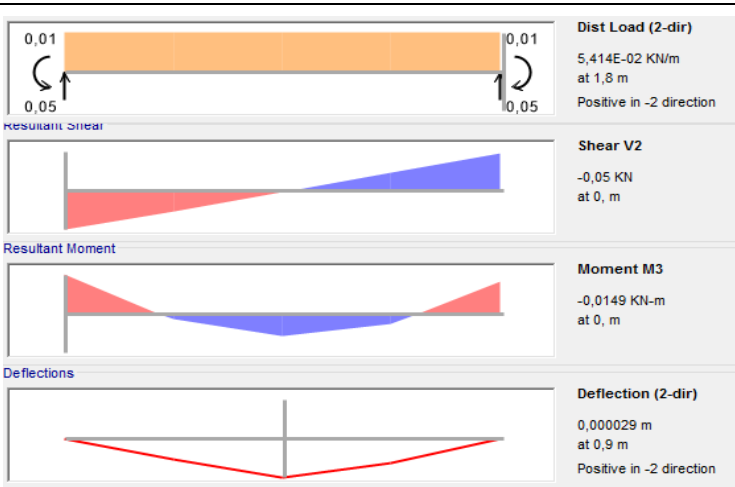
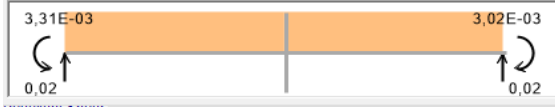
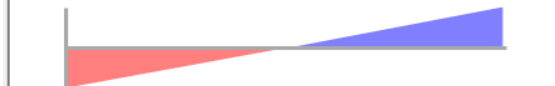
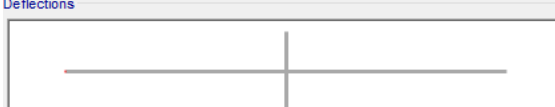
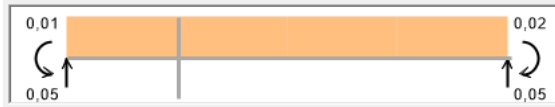
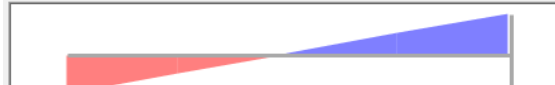
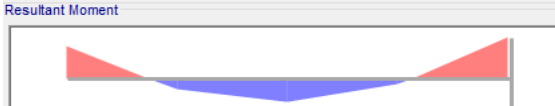
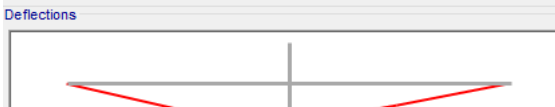
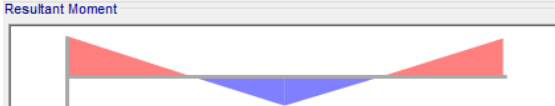
DIAGRAMAS DE MOMENTOS Y CORTANTES		
ELEMENTO	TIPO	DIAGRAMAS
11	Viga de borde	 Dist Load (2-dir) 2,637E-02 KN/m at 0,45 m Positive in -2 direction Resultant Shear Shear V2 -0,012 KN at 0, m Resultant Moment Moment M3 -0,0017 KN-m at 0, m Deflections Deflection (2-dir) 6,513E-07 m at 0,45 m Positive in -2 direction
12	Estructura de soporte	 Dist Load (2-dir) 0, KN/m at 0,6 m Positive in -2 direction Resultant Shear Shear V2 0,02 KN at 0,6 m Resultant Moment Moment M3 -0,0066 KN-m at 0,6 m Deflections Deflection (2-dir) -4,555E-07 m at 0,3 m Positive in -2 direction
13	Estructura de rigidización	 Dist Load (2-dir) 5,414E-02 KN/m at 1,8 m Positive in -2 direction Resultant Shear Shear V2 -0,05 KN at 0, m Resultant Moment Moment M3 -0,0149 KN-m at 0, m Deflections Deflection (2-dir) 0,000029 m at 0,9 m Positive in -2 direction

Tabla 3-11. Continuación

DIAGRAMAS DE MOMENTOS Y CORTANTES		
ELEMENTO	TIPO	DIAGRAMAS
14	Estructura de rigidización	 Dist Load (2-dir) 5,414E-02 KN/m at 0,45 m Positive in -2 direction
		 Shear V2 -0,025 KN at 0, m
		 Moment M3 -0,0033 KN-m at 0, m
		 Deflection (2-dir) 8,885E-07 m at 0,45 m Positive in -2 direction
15	Estructura de rigidización	 Dist Load (2-dir) 5,414E-02 KN/m at 0,45 m Positive in -2 direction
		 Shear V2 0,051 KN at 1,8 m
		 Moment M3 -0,0151 KN-m at 1,8 m
		 Deflection (2-dir) 0,000029 m at 0,9 m Positive in -2 direction
16	Estructura de rigidización	 Dist Load (2-dir) 5,414E-02 KN/m at 0, m Positive in -2 direction
		 Shear V2 -0,025 KN at 0, m
		 Moment M3 -0,0032 KN-m at 0, m
		 Deflection (2-dir) 9,673E-07 m at 0,45 m Positive in -2 direction

Fuente: Autores.

3.2.3. Fase empírica

Para el ensayo de este instrumento de laboratorio, se diseñó una bandeja de las mismas dimensiones en RH, el cual es un material en madera que está cubierto con una lámina impermeable. Además, este material tiene un espesor de 15 mm lo cual hace sea capaz de soportar el peso de la arena y el agua que circulan sobre ella.

El proceso de tamizaje con los requerimientos establecidos para el volumen de arena se realizó directamente en la bandeja de madera ya especificada anteriormente, véase Figura 3-8.



Figura 3-8. Proceso completo tamizaje. Fuente: Autores.

Se seleccionó únicamente la arena de planta como lecho rugoso para realizar las simulaciones en el equipo de laboratorio debido a sus características granulares; la arena de peña se caracteriza por su finura en el tamaño de sus granos, lo cual hizo imposible la implementación de esta en el Simulador de flujos de ríos, por la formación de lodos al entrar en contacto con el agua.

Para simular la pendiente se colocaron ladrillos Santa Fe macizo. Con ellos se elevó y se varió la pendiente que se quiere dejar de funcionalidad del instrumento. Con la arena dentro de la bandeja y elevada con 4 ladrillos se obtiene una pendiente del 15 %, se observa que la arena no sufre deslizamientos por gravedad, véase Figura 3-19.



Figura 3-9. Mediciones previas. Fuente: Autores.

Luego de tener la bandeja se definió la entrada y salida del agua. Donde se pusieron dos láminas de acero en el centro de la parte inferior de la bandeja, a 15 cm separadas entre sí.

En medio de ellas se encuentra un acople de doble rosca por el cual se realiza la salida del agua. La función de las láminas es soportar una tela que será el primer filtro para detener el arrastre de sedimentos y evitar gran pérdida del material pétreo de la bandeja, véase Figura 3-10.



Figura 3-10. Instalación para la disposición final del agua. Fuente: Autores.

Durante el procedimiento anterior se presentó imprevisto, en el que no se tuvo en cuenta la dimensión del acople y tuvieron que ser removidas las láminas. Para curar la marca de los huecos que dejaron los tornillos, se aplicó cemento blanco, véase Figura 3-11.



Figura 3-11. Material para reparar. Fuente: Autores.

En la parte superior de la bandeja se cortó un rectángulo de 12 x 5 cm, en el cual será la entrada del agua que proviene de un vertedero. Este vertedero para esta parte experimental se diseñó en triplex y está pegado al RH atornillado y amarrado, con el fin de garantizar que resista el peso del agua. Para evitar que la madera absorbiera el agua del veredero, se revistió el interior con papel contac, véase Figura 3-12.

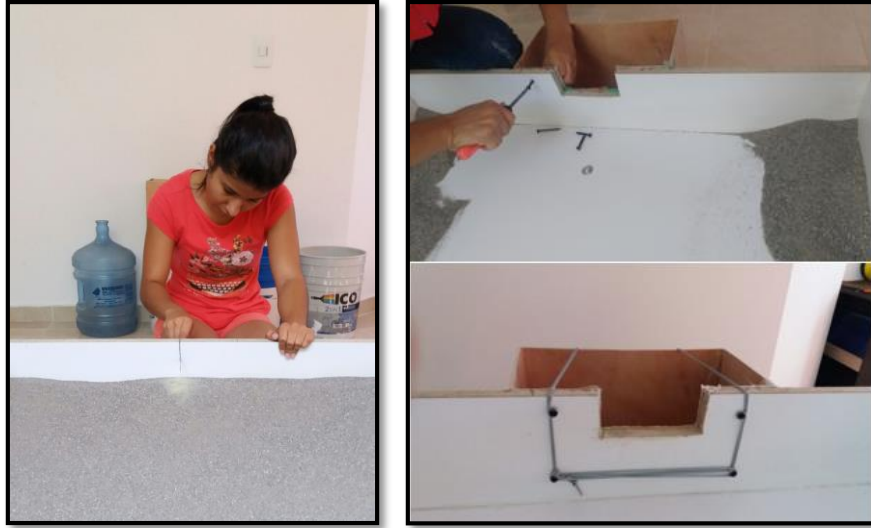


Figura 3-12. Instalación vertedero rectangular. Fuente: Autores.

Se instaló el potenciómetro para poder realizar las variaciones necesarias en el caudal para realizar distintas simulaciones que presenten un comportamiento más real. Inicialmente se realizó un ensayo del funcionamiento de la misma con la bomba de agua, para encontrar las falencias correspondientes y poder realizar las adecuaciones necesarias para obtener un funcionamiento óptimo de la bomba, véase Figura 3-13.

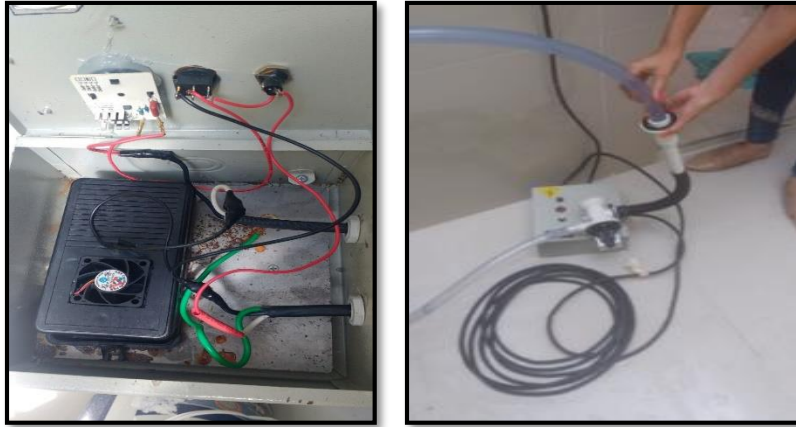


Figura 3-13. Potenciómetro acoplado al sistema de bombeo. Fuente: Autores.

Una vez calculado el volumen del recipiente donde se efectuaron los ensayos, en este caso correspondiente a 15,34 Litros se procedió a las mediciones de tiempo donde se realizan 4 tomas cada una en el voltaje que trabaja la bomba normalmente sin alteraciones en el potenciómetro. Con los datos obtenidos de las mediciones correspondientes se calcula un caudal promedio, donde se establece que a 60 Hz la bomba tiene un rendimiento de 17,28 L/min, véase Figura 3-14.



Figura 3-14. Ensayos de la bomba de agua. Fuente: Autores.

El vertedero de excesos cumple dos funciones fundamentales en el instrumento de laboratorio, el primero es la medición del caudal, donde se podrá realizar la comparación con el caudal arrojado por el potenciómetro, con estos datos se calcula el margen de error con lo que se está trabajando y así saber la variación en los datos a obtener; el segundo uso que permitirá un debido funcionamiento es como disipador de energía cuando se trabajen con caudales máximos en la bomba y con esto no presentar gran arrastre de material en la parte inicial de la simulación.

El tamaño del vertedero de excesos está sujeto a cambios según las próximas pruebas a realizar en potencias máximas y mínimas de la bomba, véase Figura 3-15.



Figura 3-15. Prueba del vertedero rectangular. Fuente: Autores.

Cuando se realizó prueba del vertedero se detectó que presentaba algunas fugas de agua en las intersecciones. Debido a esto, se aplica silicona en todas las uniones de la bandeja y el vertedero, véase Figura 3-16.



Figura 3-16. Aplicación de silicona. Fuente: Autores.

Se realizaron distintas modificaciones al sistema eléctrico de la bomba, inicialmente se instauro un potenciómetro el cual variaría el voltaje del motor, por medio de este se establecerían diferentes caudales para el Simulador de flujos de ríos, se realizaron las diferentes pruebas pero en el segundo ensayo el potenciómetro sufrió un cortocircuito el cual se procedió a reparar, en segunda instancia por recomendaciones del electromecánico se instala un disipador de calor para no presentar daños ni accidentes más adelante, en esta reparación se ubica un extractor con su respectiva rejilla. Un cambio que representaría datos más exactos fue el cambio de perilla por una que tuviera estaciones y se supiera con mayor precisión el amperaje con el que está trabajando la bomba, véase Figura 3-17.



Figura 3-17. Potenciómetro modificado. Fuente: Autores.

3.2.3.1. Cambio de equipo de bombeo e inclusión de instrumento de medición.

Los ensayos realizados con la bomba centrífuga de agua fueron óptimos hasta el momento de realizar las respectivas variaciones en el potenciómetro, se presentó el fallo de la bomba de agua cuando se reducía el amperaje, la sensibilidad a los cambios no la representaba significativamente. La bomba durante su uso y en el momento de efectuar los cambios producía un ruido que generaba incertidumbre sobre su buen desempeño al momento de realizar las simulaciones en el instrumento de laboratorio. La opinión de expertos en el tema sugirió el cambio de este equipo, para evitar accidentes producidos por un cortocircuito de la bomba durante su funcionamiento. El paso directo del agua inmediatamente después de terminar el proceso de ensayo de la bomba, fue otro motivo para tomar la decisión de cambiar la bomba de agua.

Como se debe conocer el caudal con el que se está simulando, la efectividad de la bomba debe ser elevada, una electrobomba con una mayor capacidad podría representar adecuadamente los cambios en el caudal sin presentar ningún tipo de avería. Al disminuir la potencia de la bomba directamente desde el potenciómetro se corre el riesgo de daño inmediato por el aumento de presión en esta, por tal motivo y siguiendo las sugerencias de

expertos, se busca una electrobomba que sea sensible a los cambios producidos por el regulador de potencia y que acoplada a un presostato interrumpa el funcionamiento del motor al llegar a un valor excesivo de presión.

No se debe seleccionar una bomba de gran potencia que trabaje con un caudal elevado, porque con este no se podrían realizar adecuadamente las simulaciones al presentar gran arrastre de material el cual arrojaría datos erróneos al momento de analizar los resultados. La regulación de presión permitirá trabajar sin contemplar el riesgo de avería, incendios o demás accidentes producto de una sobrecarga del motor de la bomba de agua.

La bomba que se adquirió en reemplazo de la anterior, cuenta con las siguientes características, véase Tabla 3-12:

Tabla 3-12. Características de la bomba

ELECTROBOMBA AP-4	
Potencia	½ HP
Carga (H)	7 – 30 m
Caudal (Q)	5 – 31 lpm
H máx.	34 m
Q máx.	33 lpm

Fuente: Autores.

La electrobomba cuenta con un sistema de enfriamiento interconectado con el paso del agua a través de esta y un ventilador externo que no permiten en el calentamiento excesivo de este equipo de bombeo durante horas de trabajo continuo.

La curva de rendimiento es un indicador entre la altura y el caudal de la bomba, el modelo AP-4 viene especificado de la siguiente manera, véase figura 3-18.

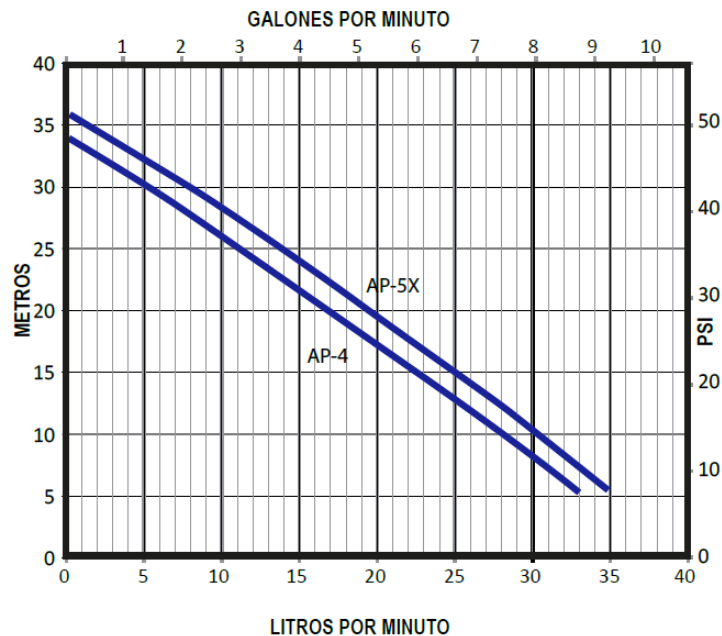


Figura 3-18. Curva de rendimiento bomba Modelo AP-4. Fuente: Manual Altamira.

La electrobomba fue instalada con los accesorios en PVC necesarios para su óptimo funcionamiento que se describen a continuación, véase Tabla 3-13:

Tabla 3-13. Accesorios sistema de bombeo.

CANTIDAD	TIPO	DIÁMETRO EN PULGADAS
1	Tubería	1
1	Codo 90°	1
1	Válvula de pie	1
1	Válvula de bola	1
2	Adaptadores macho	1

Fuente: Autores.

El presostato fue adquirido en un control automático de presión para bombas eléctricas, cuenta con un manómetro y protección contra abatimiento, es un equipo que le permite a la bomba disminuir su caudal por medios auxiliares sin que esta sufra daños permanentes o averías durante su funcionamiento. La altura máxima de impulsión del sistema de bombeo

será de 0,60 m; el presurizador permitirá que desde el caudal de trabajo más bajo la electrobomba continúe su funcionamiento normal; el presostato al estar conectado directamente a la electrobomba, véase Figura 3-19, en el momento que se suspenda totalmente el paso del agua, en 15 segundos la electrobomba se apagará automáticamente.



Figura 3-19. Presurizador y electrobomba. Fuente: Autores.

Se realizaron los ensayos correspondientes con el equipo de bombeo y el potenciómetro, se presentaron resultados satisfactorios al implementar el caudal más alto, donde se regulaba por medio del potenciómetro y la válvula de bola ubicada en el presurizador, el funcionamiento de la electrobomba es adecuado y no presenta aumento de presión en el manómetro. La reducción de caudal para el siguiente ensayo, se realizó con la perilla del potenciómetro, se observó un desempeño de la electrobomba apropiado, sin alteraciones en el manómetro ni recalentamiento de la misma. Se observa el cambio de caudal durante los ensayos directamente, véase Figura 3-20.



Figura 3-20. Ensayo del sistema de bombeo. Fuente: Autores.

El caudal de trabajo más pequeño se ajustó con la perilla del potenciómetro en su estación más baja; al seleccionar este caudal se presentaron fallas durante este ensayo del equipo, la electrobomba no presentó problemas durante los 3 primeros minutos de uso aproximadamente, al pasar este tiempo se suspende el paso del agua y el caudal cambia de manera inesperada, se realiza tres veces el procedimiento, donde sucede lo mismo.

Se comunica al proveedor lo que ocurrió y se muestra directamente, este aseguró que se debía suspender el uso del potenciómetro, porque al disminuir al máximo el voltaje de trabajo de la electrobomba esta puede presentar una falla automática en el motor generando un daño permanente y sugiere solo trabajar el cambio del caudal con la válvula de bola. Al seleccionar solo esta válvula como variador o seleccionador de caudal, se modifica por una con mejores características que abarcan durabilidad y facilidad en su trabajo y se instala un sistema de purga para la electrobomba, véase Figura 3-21:



Figura 3-21. Válvula de bola de bronce y sistema de purga. Fuente: Autores.

3.2.4. Fase analítica y fase de difusión

Al eliminar el equipo para selección y medición del caudal se implementó un caudalímetro o rotámetro, el cual, es un instrumento de medición que permite un acceso visual más fácil al caudal de trabajo para los practicantes, véase Figura 3-22; se ubica inmediatamente después de la válvula de bola proveniente del presurizador. El caudalímetro se encuentra aforado en L/h (litros por hora), por tal motivo se debe realizar la conversión respectiva para el cambio de unidades a m^3/seg y trabajar un solo sistema de medición en todo el proceso de simulación en el equipo de laboratorio.



Figura 3-22. Caudalímetro o rotámetro. Fuente: Autores.

Las características del caudalímetro son las siguientes, véase Tabla 3-14:

Tabla 3-14. Especificaciones técnicas del caudalímetro.

Material	Plástico y Metal
Rango de flujo de medida	160 – 1600 L/h
Presión de trabajo	$\leq 0,6$ MPa
Temperatura de trabajo	0 – 60 °C
Clase de precisión	$\pm 4\%$

Fuente: Lixe Colombia.

La comprobación de caudales se realizó en diferentes valores, véase Figura 3-23, para conocer si lo que este proporciona se asemeja en alto grado a la realidad, se desarrollaron 10 ensayos, determinando el volumen del recipiente donde se realizara este procedimiento.

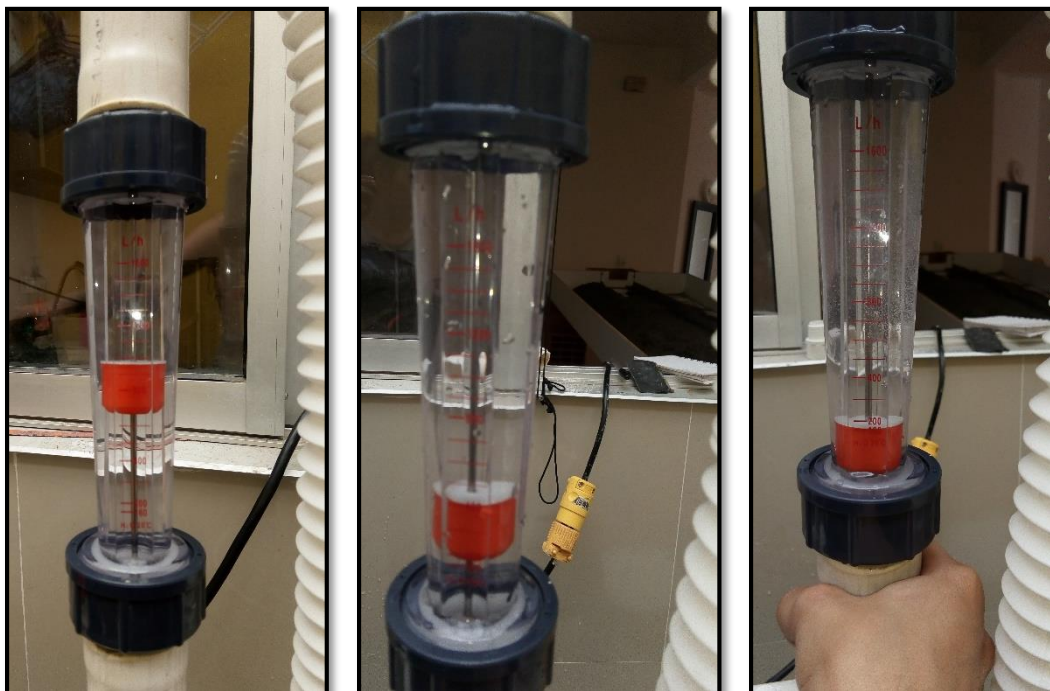


Figura 3-23. Ensayo caudalímetro. Fuente: Autores.

El volumen del recipiente corresponde a 15,34 Litros, se tomó el tiempo en el que se alcanzó el volumen deseado y con estos datos se calculó el caudal que estaba trabajando la electrobomba en ese instante, los resultados se muestran a continuación, véase Tabla 3-15. En los datos obtenidos se observa que algunos se encuentran dentro del rango de precisión que ofrece el equipo ($\pm 4\%$), lo que indica un error humano en el momento de realizar las mediciones del tiempo, lo cual representa las variaciones correspondientes entre el caudal observado y el calculado.

Tabla 3-15. Ensayos caudalímetro.

VERIFICACIÓN DE CAUDALES					
Ensayo N°	Caudalímetro (L/h)	Volumen (L)	Tiempo		Caudal Hallado (L/h)
			Segundos	Horas	
1	1600	15,34	32,23	0,00895	1713,43
2	1600	15,34	32,13	0,00893	1718,77
3	1600	15,34	33,39	0,00928	1653,91
4	1000	15,34	57,03	0,01584	968,33
5	1000	15,34	59,49	0,01653	928,29
6	930	15,34	57,83	0,01606	954,94

Tabla 3-15. Continuación

VERIFICACIÓN DE CAUDALES					
Ensayo N°	Caudalímetro (L/h)	Volumen (L)	Tiempo		Caudal Hallado (L/h)
7	400	15,34	122	0,03389	452,66
8	400	15,34	123	0,03417	448,98
9	160	15,34	242	0,06722	228,20
10	160	15,34	246	0,06833	224,49

Fuente: Autores.

Se acopló el sistema de bombeo al vertedero rectangular para ensayar el funcionamiento de este; inicialmente se planteó el uso de este equipo para realizar las mediciones del caudal como método de corroboración de información, cuando el simulador de flujos de ríos no sufre ningún tipo de alteración en su inclinación, es decir cuando la pendiente sea 0, el vertedero arrojará datos confiables para los practicantes, pero no siempre se podrá tener este escenario en el instrumento de laboratorio; al tener una pendiente mayor a 0, la lámina de agua que tenga el vertedero sufrirá este mismo fenómeno generando lectura erróneas y datos poco confiables para las simulaciones realizadas, por esto, se determinó el uso del vertedero rectangular únicamente como disipador de energía para el simulador de flujos de ríos.

Al realizar el ensayo anterior se presentó gran porcentaje de finos al final del tanque de arena, se realiza un nuevo proceso de tamizaje y lavado del material granular, donde se emplea el tamiz N° 30 con abertura de 0,6 mm, se usa como fondo, lo que pasa después de este se desecha por la cantidad de finos que este material contiene. El lecho rugoso está comprendido en lo que pasa desde el tamiz N° 10 y queda retenido en el tamiz N° 30. La limpieza del material granular se realizó para eliminar completamente las partículas finas que quedaron después del proceso de tamizaje, véase Figura 3-24.



Figura 3-24. Limpieza del material granular. Fuente: Autores.

La densidad de la arena para establecer las características precisas del lecho rugoso que se está empleando se realizó con el ensayo de densidad aparente y densidad en húmedo (material saturado de agua), donde se conoce la relación existente entre la masa de la arena ocupada en un volumen conocido. Se ubica inicialmente la probeta correspondiente a 100 ml o 100 cm³, véase Figura 3-25, en la balanza para conocer su masa, la cual fue de 97,37 gr.



Figura 3-25. Probeta aforada. Fuente: Autores.

Una muestra del material granular seco se coloca en la probeta hasta alcanzar el volumen deseado de 100 cm³ y se ubica en la balanza para conocer la masa que hay en ese volumen determinado, véase Figura 3-26, no se debe tratar de compactar la arena, ya que generaría datos erróneos.

El procedimiento se realizó 5 veces para obtener un resultado más preciso de la densidad aparente del lecho rugoso del simulador de flujos de ríos, a la masa obtenida debe restársele la masa de la probeta vacía hallada anteriormente. Los resultados se muestran a continuación, véase Tabla 3-16.

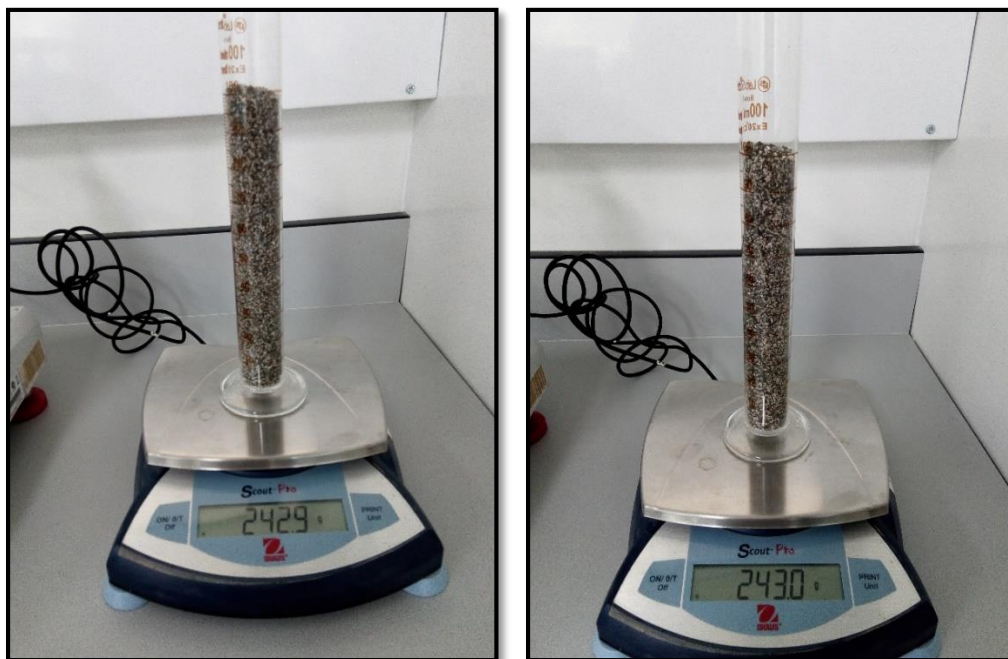


Figura 3-26. Ensayo de densidades. Fuente: Autores.

Tabla 3-16. Resultados obtenidos

ENSAYOS	MASA (gr)
1	149,53
2	148,83
3	149,63
4	149,03
5	149,13
Promedio	149,23

Fuente: Autores.

Se efectúa la división concerniente para obtener la densidad aparente del material granular.

$$\gamma = \frac{149,23 \text{ gr}}{100 \text{ cm}^3} \quad (11)$$
$$\gamma = 1,49 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

La densidad en húmedo, se realizó 3 veces el procedimiento, se seleccionó el material granular usado anteriormente y se saturó de agua, véase Figura 3-27 para simular las circunstancias a las que se encontrará expuesto en los laboratorios realizados en el Simulador de flujos de ríos.

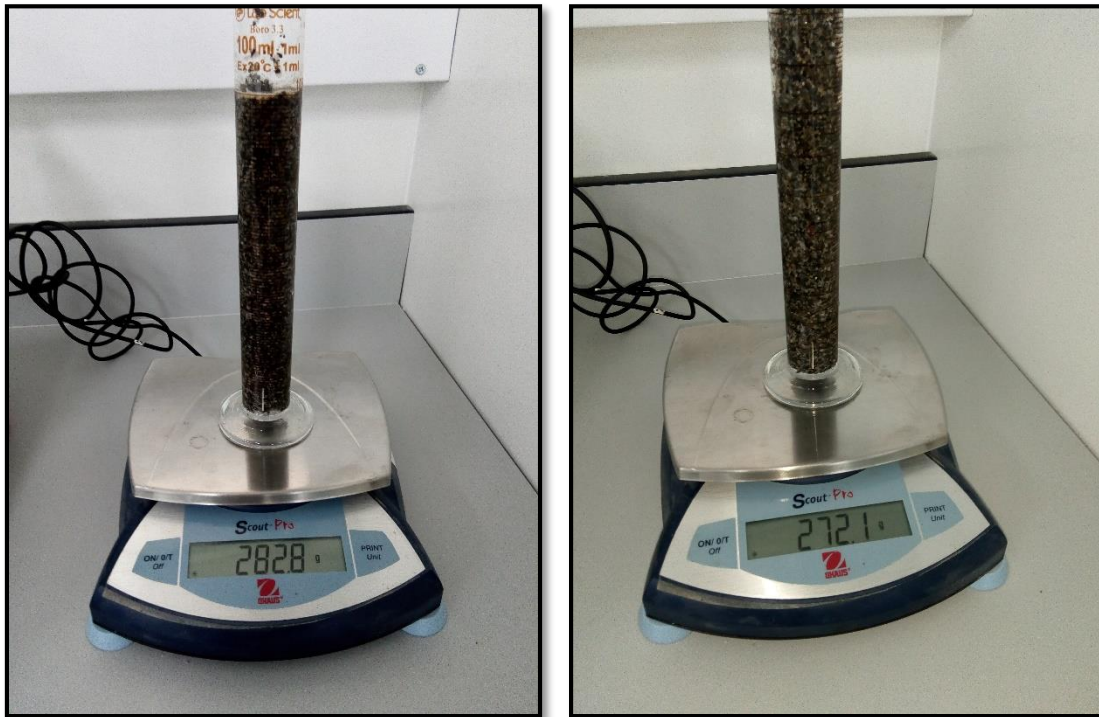


Figura 3-27. Densidad en húmedo. Fuente: Autores.

La densidad se obtiene de igual manera, restando la masa de la probeta vacía a los ensayos realizados con el material granular, véase Tabla 3-17 el promedio de la masa se divide en el volumen conocido anteriormente:

Tabla 3-17. Resultados obtenidos

ENSAYOS	MASA (gr)
1	181,23
2	189,43
3	178,73
Promedio	183,13

Fuente: Autores.

Se reemplazan las incógnitas de la ecuación para obtener la densidad aparente del material granular.

$$\gamma = \frac{183,13 \text{ gr}}{100 \text{ cm}^3} \quad (12)$$
$$\gamma = 1,83 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

Con esto podemos conocer la masa total del material granular implementado para el lecho rugoso en todo el volumen del Simulador de flujos de ríos, en seco serán necesarios 313,79 Kg de arena lavada con un tamaño de grano máximo de 2 mm y mínimo de 0,6 mm.

3.3. Descripción de los productos finales

3.3.1. Proceso constructivo

Gracias a la empresa MONTAJES SIP, encargada de la construcción del diseño estructural de este instrumento de laboratorio, objeto de esta tesis; pudimos acceder a sus instalaciones y hacer un continuo seguimiento sobre el proceso constructivo.

Tanque de arena: La lámina de acero inoxidable, luego de ser cortada según los planos de diseño (ver anexo A), es pasada por la máquina dobladora, como se muestra en la figura 3-28.



Figura 3-28 Lámina de acero cortada y doblada. Fuente: Autores

Luego de ello, se verifican las medidas del tanque de arena. Primero se verificó con un pie de rey el espesor de la lámina (ver figura 3-29) y posteriormente se verificó las dimensiones de todos sus lados (ver figuras 3-30 a la 3-33)



Figura 3-29 Verificación de medida del espesor de la lámina de acero inoxidable.
Fuente: Autores.



Figura 3-30 Verificación de medida de pestaña del tanque de arena. Fuente: Autores.



Figura 3-31 Verificación de medida del alto del tanque de arena. Fuente: Autores.



Figura 3-32 Verificación de medida del largo del tanque de arena. Fuente: Autores.



Figura 3-33 Verificación de medida del ancho del tanque de arena. Fuente: Autores.

Es necesario pulir los bordes si en el proceso de cortado deja aristas (ver figura 3-34), todo con el fin que en la soldadura sea exitosa.



Figura 3-34 Puliendo aristas del tanque de arena. Fuente: Autores.

Para poder soldar, es necesario juntar las uniones con regleta que hace presión y paulatinamente se le dan golpes con un martillo hasta dejarlas lo más pegadas posible (ver figura 3-35).



Figura 3-35 Juntando las uniones o esquinas del tanque de arena. Fuente: Autores.

Cumplido los pasos anteriores, se procede a soldar como se muestra a continuación (ver figura 3-36).



Figura 3-36 Soldadura del tanque de arena. Fuente: Autores

Los cortes del tanque de arena se realizaron posterior a la soldadura, debido a que el tanque se arena con la soldadura, permite estabilidad de la lámina de acero inoxidable, lo que garantiza que sea cortado según los planos de diseño. Además, no es posible que la dobladora realizara el proceso posterior a los cortes de la lámina que se muestran en la figura 3-37.



Figura 3-37 Cortes tanque de arena. Fuente: Autores

Estructura de soporte tanque de arena: la tubería fue cortada según los planos de diseño

(ver anexo A) y se hace una armadura con algunos puntos de soldadura mientras es nivelada para verificar si cada una de sus partes se encuentran correctamente (ver figura 3-38).



Figura 3-38 Armadura de estructura de soporte. Fuente: Autores

Cuando la estructura se encuentra nivelada se procede a realizar la soldadura de cada una de las uniones de la tubería y de las bisagras como se muestra en la figura 3-39.



Figura 3-39 Soldadura de estructura de soporte. Fuente: Autores

También se realiza la soldadura de las láminas de soporte de las cuatro patas del instrumento (ver figura 3-40)

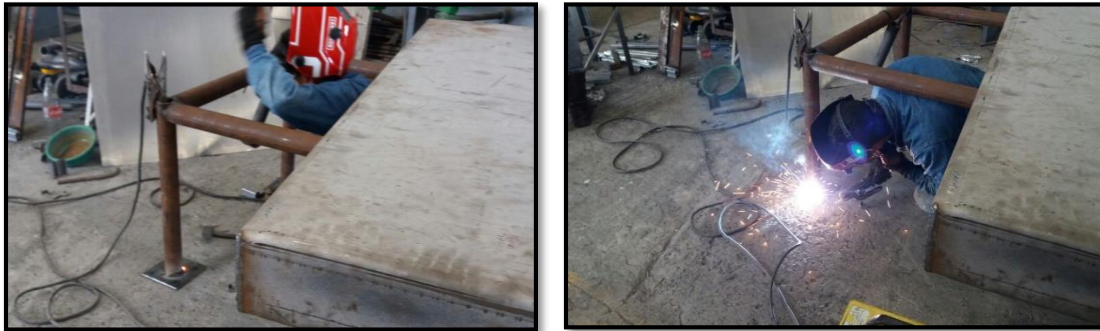


Figura 3-40 Soldadura de láminas de estructura de soporte. Fuente: Autores

Ya armada la estructura, se le aplica fosfatizante concentrado y desengrasante para retirar las impurezas como el óxido (ver figura 3-41) con un trapo húmedo y otro seco.



Figura 3-41 Aplicación fosfatizante concentrado y desengrasante. Fuente: Autores

Así pues, la estructura ya se encuentra lista para ser pintada. Se le aplica 3 capas de pintura industrial electrosoldada en los tubos, láminas de soporte y bisagras (ver figura 3-42).



Figura 3-42 Proceso de pintura. Fuente: Autores

Posteriormente, se lleva al horno a una temperatura de 180° para adherir la pintura a la estructura y darle una tonalidad brillante como se muestra en la figura 3-43.



Figura 3-43 Proceso de pintura. Fuente: Autores

Se cortan los tubos interiores, que permiten el que instrumento cambie de pendiente (ver figura 3-44), luego se deben pegar los pasadores de estos tubos, los que garantizan el movimiento del cambio de pendiente.



Figura 3-44 Tubos internos. Fuente: Autores

Sobre los cuatro pasadores están las platinas que unen el bastidor con el tanque de arena, pero antes de soldar estas piezas se junta el gato tijera con los tubos internos por medio de un tubo transversal (ver figura 3-45 y 3-46).



Figura 3-45 Vista frontal. Fuente: Autores



Figura 3-46 Vista lateral. Fuente: Autores

Estructura de soporte tanque de agua: el diseño de la estructura está construido sobre ángulos de 1 ¼” según los planos de diseño y las patas de soporte de acero al carbón redondo de 3”. Esta estructura está sujeta a la estructura de soporte del tanque de arena con el fin que sea un instrumento monolítico (ver figura 3-47).



Figura 3-47 Construcción de estructura de soporte de tanque de agua. Fuente: Autores

Modificaciones e imprevistos: Luego de la revisión realizada por el decano de la facultad Ingeniero John Jairo gil y el tutor de la tesis Iván Acosta, a MONTAJES SIP, se determinó que la estructura debía ser rigidizada con dos tubos al carbón diagonales de 3”, uno en cada lateral, con el fin de impedir movimientos en la estructura y reforzando la unión entre las estructuras de soportes, como se muestra en la figura 3-48.

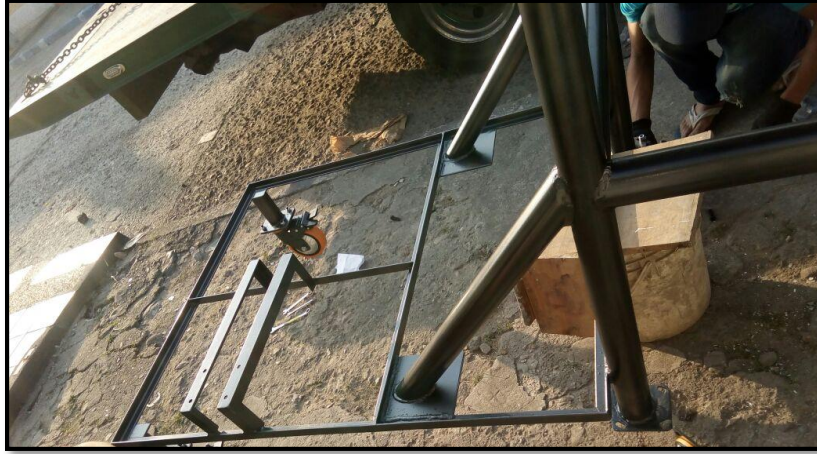


Figura 3-48 Tubos para rigidización. Fuente: Autores

El gato tijera estaba planteado desde el diseño que iba soltado a la estructura, pero durante las revisiones de las representantes de la universidad, se determinó que este debía sujeto a la estructura por medio de tornillos, con el fin que permitieran retirar en caso dado que requiriera un mantenimiento o el cambio del mismo.

La universidad sugirió que el instrumento permitiera movilizarse con facilidad, para ello realizó la compra de rodalanes en nailon con freno, de capacidad portante de 350 kg cada uno. MONTAJES SIP, hizo la instalación de los rodantes y así se pudo trasladar toda la estructura hacia las instalaciones de la Universidad, para allí, continuar con los procesos constructivos, como lo es la instalación de la red de tubería.

3.4. Conclusión del capítulo

La ingeniería civil comprende distintas áreas del conocimiento, desarrollar una en específico no excluye las demás disciplinas, cada una comprende un engranaje, que las hace indispensable para resolver un problema en específico. Para el desarrollo del Simulador de flujos de ríos como instrumento de laboratorios de la línea de aguas, fue necesario el uso de softwares estructurales y de diseño, diferentes ensayos de suelos y de las mismas prácticas hidráulicas, véase Figura 3-49; esto como conjunto para garantizar el óptimo funcionamiento del equipo de laboratorio.

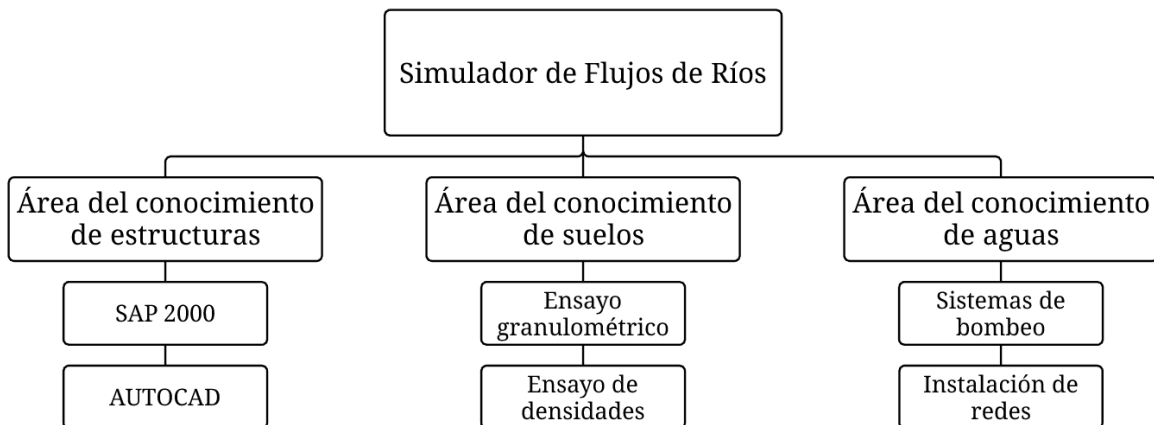


Figura 3-49. Áreas ingenieriles aplicadas.

El Simulador de flujos de ríos, es un insumo para los laboratorios de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio; realizado con gran empeño, para el uso de la comunidad estudiantil y planta docente, que vean en este instrumento, una herramienta para fomentar la investigación y el desarrollo de nuevos proyectos en la facultad de Ingeniería Civil.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se presenta el Simulador de flujos de ríos con sus respectivos diseños, pruebas, modelaciones y ensayos elaborados para el óptimo funcionamiento del equipo de laboratorio, a continuación, se exponen los resultados e indicadores necesarios para la comprobación de lo planteado anteriormente, véase Tabla 4-1:

Tabla 4-1. Resultados obtenidos.

Resultado	Indicador	Objetivo Relacionado	Porcentaje de Desarrollo
Diseño del Simulador de flujos de ríos	Análisis estructural	Objetivo específico 1	100%
Planos de diseño del Simulador de flujos de ríos	Planos de diseño	Objetivo específico 1	100%
Equipo de laboratorio: Simulador flujos de ríos	Equipo de laboratorio	Objetivo específico 2	100%
Guía de laboratorio del Simulador de flujos de ríos	Guía de laboratorio	Objetivo específico 3	100%
Manual de instrucciones del Simulador de flujos de ríos	Manual de instrucciones	Objetivo específico 3	100%

Fuente: Autores

El diseño del equipo de laboratorio, plasmado en los planos, ver anexo A, permitieron la construcción efectiva del simulador de flujo de ríos, garantizando así el cumplimiento de los requerimientos establecidos y suscritos en los mismos. El manual de instrucciones, ver anexo B, contará con todas los detalles y características correspondientes al cuidado, precauciones, mantenimiento y funcionamiento básico del equipo de laboratorio para garantizar el adecuado desempeño de este.

La elección del ejercicio a desarrollar por medio de los ensayos efectuados previamente, dio como resultado la elaboración de la guía de laboratorio, “Efectos del cambio de flujo en la

morfología del canal”, ver anexo B, la cual, permitirá la interacción con los estudiantes de la facultad de ingeniería civil con el ejercicio ejecutable en el simulador de flujos de ríos.

El proceso de ejecución del laboratorio comprendió los siguientes pasos:

1. Verificar la pendiente en el tanque de arena correspondiente a cero.
2. Compactar el lecho rugoso y comprobar que la altura estuviera uniforme por completo en el tanque de arena, con ayuda de un pie de rey se realizó el procedimiento.
3. Abastecer el tanque de suministro hidráulico inicialmente a 35 cm de altura la lámina de agua para observar el comportamiento de recirculación del sistema de bombeo del simulador de flujos de ríos.
4. Se trazó la sección transversal del cauce de manera recta con el pie de rey para garantizar un ancho uniforme, se instauró una profundidad aproximada 1,5 cm con ayuda de la espátula, véase Figura 4-1

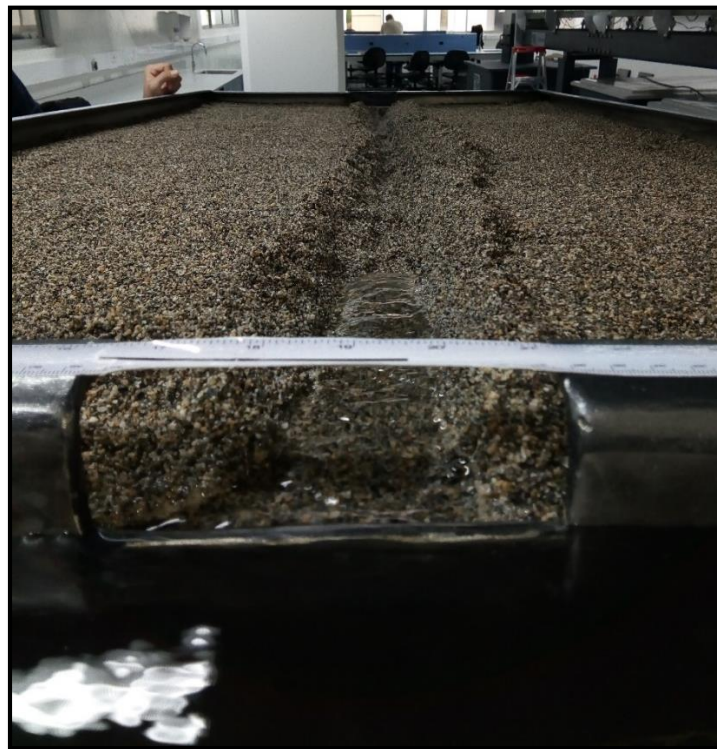


Figura 4-1. Sección transversal del canal. Fuente: Autores

5. Se ajustó la pendiente al 4%, véase Figura 4-2, para observar un comportamiento

visible en el transporte de sedimentos o en la formación y cambio de los tipos de cauces.



Figura 4-2. Regleta para visualizar inclinación. Fuente: Autores

6. La tasa de flujo mínima de trabajo suministrada por el caudalímetro es de 160 L/h o 2,6 L/min, fue implementada para la parte inicial de la práctica de laboratorio, donde, se observó una reducción de 5 cm en la lámina de agua del tanque de almacenamiento hidráulico y luego se estabilizó la altura sin presentar una variación significativa.
7. Inicialmente el cauce presentó gran transporte de sedimentos y cambios en su trazado, presentando llanuras de inundación y formación de islas a partir de un proceso de cambio del tipo de cauce a trenzado en las partes bajas del tanque de arena; en las partes altas del cauce se presentó cambio a un canal meándrico generando socavación y creación de bancadas. Véase Figura 4-3



Figura 4-3. Modelación en ejecución. Fuente: Autores

8. Se observó una estabilidad del transporte de sedimentos aproximadamente una hora después de establecer las condiciones iniciales del cuerpo hídrico.
9. Se analizó el sistema planteado en el simulador de flujos de ríos durante 2 horas, inspeccionando frecuentemente el compartimiento del drenaje, evitando la acumulación de sólidos suspendidos en el filtro correspondiente a una malla mesh 50, permitiendo el paso de agua limpia al tanque de almacenamiento de agua para dar paso a la recirculación.
10. La entrada y salida del equipo de laboratorio representa un cambio significativo en las condiciones planteadas para la simulación; observando el comportamiento que presento durante la práctica se decidió suprimir 20 cm en la parte inicial y final para no generar lecturas erróneas y resultados con gran variación con respecto a su cauce intermedio.
11. Se aumentó el caudal de entrada y la pendiente del tanque de arena, a 300 L/h o 5 L/min y a 7% respectivamente, generando nuevamente incremento en el transporte de sedimentos. Los cambios de sección transversal generan de igual manera este proceso de socavación y erosión en el lecho rugoso.
12. El laboratorio se efectuó aproximadamente durante 2 horas más registrando la

formación del cauce trenzado en la parte baja del cuerpo hídrico. Se modificó completamente el trazado del río para observar una formación meándrica definida donde se observó el incremento de bancadas y taludes por la socavación en las curvas del meandro y zonas de deposición de material granular en la parte opuesta a este.

13. Finalmente se apagó el sistema de bombeo, permitiendo el drenaje de agua aun existente en el tanque de arena y se ajustó la pendiente máxima del 12% al mismo, permitiendo la evacuación del exceso de agua presente en el lecho rugoso. Al culminar este proceso se vació con ayuda de un recipiente, el agua restante del disipador de energía.

La reducción de costos corresponde al 86% del valor comercial del equipo, véase anexo D y anexo E, confirmando la hipótesis planteada correspondiente al cambio de materiales, secciones de los elementos y costos de importación del instrumento de laboratorio. Se garantiza el adecuado funcionamiento del simulador de flujos de ríos con los materiales implementados, sustentados en el análisis estructural efectuado para evaluar la resistencia de los materiales con las diferentes cargas en servicio.

4.1. Análisis comparativo de la simulación en el instrumento de laboratorio y modelación en HEC-RAS.

La comparación de resultados en dos escenarios como una simulación y modelación del mismo cuerpo hídrico plantea la elaboración de la simulación normalmente en el equipo de laboratorio desarrollada como se muestra a continuación y la recreación de esta en el software ya mencionado.

La simulación tuvo una duración de 6 horas, se realizó el procedimiento correspondiente, establecido en la guía de laboratorio.

1. Establecer la pendiente inicial de cero.
2. Compactar el lecho rugoso y determinando una altura homogénea en todo el tanque de arena, véase Figura 4-4.



Figura 4-4. Adecuación del lecho rugoso. Fuente: Autores

3. Abastecer el suministro hídrico a la altura de la lámina de agua de 25 cm, véase Figura 4-5, correspondientes al nivel óptimo para el funcionamiento del equipo de bombeo.

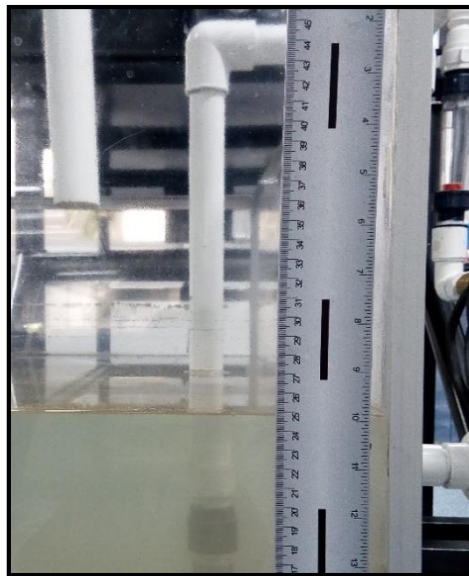


Figura 4-5. Tanque de almacenamiento de agua. Fuente: Autores

4. Se realizó el trazado del canal, con ayuda de una espátula y el pie de rey, véase Figura 4-6, para garantizar la uniformidad en toda la sección del cuerpo hídrico.



Figura 4-6. Creación de la sección del cuerpo hídrico. Fuente: Autores

5. Se ajustó la pendiente del tanque de arena al 2%, véase Figura 4-7, para establecer las condiciones iniciales del laboratorio a realizar. Con la regla instalada en el costado izquierdo del equipo se observa la elevación, guiándose desde el nivel 0 correspondiente a 25 cm.

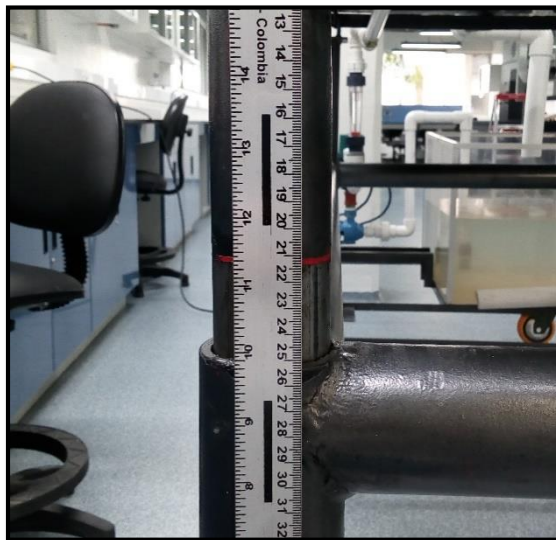


Figura 4-7. Verificación de la pendiente. Fuente: Autores

6. Se encendió el sistema de bombeo con el interruptor instantáneo y se estableció un caudal de 2,6 L/min o 160 L/h por efectos de aforamiento en el caudalímetro, véase Figura 4-8.

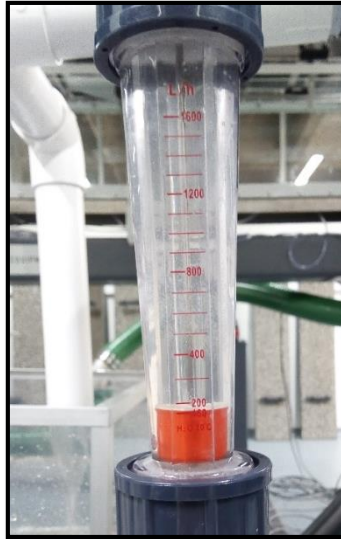


Figura 4-8. Caudal de entrada Fuente: Autores

7. Se da inicio a la simulación en el equipo de laboratorio, acogiendo las recomendaciones e instrucciones necesarias para desempeñar satisfactoriamente la práctica.

En los primeros minutos de simulación se observa en gran relevancia el transporte de sedimentos, véase Figura 4-9, dónde, origina un cambio con el paso del tiempo en la sección transversal del canal.



Figura 4-9. Transporte de sedimentos. Fuente: Autores

Al transcurrir 1 hora y media, el canal ya ha estabilizado su erosión y socavación, pero alteró significativamente la batimetría del cauce generando un perfil más rectangular, véase Figura 4-10, los meandros presentaron una vaguada consistente, aunque la lámina de agua no superara más de 2 o 3 cm en la totalidad del cuerpo hídrico, también se pueden observar las secciones en las que se evaluara la velocidad del cauce.

Para efectos de corroboración y comparación se realiza la toma de mediciones de velocidades en tres tramos significativos para el cuerpo hídrico, véase Tabla 4-2. Se calcularon estas velocidades a partir de procesos visuales, donde, se ubica un objeto con capacidad de flotar en el flujo de agua y se registra el tiempo que tarda en pasar por los puntos ya seleccionados anteriormente.

Tabla 4-2. Velocidades observadas

VELOCIDADES CAUDAL 160 L/h								
Curva 1			Transición curvas			Curva 2		
Dist. (m)	Tiempo (seg)	Velocidad (m/s)	Dist. (m)	Tiempo (seg)	Velocidad (m/s)	Dist. (m)	Tiempo (seg)	Velocidad (m/s)
0.413	1.75	0.236	0.20 1	0.82	0.245	0.232	0.78	0.297
	1.47	0.281		0.78	0.258		0.82	0.283
	1.75	0.236		0.81	0.248		0.84	0.276
	1.69	0.244		0.82	0.245		0.78	0.297
Velocidad promedio observada		0.249	Velocidad promedio observada		0.249	Velocidad promedio observada		0.288

Fuente: Autores

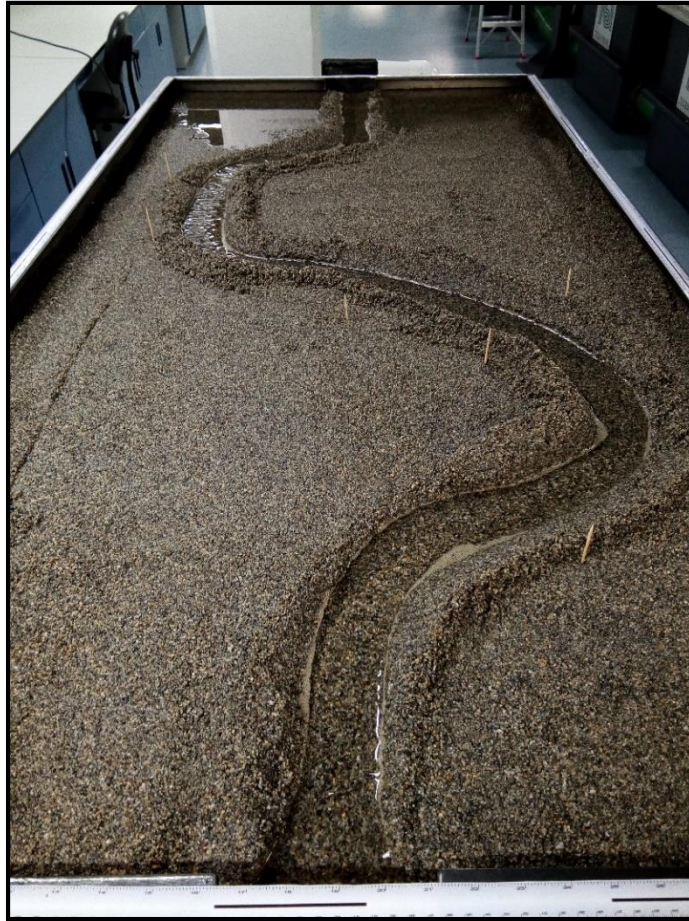


Figura 4-10. Cauce en evaluación. Fuente: Autores

Se permite la estabilidad del cuerpo hídrico durante 2 horas más, se observó una reducción significativa en el transporte de sedimentos, pero se define una sección transversal rectangular con uniformidad en la altura de la camina de agua del cauce diseñado, véase Figura 4-11. La creación de vaguada, es un aspecto fundamental en el momento de analizar la dinámica de un río, véase Figura 4-12.



Figura 4-11. Cambio en la batimetría. Fuente: Autores



Figura 4-12. Vaguada del cuerpo hídrico. Fuente: Autores

El levantamiento topográfico para elaborar las secciones transversales en un programa de diseño, véase Figura 4-13 y Figura 4-14, se realizó con una nube de puntos, tomando 8 secciones transversales a través de todo el cuerpo hídrico y con 7 puntos para cada batimetría, se obtuvieron las coordenadas N, E y Z con ayuda de las reglas ubicadas en la bandeja del simulador de flujos de ríos, véase Tabla 4-3. Este levantamiento topográfico, fue de vital

importancia para la modelación del cuerpo hídrico en el programa de HEC-RAS.



Figura 4-13. Puntos para levantamiento topográfico. Fuente: Autores

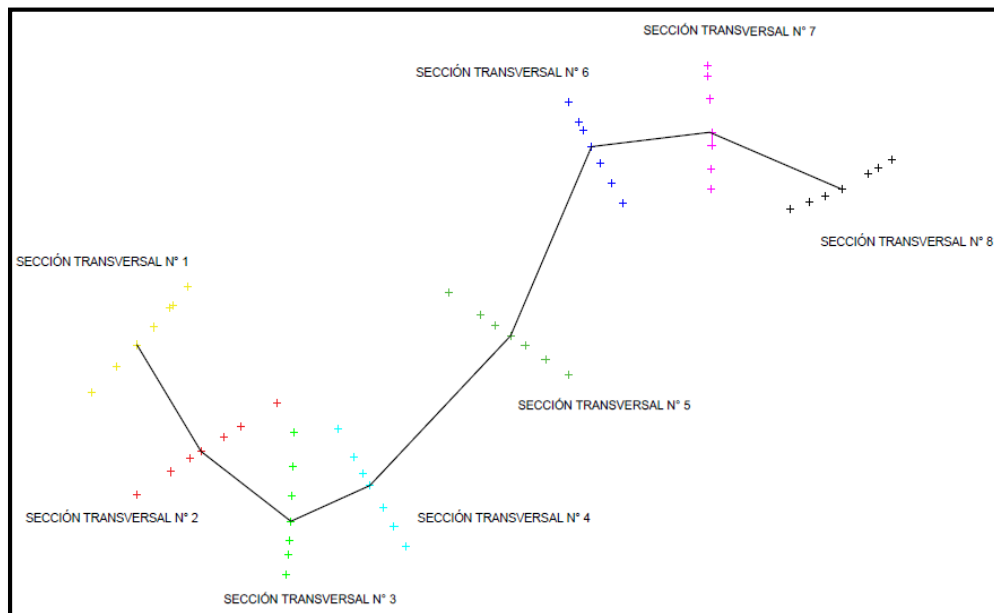


Figura 4-14. Secciones transversales AutoCAD. Fuente: Autores

Tabla 4-3. Secciones transversales

SECCIÓN 1 (RS 0,05)						SECCIÓN 2 (RS 0,19)					
	N	E	Prof(m)	Dista (m)	Z		N	E	Prof(m)	Dista (m)	Z
1	0.175	0.290	0.050		0.090	1	0.240	0.148	0.048		0.093
2			0.031	0.078	0.109	2			0.026	0.054	0.114
3			0.048	0.035	0.092	3			0.052	0.019	0.088
4	0.265	0.382	0.069	0.000	0.072	4	0.334	0.208	0.069	0.000	0.072
5			0.047	0.037	0.093	5			0.056	0.040	0.084
6			0.047	0.043	0.094	6			0.032	0.069	0.108
7	0.315	0.438	0.051		0.090	7	0.445	0.275	0.043		0.097
SECCIÓN 3 (RS 0,35)						SECCIÓN 4 (RS 0,48)					
	N	E	Prof(m)	Dista (m)	Z		N	E	Prof(m)	Dista (m)	Z
1	0.458	0.035	0.037		0.103	1	0.633	0.075	0.042		0.098
2			0.028	0.050	0.112	2			0.022	0.068	0.118
3			0.077	0.028	0.063	3			0.044	0.038	0.096
4	0.465	0.110	0.064	0.000	0.046	4	0.580	0.160	0.064	0.000	0.076
5			0.051	0.037	0.089	5			0.047	0.020	0.093
6			0.018	0.078	0.122	6			0.028	0.047	0.112
7	0.470	0.235	0.038		0.102	7	0.534	0.240	0.043		0.097
SECCIÓN 5 (RS 0,77)						SECCIÓN 6 (RS 1,06)					
	N	E	Prof(m)	Dista (m)	Z		N	E	Prof(m)	Dista (m)	Z
1	0.870	0.315	0.043		0.097	1	0.948	0.555	0.043		0.097
2			0.018	0.062	0.122	2			0.027	0.060	0.113
3			0.048	0.026	0.092	3			0.052	0.028	0.088
4	0.785	0.370	0.065		0.075	4	0.903	0.635	0.066		0.075
5			0.047	0.027	0.093	5			0.051	0.027	0.089
6			0.025	0.055	0.115	6			0.039	0.040	0.101
7	0.695	0.430	0.040		0.100	7	0.870	0.698	0.049		0.091
SECCIÓN 7 (RS 1,24)						SECCIÓN 8 (RS 1,44)					
	N	E	Prof(m)	Dista (m)	Z		N	E	Prof(m)	Dista (m)	Z
1	1.077	0.575	0.045		0.095	1	1.193	0.547	0.038		0.102
2			0.022	0.053	0.118	2			0.028	0.053	0.112
3			0.047	0.018	0.093	3			0.043	0.027	0.097
4	1.078	0.655	0.059		0.081	4	1.268	0.575	0.061		0.079
5			0.050	0.047	0.091	5			0.042	0.045	0.098
6			0.029	0.080	0.111	6			0.033	0.062	0.107
7	1.072	0.748	0.046		0.094	7	1.340	0.616	0.040		0.100

Fuente: Autores

Al finalizar la prueba con el caudal de entrada de 160 L/h se realizó el siguiente cambio de

condiciones el cual correspondió al aumento del caudal a 250 L/h o 4,2 L/min, se presentó una erosión considerable en los meandros con curvaturas pronunciadas, véase Figura 4-15, en uno de ellos ubicado en la parte baja del tanque de arena presentó el rebosamiento del cauce por la pérdida del talud de contención.



Figura 4-15. Cambio de condiciones iniciales. Fuente: Autores

4.1.1. Modelación HEC-RAS

Con las secciones definidas en AutoCAD, como nube de puntos, se creó la superficie del terreno y las curvas de nivel en AutoCAD CIVIL 3D, véase Figura 4-16, necesarias para ingresar los datos completos de la simulación al modelo.

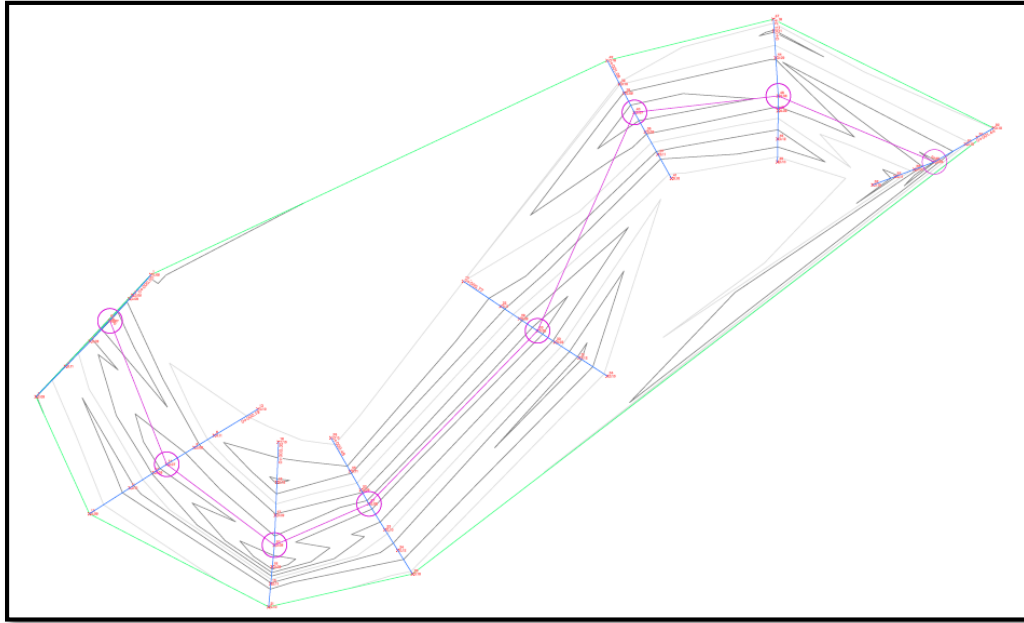
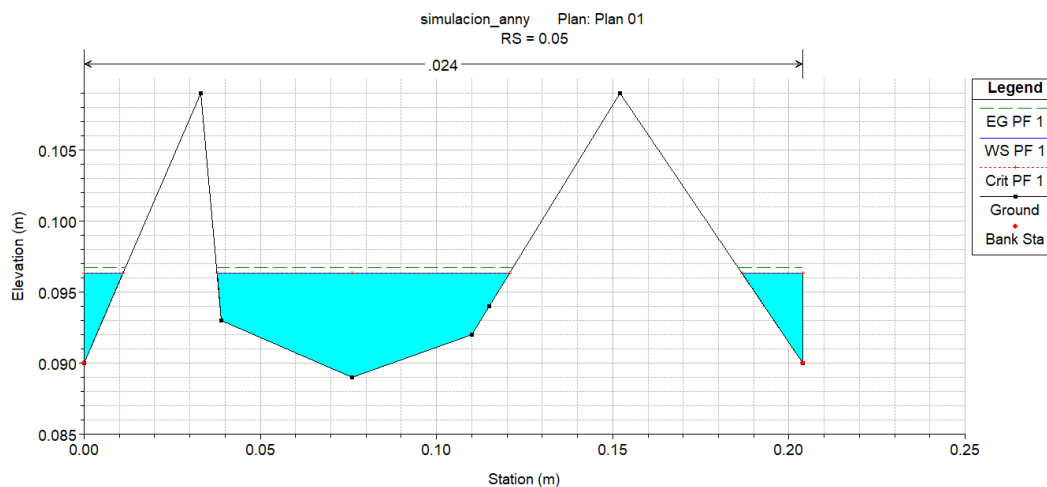
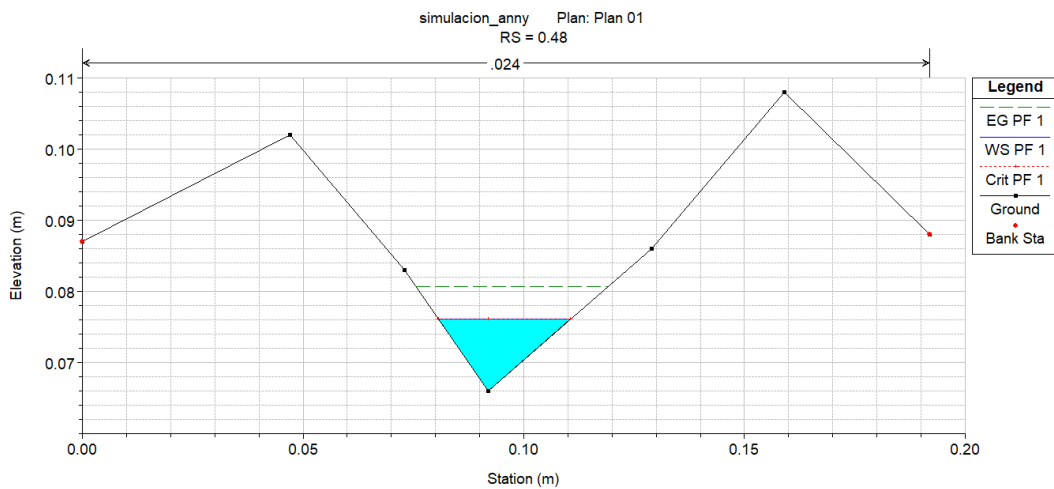
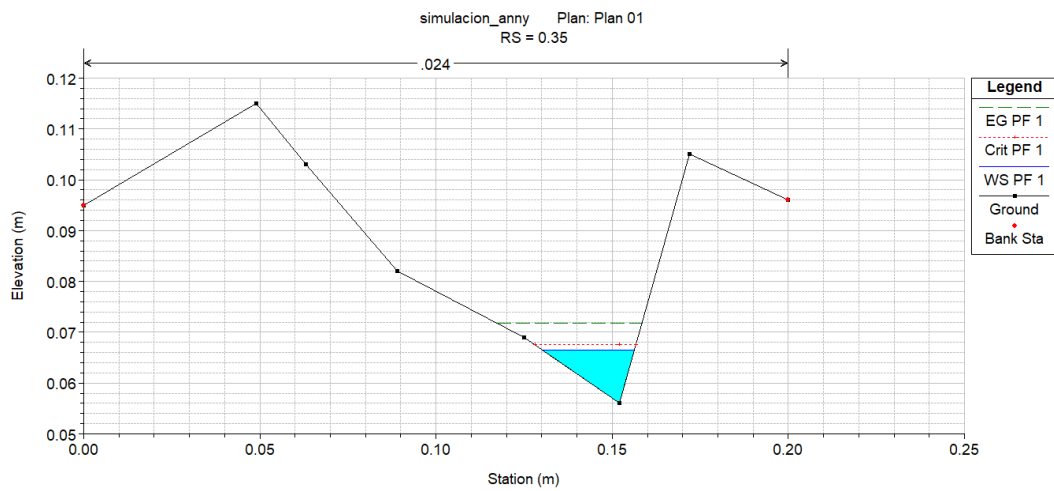
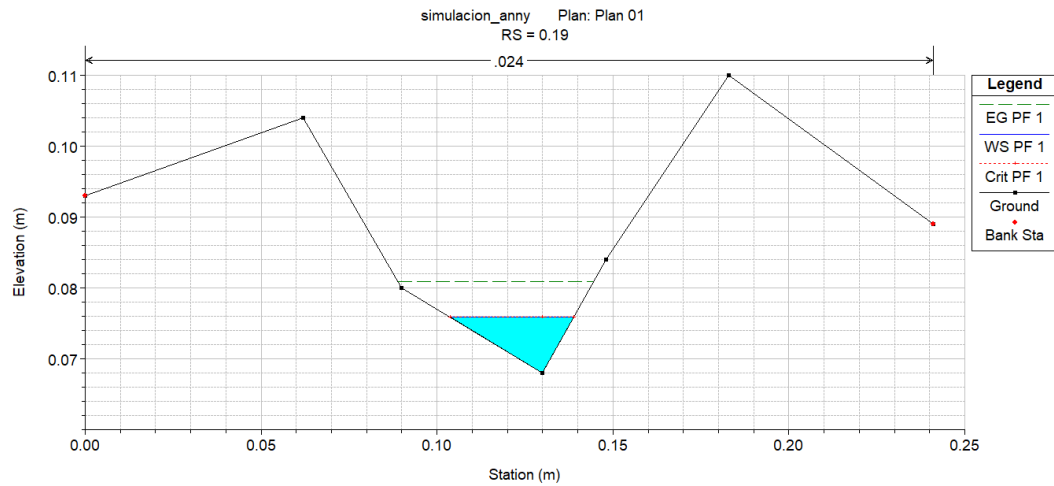


Figura 4-16. Curvas de nivel del canal. Fuente: Autores

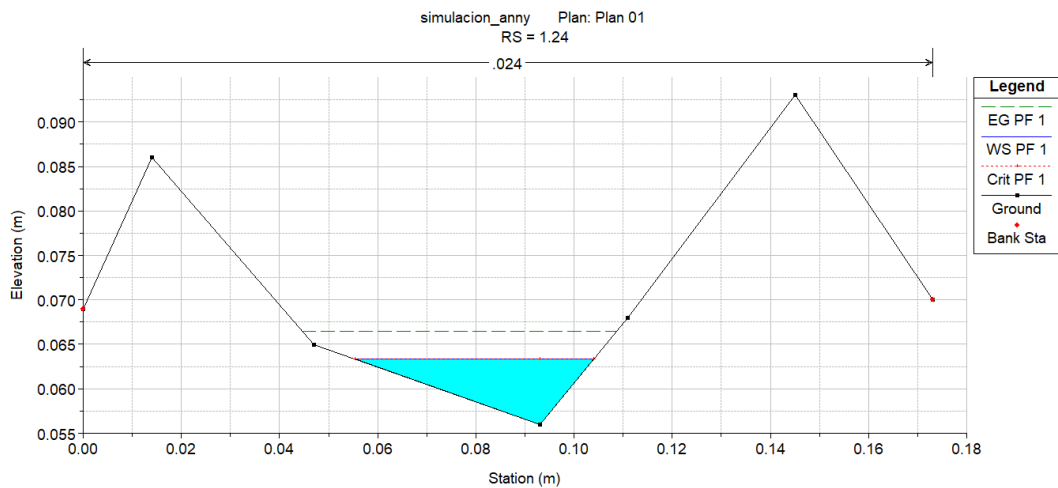
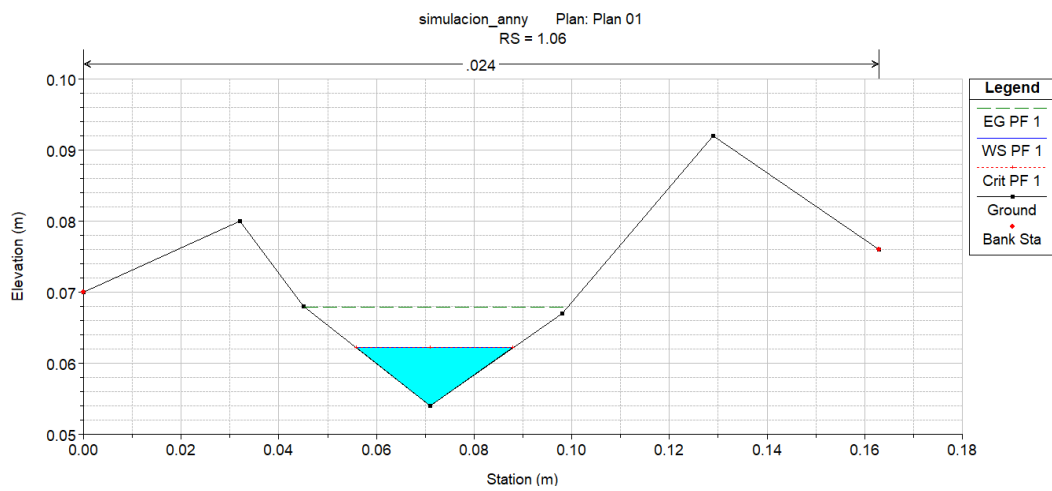
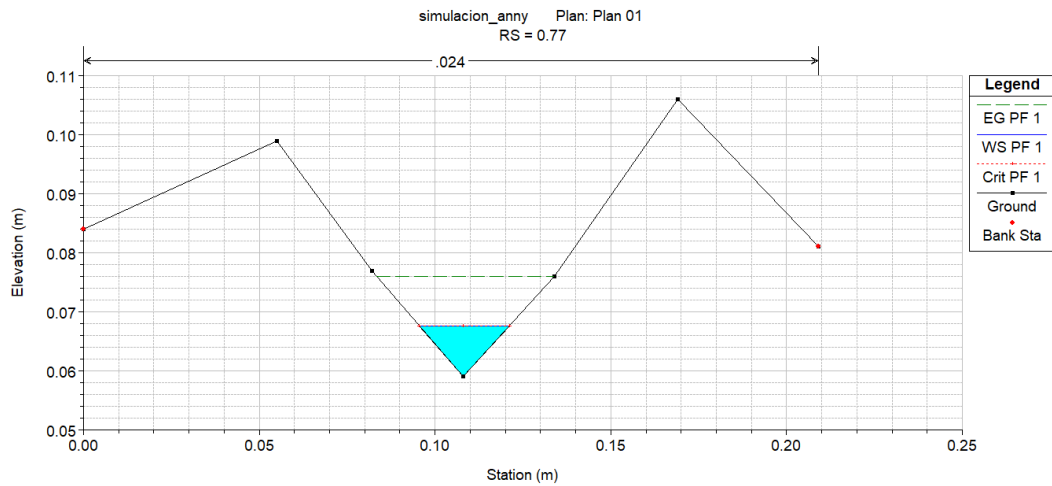
Se ingresan los datos requeridos para la modelación, con la nube de puntos con las coordenadas ingresadas anteriormente, la superficie del terreno, n de Manning el cual corresponde a 0,024 para gravas y arenas limpias, el caudal de entrada y la pendiente implementada. Los puntos con la información del terreno en estos, generan las secciones transversales en el HEC-RAS véase Figura 4-17. Se observa el cambio significativo en las zonas de transición y en las zonas que hay presencia de meandros, se comprende mejor el comportamiento dinámico de los ríos.



Diseño de un Simulador de Flujos de Ríos Como Implemento de Laboratorio Para la Universidad Santo Tomás – Sede Villavicencio



Diseño de un Simulador de Flujos de Ríos Como Implemento de Laboratorio Para la Universidad Santo Tomás – Sede Villavicencio



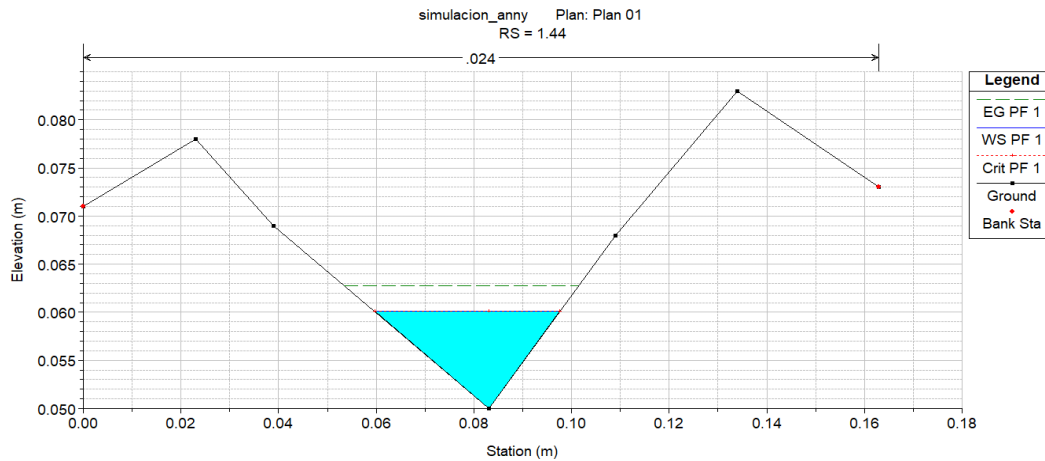


Figura 4-17. Secciones transversales modelo HEC-RAS. Fuente: Autores

El perfil longitudinal del cuerpo hídrico, véase Figura 4-18, permitió observar mejor el comportamiento con la pendiente y altura de lámina de agua a través de todo su tramo a evaluar, dando una idea visual del comportamiento de la vaguada en todo el sistema del canal.

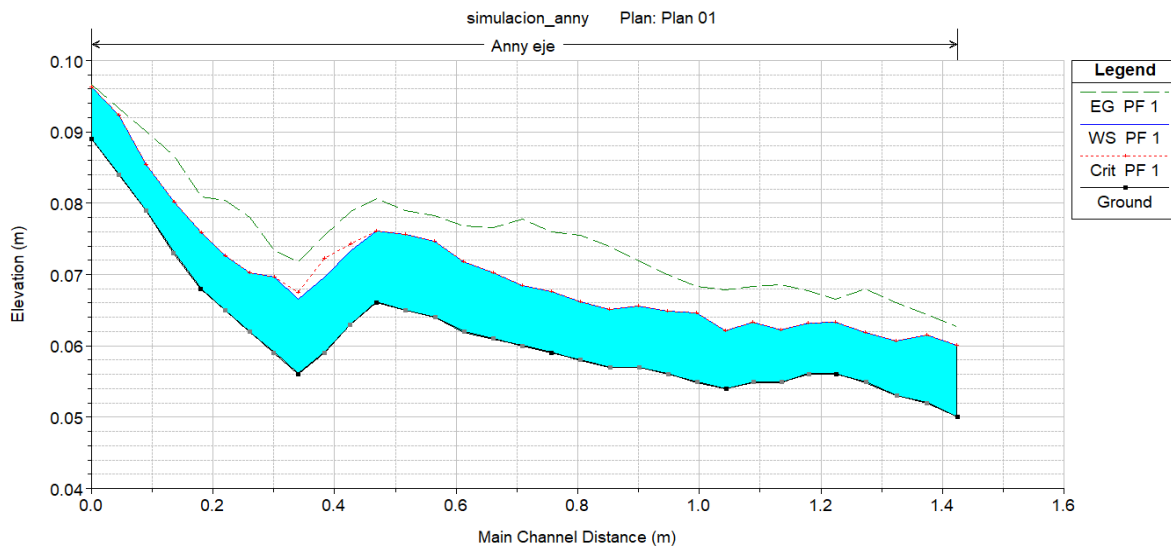


Figura 4-18. Perfil longitudinal. Fuente: Autores

Una vista tridimensional del cauce en la modelación comparada con el mismo cuerpo hídrico trazado en el simulador, véase Figura 4-19, genera confiabilidad para los resultados que suministra el programa, sin embargo, no se puede confiar plenamente en estos modelos visuales, ya que no se tiene aún los resultados de velocidad que me generan la comparación directa entre los dos modelos.

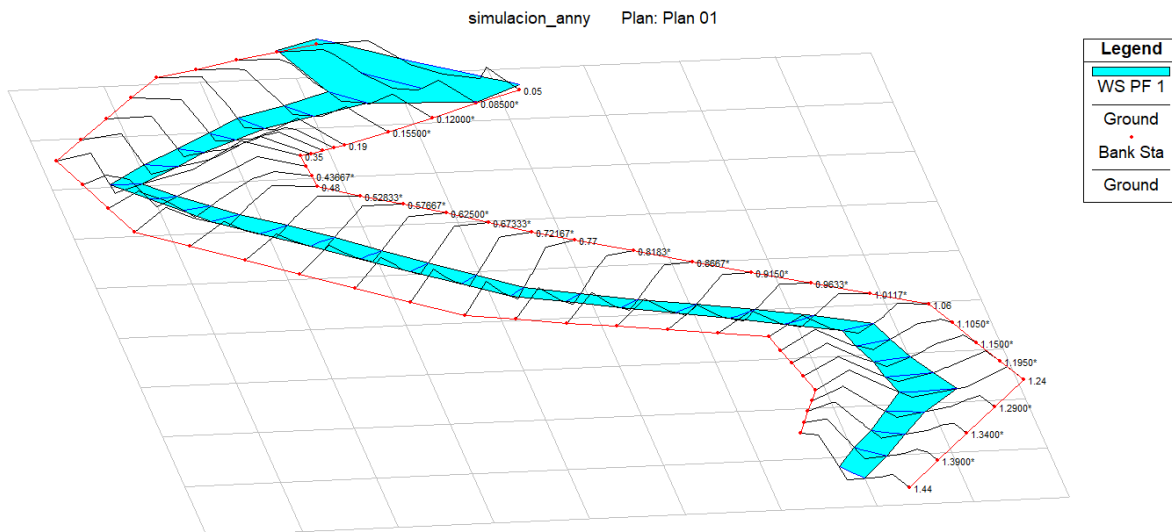


Figura 4-19. Comparación visual del modelo (escalado vertical) y simulación. Fuente: Autores

La entrega de resultados del software, véase Figura 4-20, confirma la hipótesis de poca variabilidad, tomando en cuenta el error humano que puede tener la toma de tiempos en la

evaluación de velocidades anteriormente realizado y la susceptibilidad al cambio del lecho rugoso fácilmente, sin embargo, los resultados obtenidos consideran un error mínimo.

HEC-RAS Plan: Plan 01 River: Anny Reach: eje Profile: PF 1

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
eje	1.44	PF 1	0.00	0.05	0.06	0.06	0.06	0.041608	0.23	0.00	0.04	1.03
eje	1.3900*	PF 1	0.00	0.05	0.06	0.06	0.06	0.047844	0.24	0.00	0.04	1.11
eje	1.3400*	PF 1	0.00	0.05	0.06	0.06	0.07	0.115741	0.33	0.00	0.04	1.68
eje	1.2900*	PF 1	0.00	0.05	0.06	0.06	0.07	0.142904	0.35	0.00	0.04	1.86
eje	1.24	PF 1	0.00	0.06	0.06	0.06	0.07	0.068473	0.25	0.00	0.05	1.31
eje	1.1950*	PF 1	0.00	0.06	0.06	0.06	0.07	0.100121	0.30	0.00	0.04	1.58
eje	1.1500*	PF 1	0.00	0.05	0.06	0.06	0.07	0.145646	0.36	0.00	0.03	1.88
eje	1.1050*	PF 1	0.00	0.05	0.06	0.06	0.07	0.097368	0.31	0.00	0.03	1.55
eje	1.06	PF 1	0.00	0.05	0.06	0.06	0.07	0.113838	0.33	0.00	0.03	1.66
eje	1.0117*	PF 1	0.00	0.05	0.06	0.06	0.07	0.062505	0.27	0.00	0.03	1.24
eje	0.9633*	PF 1	0.00	0.06	0.06	0.06	0.07	0.095044	0.32	0.00	0.03	1.52
eje	0.9150*	PF 1	0.00	0.06	0.07	0.07	0.07	0.125990	0.35	0.00	0.03	1.72
eje	0.8667*	PF 1	0.00	0.06	0.07	0.07	0.07	0.189538	0.41	0.00	0.03	2.07
eje	0.8183*	PF 1	0.00	0.06	0.07	0.07	0.08	0.199118	0.43	0.00	0.03	2.11
eje	0.77	PF 1	0.00	0.06	0.07	0.07	0.08	0.173286	0.40	0.00	0.03	1.97
eje	0.72167*	PF 1	0.00	0.06	0.07	0.07	0.08	0.198580	0.43	0.00	0.02	2.10
eje	0.67333*	PF 1	0.00	0.06	0.07	0.07	0.08	0.121699	0.35	0.00	0.03	1.67
eje	0.62500*	PF 1	0.00	0.06	0.07	0.07	0.08	0.085204	0.31	0.00	0.03	1.40
eje	0.57667*	PF 1	0.00	0.06	0.07	0.07	0.08	0.056487	0.27	0.00	0.03	1.16
eje	0.52833*	PF 1	0.00	0.06	0.08	0.08	0.08	0.051450	0.26	0.00	0.03	1.11
eje	0.48	PF 1	0.00	0.07	0.08	0.08	0.08	0.079209	0.30	0.00	0.03	1.36
eje	0.43667*	PF 1	0.00	0.06	0.07	0.07	0.08	0.097305	0.33	0.00	0.03	1.47
eje	0.39333*	PF 1	0.00	0.06	0.07	0.07	0.08	0.107681	0.34	0.00	0.02	1.50
eje	0.35	PF 1	0.00	0.06	0.07	0.07	0.07	0.097388	0.32	0.00	0.03	1.41
eje	0.31000*	PF 1	0.00	0.06	0.07	0.07	0.07	0.060591	0.27	0.00	0.03	1.17
eje	0.27000*	PF 1	0.00	0.06	0.07	0.07	0.08	0.168191	0.39	0.00	0.03	1.92
eje	0.23000*	PF 1	0.00	0.06	0.07	0.07	0.08	0.178243	0.39	0.00	0.03	2.02
eje	0.19	PF 1	0.00	0.07	0.08	0.08	0.08	0.104193	0.31	0.00	0.04	1.59
eje	0.15500*	PF 1	0.00	0.07	0.08	0.08	0.09	0.152091	0.35	0.00	0.04	1.91
eje	0.12000*	PF 1	0.00	0.08	0.09	0.09	0.09	0.112920	0.30	0.00	0.05	1.67
eje	0.08500*	PF 1	0.00	0.08	0.09	0.09	0.09	0.018140	0.14	0.00	0.07	0.68
eje	0.05	PF 1	0.00	0.09	0.10	0.10	0.10	0.006996	0.09	0.00	0.11	0.41

HEC-RAS Plan: Plan 01 River: Anny Reach: eje Profile: PF 1

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
eje	1.44	PF 1	0.00	0.05	0.06	0.06	0.06	0.041608	0.23	0.00	0.04	1.03
eje	1.24	PF 1	0.00	0.06	0.06	0.06	0.07	0.068473	0.25	0.00	0.05	1.31
eje	1.06	PF 1	0.00	0.05	0.06	0.06	0.07	0.113838	0.33	0.00	0.03	1.66
eje	0.77	PF 1	0.00	0.06	0.07	0.07	0.08	0.173286	0.40	0.00	0.03	1.97
eje	0.48	PF 1	0.00	0.07	0.08	0.08	0.08	0.079209	0.30	0.00	0.03	1.36
eje	0.35	PF 1	0.00	0.06	0.07	0.07	0.07	0.097388	0.32	0.00	0.03	1.41
eje	0.19	PF 1	0.00	0.07	0.08	0.08	0.08	0.104193	0.31	0.00	0.04	1.59
eje	0.05	PF 1	0.00	0.09	0.10	0.10	0.10	0.006996	0.09	0.00	0.11	0.41

Figura 4-20. Resultado de velocidades HEC-RAS. Fuente: Autores

Finalmente, y con el objetivo minimizar la diferencia entre los datos simulados y los datos observados, se tuvo en cuenta un “criterio de exactitud”, el cual se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo. Para ese fin, se utilizó la medida de bondad de ajuste: RMSE (Raíz del Error Cuadrático Medio). Véase Tabla 4-5.

El RMSE permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados. Se calcula de la siguiente manera:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{Obs} - V_{mod})^2}{n}} \quad (13)$$

El rango de valores que puede tomar va desde 0 hasta el infinito (positivo). El 0 corresponde a un ajuste perfecto mientras que valores más grandes indican un menor ajuste.

Tabla 4-4. Cálculo del criterio de exactitud

VELOCIDADES CAUDAL 160 L/h								
Curva 1			Transición curvas			Curva 2		
Distancia (m)	Tiempo (seg)	Velocidad (m/s)	Distancia (m)	Tiempo (seg)	Velocidad (m/s)	Distancia (m)	Tiempo (seg)	Velocidad (m/s)
0.413	1.75	0.236	0.201	0.82	0.245	0.232	0.78	0.297
	1.47	0.281		0.78	0.258		0.82	0.283
	1.75	0.236		0.81	0.248		0.84	0.276
	1.69	0.244		0.82	0.245		0.78	0.297
Velocidad promedio observada		0.249	Velocidad promedio observada		0.249	Velocidad promedio observada		0.288
Velocidad modelo		0.31	Velocidad modelo		0.31	Velocidad modelo		0.25
Observada - modelo		-0.061	Observada - modelo		-0.061	Observada - modelo		0.038
(Observada - modelo) ²		0.00368	(Observada - modelo) ²		0.00372	(Observada - modelo) ²		0.00148
Promedio (Observada - modelo) ²					0.00296			
RMSE					0.05441			

Fuente: Autores

Se presenta una calibración adecuada del simulador de flujos de ríos, confrontándolo con situaciones reales a las que está sujeta la dinámica fluvial de todos los ríos, el análisis comparativo realizado en un modelo de una dimensión y lo elaborado en el instrumento de laboratorio presenta gran concordancia con los datos obtenidos en estas dos situaciones.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. Conclusiones

La elaboración del simulador de flujos de ríos, abarcó distintas áreas del conocimiento; el área de estructuras fue indispensable para la selección adecuada de materiales, dimensiones y secciones de los elementos que componen el simulador de flujos de ríos, la comprobación de estas decisiones se realizó con el software SAP2000. Se obtuvieron resultados satisfactorios, de la carga aplicada frente a la resistencia de los materiales implementados, y los equipos adicionales necesarios para el funcionamiento del instrumento de laboratorio determinando una deflexión mínima y máxima de la estructura principal de 0,967 y 29 micrómetros, respectivamente. La comprobación de la estructura garantiza una resistencia sobredimensionada pero aceptada por el uso institucional al que estará expuesto el simulador de flujos de ríos.

La construcción de un equipo de laboratorio comprende diferentes procesos fundamentales para generar un conjunto de elementos que trabajen perfectamente y que conlleven a la producción de grandes proyectos investigativos. El instrumento de laboratorio se encuentra en las instalaciones de la Universidad Santo Tomás Sede Villavicencio, en el laboratorio de hidráulica con todos sus complementos para uso de la comunidad estudiantil, planta docente y demás administrativos, calibrado y ajustado para el desarrollo de nuevos proyectos y prácticas que fomenten la investigación en el área de hidráulica.

Los documentos guías que contemplan el funcionamiento, mantenimiento y procedimiento práctico del laboratorio “efectos del cambio de flujo en la morfología del canal” se desarrollaron a partir de los ensayos realizados en el simulador de flujos de ríos con los ajustes correspondientes determinados durante estos. Son archivos que amplían el conocimiento práctico-teórico para la manipulación apropiada del instrumento de laboratorio.

En la evaluación hidráulica en el software de HEC-RAS mostró resultados de velocidades comprendidas entre 0,23 y 0,40 m/s y un ancho superficial entre 3 y 5 cm con un régimen de flujo supercrítico ya que el número Froude es mayor a 1,0. El perfil longitudinal presentó un aumento significativo de la pendiente en el primer tercio del canal planteado, producto de la dinámica fluvial.

La reducción de costos contemplada en un 86% verifica la hipótesis planteada inicialmente, contemplada por el cambio de material, dimensiones y elementos del simulador de flujos de ríos. Se obtuvo un error mínimo en la evaluación de datos ejecutada a la simulación en el instrumento de laboratorio y la modelación en el software, donde se ajusta satisfactoriamente las velocidades y altura de la lámina de agua en lo propuesto en una situación y modelada en el HEC-RAS. El error calculado correspondiente a las velocidades halladas en el instrumento de laboratorio y la simulación en el programa computacional se aproxima a $\pm 20\%$, considerando estas discrepancias por el tamaño fino de las secciones transversales y del mismo simulador.

5.2. Trabajos futuros

El simulador de flujos ríos es un equipo completo, diseñado para la elaboración de laboratorios concernientes a iniciación y características del movimiento de carga de la cama, estabilidad del canal, creación de hidrogramas, efecto del cambio en el nivel de base, demostración de la respuesta de la corriente a la canalización, entre otros. Como alcanzable se entrega una guía de laboratorio, correspondiente a “Efectos del cambio de flujo en la morfología del canal” y se propone la realización y elaboración de las guías de laboratorios para los ensayos nombrados anteriormente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Badillo y A. Rodriguez, *Mecánica de Suelos*, México, Limusa, 2005.
- [2] Revista ARQHYS, (2012), Equipo de colaboradores y profesionales de la revista ARQHYS.com, [Online], Available: <http://www.arqhys.com/arquitectura/mecanica-suelos.html>
- [3] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, *Norma Sismo Resistente NSR-10*, Colombia, 2010.
- [4] V. T. Chow, *Hidráulica de Canales Abiertos*, Bogotá, McGRAW-HILL, 2004.
- [5] N. A. P. y W. D. E., (1997, Enero), *Earth Surface Process and Landforms*, [Online], Available: [http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199701\)22:1%3C59::AID-ESP652%3E3.0.CO;2-R/epdf?r3_referer=wol&tracking_action=preview_click&show_checkout=1&purchase_referrer=www.google.com.co&purchase_site_license=LICENSE_DENIED](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/(SICI)1096-9837(199701)22:1%3C59::AID-ESP652%3E3.0.CO;2-R/epdf?r3_referer=wol&tracking_action=preview_click&show_checkout=1&purchase_referrer=www.google.com.co&purchase_site_license=LICENSE_DENIED).
- [6] G. Vargas Cuervo, "Geología, Geomorfología y Dinámica Fluvial Aplicada a Hidráulica de Ríos", Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2012.
- [7] G. Bussi , E. Ortiz, F. Francés, L. Pujol, R. Gabaldón, V. Guna y J. A. Sempere. (2011, Octubre 6), *The Research Group of Hydrological and Environmental Modelling*, [Online], Available: http://lluvia.dihma.upv.es/ES/publi/congres/050_JIA2011_PRESENTACION_GB_articulo.pdf.
- [8] C. D. I. HIDROLÓGICA. US ARMY CORPS OF ENGINEERS, [Online]. Available: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>.
- [9] MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*, Bogotá D.C. : Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. , 2010
- [10] Congreso de la República, (2012, Abril 24), *Diario Oficial*, [Online]. Available: http://jacevedo.imprenta.gov.co/buscador-diario-oficial?p_auth=3NpxUaaL&p_p_id=BuscadorDiario_WAR_BuscadorDiarioportlet

&p_p_lifecycle=1&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-
1&p_p_col_count=3&p_p_col_pos=2&_BuscadorDiario_WAR_BuscadorDiariopo
rt.

- [11] IDEAM, Estudio Nacional del Agua, Bogotá D. C.: IDEAM, 2014.
- [12] ICONTEC, NTC-ISO-IEC 17025, Bogotá D.C.: ICONTEC, 2005.
- [13] INVIAS, I.N.V. E - 123, Bogotá D.C. : INVIAS, 2004.
- [14] J. Manzanares Gomez , N. Mantinez Jiménez y A. Villada Ruiz, "Diseño y montaje del prototipo de una red cerrada para el laboratorio de hidráulica de la Universidad Cooperativa de Colombia sede Villavicencio", Tesis, Universidad Cooperativa de Colombia, Villavicencio, 2016.
- [15] E. Angulo López, "Politica fiscal y estrategia como factor de desarrollo de la mediana empresa comercial sinaloense. Un estudio de caso", Universidad Autonoma de Sinaloa, México, 2011.
- [16] M. Tamayo y Tamayo, *El proceso de la investigación científica*, México: Limusa, 2003.
- [17] Miliarium Aureum, S.L., (2004), Miliarium.com Ingeniería Civil y Medio Ambiente, [Online]. Available: <http://www.miliarium.com/Proyectos/RestauracionAmbiental/RestauracionRiberas/Geologia/Geomorfologia.asp>.
- [18] Instituto Distrital de Recreación y Deporte, INSTITUTO DISTRITAL DE RECREACIÓN Y DEPORTE, [Online]. Available: https://www.idrd.gov.co/especificaciones/index.php?option=com_content&view=article&id=2168&Itemid=1766.
- [19] GRAVICON S.A.,(2017, Septiembre 1), GRAVICON S.A., [Online]. Available: <http://gravicon.com.co/productos/88-arena>.
- [20] Escuela de Ingeniería de Construcción PUVC, Escuela de Ingeniería de Construcción PUVC, [Online]. Available: http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/granulometria.pdf.

- [21] S. García Garrido, SISTEMA HTF.COM, 2012. [Online]. Available: <http://www.sistemahtf.com/index.php/el-sistema-de-bombeo>.
- [22] A. García González, PANAMAHITEK, 2015. [Online]. Available: <http://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-potenciometro/>.
- [23] Fluidac, FENGHUA FLUID AUTOMATIC CONTROL CO. LTD, [Online]. Available: <http://spanish.pneumaticcontrol-valve.com/quality-1867249-manguera-reforzada-fibra-del-polipropileno>.
- [24] R. Giles, *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica*, McGraw Hill, 1962.
- [25] JN ACEROS, (2017, Noviembre 27), JN ACEROS, [Online]. Available: <http://www.jnaceros.com.pe/blog/principales-propiedades-acero-inoxidable/>.
- [26] F. D. Del Castillo Rodríguez, (2008), FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN, [Online]. Available: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m1/materiales_1.pdf.
- [27] R. López Alonso, "Características hidráulicas y geomorfológicas de ríos de montaña (III)," *Cimbra*, vol. III, n° 363, p. 1, 2005.
- [28] CERES, (2010, Octubre 24), Centros Regionales de Educación Superior, [Online]. Available: ftp://ceres.udc.es/IT_Obras_Publicas/Troncales/Procedimientos_Construccion_Maquinaria/tema_7_10_11.pdf.
- [29] C. A. Monje Álvarez, *Metodología de la Investigación Cuantitativa y Cualitativa - Guía Didáctica*, Universidad Surcolombiana, Colombia, 2011.
- [30] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE, Bogota, D.C., 2010.

ANEXOS

Los siguientes anexos se encuentran en medio digital contenidos en el CD'S

Anexo A. Planos de diseño del simulador de flujos de ríos

Anexo B. Manual de instrucciones del simulador de flujos de ríos

Anexo C. Guía de laboratorio de “efectos del cambio de flujo en la morfología del canal”

Anexo D. Cotización del equipo de laboratorio

Anexo E. Presupuesto del instrumento de laboratorio: simulador de flujos de ríos