

PARAMETROS PARA EL DISEÑO DE UN AFORADOR EN IBER PARA EL
ACUEDUCTO COMUNITARIO DE PLAYA RICA EN LA COMUNA 8 DE
VILLAVICENCIO



LAURA TATIANA OSORIO OVIEDO
JOHN FITRGERALD PINZÓN MESA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERIA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2022

PARAMETROS PARA EL DISEÑO DE UN AFORADOR EN IBER PARA EL
ACUEDUCTO COMUNITARIO DE PLAYA RICA EN LA COMUNA 8 DE
VILLAVICENCIO

LAURA TATIANA OSORIO OVIEDO
JOHN FITRGERALD PINZÓN MESA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero ambiental

Asesor
JAIR ESTEBAN BURGOS CONTENTO
Ingeniero ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2022

Autoridades Académicas

Fray José Gabriel MESA ANGULO, O.P.

Rector General

Fray Eduardo GONZÁLEZ GIL, O.P.

Vicerrector Académico General

Fray José Antonio BALAGUERA, O.P.

Rector Sede Villavicencio

Fray Rodrigo GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TABÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

Mg. WILLIAM PEÑARANDA ZÁRATE

Decano de la Facultad de Ingeniería Ambiental

Dedicatoria

Dedico este trabajo con todo mi amor y cariño a mi familia; de manera especial a mi hija quien ha sido el motivo principal para lograr cumplir todos y cada uno de mis objetivos.

Laura Tatiana Osorio Oviedo

Dedico de todo corazón este trabajo a mi familia y amigos por la motivación para lograr este objetivo tan importante.

John Fitzgerald Pinzón Mesa

Agradecimientos

Agradezco principalmente a Dios por enseñarme siempre el mejor camino, y sobre todo por nunca dejarme desfallecer; a mi madre por brindarme todo su amor y apoyo incondicional, a mi padre por creer siempre en mí y proyectarme como una profesional, a mi hermanita por ser una motivación más en mi vida, a mis tías Esmeralda y Martha por ser esas segundas madres que siempre se han preocupado por mí, en especial en mi proceso de formación profesional. Agradezco también a mi hija, quien llegó a mi vida en el mejor momento para llenarme de amor, agradezco a ella en especial, por darme las fuerzas que necesitaba para culminar mi carrera y por ser mi motor de vida. Agradezco a Sebastián Lesmes, quien ha sido pieza fundamental en estos 5 años, brindándome apoyo, además de amor en todo este tiempo.

De igual forma agradezco a mis amigas y amigos más cercanos, quienes estuvieron para brindarme la mano y darme palabras de aliento; finalmente agradezco al ingeniero Jair Esteban Burgos, quien fue el asesor de este trabajo, que con su paciencia y profesionalismo aportó todos sus conocimientos para la realización del mismo.

Laura Tatiana Osorio Oviedo

Agradezco a Dios por ayudarme en los momentos más difíciles, a mi madre por sus palabras de motivación y ayuda en cada momento de dificultad, a mi padre por ser mi ejemplo a seguir, y a los dos por siempre creer en mí, a mi hermano por escucharme, estar siempre como un apoyo y las risas que nunca faltaron, a mi abuela Ligia por ser una segunda madre por siempre preocuparse por mí y apoyarme, a Daniela Moya y María Fernanda Benítez por creer, ayudarme y colaborar en estos años gracias por la amistad e incondicionalidad

Al Ingeniero Edgar Perilla gracias por su ayuda y consejos entorno a la vida profesional y manejo del software IBER. Agradezco a mi compañera de trabajo de grado Laura por todo el esfuerzo brindado y el orgullo que tengo hacia ella como persona y profesional es admirable; de igual forma a mis compañeros y amigos cercanos que me ayudaron a crecer como persona y profesionalmente. Por último agradezco al Ingeniero Jair Esteban Burgos el asesor de este trabajo de grado por aportar su conocimiento y experiencia en el desarrollo de este proyecto.

John Fitzgerald Pinzón Mesa

Contenido

	Pág.
Resumen	12
Abstract	13
Introducción	14
1. Objetivos	16
1.1. Objetivo General	16
1.2. Objetivos específicos	16
2. Antecedentes	17
3. Marco Teórico	19
3.1. Vertederos	19
3.1.1. Clasificación de los vertederos	20
3.1.2. Espesor de la pared	20
3.1.3. Geometría	21
3.2. Aforadores	21
3.2.1. Canaleta Parshall	22
3.3. IBER	23
3.3.1. Resultados hidrodinámicos de IBER	24
4. Metodología	26
4.1. Determinación de características en campo	26
4.2. Modelación y simulación en IBER	26
4.3. Instauración de los parámetros de diseño y sensibilidad	27
4.4. Diagrama metodológico	28
5. Análisis y discusión de los resultados	30
5.1. Visita en campo y mapa de reconocimiento del sistema	30
5.2. Planos del desarenador	31
5.3. Selección y ubicación de la estructura de aforo	33
5.4. Simulación del desarenador	33
5.5. Diseño de la estructura de aforo	38

5.6.	Simulación del desarenador con el vertedero	40
5.7.	Características hidráulicas del vertedero	47
5.7.1.	Calado Hidráulico en el vertedero	48
5.7.2.	Velocidad en el vertedero	49
5.7.3.	Energía en el vertedero	49
5.7.4.	Numero de Froude	49
5.8.	Análisis de sensibilidad del vertedero	49
5.9.	Manual de operación y mantenimiento	51
5.9.1.	Medición del caudal	51
5.9.2.	Mantenimiento del vertedero	53
6.	Impacto social y humanístico	55
7.	Conclusiones	57
8.	Recomendaciones	58
9.	Referencias bibliográficas	59
10.	Anexos	63

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. Datos ingresados en la simulación del desarenador.....	33
Tabla 2. Datos ingresados para la simulación del vertedero y desarenador	41
Tabla 3. Características hidráulicas del vertedero	48
Tabla 4. Características hidráulicas de 3 vertederos diferentes	50
Tabla 5. Caudal teórico en distintas cargas hidráulicas	53

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Partes de un vertedero	20
Figura 2. Partes de un canal Parshall (perfil).....	22
Figura 3. Diagrama metodológico del proyecto	28
Figura 4. Mapa de reconocimiento del sistema	31
Figura 5. Plano geometría corregida (desarenador).....	32
Figura 6. Vista del desarenador en 3D.....	32
Figura 7. Detalle del mallado generado	34
Figura 8. Superficie de resultados del calado hidráulico (m)	35
Figura 9. Superficie de resultados de Energía (m).....	35
Figura 10. Numero de froude en la superficie.....	36
Figura 11. Coeficiente de maning en la superficie	37
Figura 12. Velocidad media del sedimentador	37
Figura 13. Geometría del vertedero rectangular de dos contracciones	39
Figura 14. Vista 3D del desarenador conjunto el vertedero rectangular.....	40
Figura 15. Elementos del mallado generado a 0.3m	42
Figura 16. Malla generada para la estructura de aforo y el desarenador.....	42
Figura 17. Resultados del calado hidráulico del desarenador con la estructura de aforo	43
Figura 18. Resultado de superficie de la energía a lo largo del desarenador con el vertedero.	44
Figura 19. Número de Froude presente a lo largo del desarenador con el vertedero	45
Figura 20.- Coeficiente de maning asignado para toda la estructura.....	45
Figura 21. Resultado de velocidades en el desarenador contemplando el vertedero.....	46
Figura 22. Puntos de medición de parámetros en el vertedero	48
Figura 23. Medición de la carga hidráulica	52
Figura 24. <i>Tubo de conducción del agua</i>	63
Figura 25. Localización de las rejillas y bocatoma	63
Figura 26. Tanques de Almacenamiento	63
Figura 27. Geometría del desarenador con sus respectivos cortes	64

Figura 30. Calado con un caudal de 0.017 m ³ /s	66
Figura 28. Calado con un caudal de 0.0095 m ³ /s	66
Figura 29. Calado con un caudal de 0.012 m ³ /s	66
Figura 31. Velocidad con un caudal 0.0095 m ³ /s.....	67
Figura 32. Velocidad con un caudal 0.012 m ³ /s	67
Figura 33. Velocidad con un caudal 0.017 m ³ /s	67
Figura 34. Energía con un caudal de 0.0095 m ³ /s	68
Figura 36. Energía con un caudal de 0.017 m ³ /s	68
Figura 35. Energía con un caudal de 0.012 m ³ /s	68
Figura 37. Numero de froude con un caudal de 0.0095 m ³ /s.....	69
Figura 38. Numero de froude con un caudal de 0.012 m ³ /s	69
Figura 39. Numero de froude con un caudal de 0.017 m ³ /s	69

Lista de Anexos

Pág.

Anexo 1. Imágenes del estado del acueducto comunitario de Playa Rica	63
Anexo 2. Planos originales del Desarenador	64
Anexo 3. Construcción del desarenador en el acueducto comunitario de Playa Rica	65
Anexo 4. Graficas de Calado hidráulico en los vertederos	66
Anexo 5. Graficas de Velocidades en los vertederos.....	67
Anexo 6. Graficas de energía en los vertederos.....	68
Anexo 7 . Graficas de número de Froude en el vertedero	69
Anexo 8. Planilla de control de caudal en el Vertedero.....	70

Resumen

En el desarrollo del presente proyecto se determinaron los parámetros de diseño de un aforador de flujo contemplado dentro de un desarenador, por medio de la simulación en el software IBER 2.6, como estructura para el acueducto comunitario del barrio Playa Rica ubicado en la comuna 8 en la ciudad de Villavicencio. Con este se contribuye al uso racional del agua, evitando la afectación de las cuencas de donde se realiza la captación, adicionalmente, servir como herramienta para que legalmente puedan seguir contando con los permisos de captación otorgados por CORMACARENA.

Lo anterior se realizó por medio de una metodología con enfoque cuantitativo, en la que inicialmente se llevó a cabo una identificación de las características en campo por medio de una visita al sistema de acueducto, después de la cual se solicitaron datos de caudal y los planos del desarenador, los cuales fueron digitalizados.

Posteriormente se realizó el diseño del aforador, donde primero se hizo la simulación del desarenador con los datos de caudal y planos otorgados por el acueducto, con el fin de conocer el comportamiento del flujo dentro de esta estructura, y tener los resultados que sirvieron como criterio para el diseño. Por otra parte, también fue necesario hacer un análisis con la información bibliográfica pertinente y en relación a los datos hidráulicos y diseño del desarenador. En relación a lo anterior se estableció un aforador tipo vertedero de forma rectangular con dos contracciones como estructura de aforo para el acueducto.

Asimismo, esta estructura fue simulada en conjunto con el desarenador, dando como resultados una velocidad constante y calado hidráulico adecuado, para que los procesos de sedimentación dentro del desarenador se den de forma apropiada. Por lo que se puede concluir que la implementación del vertedero dentro de la estructura del desarenador, no afecta su adecuado funcionamiento, y por el contrario favorece a las condiciones de este.

Finalmente se instauraron los parámetros para el diseño de la estructura de aforo y sensibilidad de estos. Para el que se realizó un manual de operaciones y mantenimiento, del vertedero teniendo en cuenta su funcionamiento en el acueducto.

Palabras Clave: Hidrodinámica, IBER, simulación hidráulica, vertederos, desarenador.

Abstract

In the development of this project, the design parameters of a flow gauge contemplated within a sand trap were determined, through simulation in the IBER 2.6 software, as a structure for the community aqueduct of the Playa Rica neighborhood located in commune 8 in the city of Villavicencio. In order to contribute to the rational use of water, avoiding the affectation of the basins from which the catchment is made, additionally, serve as a tool so that they can legally continue to have the catchment permits granted by CORMACARENA.

The foregoing was carried out through a methodology with a quantitative approach, in which initially an identification of the characteristics in the field was carried out through a visit to the aqueduct system, after which flow data and plans were requested. of the grit trap, which were digitized.

Subsequently, the design of the flume was carried out, where the simulation of the sand trap was first made with the flow data and plans provided by the aqueduct, in order to know the behavior of the flow within this structure, and to have the results that served as criteria. for design. On the other hand, it was also necessary to carry out an analysis with the relevant bibliographic information and in relation to the hydraulic data and design of the sand trap. In relation to the above, a rectangular landfill-type gauging device with two contractions was established as a gauging structure for the aqueduct.

Likewise, this structure was simulated in conjunction with the sand trap, resulting in a constant speed and adequate hydraulic draft, so that the sedimentation processes inside the sand trap occur appropriately. Therefore, it can be concluded that the implementation of the landfill within the sand trap structure does not affect its proper functioning, and on the contrary favors its conditions.

Finally, the parameters for the design of the capacity structure and their sensitivity were established. For which an operations and maintenance manual was made for the landfill, taking into account its operation in the aqueduct.

Key Word: Hydrodynamics, IBER, hydraulic simulation, spillways, sand trap.

Introducción

El manejo adecuado del recurso hídrico, es un tema que ha cobrado mayor relevancia en los últimas décadas, puesto que se ha demostrado la importancia del mismo para evitar impactos ambientales y la ocurrencia de desastres que se relacionan con el mismo, ya que estos conllevan a efectos directos en la sociedad afectando los medios de sustento de las personas (Mundial & Unidas, 2020). El crecimiento poblacional ha aumentado la demanda de agua, y es crucial contar con una seguridad hídrica que no sólo garantice la disponibilidad de esta, sino también el saneamiento básico y gestión sostenible. Actualmente, la escasez de este recurso está afectando al 40% de la población mundial, es por eso que uno de los objetivos del desarrollo sostenible (Objetivo 6) se encuentra orientado a combatir esta problemática (ONU, 2016).

Para la obtención del recurso hídrico se hace necesario contar con infraestructuras como los acueductos, que se encargan de la distribución y suministro del agua, además de garantizar una adecuada potabilización haciéndola apta para consumo humano (Sandoval & Parrado, 2018). Estas infraestructuras se han convertido en algo valioso para las comunidades, ya que contribuyen al bienestar y progreso continuo de su población; sin embargo, hay escases de estos sistemas en algunas zonas, lo que puede conllevar a graves consecuencias tanto para las personas, como para la economía (Pizarro Montenegro, 2018)(ONU, 2016).

Colombia es uno de los países mayormente afectado por la ausencia de estas infraestructuras, y esto se ve comúnmente en las comunidades pequeñas o en algunas zonas rurales del país; es por eso que se ha optado por la búsqueda de alternativas, entre esas la construcción de acueductos comunitarios, que cumplen la función del suministro del recurso hídrico, no obstante, frente a la escases de recursos de inversión y mantenimiento, son deficientes en su gestión técnica (Pizarro Montenegro, 2018).

Villavicencio actualmente cuenta con un aproximado de 110 acueductos comunitarios, siendo una de las ciudades con más acueductos artesanales en Colombia (Periodico del Meta, 2021), por esto se infiere que más del 20% del servicio público de agua lo cubren estas infraestructuras. La urbanización del territorio en la ciudad, se ha extendido hacia laderas atestadas de microcuencas, lo cual facilita la obtención del agua, sin embargo, como se había descrito anteriormente este servicio es deficiente, y por ende puede llegar a alterar las características de

caudal del cuerpo hídrico del cual se obtiene el recurso, ya que no se tiene un control claro del volumen de agua captado.

Por lo anterior, dichos acueductos son vigilados de cerca por la corporación autónoma regional CORMACARENA, es la encargada de brindar los permisos y licencias ambientales para la captación de agua en las fuentes hídricas. Promover el uso sostenible del agua ha sido uno de los grandes retos de la corporación, y para ello se han llevado grandes mesas de trabajo junto con la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Villavicencio, con el fin de construir un diagnóstico ambiental de la gestión pública del agua, por medio de estudios y estrategias tecnológicas que faciliten el uso y manejo sostenible del agua.

Entre las alternativas para combatir esta problemática y optimizar el consumo de agua, se encuentra la implementación de la infraestructura adecuada para el control y monitoreo del recurso hídrico, por lo que se hace necesario que cada acueducto comunitario cuente con la infraestructura necesaria, especialmente para la medición del caudal, con esto se garantiza una seguridad hídrica, que favorezca al medio ambiente y a la comunidad (IDEAM et al., 2017). Actualmente, los directivos de estos acueductos han venido trabajando en esta problemática, por lo que se ha optado por buscar alternativas de bajo costo y con herramientas básicas que aseguren alta efectividad. Tal es el caso del acueducto comunitario del barrio Playa Rica ubicado en la comuna 8, quien actualmente cuenta con 620 suscriptores, y en términos estructurales carece de un aforador que certifique la adecuada gestión del recurso hídrico, por ende, Cormacarena ha hecho una advertencia, para que puedan seguir contando con los permisos de captación necesarios para su adecuado funcionamiento.

Por tal motivo la implementación de software CFD para el diseño, adaptación y simulación de este tipo de estructuras es una alternativa para la solución de esta problemática, puesto que por medio de este se pueden agilizar muchos de los procesos, además de reducir costos (Arrubla et al., 2015).

El presente proyecto tuvo como finalidad establecer los parámetros de diseño de un aforador tipo vertedero rectangular como estructura para el mejoramiento operacional del acueducto comunitario de Playa Rica en la Comuna 8 de Villavicencio, con el que se pretende contribuir al uso racional del agua para no afectar las cuencas Caño Grande y Caño Vitalia, de donde se realiza la captación para el abastecimiento del acueducto; y de esta manera obtener datos confiables.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Determinar los parámetros para el desarrollo por medio de la simulación en IBER de un aforador de flujo como estructura para el acueducto comunitario de Playa Rica de la Comuna 8 de Villavicencio.

1.2. Objetivos específicos

- Identificar las características hidráulicas y topográficas del acueducto, por medio de un levantamiento topográfico, y revisión bibliográfica existente.
- Desarrollar una modelación en IBER para determinar las medidas y el diseño adecuado para el aforador.
- Establecer los parámetros de diseño y la sensibilidad de los mismos para el funcionamiento del aforador dentro de la estructura hidráulica.

2. Antecedentes

Briones y García dicen que la medición del agua es de importancia de a nivel internacional, nacional y local, ya que es requerido conocer el volumen disponible para mejorar las estrategias de manejo e incrementar las condiciones de uso eficiente. Proponen la adopción de algún método aforador de acuerdo a las condiciones de los parámetros y rango de caudales (Briones G. & García I., 1997)

La técnica sobre procedimientos de aforo para acueductos se realiza con macro medidores el cual obtienen datos de los caudales de consumo y permiten el balance de aguas en la red de distribución (E.S.P., 2013). Por Términos de costos y de espacio dentro del acueducto, se encuentran los vertederos como estructuras de control y medición (Ramirez, Dehesa, & Camacho, 2016)

En la Universidad Central del Ecuador, se investigó que, en las construcciones hidráulicas, se diseñan vertederos que cumplan como función de aliviaderos en las presas, que servirán además como estructuras aforadoras de caudal. Siendo así que los vertederos de pared delgada sean más usados como aforadores, por su fácil construcción e instalación, mientras que los de pared gruesa tienen menor capacidad de carga de agua son más usados como aforadores de control de nivel de cauces (López Moya, 2013).

Estudios realizados en la Universidad Católica de Santa María de Perú, define que un vertedero o aforador se diseña y construye teniendo en cuenta los parámetros uniformes, obteniendo a cierta profundidad el caudal mediante tablas de aforo previamente calibradas. Además mencionan otras formas de aforar, como lo son canal Parshall, método Manning y el método volumétrico (Cuevas & Gomez, 2014).

Investigaciones presentadas en la Universidad privada Antenor Orrego de Perú, se realizó unas observaciones sobre la eficacia de los aforadores tipo Parshall, mediante un diseño del medidor con AutoCAD Civil 3D así mismo modelándolo con un método numérico bidimensional a través del software IBER, analizando los parámetros de la estructura hidráulica. En este trabajo de grado se recomienda el uso del software ya que predice mejor el comportamiento del flujo en los casos hipotéticos presentados (Giancarlo & Andrea, 2017)

IBER modela y simula bidimensionalmente el flujo en lamina libre y procesos de transporte, a través del módulo hidrodinámico resuelve ecuaciones de aguas someras en las profundidades según el tipo de problema a solucionar, estas ecuaciones son conocidas como St. Venant 2D (Iber, 2014).

IBER abarca la hidrodinámica fluvial, rotura de presas, simulación de zonas inundables, transporte de sedimentos, con esto permite cuantificar además alteración en el flujo en un entorno cerrado o abierto, al representar de forma realista el movimiento del flujo, este software tiene la ventaja de ser rápido, robusto y gratuito (Mora-Elizondo, I., 2018).

Los autores Abbas Parsaie y Amir Hamzeh Haghiabi, presentaron una investigación de una instrumentación y medidor de flujo con un aliviadero, se evaluó las propiedades hidráulicas del aforador de tipo escalonada, entre las propiedades estudiadas se encuentran la relación etapadescarga teniendo en cuenta los coeficientes de descarga y la capacidad de disipar energía (Parsaie & Haghiabi, 2019).

Dominic Reeve, Ali Adel Zuhaira y Harshinie Karunarathana hicieron un análisis computacional de las variaciones hidráulicas con geometría, recalcan la importancia de los aforadores y del uso de modelos computacionales para investigar el comportamiento del flujo sobre los aliviaderos, además se valida el modelo con los resultados dados (Reeve et al., 2019)

En la Universidad Politécnica de Cartagena, se llevó a cabo un análisis y una comparación de los coeficientes de descarga en flujo para un vertedero hidráulico, utilizando un programa de análisis bidimensional para la simulación del flujo en una superficie libre (IBER), donde se empleó un módulo hidrodinámico y de turbulencia. En este estudio se pudo comprobar la efectividad del software para modelar y simular diferentes tipos de estructuras (Bermejo, 2019).

3. Marco Teórico

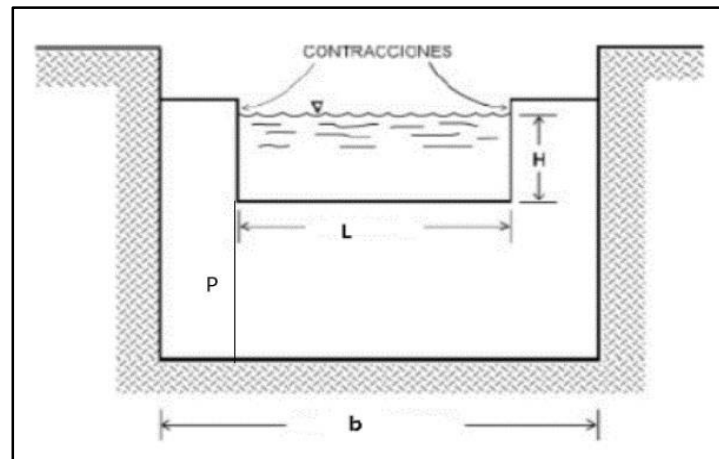
Las comunidades pequeñas son quienes más se ven afectadas por la inexistencia de la seguridad hídrica, es por eso que los acueductos comunitarios son los encargados de garantizar el abastecimiento de agua de manera individual en los distintos grupos (Salazar & Muñoz, 2007).

Un acueducto requiere de la medición permanente y precisa del caudal. La hidrometría se encarga de medir el volumen de agua que transita por una sección transversal de un cuerpo de hídrico por unidad de tiempo, se dice que es una de las partes más importantes de la hidráulica, ya que además de esto se encarga de analizar volúmenes de agua (Lux Monroy, 2015). Para el registro y control de estos datos se implementan estructuras que han sido previamente estudiadas y calibradas con el fin de que se adapten a las condiciones experimentales que puedan estar expuestas, en consecuencia, cada estructura tiene una ecuación de descarga diferente, ya que depende de las dimensiones, características hidráulicas, pérdidas de flujo, y carga hidráulica de la zona de estudio, de esta forma se puede determinar con mayor exactitud el caudal (IDEAM et al., 2017).

Estos medidores de flujo permiten calcular con mayor precisión las extracciones de agua que se realizan en determinada fuente, y cada una de las extracciones tienen sus propias características de volumen como de caudal (Büker et al., 2021). Existen diferentes tipos de estructuras para medir caudal en canales abiertos, tales como vertederos y canaletas que son también llamados aforadores.

3.1. Vertederos

Los vertederos son los instrumentos de medición más comunes, estos pueden ser móviles o fijos y consisten en una escotadura por medio de la cual se hace pasar el caudal requerido en un canal o en una fuente de agua natural (IDEAM et al., 2017). Este término también es aplicado a los obstáculos que se puedan encontrar en el paso de la corriente; esto son mayormente usados en la medición de caudales pequeños, canales, y conductos libres. Una de las ventajas que ofrece este tipo de estructuras es su fácil construcción en cuanto a la estructura, no son susceptibles a ser obstruidos por sedimentos y otros objetos que se encuentren en el agua, lo que hace que su duración sea mayor en el tiempo (Lux Monroy, 2015). En estos se pueden identificar las siguientes partes: Cresta (L), Umbral (P), Ancho del canal (b), Carga (H), y el Espesor (e), como se puede apreciar en la imagen la *Figura 1* (Guamán Sánchez, 2018).

Figura 1. Partes de un vertedero

Nota. Ilustración de las partes de un vertedero de tipo rectangular. Medidores de flujo en canales abiertos por Manuel Monrroy, 2010

Los vertederos son clasificados de acuerdo a su geometría, el grueso de su pared y la longitud de su cresta.

3.1.1. Clasificación de los vertederos

Según la clasificación por el espesor de su pared, estos pueden ser de pared delgada, que es cuando el espesor de este es menor a 2mm es decir $e < 2\text{mm}$; o de pared gruesa que corresponde a los que el espesor es mayor a $2/3$ de la altura de H . De acuerdo a su geometría pueden ser trapezoidales, triangulares, rectangulares, parabólicos y circulares, y En cuanto a su clasificación por la longitud de su cresta, pueden dividirse en vertederos sin contracciones laterales, y vertederos con contracciones (Guamán Sánchez, 2018).

3.1.2. Espesor de la pared

Los vertederos de cresta delgada o pared aguada, deben estar contruidos por un material cuyo espesor sea delgado, este comúnmente es de hoja de metal o madera biselada. Estos deben tener cierta amortiguación aguas arriba de su construcción puesto que el flujo de agua debe llegar con poca turbulencia para pasar por este (Lux Monroy, 2015).

Los vertederos de pared gruesa son comúnmente usados para controlar el caudal de ríos o canales de gran magnitud, se consideran de pared gruesa cuando su cresta es ancha.

3.1.3. Geometría

Vertedero rectangular, es una de las estructuras más utilizadas ya que es una de las más fáciles de construir, consiste en un vertedero con una escotadura rectangular con una cresta biselada de tal forma que se obtenga una arista delgada. Su incertidumbre oscila entre en 3% a 5%, y la ecuación más usada para determinar caudal es la de Francis (Lux Monroy, 2015):

Ecuación 1. Francis para Cálculo de Q

$$Q = 1.84(L - (0.1 n H))H^{3/2}$$

Donde; Q es Caudal que fluye por el vertedero expresado en m³ /s, L es Ancho de la cresta expresado en m (metros), H es Carga del vertedero expresado en m, y n es Número de contracciones.

Vertedero triangular, con estos se obtienen medidas más precisas de las alturas de carga, que corresponde a caudales reducidos. Son contruidos en hoja lata y solo se usan los que tienen una forma isósceles (90°). Para el cálculo del caudal en estos vertederos se hace un adaptación en la fórmula de Thomson de la siguiente manera (Lux Monroy, 2015):

Ecuación 2. Calculo de caudal para vertedero triangular según Thomson

$$Q = 1.4 (H^{\frac{5}{2}})$$

3.2. Aforadores

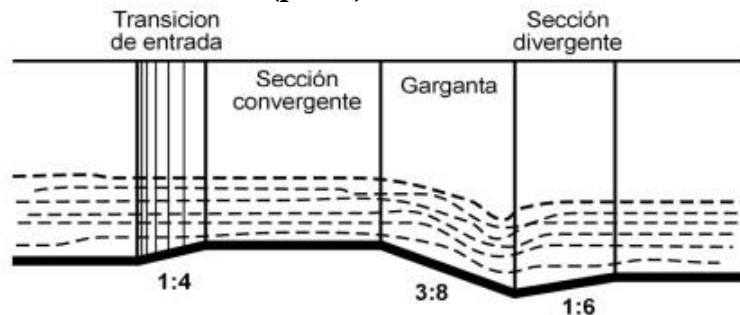
En cuanto a los aforadores, tienen una gran ventaja, respecto a que se fabrican e instalan de acuerdo con las especificaciones para la satisfacción de una necesidad en particular y no necesitan de una calibración, para interpretación de los datos de caudal se pueden encontrar en tablas ya previamente establecidas en la literatura (Hudson, 2000).

3.2.1. Canaleta Parshall

Uno de los aforadores más conocidos por su efectividad, fácil instalación y mantenimiento, es el aforador tipo canaleta Parshall.

Este aforador está compuesto por una sección de convergencia que cuenta con un piso a nivel, una garganta con piso desnivelado aguas abajo, y un sección de divergente con un piso desnivelado agua arriba; lo que hace que el caudal recorra con una velocidad crítica la garganta y llegue con una velocidad estacionaria en la sección divergente (Hudson, 2000).

Figura 2. Partes de un canal Parshall (perfil)



Nota. Adaptado de Manual de Hidráulica, por J. M De Azevedo, 1976

La fabricación puede ser en distintos materiales como madera, lamina o fibra de vidrio; en algunos casos se puede construir sobre el terreno con el uso de bloques de concreto, ladrillos o fundidos en cemento, siendo estos últimos los de mayor durabilidad (Lux Monroy, 2015). El uso de canales parshall es muy común en sistemas abastecimiento de agua, pues es fácil de realizar y se requiere poca inversión si se hace de forma adecuada.

Algunas de las ventajas que presenta este tipo de medidor, además de la fácil construcción son:

- ✓ Menor pérdida de carga
 - ✓ Paso de flujo libre
 - ✓ Menores posibilidades de que las mediciones se vean afectadas por sedimentaciones
- Para el cálculo del caudal en los canales Parshall se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 3. *Calculo de caudal de tipo potencial para canaletas Parshall*

$$Q = K H^n$$

Donde; K y n ya se encuentran establecidos previamente.

En la clasificación de aforadores, también se encuentra el aforador tipo Venturi, consiste en un elemento que estrangula el flujo que pasa por ellos y generan un cambio en la carga piezométrica causando una pérdida de energía. Este aforador puede dividirse en 4 partes, la zona de entrada, la zona de contracción, la zona de expansión, y la zona de salida, y el diseño de estas dependerá de las diferentes condiciones de funcionamiento (Iñiguez-Covarrubias et al., 2015)

Para la adaptación, diseño y estudio estas estructuras, es necesario el uso de software, mediante los cuales es posible simular y modelar su funcionamiento, teniendo en cuenta todas las características hidráulicas y topográficas del terreno, conjunto con la necesidad específica de su implementación, ya que estos son una representación simplificada de la realidad (Büker et al., 2021). El desarrollo de las distintas herramientas computacionales que han facilitado la aplicación de enfoques más complejos, han incrementado el uso de modelos hidráulicos en 2D y 3D. Existen gran variedad de paquetes para simulado y modelado en 2D creados por grupos de investigación, universidades, organizaciones comerciales y gubernamentales, entre otros; que garantizan el rendimiento que en términos de su capacidad para simular el flujo superficial en zonas densamente pobladas (Büker et al., 2021).

3.3. IBER

Uno de los modelos bidimensionales más usados para este tipo de simulaciones es IBER, que consiste en la integración de diferentes modelos que van desde la aplicación de la hidrodinámica fluvial, hasta el flujo de marea en estuarios, resolviendo las ecuaciones por el método de volúmenes finitos (Bermejo, 2019). En este se deben asumir de forma correcta las variables involucradas en la solución del problema, para así evitar errores en los resultados (Pinos & Timbe, 2019). Uno de los campos de aplicación más importante de IBER es el cálculo hidráulico de red de canales en lámina libre, conjunto con análisis de procesos de sedimentación y erosión. Este hace uso de un método de volúmenes finitos para el cálculo de caudal, turbulencias y sedimentos, resolviendo cada ecuación con claros esquemas descentrados, haciéndolo bastante útil y eficaz para flujos críticos o discontinuos (Bladé et al., 2014).

En cuanto al modelo numérico de IBER, este resuelve las ecuaciones bidimensionales de St. Venant, donde se incorporan los efectos de rozamiento y turbulencia por los vientos:

Ecuación 4. St Venant incorporando efectos de rozamiento y turbulencia

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = 0 \\
 & \frac{\partial}{\partial t} (h U_x) + \frac{\partial}{\partial x} \left(h U^2_x + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (h U_x U_y) \\
 & = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial t} (h U_y) + \\
 & \quad \frac{\partial}{\partial x} (h U_x U_y) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h U^2_y + g \frac{h^2}{2} \right) \\
 & = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y} \right)
 \end{aligned}$$

h pertenece al calado U_x y U_y son velocidades en eje horizontal, g es gravedad, ρ es densidad del agua, τ_s es fricción en la superficie libre, τ_b fricción en el fondo, Z_b es la cota de fondo.

✓ Fricción de fondo; esta es evaluada mediante la fórmula de Maning como:

$$\tau_{b,x} = \rho g h \frac{n^2 U_x |U|^2}{h^{4/3}} \qquad \tau_{b,y} = \rho g h \frac{n^2 U_y |U|^2}{h^{4/3}}$$

Y la fórmula de Van Dorn, para calcular la fuerza de rozamiento en la superficie. (Bladé et al., 2014).

Este software es bastante útil a la hora de la toma de decisiones que afecten a los canales o ríos objetos de simulación, ayuda a proteger las estructuras hidráulicas de la erosión o colapso a las cuales se encuentran expuestas, en especial en terrenos donde se puedan presentar saltos hidráulicos (Hafnaoui & Debabeche, 2020). Adicional a esto, el software deja ver gráficamente los resultados del comportamiento hidrodinámico de los flujos, lo que es factible a la hora de simular estructuras hidráulicas.

3.3.1. Resultados hidrodinámicos de IBER

La modelación matemática de IBER en un flujo trata de predecir los valores que tomen las características hidráulicas tales como:

Calado Hidráulico: corresponde a la altura de la lámina de agua respecto a un plano de referencia, que corresponde normalmente a la cota inferior del plano (Aljimos Gallardo, 2018)

Número de Froude: se define como el cociente entre la velocidad de un fluido y la velocidad en la que se puedan propagar las perturbaciones existentes. Este número describe los regímenes de flujo; es decir, si $Fr > 1$ se considera un flujo supercrítico y las alteraciones del flujo solo viajan aguas abajo, si $Fr = 1$ se considera un flujo con régimen crítico, y si $Fr < 1$ es un flujo subcrítico, por lo cual las alteraciones pueden viajar aguas arriba y aguas abajo (Borthagaray, 2012).

Energía específica: hace referencia a la energía de un flujo con respecto a la cota topográfica. Esta normalmente es expresada en unidades de longitud (Borthagaray, 2012).

Velocidad: por medio de este parámetro se podrán saber las condiciones máximas y mínimas de velocidad, para determinar la erosión a la que se encuentra expuesta la estructura. Aun mínimo de velocidad menor posibilidad de erosión y aun máximo de velocidad, aumenta la probabilidad de erosión (Aljimos Gallardo, 2018).

4. Metodología

4.1. Determinación de características en campo

En el desarrollo de esta primera fase, fue necesario contar con el apoyo de la directora actual del acueducto comunitario, con quien se realizó una reunión para socializar las fases del proyecto y las actividades a realizar dentro del acueducto, resaltando la importancia social y ambiental de su implementación; esto con la finalidad de transmitir la información con la junta de acción comunal del barrio para así obtener su aprobación.

Se procedió a realizar una visita en campo con el propósito de hacer un reconocimiento del sistema de acueducto en el barrio. Esta inició desde donde se realiza la captación del agua en los cuerpos hídricos (Caño Vitalia y Caño Grande), hasta su distribución final en el barrio. Al finalizar el recorrido se solicitaron las lecturas del caudal arrojadas por el macro medidor, y los planos del desarenador, ya que este se tuvo en cuenta para el diseño de la estructura de aforo.

Los planos del desarenador fueron digitalizados mediante el software AutoCAD Civil- 3D versión 2021, con el fin de tener una vista de este en 3 dimensiones para lograr la simulación en estos tres ejes, a su vez se contemplaron todas las medidas propuestas en el plano, para posteriormente hacer el mapa de reconocimiento del sistema.

Durante la etapa de digitalización de los planos, se hizo un rediseño de estos, contemplando nuevas medidas que favorecen a la simulación. Una vez digitalizados estos datos, se exportaron en un formato Dxf (Drawing eXchange Format) ya que es el único permitido en IBER.

4.2. Modelación y simulación en IBER

Se realizó el diseño del aforador contemplando la estructura del desarenador, debe ser construido dentro de esta estructura; para este diseño se tuvo en cuenta los datos de caudal captado actualmente, y se trabajó con el caudal máximo con el fin de tener en cuenta las condiciones máximas de oferta de agua y así evitar pérdidas.

Se hizo un análisis teniendo en cuenta la información bibliográfica pertinente y en relación a los datos hidráulicos y diseño del desarenador previamente digitalizado en 3D, para establecer cuál es la estructura más apropiada para la medición del caudal de entrada al sistema; una vez hecho este análisis se procedió a la etapa de diseño, donde el primer paso fue simular el desarenador, ya que

es importante garantizar las condiciones de flujo laminar dentro de este. Para iniciar con la simulación, se importó el desarenador en formato Dxf desde el software AutoCAD Civil- 3D hacia el software IBER 2.6, para posteriormente hacer una verificación de la estructura para asegurarse de que estas estén completas y no falten polilíneas.

Se crearon las superficies del desarenador, seleccionando en los contornos perimetrales por donde van a pasar el flujo de agua, teniendo en cuenta el tamaño y forma de este, junto con este también se asignó el coeficiente de rugosidad del material del cual está construido, en este caso fue hormigón; se importaron los datos del caudal que se va a manejar, y las condiciones iniciales. Seguido a esto se creó un mallado de tipo no estructurado (GiD) debido a la forma irregular del desarenador, una vez creada la malla se ingresaron los datos del problema, que fueron correspondientes al tiempo de simulación, y resultados deseados. Una vez se obtuvieron los resultados de la simulación, se procedió a determinar el lugar de ubicación de la estructura de aforo, el tipo de estructura, el material de construcción y sus medidas específicas.

Se procedió a simular el aforador dentro del desarenador, asignando los datos correspondientes para lograr que el flujo siguiera laminar, sin necesidad de disminuir el caudal de salida. Además, se evitó la ocurrencia de resaltos hidráulicos que pudieran afectar las medidas que se obtuvieran en la estructura de aforo. Este proceso se realizó en repetidas ocasiones, poniendo en práctica el método de prueba y error, ya que se debían corregir las dimensiones para asegurar el funcionamiento adecuado del aforador.

Una vez se garantizó las condiciones adecuadas, se procedió a realizar el cálculo del caudal teórico utilizando la ecuación de descarga correspondiente a la estructura de aforo escogida. Posterior a esto, se exportaron los planos del aforador en formato PDF, desde el software AutoCAD Civil 3D. Las características hidráulicas fueron graficadas desde IBER 2.6 con 3 caudales diferentes, con el fin de garantizar una proyección de la estructura hidráulica, para asegurarse que por el aumento del caudal de captación no se vea afectada la medición. Los resultados de estas fueron resumidos en una tabla.

4.3. Instauración de los parámetros de diseño y sensibilidad

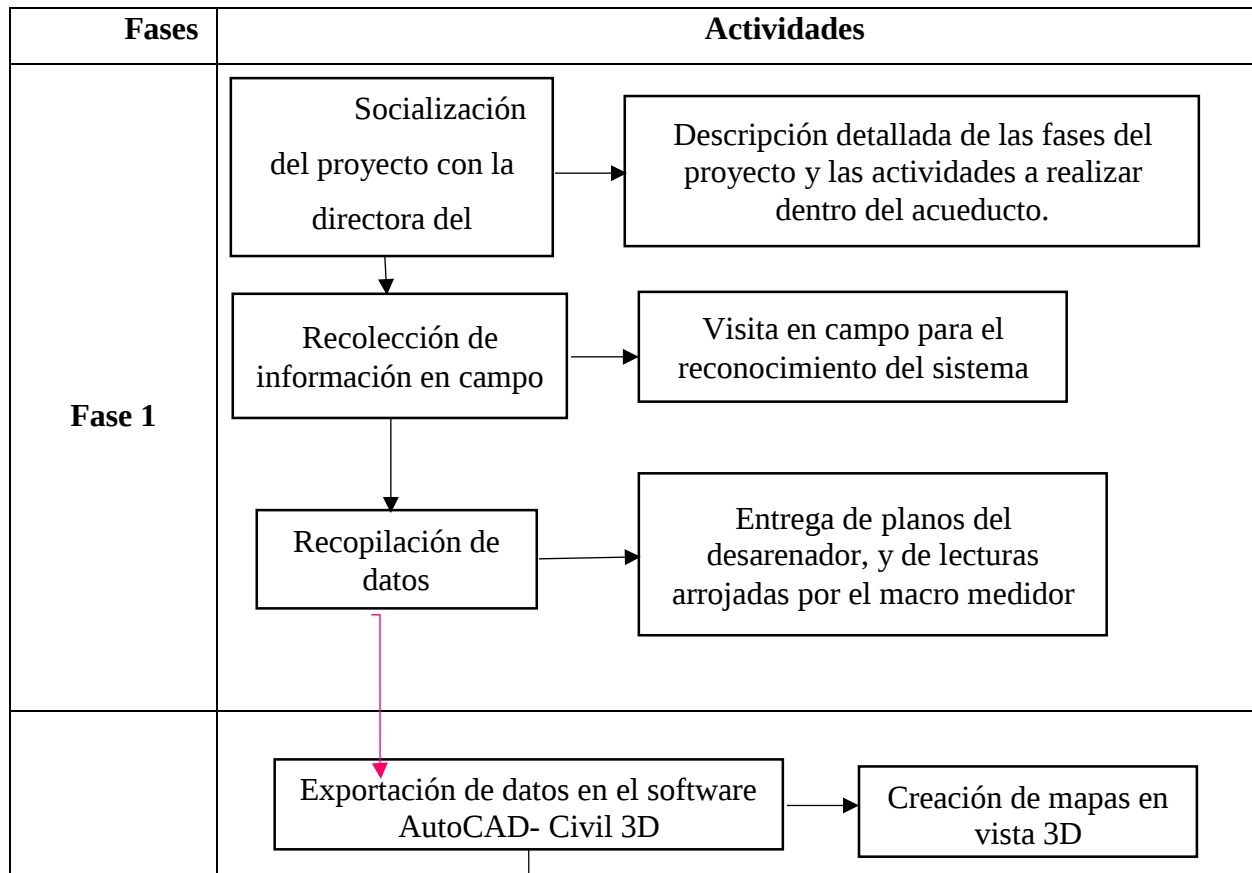
Con los diseños ya preestablecidos se procedió a realizar una descripción detallada de cada una de las medidas escogidas para el diseño del aforador, especificando tipo de material y recomendaciones para su construcción, adicional a esto, se detectó cuál es la sensibilidad de estas

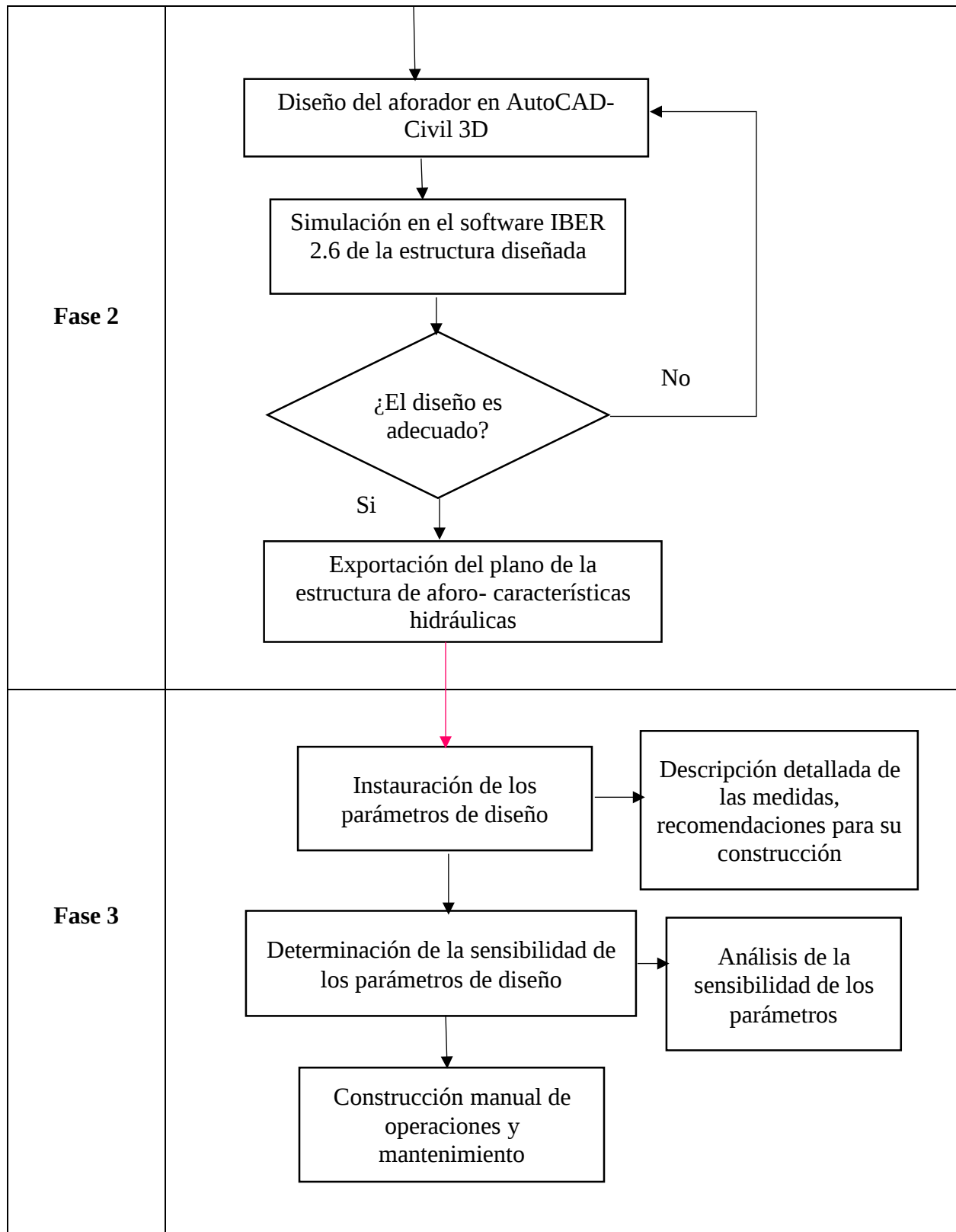
determinando cual de todas estas es la más sensible, es decir, que con su modificación cambie de forma inmediata el comportamiento del flujo dentro del aforador. Para esto se hicieron diferentes ensayos de simulación con la estructura completa (desarenador- aforador). Una vez se tienen estos resultados se procedió a realizar un manual de operaciones donde se indicó el método de medición correcto, los periodos de mantenimiento, al igual que la forma en la que debe ser realizado.

4.4. Diagrama metodológico

En el siguiente diagrama se especifica de esta manera el orden para el cumplimiento de los objetivos planteados en este proyecto.

Figura 3. Diagrama metodológico del proyecto





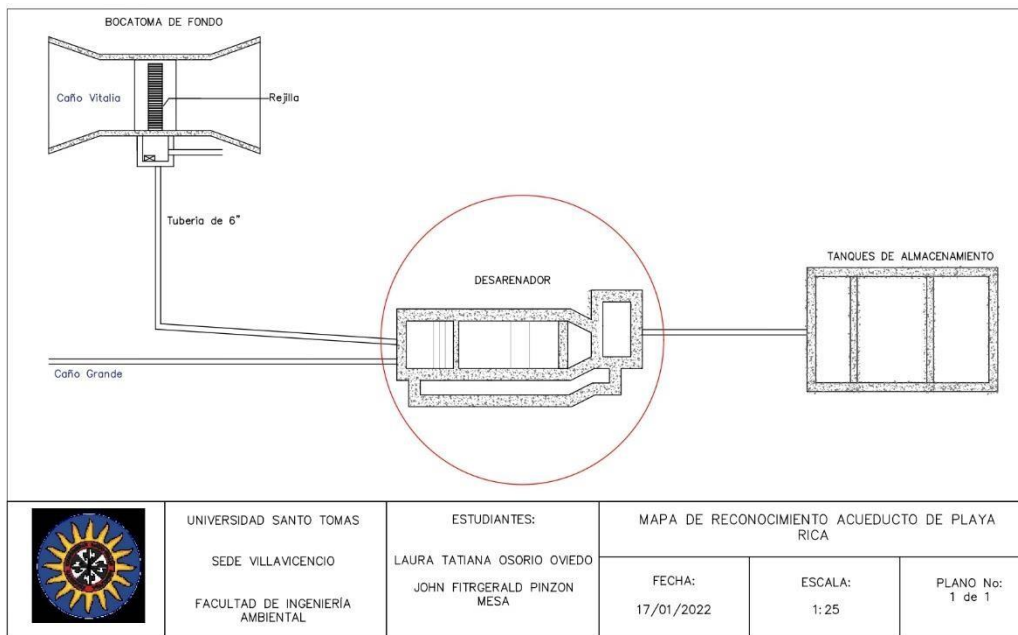
Nota. En el diagrama se pueden observar las actividades realizadas para el cumplimiento de las fases metodológicas del proyecto. Por: Osorio & Pinzón (2022)

5. Análisis y discusión de los resultados

5.1. Visita en campo y mapa de reconocimiento del sistema

Este recorrido se inició en los cuerpos hídricos, caño Vitalia y caño Grande, donde se realiza la captación de agua para el acueducto, esta se hace por medio de una bocatoma de fondo; el agua es transportada lateralmente mediante un tubo en PVC de 6" con una longitud de 170 m aproximadamente, va hacia un tanque de derivación y posteriormente hacia un tanque desarenador que no se encuentra en uso actualmente, el recorrido del agua sigue hacia los tanques de almacenamiento, para así seguir a un macro medidor en el que se hace la lectura del caudal para anteriormente hacer la distribución de esta en el barrio. Se pudo observar ciertas fallas en el transporte del agua, puesto que hay pérdidas en la unión de la tubería y los tanques de almacenamiento como se puede observar en las imágenes del **Anexo 1**. Estas pérdidas se deben al inadecuado diseño que hay, el agua que es captada de los cuerpos hídricos, llega con mucha presión por las condiciones de corriente, provocando desbordamientos en la zona, y en épocas de invierno existe la posibilidad de mayor arrastre de sedimentos llevando a la obstrucción en la estructura. Fue evidente la falta del desarenador- sedimentador, ya que el agua captada tiene sedimentos, lo que provoca el desgaste acelerado de las estructuras y a causa de esto el funcionamiento del sistema se hace ineficiente.

Durante la visita se observó un espacio entre la tubería de transporte del agua y los tanques de almacenamiento, donde se piensa la construcción de un nuevo desarenador por parte de la alcaldía municipal, este con el fin de hacer un sistema integral de acueducto. Por medio de esta visita se logró hacer un mapa de reconocimiento del sistema, el cual fue necesario digitalizar en AutoCAD Civil 3D, para identificar el lugar más adecuado para la instalación de la estructura de aforo dentro del desarenador, como se puede ver en la **Figura 4**.

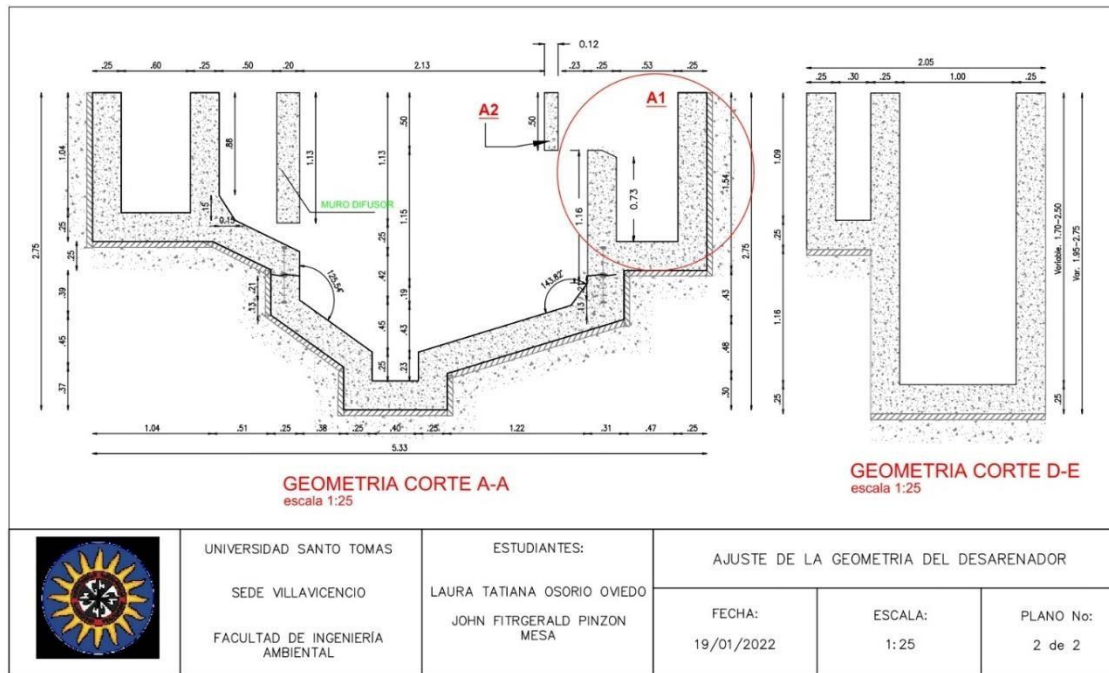
Figura 4. Mapa de reconocimiento del sistema

Nota. Mapa de caracterización de las estructuras del acueducto, en donde se resalta la estructura de desarenador la cual está en espera de construcción. Por: Osorio & Pinzón (2022)

5.2. Planos del desarenador

Estos planos fueron otorgados por la directora del acueducto en formato PDF como se puede observar en el Anexo 2, en los planos se encuentran las medidas específicas estipuladas para la construcción de este desarenador como estructura para el acueducto, sin embargo, al digitalizarlos en el software AutoCAD- Civil 3D versión 2021, se realizó un rediseño modificando algunas de sus medidas debido a que había inconsistencias entre la geometría de corte del desarenador.

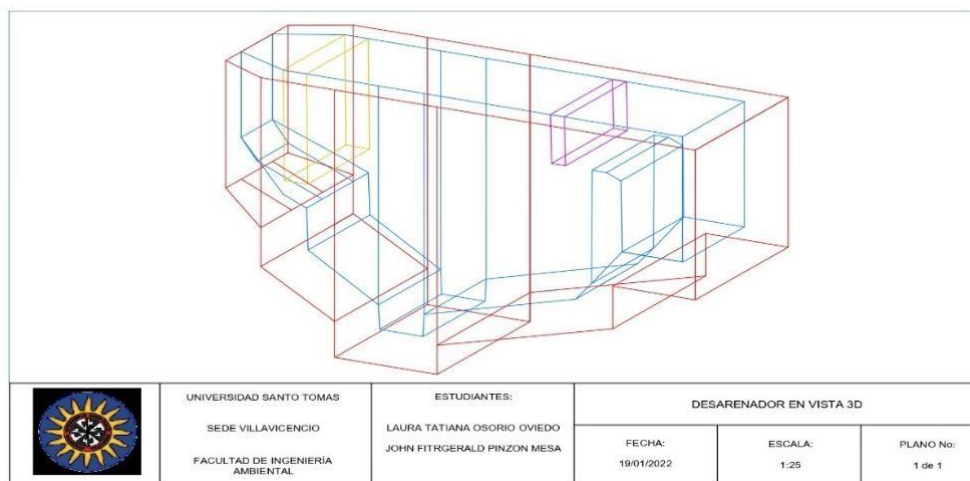
La primera modificación se realizó en la salida del desarenador en el corte A-A como se puede observar en la Figura 5, esta medida pertenece a la distancia existente entre el muro A1 y A2 que originalmente es de 0.96 m y fue modificada a una distancia de 1.03 m con el fin hacer coincidir los cortes (ver Figura 5). También se corrigió el grosor del muro A2 disminuyendo su espesor para aumentar la longitud del cauce de salida. Por último, se disminuyó el largo del muro A1 de (0.98 m) a (0.73m) con el fin de drenar mucho más fácil la salida del agua.

Figura 5. Plano geometría corregida (desarenador)

Nota. Plano corregido del desarenador cortes A-A & corte D-E. Por: Osorio & Pinzón (2022)

Estas correcciones fueron tenidas en cuenta en la obra, ya que este actualmente el desarenador se encuentra en fase de construcción (ver Anexo 3).

Una vez se corrigieron estos planos, se digitalizó el desarenador en 3D para obtener una mejor vista de todos los ejes y poder exportar al IBER (ver Figura 6)

Figura 6. Vista del desarenador en 3D

Nota. Sedimentador en vista 3D de software AutoCAD- Civil 3D. Por: Osorio & Pinzón (2022)

5.3. Selección y ubicación de la estructura de aforo

Lo primero a considerar fue el diseño del desarenador, ya que la estructura de aforo debe estar dentro de este, y lo ideal fue aprovechar el espacio que se tenía. Posterior a esto, se tuvo en cuenta la frecuencia y el periodo en el que se deben realizar las mediciones, pues lo requerido por la entidad CORMACARENA es mínimo una medición diaria.

Otros de los parámetros a considerar para el diseño de esta estructura, fue el comportamiento del flujo dentro del desarenador, de esta manera se pudieron interpretar las masas de agua, dejando ver gráficamente donde se presentaban las condiciones hidrodinámicas más adecuadas a lo largo del desarenador, para la instalación de la estructura de aforo.

Por lo que se procedió hacer primero la simulación del desarenador:

5.4. Simulación del desarenador

Con la estructura previamente importada al IBER, el primer paso para la simulación fue la asignación de los datos de las condiciones de contorno (hidrodinámica), los datos del problema, la rugosidad (uso del suelo) y la creación de la malla. Estos fueron asignados teniendo en cuenta el tipo de material del desarenador, caudal de entrada, y tiempo de simulación, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1. Datos ingresados en la simulación del desarenador

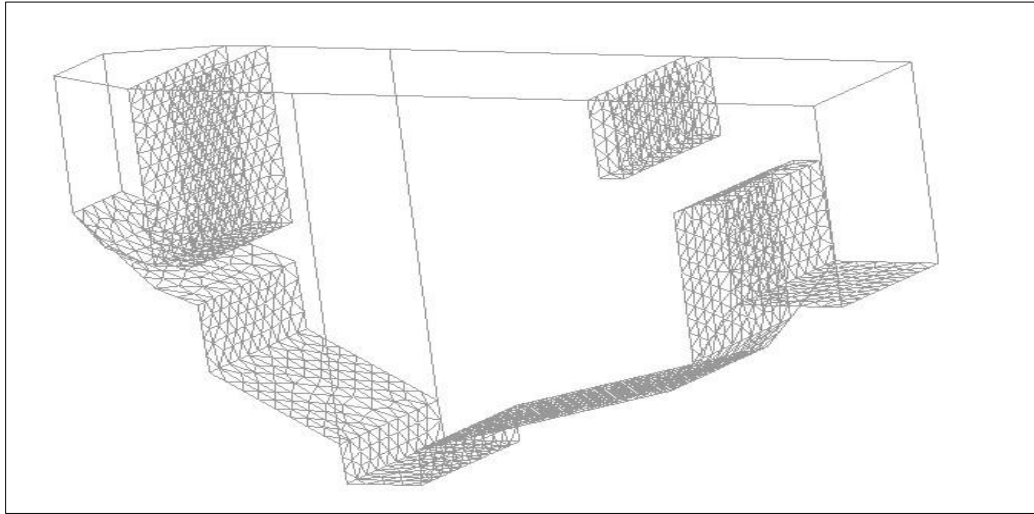
Datos asignados para la simulación						
Condiciones de contorno			Datos del problema		Uso del suelo	
Q total (m ³ /s)	Régimen	Salidas	Entrada	Tiempo max. Simulación (s)	Intervalo de resultados (s)	Coef. Maning
0.0095	Critico- Subcritico	1	1	3600	60	0.018

Nota. La siguiente tabla muestra los datos ingresados en el IBER, para lograr la simulación del flujo de agua dentro del desarenador.

Con respecto a la malla esta fue elegida de forma no estructurada, pues la triangulación de esa es la más adecuada para la forma irregular del desarenador (Iber, 2014), el tamaño de esta fue de 0.1 m, ya que al ser una estructura de tamaño considerable la triangulación realizada a esta distancia

genera los volúmenes de control suficientes para la interpretación de los resultados. El número total de elementos triangulares de la malla fue de 2.204. En la *Figura 7* se puede apreciar en detalle. El coeficiente de Manning correspondiente a 0.018 fue asignado a toda la estructura, este valor es sugerido por el software, ya que se seleccionó hormigón de cemento como material de construcción

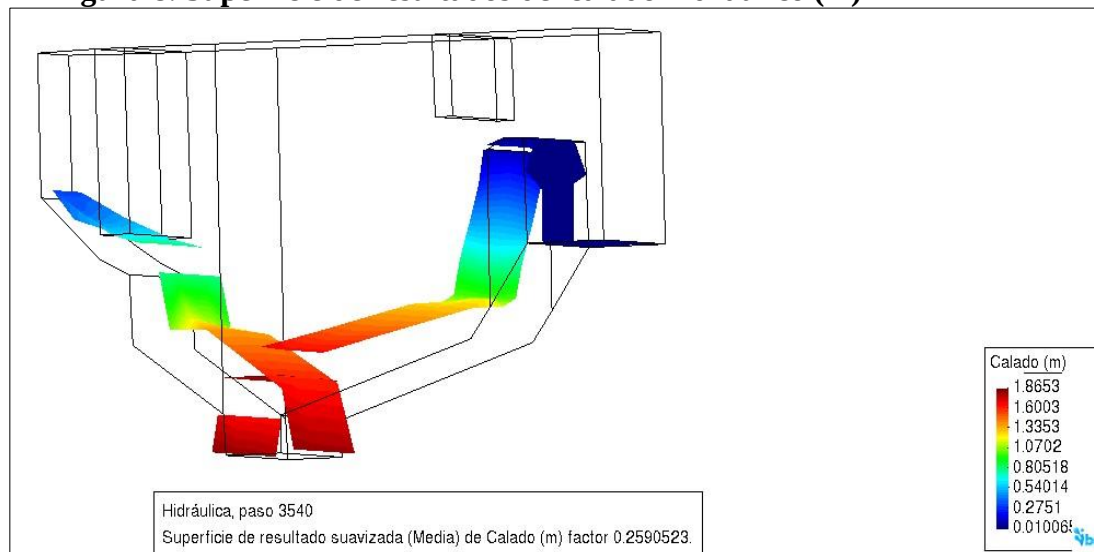
Figura 7. Detalle del mallado generado



Nota. Malla de cálculo generada para el desarenador. Por: Osorio & Pinzón (2022)

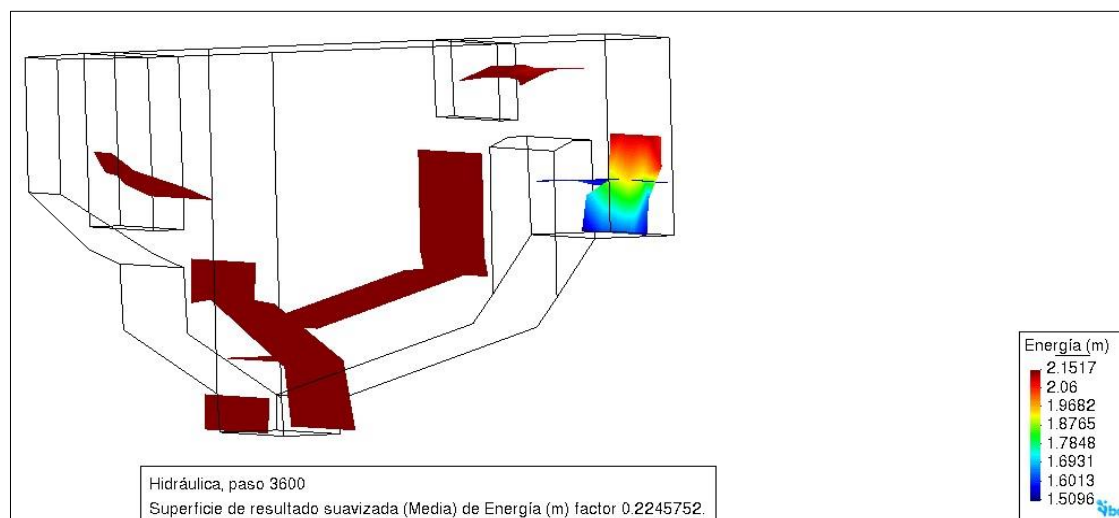
Los resultados de los parámetros seleccionados para mostrar fueron los que permitieron saber el comportamiento hidrodinámico del fluido dentro de la estructura pasada 1h, que fue lo estipulado para que el desarenador se encuentre en funcionamiento con unas condiciones constantes:

✓ **Calado hidráulico (m):** en este parámetro se puede apreciar una altura máxima de agua desde la base del desarenador, este valor corresponde a una altura de 1.86 m para un caudal de $0.0095 \text{ m}^3/\text{s}$, quedando como resguardo 0.6722 m, lo que se considera adecuado para evitar desbordamientos (RAS, 2000).

Figura 8. Superficie de resultados del calado hidráulico (m)

Nota: Extensión del calado hidráulico del flujo dentro del desarenador, contemplando las pantallas deflectoras. Por: Osorio & Pinzón (2022)

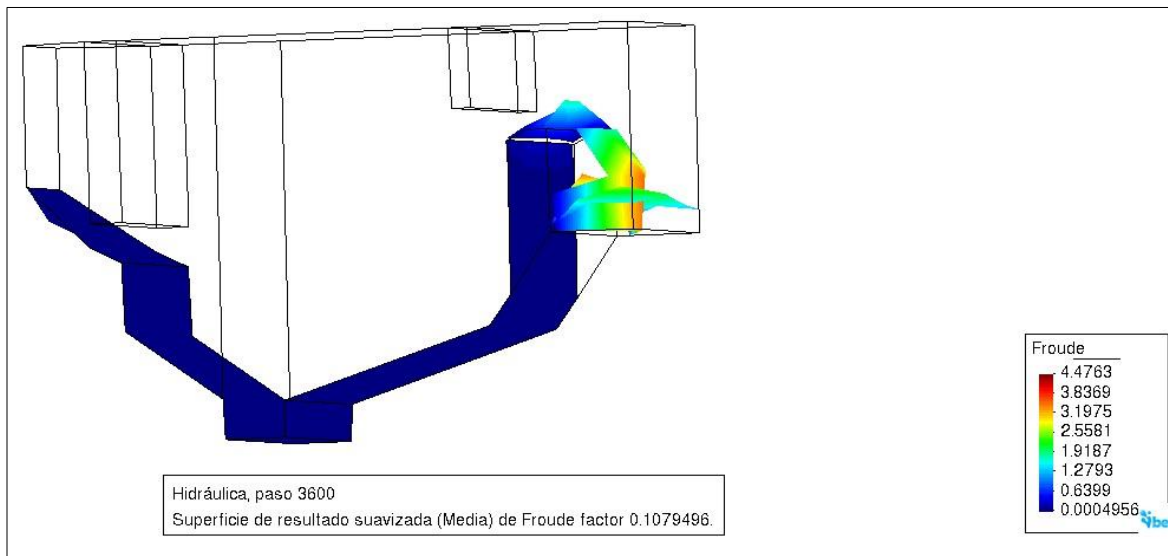
✓ **Energía (m):** La energía se mantuvo constante durante el primer trayecto del desarenador, puesto que la columna de agua no varía en esta zona y el caudal circulante tampoco. La energía disminuye tan pronto el agua sobrepasa el muro contemplado en la estructura, ya que este hace que pierda su fuerza gradualmente como se puede apreciar en la siguiente figura:

Figura 9. Superficie de resultados de Energía (m)

Nota. Energía por unidad de ancho que se genera a lo largo del desarenador. Por: Osorio & Pinzón (2022)

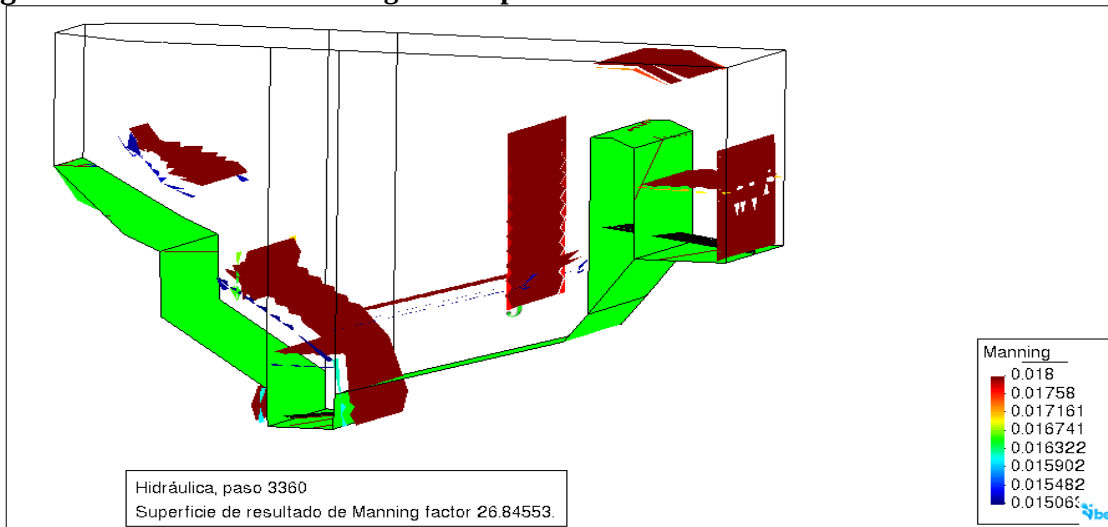
✓ **Froude:** En este parámetro se puede apreciar un flujo subcrítico, que normalmente obedece a velocidades y pendientes bajas, por lo que la incidencia de resaltos hidráulicos es despreciable. Este número está relacionado con la energía que se traduce en la profundidad de la lámina de agua, por eso su valor cambia a supercrítico en el momento en que la energía también lo hace (**Figura 10**).

Figura 10. Numero de froude en la superficie



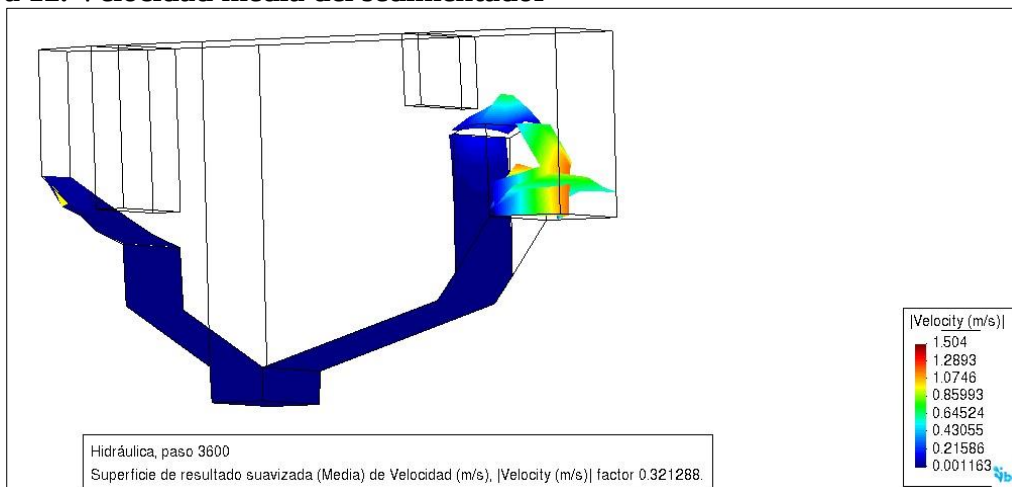
Nota: Medida del número de Froude en el desarenador. Por: Osorio & Pinzón (2022)

✓ **Manning:** al ser un resultado dependiente de la rugosidad, está ligado a la resistencia del movimiento de las aguas. Se puede observar que este es constante en gran parte de la estructura, puesto que toda esta fabricada de hormigón, por lo tanto, este valor es correspondiente a 0.018, que es un valor ponderado sugerido por el software para el material en el que espera su construcción. Este material es uno de los más adecuados para este tipo de estructuras, ya que es duradero y tiene una capacidad de soportar una velocidad de 2.5 m/s, lo que para un desarenador está dentro del rango.

Figura 11. Coeficiente de maning en la superficie

Nota: Número de Maning para las superficies en hormigón. Por: Osorio & Pinzón (2022)

✓ **Velocidad (m/s):** la velocidad del agua en la mayor parte del desarenador tuvo un estado estacionario, puesto que esta tuvo un valor mínimo de 0.001163 m/s, y un valor máximo de 1.5 m/s. El valor mínimo se mantuvo hasta después del paso del muro contemplado en la estructura, tal y como se puede apreciar en la **Figura 12**. La velocidad media arrojada en todas las secciones del desarenador es adecuada teniendo en cuenta el material del cual está construido (hormigón de cemento) por lo que es poco probable que este se erosione, además esta favorece al tiempo de sedimentación de las partículas de arena.

Figura 12. Velocidad media del sedimentador

Nota. Velocidad del flujo establecida a lo largo del desarenador. Por: Osorio & Pinzón (2022)

Observando el comportamiento general del flujo en el desarenador, se puede decir que este favorece al proceso de sedimentación de las partículas. Una de las variables más importantes a la hora de ver el comportamiento del flujo, se pudo evidenciar en la *Figura 6*, que corresponde a la altura de la lámina de agua, ya que el volumen útil de sedimentación depende de este valor, por lo que se puede decir que la sección de sedimentación está dentro de los parámetros establecidos para que alcance una velocidad media de deposición de partículas (1.5 m – 4 m). Con respecto a la velocidad del flujo, se puede clasificar en un desarenador de baja velocidad donde $V > 1$, y esto se pudo ver evidenciado en los resultados obtenidos durante la simulación, puesto que no hubo una variación significativa de velocidad, siendo esta en su mayoría un valor de 0.001163 m/s, cuyo funcionamiento favorece a la prevención de la degradación de las estructuras, que pueda ocurrir por el arrastre de partículas, especialmente las de mayor diámetro (Albuja, 2013).

El régimen de flujo subcrítico (ver *Figura 10*) es posible gracias al área de salida que es la encargada de mantener este de forma uniforme, por lo que se considera adecuado para este tipo de infraestructuras hidráulicas, ya que favorece a las condiciones de reposo en las que se debe encontrar el flujo dentro de un desarenador.

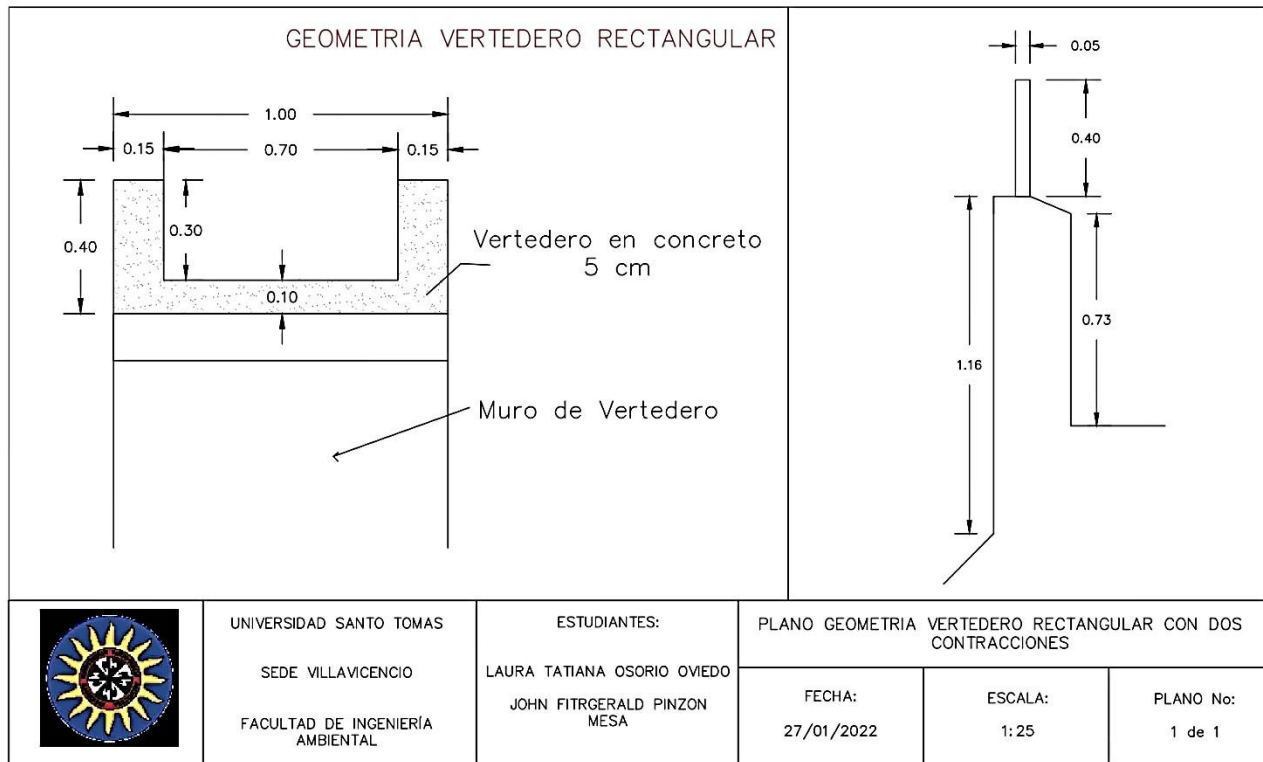
Por lo anterior, se establece que la estructura de aforo debe estar finalizando la sección de sedimentación, ya que hasta este punto se tienen unas condiciones de flujo uniforme con velocidades bajas, las cuales son condiciones recomendadas para evitar turbulencias y lograr que la superficie de la lámina de agua este tranquila con el fin de tener una medición más precisa del caudal de entrada al acueducto (Vega, 2004). Adicional a esto, la estructura de aforo no altera el proceso de sedimentación, y teniendo en cuenta que el desarenador es una estructura a la que se le debe hacer limpieza de fondo constante se debe asegurar que no haya ninguna obstrucción que impida esta labor (Albuja, 2013).

5.5. Diseño de la estructura de aforo

En razón de esto, se diseñó una estructura de aforo tipo vertedero de forma rectangular con dos contracciones, cuyas dimensiones se pueden ver a detalle en la *Figura 13*. Considerando la ubicación del vertedero, este cumple con la condición que debe tener aguas abajo de su instalación, ya que no debe haber otra estructura que pueda influir en el nivel del agua, por lo que este funcionara de forma adecuada en condiciones de lámina de vertiente libre (Vega, 2004). El

material sugerido para su construcción es de hormigón de cemento, puesto que este tiene mayor resistencia al contacto con el agua, además de que puede ayudar a disminuir la velocidad del paso del agua por la estructura, lo que es favorable teniendo en cuenta que esta debe seguir con un flujo laminar para tener una medición más acertada.

Figura 13. Geometría del vertedero rectangular de dos contracciones



Nota. Medidas sugeridas para la construcción del vertedero en hormigón de cemento.

✓ Recomendaciones para su construcción

La cresta del vertedero debe estar completamente recta, es decir debe estar de forma horizontal y nivelada. La estructura debe ser impermeable y durante su instalación se debe hacer una verificación de filtración de agua, ya que se debe garantizar que el flujo de agua pase solo por la escotadura.

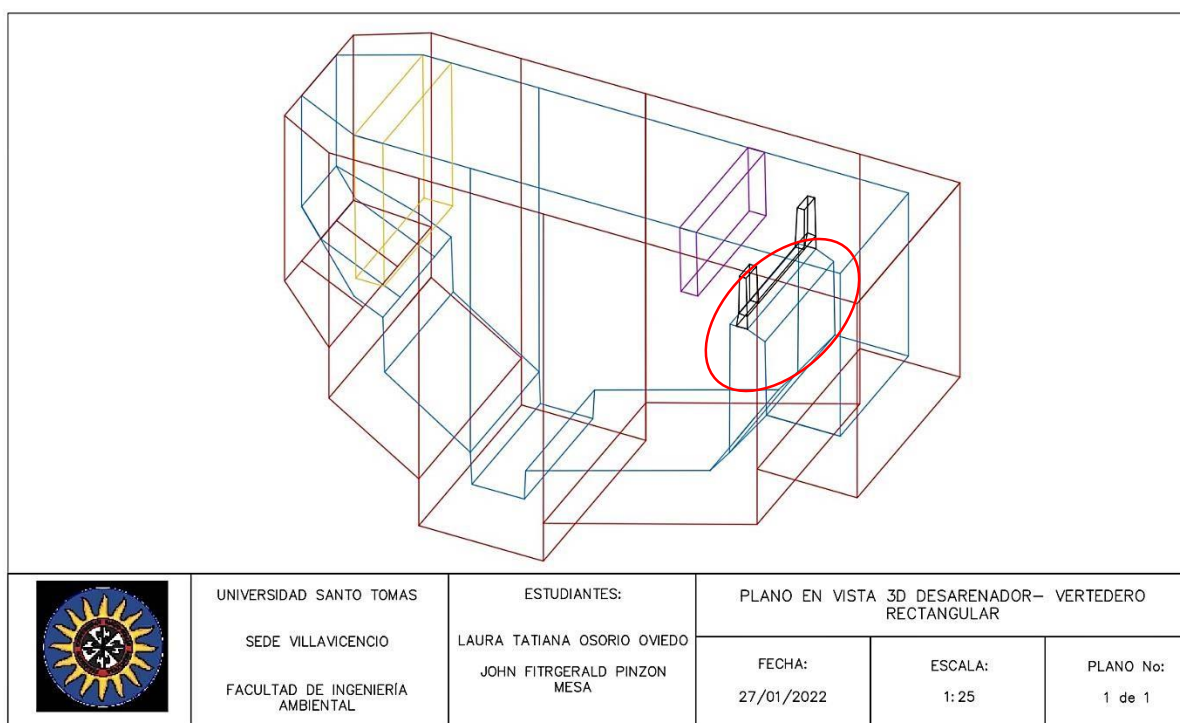
La base de este también debe estar completamente plana y nivelada, por lo tanto, se recomienda sea instalado en la superficie recta del muro de vertedero del desarenador, tal y como lo indica la **Figura 13**.

El vertedero rectangular es una de las formas más eficientes, económicas, y precisas para aforar caudales de este tipo ya que su incertidumbre está entre el 2 y 4%. Además de esto, su construcción es sencilla, lo que facilita su implementación en este tipo de acueductos (Lux Monroy, 2015). En cuanto a la medición del caudal, este se puede medir de forma instantánea, ya que para cada altura de la lámina de agua se tendrá un caudal distinto. Esto es posible ya que existe una ecuación de Q establecida para este tipo de estructuras (ver Ecuación 1).

5.6. Simulación del desarenador con el vertedero

Para la simulación del vertedero, se hizo una unión de la estructura del desarenador (*Figura 6*) y la estructura de aforo diseñada anteriormente (*Figura 13*), en el software AutoCAD Civil 3D versión 2021 como se puede apreciar en la *Figura 14*. Esto permitió tener la estructura integral para la simulación conjunta

Figura 14. Vista 3D del desarenador conjunto el vertedero rectangular



Nota. Sedimentador y vertedero en vista 3D del software AutoCAD- Civil 3D. Por: Osorio & Pinzón (2022)

La importación al se IBER realizó en formato Dxf, donde se aseguró que toda la estructura estuviera completa. Seguido a esto, se procedió a ingresar nuevamente los datos de condiciones de contorno y los datos del problema; estos datos fueron asignados teniendo en cuenta la nueva estructura de aforo, por lo que las variables de salida del flujo cambiaron, ya que al asignar la salida del flujo se puso en condición de “vertedero” seleccionado para este un flujo régimen subcrítico, tal y como se muestra en la siguiente tabla.

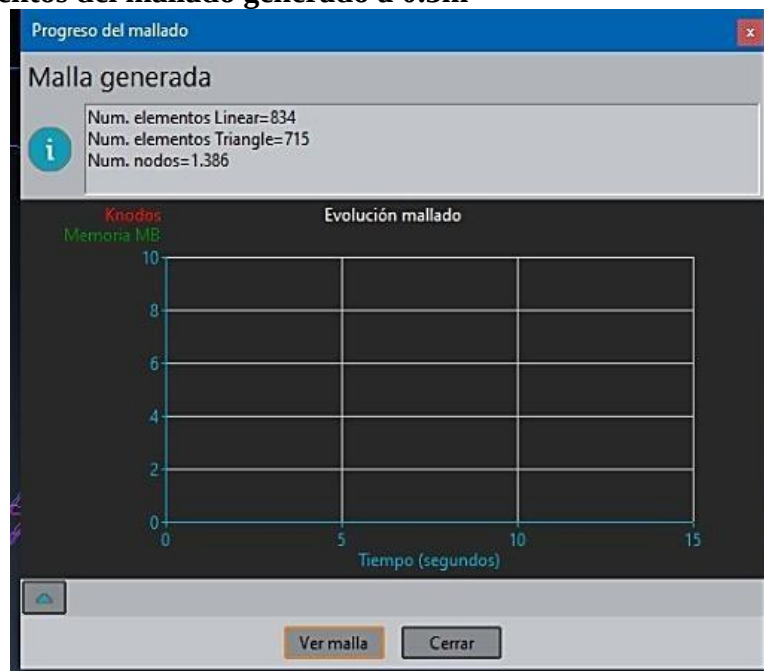
Tabla 2. Datos ingresados para la simulación del vertedero y desarenador

M									
Condiciones de contorno					Datos del problema			Uso del suelo	
Q Régimen total (m ³ /s)	Entrada		Salida		Tiempo max. Simulación (s)	Intervalo de resultados (s)		Coef. Maning	
0.0095	Critico-Subcritico	1	Condición de Flujo	Tipo	Coef. Vertedero	N. de salidas	3600	60	0.018
			Subcritico		Vertedero		1.7	1	

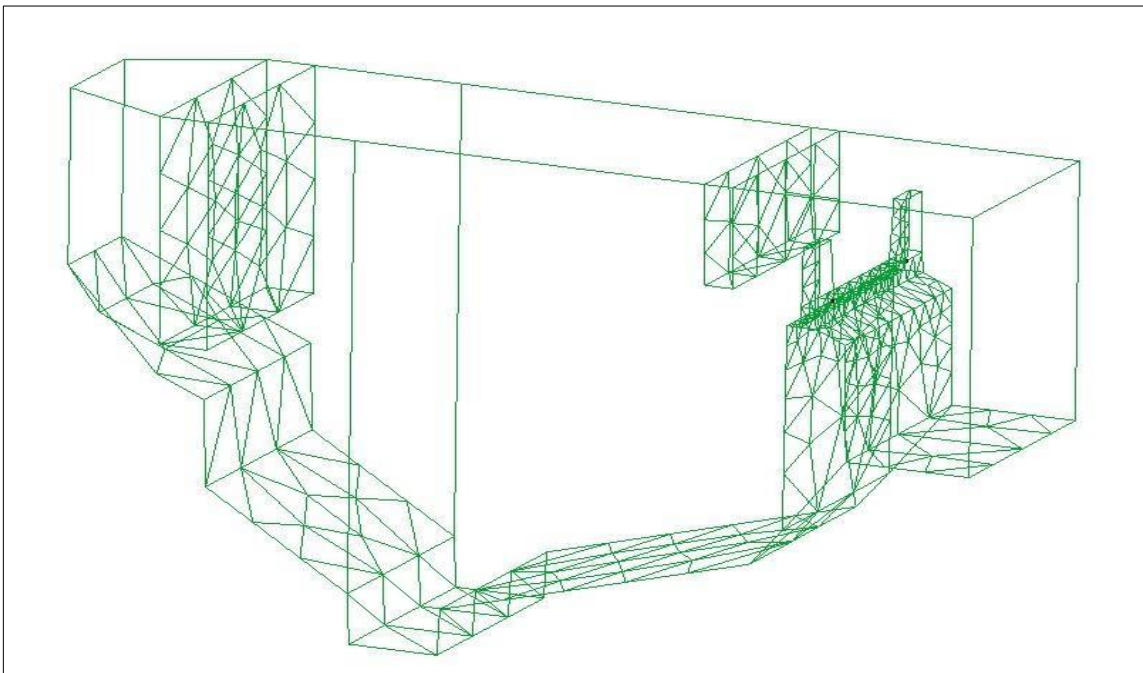
Nota. La siguiente tabla muestra las condiciones asignadas para que se dé la simulación de la estructura de aforo tipo vertedero dentro del desarenador.

El coeficiente del vertedero se deja en 1.7 por defecto, teniendo en cuenta que la ecuación de desagüe que usa IBER, es la de vertedero rectangular (Iber, 2014). El coeficiente de Maning se asignó para todas las superficies incluyendo las del vertedero, puesto que este también debe ir del mismo material (hormigón de cemento).

El mallado para esta estructura se hizo de 0.3 m, teniendo en cuenta que el esfuerzo computacional con una malla excesivamente fina es mucho mayor, este tamaño se escogió debido a una serie de pruebas que se realizaron, teniendo como conclusión que así se reduzca el tamaño de la malla los resultados no varían en los pos procesos de la simulación. Esta malla fue de tipo no estructurada gracias a la facilidad de esta de trabajar con cualquier tipo de geometría.

Figura 15. Elementos del mallado generado a 0.3m

Nota. Información general de los elementos generados de la malla para la estructura hidráulica.

Figura 16. Malla generada para la estructura de aforo y el desarenador

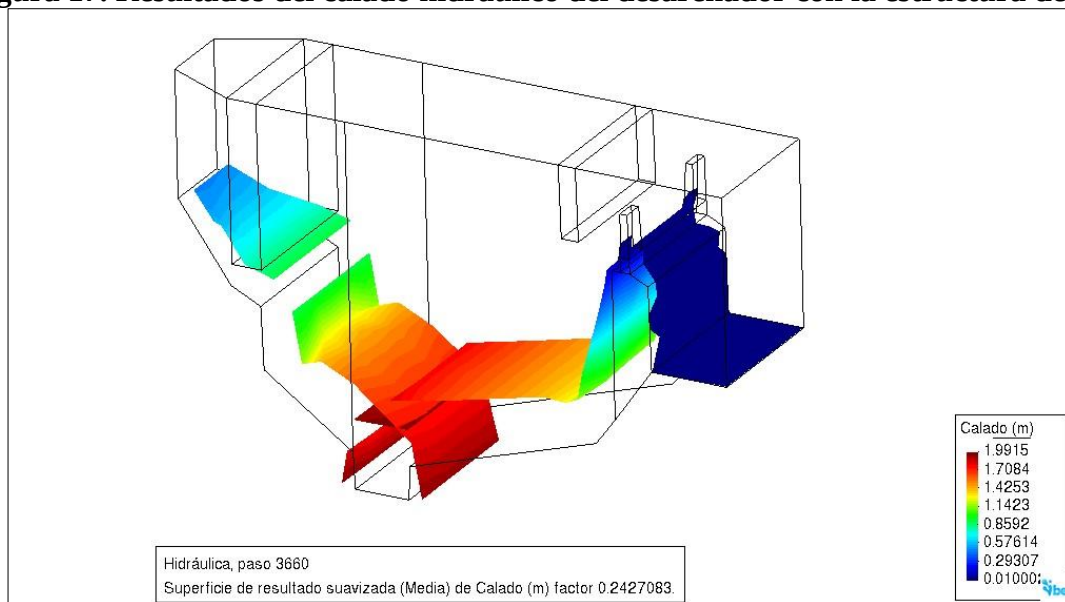
Nota. Detalle del mallado de cálculo generado a 0.3m.

Los resultados generados en esta simulación mostraron el comportamiento del flujo al pasar por el vertedero instalado dentro del desarenador, por medio de estos se pudo observar gráficamente la eficiencia de esta estructura ya que para cada parámetro se logra hacer un análisis diferente.

- ✓ **Calado hidráulico (m):** en esta variable se puede observar que el comportamiento del flujo no se ve afectado por la instalación del vertedero. La profundidad máxima de la lámina de agua respecto a la sección del desarenador es de 1.99 m, lo cual sigue siendo adecuado, ya que la profundidad es apropiada para la sedimentación de partículas en esta sección.

A la salida del vertedero la lámina de agua tiene una altura aproximada de 0.028 m por lo su caída es muy suave, por esta razón el agua baja como una especie de remanso, lo que se considera apropiado teniendo en cuenta que el choque en caída libre del fluido no será con grandes cantidades de agua que puedan corroer el suelo del desarenador. La altura de la lámina de agua en este punto es de vital importancia ya que esta debe ser medida directamente para poder saber el caudal que está pasando por el vertedero.

Figura 17. Resultados del calado hidráulico del desarenador con la estructura de aforo

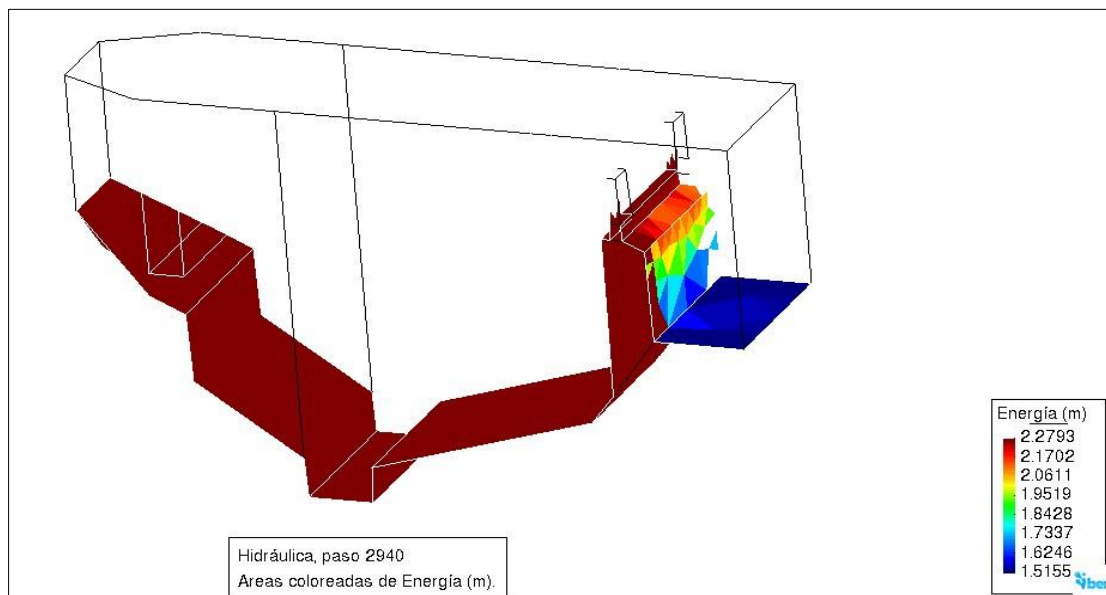


Nota. Calado hidráulico del desarenador contemplando el vertedero. Por: Osorio & Pinzón (2022)

- ✓ **Energía (m):** con respecto a los valores anteriores de este parámetro en el desarenador (**Figura 8**) la energía no varía significativamente, ya que esta también se mantiene constante a lo largo del desarenador y disminuye al pasar el aforador. Respecto a los valores máximos

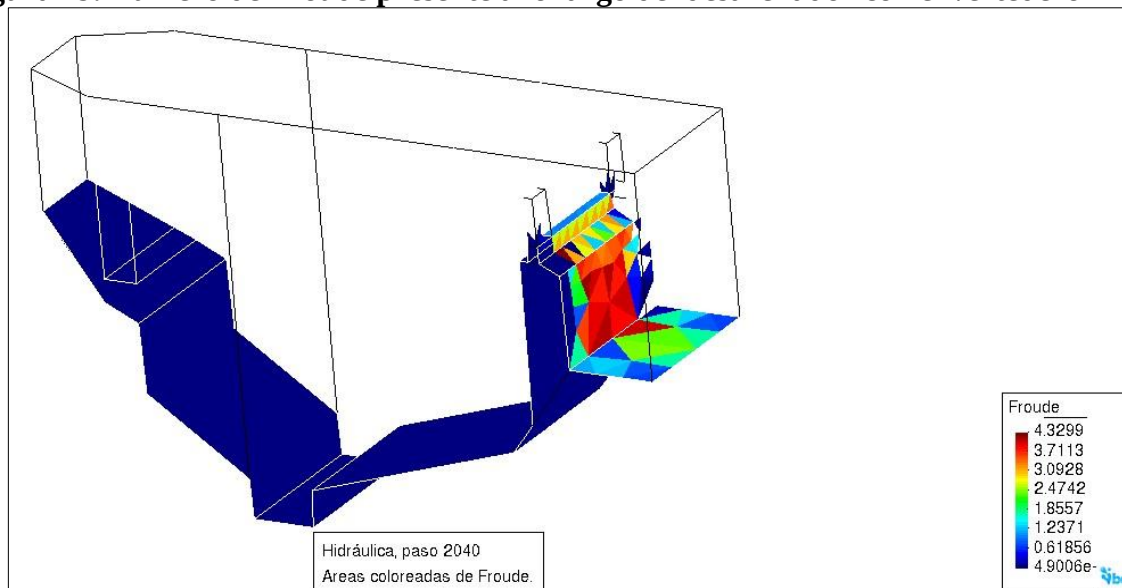
de energía estos varían solo 0.12m aumentados con la nueva estructura de aforo. La disminución de energía después del aforador se debe a la profundidad del caldo hidráulico, ya que esta es una unidad expresada en metro/columna de agua, por lo tanto, entre menor cantidad de agua, menor es su energía. Este comportamiento es conveniente para la medición del flujo, ya que al pasar con poca energía por la cresta del vertedero se pueden asegurar resultados más confiables, evitando pérdidas por resaltos hidráulicos.

Figura 18. Resultado de superficie de la energía a lo largo del desarenador con el vertedero.



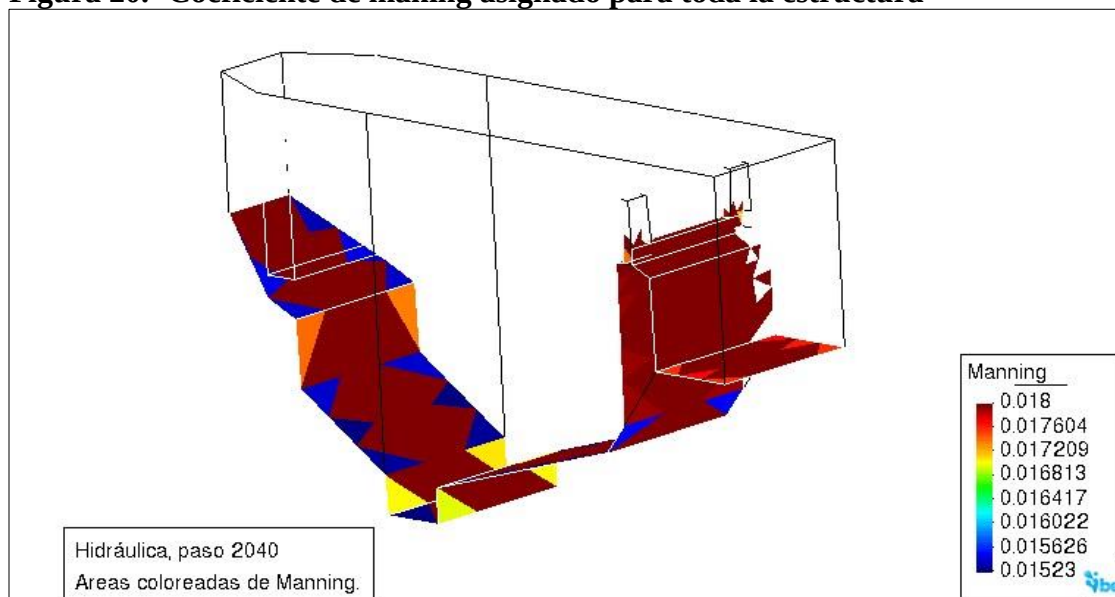
Nota. Energía expresada en metros por columna de agua. Por: Osorio & Pinzón (2022)

- ✓ **Froude:** El comportamiento del régimen del flujo sigue siendo subcrítico a lo largo del desarenador, y al pasar por el vertedero cambia a un régimen supercrítico, sin embargo, el valor subcrítico para el número de Froude es de 2.3×10^{-6} con la instalación del vertedero, por lo cual se puede decir que el flujo tiene un comportamiento más lento y tranquilo. Al pasar el vertedero, el número de Froude es supercrítico debido a la caída que tiene el flujo, sin embargo, esto no afecta los resultados de la lectura de la lámina de agua. El paso de un flujo subcrítico a supercrítico obedece a una situación teórica debido a que es común este comportamiento en las escorrentías a lo largo de la lámina de agua que pasa por el vertedero.

Figura 19. Número de Froude presente a lo largo del desarenador con el vertedero

Nota. Número de Froude para el establecimiento del régimen de flujo en el desarenador contemplando el vertedero.

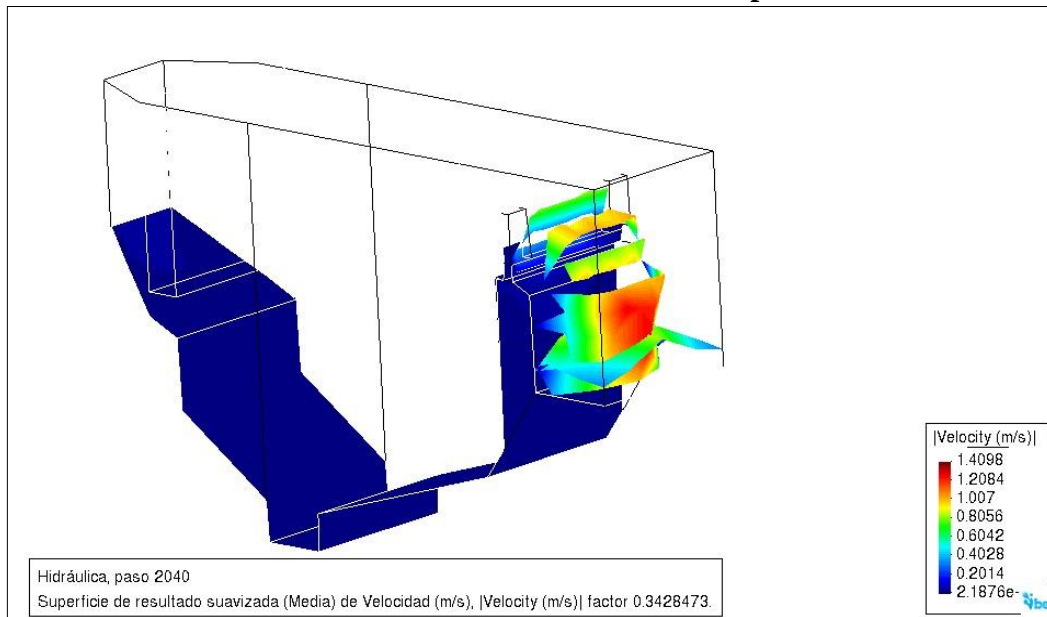
- ✓ **Maning:** Este coeficiente no varía en lo absoluto con respecto a la simulación hecha con solo el desarenador, puesto que el material asignado para la construcción del vertedero también es hormigón de cemento.

Figura 20.- Coeficiente de maning asignado para toda la estructura

Nota. Número de Maning generado para las superficies en hormigón.

- ✓ **Velocidad:** en la entrada se produce una velocidad por debajo de 1 m/s, por lo que se puede decir que hay un flujo casi que estacionario. Esto también hace que la lámina de agua que baja por el vertedero sea de tipo adherente, por lo que las cargas de h son pequeñas y la velocidad es insuficiente para despegar la lámina de agua en la pared de bajada del vertedero. La velocidad que pasa por el vertedero se considera adecuada, ya que al ser baja evita la ocurrencia de resaltos hidráulicos que puedan afectar la lectura de los resultados.

Figura 21. Resultado de velocidades en el desarenador contemplando el vertedero



Nota. Superficie de resultados de la velocidad a lo largo del desarenador y el vertedero.

Como se pudo observar en las gráficas anteriores, el comportamiento del flujo en el desarenador no varía significativamente con el vertedero, por lo que su funcionamiento sigue siendo eficiente como se había descrito anteriormente, por el contrario, la instalación de este trae consigo mejoras y esto se puede ver reflejado en parámetros como la velocidad y el número de Froude, haciendo de este más eficaz respecto a los tiempos de retención hidráulica (Albuja, 2013).

El comportamiento del flujo agua arriba favorece a las condiciones en las que debe estar un vertedero de este tipo, puesto que se debe garantizar una velocidad menor a 0.5 m/s para lograr la decantación de la sedimentación, además de que los vertederos deben trabajar libres, tal y como se encuentra el de esta estructura hidráulica (Basán, 2018).

Teniendo en cuenta que todas las simulaciones se realizaron con un caudal de $0.0095 \text{ m}^3/\text{s}$ y la altura de la lámina de agua en el vertedero según la simulación fue de 0.028 m, se considera

adecuada la altura de las paredes internas, ya que son de 0.3m por lo que, si el caudal de captación aumenta el vertedero podrá seguir siendo útil ya que su funcionamiento no se vería afectado por reboses de la lámina de agua.

En cuanto a la medición del caudal es necesario remplazar los datos de altura de lámina de agua, ancho de la garanta en el vertedero, y numero de contracciones en la *Ecuación 1*, con el fin de conocer el valor del flujo aforado. Para esta simulación al remplazar la altura de la lámina de agua en el vertedero, el resultado es el siguiente:

Ecuación 5. *Calculo de caudal para el vertedero propuesto*

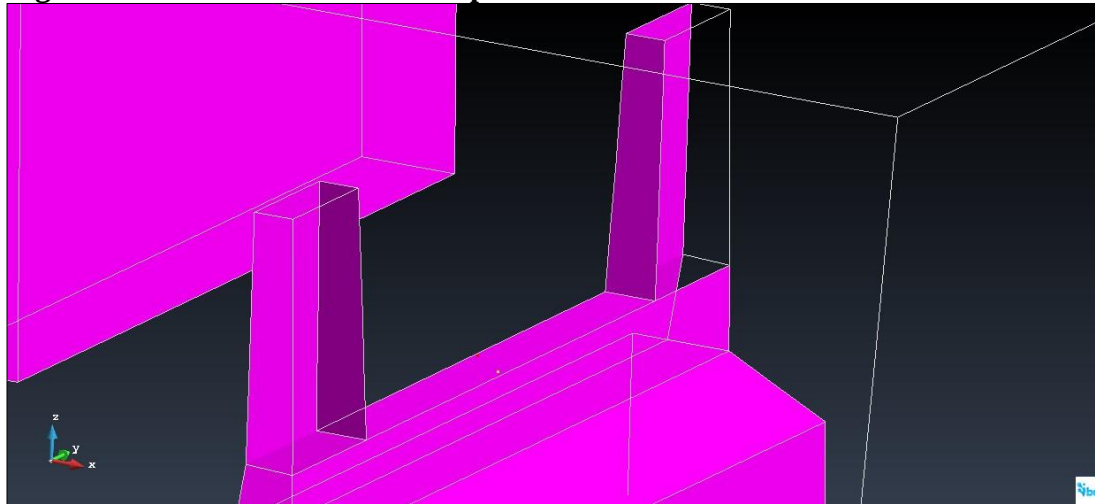
$$Q = 1.84 (0.7 - 0.2 (0.028)) 0.028^{\frac{3}{2}}$$

$$Q = 0.0059 \text{ m}^3 /s$$

5.7. Características hidráulicas del vertedero

Para realizar un análisis de las características hidráulicas en el vertedero, se simularon 3 caudales diferentes. Las variables que se tuvieron en cuenta para la comparación entre estos 3 caudales fueron, velocidad, número de Froude, Energía, y calado hidráulico, ya que estas tienen relación directa con el régimen del flujo. Así mismo es posible saber la proyección de esta estructura, puesto que se espera que el uso de esta no se vea afectado por el aumento del caudal.

Las mediciones de estas variables se hicieron en dos puntos diferentes del vertedero (entrada-salida) de la cresta como se puede observar en la *Figura 22*. Estos comportamientos fueron graficados en el software por medio de la opción “evolución punto” con la finalidad de conocer los valores exactos de los parámetros a medida del paso del tiempo. Los valores máximos fueron consignados en la *Tabla 3*.

Figura 22. Puntos de medición de parámetros en el vertedero

Nota. Vista del desarenador en IBER, con los puntos escogidos para la medición de parámetros.

Tabla 3. Características hidráulicas del vertedero

Características hidráulicas del vertedero en diferentes Q			
Q Entrada(m ³ /s)	Características	Q Salida (m ³ /s)	
A - 0.0095	Calado Hidráulico (m)	0.028	0.0059
	Velocidad (m/s)	0.51	
	Energía (m)	2.28	
	Número de Froude	0.997	
B- 0.012	Calado Hidráulico (m)	0.07	0.023
	Velocidad (m/s)	0.232	
	Energía (m)	2.3	
	Número de Froude	0.592	
C- 0.017	Calado Hidráulico (m)	0.0415	0.010
	Velocidad (m/s)	0.624	
	Energía (m)	2.3	
	Número de Froude	0.99	

Nota. En esta tabla se muestran los resultados de los máximos del comportamiento hidrodinámico del flujo en el vertedero con 3 caudales diferentes.

5.7.1. Calado Hidráulico en el vertedero

Este fue uno de los parámetros que presento mayor variación con respecto al caudal de entrada, tuvo una relación directamente proporcional en el caudal A y B, ya que a medida que este aumento el calado también lo hizo, por el contrario, el calado del caudal C tuvo una relación inversa, pues,

aunque este fue el mayor, el calado disminuyó significativamente (*ver Anexo 4*). Este comportamiento pudo ser por el efecto de las pantallas deflectoras, puesto que al aumentar el caudal en la entrada del desarenador el flujo aumenta, y al chocar con esta disminuye la altura del calado.

5.7.2. Velocidad en el vertedero

La velocidad en los tres escenarios estuvo por debajo de 1 m/s, lo cual es muy buen indicador, teniendo en cuenta que, entre menor velocidad tenga el flujo en este punto, las mediciones pueden llegar a ser más exactas. Estos resultados se pueden ver gráficamente en el (*ver Anexo 5*) correspondiente a las velocidades con los diferentes caudales.

5.7.3. Energía en el vertedero

La simulación muestra una energía igual con los caudales B y C el resultado se debe a que la lámina de agua en este punto es muy similar, por lo que las fuerzas de la columna de agua serán equivalentes. Esto se evidencia con el caudal A, ya que, al este tener una altura de la lámina de agua menor, su energía varía (*ver Anexo 6*)

5.7.4. 5.7.4 Numero de Froude

Este parámetro tiene relación directa con la velocidad, a medida que esta aumenta el número de Froude también lo hace, sin embargo, en los 3 escenarios este muestra un flujo subcrítico, por lo que la incertidumbre a la hora de la medición será menor. Estos valores se pueden ver a detalle en el *Anexo 7*.

5.8. Análisis de sensibilidad del vertedero

Para determinar la sensibilidad de los parámetros de diseño del vertedero, se tuvo que cuantificar y comprender de qué manera las medidas afectan el comportamiento del flujo en la estructura, esto se estableció a través de las características hidráulicas.

Se simularon 3 vertederos diferentes, a los cuales se les asignaron distintas medidas en el ancho de la garganta, longitudes de las contracciones, y el umbral (distancia entre el vertedero y el muro). En la *tabla 4* se observan los parámetros de diseño asignados para cada vertedero y el resultado de sus características hidráulicas, obtenidas por la simulación en IBER.

Tabla 4. Características hidráulicas de 3 vertederos diferentes

Medidas y características hidráulicas				
Vertedero	Medidas		Características hidráulicas	
Vertedero A	Ancho de la garganta(m)	0.70	Calado Hidráulico (m)	0.028
	Umbral(m)	0.10	Velocidad (m/s)	0.51
	Altura de la garganta(m)	0.30	Energía (m)	2.28
	Ancho de las contracciones	0.15	Número de Froude	0.997
Vertedero B	Ancho de la garganta(m)	0.50	Calado Hidráulico (m)	0.09
	Umbral(m)	0.05	Velocidad (m/s)	0.02
	Altura de la garganta(m)	0.35	Energía (m)	2.24
	Ancho de las contracciones	0.25	Número de Froude	0.67
Vertedero C	Ancho de la garganta(m)	0.20	Calado Hidráulico (m)	0.25
	Umbral(m)	0.15	Velocidad (m/s)	0.45
	Altura de la garganta(m)	0.25	Energía (m)	2.80
	Ancho de las contracciones	0.4	Número de Froude	0.45

Nota. En esta tabla se especifican las medidas para cada vertedero, y los resultados de los parámetros provenientes de la simulación en IBER.

El vertedero A, es el aforador seleccionado para que opere en el acueducto ya que cumple con las condiciones adecuadas para la medición de flujo.

El vertedero B, demostró tener características adecuadas como lo fueron la velocidad, energía y número de Froude, sin embargo, el tirante hidráulico que se obtuvo fue de 0.09m (9 cm), y al remplazar este valor en la ecuación teórica de descarga *Ecuación 1*, da como resultado 40 L/s, esto representa un problema, ya que al registrar un caudal tan grande se puede deducir que no es el caudal real que se capta y suministra en el acueducto.

El vertedero C, dio como resultado en el parámetro del calado hidráulico, un valor que supera la altura de su garganta, presentando rebosamiento en la estructura de aforo, así como también en el

desarenador. Este problema se presenta debido a los cambios que se le hicieron al ancho de la garganta y altura, adicionalmente también el umbral fue cambiado. Por esto, se puede deducir que los parámetros para el diseño de un vertedero dependen del adecuado dimensionamiento de la garganta, ya que es una medida sensible, que al ser mal dimensionada genera funcionamiento inadecuado en el vertedero, esto sin importar el caudal.

El material con que se simularon los tres escenarios fue de concreto con un coeficiente de rugosidad de 0.018, valor ponderado asignado de manera automática por el software.

Al momento de diseñar un vertedero rectangular con dos contracciones se debe tener en cuenta que este depende de varios factores, como la carga generada en la altura de la garganta, altura del umbral y el espesor de la pared. (Puga, 2010). Estas medidas al presentar sensibilidad por cambios pequeños o grandes dentro de la estructura, deben presentarse como los datos esenciales para obtener después de ensayos y pruebas, el vertedero adecuado. El aforador además debe contar con una transición convergente para evitar las pérdidas por carga. La transición de salida también llamada transición divergente desempeña un papel importante en este tipo de estructuras, en la salida es donde se presentan las mayores pérdidas de carga el flujo se da subcrítico o supercrítico esto dependerá también de qué forma este construido el aforador para garantizar una salida adecuada y las pérdidas sean menores, y como se ha mostrado anteriormente a la salida del vertedero A, se garantiza flujos lentos y con pocas pérdidas de energía (Vargas & Carlos, 2013).

5.9. Manual de operación y mantenimiento

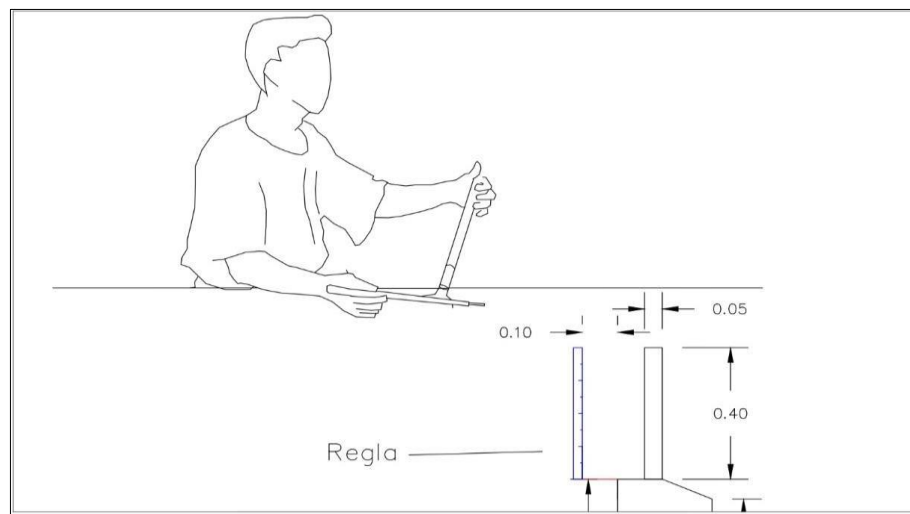
En la sección 5.9.1 se presenta la forma correcta de medición del caudal en el vertedero, y la frecuencia de medición. El personal encargado de estas mediciones debe ser directamente el operario del acueducto, quien debe encargarse de diligenciar la planilla sugerida en el Anexo7. El mantenimiento de la estructura esta descrito en la sección 5.9.2

5.9.1. Medición del caudal

Para la medición en el vertedero será necesario conocer: la longitud de la cresta (L) y la carga hidráulica sobre el vertedero (H). Para determinar la carga hidráulica esta tiene que ser medida directamente en el vertedero, la medición debe hacerse con una escala graduada aguas arriba a una

distancia (d) que será de 0.10 m. El 0 de la escala o regla deberá estar al nivel de la cresta del aforador para evitar que la medición se vea alterada (ver *Figura 23*). Una de las consideraciones más importantes a la hora de tomar esta medida, es la verificación del flujo, ya que este debe ser laminar aguas arriba del vertedero, en caso de que se presenten turbulencias en este punto la lámina se puede ver afectada y la precisión de la medida del flujo será inexacta. Las expresiones para hallar este caudal de descarga están descritas en la *Ecuación 1*.

Figura 23. Medición de la carga hidráulica



Nota. Ilustración de la forma correcta de realizar la medición en el vertedero.

En la *Tabla 5* se muestra de manera teórica según la ecuación del manual de hidráulica para el vertedero rectangular con dos contracciones, los posibles escenarios con diferentes valores de la altura de lámina de agua (H), en la cual da como resultado diferentes rangos de caudal aforado.

Tabla 5. Caudal teórico en distintas cargas hidráulicas

L(m)	H (m)	Q(m³/s)	Q(L/s)
0.70	0.01	0.001287	1.287
	0.02	0.003640	3.64
	0.03	0.006686	6.686
	0.04	0.010292	10.292
	0.05	0.014379	14.379
	0.06	0.018897	18.897
	0.07	0.023806	23.806
	0.08	0.029077	29.077
	0.09	0.034686	34.686
	0.10	0.040613	40.613

Nota. En la tabla se muestra el caudal teórico para diferentes cargas hidráulicas, hallado con la fórmula de Francis para cálculo de caudal en vertederos rectangulares con dos contracciones.

Se recomienda realizar el cálculo de caudal cuando la medida de la lámina no este estipulada en la *Tabla 5*, puesto que (H) puede variar significativamente en épocas de invierno, donde puede que se realice mayor captación de caudal.

Se deben realizar los aforos diariamente en los siguientes horarios: En la mañana 8:00, 9:00 y 10:00; en la tarde 2:00, 3:00 y 4:00, los valores tomados en la mañana y tarde deben ser promediados y este será el valor a registrar. Estos valores serán diligenciados en la planilla de registro que se encuentra en el *Anexo 8*, en esta también serán anexadas las observaciones e irregularidades que se encuentren, esto con el fin de tener un control sobre el vertedero.

5.9.2. Mantenimiento del vertedero

El mantenimiento se debe realizar de manera manual mínimo una vez al mes, limpiando el interior con cepillos y manguera a presión, para evitar el incremento de vegetación sobre la superficie de hormigón de igual forma se debe hacer el mismo con la estructura externa para evitar desgaste de esta. Para realizar este mantenimiento se recomienda cerrar el paso del agua en el desarenador, y dejar que el nivel de agua baje con el fin de que la sección del vertedero este completamente

desocupada, puesto que así se hace una limpieza más exhaustiva y de esta forma se garantiza mayor durabilidad.

Si se está presentando desgaste de la estructura por velocidades muy altas o cambios extremos de temperatura en la zona de ubicación del aforador, se recomienda hacer revestimiento con concreto sin alterar las medidas, que permitirá soportar fluctuaciones altas del flujo y altas temperaturas.

6. Impacto social y humanístico

El diseño del aforador trae consigo una mejora significativa en la infraestructura del acueducto comunitario de playa rica, y deja como resultado un gran avance para esta comunidad, pues con este se puede garantizar un uso racional del recurso hídrico, evitando afectar las cuencas de las cuales se hace captación (Caño Grande y Caño Vitalia), debido a que si se tiene un control del caudal que entra a los tanques de almacenamiento se pueden detectar algunas pérdidas que puedan llegar al momento de transportar el agua a estos, y de esta forma poder comparar el caudal de captación con el caudal real que está abasteciendo a la comunidad.

Uno de los objetivos con el impacto que se genera, es poder alcanzar un equilibrio medioambiental, obedeciendo a un desarrollo sostenible donde se puede satisfacer las necesidades actuales de la comunidad, sin necesidad de comprometer sus recursos, teniendo en cuenta que está es una comunidad cuya demanda de agua va en aumento al igual que su población.

La implementación de esta estructura de aforo también trae beneficios para la parte operacional del acueducto, haciendo que las labores de medición se hagan de una forma más fácil y de una manera más eficiente, dando criterio de las decisiones que se tomen respecto a los cuerpos hídricos que los abastecen actualmente.

La colaboración para el acueducto y los beneficiarios del acueducto se vio también reflejada en cuanto al análisis del desarenador planteado por parte de la alcaldía, ya que, al encontrar los errores en los diseños, hubo una modificación en estos con el fin de que al momento de su construcción no ocurran contratiempos.

Con esto también se contribuye al mejoramiento continuo de calidad de vida de la comunidad, ya que podrán seguir contando con el servicio público de acueducto que no solo responde al consumo humano, sino que también lo hace con respecto a su conexión y distribución, puesto que Cormacarena seguirá brindando los permisos de captación necesarios para el cumplimiento de la normativa pertinente.

El bajo costo de inversión en este prototipo de infraestructuras es un punto a favor para esta clase de proyectos, ya que solo se cuentan con recursos del mismo acueducto, por lo tanto, no se dispone de gran capital para dar solución a estas problemáticas de manera convencional, como lo es la instalación de macro medidores, ya que para las cantidades que actualmente se están captando no es una alternativa viable en términos económicos. Así mismo el costo de mantenimiento es alto,

teniendo en cuenta que la captación de agua es directamente de un cuerpo hídrico, y por efectos de corriente el arrastre de sedimentos puede que altere el funcionamiento de estos, por lo tanto, su mantenimiento tendría que ser más constante. Es por eso que alternativas eficientes a bajo costo y con herramientas básicas son la primera opción, y con los conocimientos ingenieriles y la implementación de software se pueden llegar a grandes soluciones que benefician a la economía de la población.

El uso de software CFD en la solución de problemáticas de este tipo, puede servir como referencia para otros trabajos que se quieran implementar en acueductos o en simulaciones de estructuras hidráulicas, y así de esta manera hacer de forma más práctica y visual los comportamientos hidrodinámicos de los fluidos, lo que puede generar interés para el estudio e investigación a fondo con el fin de contribuir a la producción investigativa.

7. Conclusiones

- ✓ El vertedero rectangular con dos contracciones fue la estructura seleccionada para la medición del caudal, ya que es la que mejor se adapta al lugar de implementación, además de ser una estructura que no afecta el funcionamiento del desarenador, dejando que la velocidad en este sea constante y su tirante hidráulico adecuado para los procesos de sedimentación.
- ✓ La malla no estructurada fue la que mejor se adaptó para la simulación de las dos estructuras hidráulicas, debido a que estas no tienen una geometría regular, por ende, se requiere de la formación de elementos irregulares dentro de un mismo mallado.
- ✓ Según las simulaciones realizadas para la determinación de la malla adecuada se puede inferir que tal triangulación es un factor fundamental únicamente para el nivel operativo del software puesto que no altera los resultados a pesar de su variación, ya que cuando se implementó el valor de 0.05m; el mínimo usado, el requerimiento y consumo del procesador fue el más elevado, por ende, los tiempos de simulación aumentaron. Por la anterior, se estableció una malla de 0.30m ya que con esta dimensión fue posible disminuir el periodo de simulación del desarenador y vertedero dando viabilidad al presente estudio.
- ✓ Mediante el comportamiento del flujo se confirma la posibilidad de la construcción de una estructura de aforo dentro del desarenador, lo que ahorraría costos de instalación y mantenimiento. Adicional a esto, se contribuye al mejoramiento de la calidad de vida de los beneficiarios del acueducto, puesto que con la implementación de esta cumplen con el requisito exigido por CORMACARENA de tener un segundo aforador dentro del sistema de acueducto.
- ✓ La variación de caudal de entrada al desarenado, no afecta el funcionamiento del vertedero, por lo que se concluye que este tiene una proyección a largo plazo, y en caso de una alta demanda de caudal por parte de la población del barrio playa rica, su funcionamiento será confiable.
- ✓ El parámetro más sensible en el diseño de un vertedero rectangular con dos contracciones, es el ancho de la garganta, esto se pudo ver evidenciado en la sección 5.8, por lo que, a la más mínima modificación de esta, el comportamiento del flujo varía significativamente.

8. Recomendaciones

Se recomienda gestionar previamente el tamaño de la malla de cálculo para cada infraestructura o modelo, dependiendo de la relevancia de los elementos y su afectación a los resultados, debido al alto costo computacional que tiene el software. Esto con el fin de evitar la pérdida de fluidez en el proceso.

Realizar una calibración del modelo para que este se ajuste más a la realidad, con el fin de saber el comportamiento exacto del flujo en el vertedero, y poder predecir dicho comportamiento con la alteración de cualquiera de sus variables hidrodinámicas.

Realizar un comparativo teniendo en cuenta las mismas variables y condiciones, con otros softwares CFD con el fin de determinar la calidad de la simulación y el rendimiento de esta.

Las estructuras hidráulicas en concreto tienen una larga prolongación de vida, sin embargo, para este caso al ser un vertedero se debe estar al tanto del desgaste que se produce en la cresta, ya que, al tener una sensibilidad alta, está demostrado las alteraciones que pueda llegar a tener a la hora de la lectura de los resultados. En caso de que esta medida se vea afectada, es necesario hacer un revestimiento en concreto, para prolongar su vida útil.

9. Referencias bibliográficas

- Albuja. (2013). Uso De Desarenadores En Abastecimiento De Agua Potable. *Universidad de Cuenca*, 122–127. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30010>
- Arrubla, A. P., Molina, J. C. S. & Rebolledo, F. (2015). Aportes de la ingeniería a la regulación y sostenibilidad del recurso hídrico. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 4(6), 79–97. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75040606>
- Basán, M. (2018). *Aforadores de corriente de agua*. 1(Aforados de corriente de agua), 61. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-_curso_aforadores_de_agua.pdf
- Bermejo, F. G. (2019). *Evaluación de la capacidad de un programa bidimensional para analizar el funcionamiento de vertederos no lineales tipo laberinto*. 0–209. Trabajo de fin de maestría. Universidad politecnica de Cartagena- Colombia <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/8171/tfm-ros-eva.pdf?sequence=1>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Borthagaray, J. (2012). *Flujo de fluidos estratificados*. Tesis de maestría en ingeniería matemática. Universidad de la República. Montevideo- Uruguay. https://www.fing.edu.uy/sites/default/files/biblio/9480/flujo%20de%20fluidos%20estratificados_2012.pdf
- Briones G. & García I. (1997). *Aforo del agua en canales y tuberías*. (p. 83). México- Editorial Trillas <https://es.scribd.com/doc/79788447/Aforo-del-Agua-en-Canales-y-Tuberias-Gregorio-Briones-e-Ignacio-Garcia>
- Büker, O., Stolt, K., Lindström, K., Wennergren, P., Penttinen, O., & Mattiasson, K. (2021). A unique test facility for calibration of domestic flow meters under dynamic flow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*, 79(March), 101934. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.101934>
- Cuevas, M., & Gomez, H. (2014). *Instalación y Operación de Medidores de Agua en Conductos Abiertos con diferentes caudales, para determinar la Variación en las Descargas*. Tesis de pregrado [Universidad Católica de Santa María]. Arequipa- Perú

- <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/9290>
- E.S.P. (2013). *Normas de Diseño de Sistemas de Acueducto de las Empresas Públicas de Medellín E.S.P* (Segunda ed.). Colombia: Empresas Públicas de Medellín. https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro_de_documentos/normatividad_y_legislacion/agua/Norma_Dise%C3%B1o_Acueducto_2013.pdf
- Gallardo Armijos, P. (2018). *Diseño de canales abiertos. Diseño de canales abiertos*. Editorial Científica 3Ciencias. <https://doi.org/10.17993/ingyttec.2018.43>
- Giancarlo, R., & Andrea, V. (2017). *Analisis de la eficiencia de los medidores Parshall de flujo libre por medio de un modelamiento numerico bidimensional*. Tesis de pregrado. Universidad privada Antenor Orrego. Trujillo- Perú <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/9290>
- Guamán Sánchez, V. A. (2018). *Modelación Numérica Y Experimental De Un Canal Rectangular Abierto Con Diferentes Tipos De Vertederos*. 72. Tesis de maestría. Universidad politecnica salesiana. Cuenca- Ecuador. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15227/1/UPS-CT007513.pdf>
- Hafnaoui, M. A., & Debabeche, M. (2020). Numerical modeling of the hydraulic jump location using 2D Iber software. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1995. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00942-3>
- Hudson, N.W., Silsoe Associates, Amphill, B. (1997). *Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía. (Boletín de Suelos de la FAO - 68)*. Reino Unido. <http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s00.htm>
- IBER. (2014). *Manual de referencia hidráulico*. 1–17. España. <http://www.jorgesanchez.net/web/css1.pdf>
- IDEAM, INVEMAR, & MINAMBIENTE. (2017). Protocolo de Monitoreo del Agua - Colombia. *Ideam*, 1–587. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023773/PROTOCOLO_MONITOREO_AGUA_IDEAM.pdf
- Iñiguez-Covarrubias, M., Flores-Velazquez, J., Ojeda-Bustamante, W., Díaz-Delgado, C., & Mercado-Escalante, R. (2015). Comparación de resultados experimentales de un Venturi con simulación de dinámica de fluidos computacional. In *Tecnología y Ciencias del Agua* (Vol. 6, Issue 4, pp. 141–152).

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000400010

- López, A. P. (2013). *Bases para el diseño hidráulico de la estructura de salida, canal de recolección y tanque de carga entre $20 \text{ m}^3/\text{s} > Q > 2 \text{ m}^3/\text{s}$ para desarenadores en aprovechamientos hidroeléctricos*. 138. Trabajo de pregrado. Universidad Central del Ecuador. Quito. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/3014/1/T-UCE-0011-123.pdf>
- Monroy, M. A. (2015). *Medidores De Flujo En Canales Abiertos*. Trabajo de pregrado. Universidad De San Carlos De Guatemala. Guatemala. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3165_C.pdf
- Mora-Elizondo, I. (2018). *Diseño de un vertedero lateral sobre el margen derecho del río Matina, para evitar los desbordamientos sobre las fincas de banano del Grupo Acón en Matina Limón*. Trabajo de pregrado. Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://hdl.handle.net/2238/11287>
- ONU. (2020). Agua y cambio climático. *Revista de Obras Publicas*, 167(3618), 64–67. <http://www.andi.com.co/Uploads/Agua y Cambio Climático.pdf>
- ONU. (2016). Agua Limpia Y Saneamiento: Por qué es importante. *Sustainable Development Goals*, 1–2. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/6_Spanish_Why_it_Matters.pdf
- Parsaie, A., & Haghiabi, A. H. (2019). The hydraulic investigation of circular crested stepped spillway. *Flow Measurement and Instrumentation*, 70(August), 101624. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101624>
- Pinos, J., & Timbe, L. (2019). Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins. *Water Science and Engineering*, 12(1), 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.03.001>
- Montenegro, M. (2018). Autogestión del agua: Aproximación a los acueductos comunitarios en el valle del cauca. *Actas Del 24o Foro de Educación e Investigación Universitaria*, 121. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/12262/0582469-3340-E.pdf?sequence=1>
- Puga, M. A. (2010). *Modelo Hidráulico físico de vertederos como ayuda de aprendizaje de la materia de hidráulica*. 19–51.

- <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/1681/1/T-ESPE-029265.pdf>
- Ramirez, J., Dehesa, U., & Camacho, P. (2016). *Medición del flujo de agua* (Primera ed.). Mexico: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/riego-drenaje/medicion-del-flujo-de-agua.pdf
- RAS. (2000). Reglamento Técnico Del Sector De Saneamiento Basico Agua Potable Y Ras - 2000 - Tratamiento De Aguas Residuales. *Reglamento Técnico Del Sector De Agua Potable Y Saneamiento Basico*, 150. http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_e_.pdf
- Reeve, D. E., Zuhaira, A. A., & Karunarathna, H. (2019). Computational investigation of hydraulic performance variation with geometry in gabion stepped spillways. *Water Science and Engineering*, 12(1), 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.04.002>
- Salazar, N., & Muñoz, J. (2007). El agua como bien público y los acueductos comunitarios. *Grafías Disciplinarias de La UCPR*, ISSN-e 1900-5679, N°. 4, 2007, Págs. 33-44, 4, 33–44. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5031401>
- Sandoval, M., & Parrado, G. (2018). Optimización del diseño hidráulico del acueducto veredal del alto del ramo de municipio de Chipaque Cundinamarca. *Optimización Del Diseño Hidráulico Del Acueducto Veredal Del Alto Del Ramo de Municipio de Chipaque Cundinamarca*, 53(9), 1689–1699. https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/16404/1/trabajo_final.pdf
- Vargas, M. I. V., & Carlos, J. (2013). *Diseño de una estructura para el aforo y control de niveles en canales*. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000690826
- Vega, D. B. (2004). *Serie: Técnica Agua y Suelo N° 1 vertederos de pared delgada-Rectangular y Triangular-Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua*. https://www.academia.edu/6129654/Serie_Técnica_Agua_y_Suelo_N_1_VERTEDEROS_DE_PARED_DELGADA_Rectangular_y_Triangular

10. Anexos

Anexo 1. Imágenes del estado del acueducto comunitario de Playa Rica

Figura 24. *Tubo de conducción del agua*



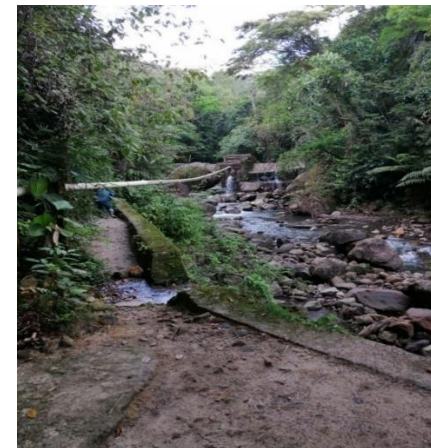
Nota: Ubicación del tubo de conducción hacia los tanques de almacenamiento, lugar donde se construirá el desarenador y aforador. Por. Osorio & Pinzón (2022)

Figura 26. *Tanques de Almacenamiento*

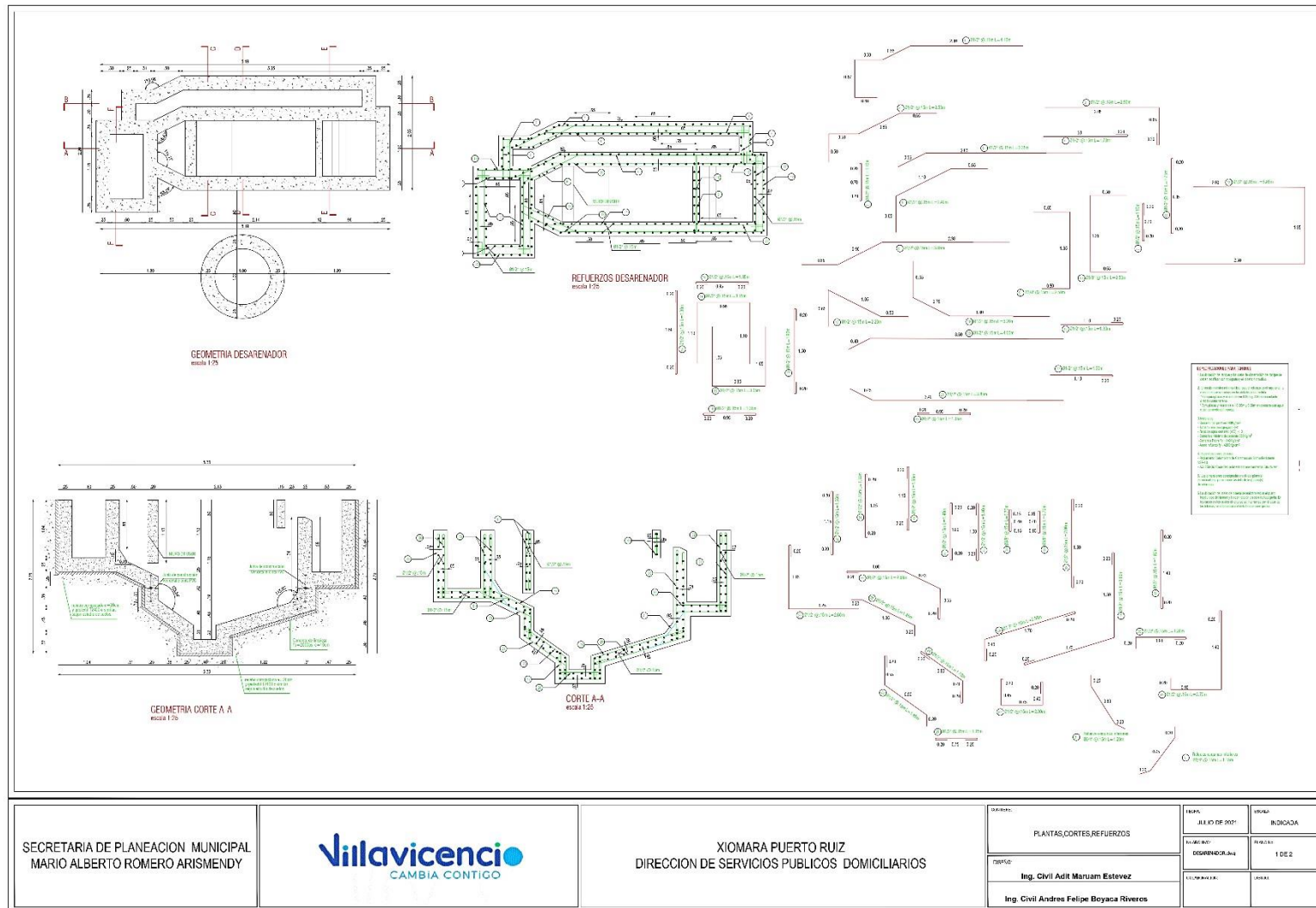


Nota: Osorio & Pinzón (2022)

Figura 25. *Localización de las rejillas y bocatoma*



Nota: Osorio & Pinzón (2022)

Anexo 2. Planos originales del Desarenador**Figura 27. Geometría del desarenador con sus respectivos cortes**

Nota: Adaptado de Secretaria de Planeación Municipal, por Boyaca A, Estevez A, 2021.

Anexo 3. *Construcción del desarenador en el acueducto comunitario de Playa Rica*

Figura 28. *Construcción desarenador vista A*



Nota: Osorio & Pinzón (2022)

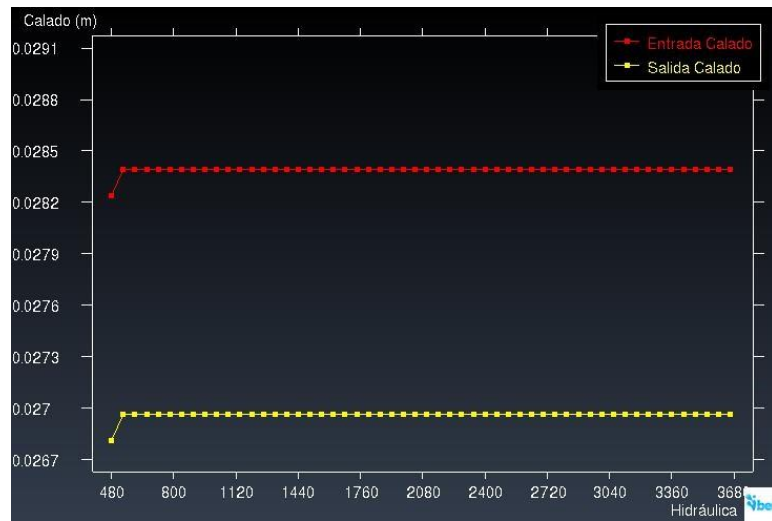
Figura 29. *Construcción desarenador vista B*



Nota: Osorio & Pinzón (2022)

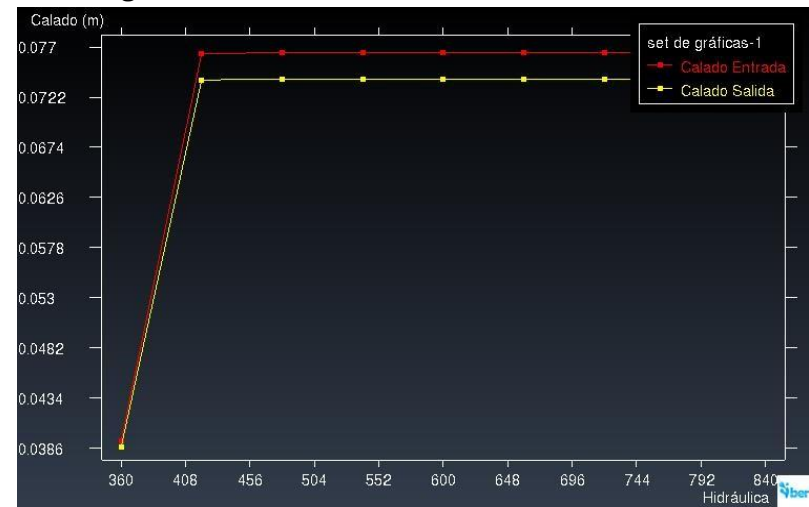
Anexo 4. Gráficas de Calado hidráulico en los vertederos

Figura 30. Calado con un caudal de 0.0095 m³/s



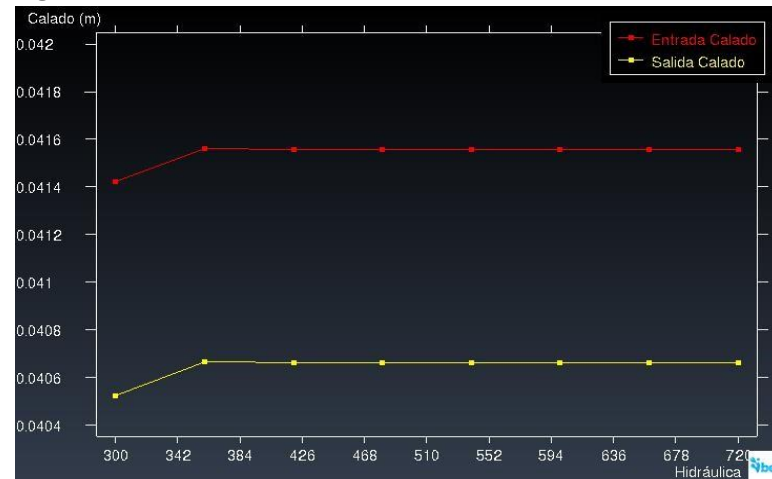
Nota: Osorio & Pinzón (2022)

Figura 32. Calado con un caudal de 0.017 m³/s

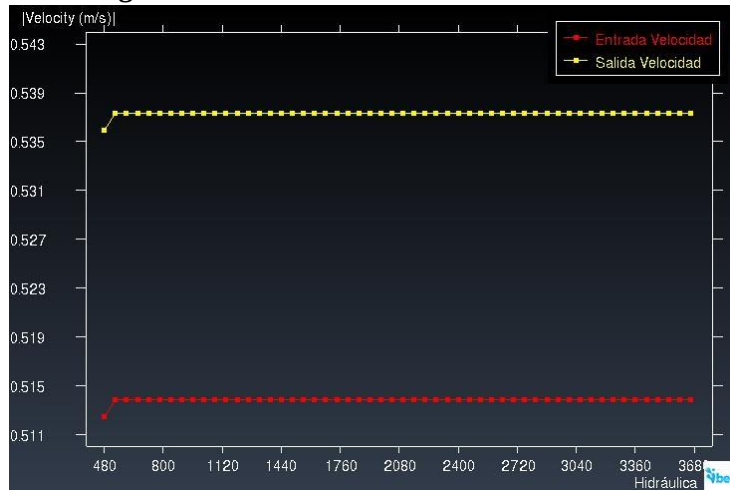


Nota: Osorio & Pinzón (2022)

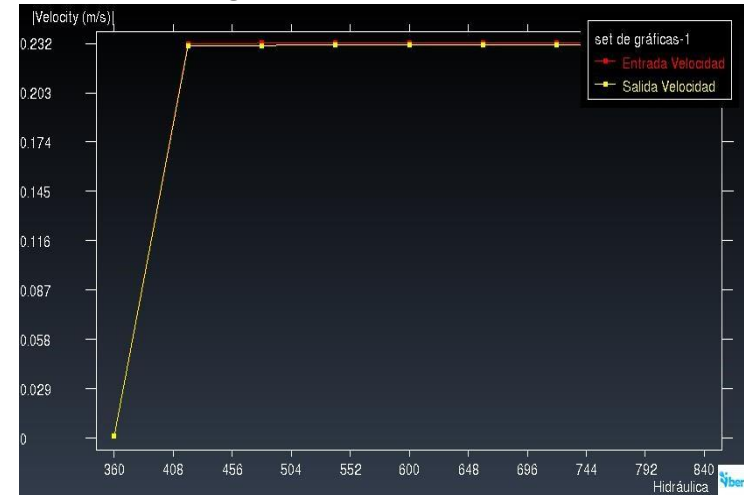
Figura 31. Calado con un caudal de 0.012 m³/s



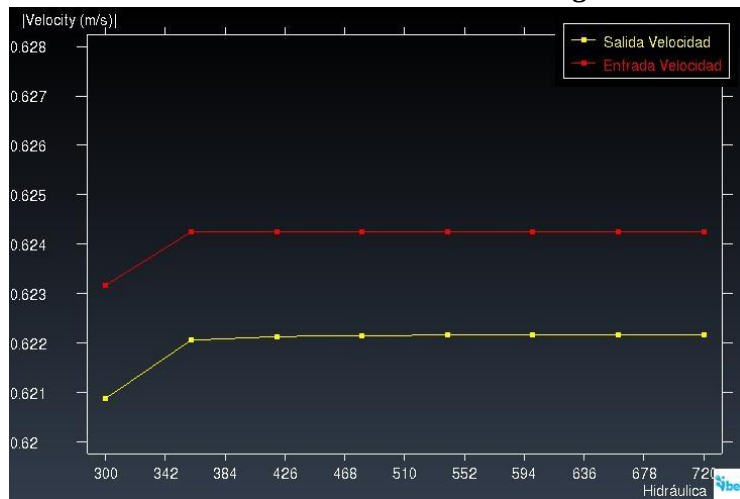
Nota: Osorio & Pinzón (2022)

Anexo 5. Graficas de Velocidades en los vertederos**Figura 33. Velocidad con un caudal 0.0095 m³/s**

Nota: Osorio & Pinzón (2022)

Figura 35. Velocidad con un caudal 0.012 m³/s

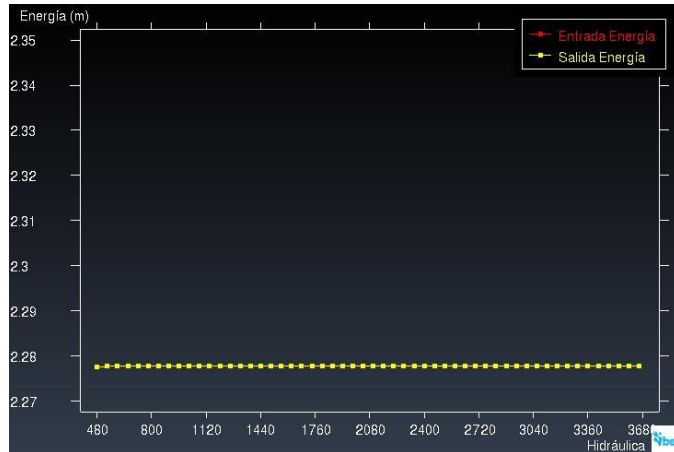
Nota: Osorio & Pinzón (2022)

Figura 34. Velocidad con un caudal 0.017 m³/s

Nota: Osorio & Pinzón (2022)

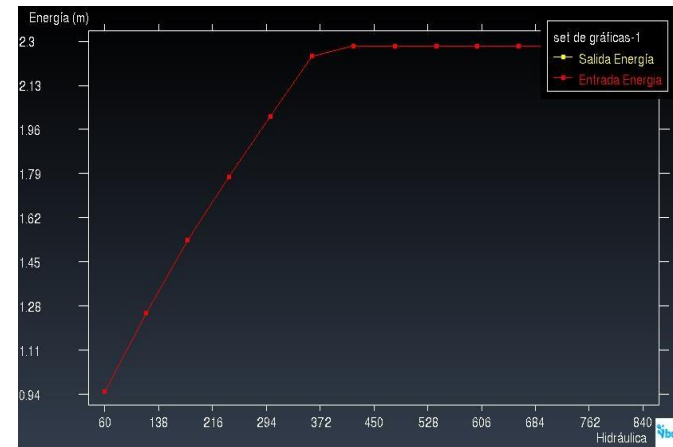
Anexo 6. Gráficas de energía en los vertederos

Figura 37. Energía con un caudal de 0.0095 m³/s



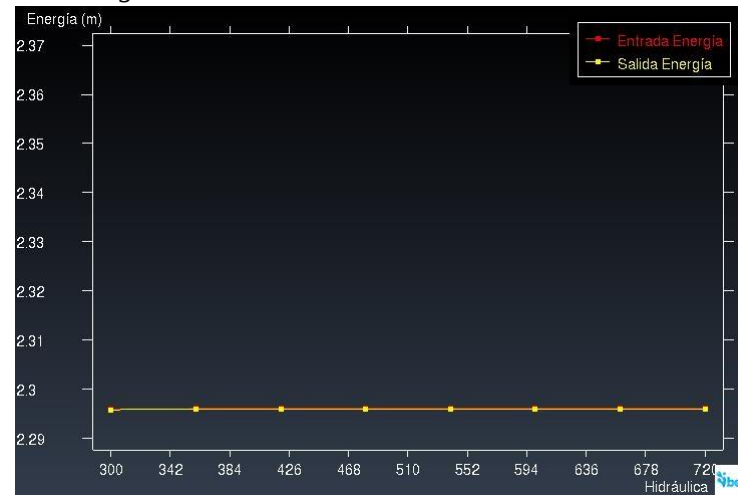
Nota: Osorio & Pinzón (2022)

Figura 36. Energía con un caudal de 0.012 m³/s



Nota: Osorio & Pinzón (2022)

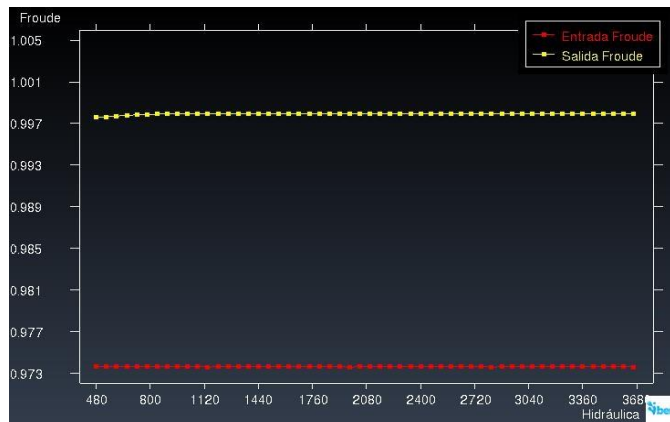
Figura 38. Energía con un caudal de 0.017 m³/s



Nota: Osorio & Pinzón (2022)

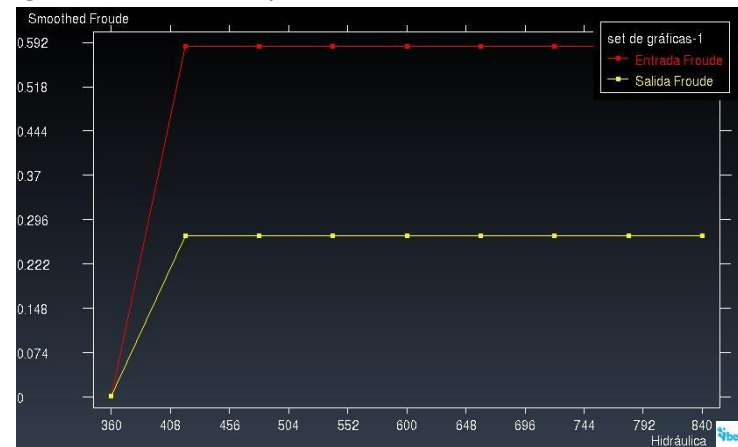
Anexo 7 . Graficas de número de Froude en el vertedero

Figura 40. Numero de froude con un caudal de 0.0095 m³/s



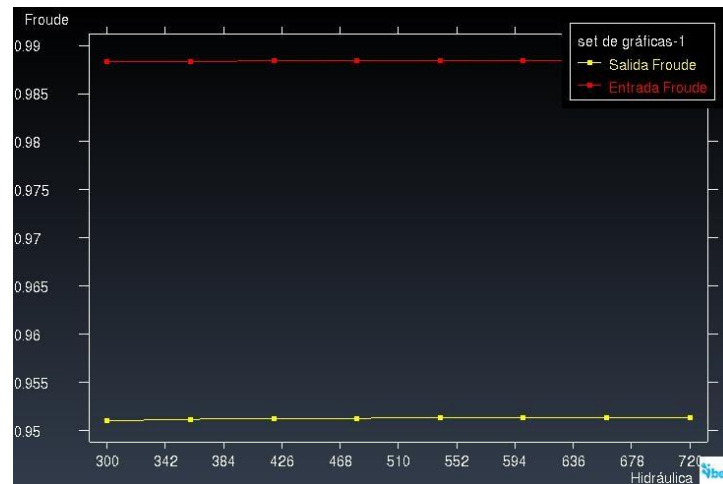
Nota: Osorio & Pinzón (2022)

Figura 39. Numero de froude con un caudal de 0.012 m³/s



Nota: Osorio & Pinzón (2022)

Figura 41. Numero de froude con un caudal de 0.017 m³/s



Nota: Osorio & Pinzón (2022)

Anexo 8. Planilla de control de caudal en el Vertedero

ACUEDUCTO COMUNITARIO PLAYA RICA		
Fecha:		
Encargado:		
Nombre del Operador:		
Hora:	Caudal (m^3/s) :	
8:00 a. m.	H(m):	Q:
9:00 a. m.	H(m):	Q:
10:00 a. m.	H(m):	Q:
Promedio:	H(m):	Q:
2:00 p. m.	H(m):	Q:
3:00 p. m.	H(m):	Q:
4:00 p. m.	H(m):	Q:
Promedio:	H(m):	Q:
Observaciones:		

Nota. Tabla de registros de caudal para el ac Playa Rica.