

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE EJEMPLAR MADERABLE COMO MEDIO DE CONDUCCIÓN DE AGUA



**July Marcela Mancilla Juvinao
Dayana Sofía Pacheco Jiménez**

**Universidad de la Costa, CUC
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Programa de Ingeniería Civil
Barranquilla, Colombia
2021**

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO
ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE EJEMPLAR MADERABLE
COMO MEDIO DE CONDUCCIÓN DE AGUA

July Marcela Mancilla Juvinao
Dayana Sofía Pacheco Jiménez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Civil

Tutores:
Leydis Villadiego Rojas
Javier Carpintero Durango

Universidad de la Costa, CUC
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Programa de Ingeniería Civil
Barranquilla, Colombia
2021

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Nota de aceptación

PRESIDENTE DE JURADO

JURADO

JURADO

Barranquilla, 2021

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Agradecimientos

A Dios fuente de toda sabiduría quien nos ha llenado de sus dones para culminar exitosamente nuestro proyecto, a nuestros padres Leslie Jovinao, Leda Jiménez y Argemiro Pacheco quienes siempre han creído en nosotras y nos han apoyado en la consecución de nuestras metas; y cómo no mencionar a nuestros tutores quienes nos ayudaron a materializar ideas aportando su tiempo y conocimientos.

Hoy nos sentimos orgullosas del resultado que hemos obtenido al alcanzar un logro más en nuestro proceso de formación profesional.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Resumen

El estudio hidráulico de un ejemplar maderable resulta beneficioso, dando a conocer sus características en aplicaciones donde tradicionalmente no suele utilizarse, evaluando las posibles utilidades que puede tener en la cotidianidad a partir de un prototipo de canal en madera para la verificación de la viabilidad de este material en relación con el comportamiento hidráulico como medio de conducción de agua mediante modelos matemáticos que representan el flujo de un fluido los cuales permitieran caracterizar y comparar los resultados, incluyendo caudal, régimen de flujo, propiedades geométricas del canal y energía específica.

Palabras clave: Madera, caudal, canal, fluido, lluvia

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Abstract

The study of the hydraulic behavior of a timber specimen is beneficial, making known its characteristics in applications where traditionally it is not usually used, evaluating the possible usefulness that it can have in everyday life from a prototype of a wood channel for the verification of the viability of this material in relation to its hydraulic behavior as a means of conducting water through mathematical models that can represent the water flow, which would allow to characterize and compare results; such as, flow, flow regime, geometric properties and specific energy.

Keywords: Wood, flow, channel, fluid, rain

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Contenido

Lista de anexos.	10
Introducción	11
Planteamiento del problema	13
Objetivos	15
General	15
Específicos	15
Justificación	16
Marco referencial	18
Antecedentes	18
Marco teórico	21
Diseño metodológico	28
Tipo de estudio	28
Procedimiento metodológico	28
Caracterización hidráulica del canal	31
Elección de la especie	31
Durabilidad requerida	31
Disponibilidad en la zona	31
Aspectos medioambientales	31
Asequibilidad económica	32
Material de estudio	32
Geometría del canal	34
Ensayos realizados	35
Ensayo aforo de caudal	35
Ensayo ganancia de masa	40
Ensayo estimación experimental del coeficiente de Manning	42
Análisis de resultados	46
Conclusiones	52
Recomendaciones	54
Referencias	55
Anexos	59

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Lista de tablas y figuras

Figuras

Figura 1. Esquema metodológico.	30
Figura 2. Prototipo canal en madera.	33
Figura 3. Impermeabilizante acrílico TOPEX utilizado para el sellado del canal.....	33
Figura 4. Impermeabilización del canal con impermeabilizante acrílico fibra 12 TOPEX..	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5. Montaje experimental, banco hidráulico, limnímetros, canal en madera.....	35
Figura 6. Equipo balanza.	40
Figura 7. Sellado de bordes del canal haciendo uso de plastilina.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 8. Masa del canal en estado seco.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 9. Proceso de llenado del canal con agua.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 10. Masa del canal en estado húmedo.	42
Figura 11. Montaje experimental del ensayo.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 12. Altura otorgada al canal para definir pendiente.	43
Figura 13. Modelación sección 1, ubicada en 0m del canal.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 14. Modelación sección 2, ubicada en 0.5m del canal.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 15. Modelación sección 3, ubicada en 1m del canal.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 16. Modelación sección 4, ubicada en 1.56m del canal. ...	¡Error! Marcador no definido.
Figura 17. Resultados obtenidos condiciones del canal.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 18. Perfil del canal.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 19. Organismos observados en el canal.....	¡Error! Marcador no definido.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Tablas

Tabla 1. Propiedades físicas del Caracolí.	27
Tabla 2. Propiedades mecánicas del Caracolí.	27
Tabla 3. Características físicas del canal.	34
Tabla 4. Registro de caudal y alturas de la lámina de agua del canal.	36
Tabla 5. Registro de caudal y alturas de la lámina de agua del canal en unidades del S.I.	36
Tabla 6. Características generales del fluido y la madera.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 7. Propiedades geométricas canal en madera.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 8. Propiedades hidráulicas canal en madera.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 9. Datos obtenidos en laboratorio muestra 1.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 10. Datos obtenidos en laboratorio muestra 2.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 11. Datos obtenidos en laboratorio muestra 3.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 12. Valores obtenidos de coeficiente de Manning experimental y coeficiente de Manning teórico.	¡Error! Marcador no definido.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Lista de anexos.

Anexo 1. Coeficiente de Manning teórico para madera. **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 2. Valores para interpolación de densidad y viscosidad cinemática a temperatura de 28°. **¡Error! Marcador no definido.**

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Introducción

De los recursos naturales presentes en la Tierra, el de mayor importancia para garantizar el bienestar de las comunidades es el agua. Este, ha sido utilizado desde épocas milenarias como medio de sustento y es en el ingeniero civil en quien recae la responsabilidad, desde el punto de vista técnico, de buscar alternativas que faciliten el cubrimiento de la necesidad de distribución del recurso en la población.

Por ende, debe conocer y estudiar campos como la hidráulica, analizando fundamentos que dan origen a modelos matemáticos que representan el flujo de un fluido, siendo que el más común presentado en la naturaleza es de tipo libre, como las corrientes de aguas lluvias; y entre los inducidos por el hombre, se encuentra el flujo a través de canales, que en términos generales lo que se busca en su estudio es conocer el comportamiento a través de estos.

Siendo así, la presente investigación compete a la hidráulica de canales mediante la revisión de un conducto libre, en el cual “el líquido circulante presenta una superficie libre sobre la cual rige la presión atmosférica. La sección transversal no tiene, necesariamente, un perímetro cerrado y cuando esto sucede, funciona parcialmente lleno”. (Rodríguez, 2008)

De lo anterior, al considerar la caracterización de tipo abierto y artificial, se plantea construir un modelo de este tipo, utilizando madera como componente principal, y de esta forma abordar la evaluación del comportamiento del material mientras se da la conducción a través de este.

Así, se plantea el estudio con materiales presentes en la región Caribe colombiana para identificar una alternativa eficiente que cumpla con los requerimientos estipulados, basados en

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

prácticas realizadas por autores que sustenten la investigación, comparando el sistema en discusión con otros que cumplan las mismas funciones, pretendiendo encontrar en la madera un recurso natural y accesible, ideal para cumplir con el uso propuesto en el presente trabajo.

Con esta investigación, se busca estudiar los principios básicos del flujo en canales partiendo de formulaciones generales hacia el caso particular en cuestión, en el cual se da la construcción del canal en madera y se evalúa el comportamiento que tiene en la conducción de un fluido, haciendo uso de ecuaciones que describan los planteamientos formulados.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Planteamiento del problema

La madera es un material de usos muy diversos, comúnmente su aplicación básica deriva en la elaboración de mobiliarios como sillas, ventanas y muebles. Del mismo modo, en campos como el sector de la construcción se utiliza para el encofrado de elementos estructurales en concreto; al ser una materia prima, de ella también se obtienen productos derivados, principalmente el papel y entre sus múltiples bondades además es útil para productos netamente ornamentales como cuadros o juguetes.

Al estar presente en la flora de la región Caribe colombiana, la madera es de fácil acceso para las comunidades, siendo un material aprovechado por el hombre mediante actividades de explotación, las cuales son reguladas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, y en cada región delegado a las Corporaciones Autónomas Regionales CRA, en lo que compete a la presente, concierne la seccional Atlántico. Por lo cual, cumpliendo con las regulaciones, se deben considerar ejemplares de tipo comercial con permiso o autorización de Aprovechamiento Forestal proveniente de la entidad reguladora.

Así, al ser un componente natural y accesible, siendo un recurso renovable de elasticidad variable, abundante en la flora de la región y fácil de trabajar, es posible explorar su funcionalidad en campos donde no es común aprovechar sus propiedades, en este caso, en la hidráulica de canales, mediante el estudio del comportamiento del material con respecto a la conducción de agua en un canal abierto, buscando una propuesta práctica como alternativa de aprovechamiento.

Por consiguiente, resulta útil realizar el presente trabajo enfocado en la hidráulica de canales, específicamente a través del estudio de conducción de fluidos por medio de un canal

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

abierto elaborado de madera, el cual pueda ser implementado como una alternativa en zonas donde se requiera conducir agua y sea difícil conseguir o construir un canal con materiales comúnmente usados.

Para tal efecto, se investigará sobre las propiedades de dicho material y de este modo se determinará su eficiencia. Por ende, es necesario formular el siguiente interrogante: ¿Se encuentra en el material en estudio una alternativa viable para la conducción de agua?

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Objetivos

General

Verificar la viabilidad de la madera de especie *Anacardium Excelsum* en relación con el comportamiento hidráulico como medio de conducción de agua mediante modelos matemáticos que representan el flujo de un fluido.

Específicos

- Analizar mediante ensayos de laboratorio la funcionalidad del material para el caso dado.
- Determinar experimentalmente el valor del coeficiente de Manning para la madera.
- Proponer aplicaciones en las cuáles se pueda implementar como alternativa el uso de canales para conducción de agua elaborados con madera.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Justificación

Un canal se define como un conducto en el cual un líquido transcurre debido a la acción de la gravedad bajo ninguna presión, pues la superficie libre del líquido está en contacto con la atmósfera, es decir, que el agua fluye impulsada por la presión atmosférica y por su propio peso. Desde el área de la ingeniería principalmente es utilizado para la conducción de agua, teniendo en cuenta que este es un recurso natural de vital importancia para la subsistencia de la humanidad, evidenciándose en el uso de las diferentes actividades diarias desarrolladas por estos como la alimentación, la sanidad, la industria, la agricultura y la recreación (Sutorius & Rodríguez, 2015).

Alrededor del mundo en los últimos años este recurso se ha visto afectado debido a diversas causas que se encuentran ligadas principalmente a la incursión del ser humano en él, tales como la creciente tasa de la población, contaminación debida a impactos ambientales y mal uso del recurso (Castañeda & Fernández, 2010). La contaminación de las principales fuentes hídricas que son la fuente de abastecimiento de la humanidad, conlleva al decaimiento o desaparición de estas, haciendo cada vez más escaso el recurso, por lo que como ciudadanos nos vemos en la obligación de generar alternativas que impulsen el aprovechamiento eficiente de este y que a su vez estén guiados bajo principios de sostenibilidad garantizando la calidad de vida actual y futura por medio del desarrollo social, el crecimiento económico y la protección ambiental.

Sin embargo, existen lugares donde los sistemas de recolección comúnmente usados son de difícil acceso, por lo cual los habitantes recurren a métodos directos para la captación del recurso hídrico en la fuente de abastecimiento más cercana, o realizan prácticas comunes como

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

la recolección de agua lluvia mediante las cubiertas de las viviendas (Reyes & Rubio, 2014), siendo necesario para ello poseer de equipos que brinden este servicio mediante la canalización. Es por esto por lo que surge el interés de llevar a cabo este trabajo investigativo en torno a la utilización de la madera, teniendo en cuenta que esta tiene características positivas como una baja utilización de energía, bajo impacto en la producción de carbono y la sostenibilidad, que, a diferencia de materiales comerciales como los metales y el plástico, es un recurso renovable, por lo que permite mantener una consecución de productos maderables de forma indefinida. (Laboratory, 2010)

En este caso, se propone la implementación de un canal abierto y artificial, fabricado en una especie maderable con características que faciliten la conducción de agua y que sea de fácil acceso en la región Caribe, teniendo en cuenta que la especie propuesta cumple con permisos de explotación “La especie *A. excelsum* no se encuentra en los listados de especies amenazadas de la UICN ni en el catálogo de especies CITES” (Mora G. A., 2020).

Con lo que, principalmente se busca determinar la funcionalidad de la implementación de la madera en un sistema de conducción de agua como alternativa de otros que cumplan las mismas funciones, donde por medio de sus características se catalogue como una alternativa atractiva y funcional para el usuario, basados en estudios realizados por autores que sustenten la investigación, evaluando factores categóricos relacionados con las propiedades del canal y documentando lo anterior con los pasos necesarios para la evaluación del material en estudio desde su concepción hasta la obtención de resultados.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Marco referencial

Antecedentes

La madera es un material ecológico de diversas propiedades físicas y mecánicas, que a lo largo del tiempo ha sido empleado para la construcción de numerosos productos que hoy son considerados de gran importancia dentro de las actividades diarias de un ser humano. Actualmente, en busca del bien ambiental se han realizado estudios para la viabilidad de su ejecución en otras actividades, por ejemplo, en la construcción como sustituto de materiales como el cemento, hormigón, acero y asfalto (Kayo & Noda, 2018). Sin embargo, no ha sido mayormente explorado en el área de la hidráulica de canales, siendo escasos los estudios que den indicadores sobre su comportamiento para la conducción de agua.

No obstante, para llevar a cabo la presente investigación, resulta necesario realizar una revisión de trabajos y estudios que describen los hechos o procesos realizados que se encuentran relacionados con los usos que se le ha dado a esta a lo largo de su historia, descritos a continuación.

Monge (2018), realizó un trabajo investigativo donde se define el proceso requerido para utilizar el bambú como material de conducción, más específicamente para crear un sistema de riego para agricultura, con el objetivo de reemplazar los materiales convencionales debido al alto costo que estos representan, y asimismo crear un sistema eficiente para dar solución a la problemática de la baja dotación del recurso hídrico en determinadas épocas del año, en la que la agricultura se ve fuertemente afectada por la baja producción de las cosechas.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

La investigación estuvo enmarcada en estudiar el comportamiento hidráulico del bambú, identificando las presiones y caudales permisibles con los que este puede funcionar, como también su valor de rugosidad, para finalmente obtener el diseño de un sistema de conducción y proveer a los pequeños agricultores del conocimiento de la funcionalidad de este sistema asequible, su construcción y sus respectivos rangos de operación, todo ello mediante la elaboración de un manual práctico de fácil entendimiento.

Así mismo (Cruz Hernández, 2019) en su estudio denominado "Determinación de características del bambú como tubería temporal a través del modelo de un banco hidráulico" buscó verificar el comportamiento del bambú para conducir agua, como una alternativa frente a los equipos y máquinas eléctricas, para reducir el impacto ambiental que estas generan, por medio de ensayos de laboratorio como ensayo de tracción para la tubería, prueba de hermeticidad, pérdidas hidráulicas y prueba de presión de aire y análisis de los resultados por medio de los planteamientos correspondientes a la hidráulica de tuberías. Con lo que se concluyó que el material es funcional para la conducción de agua, sin embargo, no es recomendado para sistemas de bombeo donde se requieran grandes presiones, debido a que este soporta una presión mínima de 22Psi, por el contrario, se recomienda para sistemas de riego o para redes cortas de abastecimiento como viviendas rurales de un piso.

A lo largo del tiempo la madera ha tomado mayor incursión en la construcción, uno de los usos más innovadores hace referencia a la construcción de armaduras en este material usadas para techos de edificaciones, construcción de puentes, entre otros, la cual consiste en una estructura entrelazada con un sistema de elementos ordenados y unidos entre sí, de forma que los esfuerzos transmitidos de un elemento a otro son de compresión o tensión axial. (Veliz, s. f.) en

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

su artículo de investigación resaltan las grandes ventajas al usar madera para la construcción de armaduras, entre las cuales se destacan: un reducido peso que facilita su instalación, capacidad para cubrir grandes luces y flexibilidad para ajustarse a diversas formas de perfiles para techos. Su diseño se basa en criterios establecidos que van desde la selección del material hasta el cálculo estructural de acuerdo con las cargas a las que esta estará sometida.

Beatriz González Rodrigo en su artículo de investigación titulado “La madera en la construcción de entramados inclinados de viviendas unifamiliares. Situación actual en España” expone que la madera estructural ha ganado un nicho importante en el mercado de la construcción de entramados debido a sus características favorables principalmente en la reducción de emisión de CO₂, afirmando que ésta en su fase de crecimiento es un sumidero de este gas y en adición, requiere poca energía en su proceso de transformación a material y es biodegradable, así como también es versátil, manejable y su montaje se realiza de forma rápida y limpia. El estudio realizado se basó en analizar el comportamiento estructural de los diferentes sistemas constructivos en madera utilizados en entramados inclinados, observando las ventajas y desventajas de cada uno para finalmente comparar su comportamiento térmico con el de un sistema tradicional, con lo cual se logró comprobar que los sistemas en madera presentan un comportamiento térmico igual que los sistemas tradicionales construidos en tejas y además presentan una ventaja de reducción en tiempos de montaje. (González, 2007)

(Jiang, y otros, 2018) resaltando los beneficios de la madera y sus derivados, realizaron una investigación donde describen planteamientos para diseñar nuevos materiales a base de madera a través de nanotecnologías avanzadas, buscando promover un progreso continuo a la sostenibilidad,

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

dándole a estos nuevos materiales una aplicación razonable en áreas donde normalmente prevalece el uso de materiales no renovables artificiales, como el plástico, vidrio y metales.

En el estudio titulado “Potencial de mitigación del cambio climático del uso de madera en ingeniería civil en Japón según la evaluación del ciclo de vida”, (Kayo & Noda, 2018) por medio del uso proyectado de madera en Japón hasta el año 2050, realizaron una estimación de la contribución significativa del uso de esta en la mitigación de la emisión de gases de efecto invernadero, mediante el almacenamiento de carbono, la sustitución de materiales no maderables, como el cemento, concreto y el asfalto por materiales de madera y la sustitución de energía utilizando los desechos de las estructuras de ingeniería realizadas con madera para combustible fósiles. Con lo que se concluyó que los efectos máximos evitados, proyectados para cada enfoque pertenecen a un 73% para almacenamiento de carbono, 19% para sustitución de materiales y 8% para sustitución de energía, en ese sentido, se muestra la importancia de la aplicación de la madera en la construcción para aportar al cambio climático y se destaca la madera principalmente como sustituto del cemento para fabricación de pilotes y del acero para la fabricación de barandillas de madera para puentes.

Marco teórico

Aquel sistema de flujo donde la superficie superior del fluido está expuesta a la atmosfera se considera un canal abierto. En la naturaleza se encuentran los ríos y corrientes y de tipo artificial las canaletas pluviales (Mott, 2006, p. 443), conociendo como fluido una sustancia que se encuentra en la fase líquida o gaseosa, el cual no puede oponer resistencia a un esfuerzo cortante, es decir, se deforma de manera continua ante cualquier esfuerzo sin importar lo pequeño que sea. (Cengel & Cimbala, 2006, p. 2)

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

La cantidad de fluido que circula a través de una sección del ducto (tubería, cañería, oleoducto, río, canal, entre otros) por unidad de tiempo se conoce como Caudal. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo expresado como $Q = \frac{V}{t} = V \cdot A$, donde v es el volumen y t el tiempo transcurrido, o V es la velocidad y A el área de la sección transversal por donde se moviliza el fluido.

De esta manera, el flujo en un canal abierto se refiere al flujo de un líquido en canales abiertos respecto a la atmósfera o en un conducto parcialmente lleno y se caracteriza por la presencia de una interfase líquido-gas, llamada superficie libre (Cengel & Cimbala, 2006, p. 679).

Los flujos en canales abiertos pueden clasificarse como estacionarios si permanecen en una posición dada a lo largo del tiempo, esto es, si la profundidad de flujo no varía en el tiempo en cualquier lugar del canal, de lo contrario se considera no estacionario. Así mismo, están clasificados como uniformes o variados, de esta manera, un flujo uniforme es aquel donde la profundidad de flujo y la velocidad promedio permanecen constantes, esto siempre y cuando la pendiente, la rugosidad la sección transversal del canal no presenten cambio alguno, de lo contrario se presenta un flujo variado o no uniforme, comúnmente visibles en los canales generados por el hombre o canales con obstrucciones o accesorios que generen un cambio en la profundidad del flujo. (Cengel & Cimbala, 2006)

Al igual que es tuberías los canales abiertos se clasifican según su régimen de flujo como laminar y turbulentos. Se dice que el régimen de flujo es laminar, cuando se caracteriza por líneas de corriente suaves y movimiento sumamente ordenado; mientras que es turbulento,

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

cuando se caracteriza por fluctuaciones de velocidad y movimiento también desordenado. La transición de flujo laminar a turbulento no ocurre repentinamente; más bien, sucede sobre cierta región en la que el flujo fluctúa entre flujos laminar y turbulento antes de volverse totalmente turbulento. Lo anterior se encuentra relacionado con el número de Reynolds, que corresponde a la razón de fuerzas inerciales a fuerzas viscosas en el fluido (Cengel & Cimbala, 2006, p. 324). Así, régimen de flujo depende del valor del número de Reynolds expresado como:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho V R_h}{\mu} = \frac{V R_h}{\nu}$$

$Re \leq 500$ Laminar
 $Re \geq 2500$ Turbulento
 $500 \leq Re \leq 2500$ Transición

Donde ρ corresponde a la densidad del fluido, V a la velocidad promedio del líquido, ν es la viscosidad cinemática y R_h el radio hidráulico definido como la razón entre el área de la sección transversal del flujo A_c y el perímetro mojado p .

Adicionalmente, uno de los principales parámetros para definir el tipo de flujo en un canal abierto, es el número adimensional de Froude, de acuerdo con este se clasifican como subcrítico, crítico o supercrítico y está definido como:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL_c}} = \frac{V}{\sqrt{gy}}$$

$Fr < 1$ Flujo subcrítico o tranquilo
 $Fr = 1$ Flujo crítico
 $Fr > 1$ Flujo supercrítico o rápido

Donde g corresponde a la aceleración gravitacional, V a la velocidad promedio del líquido en la sección transversal, y L_c a la longitud característica, la cual se toma como la profundidad del flujo, (y) para canales rectangulares. (Cengel & Cimbala, 2006)

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Elementos geométricos

Se encuentran definidos por la geometría de la sección del canal y la profundidad del flujo, así la resolución de las ecuaciones que los describen varía en función de estas características. Entre ellos se encuentran la profundidad de flujo, el ancho superficial, área mojada, perímetro mojado, radio hidráulico, profundidad hidráulica y los factores de sección; siendo estas propiedades de gran importancia para el cálculo de flujo. (Chow, 1994, p. 22). Las fórmulas que los describen teniendo en cuenta una sección rectangular son las siguientes,

Área

$$A = by \quad (1)$$

Perímetro mojado

$$P = b + 2y \quad (2)$$

Radio hidráulico

$$R = \frac{by}{b+2y} \quad (3)$$

Ancho superficial

$$T = b \quad (4)$$

Profundidad hidráulica

$$D = y \quad (5)$$

Factor de sección Z

$$Z = by^{1.5} \quad (6)$$

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Donde:

b = base del canal.

y = altura de la lámina de agua del canal.

Energía específica

La energía específica en la sección de un canal se define como la energía medida con respecto al fondo del canal. De este modo la energía específica es igual a la suma de la profundidad de flujo y la cabeza de velocidad.

Ecuación de Manning

Es una ecuación simplificada para el cálculo de flujo uniforme en canales abiertos empleada en aplicaciones prácticas, que relaciona varios elementos geométricos de fácil resolución. (Chow, 1994, p. 96)

Geometría del canal

Chow (1994) describe la sección de un canal como el corte transversal de este, medido perpendicularmente a la dirección del flujo. En lo que a un canal natural respecta, las secciones suelen ser muy irregulares, tomando forma generalmente de parábola o trapecio, lo que depende en cierta medida del caudal que es transportado, por ejemplo, en fuentes sometidas a crecientes se puede presentar una determinada sección que transporta los caudales normales y una o más secciones laterales para los caudales de desborde. Por su parte, los caudales artificiales, al ser intervenidos por la mano del hombre, son diseñados con figuras geométricas regulares, siendo unas más comunes que otras de acuerdo con la funcionalidad del canal, así las secciones

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

rectangulares son utilizadas cuando los canales son construidos con materiales más estables como, concreto, roca, metal o madera, garantizando estabilidad a sus paredes verticales.

Madera

Se considera así a uno de los primeros materiales de construcción de origen vegetal más explotados por el hombre. Corresponde a un material de elasticidad variable extraído del tronco de los árboles y es utilizada en múltiples funcionalidades. El tener ciertas propiedades como ligera, resistente, reciclable, renovable y biodegradable la hacen ideal y atractiva en la actual industria de los materiales de construcción donde estas características están siendo apreciadas y aprovechadas por parte de arquitectos y diseñadores, en la búsqueda de la reducción de las emisiones globales del dióxido de carbono (CO₂) producido por la quema de combustibles fósiles para tener energía, lo que incurre en el aumento de los efectos de invernadero y el cambio climático. (Khatib, 2016)

La madera posee una amplia variedad de especies, cada una con diversas características que permiten darle una clasificación para su uso, y de esta manera son comúnmente conocidas. Las especies más utilizadas o trabajadas son aquellas que presentan mejores características de durabilidad, resistencia y trabajabilidad, principalmente utilizadas en el sector de la construcción, fabricación de muebles y carpintería. Dentro de estas especies se encuentra el Caracolí, en su nombre científico *Anacardium Excelsum* de la familia Anacardiaceae, ampliamente distribuida en distintos departamentos de Colombia, siendo los principales destinos de removilización Atlántico 34%, Bolívar 25% y Antioquia 9%. Usada para construcción en general, muebles y encofrados, su estructura anatómica presenta poros visibles escasos que varían entre los doce

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

(12) a sesenta y cinco (65) poros por 10mm, respuesta de secado lenta en climas con temperatura baja, en términos de trabajabilidad es fácil de aserrar, su cepillado y lijado son pobres. (Blanco Flórez, 2020)

Dentro de sus características físicas y mecánicas se encuentran las mencionadas en la [Figura 1](#) y [Tabla 1](#), respectivamente.

Tabla 1.

Propiedades físicas del Caracolí.

Propiedad	Valor
Densidad básica	0.41 g/cm ³
Densidad aparente 12% humedad	0.44 g/cm ³
Contracción volumétrica total	7.7%
Contracción tangencial	5.4%
Contracción radial	2.8%
Relación T/R	1.9

Fuente: (Blanco Flórez, 2020)

Tabla 1.

Propiedades mecánicas del Caracolí.

Propiedad	Valor
Módulo de elasticidad	87.24 Mpa
Módulo de ruptura	59 Mpa
Dureza janka	210 Kgf

Fuente: (Blanco Flórez, 2020)

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Diseño metodológico

Tipo de estudio

El estudio realizado en relación con el comportamiento hidráulico del ejemplar maderable es caracterizado como una investigación de tipo experimental, considerando que las variables en cuestión han sido manipuladas en un ambiente de condiciones controladas previamente determinadas, las cuales permiten replicar los modelos concretos que pueden desarrollarse en un cualquier tipo de canal abierto en el prototipo en estudio y así poder observar los efectos que se producen obteniendo los datos que sustenten los planteamientos.

Procedimiento metodológico

Para el desarrollo del proyecto se describen las siguientes etapas:

Etapas 1. Levantamiento de información.

En esta etapa se sustenta el enfoque del proyecto, de acuerdo con la revisión de antecedentes acerca del uso y comportamiento hidráulico de materiales naturales para la conducción de fluido en canales abiertos.

Por tanto, se ejecutan las siguientes actividades:

- Recopilación de información tecnológica disponible, referente a antecedentes.
- Recopilación de información técnica, referente a datos y características del material a elegir.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Etapa 2. Selección de material.

En esta etapa se investigan posibles materiales de acuerdo con criterios establecidos, teniendo en cuenta que sean comerciales para garantizar su accesibilidad en la región Caribe; de los cuales se selecciona el ejemplar a estudiar: Caracolí.

Por tanto, se ejecuta la siguiente actividad:

- Selección de ejemplar que cumple con las características designadas.

Etapa 3. Dimensionamiento y ejecución.

En esta etapa se determinan las dimensiones del prototipo para el análisis, de tal forma que se garantice el aprovechamiento del material para el estudio que se requiere.

Por tanto, se ejecutan las siguientes actividades:

- Construcción del prototipo del canal a partir de los modelos consultados.
- Banco de pruebas de laboratorio, que permitan conocer el comportamiento hidráulico de la madera y estimación de comportamiento físico a lo largo de su vida útil.
- En caso de ser necesario, redimensionamiento.

Etapa 4. Viabilidad.

En esta etapa se busca analizar el comportamiento hidráulico de la madera con relación a la conducción de fluido en un canal abierto, utilizando modelos matemáticos que permitan establecer comparaciones con el modelo estándar establecido a partir de las variables en estudio.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Por tanto, se ejecutan las siguientes actividades:

- Análisis de los factores estudiados en relación con el comportamiento hidráulico de la madera en la conducción de fluido.
- Establecimiento de conclusiones respecto a los datos obtenidos.

Etapa 5. Redacción.

En esta etapa se redacta el documento que sustenta la práctica investigativa desde su concepción hasta su finalización.

Por tanto, se ejecuta la siguiente actividad:

- Redacción del documento final una vez culminadas las etapas que sustentan la metodología utilizada en la investigación.

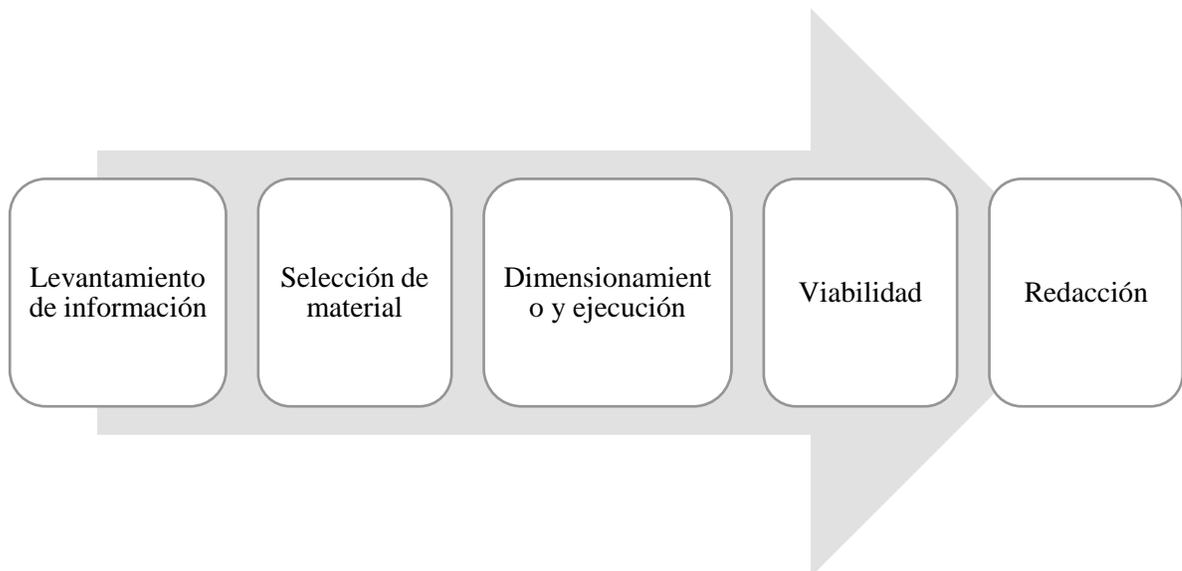


Figura 1. Esquema metodológico. Fuente: Elaboración propia.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Caracterización hidráulica del canal

En este apartado se describen los procedimientos y cálculos realizados por medio de prácticas y expresiones existentes en la hidráulica de canales para el cálculo de los parámetros geométricos del canal.

Elección de la especie

Para elegir la especie maderable a ensayar fue necesario definir criterios que en conjunto fundamentaran los objetivos de la investigación, de esta manera se tienen los siguientes:

Durabilidad requerida

Teniendo en cuenta que el marco de la investigación es el comportamiento de la madera frente a la conducción de agua, se buscó un material lo menos permeable posible y que a su vez enfrentando las condiciones a las que será sometido su deterioro fuera más lento.

Disponibilidad en la zona

Para hacer posible la investigación el material debía estar disponible y ser de fácil acceso en la zona de estudio, por lo que la especie maderable escogida es ampliamente encontrada en la región Caribe.

Aspectos medioambientales

Considerando que la madera es un material de origen natural y que por su uso ilegal y desmedido se generan afectaciones al medio ambiente, es importante tener en cuenta el criterio de las especies protegidas o en peligro de extinción, por lo que se corroboró con las autoridades

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

ambientales de la región que la especie a utilizar no incidiera en esta característica, de tal manera que con la tala responsable sea posible su uso y comercialización.

Asequibilidad económica

Para hacer la alternativa propuesta más atractiva, además de asequible debía estar dentro de un rango económico aceptable, igual o inferior a los materiales de uso comercial.

Material de estudio

En consecuencia, se adaptó un prototipo de un canal en madera como se observa en la **Figura 1**, de especie *Anacardium Excelsum* en su nombre científico y conocida coloquialmente como Caracolí, teniendo en cuenta que esta tiene una buena respuesta al entrar en contacto con el agua, lo cual se puede evidenciar al ser este un material usado para la elaboración de canoas y formaletas, que aunque susceptible a la pudrición y ataque de termitas haciendo uso de preservantes se le puede dar estos usos (Mora, 2017). De igual forma es utilizada para carpintería en la construcción de interiores, pisos, postes, utensilios livianos, entre otros; normalmente crece a la orilla de arroyos, ríos y nacimientos de agua (López Camacho, y otros, 2016) tolerando inundaciones periódicas y altos niveles freáticos.

Teniendo en cuenta la porosidad del material y que el canal está conformado por partes, fue previamente impermeabilizado con tres (3) capas de impermeabilizante acrílico marca Topex apto para madera, cubriendo únicamente la zona exterior para no alterar las propiedades naturales del canal y su comportamiento respecto al fluido que se desea transportar.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO



Figura 1. Prototipo canal en madera. *Fuente:* Elaboración propia.



Figura 3. Impermeabilizante acrílico TOPEX utilizado para el sellado del canal.

Fuente: Homecenter.co

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

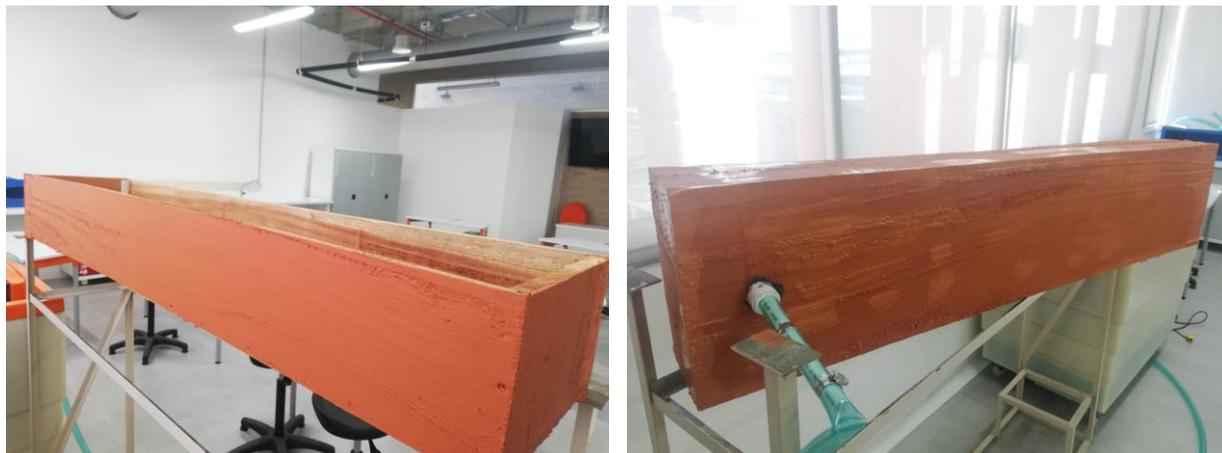


Figura 4. Impermeabilización del canal con impermeabilizante acrílico fibra 12 TOPEX.

Fuente: Elaboración propia.

Geometría del canal

Para la simplificación del estudio se optó trabajar con una canal totalmente rectangular con igual profundidad a lo largo de su longitud, respondiendo a las características de un flujo uniforme, adicionalmente se agregó un tramo de descarga elaborado en aluminio para dar continuidad al fluido hasta el banco hidráulico, como también una placa de madera al extremo inicial del canal, justo arriba de la conexión de la descarga del caudal, cumpliendo la función de disipar la energía del caudal descargado. Las dimensiones del canal se encuentran establecidas en la Tabla 2

Tabla 2.

Características físicas del canal.

Altura [m]	h	0.20
Base [m]	b	0.34
Longitud [m]	L	1.56
Pendiente de fondo [%]	S_0	0.01

Fuente: Elaboración propia.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Ensayos realizados

Ensayo aforo de caudal

Para el montaje experimental del presente ensayo se utiliza el flujómetro para el registro del caudal, el banco hidráulico para el bombeo, descarga y recirculación del agua, dos limnómetros para el registro de las alturas hidráulicas y el canal en madera con su soporte, como se observa en la .



Figura 5. Montaje experimental, banco hidráulico, limnómetros, canal en madera. Fuente: Elaboración propia.

Este ensayo consiste en registrar el gasto de agua que pasa por la sección transversal del canal utilizando un flujómetro, para lo cual se hace necesario controlar la salida del fluido en el banco hidráulico. En este caso, se tomaron diez (10) valores diferentes de este.

Simultáneamente, para cada caudal de salida se registraron las correspondientes alturas de la lámina de agua, tanto aguas arriba como aguas abajo, haciendo uso de los dos limnómetros

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

ubicados a 0.5m del inicio del canal para la medición aguas arriba y 1m del inicio del canal para la medición aguas abajo.

Este procedimiento fue realizado (3) veces buscando que los valores del caudal fueran iguales y así se obtuvieron los datos contemplados en la **Tabla 3**.

Tabla 3.

Registro de caudal y alturas de la lámina de agua del canal.

Caudal [L/min]	y1 aguas arriba [mm]			y2 aguas abajo [mm]		
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 1	Medición 2	Medición 3
10,20	17,00	13,50	14,00	11,00	12,00	12,50
15,70	18,00	16,00	16,50	13,00	14,00	15,00
21,30	21,00	17,50	19,00	14,00	15,00	15,50
26,30	21,00	19,00	19,50	16,00	17,00	17,00
29,00	22,00	20,00	20,00	17,00	18,00	18,50
38,50	24,50	22,00	21,50	20,00	18,50	20,00
45,50	26,50	23,50	24,00	21,50	22,00	21,00
51,50	28,00	26,00	26,50	21,50	24,00	24,00
56,60	29,00	28,50	28,00	23,00	26,00	26,00
61,30	30,00	30,00	31,00	27,00	29,00	29,00

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se llevaron los datos a unidades consistentes y se calculó el promedio de las tres (3) mediciones obteniendo los valores de la

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Tabla 4.

Tabla 4.

Registro de caudal y alturas de la lámina de agua del canal en unidades del S.I.

Caudal [m ³ /s]	y₁ aguas arriba [m]	y₂ aguas abajo [m]
0,00017	0,015	0,011
0,00026	0,017	0,013
0,00036	0,019	0,014
0,00044	0,020	0,015
0,00048	0,021	0,016
0,00064	0,023	0,018
0,00076	0,025	0,019
0,00086	0,027	0,020
0,00094	0,029	0,022
0,00102	0,030	0,024

Fuente: Elaboración propia.

Una vez recopilados los datos experimentales, se procedió con los datos generales que dependen de las características propias del material utilizado y del flujo a transportar, las cuales están definidas por la literatura existente y serán de utilidad en los cálculos para la caracterización hidráulica del canal. Para determinar las características del flujo se midió la temperatura del agua que arrojó un valor de 28°C. Los datos se encuentran resumidos en la

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Tabla 6.

Características generales del fluido y el canal.

Propiedades	Símbolo	Valor	Referencia
Densidad [kg/m ³]	<i>P</i>	996,26	(Mott, 2006)
Viscosidad cinemática [m ² /s]	<i>Θ</i>	8,40E-07	(Mott, 2006)
Viscosidad dinámica [kg/ms]	<i>μ</i>	8,37E-04	
Altura [m]	<i>H</i>	0,20	
Base [m]	<i>B</i>	0,30	
Longitud [m]	<i>L</i>	1,56	
Gravedad [m/s ²]	<i>G</i>	9,81	
Pendiente de fondo	<i>S₀</i>	0,0001	

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, es posible calcular los elementos geométricos del canal tales como, área, perímetro mojado, radio hidráulico, ancho superficial, profundidad hidráulica y factor de sección *Z*. A continuación, en la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* se describen los valores obtenidos de cada elemento tanto aguas arriba como aguas abajo.

Tabla 7.

Propiedades geométricas del canal en madera.

Área [m²] A	Perímetro mojado [m] P	Radio hidráulico [m] R	Ancho superficial [m] T	Profundidad hidráulica [m] D	Factor de sección [m] Z
---	---	---	--	---	--

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Agua arriba	Aguas abajo									
0,005	0,003	0,334	0,327	0,014	0,010	0,30	0,015	0,011	0,0006	0,0004
0,005	0,004	0,338	0,330	0,015	0,012	0,30	0,017	0,013	0,0007	0,0004
0,006	0,004	0,343	0,333	0,017	0,013	0,30	0,019	0,014	0,0008	0,0005
0,006	0,005	0,344	0,335	0,018	0,014	0,30	0,020	0,015	0,0009	0,0006
0,006	0,005	0,346	0,336	0,018	0,014	0,30	0,021	0,016	0,0009	0,0006
0,007	0,005	0,350	0,340	0,020	0,016	0,30	0,023	0,018	0,0010	0,0007
0,008	0,006	0,354	0,343	0,021	0,017	0,30	0,025	0,019	0,0012	0,0008
0,008	0,006	0,358	0,346	0,023	0,018	0,30	0,027	0,020	0,0013	0,0009
0,009	0,007	0,362	0,348	0,024	0,019	0,30	0,029	0,022	0,0015	0,0010
0,009	0,007	0,365	0,352	0,025	0,021	0,30	0,030	0,024	0,0016	0,0011

Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, se calculan las propiedades hidráulicas utilizadas para el diseño de un canal expuestas a continuación con las respectivas fórmulas que las describen.

Energía específica

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2} \quad (7)$$

Donde:

y = altura de la lámina de agua del canal.

g = gravedad.

q = caudal específico o por unidad de ancho.

Que a su vez se describe como:

$$q = \frac{Q}{b} \quad (8)$$

Donde:

Q = caudal.

b = base del canal.

Velocidad

$$V = \frac{Q}{A} \quad (9)$$

Donde:

Q = caudal.

A = área del canal.

Número de Reynolds

$$R_e = \frac{4RV}{\nu} \quad (10)$$

Donde:

R = radio hidráulico.

V = velocidad.

ν = viscosidad cinemática.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Número de Froude

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (11)$$

Donde:

V = velocidad.

g = gravedad

D = profundidad hidráulica.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Realizando la aplicación de las fórmulas para cada dato tanto aguas arriba como aguas abajo se obtienen los valores establecidos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 8.

Propiedades hidráulicas canal en madera.

Caudal [m ³ /s]	Energía específica [m]		Velocidad [m/s]		Re		Tipo de Flujo	Fr		Tipo de Flujo
	Agua arriba	Aguas abajo	Agua arriba	Aguas abajo	Agua arriba	Aguas abajo		Agua arriba	Aguas abajo	
0,00017	0,01	0,01	0,04	0,05	2420,3	2476,4	Transicional	0,10	0,15	Subcrítico
0,00026	0,02	0,01	0,05	0,07	3681,4	3774,1	Turbulento	0,14	0,19	Subcrítico
0,00036	0,02	0,01	0,06	0,08	4926,6	5070,9	Turbulento	0,16	0,22	Subcrítico
0,00044	0,02	0,02	0,07	0,10	6059,5	6231,7	Turbulento	0,19	0,25	Subcrítico
0,00048	0,02	0,02	0,08	0,10	6649,4	6843,3	Turbulento	0,20	0,26	Subcrítico
0,00064	0,02	0,02	0,09	0,12	8726,8	8989,3	Turbulento	0,22	0,29	Subcrítico
0,00076	0,03	0,02	0,10	0,13	10197,0	10530,8	Turbulento	0,23	0,30	Subcrítico
0,00086	0,03	0,02	0,10	0,14	11402,2	11828,4	Turbulento	0,23	0,31	Subcrítico
0,00094	0,03	0,02	0,11	0,14	12415,9	12900,8	Turbulento	0,24	0,31	Subcrítico
0,00102	0,03	0,02	0,11	0,14	13312,0	13807,0	Turbulento	0,23	0,29	Subcrítico

Fuente: Elaboración propia.

Ensayo ganancia de masa

Este ensayo consiste en describir la capacidad de absorción y permeabilidad de la madera en estudio, haciendo uso del prototipo y una balanza con capacidad de máxima de 100kg y mínima de 50g,

Figura 6. Equipo balanza. *Fuente:* Elaboración propia.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO



Figura 6. Equipo balanza. *Fuente:* Elaboración propia.

Inicialmente se sellaron los bordes y esquinas del canal con plastilina alrededor de la compuerta ajustable, que para este caso debía estar totalmente cerrada.



Figura 7. Sellado de bordes del canal haciendo uso de plastilina. *Fuente:* Elaboración propia.

Seguidamente se tomó la masa inicial del prototipo en estado seco, haciendo uso de la balanza, la cual arrojó un valor de 10.75 kg.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO



Figura 8. Masa del canal en estado seco. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se llenó el canal hasta el borde de sus paredes con agua durante 24 horas y pasado este tiempo se vació y se tomó finalmente la masa en estado húmedo del canal, con lo que se obtuvo una masa de 11.65 kg.



Figura 9. Proceso de llenado del canal con agua. Fuente: Elaboración propia.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO



Figura 10. Masa del canal en estado húmedo. Fuente: Elaboración propia.

Ensayo estimación experimental del coeficiente de Manning

Este ensayo tiene como objetivo determinar experimentalmente el valor del coeficiente de rugosidad de Manning para la madera en estudio, haciendo uso del canal en madera, dos limnímetros y el banco hidráulico **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** El procedimiento consiste en realizar la medición de las alturas hidráulicas con un determinado caudal, con una pendiente conocida, para cual se da una altura específica al canal por medio de accesorios presentes en el laboratorio, en este caso se toman tres muestras cada una con dos pendientes diferentes y dos registros de alturas hidráulicas tanto aguas arriba como aguas abajo.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO



Figura 11. Montaje experimental del ensayo. *Fuente:* Elaboración propia.

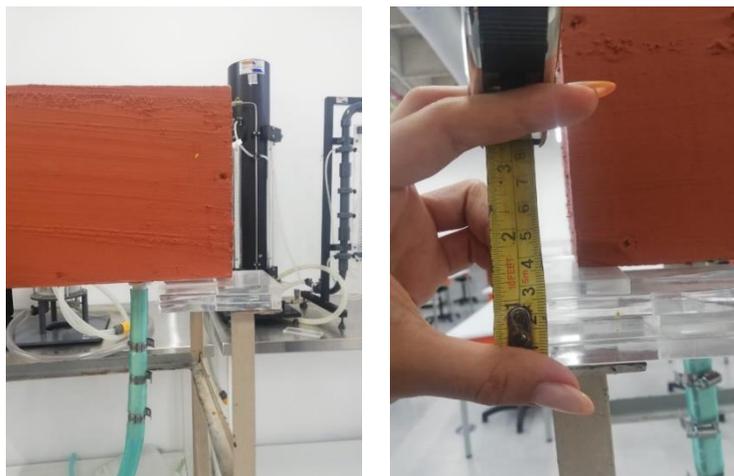


Figura 2. Altura otorgada al canal para definir pendiente. *Fuente:* Elaboración propia.

Conociendo la altura a un extremo del canal es posible calcular la pendiente de este y a su vez es posible calcular los parámetros necesarios para reemplazar en la formulación de Manning, tales como área, velocidad y radio hidráulico, y así posteriormente calcular el valor de n para cada caso.

Tabla 9.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Datos obtenidos en laboratorio muestra 1.

S	Q [m ³ /s]	y ₁ [m]	y ₂ [m]	A ₁ [m ²]	A ₂ [m ²]	V ₁ [m/s]	V ₂ [m/s]	R ₁ [m]	R ₂ [m]	n ₁	n ₂	Promedio
0.0160	0.00043	0.008	0.004	0.002	0.001	0.174	0.349	0.008	0.004	0.028	0.001	0.0163
0.0192		0.008	0.004	0.002	0.001	0.186	0.398	0.007	0.003	0.028	0.008	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10.

Datos obtenidos en laboratorio muestra 2.

S	Q [m ³ /s]	y ₁ [m]	y ₂ [m]	A ₁ [m ²]	A ₂ [m ²]	V ₁ [m/s]	V ₂ [m/s]	R ₁ [m]	R ₂ [m]	n ₁	n ₂	Promedio
0.0160	0.00065	0.010	0.006	0.003	0.002	0.212	0.354	0.009	0.006	0.027	0.002	0.0157
0.0192		0.009	0.005	0.003	0.002	0.236	0.424	0.008	0.005	0.024	0.009	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11.

Datos obtenidos en laboratorio muestra 3.

S	Q [m ³ /s]	y ₁ [m]	y ₂ [m]	A ₁ [m ²]	A ₂ [m ²]	V ₁ [m/s]	V ₂ [m/s]	R ₁ [m]	R ₂ [m]	n ₁	n ₂	Promedio
0.0160	0.00086	0.012	0.007	0.004	0.002	0.235	0.403	0.011	0.007	0.027	0.003	0.0161
0.0192		0.011	0.006	0.003	0.002	0.256	0.470	0.010	0.006	0.026	0.009	

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se realiza el promedio entre los tres valores antes mostrados y teniendo como resultado un valor experimental de 0.016.

Tabla 12.

Valores obtenidos de coeficiente de Manning experimental.

n experimental			
Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
0.0163	0.0157	0.0161	0.0160

Fuente: Elaboración propia.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Análisis de resultados

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observan los resultados obtenidos para la caracterización hidráulica del canal, de esta manera se tiene que los regímenes de flujo para el número de Reynolds son turbulentos y para el número de Froude los valores se encuentran por encima de la profundidad crítica dando lugar a un flujo subcrítico, lo que nos indica que en la trayectoria del flujo las partículas se encuentran de forma desordenada o aleatoria, pero a su vez lleva un recorrido lento.

Al partir del planteamiento de trabajar con un canal artificial de flujo uniforme la rugosidad se obtuvo en función de variables como la profundidad, velocidad y las características de la sección, que en este caso es rectangular. (Fernández de Córdova Webster et al., 2018) afirma “Este coeficiente de resistencia al flujo es muy variable porque depende de una serie factores como la vegetación, irregularidad, obstrucciones, nivel, caudal, régimen de circulación, entre otros”. Por lo que resulta importante la verificación del coeficiente de Manning de forma experimental teniendo en cuenta todas las características propias del material en estudio y las variables que afectan dicho valor, con lo que es posible aproximarnos a un valor más real del coeficiente dentro de su amplia variabilidad.

Así pues, como se puede observar en las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** los valores experimentales del coeficiente de rugosidad de Manning tienen un comportamiento distinto aguas arriba y aguas abajo, por lo que se adaptó el modelo del canal al software HEC- RAS tomando cuatro (4) estaciones con sus respectivas distancias y elevaciones, como se observa en las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.,**

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., conformadas por el punto inicial y final del canal y la ubicación de los dos limnómetros, buscando calibrar el modelo con los valores reales del coeficiente de Manning ajustado a las profundidades hidráulicas medidas en laboratorio.

Para el modelado del canal se tiene en cuenta los datos de la práctica de estimación experimental del coeficiente de Manning para el caudal más alto, contemplados en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

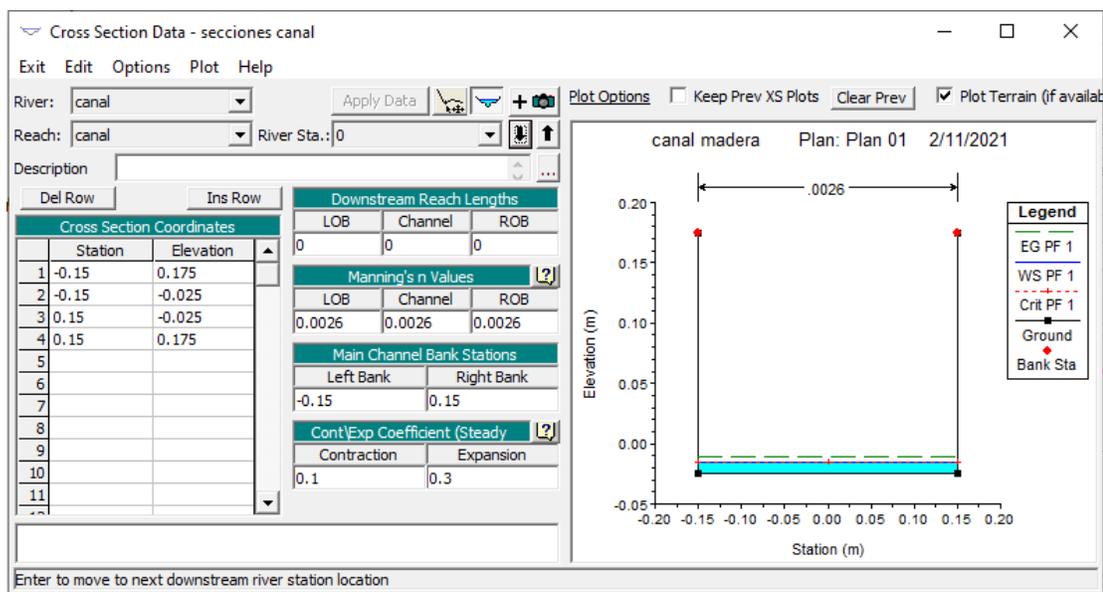


Figura 13. Modelación sección 1, ubicada en 0m del canal. Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS 5.0.7.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

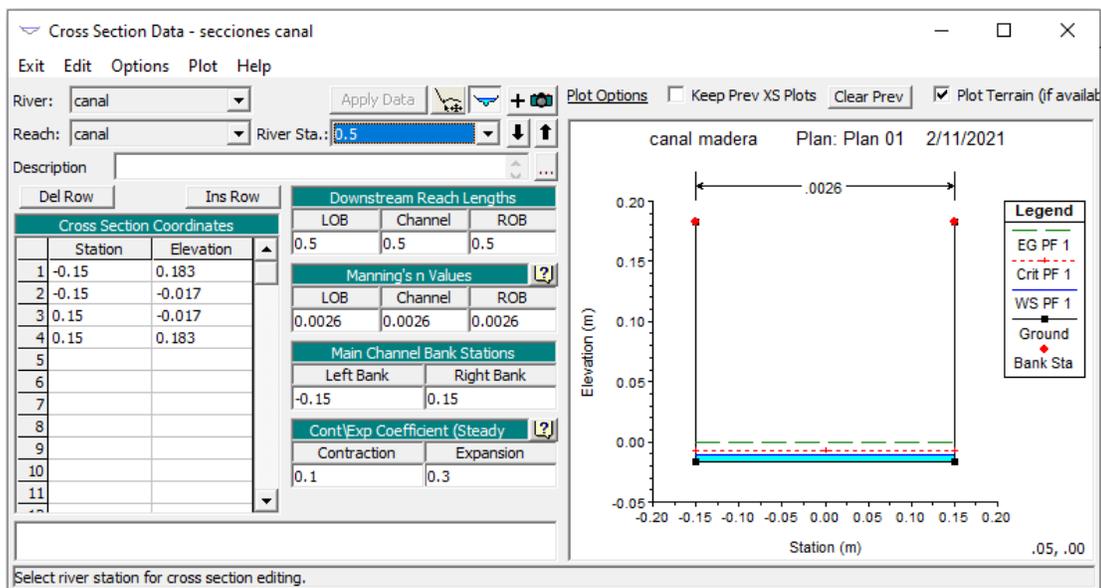


Figura 14. Modelación sección 2, ubicada en 0.5m del canal. Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS 5.0.7.

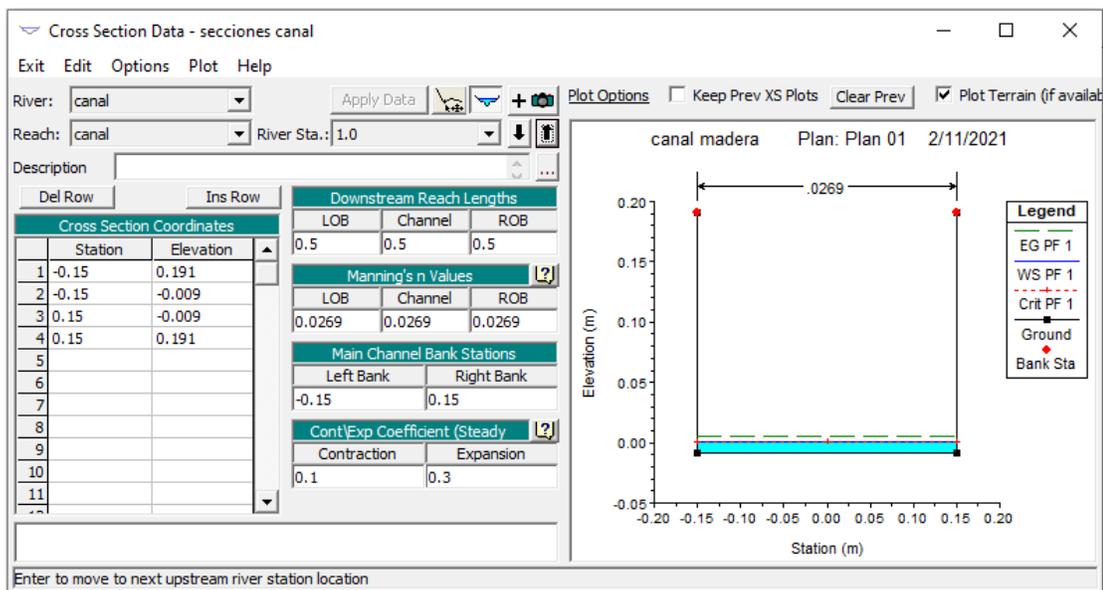


Figura 15. Modelación sección 3, ubicada en 1m del canal. Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS 5.0.7.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

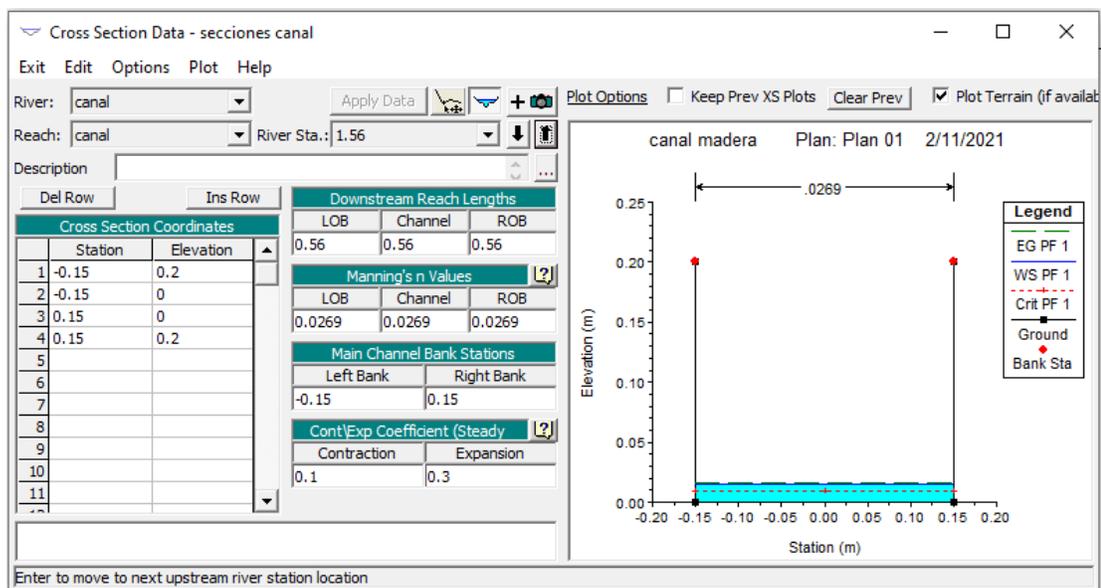


Figura 16. Modelación sección 4, ubicada en 1.56m del canal. Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS

5.0.7.

En la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. se muestran los resultados arrojados por el programa HEC-RAS para el caudal de $0.0008\text{m}^3/\text{s}$ con pendiente de 1.6%, donde se observa que los valores tienen una precisión de dos decimales, es decir, del centímetro, y los datos tomados en laboratorio tienen precisión de milímetro, teniendo en cuenta que el caudal suministrado es bajo. Por lo cual no es posible realizar una comparación entre los valores de profundidad obtenidos, considerando la incertidumbre que existe entre la precisión de los datos que brinda el programa y lo obtenido en la práctica.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

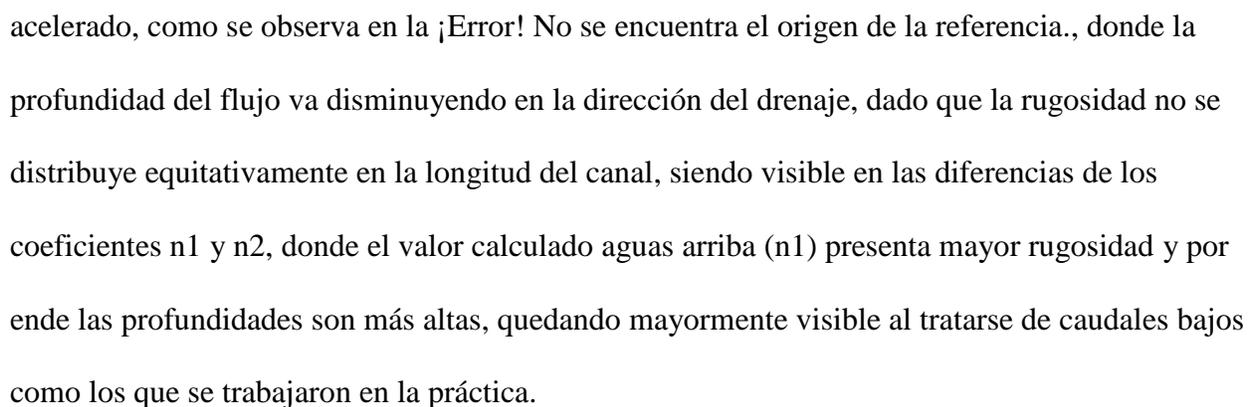
Profile Output Table - Standard Table 1

File Options Std. Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: Plan 01 River: canal Reach: canal Profile: PF 1

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
canal	1.56	PF 1	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.008828	0.20	0.00	0.30	0.52
canal	1	PF 1	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.036425	0.30	0.00	0.30	1.00
canal	0.5	PF 1	0.00	-0.02	-0.01	-0.01	0.00	0.001048	0.43	0.00	0.30	1.68
canal	0	PF 1	0.00	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	0.000340	0.30	0.00	0.30	1.00

Figura 17. Resultados obtenidos condiciones del canal. Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS 5.0.7.

En consecuencia, se evidenció que el perfil representa un flujo gradualmente variado acelerado, como se observa en la  donde la profundidad del flujo va disminuyendo en la dirección del drenaje, dado que la rugosidad no se distribuye equitativamente en la longitud del canal, siendo visible en las diferencias de los coeficientes n_1 y n_2 , donde el valor calculado aguas arriba (n_1) presenta mayor rugosidad y por ende las profundidades son más altas, quedando mayormente visible al tratarse de caudales bajos como los que se trabajaron en la práctica.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

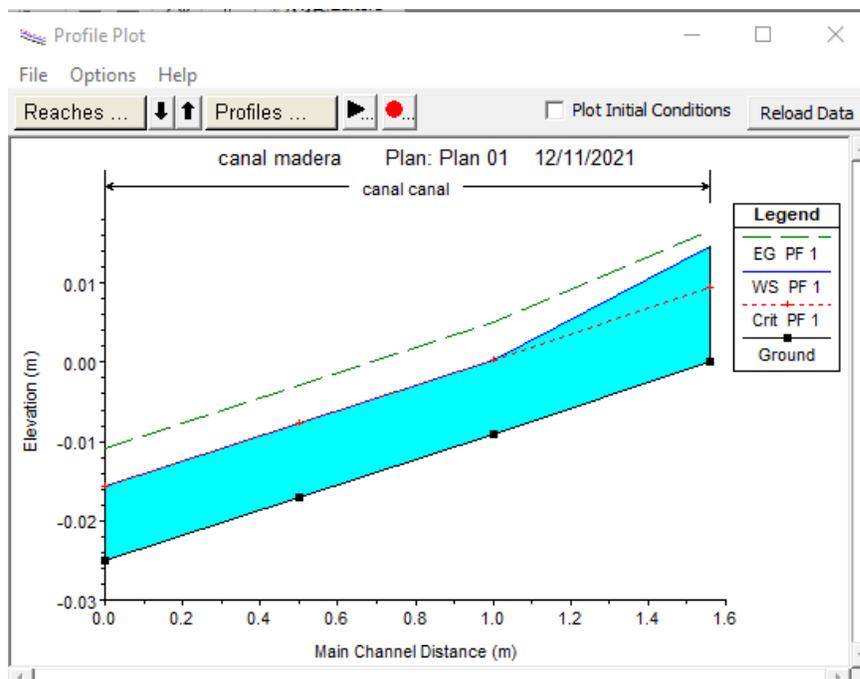


Figura 18. Perfil del canal. Fuente: Elaboración propia, HEC-RAS 5.0.7.

Una de las razones causantes del comportamiento del flujo se le atribuye al hecho de que el canal en cuestión fue realizado a mano con un material natural, por lo que es probable que existan variaciones en la geometría del canal que, aunque no visibles significativas, de igual forma influyen factores como el cepillado o el proceso de pulido de la madera, donde al tener una superficie más pulida la resistencia al flujo es menor, por el contrario, si esta no ha sido mayormente trabajada al encontrarse con gran cantidad de irregularidades u obstrucciones la superficie presenta mayor resistencia, siendo esto un trabajo manual no hay garantía en la uniformidad del acabado del prototipo.

Respecto al comportamiento de la madera durante la realización de los ensayos, expuesta a condiciones principalmente de humedad se tiene que esta puede verse afectada a lo largo del tiempo con alteraciones en su composición normal o deterioro. En este caso se destacan los agentes degradadores abióticos los cuales están relacionados con aspectos atmosféricos como el

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

sol y la lluvia, que a su vez dan paso a la aparición de los agentes bióticos integrados por los organismos vivos que degradan la madera; al ser la madera un material de origen orgánico y natural algunos seres vivos tanto del reino animal como vegetal la usan como fuente de alimentación (Sánchez, 2001).

Con el desarrollo de la práctica de ganancia de masa, el canal ganó 0.9 kg, con lo que se confirma que por la porosidad del material al ser usado por un tiempo prolongado este puede absorber una cantidad significativa de agua, con la humedad alcanzada por el canal se creó un ambiente favorable para la germinación de hongos a lo largo del canal como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, lo cual puede incurrir en la disminución de las propiedades físicas y mecánicas del material, principalmente su rugosidad y esto puede reflejarse en cambios en el comportamiento hidráulico del prototipo que se quiera emplear.



Figura 19. Organismos observados en el canal. *Fuente:* Elaboración propia.

El porcentaje de variación asociado a la ganancia de masa del canal fue de 8.4%, por lo que es importante que al momento de adecuar el prototipo para su funcionamiento se tenga en cuenta la estimación del peso adicional que tendrá al entrar en contacto con el agua.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Conclusiones

Se analizó el comportamiento hidráulico de la madera de especie Caracolí mediante la elaboración de un canal abierto de forma rectangular.

Aunque el canal fue diseñado con las características necesarias para conducir un flujo uniforme, en la práctica se corroboró que este cumplía con un comportamiento de flujo gradualmente variado debido a factores ligados principalmente a las características del canal, de este modo con la práctica se logró mostrar que, por condiciones mínimas, se presentan alteraciones en la profundidad de flujo, siendo mayormente visible al trabajar con valores de flujo bajos como los abordados en este estudio.

De los ensayos de laboratorio realizados se tiene que el comportamiento del material en estudio cuenta con características congruentes con los materiales comerciales usados para la conducción o transporte de fluidos, y que al ser viable la utilización de la madera como medio de conducción de agua podrá ser considerada dentro de las opciones para tal fin, quedando a disposición del usuario la selección del material que desee utilizar al considerar factores como su capacidad adquisitiva, el contexto donde se realice la actividad y la disposición de los recursos para la implementación.

De esta manera, es pertinente destacar la principal ventaja de la investigación, que es el beneficio ambiental que genera la utilización de la madera como alternativa de aprovechamiento sostenible para la conducción, ya que combina tanto el aprovechamiento de un recurso de gran importancia para la subsistencia de los seres vivientes como es el agua, como también la implementación de la madera que al ser un material natural, accesible, renovable y ecológico,

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

disminuye a lo largo de su vida útil la contaminación generada por otros materiales destinados comúnmente a este uso.

En consecuencia, se recomienda dar prioridad a la implementación de esta alternativa siempre y cuando se disponga del recurso, siendo conscientes del impacto positivo generado al disminuir el consumo de materiales no renovables, sin dejar atrás que se debe realizar la tala responsable de la especie a utilizar, esto, tratando de mantener la estructura forestal de un bosque donde el porcentaje de los árboles disponibles en la zona sea mayor que los extraídos.

Por último, dentro de las principales utilidades que se le pueden dar al prototipo en cuestión, está la recolección de aguas lluvias para abastecimiento, lo cual es una opción que en los últimos años ha tenido gran acogida, teniendo en cuenta que las fuentes de abastecimiento se encuentran cada vez más limitadas, y se ha optado dar como solución ambiental captar aguas lluvias en las zonas de consumo, de esta manera la utilización del canal en madera permite el aprovechamiento del recurso hídrico en zonas donde este es escaso y donde es de difícil la consecución de los sistemas de recolección convencionales.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Recomendaciones

Partiendo de la práctica investigativa realizada se plantean propuestas que pueden facilitar la implementación del modelo estudiado, entre las cuales están:

- Impermeabilizar la superficie externa del canal, para evitar filtraciones del fluido a transportar.
- Sellar el canal con un tipo de resina adecuado para madera en la superficie interna de este, para crear una capa de protección que evite el crecimiento de vegetación o microorganismos, garantizando un mejor comportamiento hidráulico y la prolongación de la vida útil del prototipo.
- Seguir las recomendaciones ambientales para la tala responsable de árboles dictadas por las autoridades ambientales regionales, para salvaguardar la conservación de la especie a aprovechar.
- Mantener el canal en condiciones de temperatura controlada evitando someterlo a ambientes que puedan afectar sus propiedades físicas.
- Evitar la exposición ante agentes externos que puedan contaminar la superficie del canal al producir la acumulación de sedimentos que den lugar a la generación de microorganismos.
- Para futuras experiencias, realizar los ensayos o pruebas con caudales más altos, de manera que los datos obtenidos se puedan revisar y sustentar por medio de herramientas de cálculo.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Referencias

- Blanco Flórez, J. (2020). CARACTERIZACIÓN DE LAS 30 ESPECIES FORESTALES maderables más Movilizadas en Colombia provenientes del bosque natural. Bogotá D.C Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Unión Europea.
- Castellanos, Hermes E, Collazos, Carlos A, Farfan, Javier C, & Meléndez-Pertuz, Farid. (2017). Diseño y Construcción de un Canal Hidráulico de Pendiente Variable. Información tecnológica, 28(6), 103-114. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000600012>.
- Castañeda, N. P., & Fernández, D. N. (2010). Propuesta de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia, como alternativa para el ahorro de agua potable, en la institución educativa María Auxiliadora de Caldas, Antioquia. 60.
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). Mecanica de Fluidos. Mc Graw Hill.
- Chow, V. T. (1994). Hidraulica de canales abiertos. McGRAW-HILL.
- Cruz Hernández, C. A. (19 de Mayo de 2019). *Universidad Católica de Colombia*. Obtenido de Universidad Católica de Colombia: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23637/1/TRABAJO%20DE%20GRADO%20N%2040.pdf>
- Fernández de Córdova Webster, C. J., León Méndez, A. J. F., Rodríguez López, Y., Martínez Ramírez, P. G., & Meneses Meneses, D. M. (2018). Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 39(1), 17-31. Recuperado en 10 de octubre de 2021, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000100002&lng=es&tlng=es.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Gaveau, D., 2021. La tala selectiva podría ayudar a proteger los bosques de Indonesia - CIFOR

Forests News. CIFOR Forests News. Recuperado en

<https://forestsnews.cifor.org/22972/la-tala-selectiva-podria-ayudar-a-proteger-los-bosques-de-indonesia?fnl=>

González, B. (2007). La madera en la construcción de entramados inclinados.

https://www.academia.edu/22351898/La_madera_en_la_construccion_de_entramados_inclinados

Hernández Rodríguez, N., Obregón Neira, N., & Torres, A. (2016). Factor Identification of

Categorical Type Related to the Structural Condition of Bogota's Sewage Pipelines

Stemming from Concepts of the Information's Entropy. *Ingeniería Solidaria*, 12(19), 63-

71. <https://doi.org/10.16925/in.v12i19.1194>

Jiang, F., Li, T., Li, Y., Zhang, Y., Gong, A., Dai, J., . . . Hu, L. (2018). Wood-Based

Nanotechnologies toward Sustainability. *ADVANCED MATERIALS*, 1703453.

Kayo, C., & Noda, R. (2018). Climate Change Mitigation Potential of Wood Use in Civil

Engineering in Japan Based on Life-Cycle Assessment. *Sustainability*, 561.

Khatib, J. M. (2016). Sustainability of Construction Materials. En J. M. Khatib, *Sustainability of*

Construction Materials (pág. 129). Cambridge, EE.UU: Woodhead Publishing.

Laboratory, F. P. (2010). *Wood handbook—Wood as an engineering material*. Madison

Wisconsin EE. UU: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products

Laboratory.

López Camacho, R., Sarmiento, C., Espitia, L., Barrero, A. M., Consuegra, C., & Gallego Castillo,

B. (2016). *100 Plantas del Caribe Colombiano. Usar para conservar: aprendiendo de los*

habitantes del bosque seco. Bogotá D.C Colombia: Nadia Rey Cobos Oficina de

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

- Comunicaciones Fondo Patrimonio Natural. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Rene-Lopez-Camacho-2/publication/326882449_100_plantas_del_Caribe_Usar_para_conservar_aprendiendo_de_los_habitantes_del_bosque_seco/links/5b6a274845851546c9f6b5c1/100-plantas-del-Caribe-Usar-para-conservar-aprendiendo-
- Monge Freile, M. F. (2018). *Universidad Nacional Agraria La Molina*. Obtenido de Universidad Nacional Agraria La Molina: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3318>
- Mora, G. A. (2020). Plan de Manejo y Conservación del Caracoli (*Anacardium excelsum* (Bertero ex Kunth) Skeels) en la jurisdicción CAR. Bogotá D.C, Colombia: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR, 2018.
- Mora, G. A. (2017). Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Obtenido de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5b9039167ccba.pdf>
- Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos* (6.a ed.). Pearson. México.
- Ramos, A., (2016). [online] Ferrovial. Available at: <https://www.jmcprl.net/ART%20%20PDF/PRENSAyRED/madera.pdf> [Accessed 10 October 2021].
- Rodríguez, P. (2008). *Hidráulica de canales*.
- Reyes, M. C., & Rubio, J. J. (2014). Descripción de los sistemas de recolección y aprovechamiento de aguas lluvias. Obtenido de Repositorio Universidad Católica de Colombia: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2089/1/Recoleccion-aguas.pdf>
- Saldarriaga, J. (2009). *Hidráulica de tuberías: Abastecimiento de agua, redes, riegos*. Alfaomega.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Sánchez, F. P. (2001). Protección Preventiva de la Madera. AITIM.

Sutorius, M., & Rodríguez, S. (2015). La fundamentalidad del derecho al agua en Colombia.

Revista Derecho del Estado, 35, 243. <https://doi.org/10.18601/01229893.n35.09>

Veliz, M. (s. f.). Estructuras de madera armaduras de madera. Recuperado 21 de julio de 2021, de

https://www.academia.edu/9411635/ESTRUCTURAS_DE_MADERA_ARMADURAS_DE_MADERA

Zainab Nadhum Hadi, Nisren Jasim Hussien Almansori, (2021) Estimation of Manning coefficient

for the section between Al-Hindiya barrage and Al-Kufa barrage utilizing HEC-RAS,

Materials Today: Proceedings, ISSN 2214-7853,

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.417>.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Anexos

Anexo 1. Coeficiente de Manning teórico para madera.

Descripción del canal	n
Vidrio, cobre, plástico u otras superficies lisas	0.010
Acero liso sin pintar, madera plana	0.012
Acero pintado o hierro fundido revestido	0.013
Asfalto liso, arcilla común de revestimiento de drenajes, concreto con acabado, ladrillo vitrificado	0.013
Hierro fundido sin recubrimiento, tubería de hierro negro forjado, arcilla vitrificada para revestir drenajes	0.014
Ladrillo en concreto cementado, concreto flotado con acabado, tubo de concreto	0.015
Concreto colado, sin acabado, tubo de acero en espiral	0.017
Suelo suave	0.018
Suelo limpio excavado	0.022
Dren para avenidas*. de metal corrugado	0.024
Canal natural con piedras y maleza	0.030
Canal natural con vegetación rala	0.050
Canal natural con arbustos grandes y juncos	0.060
Canal natural con vegetación espesa	0.100

Fuente: Tabla 14. 1 Valores de la n de Manning (Mott, 2006, p. 449)

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Anexo 2. Valores para interpolación de densidad y viscosidad cinemática a temperatura de 28°.

Temperatura (°C)	Peso específico γ (kN/m ³)	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad dinámica η (Pa·s)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)
0	9.81	1000	1.75×10^{-3}	1.75×10^{-6}
5	9.81	1000	1.52×10^{-3}	1.52×10^{-6}
10	9.81	1000	1.30×10^{-3}	1.30×10^{-6}
15	9.81	1000	1.15×10^{-3}	1.15×10^{-6}
20	9.79	998	1.02×10^{-3}	1.02×10^{-6}
25	9.78	997	8.91×10^{-4}	8.94×10^{-7}
30	9.77	996	8.00×10^{-4}	8.03×10^{-7}
35	9.75	994	7.18×10^{-4}	7.22×10^{-7}
40	9.73	992	6.51×10^{-4}	6.56×10^{-7}
45	9.71	990	5.94×10^{-4}	6.00×10^{-7}
50	9.69	988	5.41×10^{-4}	5.48×10^{-7}
55	9.67	986	4.98×10^{-4}	5.05×10^{-7}
60	9.65	984	4.60×10^{-4}	4.67×10^{-7}
65	9.62	981	4.31×10^{-4}	4.39×10^{-7}
70	9.59	978	4.02×10^{-4}	4.11×10^{-7}
75	9.56	975	3.73×10^{-4}	3.83×10^{-7}
80	9.53	971	3.50×10^{-4}	3.60×10^{-7}
85	9.50	968	3.30×10^{-4}	3.41×10^{-7}
90	9.47	965	3.11×10^{-4}	3.22×10^{-7}
95	9.44	962	2.92×10^{-4}	3.04×10^{-7}
100	9.40	958	2.82×10^{-4}	2.94×10^{-7}

Fuente: Tabla A.1 Propiedades del agua en unidades del SI. (Mott, 2006, p. 589)