

EVALUACIÓN HIDRÁULICA DEL FUNCIONAMIENTO DE LAS COMPUERTAS
USADAS EN EL CANAL DE PANAMÁ PARA ADAPTARLAS EN EL SISTEMA
FLUVIAL DEL CANAL DEL DIQUE

CHRISTIAN MAURICIO SILVA VARGAS
JHONATAN ALBERTO PULIDO PRADA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
ALTERNATIVA VISITA TÉCNICA INTERNACIONAL
BOGOTÁ D.C.
2017

EVALUACIÓN HIDRÁULICA DEL FUNCIONAMIENTO DE LAS COMPUERTAS
USADAS EN EL CANAL DE PANAMÁ PARA ADAPTARLAS EN EL SISTEMA
FLUVIAL DEL CANAL DEL DIQUE

CHRISTIAN MAURICIO SILVA VARGAS
JHONATAN ALBERTO PULIDO PRADA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR
ING. HENRY ALBERTO CÓRDOBA ROMERO MSC

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
ALTERNATIVA VISITA TÉCNICA INTERNACIONAL
BOGOTÁ D.C.

2017



Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Compartir bajo la Misma Licencia — Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, quien nos ha guiado en todo momento; a nuestras familias por su apoyo durante todo este recorrido; a la Universidad Católica de Colombia y maestros que con dedicación y empeño impartieron su conocimiento; a los que guiaron la realización de este proyecto, especialmente el ingeniero Felipe Santamaría, pues su ayuda fue vital desde el inicio.

A la Autoridad del Canal de Panamá, pues abrieron sus puertas como invitados de honor dentro de las instalaciones del canal; a la Sociedad Colombiana de Ingenieros y el Fondo Adaptación por brindarnos la información que requerimos para desarrollar este proyecto.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
1. GENERALIDADES	10
1.1 ANTECEDENTES.....	10
1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	11
1.3 OBJETIVOS	12
1.3.1 Objetivo general	12
1.3.2 Objetivos específicos.....	12
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	12
1.5 DELIMITACIÓN	13
1.6 MARCO DE REFERENCIA	13
1.6.1 Marco teórico.....	13
1.6.1.1 Funcionamiento y finalidad de las esclusas	13
1.6.1.2 Estado de flujo.....	15
1.6.1.3 Compuertas	16
1.6.2 Marco conceptual	19
1.6.3 Marco histórico	21
1.7 METODOLOGÍA.....	22
2. VISITA TÉCNICA A PANAMÁ	24
2.1 ESCLUSAS DE MIRAFLORES	24
2.2 ESCLUSAS DE COCOLÍ.....	26
3. RECOLECCIÓN DE DATOS SOBRE EL CANAL DEL DIQUE	29
3.1 LA ZONA DEL PROYECTO	29
3.2 ESTADO ACTUAL DEL PROYECTO CANAL DEL DIQUE.....	30
3.2.1 Fase I, obras preliminares Fondo Adaptación	30
3.2.2 Fase II, obras principales Fondo Adaptación	31
4. CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA LA ADAPTACIÓN DE LAS COMPUERTAS PANAMEÑAS EN CALAMAR	34
4.1 TIPO DE COMPUERTA.....	34
4.2 CONDICIONES HIDRÁULICAS EN EL CANAL DEL DIQUE	34

5. DIMENSIONAMIENTO DE LA COMPUERTA EN LA ESCLUSA DE CALAMAR	36
5.1. RÉGIMEN HIDRÁULICO	37
5.1.1 Número de Froude	37
5.1.2 Número de Reynolds.....	37
5.2 VALOR DE LAS CARGAS ACTUANTES SOBRE LA COMPUERTA	38
5.2.1 Caso 1	38
5.2.2 Caso 2	40
5.3 DETERMINACIÓN DEL PESO DE LAS COMPUERTAS.....	41
5.4 DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE LA COMPUERTA	42
5.4.1 Espesor mínimo	42
5.4.2 Espesor definitivo de la compuerta	43
6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	45
6.1 HIDRÁULICA DE LA ESCLUSA Y TIEMPO DE LLENADO	45
6.1.1 Caso I – Nivel máximo del río y nivel del canal óptimo.....	45
6.1.2 Caso II – Nivel mínimo navegable del río y del canal	47
7. CONCLUSIONES	49
8. RECOMENDACIONES.....	51
BIBLIOGRAFÍA.....	52
ANEXO 1. VISTA EN PLANTA DE LA ESCLUSA EN CALAMAR	55
ANEXO 2. SISTEMA DE ALCANTARILLAS PARA EL LLENADO Y VACIADO DE LA ESCLUSA.....	57

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: ¿Cómo funcionan las esclusas del Canal de Panamá?.....	14
Ilustración 2: ¿Cómo funcionan las esclusas del Canal de Panamá?.....	14
Ilustración 3: Ejemplo de compuerta rodante.....	17
Ilustración 4: Compuerta tipo esclusa, vista de planta.....	18
Ilustración 5: Ubicación esclusas de Miraflores	24
Ilustración 6: Ubicación esclusas de Cocolí.....	26
Ilustración 7: Ubicación de las esclusas	28
Ilustración 8: Ubicación del proyecto	29
Ilustración 9: Descripción actual de la zona a intervenir en Calamar.....	30
Ilustración 10: Solución del Fondo Adaptación	31
Ilustración 11: Convoy de diseño	32
Ilustración 12: Niveles mensuales del Río Magdalena en Calamar	35
Ilustración 13: Sección transversal del Canal del Dique	36
Ilustración 14: Simulación Caso 1.....	39
Ilustración 15: Simulación caso 2.....	40
Ilustración 16: Corte del dimensionamiento de la compuerta	44

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Comparación histórica del Canal del Dique y el Canal de Panamá	21
Tabla 2: Cálculo del diámetro de las tuberías	46

INTRODUCCIÓN

Desde su construcción, el Canal del Dique en Colombia ha sido de gran importancia para el desarrollo económico de Cartagena y de las poblaciones que atraviesa, ya que conecta estos asentamientos con el Río Magdalena, que a su vez los comunica con el interior del país. Con más de cinco siglos de historia, actualmente el canal genera más problemas que beneficios, debido a que no cuenta con un control de caudal y sedimentos en el sistema. Esto produce inundaciones en las poblaciones que atraviesa y contribuye a la contaminación producida en su desembocadura en las bahías de Cartagena y Barbacoas¹.

El gobierno colombiano adelanta obras de restauración del canal que contemplan dos fases. En la primera, se busca rectificar las orillas, construir diques en las poblaciones aledañas y reparar los que están deteriorados. En su segunda fase de construcción, se incluyen esclusas para mantener la navegabilidad en el sector, compuertas para el control de caudal y de ingreso de sedimentos al sistema, y también un paso de peces.

La segunda fase es de gran importancia, puesto que mantiene los principales ejes económicos del sector como la pesca y la navegabilidad en el canal; se evitan problemas de inundaciones en altas temporadas de lluvias, y se evitan problemas ambientales por el ingreso de sedimentos al sistema y directamente a las Bahías de Cartagena y Barbacoas.

Considerando lo anterior, surgen ideas de cómo adaptar tecnología que se ha visto funciona en otros países y, a partir de una visita técnica a la Ciudad de Panamá, se generó la pregunta si las compuertas utilizadas en su canal, un paso interoceánico tan importante a nivel mundial, se pueden adaptar en la propuesta que el Fondo Adaptación propone para mantener la navegación en el sector mediante un juego de esclusas. Este estudio revisa las compuertas panameñas, y se concentra en el diseño para su implementación en las esclusas del Canal del Dique en Colombia.

¹ AGUILERA Díaz, María M. El Canal Del Dique Y Su Subregión: Una Economía Basada En La Riqueza Hídrica. Banco De La República, 2006. Disponible en: http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/DTSER-72_%28VE%29.pdf.

1. GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Los aspectos a revisar para realizar este estudio están ligados con la historia del Canal del Dique, indicar su importancia y la razón por la que fue construido; además su estado de navegabilidad para contextualizar este estudio.

Históricamente, el Canal del Dique ha sido un importante corredor fluvial artificial colombiano, que conecta la ciudad de Cartagena con el Río Magdalena. Su construcción se remonta al siglo XVI, cuando el gobernador de la ciudad permitió la construcción de un camino que comunicara varios caños que terminaban alimentándose del río². Su importancia en aquel entonces estaba dada por la necesidad de mantener a Cartagena con un perfil portuario, así como Santa Marta y Barranquilla. El canal era la mejor solución, porque el transporte terrestre era complejo por las pocas vías que conectaban las costas con el interior del país, y no existía una ruta fluvial que conectara esta ciudad con el interior del país. A través de su historia, el canal ha tenido múltiples intervenciones de mantenimiento.

En el siglo XX, tuvo tres obras de rectificación en sus orillas y ampliaciones transversales³ las cuales permitieron su recuperación, ya que, al ingresar sedimentos al sistema, se generaba una acumulación de materiales que disminuían la eficiencia porque el área transversal era menor y los barcos más grandes no podían transitar. Actualmente su funcionamiento genera problemas de inundaciones en las zonas vecinas y contaminación en las bahías de Cartagena y Barbacoas, al no existir un elemento de control que regule el caudal cuando hay crecientes en el río.

El Fondo Adaptación optó por una solución que incluye esclusas y compuertas que permiten el control del caudal que entra al canal, y al mismo tiempo mantener la navegabilidad y la migración de peces. En ese caso, al usar esclusas, dicho sistema permitirá la entrada y salida de embarcaciones para mantener el comercio y el servicio de navegabilidad en el sector.

² Gustavo A. Bell Lemus. El Canal del Dique 1810-1840: El viacrucis de Cartagena, Boletín Cultural y Bibliográfico, Número 21, Volumen XXVI, 1989. En Disponible en: https://publicaciones.banrepcultural.org/index.php/boletin_cultural/article/view/2585/2662. [Fecha de consulta: 03 junio 2017]

³ El Canal Del Dique – Un Gran Reto De Nación. [Videograbación]. Fundación Mario Santo Domingo, 2012. (7:17 min.). Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=H54IQLgBRoM>

Para describir la situación actual en el Canal del Dique, en cuanto a navegabilidad, es necesario categorizar el tipo de uso que se le hace. En primer lugar, está el tipo de uso de navegación de carga, y es la que se hace para transportar mercancía, materias primas y demás materiales con fines comerciales. Luego está la navegación doméstica, la cual está enfocada a actividades de pesca y transporte. Ambas son importantes tanto social como económicamente, puesto que, la economía de un país se afecta por el uso de este tipo de transporte.

1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El Canal del Dique es indudablemente una importante ruta fluvial de 113 kilómetros desde su nacimiento en Calamar hasta su desembocadura en la Bahía de Cartagena, comunicándola con el Río Magdalena. Sus aguas abastecen acueductos y sirven como distritos de riego para las ciénagas aledañas. Los diversos usos que se le da son de gran importancia económica, social y ecológica⁴.

Sin embargo, en la actualidad el canal ha presentado grandes problemas estructurales al no contar con una regulación de caudal y entrada de sedimentos, lo que afecta la comunidad y deteriora el medio ambiente, puesto que en la desembocadura del canal se presenta contaminación. Dicha problemática se debe a que el Río Magdalena transporta sedimentos y contaminantes de las ciudades por las que atraviesa, y al no existir un control a su entrada, estos sedimentos llegan y transcurren con facilidad a través del canal hasta su desembocadura en la bahía de Cartagena y Barbacoas. Este problema se da ya que, al no tener curvas durante su recorrido, el agua fluye más rápido y no tiene tiempo para que los materiales contaminantes se sedimenten antes de llegar a la desembocadura.

Adicional a eso, en 2010 la problemática del canal generó un gran desastre, ya que el agua se desbordó a causa de las altas lluvias que se presentaron a partir del fenómeno de La Niña (temporada de altas lluvias en la zona tropical⁵), inundando las poblaciones aledañas a su cauce. A partir de esta tragedia, el Gobierno Nacional destinó 1 billón de pesos mediante el Fondo Adaptación⁶ para

⁴ AGUILERA Díaz, María M. El Canal Del Dique Y Su Subregión: Una Economía Basada En La Riqueza Hídrica. Banco De La República, 2006. Disponible en: http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/DTSER-72_%28VE%29.pdf. [Fecha de consulta: 05 junio 2017]

⁵ Disponible en: <https://www.elheraldo.co/local/el-fantasma-de-la-nina-vuelve-amenazar-la-region-caribe-262052>. [Fecha de consulta: 03 junio 2017]

⁶ Disponible en: <http://www.portafolio.co/economia/finanzas/gobierno-invertira-billon-pesos-canal-dique-102974>. [Fecha de consulta: 03 junio 2017]

desarrollar obras que mitiguen los daños causados por el canal, y que permitan mantener en funcionamiento este paso fluvial. Esto es de gran importancia económica para las poblaciones asentadas que atraviesa, puesto que el desarrollo industrial, agropecuario y consumo humano dependen del canal. Dichas obras incluyen, entre diferentes aspectos (regulación de caudal, garantizar paso de peces, paso de buques), un juego de esclusas que permiten la navegabilidad en el canal.

La importancia de mantener la navegabilidad en el Canal del Dique está ligada desde su construcción, con la necesidad de mantener a Cartagena como puerto de comercio, así como Santa Marta y Barranquilla. Al construir esclusas (que contienen las compuertas a adaptar en este estudio), se garantiza dicha necesidad. Un medio fluvial es una alternativa de transporte muy importante para el comercio, puesto que es necesario para una nación el hacer uso de sus rutas fluviales, pues al no hacerlo afecta negativamente su economía.

Teniendo en cuenta lo anterior, el interrogante principal de este proyecto de grado es: ¿Se puede adaptar el sistema hidráulico de compuertas utilizadas en el canal de Panamá en las esclusas del Canal del Dique en Colombia para mantener la navegabilidad?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento hidráulico de las compuertas existentes en el Canal de Panamá para escoger la mejor opción técnica para adaptarlas a las esclusas en el Canal del Dique en Colombia.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar la visita técnica al Canal de Panamá para recolectar los datos que permitan conocer el tipo y funcionamiento de las compuertas.
- Estudiar la solución que el gobierno colombiano está dando para la restauración del Canal del Dique, mediante la construcción de esclusas que permiten la navegabilidad en el sector.
- Verificar la adaptación técnica de las compuertas del Canal de Panamá en las esclusas del Canal del Dique.

1.4 JUSTIFICACIÓN

La Universidad Católica de Colombia ofrece la opción de Visita Técnica

Internacional como alternativa de trabajo de grado. La razón de ello es para que los estudiantes al visitar otro país y conocer nuevos métodos de construcción, mega obras de ingeniería y nuevas tecnologías en el sector, presenten un proyecto donde se adapte lo visto en ese lugar a una solución para una problemática en Colombia.

Dicha visita y razón de esta monografía, se realizó en Panamá desde el 31 de julio hasta el 7 de agosto de 2017, en donde se tuvo la oportunidad de, entre varios sitios (académicos, turísticos y técnicos), visitar el Canal de Panamá en sus esclusas de Miraflores y Cocolí. Con dicha visita, se generó la pregunta de este trabajo de grado, la cual estudia las compuertas utilizadas para las esclusas allí, verificando si funcionarían en la propuesta que el Fondo Adaptación propone para mantener la navegabilidad en el sector por medio de esclusas.

Este proyecto permitirá hacer un análisis hidráulico de las compuertas y una adaptación e implementación, donde se aplican tecnologías vistas en otro país para la solución de problemas en Colombia.

1.5 DELIMITACIÓN

Esta monografía contiene el estudio hidráulico de las compuertas del Canal de Panamá y su inclusión en el Canal del Dique en Colombia para mantener la navegabilidad en ese sector por medio de un juego de esclusas. Para ello, se realiza una visita técnica a Panamá para conocer el funcionamiento de sus compuertas (esclusas de Miraflores y Cocolí), y evaluar la mejor opción técnica entre ambas para su adaptación a la propuesta del Fondo Adaptación en el Canal del Dique. Dicho estudio contiene la verificación técnica que permite la adaptación de las compuertas panameñas en la esclusa ubicada en Calamar. Se entrega una evaluación donde se encuentran las dimensiones de la compuerta, teniendo en cuenta las condiciones hídricas (caudal y niveles históricos) del Río Magdalena a la altura de Calamar; y el tipo de compuertas vistas en Panamá, en la visita realizada del 31 de julio al 7 de agosto de 2017.

1.6 MARCO DE REFERENCIA

1.6.1 Marco teórico

1.6.1.1 Funcionamiento y finalidad de las esclusas

Las esclusas tienen una finalidad de adaptar a un nivel los barcos. En la ilustración 1 se muestra cómo son utilizadas en el Canal de Panamá para subir un barco

desde el nivel del Océano Atlántico hasta el Lago Gatún.

En este caso, se requieren de tres esclusas para subir el barco. Al ingresar desde el Océano Atlántico, las primeras compuertas se abren y dan paso al barco que, después de ingresar, se cierran detrás de él. El proceso se repite hasta llegar a la tercera esclusa, en donde las compuertas frontales se abren y dan paso al barco al lago Gatún. Allí el barco correrá libre hasta el siguiente juego de esclusas. El lago Gatún se encuentra a 26 metros sobre el nivel del mar, y es la distancia que el barco es subido por medio del sistema.

Ilustración 1: ¿Cómo funcionan las esclusas del Canal de Panamá?



Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=rzac7mQUOzc>

Ilustración 2: ¿Cómo funcionan las esclusas del Canal de Panamá?



Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=rzac7mQUOzc>

En la ilustración 2 se muestra cómo el barco ha pasado el Lago Gatún para empezar a descender y atravesar el lago Miraflores y lo hace por medio de las esclusas de Pedro Miguel. Las esclusas, en este caso, en vez de ser llenas de agua para que el barco suba, son vaciadas para que el barco pueda descender. Hace su recorrido por el lago hasta las esclusas de Miraflores, en donde hay dos

esclusas continuas, el barco desciende hasta el nivel del Océano Pacífico.

1.6.1.2 Estado de flujo

En un canal, el estado del flujo está gobernado por la viscosidad y la gravedad en función de las fuerzas inerciales del flujo⁷.

- **Efecto de Viscosidad**

A causa de la viscosidad del fluido, el flujo puede ser laminar, en transición o turbulento. Es Flujo laminar si las fuerzas viscosas son mayores a las fuerzas inerciales. Es Flujo turbulento, si las fuerzas inerciales son mayores a las fuerzas viscosas. Existe una zona intermedia entre ambos flujos y es denominado como Flujo transicional. La determinación del tipo de flujo está dada por el número de Reynolds que se describe en la fórmula 1.

Fórmula 1. Número de Reynolds

$$Re = \frac{V * L}{\nu}$$

Donde:

Re: Número de Reynolds

V: Velocidad del flujo

L: Longitud del canal

ν: Viscosidad cinemática del fluido

En general, $500 < Re < 4500$ indica la condición de flujo en transición; cuando es menor a 500 se le denomina laminar, y mayor a 4500 se le considera como flujo turbulento.

- **Efecto de la gravedad**

Este parámetro está dado por la relación de las fuerzas inerciales y gravitacionales, mediante el número de Froude, que se define en la fórmula 2.

⁷ CHOW, Ven Te. Hidráulica de Canales Abiertos. Bogotá. McGraw Hill. 2004. 7 p

Fórmula 2. Numero de Froude.

$$F = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Donde:

F: Número de Froude

V: Velocidad media del flujo

L: Longitud del canal

g: Gravedad

Cuando F es igual a 1 ($F = 1$), el flujo es Crítico; si es menor a 1 ($F < 1$), el flujo es Subcrítico; y si F es mayor a 1 ($F > 1$), el flujo se denomina como Supercrítico.

En un canal abierto, la combinación de la gravedad y la viscosidad pueden generar los siguientes regímenes de flujo:

- a. Subcrítico laminar. Cuando $F < 1$, y el flujo es laminar.
- b. Supercrítico laminar. Cuando $F > 1$, y el flujo es laminar.
- c. Supercrítico turbulento. Cuando $F > 1$, y el flujo es turbulento.
- d. Subcrítico turbulento. Cuando $F < 1$, y el flujo es turbulento.

1.6.1.3 Compuertas

Se denomina como un elemento estructural generalmente metálico, que permite regular el paso de caudal en un canal abierto mediante el control de la abertura de la misma. En la mayoría de los casos, se puede apreciar su movimiento a simple vista al ubicarse en canalizaciones abiertas. Pero también se pueden dar compuertas sumergibles bajo la superficie libre como es el caso de los piques intermedios de túneles de aducción o en las salidas de túneles a presión.

- **Tipos de compuertas**

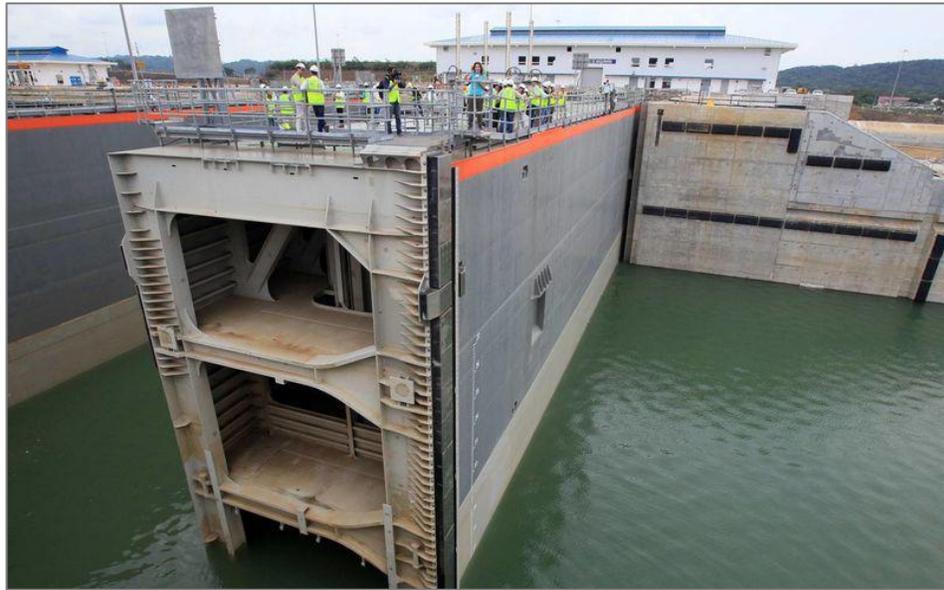
Existen diversos tipos de compuertas, que dependiendo del tipo de uso que se le quiera dar, sus funciones varían según su tipo. Las compuertas que competen este estudio son las vistas en el Canal de Panamá y son las rodantes en el caso de las esclusas de Cocolí, o canal ampliado; y las compuertas tipo esclusa, vistas en las esclusas de Miraflores o canal antiguo.

- **Compuerta Rodante**

También conocidas como Vagón, son empleadas para soportar altas cargas hidráulicas (superiores a 100 metros columna de agua) y casos donde se tienen

grandes vanos por cubrir. Dentro de su estructura poseen ruedas que facilitan su desplazamiento, lo que reduce la fricción y por tanto la potencia requerida por los motores.

Ilustración 3: Ejemplo de compuerta rodante



Disponible en: <http://sipse.com/mundo/el-complicado-recorrido-de-la-ampliacion-del-canal-de-panama-210049.html>

Su objetivo principal es bloquear conductos o regular caudales y se emplea principalmente en:

- Plantas de Rebombéo
- Centrales Hidroeléctricas
- Presas
- Colectores pluviales
- Túneles de cierre para presas
- Canales donde se requiera soportar altas cargas hidráulicas

Algunas ventajas que presenta por su uso son:

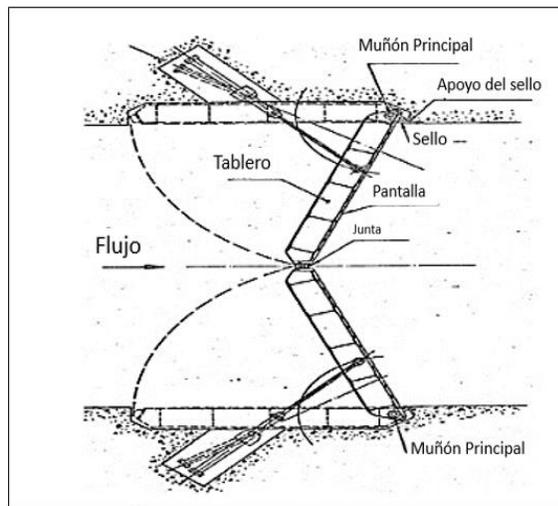
- Por la manera en que es diseñada se considera como una especie de dique seco, lo que permite realizar un mantenimiento sin necesidad de retirarla.
- No requiere de pausar las operaciones para realizar un mantenimiento y los tiempos para realizar dicha tarea son cortos.

- Presenta hermetismo en sentido del flujo o en contra, es decir, que no presenta filtración del fluido que esté conteniendo. En ese sentido, la tolerancia de fuga de 0.3 lps por metro lineal de sello, lo cual no representa una fuga grande o exagerada.

○ **Compuerta Tipo Esclusa**

Es una estructura que se divide a la mitad del ancho que se quiere obstaculizar, la cual forma una especie de V al momento de cerrarlas. Dentro de su estructura posee bisagras que se accionan por medios mecánicos o pistones, con el fin de elevar la lámina de agua para permitir el paso de embarcaciones que se encuentran en diferentes niveles. Dentro de sus desventajas sobresale que su tiempo de operación tanto de apertura como cierre es largo y solo pueden ser abiertas cuando los niveles a cada lado de la compuerta tengan una diferencia de pocos centímetros.

Ilustración 4: Compuerta tipo esclusa, vista de planta



Disponible en: <https://es.slideshare.net/ingtirzos/calculo-de-compuerta-radial>

1.6.1.4 Diseño de tuberías simples con altas pérdidas menores

En el año 1989, Saldarriaga y Ferrer desarrollaron un método de cálculo que permite tener en cuenta sistemas con altas pérdidas menores, el cual consiste en definir una “velocidad de pérdida (V_P)” que permita la igualación de la sumatoria de las pérdidas menores y la cabeza piezométrica disponible en el sistema. De acuerdo con esto, se establecen las siguientes ecuaciones:

$$\Sigma hm = H$$

Además,

$$\Sigma hm = (\Sigma Km) \frac{V^2}{2g}$$

Donde Σhm es la sumatoria de los coeficientes de pérdidas por cada uno de los accesorios que se tenga en el sistema.

Mediante las dos ecuaciones anteriores se obtiene el siguiente resultado para la “velocidad de pérdida”:

$$\frac{Vp^2}{2g} = \frac{H}{\Sigma hm}$$

Si se despeja V_p en esta última ecuación se llega a:

$$Vp^2 = \frac{2gH}{\Sigma hm}$$

$$Vp = \sqrt{\frac{2gH}{\Sigma hm}}$$

En caso de que en alguna de las iteraciones V_i es mayor a la V_p , significa que la velocidad V_i implica pérdidas menores superiores a la cabeza piezométrica disponible, lo que es físicamente imposible. Al ocurrir esto, se debe limitar la cabeza piezométrica disponible para ser pérdida por fricción durante el recorrido.

Para realizar el diseño de tuberías simples con altas pérdidas menores, el libro de Hidráulica de Tuberías de Juan Saldarriaga se explica el procedimiento para determinar el diámetro de tubería para una tubería simple cuando se da el caso de las altas pérdidas menores. Allí presenta un diagrama de flujo que permite demostrar el proceso de convergencia para determinar el diámetro de este sistema.

1.6.2 Marco conceptual

En este estudio, se realiza una verificación de la adaptación de las compuertas del Canal de Panamá en el sistema fluvial del Canal del Dique en Colombia para mantener la navegabilidad en el sector. Por ello, se indaga en el concepto de los canales, los cuales son conductos abiertos o cerrados en los cuales transcurre agua debido a la acción de la gravedad (en flujo libre), lo cual quiere decir que el agua fluye impulsada por la presión atmosférica y su propio peso.

De acuerdo con su origen los canales pueden clasificarse en naturales o artificiales⁸. Los canales naturales son todos aquellos senderos que existen de manera natural por donde transita el agua, generalmente estos canales naturales tienen una forma irregular y variable durante su recorrido, lo mismo que su alineación y características de los lechos, mientras que los canales artificiales son todos aquellos construidos o desarrollados mediante la implementación de la mano del hombre. Debido a esto, las secciones transversales de los canales pueden tener formas comunes como trapecios, rectángulos, triángulos o círculos.

Los elementos geométricos son propiedades de la sección de un canal que pueden ser definidos por la geometría de la sección y la profundidad del flujo. Estos elementos son considerados importantes ya que se emplean en el cálculo del régimen hidráulico, el cual está caracterizado por el estado del flujo (*Numero de Reynolds*) y efecto de la gravedad en el fluido (*Numero de Froude*).

Dentro de las aplicaciones que tienen los canales artificiales se encuentra la navegabilidad, ya que por medio de estos se pueden transportar diferentes tipos de cargas. La economía de un país se ve afectada al hacer uso de estos, ya que el transporte desde los puertos y las zonas costeras al centro del país representan un factor relevante de importancia en el tema de importaciones.

En algunos canales de navegación se emplean esclusas, esto con el fin de permitirle a una embarcación ir de un nivel a otro (subir o bajar) dependiendo del caso y dirección que vaya el navío, puesto que en esos canales es necesario superar altitudes entre aguas para la navegación. Dentro de los elementos que componen las esclusas se encuentran las compuertas, las cuales son los elementos más importantes de toda la esclusa.

Existen diferentes tipos de compuertas, la sección de estas depende de la presión hidrostática al cual serán sometidas⁹, espacio donde se ubicará la esclusa, recurso económico o simplemente el criterio del diseñador. Para calcular la presión a cuál será sometida la compuerta se ha de tener en cuenta los niveles del

⁸ CHOW, Ven Te. Hidráulica de Canales Abiertos. Bogotá. McGraw Hill. 2004. p 20.

⁹ FLUIDOS. Compuertas. Disponible en: <http://fluidos.eia.edu.co/obrashidraulicas/articulos/compuertas/compuertas.html>. [Fecha de consulta: 25 de octubre del 2017]

agua en el interior y exterior de la esclusa, con ello se determinará el espesor y material que compone la misma.

1.6.3 Marco histórico

Tabla 1: Comparación histórica del Canal del Dique y el Canal de Panamá

	CANAL DEL DIQUE (COLOMBIA)		CANAL DE PANAMÁ (PANAMÁ)	
	AÑO	HECHO IMPORTANTE	AÑO	HECHO IMPORTANTE
Siglo XVI	1571	Gobernador de la ciudad de Cartagena concede el aval para la construcción de un camino que comunicara varios caños que terminaban alimentándose del río. El canal entra en un periodo de innumerables pleitos legales entre el Cabildo de la ciudad, el gobernador y varios súbditos de la corona con el fin de evitar el inicio de las obras.	1513	Surge la idea de excavar un paso de agua a través del istmo de Panamá para unir los océanos Atlántico y Pacífico. Se propusieron varias rutas por los nativos que fueron rápidamente abandonadas debido a que los problemas geotécnicos e hidráulicos.
Siglo XIX	1836	El concejo municipal de Cartagena solicita al Congreso de poder transferir los derechos sobre la vía a cualquier compañía privada que se interese por hacerse cargo de la misma.	1876	En Francia el científico alemán Alexander von Humboldt junto con un comité genera estudios exploratorios para establecer una posible ruta del Canal de Panamá a nivel.
			1881	Empieza la construcción del Canal de Panamá, obra que quedó inconclusa debido a la falta de planeación, agotamiento de recursos y miles de obreros muertos a causa de la fiebre amarilla y malaria. Como consecuencia de esto, se decide ceder los derechos de explotación y control del Canal al gobierno de Estados Unidos con el fin de obtener un apoyo financiero.
Siglo XX	1984	Se removieron cerca de 220 curvas naturales del canal que provocaban sedimentación, disminución de la velocidad del agua y permitían regular el caudal del canal para convertirlo en una ruta fácil de navegar. Haciendo	1903	Se crea la nueva República de Panamá como resultado de la independencia de Colombia, la cual es reconocida por el congreso de Estados Unidos e inicia acuerdos sobre el control y financiación para la construcción del Canal.

Siglo XX	1984	que el rio transporte más sedimentos que afectan sistemas ecológicos frágiles como son las ciénagas y los corales en la bahía de Cartagena.	1914	Se inaugura el Canal de Panamá, obra completada por Estados Unidos, con ello deja de existir la Comisión del Canal de Panamá y se cede la administración a la Autoridad del Canal de Panamá.
Siglo XXI	2005	La bahía de Cartagena según el CIOH tiene una proa sedimentaria que puede cortarla en dos, esto como producto del ingreso en promedio entre dos y tres millones y medio de metros cúbicos de sedimentos anualmente.	2006	Se presenta la propuesta de Ampliación del Canal a través de la creación de un nuevo juego de esclusas ubicadas paralelamente a las existentes para suplir la demanda de los barcos post-panamax.
	2010	Debido al fenómeno de La Niña se generó un aumento en el caudal dentro del canal, lo que produjo que se abriera un boquete en una parte de sus taludes, provocando así la inundación de pueblos aledaños como fue el caso de Hato Viejo, produciendo el desplazamiento de cientos de personas, pérdidas de cultivos, animales y bienes materiales.	2007	Inician trabajos de ampliación desde el Cerro Paraíso, los cuales por problemas en el presupuesto no se logran terminar en el tiempo establecido y se requiere pedir una prórroga.
	2017	La firma holandesa Royal Haskoning DHV, mediante su representante Fortunato Carvajal, entrego al Fondo Nacional de Adaptación los diseños de las compuertas y esclusas a construir en el canal del Dique el pasado 9 de mayo, El cual cuenta con una inversión de 2 billones de pesos destinados de la siguiente manera: 1,7 billones para la construcción de las esclusas y las compuertas y 300 mil millones para la restauración de las ciénagas.	2016	Se inaugura la ampliación paralela al canal existente para suplir los problemas de capacidad.

Fuente: Autores

1.7 METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto se contemplan tres etapas. La primera está compuesta por la investigación y recolección de datos en el Fondo adaptación y las entidades que estén involucradas en el proyecto Canal del Dique, para así

tener un panorama completo de la estructuración y avance del proyecto. También, la visita técnica a las esclusas de Cocolí y Miraflores en Panamá, será fundamental para el estudio de sus compuertas, pues allí se recolectarán los datos que permitan conocer su funcionamiento para la aplicación en Calamar.

En una segunda etapa, a partir de los datos recolectados, se especificará qué tipo de compuerta se desarrollará en este estudio para ser incluida en las esclusas del Canal del Dique en Calamar, teniendo en cuenta aspectos de funcionalidad, mantenimiento y demás, que permitan seleccionar la mejor opción. Además, con el histórico de los niveles encontrados en el Río Magdalena a la altura de Calamar, se especificará la altura necesaria de la esclusa desde la base del canal.

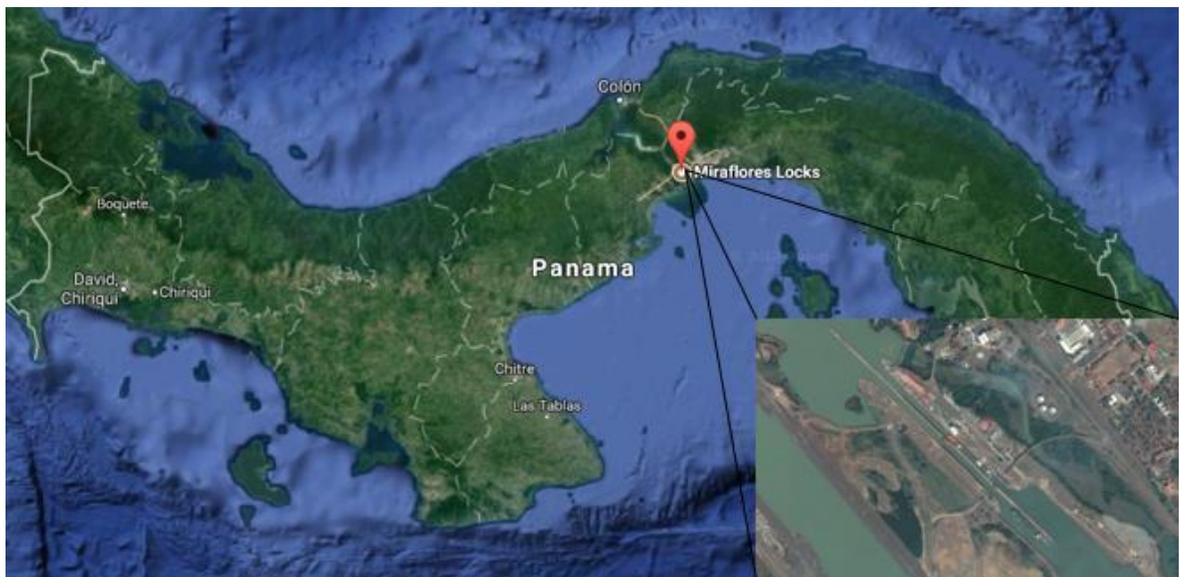
La tercera etapa incluye los resultados de este estudio, donde se entregará el material, el peso y el dimensionamiento de las compuertas con su respectivo análisis, teniendo en cuenta las condiciones extremas del Río Magdalena a la altura de Calamar.

2. VISITA TÉCNICA A PANAMÁ

Para comprender cómo funcionan las esclusas y conocer cómo funcionan sus compuertas, se realizó una visita técnica a la ciudad de Panamá. Este estudio contiene un informe en detalle de lo que se encontró en las esclusas de Miraflores (antiguas) y Cocolí (nuevas) en la visita que se realizó desde el 31 de julio hasta el 7 de agosto de 2017. Dentro de todos los aspectos que presenta la Autoridad del Canal de Panamá (económicos de la región, técnicos, ingenieriles, constructivos y turísticos), se presentaron los aspectos sobre las esclusas y sus compuertas descritos a continuación:

2.1 ESCLUSAS DE MIRAFLORES

Ilustración 5: Ubicación esclusas de Miraflores



Fuente: Google Maps 2017 e indicación de autores

Estas esclusas se encuentran sobre la costa oeste del país, y colindan con el Océano Pacífico. En Miraflores se encuentra la cámara más profunda y las compuertas más altas en comparación con las de Pedro Miguel y Gatún (hablando de las esclusas antiguas), debido a que dichas compuertas soportan la variación entre 40 y 50 cm que presenta la marea del Pacífico en algunos días del año. Las compuertas pesan entre 353.8 y 662.2 toneladas dependiendo del lugar donde se encuentren por sus dimensiones.

En promedio la diferencia de nivel al cruzar por la esclusa de Miraflores es de 16.50 metros. La esclusa en total tiene dos cámaras, las cuales tienen 305 metros de largo, 33.5 metros de ancho y una profundidad de 12.5 metros. Se requieren aproximadamente cerca de 128 millones de litros de agua para llenar cada cámara, y el modo utilizado para el llenado es por gravedad, ya que las esclusas se encuentran de manera escalonada. Para Este proceso, se toma el agua del lago Miraflores y mediante un sistema de sumideros es llevada hasta cada cámara que se encuentra en un nivel inferior respecto al anterior.

Cada cámara tiene catorce sumideros los cuales se conectan con cinco alcantarillas ubicadas en la parte inferior. El control de agua que ingresa a la cámara se realiza mediante el empleo de válvulas cilíndricas y de vástago. Durante el proceso de operación se produce un flujo turbulento de tal manera que no requiere de un control de sedimentos, ya que el agua arrastra todo el material granular y vegetal que haya podido ingresar a la cámara.

Las compuertas separan cada cámara durante las etapas de la operación, dichas compuertas están compuestas por dos hojas. Las compuertas que limitan con el océano pacífico tienen una altura de 25 metros, mientras que las encontradas en medio de las cámaras y las que colindan con el lago Miraflores tienen una altura de 14.5 metros. Cada hoja es hueca y boyante, las cuales tienen un revestimiento de concreto para soportar cerca de 12.800 toneladas en el momento de operación.

Cada hoja es unida a los muros mediante bisagras las cuales tienen un peso aproximado de 16.7 toneladas que, para poder operarlas, es necesario un sistema de pistón el cual es impulsado por dos motores de 19 KW, en donde uno de ellos es usado mientras que el otro está en reposo, el segundo se reserva en caso de mantenimiento del otro o de falla (principio de redundancia). El tiempo de operación ya sea de apertura o cierre de la compuerta es de 1 minuto con 10 segundos aproximadamente, mientras que el tiempo de llenado de la cámara es de 10 min; por lo tanto, un buque tarda en transcurrir cerca de 1 hora la esclusa de Miraflores y aproximadamente entre 8 y 10 horas en transcurrir todo el canal. De igual manera cada compuerta tiene un sello de caucho entre la pared y la compuerta para evitar filtraciones, dicho sello aumenta su funcionalidad a medida que la presión del agua aumenta. De acuerdo con esto, es normal encontrar que en la parte superior de la compuerta se encuentren fugas, pero esto no quiere decir que este mal diseñado o que este presentando fallas.

Para realizar la apertura o cierre de las hojas el nivel del agua en cada cámara debe ser igual, de lo contrario el pistón no tendrá la fuerza para abrirla y si se

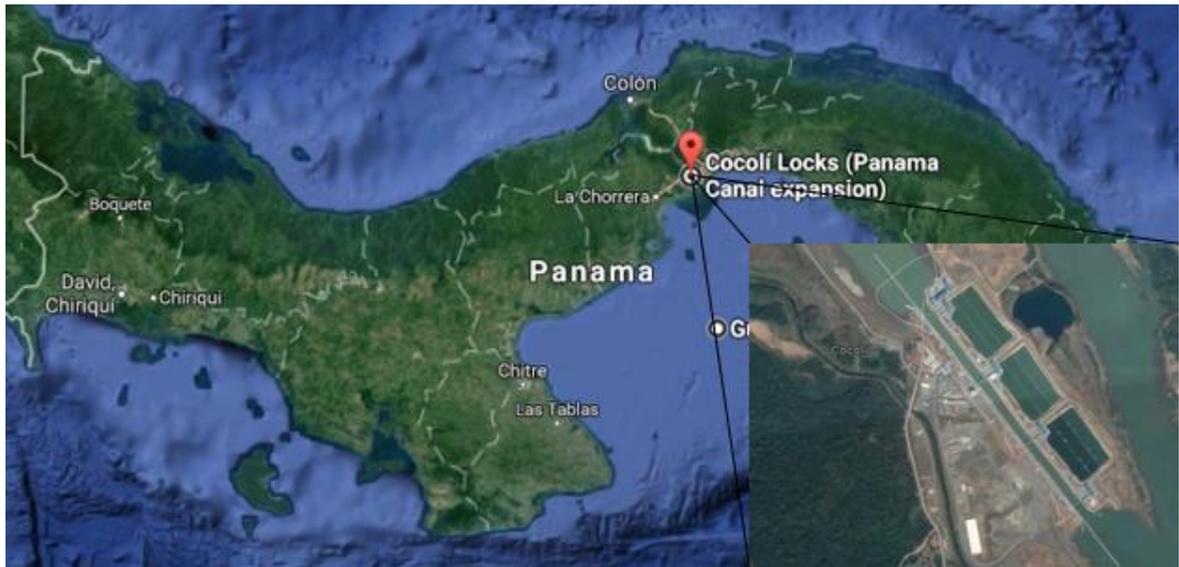
realizara la operación, las inundaciones que se producirían aguas abajo serian catastróficas.

Cada cámara tiene un par de compuertas auxiliares las cuales pueden emplearse de respaldo para evitar posibles inundaciones en caso de que buque llegara a golpearlas, o también para dividir la cámara en dos y así permitir el paso de buques más pequeños sin necesidad de realizar el llenado total de la cámara.

Para realizar el diseño de las compuertas, no se empleó ningún software de comprobación. La única manera de corroborar que el diseño fue correcto fue al momento de iniciar las operaciones en el canal. El periodo de diseño de las compuertas fue de 100 años y, por lo tanto, actualmente se encuentran en etapa de mantenimiento completo y reemplazando ciertas partes que ya no están en óptimas condiciones para la correcta operación y seguridad de los usuarios.

2.2 ESCLUSAS DE COCOLÍ

Ilustración 6: Ubicación esclusas de Cocolí



Fuente: Google Maps 2017 e indicación de autores

Al igual que las esclusas de Miraflores, estas colindan con el océano pacifico y, por lo tanto, sus dimensiones también se rigieron para salvar las diferencias en los niveles de la marea que se presentan a lo largo del año. Dichas esclusas se ubican al suroeste de las esclusas de Miraflores y se construyeron unas tinas de recuperación de agua a un lado de estas.

Esta esclusa se diseñó para superar la diferencia de nivel entre el océano pacífico y el lago Gatún, de esta manera los buques que pasen por esta esclusa ingresan directamente al corte culebra. De esta manera, la esclusa tiene tres cámaras para realizar la elevación de los buques y cada cámara tiene tres tinas para la reutilización de agua.

Cada cámara tiene 427 metros de largo, 55 metros de ancho y 18,3 metros de profundidad. Para llenar cada cámara se requiere aproximadamente 422 millones de litros de agua dulce. Cerca del 60 por ciento del agua es reciclada en las tinas en cada tránsito. Para esta operación, el agua es transferida desde las tinas a cada cámara por gravedad y viceversa. El control de llenado de cada cámara se hace por medio de válvulas.

Cada cámara tiene dos alcantarillas ubicadas en su parte lateral. Durante su operación, el flujo que se produce es turbulento y, por lo tanto, no se requiere de un control de sedimentos. La esclusa tiene 8 compuertas, dos por cada cámara. Una que hace parte principal de la operación y la otra funciona como auxiliar en caso de alguna emergencia.

El tipo de compuertas que se emplearon son rodantes, las cuales operan desde nichos de concreto situadas perpendicularmente a las cámaras, de esta manera cada compuerta se convierte en una especie de dique seco, lo que permite su mantenimiento en el lugar sin necesidad de quitarla e interrumpir las operaciones.

El material del que están hechas las compuertas es de acero pretensado. Un peso promedio de las compuertas es de 3200 toneladas; son huecas y en medio de su altura poseen una cámara de flotación. Dicho peso puede variar de acuerdo con las dimensiones de la compuerta que depende del lugar en que se ubiquen, siendo las más grandes las que colindan con el océano pacífico. Su mecanismo de operación es mediante cable (guaya) y se desliza sobre unas guías.

Son compuertas esbeltas donde su ancho pueden ser aproximadamente 8 metros, posee un sello de caucho en la punta para evitar fugas y se debe realizar un tensionamiento continuo a las guayas.

Para su diseño se basaron en las normas establecidas por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE por sus siglas en inglés) y The American Concrete Institute (ACI), donde se tuvieron en cuenta tanto fuerzas dinámicas como fuerzas estáticas. Se diseñaron para tener un periodo de funcionamiento de 100 años.

Ilustración 7: Ubicación de las esclusas



Fuente: Google Earth e indicación de autores

Con lo encontrado en Panamá, respecto a las compuertas de las esclusas, se prosigue a evaluar su adaptación en las esclusas del Canal del Dique en Colombia, conforme a lo que el Fondo Adaptación propone para mantener la navegabilidad en el sector.

3. RECOLECCIÓN DE DATOS SOBRE EL CANAL DEL DIQUE

Para conocer a fondo en detalle la zona del proyecto, la problemática que se presenta en el sector y la solución que el gobierno está dando, fue necesario comunicarse con el Fondo Adaptación, quien es el ente encargado de llevar a cabo la obra. También las autoridades encargadas del Canal del Dique, que en este caso es la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique (CARDIQUE), y socializaciones acerca de los avances que se están haciendo allí, como la Socialización de los Proyectos de Intervención Canal del Dique y Obras la Mojana que presentó la Sociedad Colombiana de Ingenieros en su sede principal en Bogotá el mes de octubre del 2017.

3.1 LA ZONA DEL PROYECTO

Ilustración 8: Ubicación del proyecto



Fuente: Google Earth 2017 e indicación de autores

El Canal del Dique es una bifurcación del Río Magdalena a la altura de la población de Calamar, localizado al noreste del departamento de Bolívar, Colombia. La intervención del proyecto del Fondo Adaptación inicia en el kilómetro 03+20, esto respecto a donde inicia el Canal desde Calamar. Después de estudiar el comportamiento de los convoyes, se determinó que lo mejor para la maniobra del convoy es dejar un espacio de 3,2 kilómetros para ubicar la esclusa y no inmediatamente cuando inicia el canal desde el Río Magdalena. En dicho lugar se

realizará una ampliación aproximada de 100m para poder realizar la intervención y contar con espacio suficiente en cada una de las áreas.

Ilustración 9: Descripción actual de la zona a intervenir en Calamar



Fuente: Google Earth 2017 e indicación de autores

3.2 ESTADO ACTUAL DEL PROYECTO CANAL DEL DIQUE

La solución seleccionada por el gobierno comprende dos fases, la primera fase que consiste en la realización de obras preliminares, se encuentran en un 67% de avance¹⁰, y la segunda fase contempla un plan de tres frentes a desarrollarse. Para comprender su complejidad e importancia, se describirá brevemente el proyecto del Fondo Adaptación en los siguientes numerales.

3.2.1 Fase I, obras preliminares Fondo Adaptación

La solución propuesta por el Fondo Adaptación comprende una primera fase donde se realizaron la estructuración y la gestión del proyecto. Luego, se hicieron estudios y diseños detallados de las obras preventivas y de las obras principales.

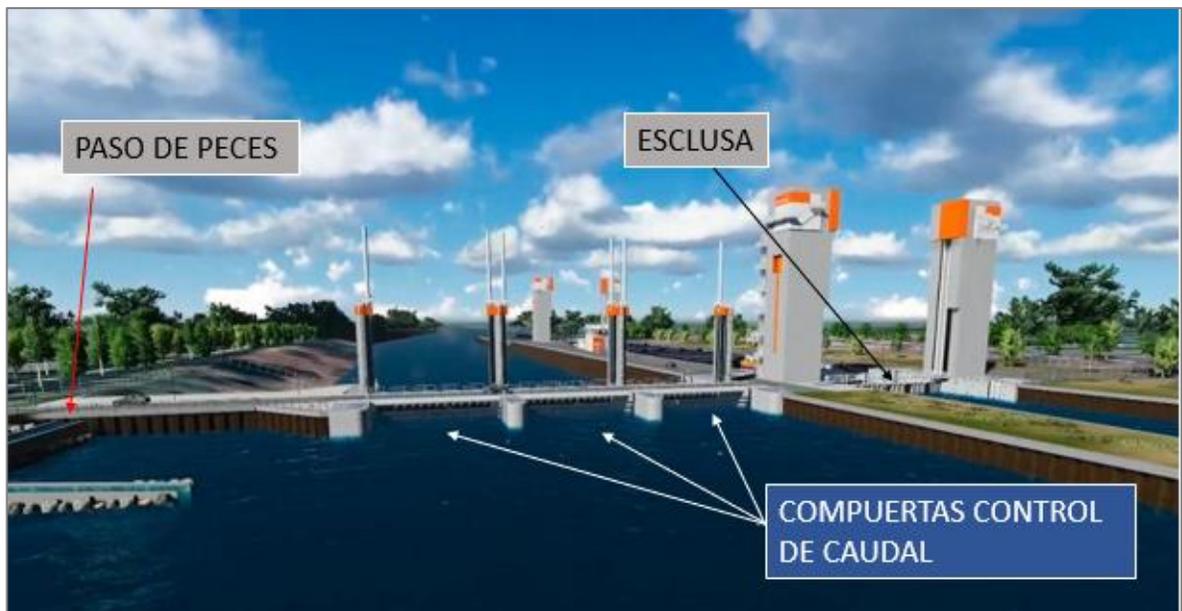
¹⁰ SOCIALIZACIÓN de los Proyectos de Intervención Canal del Dique y Obras la Mojana. (1° : 2017 : Bogotá, Colombia). Sociedad Colombiana de Ingenieros y Fondo Adaptación

En el ítem de obras preventivas se están realizando obras de protección de las orillas, la construcción de Diques en donde no existían, y reforzamiento de los que estaban mal contruidos o estaban en deterioro¹¹.

3.2.2 Fase II, obras principales Fondo Adaptación

Para las obras principales, se contempla la construcción de tres frentes que buscan mantener la navegabilidad en el canal, la migración de peces y el control de caudales.

Ilustración 10: Solución del Fondo Adaptación



Fuente: Fondo Adaptación 2017

- El primer frente plantea la reducción de caudal que ingresa al canal y que inunda las ciénagas aledañas a lo largo de su recorrido. Está compuesto por una presa de tres compuertas, las cuales permiten el ingreso de agua al canal y en caso de sequía en el río, cierra el paso del agua para que no se devuelva y mantener siempre un nivel navegable.
- El segundo frente, mediante un paso escalonado horizontalmente, permite el ingreso de peces, lo cual mantiene la actividad de pesca, puesto que es fundamental para el desarrollo económico de la zona.

¹¹ SOCIALIZACIÓN de los Proyectos de Intervención Canal del Dique y Obras la Mojana. (1° : 2017 : Bogotá, Colombia). Sociedad Colombiana de Ingenieros y Fondo Adaptación

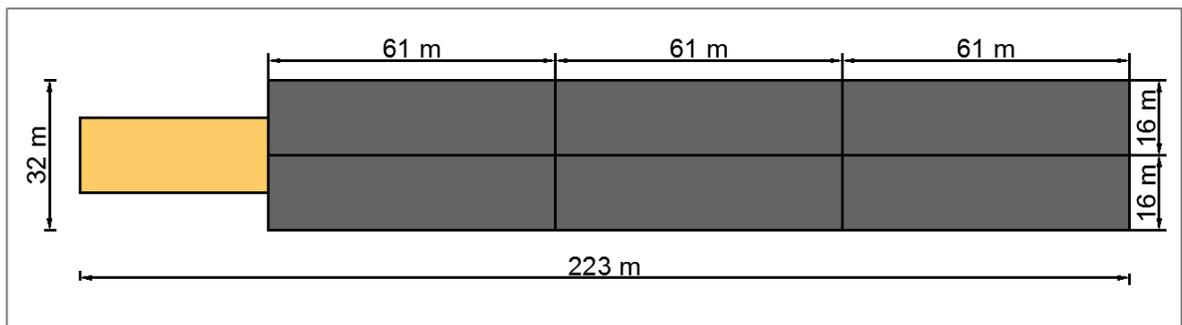
- El tercer frente es permitir, por medio de esclusas, el paso de buques por el canal para mantener la navegabilidad en ese sector y disminuir el ingreso de sedimentos.

Los tres frentes se complementan y ayudan a mantener viva la actividad económica que depende directamente del canal, y soluciona problemas de inundaciones y contaminación¹².

Este estudio se concentra únicamente en el tercer frente para desarrollar el diseño hidráulico de las compuertas de las esclusas.

3.2.2.1 Esclusas canal del dique

Ilustración 11: Convoy de diseño



Fuente: Autores

Para el diseño del sistema de esclusas se consideró una proyección de la carga de materiales que son transportados en los convoyes hasta el año 2047¹³, en donde el principal elemento a transportar es el carbón. El convoy de diseño para las esclusas del Canal del Dique es de 2x3 barcazas más un remolcador, con capacidad de carga total de 7.200 toneladas. Sus dimensiones son de 223 metros de eslora (largo del buque) y 32 metros de manga (ancho del buque), en donde para el ingreso del convoy no se requiere su fraccionamiento, sino que ingresará completo; por lo tanto, las dimensiones de la esclusa son 254 m de largo y 33,5 m de ancho. La altura de la lámina de agua debe respetar un mínimo de calado (lámina de agua mínima que permite la navegación) de 6 pies o 1,8282 metros

¹² ADAPTACIÓN, Fondo. Canal del Dique, esclusas y compuertas. [En línea]. [Fecha de consulta: 21 de agosto del 2017]. Disponible en: <http://sitio.fondoadaptacion.gov.co/index.php/el-fondo/macroyectos/canal-del-dique/esclusas-y-compuertas>

¹³ SOCIALIZACIÓN de los Proyectos de Intervención Canal del Dique y Obras la Mojana. (1° : 2017: Bogotá, Colombia). Sociedad Colombiana de Ingenieros y Fondo Adaptación

para la navegabilidad. En el anexo 1 de este documento se muestra la vista en planta sugerida para la construcción de la esclusa, según el convoy de diseño.

4. CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA LA ADAPTACIÓN DE LAS COMPUERTAS PANAMEÑAS EN CALAMAR

El ancho de las compuertas está acorde con lo que se encontró en el Fondo Adaptación. En este caso, lo que queda por definir es qué tipo de compuertas, de las vistas en Panamá, será la mejor opción para su implementación en este proyecto. Además, teniendo en cuenta los niveles registrados en el Río Magdalena a la Altura de Calamar, darán el pie para la altura requerida para esta adaptación.

4.1 TIPO DE COMPUERTA

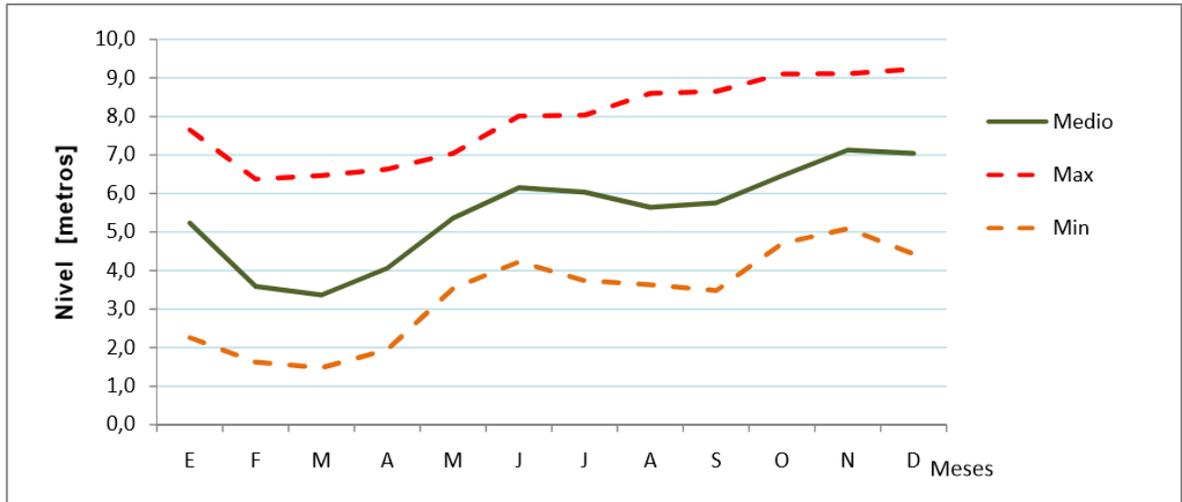
Teniendo en cuenta la visita técnica a Panamá y lo observado en las necesidades del Canal del Dique, se determinó que la mejor opción son las compuertas del canal ampliado (esclusas de Cocolí), puesto que la razón por la que en Panamá escogió cambiar el modelo antiguo (esclusas de Miraflores) es por los beneficios expuestos en el marco teórico de este documento. Sus beneficios, en cuanto a facilidad de mantenimiento, aportan para que la operación sea más sencilla. Además, con este tipo se evitan al máximo las filtraciones. Al ser huecas en su interior, presentan la característica de transferir el peso a la solera o base del canal, la cual es de al menos una décima parte del peso total de la compuerta¹⁴. Esto basados en el principio de Arquímedes, donde se afirma que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical hacia arriba igual al peso de fluido desalojado, ayudando a que la operación de apertura y cierre sea más fácil puesto que la carga que requiere mover los motores es menor.

4.2 CONDICIONES HIDRÁULICAS EN EL CANAL DEL DIQUE

Para la determinación de la altura necesaria de las compuertas, se utilizó como base el histórico de los niveles que presentó el Río Magdalena, a la altura de Calamar, en un periodo desde 1971 hasta 2010 (ilustración 11). Esos niveles son base para la determinación del comportamiento del río en diferentes épocas del mes y a lo largo del tiempo. Con ello se hicieron cálculos de diseño hidráulico para determinar el espesor de compuertas y la altura total de la compuerta para la esclusa, lo cual, con los niveles máximos registrados, se determinó que la altura de la compuerta desde la base del canal es de 10 m.

¹⁴ Disponible en: <http://www.gupc.com.pa/es/proyecto/tercer-juego-de-esclusas>. [Fecha de consulta: 22 de octubre de 2017]

Ilustración 12: Niveles mensuales del Río Magdalena en Calamar



Fuente: Fundación Promotora del Canal del Dique, con apoyo del IDEAM¹⁵.

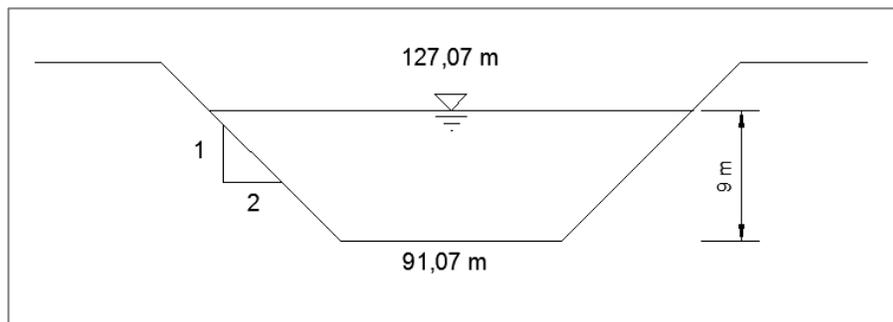
¹⁵ Disponible en:

http://fundacionpromotoradelcanaldeldique.org/herramientas/Gestion_Ambiental_Del_Riesgo_por_Inundacion.pdf. [Fecha de consulta: 22 de octubre de 2017]

5. DIMENSIONAMIENTO DE LA COMPUERTA EN LA ESCLUSA DE CALAMAR

Basados en la consulta sobre el proyecto del Fondo Adaptación y el estudio de las esclusas del Canal de Panamá, se procede a realizar el dimensionamiento de la compuerta en la esclusa de Calamar, en el Canal del Dique, guiados por el método presentado por Tomás Ochoa en su libro de Centrales Hidroeléctricas. Para ello, es necesario conocer la sección transversal del canal para determinar el régimen hidráulico. Según CARDIQUE, esas dimensiones son las siguientes:

Ilustración 13: Sección transversal del Canal del Dique



Fuente: Autores con apoyo de la información suministrada por CARDIQUE

Con lo anterior, se determinó que el área transversal del canal a esa altura con una lámina de agua máxima es de 981,63 m², según lo establecido en la fórmula 3.

Fórmula 3. Área de un trapecio

$$A = Y(B + ZY)$$

Donde:

A = Área del trapecio

Y = Altura de la lámina de agua

B = Base del Canal

Z = La proporción horizontal respecto la vertical

Así:

$$A = 9m(91,07m + (2 * 9m))$$

$$A = 981,63m^2$$

5.1. RÉGIMEN HIDRÁULICO

El régimen hidráulico en el que se encuentra el Canal del Dique por las fuerzas viscosas (Reynolds) y fuerzas gravitacionales (Froude) se determinó de la siguiente manera:

5.1.1 Número de Froude

Para hallar en Número de Froude es necesario determinar el radio hidráulico como se muestra en la fórmula 4, y la velocidad de flujo como lo muestra la fórmula 5.

Fórmula 4. Radio hidráulico en Canales

$$h = \frac{\text{Area mojada}}{\text{Superficie libre}}$$
$$h = \frac{981,63m}{127,07m}$$
$$h = 7,725m$$

Fórmula 5. Velocidad de flujo:

$$V = \frac{Q}{A}$$
$$V = \frac{550 \frac{m^3}{s}}{981,63m^2}$$
$$V = 0,56 \frac{m}{s}$$

Reemplazando las ecuaciones 4 y 5 en 2, se obtiene que el número de Froude es:

$$F = \frac{0,56 \frac{m}{s}}{\sqrt{9,81 \frac{m}{s^2} * 7,725m}}$$

$$F = 0,06 < 1 \rightarrow \text{FLUJO SUBCRITICO}$$

5.1.2 Número de Reynolds

Para la determinación del número de Reynolds, se tomó el caudal de entrada en el Canal del Dique a la altura de Calamar, en donde se tiene $Q = 550 \frac{m^3}{s}$ a una temperatura $T = 25^\circ C$. La viscosidad dinámica del agua a esa temperatura es de $\mu = 8,91 \times 10^{-4} Pa * s$, así como la densidad es de $\rho = 997,13 \frac{kg}{m^3}$. Para su determinación se hace uso de la fórmula 1.

Fórmula 6. Radio Hidráulico

$$RH = \frac{Y(B + ZY)}{B + 2Y\sqrt{Z^2 + 1}}$$
$$RH = \frac{9m(91,07m + (2 * 9m))}{91,07m + ((2 * 9m)\sqrt{2^2 + 1})}$$

$$RH = 7,475m$$

Teniendo los valores de las propiedades del agua, y con el Radio Hidráulico, se obtiene que el número de Reynolds es de:

$$Re = \frac{0,56 \frac{m}{s} * 7,475m * 997,13 \frac{kg}{m^3}}{8.91 \times 10^{-4} Pa * s}$$

$$Re = 4684609 > 2000 \rightarrow \text{FLUJO TURBULENTO}$$

5.2 VALOR DE LAS CARGAS ACTUANTES SOBRE LA COMPUERTA

Para evaluar el comportamiento de la compuerta, se exponen dos casos en los que se observan condiciones extremas en la zona donde irán las compuertas. Estos casos son producto de los niveles de agua que se observan en la ilustración 12, donde se ve el histórico de los últimos años en cuanto a nivel del agua del Río Magdalena a la altura de Calamar. En esos casos se calcula la presión en ambos lados de la compuerta.

5.2.1 Caso 1

Nivel del Río Magdalena máximo y nivel de navegabilidad promedio en el Canal del Dique:

Nivel aguas arriba = 9m

Nivel aguas abajo = 6m

Para el primer caso se tiene que el nivel del río está al máximo, mientras que en el canal se mantiene a un nivel normal de navegación, según el Fondo Adaptación el nivel regular dentro del canal es de 6 m. Siendo así, con el peso unitario del agua y la altura registrada en ambos lados de la compuerta se calcula P y F , cuyos valores se representan en la ilustración 14.

Fórmula 7. Presión del agua

$$P = \gamma * H$$

Donde:

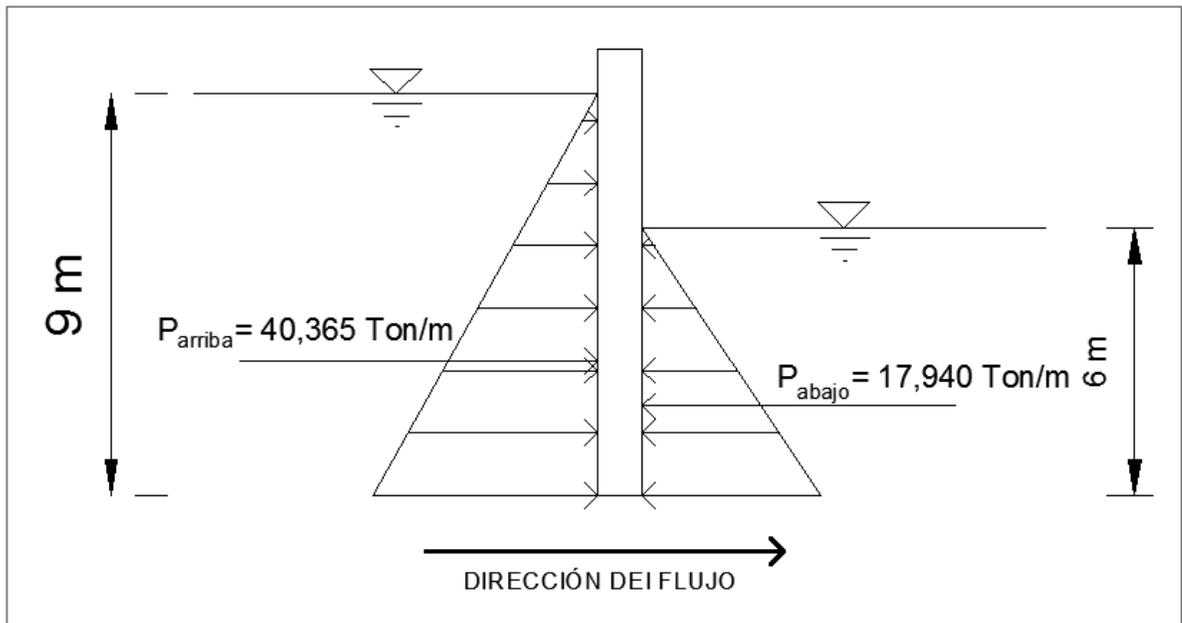
γ = Peso unitario del agua

H = Altura de la lámina de agua

$$\gamma_{\text{agua}} = 997,13 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \approx 0,98 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3}$$

$$P_{\text{arriba}} = 0,98 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3} * 9\text{m} = 8,97 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}$$

Ilustración 14: Simulación Caso 1



Fuente: Autores

Teniendo la presión, se puede hallar la fuerza que soporta la compuerta. Esta se concentra a un tercio desde la base de la compuerta.

$$F_{\text{arriba}} = \frac{8,97 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^2} * 9\text{m}}{2} = 40,365 \text{ Ton/m}$$

Para el caso de aguas abajo, se calcula de la misma forma y se obtiene que:

$$P_{abajo} = 0,98 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3} * 6\text{m} = 5,98 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}$$

$$F_{abajo} = \frac{5,98 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^2} * 6\text{m}}{2} = 17,940 \text{ Ton/m}$$

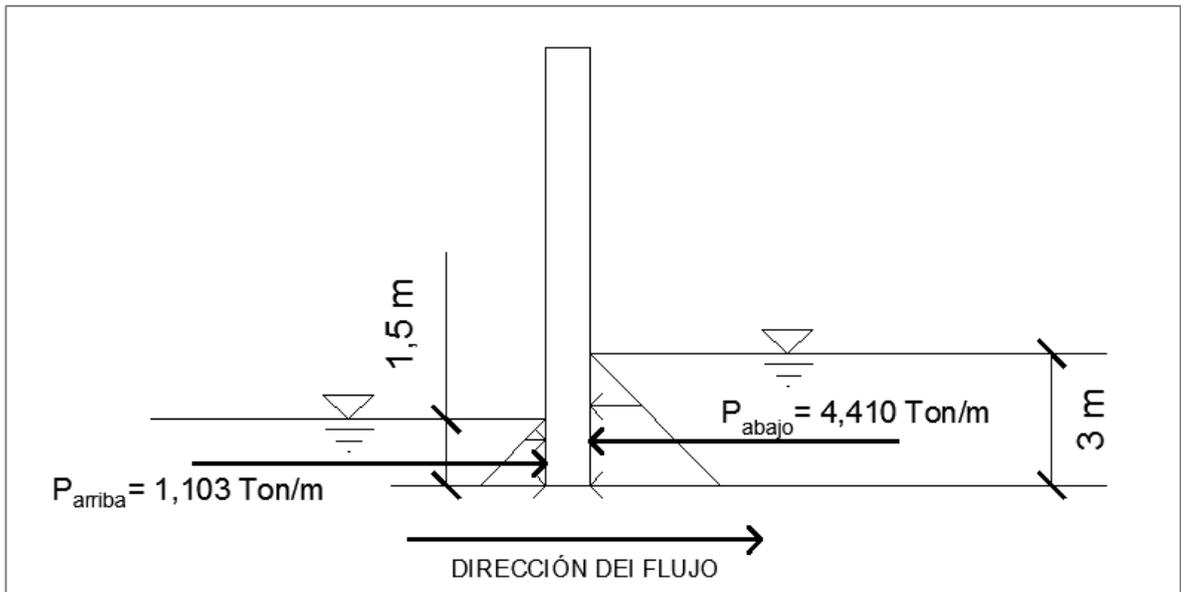
5.2.2 Caso 2

Nivel del Rio Magdalena mínimo y nivel de navegabilidad mínimo en el canal del dique:

Nivel aguas arriba = 1,5m

Nivel aguas abajo = 3m

Ilustración 15: Simulación caso 2



Fuente: Autores

De igual forma que en el caso 1, se procede a calcular P y F .

$$P_{arriba} = 0,98 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3} * 1,5\text{m} = 1,47 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}$$

$$F_{arriba} = \frac{1,47 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^2} * 1,5\text{m}}{2} = 1,103 \text{ Ton/m}$$

$$P_{abajo} = 0,98 \frac{Ton}{m^3} * 3m = 2,94 \frac{Ton}{m^2}$$

$$F_{abajo} = \frac{2,94 \frac{Ton}{m^2} * 3m}{2} = 4,410 Ton/m$$

5.3 DETERMINACIÓN DEL PESO DE LAS COMPUERTAS

Para determinar el peso de las compuertas de ruedas se utiliza la fórmula 8, en donde a partir de un condicional dado por una operación, se determina si se utiliza la fórmula a o b.

Fórmula 8. Determinación del peso de las compuertas

$$a) G = 0.706(W^2 * h * H)^{0.7} \text{ Cuando } W^2 * h * H > 2000m^4$$

$$b) G = 0.888(W^2 * h * H)^{0.659} \text{ Cuando } W^2 * h * H < 2000m^4$$

Donde:

G= peso de la compuerta

W= Ancho de la compuerta en m

h= Altura de la compuerta en m

H= Cabeza en la solera en m

Para determinar cuál fórmula utilizar, se determina el valor de $W^2 * h * H$, y en este caso, sus valores son: $W= 33,5m$, $h= 10m$ y el valor de H se seleccionó del valor de las cargas actuantes sobre la compuerta (Caso 1) la más crítica. Para hacer este cálculo es necesario pasar la $P_{arriba} 9,87 ton/m^2$ a m.c.d.a. (metros columna de agua) para manejar las mismas unidades.

$$H = 8,97 \frac{Ton}{m^2} * \frac{1000 kg}{1 Ton} * 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$H = 87995,7 Pa * \frac{1 m.c.a}{9800 Pa} = 8,98 m$$

Teniendo ese valor, se procede a calcular el condicional y se obtiene:

$$W^2 * h * H = (33,5m)^2 * 10m * 8,98m$$

$$W^2 * h * H = 100778,05 m^4$$

Como $W^2 * h * H > 2000m^4$ se utiliza la fórmula 8-a.

$$G = 0.706(W^2 * h * H)^{0.7}:$$

$$G = 0.706((33,5m)^2 * 10m * 8,98m)^{0.7}$$

$$G = 2244,71Ton \approx 2245 Ton$$

La compuerta, con estas consideraciones debe tener un peso de 2245 toneladas para que las cargas a las que está sometida no la desestabilicen.

5.4 DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE LA COMPUERTA

5.4.1 Espesor mínimo

Para considerar el espesor mínimo de la compuerta, según el modelo que presenta Tomás Ochoa en su libro de Centrales Hidroeléctricas, se establecen los siguientes pasos:

Primero se establece el momento flector mediante la fórmula 9, donde L y H deben estar en metros, y el 125 es un factor de conversión para que la respuesta sea en kg * cm.

Fórmula 9. Momento Flector

$$M = 125 H * L^2(kg * cm)$$

$$M = 125 * 8,98m * (33,5m)^2$$

$$M = 12559725,625 kg * cm$$

Con el momento flector, se procede a despejar la fórmula 10 y reemplazar el valor de momento para el cálculo del esfuerzo.

Fórmula 10. Momento resistente

$$M = \sigma * W, \text{ donde } \sigma \text{ se da en } \frac{kg}{cm^2}$$

$$\sigma = \frac{M}{W}$$

$$\sigma = \frac{12559725,625 kg * cm}{3350 cm}$$

$$\sigma = 3749,17 \frac{kg}{cm^2}$$

Reemplazando en esfuerzo obtenido en la fórmula 11, resultará el espesor d de la compuerta.

Fórmula 11. Espesor de la compuerta

$$d = 27,4 L \sqrt{\frac{H}{\sigma}} \text{ (cm)}$$

$$d = 27,4 * 33,5m \sqrt{\frac{8,98m}{3749,17 \frac{kg}{cm^2}}}$$

$$d = 44,92 \text{ cm} \approx 45 \text{ cm}$$

Como resultado de este procedimiento, se establece que el espesor mínimo de la compuerta debe ser de 45 cm.

5.4.2 Espesor definitivo de la compuerta

Teniendo en cuenta el peso de la compuerta, resultado de procedimientos anteriores, y el espesor mínimo que esta debe tener, se procede a seleccionar un material para la compuerta. Con ese material, y dependiendo de su peso específico se le da a la compuerta un espesor óptimo para que dicho material cumpla con el peso especificado. Además, se tendrá en cuenta que esta compuerta va a ser hueca por los beneficios que representa el que sea construida de esa manera.

Se establece que el material del que estará compuesta la compuerta será acero pretensado (teniendo en cuenta el material que se tiene en las compuertas de Cocolí Panamá), el cual tiene un peso específico de $7,85 \text{ ton/m}^3$. En base a esto, se realiza la evaluación si con las dimensiones que hasta ahora se establecieron, se cumple con la condición del peso. La condición de peso es la siguiente está dada en la fórmula 12.

Fórmula 12. Condicional de diseño

$$G < \gamma_{Acero} * W * H * d$$

$$2245 \text{ ton} < 7,85 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3} * 33,5\text{m} * 10\text{m} * 0,45\text{m}$$

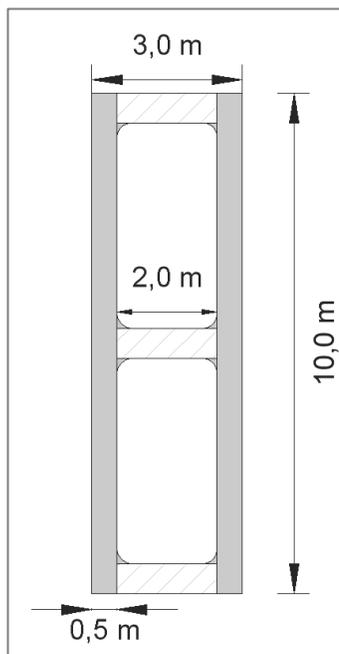
$$2245 \text{ ton} < 1183,39 \text{ Ton}$$

Como la condición de peso no se cumple, se amplía el espesor de la compuerta para que, variando dicho valor, se encuentre el espesor óptimo.

$$d = \frac{2245 \text{ ton}}{7,85 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3} * 33,5 \text{ m} * 10 \text{ m}} = 0,854 \text{ m} \approx 86 \text{ cm}$$

Haciendo el despeje, el espesor de la compuerta debe ser de 86 cm de material sólido. Para respetar ese valor, teniendo en cuenta que se está diseñando una compuerta hueca, y haciendo uso del valor mínimo de espesor, se selecciona una compuerta de dos paredes sólidas con espesor de 50 cm cada una, y un espacio entre ellas de 2 metros de distancia. Ambas paredes estarán unidas en el extremo superior, inferior y central para que sean una sola pieza. Con esto, sumando los dos espesores mínimos da que el ancho requerido del material es de 1,00 m. En definitiva, el espesor, incluyendo el vacío en su interior, es de 3,00 metros como se muestra en la ilustración 15.

Ilustración 16: Corte del dimensionamiento de la compuerta



Fuente: Autores

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Luego de realizar el dimensionamiento de la compuerta, se requiere analizar su comportamiento cuando entre en operación. Para ello, se determina el tiempo de llenado de la esclusa, dependiendo de los niveles aguas arriba y aguas abajo. Se debe aclarar que las compuertas entrarán en operación siempre y cuando ambos niveles de agua sean iguales. La razón de ello, es que la carga hidráulica provocaría que el equipo necesario para la operación, requiera una potencia mayor a la necesaria para abrir la compuerta; además, se produciría una desestabilización del buque por el cambio abrupto de nivel. Lo anterior se evidencia de la misma forma en el Canal de Panamá y es la razón por la que es necesario construir las alcantarillas que permitan igualar los niveles de agua y así, ejecutar a operación de la compuerta.

6.1 HIDRÁULICA DE LA ESCLUSA Y TIEMPO DE LLENADO

Para el diseño hidráulico de la esclusa es necesario considerar los escenarios a los que se va a enfrentar el sistema por la diferencia de niveles entre el Río Magdalena y el Canal del Dique. El tiempo de llenado y vaciado estará dado por esos factores, en donde para establecer un rango, se evalúan los dos casos extremos que competen este estudio.

6.1.1 Caso I – Nivel máximo del río y nivel del canal óptimo

El primer caso a considerar está dado por un escenario donde el nivel del río presenta un máximo, es decir, 9 metros, y el nivel óptimo del canal es de 6 metros.

$$\text{Area compuerta sumergida} = 33,5m * 9m$$

$$\text{Area compuerta sumergida} = 301,5m^2$$

$$\text{Velocidad de flujo en el rio} = 0,56 \frac{m}{s}$$

$$\text{Caudal en la compuerta} = 168,84 \frac{m^3}{s}$$

Se establece que para recolectar el caudal de la compuerta de va a disponer de 14 tubos de concreto ($K_s=1,65 \text{ mm}$).

Este tipo de tuberías se diseñan por el método del diseño de tuberías simples con altas pérdidas menores, debido a la gran longitud de la tubería y las altas pérdidas menores causadas por los accesorios. Este método que se menciona en el marco

teórico de este trabajo y es modelo desarrollado por Juan Saldarriaga en su libro Hidráulica de tuberías. Teniendo el número de tuberías y el caudal individual que debe transportar cada una, se procede a evaluar mediante el algoritmo allí indicado, las condiciones de cada una de las tuberías. Lo anterior da como resultado la tabla 2, en donde se determina en pulgadas y en metros las dimensiones de cada uno de los diámetros.

$$\text{Caudal diseño en cada tubería} = \frac{168,84 \frac{m^3}{s}}{14}$$

$$\text{Caudal diseño en cada tubería} = 12,06 \frac{m^3}{s}$$

Tabla 2: Cálculo del diámetro de las tuberías

TUBERÍA	LONGITUD (m)	CAUDAL DISEÑO (m ³ /s)	CAUDAL REAL (m ³ /s)	VELOCIDAD (m/s)	DIÁMETRO (in)	DIÁMETRO (m)
TUB-1	185	12,06	12,37	3,082	89	2,2606
TUB-2	200	12,06	12,25	3,052	89	2,2606
TUB-3	215	12,06	12,13	3,023	89	2,2606
TUB-4	230	12,06	12,31	3,001	90	2,2860
TUB-5	245	12,06	12,21	2,970	90	2,2860
TUB-6	260	12,06	12,40	2,960	91	2,3114
TUB-7	275	12,06	12,59	2,930	92	2,3368
TUB-8	290	12,06	12,78	2,920	93	2,3622
TUB-9	305	12,06	12,98	2,900	94	2,3876
TUB-10	320	12,06	12,87	2,880	94	2,3876
TUB-11	335	12,06	13,07	2,860	95	2,4130
TUB-12	350	12,06	13,28	2,840	96	2,4384
TUB-13	365	12,06	13,49	2,830	97	2,4638
TUB-14	380	12,06	13,70	2,820	98	2,4892
TOTALES	3955	168,84	178,43			

Fuente: Autores

En el anexo 2 de este documento se encuentran al detalle la ubicación de cada una de las tuberías. Es importante resaltar el tiempo de llenado de la esclusa, el cual teniendo en cuenta el caudal real que transportan las tuberías y el volumen de llenado, el tiempo es de 3 minutos como se muestra a continuación:

$$\text{Caudal total tuberías} = 178,43 \frac{m^3}{s}$$

$$\text{Volumen de llenado} = 33,5m * 254m * 3 m$$

$$\text{Volumen de llenado} = 25.527 \text{ m}^3$$

$$\text{Tiempo de llenado o vaciado} = \frac{\text{Volumen de llenado}}{\text{Caudal total tuberías}}$$

$$\text{Tiempo de llenado o vaciado} = \frac{25.527 \text{ m}^3}{178,43 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}$$

$$\text{Tiempo de llenado o vaciado} = 143,06 \text{ seg} \approx 3 \text{ min}$$

6.1.2 Caso II – Nivel mínimo navegable del río y del canal

En el caso en que se presente una época de sequía en el río, el sistema de regulación de caudal buscaría mantener un nivel mínimo dentro del canal de 3 metros. Aunque el río presente un nivel menor, el cierre de compuertas se habrá hecho con bastante antelación para que la navegabilidad dentro del canal no se vea afectada. Además, este caso considera que ese registro mínimo de nivel respetará el calado que requiere el buque para transitar en el Río Magdalena, es decir, aproximadamente 2 metros o 6 pies de altura. Si el nivel en el río es menor, la navegabilidad del mismo no se permitiría puesto que estos no serían capaces de transitar en el río a un nivel menor al del calado.

En este caso, para determinar el tiempo de llenado de la esclusa, se tiene en cuenta el caudal de las 14 tuberías que se diseñaron para el caso I, ya que su diseño representa el caso crítico y no es necesario diseñar algo diferente para su funcionamiento. El caudal transportado por las 14 tuberías es de $178,43 \text{ m}^3/\text{s}$ y el volumen a llenar en la esclusa es de $12.763,5 \text{ m}^3$. Por lo tanto, el tiempo de espera para que se igualen los niveles del agua a cada lado de la compuerta es de 1,30 min aproximadamente, para luego poder ser operada (operación de apertura o cierre). A continuación, se presenta el cálculo:

$$\text{Caudal total tuberías} = 178,43 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\text{Volumen de llenado} = 33,5\text{m} * 254\text{m} * 1,5\text{m}$$

$$\text{Volumen de llenado} = 12.763,5 \text{ m}^3$$

$$\text{Tiempo de llenado o vaciado} = \frac{\text{Volumen de llenado}}{\text{Caudal total tuberías}}$$

$$\text{Tiempo de llenado o vaciado} = \frac{12.763,5 \text{ m}^3}{178,43 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}$$

Tiempo de llenado o vaciado = 71,53 seg \approx 1,30 min

De acuerdo a lo anterior, el rango de tiempo para llenar la esclusa está entre 1,30 y 3,00 minutos. Esto debido a los casos críticos que presenta el Río Magdalena y por consecuencia el Canal del Dique. En este modelo, no se tiene en cuenta el diseño de la válvula para permitir el paso de agua, ya que se necesita un análisis y un tipo de válvula que requiere un estudio completo y puede ser objeto de una futura investigación, dado que, no hace parte del alcance de este estudio.

7. CONCLUSIONES

La implementación de estas compuertas en el sistema de esclusas propuesto por el Fondo Adaptación, garantizará la navegabilidad en el Canal del Dique, puesto que los buques tendrán la posibilidad de ingresar al sistema fluvial, mientras que se regula el nivel aguas abajo del canal; esto por medio de la Fase II del proyecto de restauración del Canal del Dique (obras principales del Fondo Adaptación).

De acuerdo con la información recolectada durante la visita realizada al Canal de Panamá, con su respectivo análisis, se determinó que el tipo de compuerta rodante sería la opción técnica más óptima para ser adaptada en el proyecto propuesto por el Fondo Adaptación, esto por ventajas de funcionalidad que presenta de acuerdo con su estructura.

Además, mediante la información suministrada por el Consorcio Dique, Cormagdalena, la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique (CARDIQUE), La fundación Promotora del Canal del Dique, el IDEAM y la socialización de los proyectos que adelanta el Fondo Adaptación, organizada por la Sociedad Colombiana de Ingenieros, se estudió la solución propuesta por el gobierno para la restauración del Canal del Dique, la cual garantiza la navegabilidad en ese sector mediante la construcción de esclusas. Adicionalmente, se identificó la zona del proyecto, los requerimientos hidráulicos para las compuertas de acuerdo a los niveles del río y las dimensiones de acuerdo con el convoy de diseño.

Al verificar la adaptación técnica de las compuertas panameñas en el Canal del Dique, se determinó que los criterios de selección son: el tipo de compuertas identificadas en la visita técnica, y las condiciones hidráulicas del Río Magdalena a la altura de Calamar. Como se explica en el capítulo 4 de este documento, Las compuertas rodantes encontradas en Cocolí, son la mejor opción técnica para ser adaptadas en las esclusas del sistema fluvial del canal del Dique.

Luego de seleccionar el tipo de compuerta, se procedió a realizar su respectivo dimensionamiento, donde se determinó que la compuerta rodante debe tener un alto de 10 metros, un ancho de 33,5 metros y un espesor de 3 metros. Teniendo en cuenta que el espesor mínimo resultado de la evaluación es de 45 centímetros, se decidió ampliar su espesor y hacer dos capas de 50 centímetros de material sólido, para que con la unión de ambas estructuras se sumara el peso requerido de 2245 toneladas; esto con el fin de darle estabilidad a la compuerta. Se estableció dejar un espacio de dos metros entre lámina y lámina para hacerla hueca. El beneficio que representa construirla así es por la facilidad en las obras de mantenimiento, ya que, al existir dicho espacio, se permite la entrada de personal técnico dentro de la compuerta. Además, el material de la compuerta

seleccionada es de acero pretensado, cuyo peso específico es de 7,85 ton/m³, el mismo de las compuertas de Panamá.

Para la operación de la esclusa, el tiempo de llenado dependerá del nivel de agua que presente el Río Magdalena. Con el análisis de la hidráulica de la esclusa y el tiempo de llenado, contenida en el capítulo 6.1 de este documento, se determinó que para los dos casos extremos (Nivel máximo del río y nivel del canal óptimo - Nivel mínimo navegable del río y del canal) el tiempo de llenado y vaciado varía en un rango de 1,30 y 3,00 minutos.

Al analizar las condiciones del Río Magdalena, se estableció que servicio de la esclusa en Calamar dependerá en gran medida del caudal o nivel de agua que presente el río. La razón es que, en tiempos de sequía, si no se cumple con un nivel de calado mínimo de 6 pies (1,8288 metros), las embarcaciones no podrán salir del canal en dirección al río, tal como se evidencia en el capítulo 6.1.2 de este documento. Superando ese nivel mínimo, la esclusa y con ella las compuertas, no tendrán problemas para operar (excepto en casos de accidente o mantenimiento).

8. RECOMENDACIONES

Es importante evaluar el sello entre la compuerta y el muro opuesto al nicho donde se resguarda la estructura (ver anexo 1), puesto que su eficiencia dependerá de la presión generada por el agua. En el caso de presentarse fugas en la parte superior, no es indicativo de falla, sino que se debe permitir una tolerancia, ya que nunca va a realizarse un sello 100% hermético.

Debido a que el proyecto propuesto por el Fondo Adaptación requiere de una inversión importante por parte del gobierno, se debe evaluar la relación de costo-beneficio que representa el construir compuertas en la esclusa en Calamar, esto para garantizar la navegabilidad en el sector. Los factores a tener en cuenta son económicos por la importancia de hacer uso de las rutas fluviales en el país, y sociales por lo que representa para las poblaciones aledañas al canal su restauración.

Para el correcto funcionamiento de la esclusa y sus compuertas, es necesario que la entidad encargada del mantenimiento del Canal del Dique realice obras de dragado y mantenimiento en el sector que comprende la entrada del Río Magdalena en Calamar, y el kilómetro 3.2, lugar donde se va a ubicar la esclusa. Es de vital importancia para que la sección transversal concuerde con lo que se encuentra aguas abajo, y para el correcto funcionamiento del sistema propuesto por el Fondo Adaptación.

BIBLIOGRAFÍA

OCHOA, Tomás. Centrales Hidroeléctricas. Tomo 2. Bogotá. Universidad la Gran Colombia. 2002.

ERBISTY, Paulo. Design of Hydraulic Gates. 2ª edición. Londres. Taylor & Francis Group. 2014.

CHOW, Ven Te. Hidráulica de Canales Abiertos. Bogotá. McGraw Hill. 2004.

MERY, M. H. Hidráulica aplicada al diseño de obras. Santiago de Chile, CL: RIL editores. 2006.

SALDARRIAGA, Juan. Hidráulica de Tuberías. 3ª edición. Bogotá D.C. Alfaomega Colombiana S.A. 2016.

BELL, Gustavo A. El Canal del Dique 1810-1840: El viacrucis de Cartagena, Boletín Cultural y Bibliográfico, Número 21, Volumen XXVI, 1989. En Disponible en:

https://publicaciones.banrepcultural.org/index.php/boletin_cultural/article/view/2585/2662. [Fecha de consulta: 03 junio 2017]

SOCIALIZACIÓN de los Proyectos de Intervención Canal del Dique y Obras la Mojana. (1° : 2017 : Bogotá, Colombia). Sociedad Colombiana de Ingenieros y Fondo Adaptación.

DIQUE, Consorcio. Macro-Proyecto Restauración Sistema Canal del Dique. 2016. Disponible en: <http://camacolbolivar.com/wp-content/uploads/2016/10/Macro-proyecto-CANAL-DEL-DIQUE.pdf>. [Fecha de consulta: 03 de junio de 2017]

¿Cómo funcionan las esclusas del canal de Panamá? [Video]. Canal de Panamá. 2011. (20 seg.) Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=rzac7mQUOzc/>

ADAPTACIÓN, Fondo. Inician las obras En El Canal del Dique, 2014. Disponible en: <http://sitio.fondoadaptacion.gov.co/index.php/prensa/31-prensa/mas-noticias/446-inician-las-obras-en-el-canal-del-dique>. [Fecha de consulta: 03 de junio de 2017]

CORMAGDALENA. Levantamiento Batimétrico Rio Magdalena, 2017. Disponible en: <http://www.cormagdalena.gov.co/idehacor/indes.jsp?sector=4>. [Fecha de consulta: 03 de junio de 2017]

CORMAGDALENA. Proyectos en el Canal del Dique, 2017. Disponible

en: <http://dc02eja.cormagdalena.gov.co/index.php?idcategoria=104>. [Fecha de consulta: 03 de junio de 2017]

AGUILERA Díaz, María M. El Canal Del Dique Y Su Subregión: Una Economía Basada En La Riqueza Hídrica. Banco De La República, 2006. Disponible en: http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/DTSER-72_%28VE%29.pdf.

Canal de Panamá. Autoridad del Canal de Panamá. 2017. Disponible en: <https://micanaldepanama.com/>

FORERO, Esneider Felipe. Tecnología de Compuertas del Canal de Panamá, para Diseño en el Río del Oro en el Departamento del Huila, Municipio de Neiva. Tesis (Ingeniero Civil). Bogotá, Colombia. Universidad Católica de Colombia. 2016.

El Canal Del Dique, Una Bomba De Tiempo. [Videograbación]. The Nature Conservancy, 2011. (6:45 min). Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=mC64iMZb4sU&feature=youtu.be>

Listos Los Diseños De Las Esclusas Y Compuertas Para El Canal Del Dique. [Videograbación]. Cityskyline, 2017. (16:55 min.). Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=Vjv9wTmu_WU&feature=youtu.be.

Santos Se Reunirá Con Verano Y Dumek Para Analizar El Proyecto Del Canal Del Dique. El Heraldo, 2017. Disponible en: <https://www.elheraldo.co/bolivar/santos-se-reunira-con-verano-y-dumek-para-analizar-el-proyecto-del-canal-del-dique-368273>. [Fecha de consulta: 03 de junio de 2017]

El Canal Del Dique, Una Pesadilla Ambiental. [Videograbación]. Noticias Caracol, 2013. (03:33 min.). Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=xu8JVvLUzoA>

El Canal Del Dique – Un Gran Reto De Nación. [Videograbación]. Fundación Mario Santo Domingo, 2012. (7:17 min.). Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=H54IQLgBRoM>

PÉREZ, Ramiro. Manual De Prácticas de Laboratorio de Hidráulica. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/12697/50/3353962.2005.Parte%2010.pdf>. [Fecha de consulta: 05 de junio de 2017]

Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique – CARDIQUE. Disponible en: <http://www.cardique.gov.co/>. [Fecha de consulta: 06 de junio de 2017]

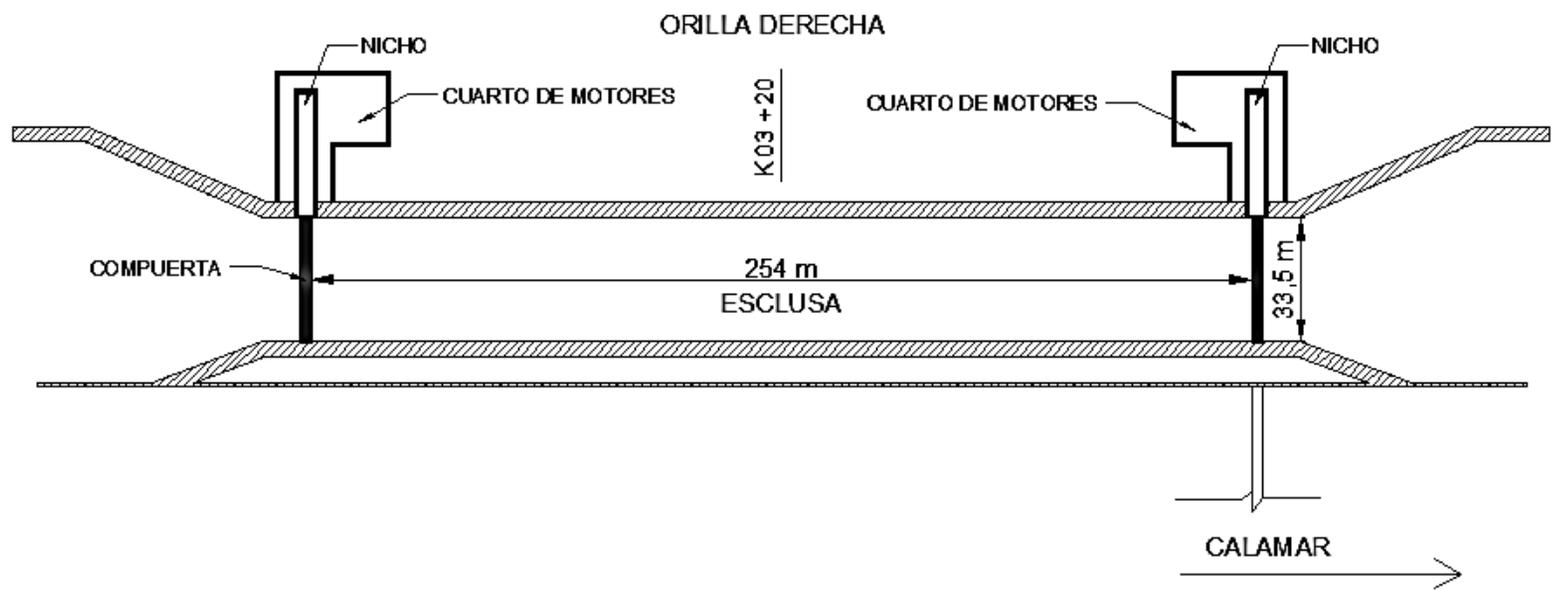
Fundación Promotora del Canal del Dique. Disponible en:
<http://www.fundacionpromotoradelcanaldeldique.org/index.html>. [Fecha de
consulta: 10 de octubre de 2017]

IDEAM. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/>. [Fecha de consulta: 15 de
octubre de 2017].

MECANICA DE FLUIDOS Y RECURSOS HIDRAULICOS Disponible en:
<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/indexh.html>.

ANEXO 1. VISTA EN PLANTA DE LA ESCLUSA EN CALAMAR

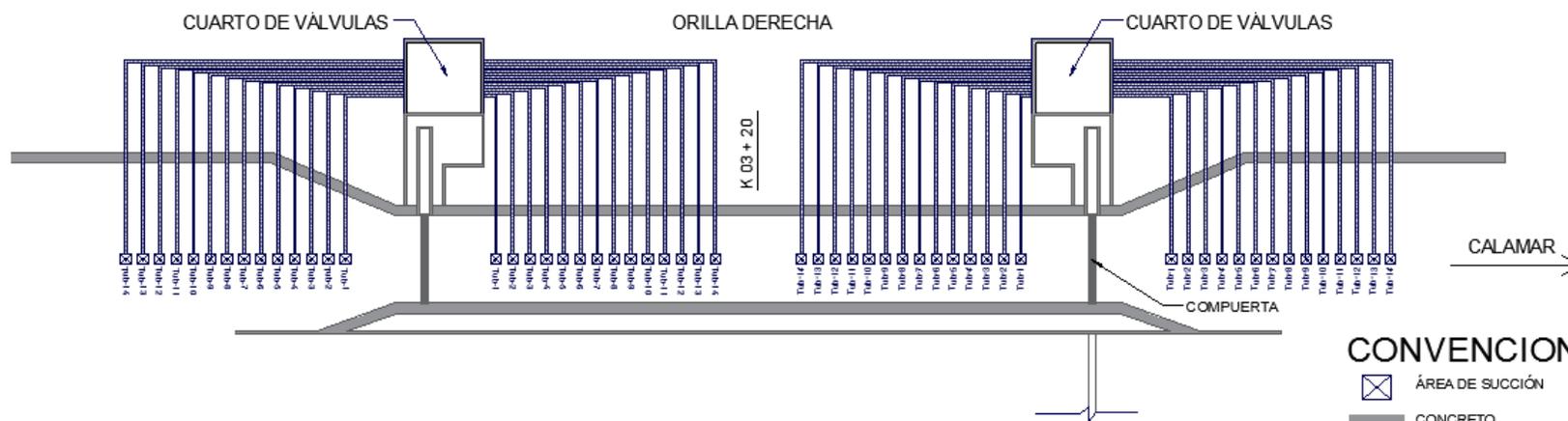
VISTA EN PLANTA DE LA ESCLUSA EN CALAMAR



Fuente: Autores

ANEXO 2. SISTEMA DE ALCANTARILLAS PARA EL LLENADO Y VACIADO DE LA ESCLUSA

CAPTACIÓN DE AGUA PARA LLENADO DE ESCLUSA EN CALAMAR



CONVENCIONES

-  ÁREA DE SUCCIÓN
-  CONCRETO
-  TUBERÍA CORTE
-  TUBERÍA PLANTA

