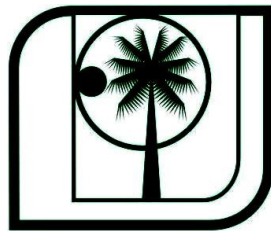


*Diseño Conceptual de una Embarcación con
Autopropulsión destinada al Transporte de Carbón en el
sector bajo del Río Magdalena*

OSCAR D. ACOSTA LOPERA
CÓDIGO: T00018922



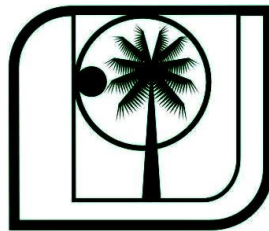
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA & MECATRÓNICA
CARTAGENA, D.T. Y C.
JULIO 4 DE 2014

*Diseño Conceptual de una Embarcación con
Autopropulsión destinada al Transporte de Carbón en el
sector bajo del Río Magdalena*

OSCAR D. ACOSTA LOPERA
CÓDIGO: T00018922

TRABAJO DE GRADO REQUISITO PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR
JAIRO H. CABRERA TOVAR, PH.D.
DOCTOR EN INGENIERÍA NAVAL Y OCEÁNICA



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA & MECATRÓNICA
CARTAGENA, D.T. Y C.
JULIO 4 DE 2014

Título en español

Diseño Conceptual de una Embarcación con Autopropulsión destinada al Transporte de Carbón en el sector bajo del Río Magdalena

Title in English

Conceptual Design of an Inland Water Ship Self-Propelled for Coal Transportation to Navigability of the Magdalena River Low Section

Resumen: Se desarrolla el diseño conceptual de una barcaza autopropulsada para el transporte de carbón en el río Magdalena entre los puertos de la ciudad de Barranquilla y el puerto de Capulco ubicados en el sector bajo del afluente. En el diseño se considera las restricciones físicas del río y de carga en los respectivos terminales y su correspondiente ruta además de seleccionar las líneas y formas del casco más apropiadas desde el punto de vista al desempeño, al avance y a la propulsión.

Abstract: Conceptual design of an inland-water self-propelled ship for coal transportation appropriate to the Magdalena river low section, between the ports of Barranquilla and Capulco. The design is considering physical and loading constraints of the river, defining hull lines and optimizing powering aspects.

Palabras clave: Barcaza Autopropulsada, Transporte de Carbón, Río Magdalena, Resistencia al Avance, Potencia.

Keywords: Inland-Water Ship, Coal Transportation, Magdalena River, Hull Lines, Powering Aspects.

Nota de aceptación

Trabajo de tesis

Aprobado

Jurado

Andrés Marrugo, Ph.D.

Jurado

Vladimir Quiróz, M.Sc.

Director

Jairo H. Cabrera Tovar, Ph.D.

Cartagena, D.T. y C., Julio 3 de 2014

Nota al lector

Las directivas de la Universidad Tecnológica de Bolívar, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

El autor ha puesto el máximo empeño en asegurarse de que las direcciones de las páginas web a las que hace referencia en este trabajo sean correctas y estén activas en el momento de la publicación. No obstante, no es responsable del contenido de dichas páginas web y no puede garantizar que una página permanezca activa o que su contenido siga siendo relevante, ético u oportuno.

Planilla para formato de tesis creada por Ph.D Edwin Camilo Cubides Garzón. Disponible en el Departamento de Estadística adscrita a la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. Escrito y editado en L^AT_EX por Oscar D. Acosta Lopera.

8 de mayo de 2014

Cesión de derechos patrimoniales

Cordial Saludo:

Manifiesto en este documento mi voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica de Bolívar los derechos patrimoniales, consagrados en el artículo 72 de la Ley 23 de 1982 sobre Derechos de Autor, del trabajo final denominado *Diseño Conceptual de una Embarcación con Autopropulsión destinada al Transporte de Carbón en el sector bajo del Río Magdalena*, producto de mi actividad académica para optar el título de **Ingeniero Mecánico** de la misma institución.

La Universidad Tecnológica de Bolívar, entidad académica sin ánimo de lucro, queda por lo tanto facultada para ejercer plenamente los derechos anteriormente cedidos en su actividad ordinaria de investigación, docencia y extensión. La cesión otorgada se ajusta a lo que establece la mencionada ley. Con todo, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la misma ley. En concordancia, suscribo este documento que hace parte integral del trabajo antes mencionado y entrego al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

Atentamente,

Oscar D. Acosta Lopera

8 de mayo de 2014

Señores
Universidad Tecnológica de Bolívar
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica & Mecatrónica
Comité evaluador de trabajos de grado

Cordial saludo:

Por medio de la presente, permito someter a su consideración el trabajo de grado titulado *Diseño Conceptual de una Embarcación con Autopropulsión destinada al Transporte de Carbón en el sector bajo del Río Magdalena*, requisito para optar el título de **Ingeniero Mecánico**.

Atentamente,

Oscar D. Acosta Lopera

8 de mayo de 2014

Señores
Universidad Tecnológica de Bolívar
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica & Mecatrónica
Comité evaluador de trabajos de grado

Apreciados señores:

Por medio de la presente, permito informarles que el trabajo de grado titulado *Diseño Conceptual de una Embarcación con Autopropulsión destinada al Transporte de Carbón en el sector bajo del Río Magdalena* ha sido desarrollado de acuerdo a los objetivos.

Como director del proyecto considero que el trabajo es satisfactorio y amerita ser presentado para su evaluación.

Atentamente,

Jairo H. Cabrera Tovar, Ph.D.

Dedicado a

Gina S. Corredor Hernández

Agradecimientos

Expreso mis agradecimientos a las personas que de una u otra forma han colaborado, contribuido y/o aportado durante el desarrollo de este trabajo, ya sea de forma interesada o no.

A Dios y a la virgen de Guadalupe por lograr este sueño y seguir alcanzando metas para llegar al éxito.

A **Ph.D. Jairo H. Cabrera Tovar**, por todos sus conocimientos que me ha impartido durante el pregrado, su confianza, consejos como profesor y amigo, y la motivación para el desarrollo de este proyecto. Sin él, no hubiera sido posible.

A los organizadores y jurados de **INGENIAR 2013** de la **Universidad Pontificia Bolivariana sede Medellín**, por aceptar y dejar exponer mi avance durante el proyecto, demostrando tiempo y sacrificio para estar ahí.

A mis tíos paternos **Rosario Acosta** y **Alcides Jiménez**, principales padres que me aceptaron, me criaron, me han apoyado en todo y me formaron con bases en principios y valores. Mis primas paternas, **Monica** y **Luisa**; mis padres biológicos, **Gustavo** y **Gladis**; mi hermano, **Mauricio**; mis tíos maternos, **Pablo León**, **Luz Piedad** y **Elizabeth**; mis primas maternas, **María Fernanda**, **Sara**, **Ana** y **Paula Andrea**. A mi abuelo **Leónidas**. A los que no están en nuestro mundo, mis abuelos **Gilma**, **Severo** y en especial a **Ramona Cortina**, mi segunda madre. Y a los demás familiares paternos y maternos.

Por último, este trabajo se lo dedico a **Gina S. Corredor Hernández** que, aunque lejos y cerca, estuvo presente en mis mejores momentos. Gracias a ella recibí su apoyo incondicional, ánimos para seguir logrando mis metas y me ha demostrado que las cosas llegan cuando menos lo esperas.

Seguiremos adelante.

Para meditar

“Se debe hacer todo tan sencillo como sea posible, pero no más sencillo” **Albert Einstein**

“Triste época la nuestra, en que es más difícil quebrantar un prejuicio que quebrantar un átomo” **Albert Einstein**

“Debemos comprender que los progresos del conocimiento no pueden ser identificados con la eliminación de la ignorancia. Deben unirnos a un progreso de la ignorancia” **Edgar Morin**

“La pasión es un ingrediente clave para el estudio y la práctica de las leyes y de la vida” **Elle Woods** en *Legally Blonde*

“La primera impresión no siempre es la correcta. Siempre tienen que tener fe en la gente, y lo más importante... siempre tengan fe en ustedes mismos” **Elle Woods** en *Legally Blonde*

“Considero la gramática como la primera parte del arte de pensar” **Étienne Bonnot de Condillac**

“La verdadera elocuencia consiste en decir todo lo que es preciso y en decir apenas lo que es preciso” **François de La Rochefoucauld**

“Cuando uno se aburre escribiendo, el lector se aburre leyendo” **Gabriel García Márquez**

“El escritor escribe su libro para explicarse a sí mismo lo que no se puede explicar” **Gabriel García Márquez**

“Si uno no se queda corrigiendo el libro por el resto de su vida es porque el mismo rigor de fierro que hace falta para empezararlo se impone para terminarlo” **Gabriel García Márquez**

“Be not inhospitable to strangers lest they be angels in disguise” **George Whitman**
escrito en las paredes de la librería *Shakespeare & Company* en París, Francia.

“Cualquiera que sea la cosa que queramos decir, sólo hay una palabra para expresarla, un verbo para animarla y un adjetivo para calificarla” **Guy de Maupassant**

“Hay verdaderamente dos cosas diferentes: saber y creer que sabe. La ciencia consiste en saber, en creer que se sabe reside la ignorancia” **Hipócrates**

“El secreto de un buen hablar es saber escuchar” **Ismael Cala**

“Es mucho más fácil reconocer el error que encontrar la verdad; aquel está en la superficie, de manera que se deja erradicar fácilmente; esta reposa en el fondo, de manera que su búsqueda no es asunto para cualquiera” **Johann Wolfgang von Goethe**

“No es lo que el país pueda hacer por ti, sino lo que tú puedas hacer por tu país” **John F. Kennedy**

“Son vanas y están plagadas de errores las ciencias que no han nacido del experimento, madre de toda certidumbre” **Leonardo Da Vinci**

“¿Para qué sirve un libro sin imágenes ni diálogos?” **Lewis Carroll**

“El genio se compone del dos por ciento de talento y del noventa y ocho por ciento de perseverante aplicación” **Ludwig van Beethoven**

“Ni un paso atrás, siempre adelante” **Luis Carlos Galán**

“Cada quien llama claras las ideas que están en el mismo grado de confusión que las suyas” **Marcel Proust**

“Habla todo lo que sabes y nada en lo absoluto de lo que ignoras” **Nicolas Léonard Sadi Carnot**

“No es lo que seas en tu interior, son tus actos los que te definen” **Rachel Dawes** en *Batman Begins*

“El viejo preceptor de un colegio le dice a uno de sus alumnos: ‘Relea lo que ha escrito y en donde se tope con una frase que le parezca particularmente brillante, bórrela.’”
Samuel Johnson, según James Boswell

“Los atrasos tienen consecuencias funestas” **William Shakespeare**

“Un relato honesto resulta mejor si se lo hace sin rodeos” **William Shakespeare**

Índice general

Índice general	II
Índice de tablas	IV
Índice de figuras	V
Convenciones	VI
Lista de símbolos	VII
Introducción	IX
1. El carbón en Colombia	1
1.1. Propiedades del carbón	1
1.2. Clasificación	2
1.3. Carbón a nivel mundial	2
1.4. Carbón en Colombia	4
2. Descripción del área de navegabilidad	8
2.1. Antecedentes	9
2.2. Proyectos	10
2.3. Ruta seleccionada	11
3. Transporte fluvial	13
3.1. Características básicas de las vías fluviales	13
3.2. Transporte fluvial a nivel mundial	14
3.3. Transporte fluvial en Colombia	16
4. Metodología	20

4.1. Restricciones físicas del río y modelo del casco	20
4.2. Análisis paramétrico	22
4.3. Selección de la embarcación	24
4.4. Validación de resultados	31
5. Resultados	32
5.1. Resumen de resultados en FREE!ship	33
5.2. Resumen de resultados en AVEVA Marine	34
Glosario	42
Referencias	44

Índice de tablas

1.	Clasificación del carbón según ASTM	2
2.	Países productores de carbón (estimado en 2012)	3
3.	Reservas probadas del carbón en el mundo	4
4.	Países exportadores e importadores de carbón (estimado en 2012)	5
5.	Reservas de carbón en la minería colombiana	6
6.	Comparación entre los diferentes modos de transporte para 7,200 t a 500 km	16
7.	Nomenclatura del convoy de carga	18
8.	Dimensiones y conformación típica de los convoy más grandes que operan actualmente en el río Magdalena	18
9.	Longitud mínima de radio de curvatura	22
10.	Modelos de las embarcaciones fluviales	22
11.	Características de los modelos de las barcas preseleccionadas	24
12.	Valores para el coeficiente de forma	26
13.	Valores aproximados para el factor de resistencia al apéndice	26
14.	Resultados de la resistencia al avance y potencia de las tres embarcaciones .	34
15.	Resultados posteriores de la resistencia al avance y potencia de la embar- cación 3	35
16.	Cálculos finales de resistencia al avance y potencia según Holtrop para la embarcación 3	35

Índice de figuras

1.	Importantes yacimientos del carbón en el mundo	3
2.	Cadena del carbón en Colombia	6
3.	Ingresos de exportación de la minería en Colombia	7
4.	Mapa del río Magdalena	9
5.	Puerto de Capulco	11
6.	Puerto de Barranquilla	12
7.	Canal Ámsterdam-Rin en Los Países Bajos	15
8.	Participación del movimiento de carga nacional por modo de transporte durante el año 2006	16
9.	Rutas para el transporte de carbón en Colombia	17
10.	Nivel del río Magdalena a la altura del municipio de Gamarra	19
11.	Metodología RESMAG	20
12.	Radio de curvatura en función del ángulo del timón y la profundidad del agua	21
13.	Vista transversal de los cascos preseleccionados	24
14.	Diagrama del método de selección de la embarcación	29
15.	Diagrama de los componentes del método de selección de la embarcación . .	30
16.	Análisis comparativo de la resistencia al avance de las barcazas	33
17.	Análisis comparativo de la potencia de las barcazas	33
18.	Análisis posterior de la resistencia al avance de la barcaza 3	34
19.	Análisis posterior de la potencia de la barcaza 3	35
20.	Vista isométrica de la embarcación seleccionada	36
21.	Planos de líneas y formas de la embarcación seleccionada	37

Convenciones

Unidad	Nombre	Definición
BTU	Unidades Térmicas Inglesas	ISO 80000-5
cm ²	Centímetro cuadrado	-
cm ³	Centímetro cubico	-
COP\$	Peso colombiano	ISO 4217 (No. 170)
ft	Pie	ISO 80000-3
g	Gramo	ISO 80000-1
ha	Hectárea	NIST
hp	Caballos de fuerza	NIST
kg	Kilogramo	ISO 80000-1
km	Kilómetro	ISO 80000-1
kN	Kilo-Newton	ISO 80000-4
kW	Kilo-Watt	ISO 80000-4
kn	Nudo	ISO 80000-3
lb	Libra	ISO 80000-3
m	Metro	ISO 80000-4
m ³	Metro cubico	-
Mg	Mega-gramo	ISO 80000-1
mi	Milla	NIST
MJ	Mega Joule	ISO 80000-4
s	Segundo	ISO 80000-3
s ²	Segundo al cuadrado	-
t	Tonelada	NIST
USD\$	Dólar estadounidense	ISO 4217 (No. 840)

Lista de símbolos

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
$1 + k_1$	Factor de forma	-
$1 + k_2$	Factor de resistencia al apéndice	-
A_{BT}	Área transversal debido a la presencia del bulbo	m ²
A_T	Área de la popa sumergida	m ²
A_{WP}	Área de la línea de agua	m ²
A_x	Área máxima de la sección transversal del casco	m ²
B	Manga	m
c_1	Constante	-
c_2	Constante	-
c_3	Constante	-
c_4	Constante	-
c_5	Constante	-
c_6	Constante	-
c_7	Constante	-
c_{14}	Constante	-
c_{15}	Constante	-
c_{16}	Constante	-
c_{17}	Constante	-
C_A	Coefficiente de correlación	-
C_B	Coefficiente de bloque	-
C_{BTO}	Coefficiente debido a la presencia de hélice en la proa	-
C_F	Coefficiente friccional	-
C_M	Coefficiente de la sección media del casco	-
C_{max}	Calado máximo	m
C_P	Coefficiente prismático	-
C_{stern}	Coefficiente de forma del casco en la popa	-
C_{WP}	Coefficiente de la línea de agua	-
d	Constante	-
d_t	Diámetro del túnel	m
F_n	Número de Froude	-
F_{ni}	Número de Froude basado en la inmersión	-
F_{nT}	Número de Froude basado en la inmersión de la popa	-

Símbolo	Término	Unidad SI
F_r	Fricción	-
g	Gravedad	m/s ²
h_B	Altura del bulbo	m
i_E	Semiángulo de entrada de flotación	-
L	Eslora	m
l_{cb}	Posición longitudinal del centro de carena	-
L_R	Parámetro que refleja la eslora	m
L_{WL}	Eslora al nivel de la línea de agua	m
m_1	Constante	-
m_3	Constante	-
m_4	Constante	-
P	Potencia	kW
P_B	Medida para la salida de la popa	-
P_e	Potencia efectiva	kW
p_m	Profundidad mínima	m
R_A	Resistencia en relación modelo–escala real de la embarcación	kN
R_{APP}	Resistencia al apéndice	kN
R_B	Resistencia adicional debido a la presencia de bulbo en la proa	kN
R_F	Resistencia friccional	kN
R_n	Número de Reynolds	-
R_R	Resistencia residual	kN
R_{T_e}	Resistencia total efectiva	kN
R_{total}	Resistencia total	kN
R_{TR}	Resistencia adicional debido a la popa sumergida	kN
R_W	Resistencia de olas	kN
$R_{W-A_{0.4}}$	Resistencia de olas con número de Froude inferior a 0.4	kN
$R_{W-B_{0.55}}$	Resistencia de olas con número de Froude superior a 0.55	kN
S	Área mojada del casco	m ²
S_{APP}	Área mojada del apéndice	m ²
T	Calado	m
T_F	Distancia vertical desde la línea de quilla hasta la sección central del bulbo	m
V	Velocidad de la embarcación	m/s
ν	Viscosidad cinemática	m ² /s

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
∇	Volumen del cuerpo sumergido	m ³
λ	Constante	-
ρ	Densidad	kg/m ³

Introducción

Colombia es el país con las mayores reservas de carbón en América Latina con recursos potenciales de 17 millones de t aproximadamente (UPME, 2005). En función a la existencia de una creciente demanda internacional de este producto, se hace necesario definir alternativas de transporte entre sus yacimientos y los principales puertos de exportación. Una de ellas es la utilización del recurso hídrico para el transporte de carbón como es el río Magdalena, la cual es la principal arteria fluvial que conecta los puertos ubicados en el norte del país con los principales campos de producción de este mineral. A pesar de ser la alternativa fluvial más viable para el transporte de volúmenes de carga, predominan en el país para el transporte de carbón los sistemas terrestre y ferroviario. Además, la mínima utilización que se hace a través del río se realiza por medio del sistema convoy [barcaza(s)-empujador] (Hernández, Herrera, Villalba, y Gómez, 2007) con pocas eficiencias operacionales comparado al sistema de embarcaciones con propulsión propia.

En este trabajo de investigación se explora el diseño conceptual de una barcaza autopropulsada para el transporte de carbón en el río Magdalena entre los puertos ubicados en la ciudad de Barranquilla y el puerto de Capulco localizado próximo al municipio de Gamarra en el departamento del Cesar. Las dimensiones principales de la embarcación se determinan considerando las condiciones físicas del río y restricciones de carga en calados permitidos.

El diseño conceptual se fundamenta en el análisis teórico de resistencia al avance y potencia. Para lo anterior se desarrolla la herramienta de cálculo RESMAG que permite la selección de la embarcación apropiada a las características físicas del río Magdalena. Los resultados son validados con programas especializados en el campo de la ingeniería naval.

En el capítulo 1 se habla del carbón y sus propiedades, clasificación y el manejo del material sólido tanto a nivel mundial como en Colombia. En el capítulo 2 se describe el área de navegabilidad, en ella explicaremos sus antecedentes, proyectos y ruta seleccionada. En el capítulo 3 hablaremos de las características básicas de las vías fluviales, del transporte fluvial en el mundo y en Colombia. En el capítulo 4 se explica la metodología propuesta para la selección de la embarcación. En el capítulo 5 se describe los resultados y su validación. Finalmente concluimos el trabajo con el análisis del capítulo anterior y proponemos recomendaciones para mejorar el proyecto.

Planteamiento y formulación del problema

Las condiciones del relieve colombiano, las temporadas invernales y otros factores afectan el transporte de carga, en su gran mayoría por vía terrestre. Por lo anterior, hace que el proceso sea muy costoso e ineficiente. En el caso específico del transporte de carbón, 9.43 por ciento de los yacimientos del material sólido es localizado en el interior del país¹ (UPME, s.f.), por lo que resulta potencialmente viable el uso del transporte fluvial aprovechando la presencia del principal recurso hídrico del país, el río Magdalena.

En Colombia, el transporte de carga puede reemplazarse por modos más eficientes y económicos. Esto reduce el costo de fletes internos y de exportación, ya que aporta al desarrollo de la economía nacional. Igualmente cuenta con la principal arteria fluvial que comunica las empresas productoras de este mineral ubicadas al interior del país con la costa norte donde se encuentran los principales puertos nacionales y de exportación.

Pocos avances e innovaciones se han realizado en la últimas décadas en relación a las embarcaciones fluviales que transportan este producto. Su geometría, líneas y formas son principalmente rectangulares de capacidades limitadas y que además necesitan desplazarse en grupos o convoy con la ayuda de empujadores.

¿Es posible diseñar una embarcación fluvial, que lleve en consideración el tipo de barcaza para transportar carbón y, además, que sea autopropulsable para las limitaciones físicas del río Magdalena?

Objetivos

General

Desarrollar una herramienta de cálculo que seleccione la embarcación apropiada a las condiciones del río Magdalena.

Específicos

- Investigar y establecer a través de la caracterización del río sus restricciones físicas relacionado con la navegabilidad.
- Realizar el análisis paramétrico de las líneas y la geometría del casco a partir de una base de datos de embarcaciones fluviales tipo barcaza.
- Revisar y evaluar el potencial carbonífero en Colombia y sus medios de transporte.
- Evaluar el empleo de embarcaciones fluviales al transporte de carbón y definir una base de modelos para este tipo de embarcaciones.
- Validar los resultados con programas desarrollados en el área de ingeniería naval.

¹Reservas medidas del carbón en la minería colombiana correspondiente a los departamentos de Antioquia, Boyacá, Cundinamarca, Norte de Santander y Santander.

Justificación

- El proyecto es relevante, ya que el río Magdalena posee un potencial muy alto como alternativa de transporte. El afluente ofrece una vía natural que podría conectar los principales yacimientos del interior del país con los puertos de exportación e importación localizados en la costa norte colombiana.
- Actualmente, de acuerdo a las políticas del gobierno central, se proyectan grandes obras de dragado y encauzamiento. De acuerdo con Hernández y cols. (2007), comparando con los diferentes modos de transporte en Colombia, el menor costo para transportar 7,200 t de carga recorriendo 500 km sería el modo fluvial con 64 t/km frente al modo más utilizado como es el modo terrestre con 92 t/km y al modo ferroviario con 78 t/km representando mayores costos. Por lo tanto, lo convierte la principal hidrovía del país que presentaría mayores ventajas económicas.
- En comparación con las barcazas que necesitan ser empujadas por remolcadores, en el proyecto se diseña conceptualmente una barcaza autopropulsable con volúmenes de carga mayores y mejor maniobrabilidad.
- Para el proyecto de ampliación del río Magdalena el país recibirá bonos de carbono, ya que se favorecerá en el programa de beneficios del Protocolo de Kioto. Por esta razón representa ventajas ambientales (Chacón, 2013).
- De acuerdo a especialistas y al mercado internacional, el carbón colombiano posee propiedades físicas únicas que lo hace altamente competitivo y con reconocida demanda a nivel mundial, generando grandes beneficios económicos para el desarrollo del país.

CAPÍTULO 1

El carbón en Colombia

Iniciamos en este capítulo con las propiedades del carbón en general, sus usos y clasificación. También se hablará de la obtención de este mineral tanto en Colombia como a nivel mundial. Para el caso de nuestro país mencionaremos las etapas del material sólido, las reservas por departamentos, cifras y como afecta la minería de carbón al medio ambiente.

1.1. Propiedades del carbón

El carbón es un combustible sólido de origen vegetal, generalmente de color negro o marrón, con grandes cantidades de carbono y otros elementos como azufre, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno, que quedan como cenizas al quemarlo. Para James Morton Schopf² define el carbón como “un material que contiene más de 50 por ciento en peso (70 por ciento en volumen), materia carbonosa producida por la compactación y la induración de restos de plantas alteradas o, en estos casos, depósitos de turba” (Encyclopædia Britannica, 2012c).

Las diferencias de densidad hacen lo posible para mejorar la calidad del carbón. Por ejemplo, varía entre 1.1 y 1.5 Mg/m³ o g/cm³. Además es ligeramente más denso que el agua (1.0 g/cm³) y menos denso que la mayoría de roca y material mineral. Una de las razones de la variación de su densidad se debe a la presencia de poros, ya que puede contener metano que se libera durante las operaciones mineras y forman mezclas explosivas con el aire. “La presencia de espacio de los poros es importante en la producción de coque, licuefacción, y la generación de área superficial alta de carbono para la purificación de agua y gases” (Encyclopædia Britannica, 2012c).

Otras propiedades pueden afectar la forma que se utiliza el carbón, tales como la dureza y la temperatura de fusión de cenizas. También, una muy importante para las propiedades del material sólido es su reflectividad o reflectancia. Para los geólogos, su utilización es notable para anticipar el potencial en busca de hidrocarburos sólidos o líquidos que se exploran para el petróleo. Las propiedades del carbón varían según las localidades mineras (Encyclopædia Britannica, 2012c).

²Geólogo estadounidense (†1911-1978)

Su uso es muy fundamental. Los más significativos están en la generación de electricidad, producción de acero, fabricación de cemento y combustible líquido (World Coal Association, s.f.).

1.2. Clasificación

El carbón se clasifica de diferentes maneras. Una de ellas, según su contenido de carbono fijo, como la turba, con bajo contenido y alto índice de humedad; el lignito, de contenido alto es considerado el carbón de peor calidad; el carbón bituminoso, su poder calorífico es superior debido a su alto contenido; y la antracita, mayor contenido y máximo poder calorífico (Microsoft Encarta, 2009). También se clasifica el mineral según ASTM³ (tabla 1).

TABLA 1. Clasificación del carbón según ASTM

Rango y grupo	Porcentaje de carbón fijo [•]		Porcentaje de material volátil [•]		Valor calorífico*					Características de aglomeración	
	Igual o superior a	Inferior a	Superior a	Igual o inferior a	BTU/lb		MJ/kg				
					Igual o superior a	Inferior a	Igual o superior a	Igual o superior a	Inferior a		
Antracítico											
Meta-antracita	98	-	-	2	-	-	-	-	-	-	Sin aglomerar
Antracita	92	98	2	8	-	-	-	-	-		
Semiantracita [†]	86	92	8	14	-	-	-	-	-		
Bituminoso											
Volatilidad baja	78	86	14	22	-	-	-	-	-	Comúnmente aglomerado [§]	
Volatilidad media	69	78	22	31	-	-	-	-	-		
Volatilidad alta A	-	69	31	-	14,000 [‡]	-	-	32.6	-		
Volatilidad alta B	-	-	-	-	13,000 [‡]	14,000	-	30.2	32.6		
Volatilidad alta C	-	-	-	-	11,500	13,000	-	26.7	30.2		
					10,500	11,500	-	24.4	26.7	Aglomerado	
Sub bituminoso											
Tipo A	-	-	-	-	10,500	11,500	-	24.4	26.7	Sin aglomerar	
Tipo B	-	-	-	-	9,500	10,500	-	22.1	24.4		
Tipo C	-	-	-	-	8,500	9,500	-	19.3	21.1		
Lignito											
Tipo A	-	-	-	-	6,300	8,300	-	14.7	19.3	Sin aglomerar	
Tipo B	-	-	-	-	-	6,300	-	-	14.7		

[•]Seco, base mineral libre de materias. ^{*}Húmedo, base mineral libre de materias. El carbón húmedo contiene humedad natural, pero no incluye agua visible en la superficie. [†]Si aglomera, clasifica en el grupo de baja volatilidad de la base bituminosa. [‡]El carbón contenido en 69% o más de carbón fijo en seco, base mineral libre de materias son clasificados, independiente del valor calorífico. [§]Hay muchas variedades sin aglomerar en estos grupos de base bituminoso; estos también son excepciones notables en el grupo bituminoso de volatilidad alta C.

Fuente: Encyclopædia Britannica, 2012c

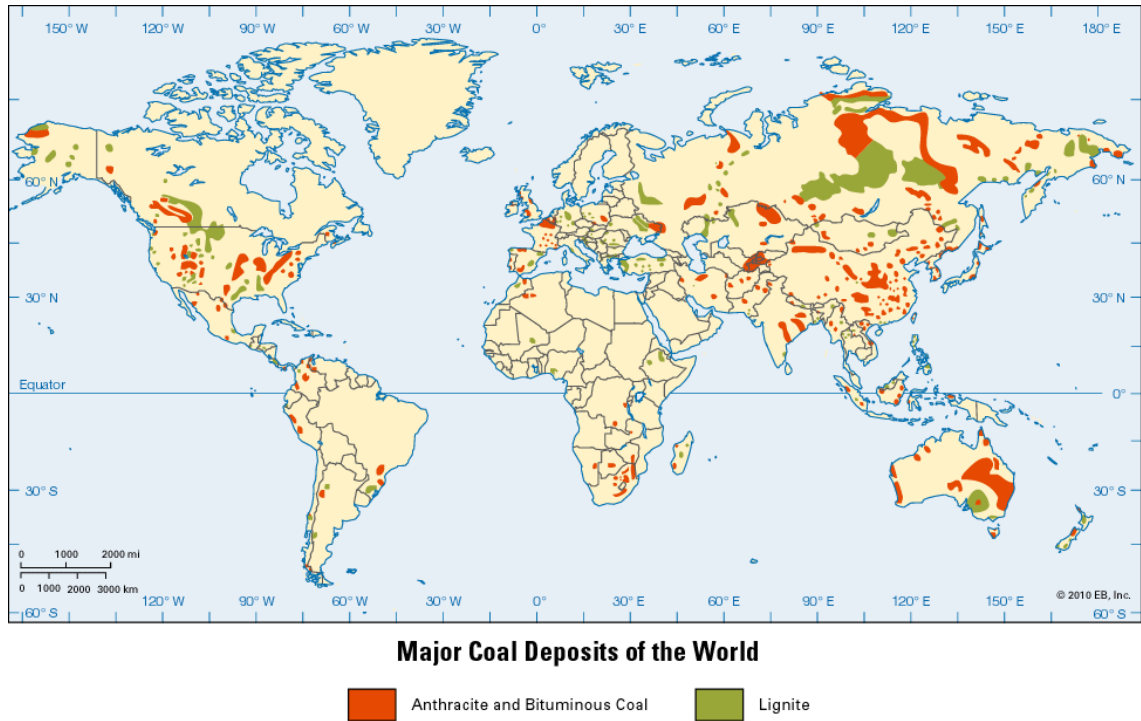
1.3. Carbón a nivel mundial

Actualmente los depósitos de gran importancia para la comercialización del carbón se encuentran en Europa, Asia, Australia, Sudáfrica y América del Norte. En la figura 1 muestra los yacimientos de este material en el mundo. Las cifras para evaluar las reservas mundiales y los recursos son difíciles, ya que radica en la falta de datos precisos para cada país. Debido a esto, existen dos problemas fundamentales, la primera se refiere a las cantidades que sean recuperables, en este caso, reservas probadas; la segunda, las cantidades que no sean recuperables, o recursos geológicos (Encyclopædia Britannica, 2012c).

El primer problema, un lecho de carbón debe tener un espesor mínimo de 0.6 m y ser enterrado a cierta profundidad máxima de 2,000 m aproximadamente. Estos valores no son fijos, ya que cambian con la calidad, demanda y facilidad de extraer el material sólido, ya sea en la superficie o subterránea. El segundo problema, es más importante el

³ American Society for Testing and Materials

FIGURA 1. Importantes yacimientos del carbón en el mundo



Fuente: Encyclopædia Britannica, 2012c

número de años que el carbón estará disponible que la cantidad de recursos del componente sólido, lo cual significa que las reservas mundiales deben durar entre 300 y 500 años. Estos recursos son difíciles de estimar (Encyclopædia Britannica, 2012c). En la tabla 2 presenta los 10 países productores de carbón en el mundo según lo estimado en el año 2012 y en la tabla 3 muestra la cantidad total de las reservas probadas del carbón conforme a los datos registrado hasta el año 2005.

TABLA 2. Países productores de carbón (estimado en 2012)

País	Mt	País	Mt	País	Mt	País	Mt
Productores				Productores de carbón térmico			
China	3,549	Rusia	359	China	3,039	Rusia	201
EE.UU.	935	Sudáfrica	259	EE.UU.	782	Australia	200
India	595	Alemania	197	India	504	Kazajistán	108
Indonesia	443	Polonia	144	Indonesia	440	Colombia	85
Australia	421	Kazajistán	126	Sudáfrica	258	Polonia	68
Productores de carbón coquizable				Productores de lignito			
China	510	Canadá	31	Alemania	185	Polonia	64
Australia	147	Mongolia	21	Rusia	78	Grecia	62
EE.UU.	81	Ucrania	18	Australia	73	República Checa	43
Rusia	75	Kazajistán	13	EE.UU.	72	India	43
India	47	Polonia	12	Turquía	66	Serbia	38

Mt = Millones de t

Fuente: World Coal Association, 2013

TABLA 3. Reservas probadas del carbón en el mundo

País/Región	Millones de t			Total a nivel mundial (%)
	Antracita y Bituminoso	Sub-bituminoso y Lignito	Total	
Canadá	3,471	3,107	6,578	0.70
Estados Unidos	11,338	135,305	246,643	27.10
México	860	351	1,211	0.10
Total América del Norte	115,669	138,763	254,432	28.00
Brasil	-	10,113	10,113	1.10
Colombia	6,230	381	6,611	0.70
Otros países del Sur y Centroamérica	1,471	1,698	3,169	0.30
Total Sur y Centroamérica	7,701	12,192	19,893	2.20
Alemania	183	6,556	6,739	0.70
Bulgaria	4	2,183	2,187	0.20
Grecia	-	3,900	3,900	0.40
Hungría	198	3,159	3,357	0.40
Kazajistán	28,151	3,128	31,279	3.40
Polonia	14,000	-	14,000	1.50
Reino Unido	220	-	220	<0.05
República Checa	2,094	3,458	5,552	0.60
Rumanía	22	472	494	0.10
Rusia	49,088	107,922	157,010	17.30
Turquía	278	3,908	4,186	0.50
Ucrania	16,274	17,879	34,153	3.80
Otros países europeos y euroasiáticos	1,744	22,274	24,018	2.60
Total Europa y Eurasia	112,256	174,839	287,095	31.60
Sudáfrica	48,750	-	48,750	5.40
Otros países africanos	910	174	1,084	0.10
Total África y Medio Oriente	51,502	174	1,084	0.10
Australia	38,600	39,900	78,500	8.60
China	62,200	52,300	114,500	12.60
India	90,085	2,360	92,445	10.20
Indonesia	740	4,228	4,968	0.50
Pakistán	-	3,050	3,050	0.30
Vietnam	150	-	150	<0.05
Otros países de Asia y del Pacífico	97	215	312	<0.05
Total Asia y Pacífico	193,256	105,243	298,499	32.80
Total Mundo	478,771	430,293	909,064	100.00

Fuente: Encyclopædia Britannica, 2012c

Para el transporte de carbón, las distancias cortas se llevan a cabo de manera terrestre. En cambio, para trayectos largos se usan trenes y barcos. En la parte marítima, el carbón se comercializa de dos tipos: térmica, que ha aumentado en promedio 7 por ciento cada año; y coque, que se ha incrementado en un 1.6 por ciento al año (World Coal Association, 2012a). En la tabla 4 muestra los países exportadores e importadores de este material sólido.

1.4. Carbón en Colombia

En los últimos años se ha aumentado las exportaciones de este material sólido debido a la creciente demanda mundial, ya que el contenido que tiene el carbón colombiano es bajo en cenizas y en azufre pero alto en volatilidad y poder calorífico (Boada Sáenz Ingenieros, 2008).

TABLA 4. Países exportadores e importadores de carbón (estimado en 2012)

País	Total (Mt)	Térmico (Mt)	Coquizable (Mt)
Exportadores			
Indonesia	383	380	3
Australia	301	159	142
Rusia	134	116	18
Estados Unidos	114	51	63
Colombia	82	82	0
Sudáfrica	74	74	0
Canadá	35	4	31
Importadores			
China	289	218	71
Japón	184	132	52
India	160	123	37
Corea del Sur	125	94	31
China Taipéi (Taiwán)	64	56	8
Alemania	45	36	9
Reino Unido	45	40	5

Mt = Millones de t

Fuente: World Coal Association, 2013

La cadena de carbón en Colombia muestra por etapas de la siguiente manera (figura 2) (UPME, 2005):

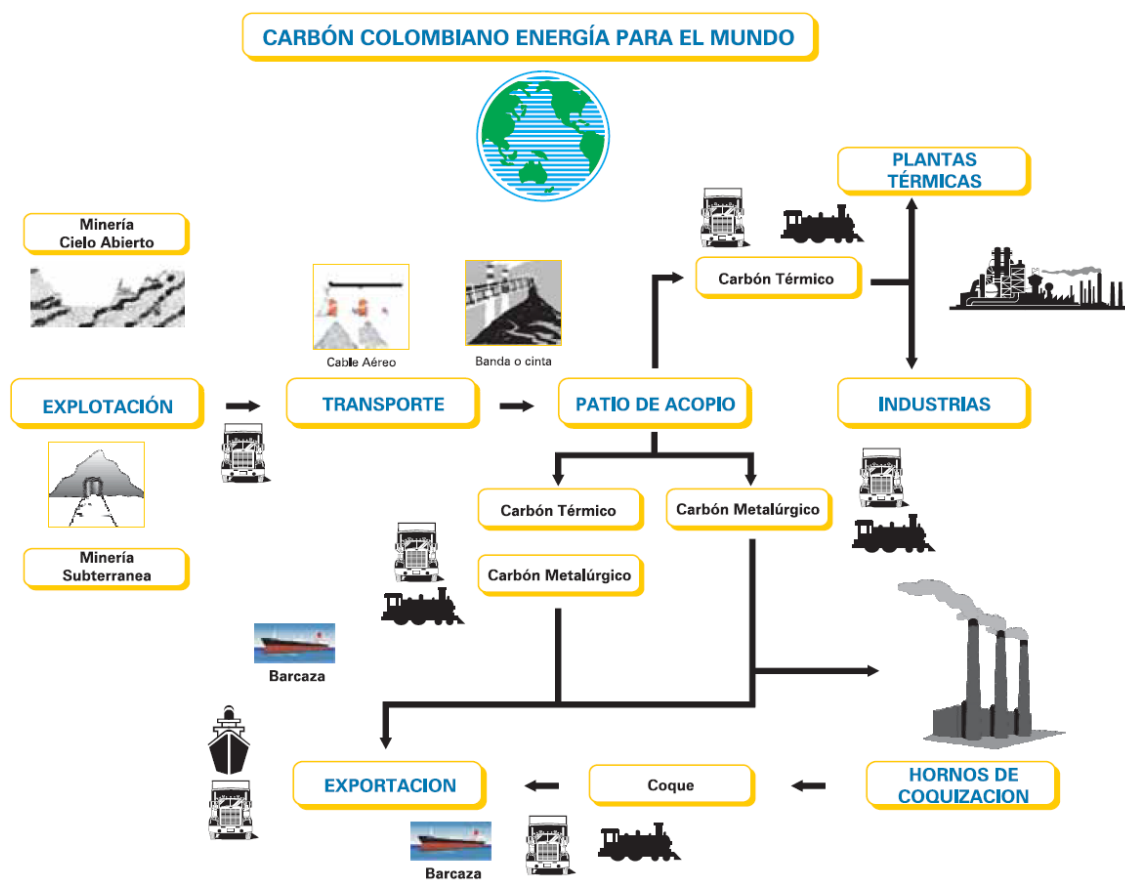
- Explotación - reservas y calidades
- Explotación - desarrollo y montaje, preparación y producción
- Beneficio - clasificación y lavado del carbón
- Transformación en la producción de coque y otros procesos
- Transporte desde la mina hasta el sitio de beneficio y los patios de acopio
- Transporte, comercialización, distribución y usos

Las mayores reservas medidas se ubican en los departamentos de La Guajira, Cesar y Córdoba con el 84 por ciento del total de las reservas del país, seguido de Cundinamarca y Boyacá con el 6 por ciento, y por último Santander, Antioquia, Valle del Cauca y Cauca con el 3 por ciento (tabla 5). Boyacá cuenta con el 26 por ciento del total de las reservas indicadas, seguido de Cesar y Cundinamarca. Se estima que el 68 por ciento es de tipo térmico y el 32 por ciento es Coquizable (UPME, s.f.).

Colombia se ubica entre los 10 países productores de carbón en el mundo con una carga 74 millones de t. La minería de carbón juega un papel muy importante en la economía colombiana. Según cifras, durante el año 2009 el país ganó más de USD\$5 billones en ingresos de exportación de carbón (figura 3) (World Coal Association, 2012b).

Durante el año 2013 la producción de carbón alcanzó hasta 85.5 millones de t. En el último trimestre creció el 18 por ciento (3.8 millones de t) en comparación al año

FIGURA 2. Cadena del carbón en Colombia



Fuente: UPME, 2005

TABLA 5. Reservas de carbón en la minería colombiana

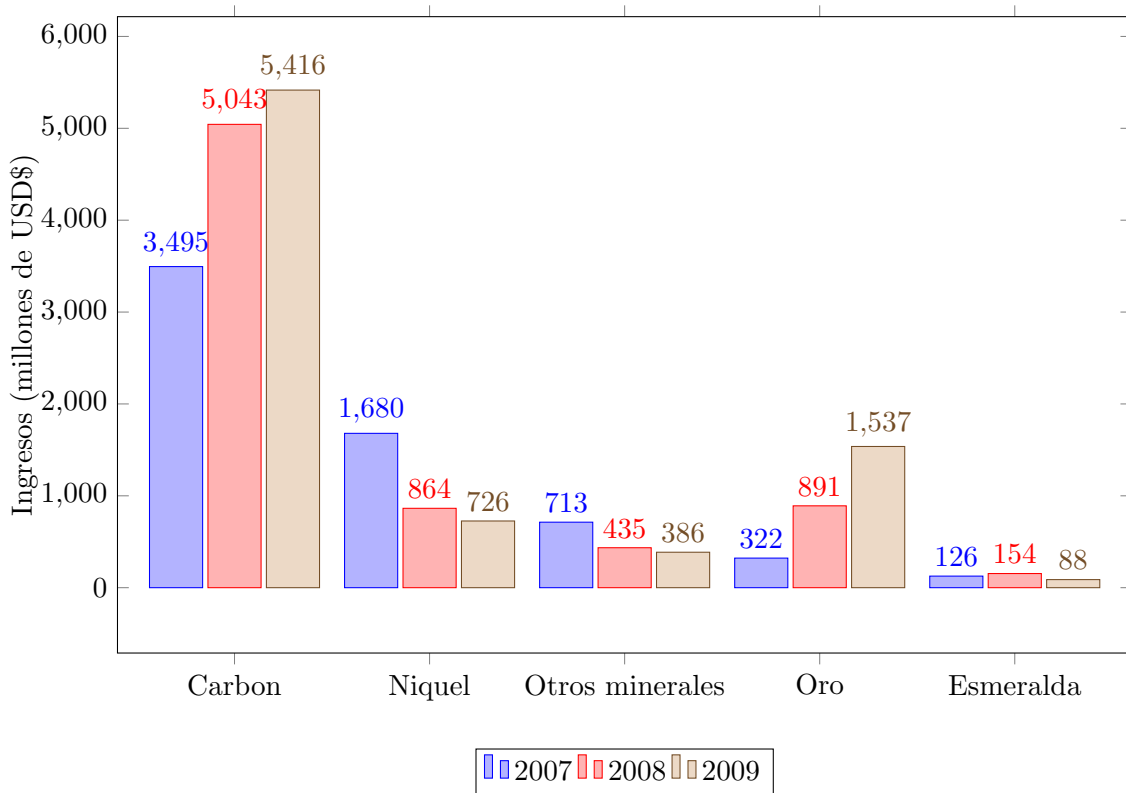
Zonas carboníferas	Recursos y reservas (Mt)		Tipo de carbón
	Medidas	Indicadas	
Antioquia	90.0	225.0	Térmico
Boyacá	170.4	682.7	Térmico y Coquizable
Cauca	16.4	66.8	Térmico
Cesar	1,933.0	589.0	Térmico
Córdoba	381.0	257.0	Térmico
Cundinamarca	241.9	538.7	Térmico y Coquizable
La Guajira	3,670.0	-	Térmico
Norte de Santander	68.0	101.0	Térmico y Coquizable
Santander	57.1	114.0	Térmico y Coquizable
Valle del Cauca	20.1	22.4	Térmico
Total del país	6,647.9	2,596.6	

Mt = Millones de t

Fuente: UPME, s.f.

anterior. Boyacá, con 2.7 millones de t y Cundinamarca, con 2.4 millones de t son los departamentos que presentaron la mayor producción. Según cifras, el 94.3 por ciento se

FIGURA 3. Ingresos de exportación de la minería en Colombia



Fuente: World Coal Association, 2012b

destinó a la exportación; el resto se destinó al consumo interno (Agencia Nacional de Minería, 2014).

En la minería en Colombia existen ventajas económicas, ya que los proyectos que se ejecutan son de gran escala, atrayendo inversiones y costosos beneficios tributarios. Por otra parte, sus desventajas son aún mayores, debido a la explotación minera ilegal, modelo de política para su extracción y conflictos armados por grupos al margen de la ley. Como consecuencia a estos problemas generan aspectos negativos ambientales, sociales y económicos. La explotación a cielo abierto causa destrucción ambiental a pesar de que en nuestro país es uno de los más biodiversos del mundo. Para Julio Fierro⁴, esta problemática no tiene comparación con otros países como Chile, ya que su biodiversidad es baja y en ese país es seco. Sin embargo, en Costa Rica, por poseer riqueza natural, la ex-presidenta de ese país, Laura Chinchilla, prohibió la minería a cielo abierto en toda la nación. Según el investigador comenta “la minería en Colombia no produce riquezas, sino que, por el contrario, los estudios demuestran que los grandes sectores mineros generan más pobreza y desempleo en el país”. En el caso del carbón, gran parte de la minería ilegal se realiza en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Santander. Lo más grave es que no cuenta con licencia ambiental y particularmente se ubican en los páramos (Agencia de Noticias UN, 2014).

⁴Experto de la Universidad Nacional de Colombia, geólogo del grupo de investigación *Terrae* y docente del Instituto de Estudios Ambientales (IDEA)

Descripción del área de navegabilidad

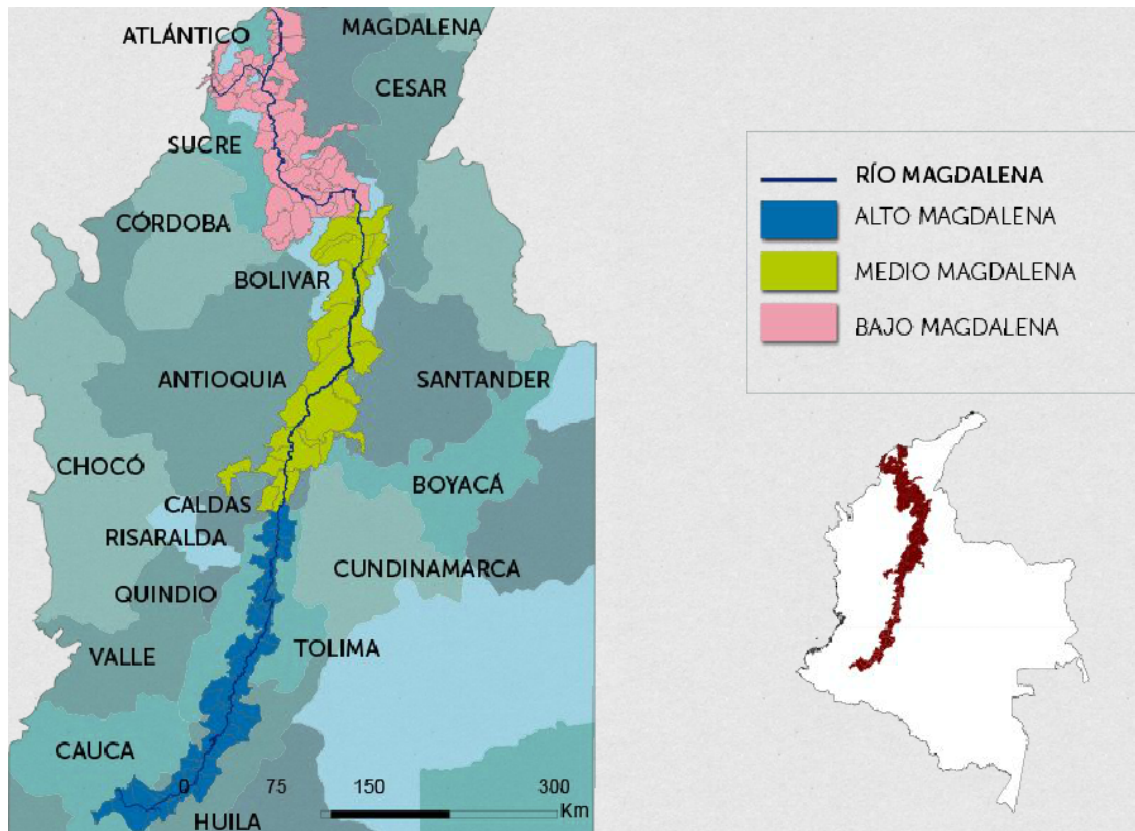
El río Magdalena fluye desde el sur hacia el norte del país. Su longitud es de 930 mi (1,497 km) (Encyclopædia Britannica, 2012e). Nace en el páramo de las Papas, localizado en el sector de la cordillera de los Andes comprendido en el departamento de Huila. Recorre los departamentos de Tolima, Cundinamarca, Boyacá, Caldas, Antioquia, Santander, Cesar, Bolívar, Magdalena y Atlántico. Además recibe los ríos San Jorge, Cesar y Cauca en la llanura de inundación de las tierras bajas pantanosas del norte. Su desembocadura finaliza en el mar Caribe por dos puntos: en Bocas de Ceniza, cerca de la ciudad de Barranquilla; y en el canal de Dique, próximo a la ciudad de Cartagena (figura 4) (CORMAGDALENA, 2013c).

El río está dividido en tres sectores: alto, medio y bajo. El primer sector recorre algunos municipios cercanos al macizo colombiano y otros como San Agustín e Isnos, Timaná, Neiva, Villavieja, Girardot y Ambalema; el segundo sector fluye por los municipios de Marquita, Honda, Puerto Nare, Puerto Berrío, Barrancabermeja y Puerto Wilches; el último sector termina por los municipios de Gamarra, El Banco, San Martín de Loba, Mompo, Magangué y Barranquilla (ICANH, 2010). “En la cuenca del río Magdalena habita el 80 por ciento de la población colombiana, con 128 municipios ribereños y seis departamentos, donde se realiza el 85 por ciento de la actividad económica, que genera el 80 por ciento del PIB⁵ del país” (Chacón, 2013).

La navegabilidad del río es considerada como una vía limitada a pesar de su longitud, extensión y potencial capacidad de comunicar las minerías que están ubicadas en el interior del país con los principales puertos de la zona norte colombiana. Esto es debido a que no existe infraestructura apropiada para el desarrollo de la navegación. Los dos últimos sectores son navegables comercialmente con longitud de 908 km (Revista Semana, 2013), a menor escala desde Puerto Berrío hasta Barrancabermeja, y a mayor escala hasta Bocas de Ceniza. Lo anterior significa que los recorridos que tienen acceso a los puertos más importantes del país están ubicados en Cartagena y Barranquilla. Hoy en día la demanda de carga anual para el transporte fluvial es de 2.48 millones de t (2004), en el caso de cargas en general, incluyendo carbón, es de aproximadamente 0.90 millones de t (CORMAGDALENA, 2013c).

⁵Producto Interno Bruto

FIGURA 4. Mapa del río Magdalena



Fuente: CORMAGDALENA, 2013b

2.1. Antecedentes

Anteriormente los puertos que están ubicados cerca del río presentaron falta de actividades de carga de manera fluvial. Además, la inversión pública para este medio de transporte ha sido escasa e insuficiente.

Para el transporte de contenedores no existe flota actual para este tipo aunque esté poco desarrollado (CORMAGDALENA, 2013c). Las dificultades de navegabilidad del río se deben al aumento de la erosión por cambios de uso del suelo, causando el exceso de sedimento. También, como la deforestación por actividades humanas, ya que corresponde a la tercera parte del transporte de sedimentos en el Magdalena (Colorado, 2012). A pesar de que se han anunciado planes para la recuperación del afluente en las dos últimas décadas, ningún proyecto prosperó (Revista Semana, 2013).

Sin embargo, se han realizado proyectos que hasta el momento están en funcionamiento en el río. Uno de ellos es la construcción del primer remolcador para el transporte de carga en el país llamado *HUMBERTO MUÑOZ*. Esta embarcación es considerada la más moderna y con mayor capacidad. Sus dimensiones principales son de 40 m de eslora, 12 m de manga, 10 m de calado para un puntal de 12 m, y 3 motores eléctricos con capacidad de hasta 2,325 hp (1,733.75 kW). Fue construido por *Navierra Fluvial Colombiana S.A.*

que es la única empresa de transporte fluvial que cuenta con un astillero y fue diseñado por la empresa *CT Marine Inc.* (Revista Dinero, 2010).

2.2. Proyectos

Los proyectos de mediano y largo plazo se realizarán para la recuperación de la navegabilidad que incluyen la construcción de puertos, sistemas de navegación satelital, obras de encauzamiento y mantenimiento del canal navegable.

Durante el acuerdo para la prosperidad número 64, el *Ministerio de Transporte* contratará los diseños para el nuevo puente Pumarejo con el fin de mejorar la navegabilidad del río, ya que la altura entre el lecho del caudal y la parte baja del puente actual no permite el paso de embarcaciones de mayor tamaño (Ministerio de Transporte, 2012). Para el proyecto de ampliación del río, las obras se iniciarán a mediados del año 2014. Los consorcios deben garantizar las condiciones mínimas de navegabilidad durante los próximos 13 años, con 2.18 m de profundidad, 52 m de ancho de canal y 900 m de curvatura (Chacón, 2013). Para la demanda futura de carga se espera que sea 8.3 millones de t al año, en el caso del carbón se estima que el producto alcance con un total de 1.8 millones de t (CORMAGDALENA, 2013c).

La ruta para recuperar la navegabilidad del río Magdalena está entre los municipios de Puerto Salgar/La Dorada y la ciudad de Barranquilla. Tiene una longitud de 908 km y doble vía para 150 km. Se realizarán obras de encauzamiento y mantenimiento del canal navegable. Para las obras de encauzamiento se ejecutarán desde Puerto Salgar/La Dorada hasta Barrancabermeja por dos sectores: el primero, desde Puerto Salgar/La Dorada hasta Puerto Berrío; el segundo, hasta Barrancabermeja. Además, cuenta con 15 tramos y 156 intervenciones, todo con un tiempo estimado de 4 años y un costo de inversión por COP\$800 mil millones. Para el mantenimiento del canal navegable se debe garantizar las profundidades del río para 7 ft (2.13 m) desde Puerto Salgar/La Dorada hasta Barranquilla, y 37.5 ft (11.43 m) en Barranquilla y Bocas de Ceniza. Lo anterior, los tipos de obras son por remoción mecánica de sedimentos y dragado hidráulico. Las embarcaciones para el proyecto estarán conformado por un remolcador y tres barcasas para las dimensiones de 240 m de eslora, 25 m de manga y 1.8 m de calado para transportar 7,200 t de carga (Molina, 2013).

Se tiene en cuenta planes ambientales en estos proyectos. Uno de ellos es la recuperación de la cantidad y la calidad del agua y manejo de los caudales del río, garantizando el potencial de energía, la potabilización, el riego y los recursos naturales e hidrobiológicos (CORMAGDALENA, 2013c). Juan Darío Restrepo⁶ comenta “mientras la cuenca del Magdalena no sea tratada integralmente no tendremos nunca soluciones. Hay que impulsar una política unificada para que todas las corporaciones regionales del río Magdalena tengan reglas de control de calidad del agua, una política integrada” (Correa, 2013). Además, el proyecto será inscrito en el programa de beneficios del Protocolo de Kioto, permitiendo a Colombia recibir bonos de carbono (Chacón, 2013).

Actualmente la empresa *Impala* apoya las operaciones fluviales en cuanto al transporte multimodal por el río Magdalena y el canal de Dique. Cuenta con una flota actual de 34 barcasas para carga seca, 19 para el manejo de líquidos y 11 remolcadores. Una de sus

⁶Profesor de la Universidad de EAFIT, biólogo marino, doctor en Oceanografía y uno de los expertos que más ha estudiado en el país la cuenca del río Magdalena

mayores apuestas es la construcción del Puerto de Barrancabermeja, además, su flota está proyectada para su primera fase con 150 barcazas y 23 remolcadores. Se espera que el nuevo puerto demande inversiones por USD\$300 millones para una capacidad de carga de 1.5 millones de t al año que incluye carbón, graneles sólidos, hidrocarburos, contenedores y carga en general (Figuroa, 2013).

2.3. Ruta seleccionada

La *Sociedad Portuaria de Caribe S.A.* desarrolla dos nuevos puertos especializado en carbón y graneles sólidos, desde Capulco, ubicado en el departamento del Cesar, hasta Barranquilla con una distancia de 500 km. Según su visión, para el 2018 será “el puerto público con mayor eficiencia en el movimiento de graneles sólidos en Colombia, sirviendo de enlace logístico y alternativa portuaria al desarrollo carbonífero del país, soportado en el transporte fluvial de grandes volúmenes de carga a través del río Magdalena” (Sociedad Portuaria del Caribe, s.f.).

El puerto de Capulco cuenta con un área de 16 ha, un muelle para barcazas, destinado solamente para el cargue de carbón de exportación y descargue de granos y mineral. Para su primera fase alcanzará la carga de 1 millón de t anuales (figura 5) (Sociedad Portuaria del Caribe, s.f.).

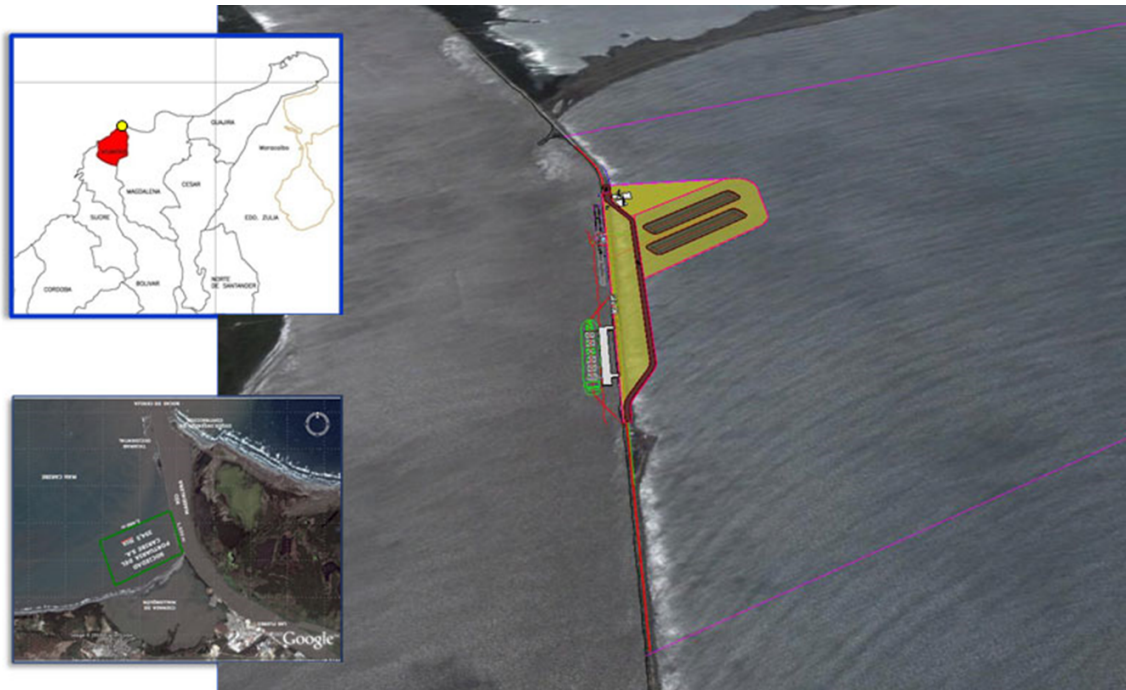
FIGURA 5. Puerto de Capulco



Fuente: Sociedad Portuaria del Caribe, s.f.

El puerto SP Caribe en Barranquilla está ubicado en la desembocadura del río (Bocas de Ceniza) que ofrece condiciones optimas en cuanto al calado, que es de 40 ft (12.19 m). Tiene muchas ventajas como su ubicación, las condiciones naturales, transporte más eficiente en términos de grandes volúmenes de carga y costos y la logística fluvial. Cuenta con un área de 354 ha y dos muelles. El primero, destinados para el cargue de carbón de exportación y el descargue de granos y mineral. El segundo, para el descargue y almacenamiento del carbón en las barcazas y para el cargue de barcazas de granos y minerales. Para su primera fase alcanzará la carga de 3 millones de t anuales (figura 6) (Sociedad Portuaria del Caribe, s.f.).

FIGURA 6. Puerto de Barranquilla



Fuente: Sociedad Portuaria del Caribe, s.f.

Por todo lo anterior, el presente estudio se centrará en el diseño conceptual del casco de una embarcación con propulsión propia para el sector bajo del río Magdalena entre los puertos de Barranquilla y Capulco. Se pueda ofrecer toda una potencialidad frente a las condiciones de navegabilidad proyectada para el afluente.

Transporte fluvial

Conforme al capítulo anterior, se vienen desarrollando proyectos para la construcción de dos nuevos puertos especializados en carbón y sólidos a granel. De igual manera se espera que en el puerto de Capulco entre en la primera fase para alcanzar la carga de 1 millón de t anuales, mientras que en el puerto de Barranquilla se espera que la carga aumente hasta 3 millones de t (Sociedad Portuaria del Caribe, s.f.).

En este capítulo se presenta una visión general del transporte fluvial tanto a nivel mundial como en Colombia. Características básicas de las vías fluviales, comparación de los modos de transporte, tipos de embarcaciones, clasificación de la carga fluvial, dimensiones y conformación típica de los convoy de carga y datos del nivel del río Magdalena a la altura del municipio de Gamarra serán también incluidos.

El transporte por las vías fluviales pueden ser de tres formas: ríos navegables; aquellas que están hechas para navegar por canalización (dragado y protección de las orillas); y vías artificiales o canales. Muchas de estas tienen usos múltiples además de la navegación, como el drenaje, riego para el abastecimiento de agua y la generación de energía hidroeléctrica. Para que los ríos sean plenamente navegables se debe analizar su topografía y los cambios en los niveles de agua (Encyclopædia Britannica, 2012b).

3.1. Características básicas de las vías fluviales

Las vías fluviales se clasifican en tres categorías: ríos navegables, ríos canalizados y canales artificiales.

El primero está sujeta a interrupciones estacionales que conducen a los movimientos de los canales y para la formación de bancos de arena. Hay que reducir al mínimo los riesgos naturales para obtener un canal de sección transversal uniforme que sigue el valle natural (Encyclopædia Britannica, 2012b).

El segundo se lleva a cabo la construcción de esclusas que crean una serie de pasos, cuya longitud depende de la pendiente natural de valle y en aumento de cada cerradura. Requieren protección de las orillas contra la erosión y, en algunos casos, la protección del cauce contra las pérdidas por filtración (Encyclopædia Britannica, 2012b).

El tercero las vías fluviales en algunos puntos se apartan de los valles fluviales naturales y pasan a través de colinas y cuencas hidrográficas a lo largo de un canal artificial. Se necesita protección contra la erosión y la filtración. La selección de la ruta de un canal artificial proporciona un desplazamiento más rápido (Encyclopædia Britannica, 2012b).

3.2. Transporte fluvial a nivel mundial

Los países que usan las vías fluviales desempeñan un papel económico cada vez más importante. Para productos básicos, en particular productos a granel como granos, carbón y mineral, el transporte fluvial sigue siendo el más económico que cualquier otro tipo de transporte (Encyclopædia Britannica, 2012b).

En Estados Unidos, el río Mississippi es la principal arteria fluvial para el transporte de carbón que conecta a otros afluentes como Ohio, Missouri, entre otros. El material sólido es usado en su mayor porcentaje para el sector eléctrico, y otro para exportación en los puertos de Nueva Orleans. El modo de transporte más usado es el ferroviario, seguido de terrestre, barcazas y otros medios (U.S. Energy Information Administration, 2012). El río es navegable aproximadamente 1,800 km desde Minneapolis hasta Nueva Orleans. Además de tener un canal profundo y 700 km sin ninguna esclusa, un remolcador de empuje puede llevar 40,000 t de carga con un montaje de 40 barcazas y una potencia de empuje de 9,000 hp (6,711.30 kW). En el río Ohio, para evitar doble esclusas las cámaras originales de bloqueo se alargaron de 600 ft (182.88 m) a 1,200 ft (365.76 m). En las costa oeste de ese país se están desarrollando proyectos para la navegabilidad, uno de ellos es el río Columbia que será navegable a 500 km desde el Pacífico hasta Lewiston, Idaho (Encyclopædia Britannica, 2012b).

En Europa el transporte fluvial no solo transporta mercancías, también pasajeros. La red de vías navegables de Francia son aproximadamente 5,000 mi (8,046.72 km) basados principalmente en sus ríos pero muchos de los canales son de baja capacidad con un estándar de hasta 1,350 t (Encyclopædia Britannica, 2012b). Durante el año 2011 se han realizado 7.9 mil millones de t/km, se han producido 58.7 millones de t (con exclusión del transporte en el río Rin). En comparación con el año 2010 ha disminuido -2.4 por ciento en t/km y -3 por ciento. Sin embargo, el transporte fluvial sigue siendo generalmente superior frente a otros medios, con +38,4 por ciento en t/km en los últimos 15 años (Voies Navigable de France, 2012).

Los Países Bajos son pioneros en la flota del transporte fluvial a diferencia de los países europeos. El sistema de canales están basados en los grandes ríos naturales (Encyclopædia Britannica, 2012b). Su flota es considerada la más grande y moderna del continente, ya que cuenta con una amplia gama de tipos de embarcaciones con capacidad total de carga hasta 7.4 millones de t. Alrededor del 50 por ciento de toda la flota de Europa Occidental está bajo la bandera holandesa. La red de vías navegables de Europa representa cerca de 24,709 km de los cuales 6,000 km son holandesas, puesto que más de 500 km son rutas principales. Una barcaza de mayor tamaño puede transportar hasta 16,000 t, lo que equivale a 660 camiones a la vez. En cambio, la más pequeña puede llevar hasta 362 t (14 camiones) (Bureau Voorlichting Binnevaart, 2011). En la figura 7 muestra un ejemplo de transporte fluvial en el canal Ámsterdam-Rin.

FIGURA 7. Canal Ámsterdam-Rin en Los Países Bajos



Fuente: Encyclopædia Britannica, 2012a

3.3. Transporte fluvial en Colombia

Una de las características del transporte de carga fluvial es que requiere ser movilizadas en gran volumen y distancias considerables. Existe la comparación entre los diferentes modos de transporte para transportar 7,200 t a 500 km (tabla 6). Los medios más usados son el transporte terrestre y el transporte fluvial, pero ambos tienen una gran diferencia en todos sus aspectos, incluyendo el costo total (Hernández y cols., 2007).

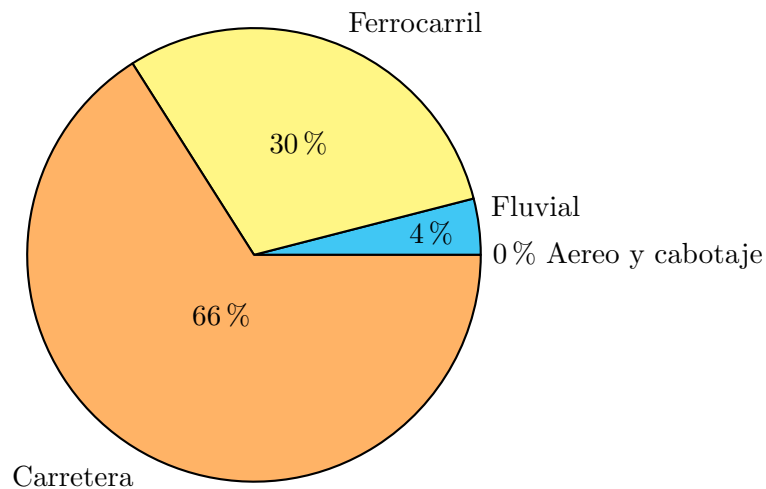
TABLA 6. Comparación entre los diferentes modos de transporte para 7,200 t a 500 km

Modo	t por unidad	Equipo (unidades)	Costo (t/km)	Velocidad (km/s)	Total (COP\$ millones)
Aéreo	12	600	1,552	625	5,269
Terrestre	35	206	92	50	310
Ferrovionario	35 por vagón	204 vagones	78	25	263
Fluvial	1,200 por bote	6 botes	64	14	216

Fuente: Hernández y cols., 2007

Un ejemplo sería la carga fluvial que tuvo participación en el año 2006 con un 4 por ciento de la carga nacional, seguido de la carga terrestre que hasta el momento tiene mayor participación corresponde el 66 por ciento, el férreo con el 30 por ciento, mientras que los modos aéreo y cabotaje no alcanzaron el 1 por ciento (figura 8). En la figura 9 muestra las rutas para el transporte de carbón en el país (Hernández y cols., 2007).

FIGURA 8. Participación del movimiento de carga nacional por modo de transporte durante el año 2006



Fuente: Hernández y cols., 2007

Los tipos de embarcaciones que se encuentran en los ríos de Colombia son: remolcador o propulsor, bote, lancha, bote motor, canoa, motor canoa, fuera de borda, embarcaciones especiales y convoy o flotillas (Hernández y cols., 2007).

La carga fluvial se clasifica de la siguiente forma: carga seca al granel almacenado en contenedores y/o empacadoras; carga líquida, al granel y/o envasada; carga gaseosa, almacenada en tanques y/o en cilindros; y semovientes, en corrales. Además, se clasifica

FIGURA 9. Rutas para el transporte de carbón en Colombia




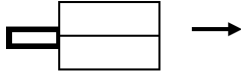
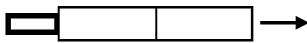
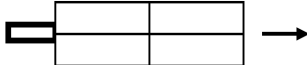

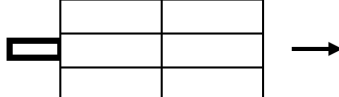
Fuente: UPME, s.f.

de acuerdo a su capacidad transportadora: menores de 25 t y mayores o iguales de 25 t. En el caso de las capacidades mayores se clasifican así: de 25 a 100 t, de 101 a 700 t, de 701 a 2,000 t, de 2,001 a 3,500 t, de 3,501 t en adelante (Hernández y cols., 2007).

Para las barcazas, que transporta cargas mayores, son empujadas por remolcadores y están en forma de “Convoy” que varía según su capacidad y conformada en serie y/o paralelo (tabla 7). El más largo alcanza una longitud de 254 m, con anchura de 26 m. En la tabla 8 muestran las características de los convoy que operan actualmente en el río

Magdalena, incluyendo las dimensiones y configuraciones típicas de los convoy que operan en el río (Hernández y cols., 2007).

TABLA 7. Nomenclatura del convoy de carga

Configuración	Nomenclatura	Forma del convoy
Remolcador + una barcaza	R-B	
Remolcador + dos barcasas en paralelo	R-2B	
Remolcador + dos barcasas en serie	R-B-B	
Remolcador + cuatro barcasas en dos filas y dos columnas	R-2B -2B	
Remolcador + seis barcasas en dos filas y tres columnas	R-2B-2B-2B	
Remolcador + seis barcasas en tres filas y dos columnas	R-3B-3B	

Fuente: Aguilera, 2011

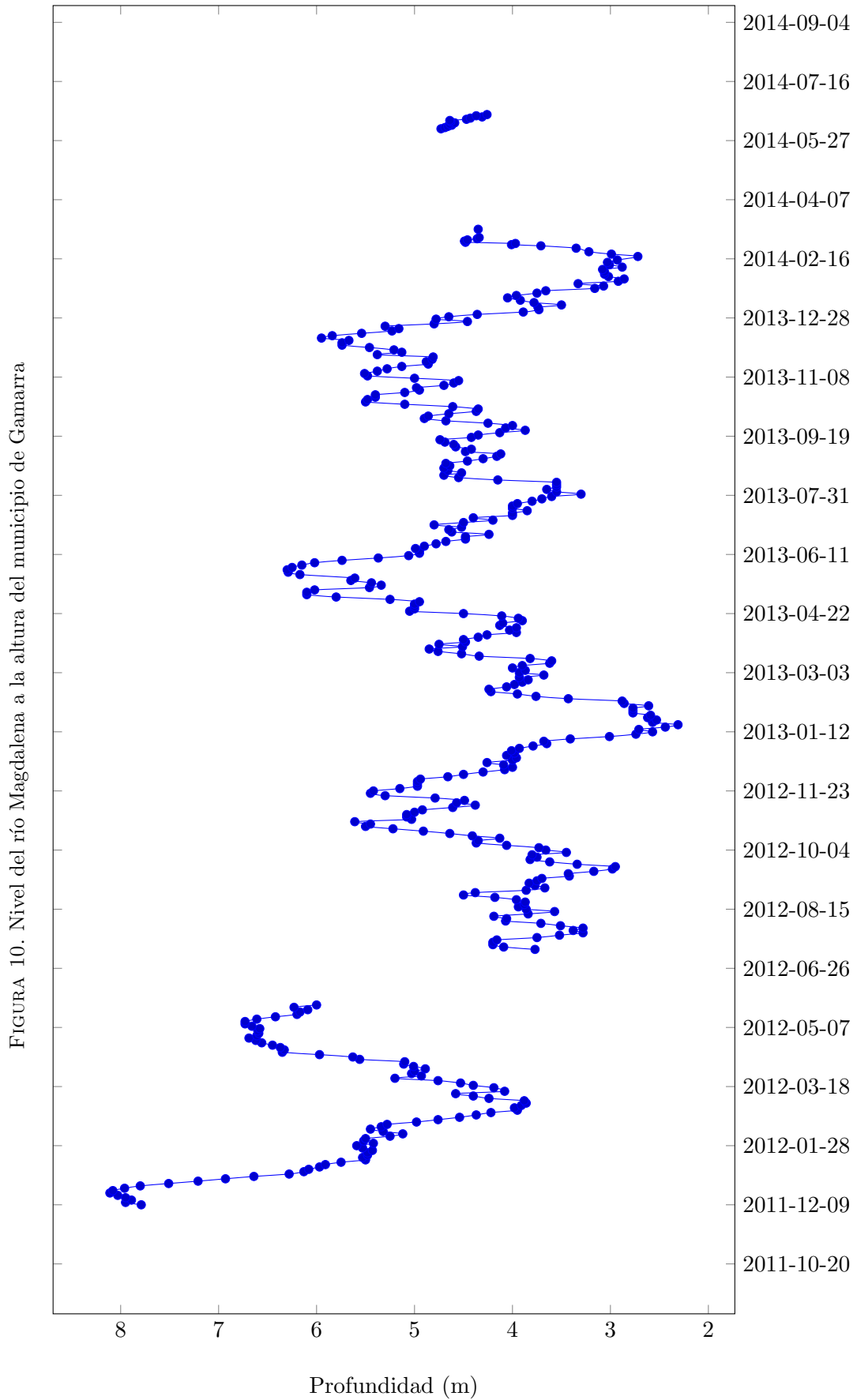
TABLA 8. Dimensiones y conformación típica de los convoy más grandes que operan actualmente en el río Magdalena

Características del convoy		La Dorada - P. Berrío	P. Berrío - B/meja	B/meja - Costa Norte	Tamalameque - Costa Norte
Remolcador	Eslora (m)	22.0	32.0	36.0	34.0
	Manga (m)	4.8	6.3	11.0	10.0
	Potencia (hp)	800.0	1,440.0	2,100.0	1,920.0
Barcaza	Eslora (m)	45.0	53.0	60.0	60.0
	Manga (m)	10.5	11.2	12.7	15.0
Longitud total (m)	Contra corriente	112.0	138.0	216.0	254.0
	Con la corriente	67.0	138.0	156.0	144.0
Ancho total (m)	Contra corriente	10.5	22.5	38.1	39.0
	Con la corriente	21.0	22.5	38.1	39.0
Capacidad transportadora (t)	Contra corriente	750.0	2,650.0	5,500.0	6,000.0
	Con la corriente	-	-	6,600.0	7,200.0
Composición típica	Contra corriente	R-B-B	R-2B-2B	R-2B-2B-2B	R-2B-2B-2B
	Con la corriente	R-2B	R-2B-2B	R-3B-3B	R-3B-3B

Fuente: Hernández y cols., 2007

Existen restricciones en la navegación para el tránsito de las embarcaciones. Esto dependen del calado, tipo de navío que transitan por el río, morfología del sector y el tiempo hidrológico en que se está navegando (Aguilera, 2011).

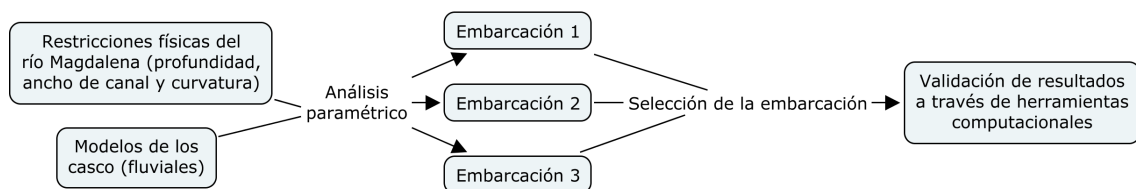
Esta propuesta busca dar respuesta a un sistema eficiente de transporte en función de las mejorías proyectadas para el río Magdalena en vista de convertirlo en una hidrovía. El sistema es basado en embarcaciones con propulsión propia que presenta mayores ventajas en maniobrabilidad y velocidad *vs.* capacidad de carga frente al sistema convoy utilizado actualmente. Las principales restricciones son el mínimo calado del trayecto en estudio que varía en función de la época de lluvia; y radios de curvaturas y giro. En la figura 10 muestra el nivel del río Magdalena en el municipio de Gamarra cerca de Capulco en el departamento del Cesar, con fechas de diciembre 9 de 2011 hasta junio 18 de 2014.



Metodología

La metodología propuesta objetiva la selección apropiada del concepto del casco de una embarcación fluvial para las restricciones físicas del río Magdalena en su fase preliminar. Para tal fin se desarrolló una herramienta de cálculo que llamaremos RESMAG (Diseño Conceptual basado en la **RES**istencia al Avance para las Características propias del Río **MAG**dalena). Consiste inicialmente de un análisis paramétrico a partir de barcazas en operación y de diferentes formas y orígenes. Se tiene en cuenta las restricciones como profundidad, ancho de canal y curvatura del medio navegable. Luego de preseleccionar hasta tres configuraciones se realiza un análisis de resistencia al avance y de potencia, permitiendo escoger el casco con las mejores condiciones de desempeño. La validación de los resultados se realiza a través de reconocidas herramientas computacionales del área de diseño naval (anexo A) completando la metodología de selección del casco propuesta y detallada en la figura 11.

FIGURA 11. Metodología RESMAG



4.1. Restricciones físicas del río y modelo del casco

Los modelos de casco corresponden a una base de datos de embarcaciones fluviales con diferentes coeficientes de forma y líneas de casco. Las restricciones físicas de río, calado, radios de curvaturas, presencia de puentes, canales, etc. deben ser consideradas como datos necesarios para el análisis paramétrico que resultará en la preselección de tres embarcaciones con sus líneas y formas.

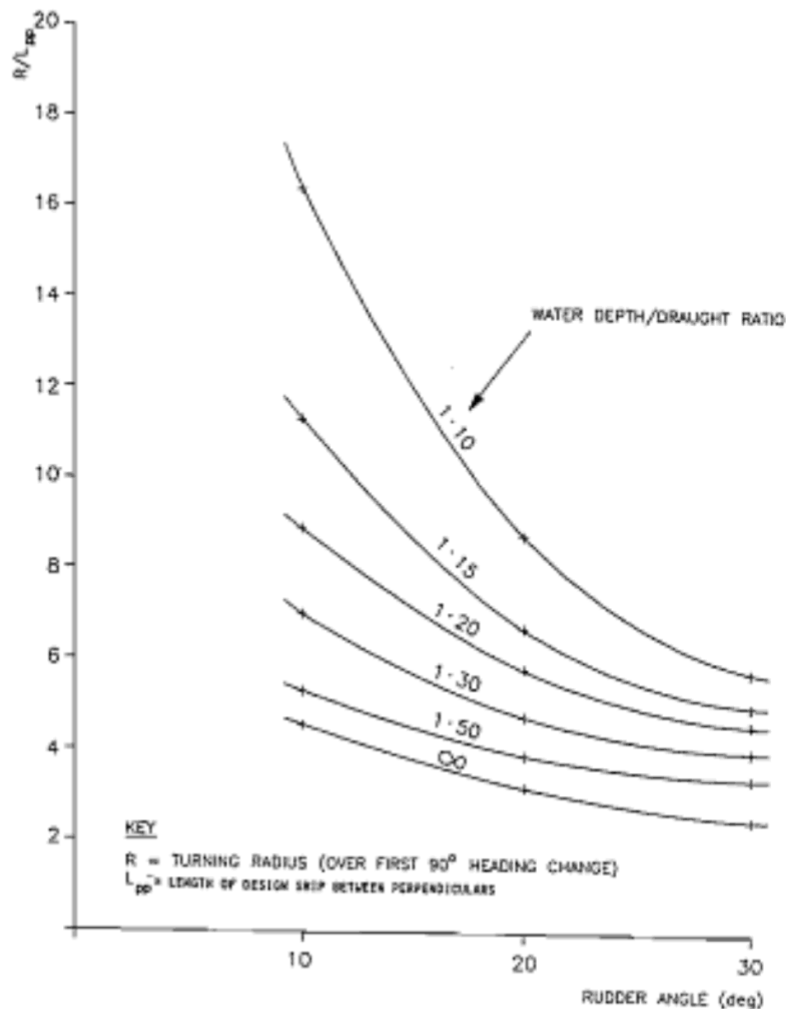
Para el sector de estudio, se presenta la profundidad mínima en Capulco hallada de la siguiente manera (Aguilera, 2011)

$$p_m = 1.35 \times C_{max}, \quad (1)$$

donde C_{max} es el calado máximo de la embarcación típico de diseño, definiendo el límite para estas embarcaciones a un calado no superior a 3 m.

En cuanto al radio de curvatura, se obtiene a partir de recomendaciones de PIANC⁷. Para embarcaciones con un solo timón y hélice, se basan en gráficos que indican los radios de giro en función de la relación entre el calado y la profundidad (MTC, 2007). Un giro brusco puede realizar un buque que tenga maniobrabilidad con un radio de aproximadamente 2.0 a 3.0 veces la eslora en aguas profundas, aumentando hasta 5 veces o más la longitud de la embarcación a una relación entre el calado y la profundidad de 1.10, como se muestra en la figura 12 (PIANC, IALA, IAPH, y IMPA, 1997). La longitud mínima de radio de curvatura está en función de ángulo de giro (tabla 9). Cabe notar que los radios de curvatura recomendados en el río Magdalena son difíciles de cumplir debido a la morfología del lecho y no a los parámetros geométricos (Aguilera, 2011). Tanto la tabla para la longitud mínima como la grafica del radio de curvatura no se tienen en cuenta para la metodología.

FIGURA 12. Radio de curvatura en función del ángulo del timón y la profundidad del agua



Fuente: PIANC y cols., 1997

⁷ Permanent International Association of Navigation Congresses (más conocida como World Association for Waterborne Transport Infrastructure)

TABLA 9. Longitud mínima de radio de curvatura

Ángulo de giro (grados)	Longitud mínima
<25	3 veces la eslora de la embarcación de diseño
25-35	5 veces la eslora de la embarcación de diseño
>35	10 veces la eslora de la embarcación de diseño

Fuente: Aguilera, 2011

4.2. Análisis paramétrico

La descripción paramétrica de una embarcación nos permite trabajar con representaciones simples de componentes, esto significa que el diseñador puede manipular fácilmente soluciones para encontrar configuraciones que satisfacen las requisitos funcionales (Tvedt, 2012).

El análisis paramétrico aborda la preselección de 3 embarcaciones fluviales típicas a partir de una base de datos predefinidas. En la tabla 10 presenta un ejemplo correspondiente a 10 de estas naves identificadas con número IMO⁸ o ENI⁹, donde el valor del desplazamiento indica solamente la carga que se necesita para transportar. El análisis paramétrico inicia a partir de relaciones de forma y considerando las restricciones físicas del río como la longitud mínima de curvatura y, para el tramo de estudio, no supere los 3 m de calado, conforme como se muestra la tabla 11. Las relaciones eslora/calado y manga/calado permite mantener sus escalas en los ejes longitudinal, transversal y vertical. En el caso de la embarcación 1 no se realizaron las relaciones de forma, debido a que sus dimensiones en los ejes longitudinal y transversal no son suficientes para la ejecución del análisis paramétrico. Si fuese en caso contrario sus dimensiones serían: 35 m de eslora, 15 m de manga y 3 m de calado con porcentaje de 250 por ciento en cada uno de sus escalas. Cabe notar que el valor del desplazamiento indica la carga que se necesita para su transporte incluyendo el peso del casco.

TABLA 10. Modelos de las embarcaciones fluviales

Nombre	Características
Apollo (ENI: 6000497) 	80.00 m de eslora, 9.50 m de manga, 2.72 m de calado y 1,380 t de desplazamiento.
Caron (ENI: 02330817) 	135.00 m de eslora, 11.45 m de manga, 3.76 m de calado y 4,217 t de desplazamiento.

*Continuar en la siguiente página*⁸ International Maritime Organization⁹ European Number of Identification

Tabla 10 – Continuación de la página anterior

Nombre	Características
<p><i>Janus</i> (IMO: 2323046)</p> 	<p>40.05 m de eslora, 6.75 m de manga, 2.10 m de calado y 222 t de desplazamiento.</p>
<p><i>Main</i> (ENI: 04503460)</p> 	<p>105.10 m de eslora, 10.99 m de manga, 3.02 m de calado y 2,078 t de desplazamiento.</p>
<p><i>Miranda</i> (ENI: 02306327)</p> 	<p>61.55 m de eslora, 7.02 m de manga, 2.80 m de calado y 703 t de desplazamiento.</p>
<p><i>Surcouf</i> (ENI: 02306327)</p> 	<p>86.00 m de eslora, 9.50 m de manga, 2.70 m de calado y 1,506 t de desplazamiento.</p>
<p><i>Tabëë 2</i> (IMO: 2306125)</p> 	<p>66.94 m de eslora, 8.16 m de manga, 2.52 m de calado y 930 t de desplazamiento.</p>
<p><i>Victorie</i> (ENI: 02318592)</p> 	<p>80.08 m de eslora, 8.22 m de manga, 2.83 m de calado y 1,254 t de desplazamiento.</p>
<p><i>Westeind</i> (ENI: 02314043)</p> 	<p>86.00 m de eslora, 10.00 m de manga, 2.97 m de calado y 1,704 t de desplazamiento.</p>
<p><i>Zwartemeer</i> (IMO: 2007729)</p> 	<p>34.57 m de eslora, 6.57 m de manga, 1.70 m de calado y 149 t de desplazamiento.</p>

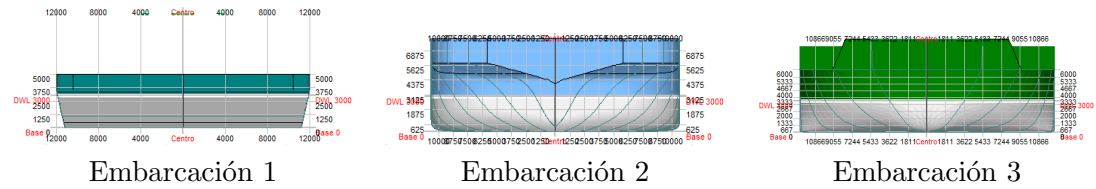
Fuente: Binnenvaartlog, s.f.

TABLA 11. Características de los modelos de las barcasas preseleccionadas

	Embarcación	Dimensiones		Relaciones de forma		%
		Originales	Deseadas	Eslora/Calado	Manga/Calado	
1	Eslora (m)	14.00	159.60	-	-	1,140
	Manga (m)	6.00	24.00	-	-	400
	Calado (m)	1.20	3.00	-	-	250
	Desplazamiento (t)	83.34	9,500.50	-	-	-
2	Eslora (m)	128.25	160.31			
	Manga (m)	17.05	21.31			
	Calado (m)	2.40	3.00	53.44	7.10	125
	Desplazamiento (t)	4,485.00	8,760.30			
3	Eslora (m)	100.00	150.00			
	Manga (m)	16.50	24.75	50.00	8.25	150
	Calado (m)	2.00	3.00			
	Desplazamiento (t)	2,650.00	8,943.60			

Las barcasas preseleccionadas basadas en su forma geométrica del casco son: *Janus* (embarcación 1), *Victorie* (embarcación 2) y *Miranda* (embarcación 3), cuya vista transversal se muestra en la figura 13.

FIGURA 13. Vista transversal de los cascos preseleccionados



4.3. Selección de la embarcación

La selección del casco está fundamentada en la evaluación de la resistencia al avance de las embarcaciones preseleccionadas. De acuerdo con Holtrop (1982; 1984), el cálculo de la resistencia representa la sumatoria de los componentes descritos de la siguiente manera

$$R_{total} = R_F(1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A, \quad (2)$$

donde R_F es la resistencia friccional, $1 + k_1$ es el factor de forma del casco, R_{APP} es resistencia al apéndice, R_W es la resistencia de olas, R_B es la resistencia adicional debido a la presencia de bulbo en la proa, R_{TR} es la resistencia adicional debido a la popa sumergida y R_A es la resistencia en relación modelo-escala real de la embarcación (figura 14).

La resistencia friccional establecida por ITTC-1957¹⁰ se representa por la ecuación del coeficiente friccional así

$$C_F = \frac{R_F}{\frac{1}{2}\rho SV^2} = \frac{0,075}{(\log(R_n) - 2)^2}, \quad (3)$$

¹⁰International Towing Tank Conference

donde C_F es el coeficiente de la resistencia friccional de la embarcación, ρ es la densidad del río, S es el área mojada del casco, V es la velocidad de la embarcación y R_n es el número de Reynolds (figura 15a) (Chalfant y Chrystostomidis, 2009).

El área mojada del casco está compuesto por

$$S = L(2T + B) \sqrt{C_M} \left(0.453 + 0.4425C_B - 0.2862C_M - 0.003467 \frac{B}{T} + 0.3696C_{WP} \right) + 2.38 \frac{A_{BT}}{C_B}, \quad (4)$$

donde L es la eslora, T es el calado, B es la manga, C_M es el coeficiente de la sección media del casco, C_B es el coeficiente de bloque, C_{WP} es el coeficiente de la línea de agua y A_{BT} es el área transversal debido a la presencia de bulbo.

Para C_B tenemos

$$C_B = \frac{\nabla}{L \cdot B \cdot T}, \quad (5)$$

donde ∇ es el volumen del cuerpo sumergido, en la cual, las unidades en el sistema internacional para el desplazamiento en t es exactamente igual al volumen en m^3 si se analiza en aguas dulces. En cambio en aguas saladas, el desplazamiento es equivalente al 2.5 por ciento (Benford, 1991).

C_M esta comformado por

$$C_M = \frac{A_x}{B \cdot T}, \quad (6)$$

donde A_x es el área máxima de la sección transversal del casco bajo el agua.

C_{WP} se define como

$$C_{WP} = \frac{A_{WP}}{L \cdot B}, \quad (7)$$

donde A_{WP} es el área de la línea de agua.

El número de Reynolds es una cantidad adimensional que determina el movimiento de los fluidos. Si el flujo es absolutamente constante, su estado es laminar y su valor es menor a 2,000. En cambio, si el flujo presenta fluctuaciones inestables, su estado es turbulento y su valor es mayor a 2,000. No hay un valor específico de la transición entre el flujo laminar y el turbulento, pero su intervalo equivale entre 1,000 y 2,000 y se extiende hacia arriba entre 3,000 y 5,000 (Encyclopædia Britannica, 2012f). Para el presente estudio se representa de la siguiente forma:

$$R_n = \frac{L \times V}{v}, \quad (8)$$

donde v es la viscosidad cinemática.

El factor de forma viene representado de acuerdo con

$$1 + k_1 = 0.93 + 0.487118c_{14} \left(\frac{B}{L} \right)^{1.06806} \left(\frac{T}{L} \right)^{0.46106} \left(\frac{L}{L_R} \right)^{0.121563} \left(\frac{L^3}{\nabla} \right)^{0.36486} (1 - C_P)^{0.604247}, \quad (9)$$

donde c_{14} es el coeficiente para la forma de la popa y L_R es el parámetro que refleja la eslora (figura 15b) definiendo como

$$L_R = L \left(1 - C_P + \frac{0.06C_P lcb}{4C_P - 1} \right), \quad (10)$$

donde lcb es la posición longitudinal del centro de carena y C_P es el coeficiente prismático describiendo así:

$$C_P = \frac{\nabla}{L \cdot A_x}, \quad (11)$$

c_{14} depende de C_{stern} que es el coeficiente de forma del casco en la popa. Cada perfil se describe en la tabla 12 y está compuesta por

$$c_{14} = 1 + 0.011C_{stern}, \quad (12)$$

TABLA 12. Valores para el coeficiente de forma

Forma	C_{stern}
<i>Pram with gondola</i>	-25
Sección en forma de V	-10
Sección de forma normal	0
Sección en forma de U	10

Fuente: Holtrop, 1984

El cálculo de la resistencia en función del apéndice es descrito de la siguiente forma:

$$R_{APP} = \frac{1}{2} \rho V^2 S_{APP} (1 + k_2)_{eq} C_F, \quad (13)$$

donde S_{APP} es el área mojada del apéndice y $1 + k_2$ es el factor de resistencia al apéndice (figura 15c).

En la tabla 13 muestran los valores de $1 + k_2$ corresponden a apéndices orientados al flujo simplificados.

TABLA 13. Valores aproximados para el factor de resistencia al apéndice

Timón detrás del <i>skag</i>	1.5-2.0
Timón detrás de la popa	1.3-1.5
Timones de balance de doble tornillo	2.8
Eje con soporte	3.0
<i>Skegs</i>	1.5-2.0
<i>Struts bossing</i>	3.0
<i>Hull bossings</i>	2.0
Eje	2.0-4.0
Aletas estabilizadoras	2.8
<i>Dome</i>	2.7
Quillas de pantoque	1.4

Fuente: Holtrop y Mennen, 1982

Para el valor equivalente del factor de resistencia al apéndice es determinado así:

$$(1 + k_2)_{eq} = \frac{\sum (1 + k_2) S_{APP}}{\sum S_{APP}}. \quad (14)$$

En caso de presentar hélice en la proa, la resistencia al apéndice se suma acorde a

$$R_{APP} + \rho V^2 \pi d_t^2 C_{BTO}, \quad (15)$$

donde d_t es el diámetro del túnel y C_{BTO} es el coeficiente debido a la presencia de hélice en la proa en la cual tiene un rango de valores entre 0.003 y 0.012.

La resistencia debido a olas se representa por tres ecuaciones que dependen del número de Froude. Este número es una unidad adimensional que indica la influencia de la gravedad en el movimiento de un fluido (Encyclopædia Britannica, 2012d). Se expresa como

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL_{WL}}}, \quad (16)$$

donde g es la gravedad y L_{WL} es la eslora al nivel de la línea de agua (Newman, 1977).

La primera ecuación de resistencia de olas con valor de F_n mayor a 0.55 (figura 15d) se expresa de la siguiente forma:

$$R_{W-B} = c_{17} c_2 c_5 \nabla \rho g \exp \left(m_3 F_n^d + m_4 \cos(\lambda F_n^{-2}) \right), \quad (17)$$

donde

$$c_{17} = 6919.3 C_M^{-1.3346} \left(\frac{\nabla}{L^3} \right)^{2.00977} \left(\frac{L}{B} - 2 \right)^{1.20692}; \quad (18)$$

$$c_2 = \exp(-1.89\sqrt{c_3}); \quad (19)$$

$$c_3 = \frac{0.56 A_{BT}^{1.5}}{BT (0.31\sqrt{A_{BT}} + T_F - h_B)}; \quad (20)$$

$$c_5 = 1 - 0.8 \frac{A_T}{BTC_M}; \quad (21)$$

$$m_3 = -7.2035 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.326869} \left(\frac{T}{B} \right)^{0.605375}; \quad (22)$$

$$d = -0.9; \quad (23)$$

$$m_4 = c_{15} 0.4 \exp(-0.034 F_n^{-3.29}); \quad (24)$$

$$c_{15} = -1.69385 \text{ cuando } \frac{L^3}{\nabla} < 512; \quad (25)$$

$$c_{15} = -1.69385 + \frac{(L/\nabla^{1/3} - 8)}{2.36} \text{ cuando } 512 < \frac{L^3}{\nabla} < 1726.91; \quad (26)$$

$$c_{15} = 0 \text{ cuando } \frac{L^3}{\nabla} > 1726.91; \quad (27)$$

$$\lambda = 1.446 C_P - 0.03 \frac{L}{B} \text{ cuando } \frac{L}{B} < 12; \quad (28)$$

$$\lambda = 1.446C_P - 0.36 \text{ cuando } \frac{L}{B} > 12. \quad (29)$$

T_F es la distancia vertical desde la línea de quilla hasta la sección central del bulbo, h_B es la altura del bulbo y A_T es el área de la popa sumergida.

La segunda ecuación de resistencia de olas con valor de F_n menor a 0.4 (figura 15e) se determina así:

$$R_{W-A} = c_1 c_2 c_5 \nabla \rho g \exp \left(m_1 F_n^d + m_4 \cos(\lambda F_n^{-2}) \right), \quad (30)$$

donde

$$c_1 = 2223105 c_7^{3.78163} \left(\frac{T}{B} \right)^{1.07961} (90 - i_E)^{-1.37565}; \quad (31)$$

$$c_7 = 0.229577 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.33333} \text{ cuando } \frac{B}{L} < 0.11; \quad (32)$$

$$c_7 = \frac{B}{L} \text{ cuando } 0.11 < \frac{B}{L} < 0.25; \quad (33)$$

$$c_7 = 0.5 - 0.0625 \frac{B}{L} \text{ cuando } \frac{B}{L} > 0.25; \quad (34)$$

$$m_1 = 0.0140407 \frac{L}{T} - 1.75254 \frac{\nabla^{1/3}}{L} - 4.79323 \frac{B}{L} - c_{16}; \quad (35)$$

$$c_{16} = 8.07981 C_P - 13.8673 C_P^2 + 6.984388 C_P^3 \text{ cuando } C_P < 0.8; \quad (36)$$

$$c_{16} = 1.73014 - 0.7067 C_P \text{ cuando } C_P > 0.8. \quad (37)$$

i_E es el semiángulo de entrada de flotación. Si su valor es desconocido, se usa de la siguiente forma:

$$i_E = 1 + 89 \exp \left(- \left(\frac{L}{B} \right)^{0.80856} (1 - C_{WP})^{0.30484} (1 C_P - 0.0225 lcb)^{0.6367} \left(\frac{L_R}{B} \right)^{0.34574} \left(100 \frac{\nabla}{L^3} \right)^{0.16302} \right). \quad (38)$$

La tercera ecuación de resistencia de olas con valor de $0.40 < F_n < 0.55$ (figura 15f) se calcula así:

$$R_W = R_{W-A_{0.4}} + \frac{(10F_n - 4)(R_{W-B_{0.55}} - R_{W-A_{0.4}})}{1.5}, \quad (39)$$

donde $R_{W-A_{0.4}}$ es la resistencia de olas para $F_n = 0.4$ y $R_{W-B_{0.55}}$ es la resistencia de olas para $F_n = 0.55$ (Holtrop, 1984).

La resistencia adicional debido a la presencia de bulbo en la proa se determina de la siguiente forma:

$$R_B = 0.11 \exp(-3P_B^{-2}) \frac{F_{ni}^3 A_{BT}^{1.5} \rho g}{1 + F_{ni}^2}, \quad (40)$$

donde el coeficiente P_B es una medida para la salida de la popa y F_{ni} es el número de Froude basado en la inmersión (figura 15g). Ambas se definen así:

$$P_B = 0.56 \frac{\sqrt{A_{BT}}}{T_F - 1.5h_B}, \quad (41)$$

$$F_{ni} = \frac{V}{\sqrt{g(T_F - h_B - 0.25\sqrt{A_{BT}}) + 0.15V^2}}. \quad (42)$$

La resistencia adicional debido a la popa sumergida (figura 15h) se representa por

$$R_{TR} = 0.5\rho V^2 A_T c_6, \quad (43)$$

donde c_6 esta compuesto por

$$c_6 = 0.2(1 - 0.2F_{nT}) \text{ cuando } F_{nT} < 5; \quad (44)$$

$$c_6 = 0 \text{ cuando } F_{nT} \geq 5. \quad (45)$$

F_{nT} es el número de Froude basado en la inmersión de la popa definido por

$$F_{nT} = \frac{V}{\sqrt{2gA_T/(B + BC_{WP})}}. \quad (46)$$

Para la resistencia en función de la relación modelo-escala real de la embarcación (figura 15i) se expresa como

$$R_A = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_A, \quad (47)$$

donde C_A es el coeficiente de correlación calculando de la siguiente forma:

$$C_A = 0.006(L + 100)^{-0.16} - 0.00205 + 0.003\sqrt{\frac{L}{7.5}} C_B^4 c_2(0.04 - c_4), \quad (48)$$

con

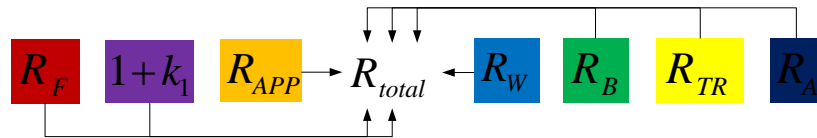
$$c_4 = \frac{T_F}{L} \text{ cuando } \frac{T_F}{L} \leq 0.04; \quad (49)$$

$$c_4 = 0.04 \text{ cuando } \frac{T_F}{L} > 0.04. \quad (50)$$

La potencia necesaria para alcanzar la velocidad de acuerdo a los requerimientos de diseño propuestos inicialmente está determinado por (Benford, 1991)

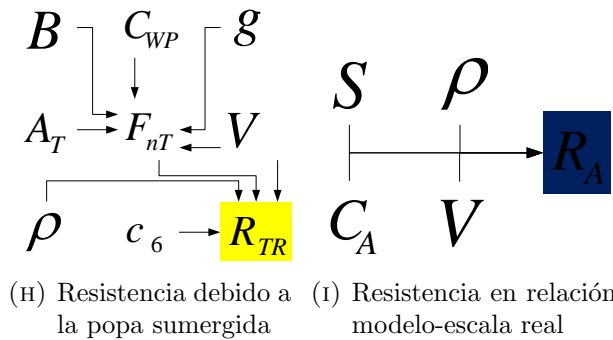
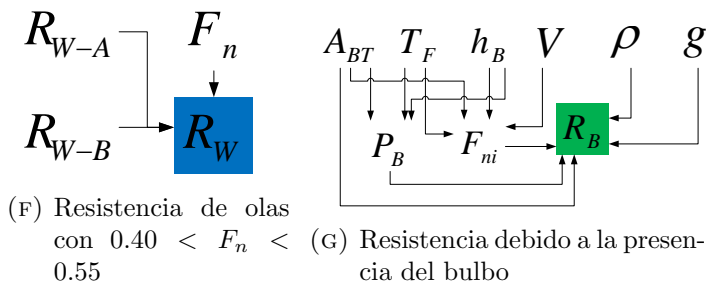
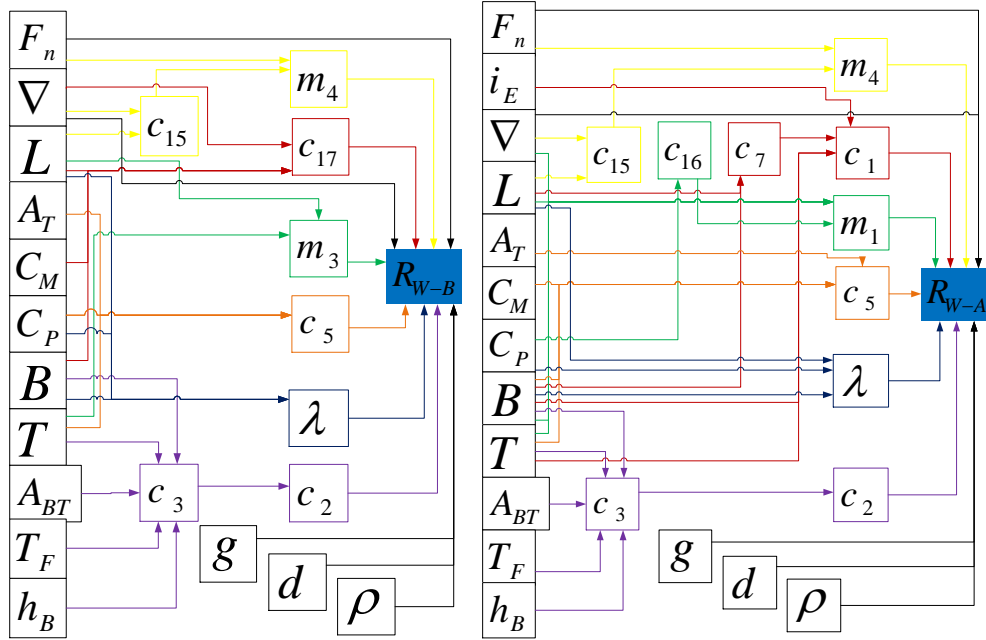
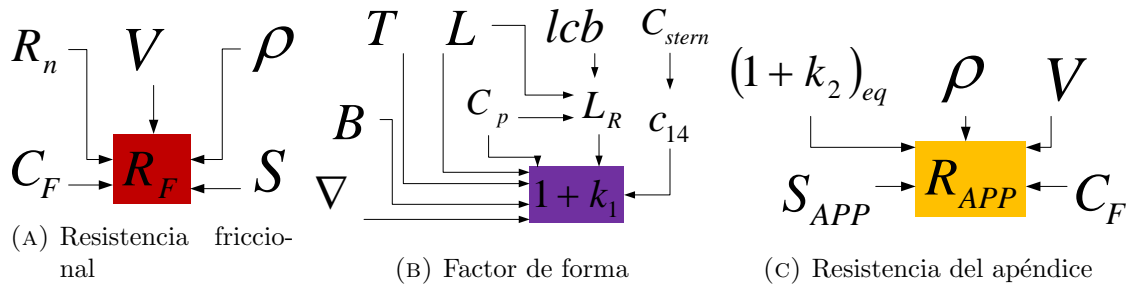
$$P = R_{total} \times V. \quad (51)$$

FIGURA 14. Diagrama del método de selección de la embarcación



El método Holtrop fue desarrollado a través de pruebas experimentales tanto a escala que se realiza un canal de ensayos hidrodinámicos oceanográfico, y pruebas reales en embarcaciones marítimas. Los datos obtenidos en los ensayos se realiza un análisis estadístico (Holtrop, 1977).

FIGURA 15. Diagrama de los componentes del método de selección de la embarcación



4.4. Validación de resultados

Los resultados son validados para la evaluación de resistencia aplicando el software FREE!ship (v Engeland, 2006). Además, son presentados, comparando para las tres configuraciones preseleccionadas, los valores tanto de resistencia al avance como de potencia. Por último, al modelo de embarcación seleccionado por RESMAG se efectúa un nuevo análisis de resistencia usando el software AVEVA Marine (AVEVA Group plc, s.f.). Las herramientas computacionales mencionadas utilizan entre otros el método Holtrop (1982; 1984).

Resultados

En el capítulo anterior se presentó la metodología RESMAG para la selección del modelo de la embarcación basado en el cálculo de la resistencia al avance y la potencia de embarcaciones fluviales. Además se describieron las variables que conforman el método, tales como la resistencia friccional, factor de forma del casco, resistencia al apéndice, resistencia de olas, resistencia adicional debido a la presencia del bulbo en la proa, resistencia adicional debido a la popa sumergida y resistencia en relación modelo-escala real de la embarcación.

En este capítulo se presenta los resultados tanto de resistencia al avance como de potencia de las embarcaciones preseleccionadas. Posteriormente se muestra los resultados de análisis para el casco seleccionado usando el software AVEVA Marine. Por último se resumen los resultados de los software ya mencionados y se detalla los planos de líneas y formas de la barcaza seleccionada.

En la figura 16 se muestra el comportamiento de la resistencia al avance de las embarcaciones preseleccionadas al aumentar su velocidad entre 4 y 7 kn. La barcaza 1 presenta la mayor resistencia total entre todas las embarcaciones; mientras que las barcazas 2 y 3 sus valores de resistencia son inferiores a 80 kN a 7 kn. La barcaza 3 presenta la menor resistencia y sería la mejor selección para el diseño, ya que su valor equivale a aproximadamente 62 kN a esa misma velocidad. Si tuviéramos en cuenta la velocidad promedio (5.5 kn) la resistencia para barcaza 3 sería de 39.16 kN. Cabe notar que en la metodología no se tuvieron en cuenta la resistencia al apéndice ni la resistencia debido a la popa sumergida, ya que no existen elementos adicionales en los tres cascos y además, ninguna de ellas presentan hundimiento en su popa.

En el análisis de potencia de las barcazas, sus valores de referencia son para el diseño de la hélice propulsora. Para el cálculo de la potencia del motor propulsor se deberá adicionar dicha potencia las pérdidas por el (los) eje(s) de transmisión y demás componentes presentes en este sistema. La embarcación 3 es la que presenta menor potencia, ya que se requiere empujar 223.86 kW a 7 kn mientras que las demás embarcaciones sus valores superan los 260.00 kW. Los resultados son observados en la figura 17 y en la tabla 14.

Para los análisis posteriores de la embarcación 3, en las figuras 18 y 19 se observan que el comportamiento de las variables cumple con el método RESMAG. En ellas se observa que las diferencias de cada uno de los valores tanto la resistencia al avance como la potencia

FIGURA 16. Análisis comparativo de la resistencia al avance de las barcazas

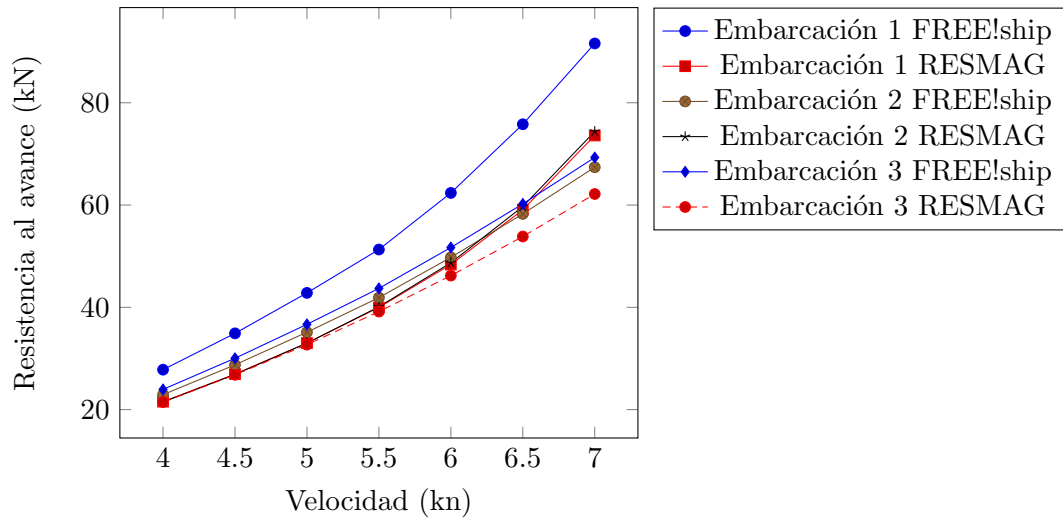
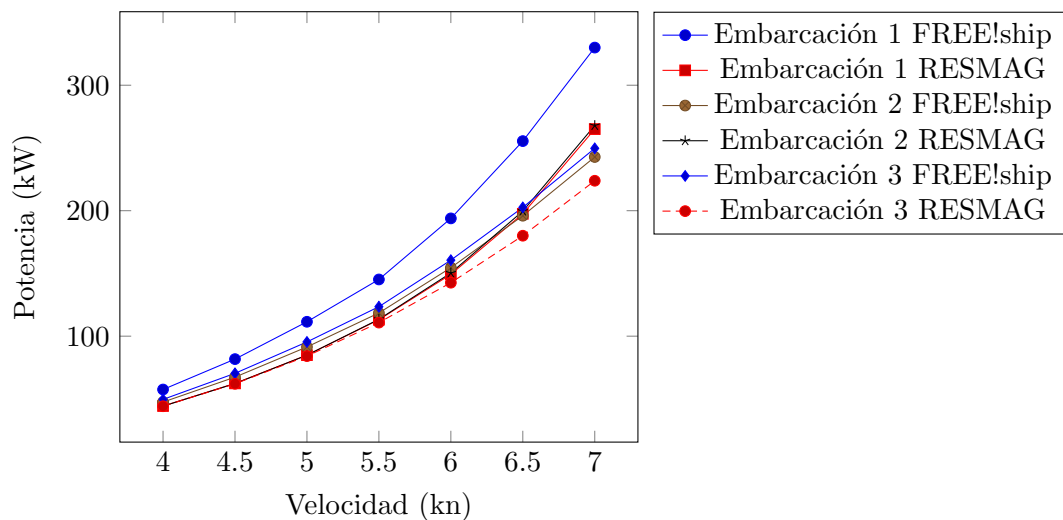


FIGURA 17. Análisis comparativo de la potencia de las barcazas



son menores. Para más detalles, ver la tabla 18. En la figura 20 muestra la vista isométrica de la embarcación seleccionada y la figura 21 se detalla los planos de líneas y formas.

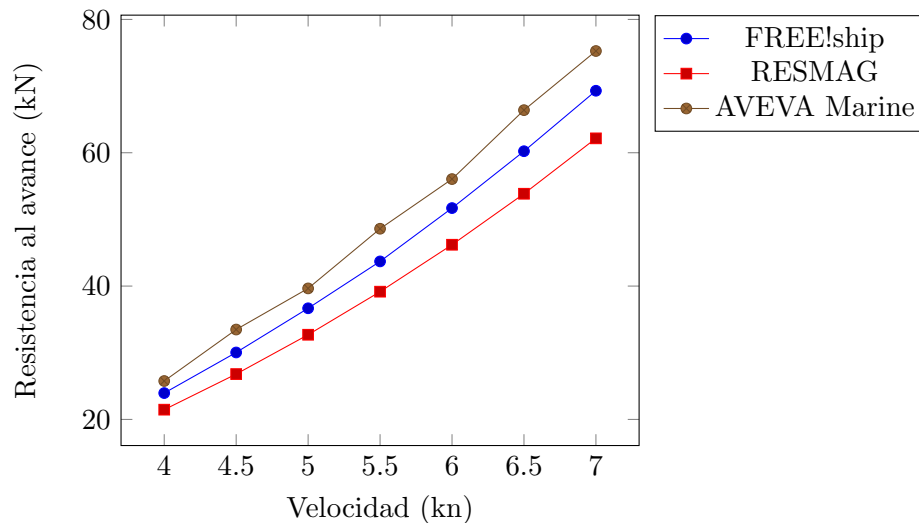
5.1. Resumen de resultados en FREE!ship

En la tabla 16 muestra los resultados finales de la resistencia al avance y la potencia según Holtrop para la barcaza 3. En ella se analiza otras variables donde F_r es la fricción, R_F es la resistencia friccional, R_R es la resistencia residual, R_{T_e} es la resistencia total efectiva y P_e es la potencia efectiva.

TABLA 14. Resultados de la resistencia al avance y potencia de las tres embarcaciones

V		R_{Total} (kN)			P (kW)		
kn	m/s	FREE!ship	RESMAG	Diferencia	FREE!ship	RESMAG	Diferencia
Embarcación 1							
4.00	2.06	27.80	21.55	6.25	57.49	44.34	13.15
4.50	2.31	34.91	26.94	7.97	81.72	62.37	19.36
5.00	2.57	42.82	33.01	9.81	111.47	84.90	26.56
5.50	2.83	51.30	39.98	11.32	145.20	113.12	32.08
6.00	3.09	62.37	48.36	14.01	193.87	149.27	44.60
6.50	3.34	75.80	59.07	16.73	255.47	197.27	57.93
7.00	3.60	91.60	73.60	18.00	330.00	265.05	64.95
Embarcación 2							
4.00	2.06	22.92	21.48	1.43	47.48	44.21	3.27
4.50	2.31	28.75	26.88	1.87	67.35	62.23	5.12
5.00	2.57	35.13	33.00	2.13	91.41	84.87	6.54
5.50	2.83	41.90	40.10	1.80	118.50	113.45	5.05
6.00	3.09	49.77	48.71	1.06	154.57	150.35	4.22
6.50	3.34	58.27	59.71	1.44	196.00	199.66	3.66
7.00	3.60	67.40	74.39	6.99	242.80	267.89	25.09
Embarcación 3							
4.00	2.06	23.95	21.46	2.49	49.61	44.16	5.45
4.50	2.31	30.04	26.80	3.24	70.38	62.04	8.34
5.00	2.57	36.67	32.70	3.97	95.40	84.11	11.29
5.50	2.83	43.70	39.16	4.54	123.50	110.81	12.69
6.00	3.09	51.70	46.20	5.50	160.57	142.61	17.96
6.50	3.34	60.23	53.85	6.38	202.63	180.06	22.57
7.00	3.60	69.30	62.16	7.14	249.70	223.86	25.84

FIGURA 18. Análisis posterior de la resistencia al avance de la barcaza 3



5.2. Resumen de resultados en AVEVA Marine

En la página 37 muestra el resumen de resultados de AVEVA Marine para la embarcación 3.

FIGURA 19. Análisis posterior de la potencia de la barcaza 3

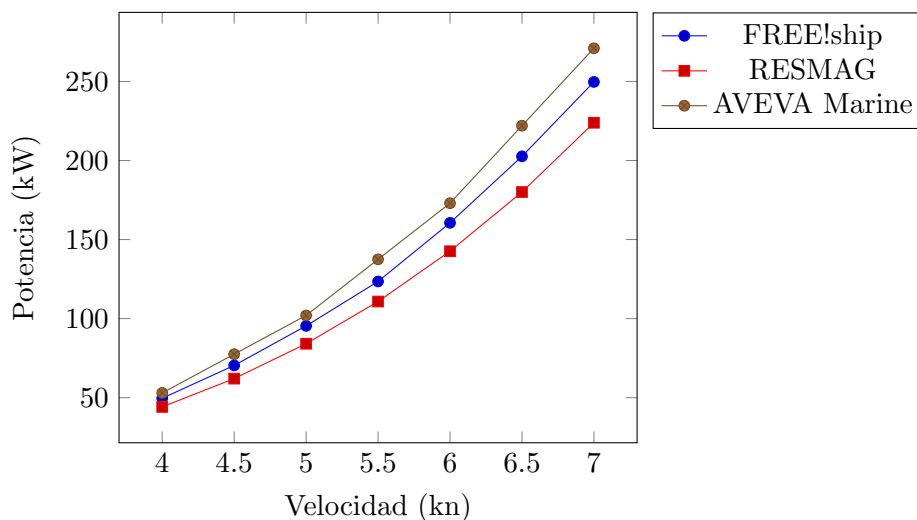


TABLA 15. Resultados posteriores de la resistencia al avance y potencia de la embarcación 3

V		R_{Total} (kN)			P (kW)		
kn	m/s	FREE!ship	RESMAG	AVEVA Marine	FREE!Ship	RESMAG	AVEVA Marine
4.00	2.06	23.95	21.46	25.76	49.61	44.16	53.00
4.50	2.31	30.04	26.80	33.48	70.38	62.04	77.50
5.00	2.57	36.67	32.70	39.65	95.40	84.11	102.00
5.50	2.83	43.70	39.16	48.60	123.50	110.81	137.50
6.00	3.09	51.70	46.20	56.05	160.57	142.61	173.00
6.50	3.34	60.23	53.85	66.39	202.63	180.06	222.00
7.00	3.60	69.30	62.16	75.26	249.70	223.86	271.00

TABLA 16. Cálculos finales de resistencia al avance y potencia según Holtrop para la embarcación 3

V		F_r	R_F	R_R	R_T	P	R_{T_e}	P_e
kn	m/s	-	kN	kN	kN	kW	kN	kW
0.00	0.00	0.000	0.0	-	-	-	-	-
0.79	0.40	0.011	0.9	-	-	-	-	-
1.57	0.81	0.021	3.4	-	-	-	-	-
2.36	1.21	0.032	7.2	-	-	-	-	-
3.14	1.62	0.042	12.4	-	-	-	-	-
3.93	2.02	0.053	18.7	4.4	23.1	46.7	23.1	46.7
4.71	2.43	0.063	26.3	6.3	32.6	79.1	32.6	79.1
5.50	2.83	0.074	35.1	8.5	43.7	123.5	43.7	123.5
6.25	3.22	0.084	44.6	11.1	55.7	179.1	55.7	179.1
7.00	3.60	0.094	55.1	14.2	69.3	249.7	69.3	249.7

FIGURA 20. Vista isométrica de la embarcación seleccionada

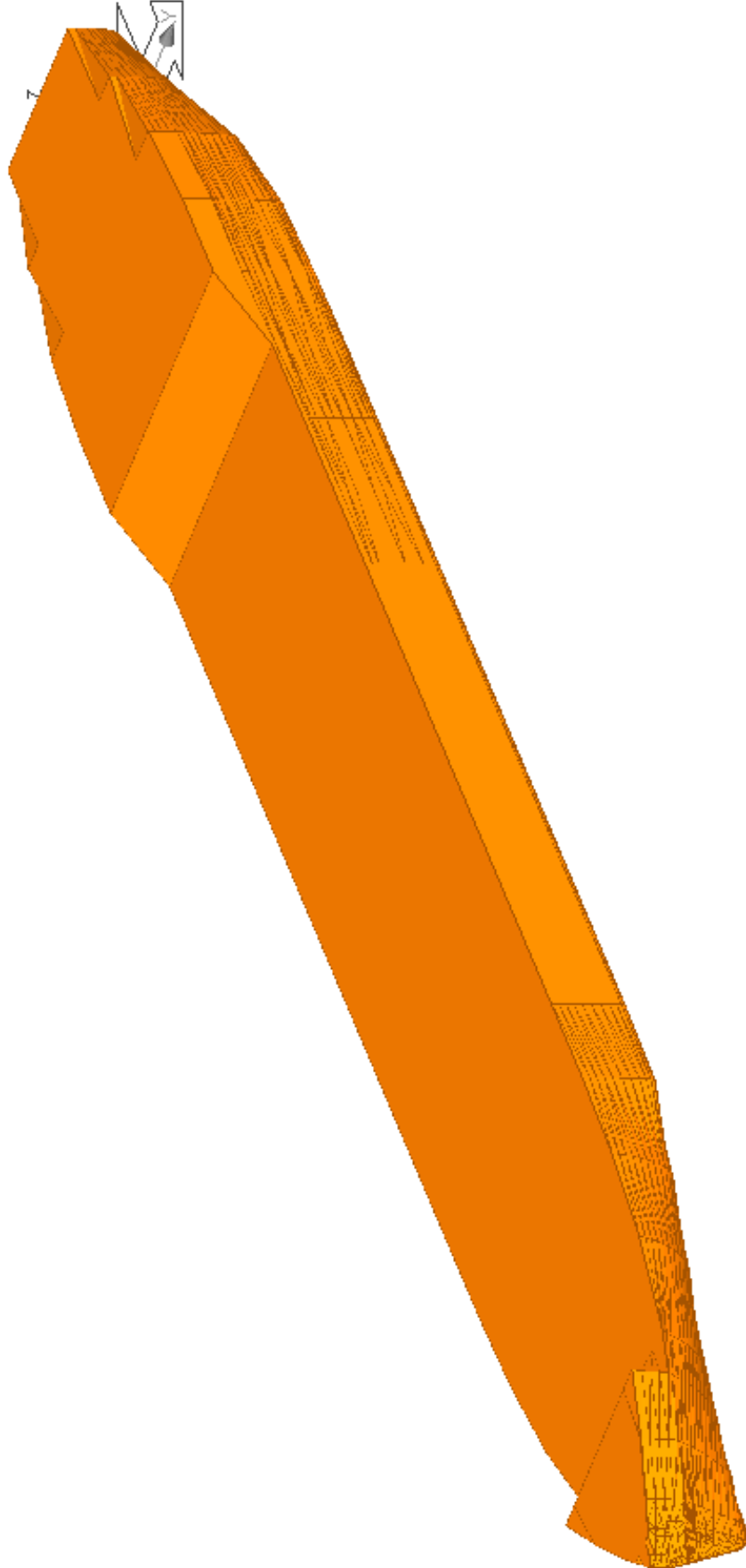
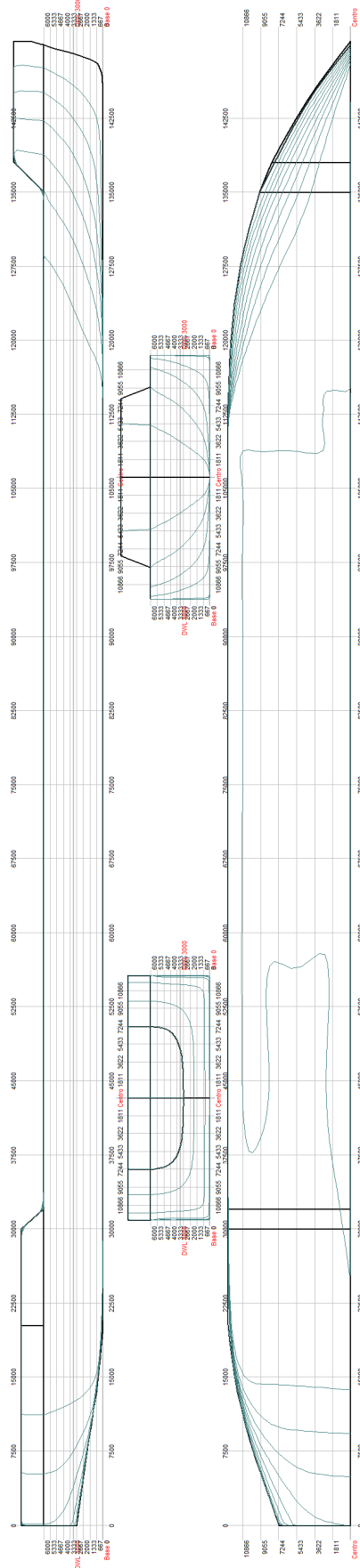


FIGURA 21. Planos de líneas y formas de la embarcación seleccionada



Data Summary**Physical Constants**

Grav. accel (g)	9.81000	metres/sec^2
Water temperature	15.00000	deg.C
Water density	1.02500	tonnes/cu.m
Water viscosity	0.00000	metres^2/sec

Main Dimensions

Length b.p.	150.000	metres
Breadth mld.	24.000	metres
Design draught	3.000	metres
Afterbody form	10	(-10 = V-form -> +10 = U-form)
Forebody form	-10	(-10 = V-form -> +10 = U-form)

Appendages

No appendages

Given propeller particulars

Wageningen B-Series propeller		
Fixed Pitch		
Non-noise Reduced		
Efficiency factor	1.000	
Shaft height	2.000	metres
Cavitation SF	0.200	
Design speed	12.000	knots
Diameter	2.000	metres
Number of blades	4	
Min. Effective BAR	0.400	
Number of screws	1	
Reynolds number correction using ITTC method		

Resistances

Data: Condition 1

Draught aft	3.000	metres	
Draught fwd	3.000	metres	
Mean draught	3.000	metres	
Length aft of AP	0.000	metres	
Length fwd of FP	0.000	metres	
Transom area	0.000	sq.metres	(0.000 % midship area)
Bulb area	0.000	sq.metres	(0.000 % midship area)
Height of Centroid	0.000	metres	
Displacement	9109	tonnes	
Long. centre buoy.	-3.195	metres	(-2.130 % LPP fwd midships)
Wetted surface	4131	sq.metres	
Half entrance angle	15.721	degrees	
Chine length (Lp)	0.000	metres	
Mean beam over chines	0.000	metres	
Deadrise at 50% Lp	20.000	degrees	
Demi-hull breadth	3.000	metres	
Angle of transom wedge	12.000	degrees	
Viscous resistance form factor	0.400		
Deadrise Angle	15.000	degrees	

Block coeff. (Cb)	0.823	Lpp/B	6.250
Midship area (Cm)	1.030	B/T	8.000
Prismatic (Cp)	0.799	CircM	7.242
Waterplane (Cwp)	0.898	CircS	9.628

Resistance estimated according to	Holtrop and Mennen
Propulsion factors estimated according to	Holtrop and Mennen
Wake correction method	ITTC 1978 (including Form Factor Correction)

Service allowance	0	%
Hull roughness	120	microns
Transmission efficiency	1.00	
Form factor, k	0.293	

Resistance Results - Condition 1

Speed kts	Fn	Rn /10 ⁹	Cf *10 ³	Cf x k *10 ³	Cr *10 ³	Ca *10 ³	Ct *10 ³	CircC
1.000	0.013	0.065	2.220	0.651	0.000	0.553	3.424	1.312
2.000	0.027	0.130	2.007	0.588	0.000	0.553	3.148	1.206
3.000	0.040	0.195	1.896	0.556	0.000	0.553	3.005	1.151
4.000	0.054	0.260	1.823	0.534	0.000	0.553	2.910	1.115
5.000	0.067	0.325	1.769	0.519	0.000	0.553	2.841	1.088
6.000	0.080	0.390	1.727	0.506	0.002	0.553	2.788	1.068
7.000	0.094	0.455	1.692	0.496	0.008	0.553	2.750	1.053
8.000	0.107	0.520	1.663	0.487	0.026	0.553	2.730	1.046
9.000	0.121	0.584	1.638	0.480	0.062	0.553	2.733	1.047
10.000	0.134	0.649	1.616	0.474	0.122	0.553	2.765	1.059
11.000	0.148	0.714	1.597	0.468	0.211	0.553	2.829	1.084
12.000	0.161	0.779	1.579	0.463	0.330	0.553	2.926	1.121

Conclusiones

Se desarrolló la metodología RESMAG, que es una herramienta de cálculo que inicia con un análisis paramétrico de las embarcaciones y a partir de una base de modelos de cascos, llevando en consideración las restricciones físicas del río como profundidad, ancho de canal y curvatura. De la preselección de hasta 3 modelos sigue un análisis de la resistencia al avance y potencia que nos orientará finalmente a la selección del casco apropiado. La validación de la escogencia del casco en el cálculo de resistencia al avance fue realizada a partir de herramientas computacionales tradicionales de diseño naval.

Cabe resaltar que de acuerdo a los resultados de evaluaciones de resistencia hubo coherencias comparado con el método tradicional de Holtrop y que este último no considera las correcciones debido a los efectos de aguas poco profundas. Los resultados serán validados en una fase posterior a través de ensayos de un canal de pruebas en los laboratorios de la Universidad Tecnológica de Bolívar (Toncel y Cabrera, 2013).

Trabajo futuro

El presente estudio de diseño de una embarcación se centró en su fase conceptual con el desarrollo de la herramienta de análisis RESMAG. Corresponde para trabajos futuros continuar con las otras disciplinas importantes del ciclo de diseño y de las fases consecuentes, el diseño preliminar e ingeniería básica.

Cabe resaltar que no se consideraron en este estudio los efectos hidrodinámicos debido a aguas someras en las evaluaciones de resistencia al avance, tema de principal importancia para continuar con esta investigación y como trabajo futuro para su inclusión en una nueva versión de RESMAG.

Aspectos a desarrollar:

- Realizar el análisis de estabilidad estática y dinámica.
- Realizar el análisis estructural.
- Realizar el análisis para el diseño preliminar de los propulsores necesarios para el sistema de autopropulsión.
- Realizar ensayos a través de canal de pruebas.
- Realizar la simulación aplicando mecánica de fluidos computacional (CFD¹¹).
- Mejorar el método que permite evaluar tanto para la resistencia al avance como la potencia solo para embarcaciones fluviales en aguas poco profundas, ya que se requiere la aplicación de probabilidad y estadística.

¹¹*Computational Fluid Dynamics*

Glosario

Definiciones tomadas de *Diccionario Esencial de la Lengua Española* por la Real Academia Española, *Encyclopædia Britannica Ultimate Reference Suite* por Encyclopædia Britannica Inc., *Merriam-Webster's Dictionary and Thesaurus* por Merriam Webster Inc., *Naval Architecture for Non-Naval Architects* por Harry Benford y *Ship Design for Efficiency & Economy* por Volker Bertram and Herbert Schneekluth.

A APÉNDICE: Parte de un buque que se extiende más allá del esquema principal del casco, incluyendo elementos tales como timón, ejes, struts, bosings y quillas de balance.

ASTILLERO: Establecimiento donde se construyen y reparan buques.

B BABOR: Lado o costado izquierdo de la embarcación mirando de popa a proa.

BARCAZA: Lancha grande para transportar carga de los buques a tierra o viceversa.

BORDA: Borde superior del costado de un buque.

BOSSING: Parte exterior curvada de chapa del forro del buque que rodea y soporta el eje de la hélice.

BULBO: Ubicado en la parte inferior de la proa, ya que presenta menos potencia en cuanto a la propulsión y mejores características de resistencia.

C CABOTAJE: Trafico marítimo en las costas de un país determinado.

CALADO: Profundidad que alcanza en el agua la parte sumergida de un barco. Altura que alcanza la superficie del agua sobre el fondo.

CARENA: Parte sumergida del casco de un buque. Reparación que se hace en el casco de la nave para hacerlo estanco.

CASCO: Cuerpo de la nave, exceptuando el aparejo y las máquinas.

CODASTE: Madero grueso puesto verticalmente sobre el extremo de la quilla inmediato a la popa, que sirve de fundamento a todo el armazón de esta parte del buque. En las embarcaciones de hierro forma una sola pieza con la quilla.

CONTENEDOR: Embalaje metálico grande y recuperable, de tipos y dimensiones normalizados internacionalmente y con dispositivos para facilitar su manejo.

D DESPLAZAMIENTO: Volumen y peso del agua que desaloja un buque, igual al espacio que ocupa en el agua su casco hasta la línea de flotación.

DRAGA: Máquina que se emplea para ahondar y limpiar los puertos, ríos, canales, etc., extrayendo de ellos fango, piedras, arena, etc.

- DUREZA: Resistencia que opone un mineral a ser rayado por otro.
- E ENCAUZAR: Encerrar en un cauce una corriente o darle dirección por él.
- ESCLUSA: Compartimento, con puertas de entrada y salida, que se construye en un canal de navegación para que los barcos puedan pasar de un tramo a otro de diferente nivel, para lo cual se llena de agua o se vacía el espacio comprendido entre dichas puertas.
- ESLORA: Longitud que tiene la nave sobre la primera o principal cubierta desde el codaste a la roda por la parte de adentro.
- ESTRIBOR: Banda derecha del navío mirando de popa a proa.
- F FLETE: Valor del traslado de mercancías en un vehículo de transporte.
- FLOTILLA: Flota compuesta de buques pequeños.
- G GRANEL: Dicho de cosas menudas, como trigo, centeno, etc.: Sin orden, número ni medida.
- H *HULL*: Casco.
- I INMERSIÓN: Acción de introducir o introducirse algo en un fluido.
- M MANGA: Anchura mayor de un buque.
- N NUDO: Unidad de velocidad para barcos y aviones, equivalente a una milla náutica por hora.
- P PANTOQUE: Parte casi plana del casco de un barco, que forma el fondo junto a la quilla.
- POPA: Parte posterior de una embarcación.
- PRAM*: Un pequeño bote casi plano de fondo ligero, con un amplio espejo de popa.
- PROA: Parte delantera de la nave, con la cual corta las aguas.
- PUNTAL: Altura de la nave desde su plan hasta la cubierta principal o superior.
- Q QUILLA: Pieza de madera o hierro, que va de popa a proa por la parte inferior del barco y en que se asienta todo su armazón.
- R REFLECTANCIA: Capacidad para reflejar la luz.
- REMOLCAR: Llevar una embarcación u otra cosa sobre el agua, tirando de ella por medio de un cabo o cuerda.
- RODA: Pieza gruesa y curva, de madera o hierro, que forma la proa de la nave.
- S SEMOVIENTE: Animal de granja.
- SKEG*: la parte de conexión de la quilla con la parte inferior del timón en un barco de una sola hélice.
- STRUT*: Puntal.

Referencias

- Agencia de Noticias UN. (2014, abril 4). *Costa Rica tiene prohibida la megaminería, un ejemplo para Colombia*. Bogotá, D.C., Colombia. Descargado de <http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co/ndetalle/article/costa-rica-tiene-prohibida-la-megamineria-un-ejemplo-para-colombia.html>
- Agencia Nacional de Minería. (2014, Febrero 6). *El país produjo 85,5 millones de toneladas de carbón durante 2013*. Bogotá, D.C., Colombia. Descargado de <http://www.anm.gov.co/?q=ANM-reporta-produccion-regalias-2013>
- Aguilera, J. (2011, Junio). *Plan de Manejo Ambiental para los Dragados de Mantenimiento del Canal Navegable del Río Magdalena, sector Puerto Salgar - Puerto Berrío* (Informe CM-038-09-075 V1). Bogotá, D.C., Colombia: Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia y CORMAGDALENA. Descargado de <http://fs03eja1.cormagdalena.com.co/nuevaweb/AdmonCon/Documentos/PLAN%20DE%20MANEJO%20AMBIENTAL-INFORME%20CM-038-09-075.pdf>
- AVEVA Group plc. (s.f.). *AVEVA — Marine Design & Engineering Software - AVEVA Marine*. Cambridge, United Kingdom. Descargado de <http://www.aveva.com/marine>
- Benford, H. (1991). *Naval Architecture for Non-Naval Architects*. Jersey City, NJ: The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Bertram, V., y Schneekluth, H. (1988). Lines Design. En *Ship design for efficiency and economy* (2.^a ed., p. 43). Woburn, MA: Butterworth-Heinemann.
- Binnenvaartlog. (s.f.). Descargado de <http://www.binnenvaartlog.nl/>
- Boada Sáenz Ingenieros. (2008, Abril). *Determinación de la Mejor Ubicación de un Puerto Fluvial Carbonero en el Río Magdalena, entre Puerto Berrío y Barrancabermeja* (Informe Final BSI-IF-01-08-V1). Bogotá, D.C., Colombia: Boada Sáenz Ingenieros, FEDENAVI y CORMAGDALENA.
- Bureau Voorlichting Binnevaart. (2011, Enero 11). Binnenvaart in Cijfers. *Blue Magazine*, 11. Descargado de http://www.bureauvoorlichtingbinnenvaart.nl/flexfleet/assets/files/BlueMagazine_def.pdf
- Chacón, J. (2013, Noviembre 10). Le llegó la hora al Magdalena. *Periódico El Espectador*. Descargado de <http://www.elespectador.com/noticias/economia/le-llego-hora-al-magdalena-articulo-457363>
- Chalfant, J. S., y Chryssostomidis, C. (2009). *Toward the Development of an Integrated Electric Ship Evaluation Tool* (Inf. Téc.). Cambridge, MA: MIT Sea Grant College Program, Massachusetts Institute of Technology. Descargado de http://seagrant.mit.edu/ESRDC_library/Chalfant-Toward-2009.pdf
- Colorado, P. (2012, Febrero 16). Se invierte duro para rescatar navegabilidad del río Magdalena. *Periódico El Colombiano*. Descargado de http://www.elcolombiano.com/BancoConocimiento/S/se_invierte_duro_para_rescatar_navegabilidad_del_rio_magdalena/se_invierte_duro_para_rescatar_navegabilidad_del_rio_magdalena.asp
- CORMAGDALENA. (2013a, Junio). *Niveles del río*. Descargado de <http://dc02eja.cormagdalena.com.co/index.php?idcategoria=110>
- CORMAGDALENA. (2013b, Junio). *Plan Maestro de Aprovechamiento del Río Magdalena*. Bogotá, D.C., Colombia. Descargado de <http://dc02eja.cormagdalena.com.co/?idcategoria=1134>

- CORMAGDALENA. (2013c, Agosto 15). *Visión Colombia 2019: Colombia Segundo Centenario* (Informe). Bogotá, D.C., Colombia: Autor. Descargado de http://fs03eja1.cormagdalena.com.co/php/cormagdalena/attachments/151_VISION%20Cormagdalena%202019%20-%20AGOSTO%2015%20-%2006.pdf
- Correa, M. V. (2013, Abril 21). Obras en el río Magdalena: sí, pero con plan ambiental. *Periódico El Colombiano*. Descargado de http://www.elcolombiano.com/BancoConocimiento/0/obras_en_el_rio_magdalena_si_pero_con_plan_ambiental/obras_en_el_rio_magdalena_si_pero_con_plan_ambiental.asp
- Encyclopædia Britannica. (2012a). *Amsterdam-Rhine Canal*. Chicago, Il: Encyclopædia Britannica Online. Descargado de <http://www.britannica.com/EBchecked/media/121038/Amsterdam-Rhine-Canal>
- Encyclopædia Britannica. (2012b). *Canals and Inland Waterways*. Chicago, Il: Encyclopædia Britannica Ultimate Reference Suite.
- Encyclopædia Britannica. (2012c). *Coal*. Chicago, Il: Encyclopædia Britannica Ultimate Reference Suite.
- Encyclopædia Britannica. (2012d). *Froude Number*. Chicago, Il: Encyclopædia Britannica Ultimate Reference Suite.
- Encyclopædia Britannica. (2012e). *Magdalena River*. Chicago, Il: Encyclopædia Britannica Ultimate Reference Suite.
- Encyclopædia Britannica. (2012f). *Reynolds Number*. Chicago, Il: Encyclopædia Britannica Ultimate Reference Suite.
- Figuroa, H. (2013, Diciembre 12). Impala le Apuesta al Transporte Multimodal en Colombia. *Periódico El Universal*, 9.
- Hernández, M. E., Herrera, R. J., Villalba, L. M., y Gómez, J. L. (2007, Diciembre). *Estudio de Caracterización Transporte Acuatico, Subsector Transporte Fluvial* (Informe). Cartagena D.T y C., Colombia: SENA. Descargado de <http://observatorio.sena.edu.co/mesas/01/TRANSPORTE%20ACUATICO.pdf>
- Holtrop, J. (1977, Febrero). A Statistical Analysis of Performance Test Results. *International Shipbuilding Progress*, 23-28. Descargado de http://esrdc.mit.edu/library/ESRDC_library/Holtrop-Statistical-Feb-1977.pdf
- Holtrop, J. (1984). A Statistical Re-Analysis of Resistance and Propulsion Data. *International Shipbuilding Progress*, 272-276. Descargado de http://esrdc.mit.edu/library/ESRDC_library/Holtrop-Stat-Re-Analysis-1984.pdf
- Holtrop, J., y Mennen, G. G. J. (1982). An Approximate Power Prediction Method. *International Shipbuilding Progress*, 166-170. Descargado de http://esrdc.mit.edu/library/ESRDC_library/Holtrop-Approximate-1982.pdf
- ICANH. (2010, Abril). *Río Magdalena: Navegando por una Nación* (Información de prensa). Bogotá, D.C., Colombia: Ministerio de Cultura. Descargado de http://www.icanh.gov.co/recursos_user/EXPOSICION%20Rio%20Magdalena.pdf
- Merriam-Webster. (2007). *Merriam-webster's dictionary and thesaurus*. Springfield, MA: Perfection Learning Corporation.
- Ministerio de Transporte. (2012, Marzo 5). *Al río Magdalena le llegó la hora: Ministro de Transporte*. Barranquilla, Colombia. Descargado de <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones.php?id=761>
- Microsoft Encarta. (2009). *Carbón*. Redmond, WA: Microsoft Corporation.
- Molina, A. (2013, Marzo 14). El Río es más que Agua: Obras para la Recuperación de la Navegabilidad del Río Magdalena Puerto Salgar/La Dorada - Barranquilla. En *3rd International Ship Design & Naval Engineering Congress*. Cartagena D.T. y C., Colombia. Descargado de <http://dc02eja.cormagdalena.com.co/recursos>

- _user//flash.swf
- MTC. (2007, Junio). *Mejoramiento y Mantenimiento de las Condiciones de Navegabilidad en los Ríos Ucayali, Huallaga, Marañón y Amazonas* (Informe). Lima, Perú: Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Descargado de https://www.mtc.gob.pe/portal/transportes/acuatico/s_nosotros/Perfil%20de%20Proyecto/Mejoramiento%20y%20Mantenimiento%20de%20las%20Condiciones%20de%20Navegabilidad%20en%20las%20V%C3%ADas%20Navegables/PERFIL%20MEJ%20MANT%20HIDROVIAS%20FINAL.pdf
- Newman, J. N. (1977). Model Testing. En *Marine hydrodynamics* (p. 28). Cambridge, MA: MIT Press.
- PIANC, IALA, IAPH, y IMPA. (1997, Junio). *Approach Channels: A Guide for Design* (Final report / of the Joint PIANC-IAPH Working Group II-30 in cooperation with IMPA and IALA n.º 95). Bruselas, Bélgica: Permanent International Association of Navigation Congresses, International Association of Lighthouse Authorities, International Association of Ports and Harbors e International Maritime Pilots Association.
- Real Academia Española. (2006). *Diccionario esencial de la lengua española*. Madrid, Spain: Espasa Calpe.
- Revista Dinero. (2010, Octubre 25). El remolcador más moderno y grande de Colombia ya está operando. *Revista Dinero*. Descargado de <http://www.dinero.com/actualidad/noticias/articulo/el-remolcador-moderno-grande-colombia-esta-operando/106164>
- Revista Semana. (2013, Octubre 5). El renacer del río Magdalena. *Revista Semana*. Descargado de <http://www.semana.com/nacion/articulo/renacer-del-rio-magdalena/359951-3>
- Sociedad Portuaria del Caribe. (s.f.). *Proyecto Terminal*. Barranquilla, Colombia. Descargado de <http://spcaribe.com/>
- Toncel, W., y Cabrera, J. H. (2013, Marzo 14). Modelo de Diseño de un Canal de Ensayos Hidrodinámicos para Colombia. Cartagena D.T y C., Colombia.
- Tvedt, H. (2012). *Modular approach to offshore vessel design and configuration*. Tesis master of science in marine systems design, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Noruega. Descargado de <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:566095/FULLTEXT01.pdf>
- UPME. (s.f.). *Panorama Sector Carbonífero*. Descargado de http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/panorama/contenid/panorama.htm
- UPME. (2005). *La Cadena del Carbón en Colombia* (S. A. Mejía, Ed.). Bogotá, D.C., Colombia: Ministerio de Minas y Energía. Descargado de http://www.upme.gov.co/Docs/Cadena_carbon.pdf
- U.S. Energy Information Administration. (2012, Noviembre 16). *Coal Transportation Rates to the Electric Power Sector*. Washington, D.C.: Independent Statistics & Analysis. Descargado de <http://www.eia.gov/coal/transportationrates/trend-coal.cfm#fig3>
- v Engeland, M. (2006). Free!ship manual (Version 2.6 ed.) [Manual de software informático]. Boston, MA.
- Voies Navigable de France. (2012, Junio). *Le Mémento du Fluvial 2011-2012* (Documento). Béthune, Francia. Descargado de http://www.vnf.fr/vnf/img/cms/Tourisme_et_domaine/MEMENTO_2011_-_2012_201208031206.pdf
- World Coal Association. (s.f.). *Uses of Coal*. Londres, Reino Unido. Descargado de <http://www.worldcoal.org/coal/uses-of-coal/>

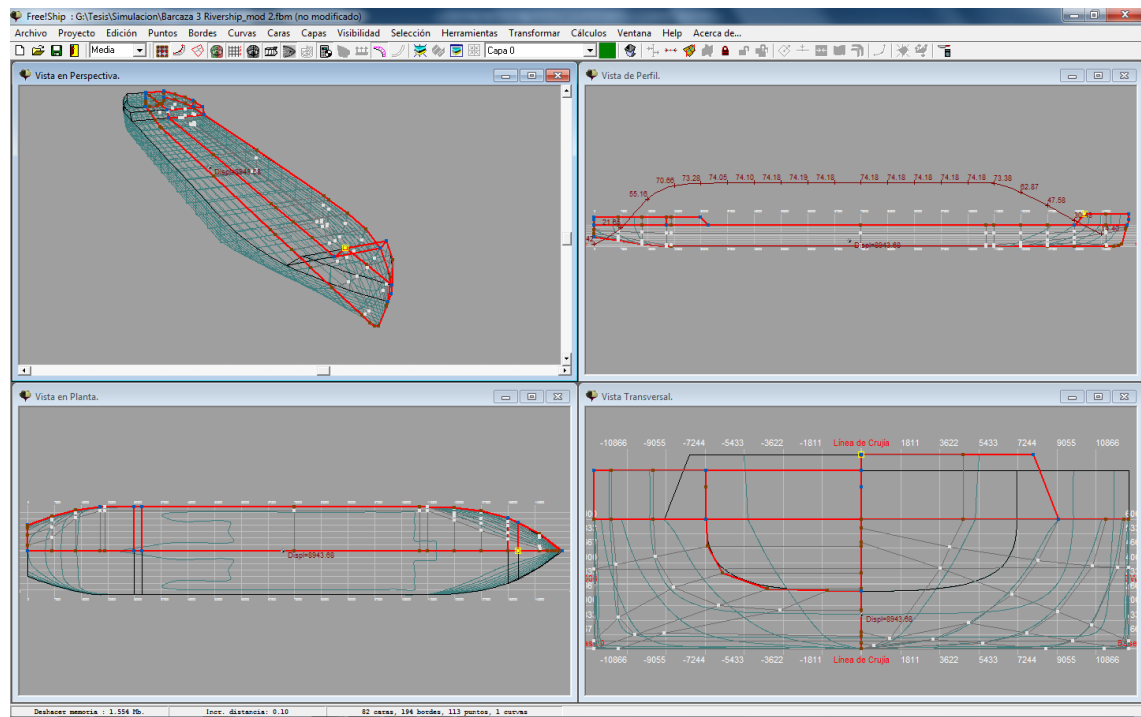
-
- World Coal Association. (2012a). *Coal Market & Transportation*. Descargado de <http://www.worldcoal.org/coal/market-amp-transportation/>
- World Coal Association. (2012b, Abril 16). *Coal –Energy for Sustainable Development* (Reporte). Londres, Reino Unido: Autor. Descargado de [http://www.worldcoal.org/bin/pdf/original_pdf_file/coal_-_energy_for_sustainable_development_final\(16_04_2012\).pdf](http://www.worldcoal.org/bin/pdf/original_pdf_file/coal_-_energy_for_sustainable_development_final(16_04_2012).pdf)
- World Coal Association. (2013, Septiembre 11). *Coal Facts* (Documento). Londres, Reino Unido: Autor. Descargado de [http://www.worldcoal.org/bin/pdf/original_pdf_file/coal_facts_2013\(11_09_2013\).pdf](http://www.worldcoal.org/bin/pdf/original_pdf_file/coal_facts_2013(11_09_2013).pdf)

Parte I
Anexos

Descripción de las herramientas computacionales comerciales

En este apéndice se reseña los ambientes computacionales usados en la validación de resultados de RESMAG usando los programas FREE!ship y AVEVA Marine. Esto servirá de guía de referencia para futuras evaluaciones. El primero, es un software de uso libre para el diseño preliminar de embarcaciones (figura A.1). El segundo, a diferencia de lo anterior, es un poderoso software de licencia comercial reconocido en la industria naval y acompaña el diseño desde su fase conceptual hasta su efectiva construcción.

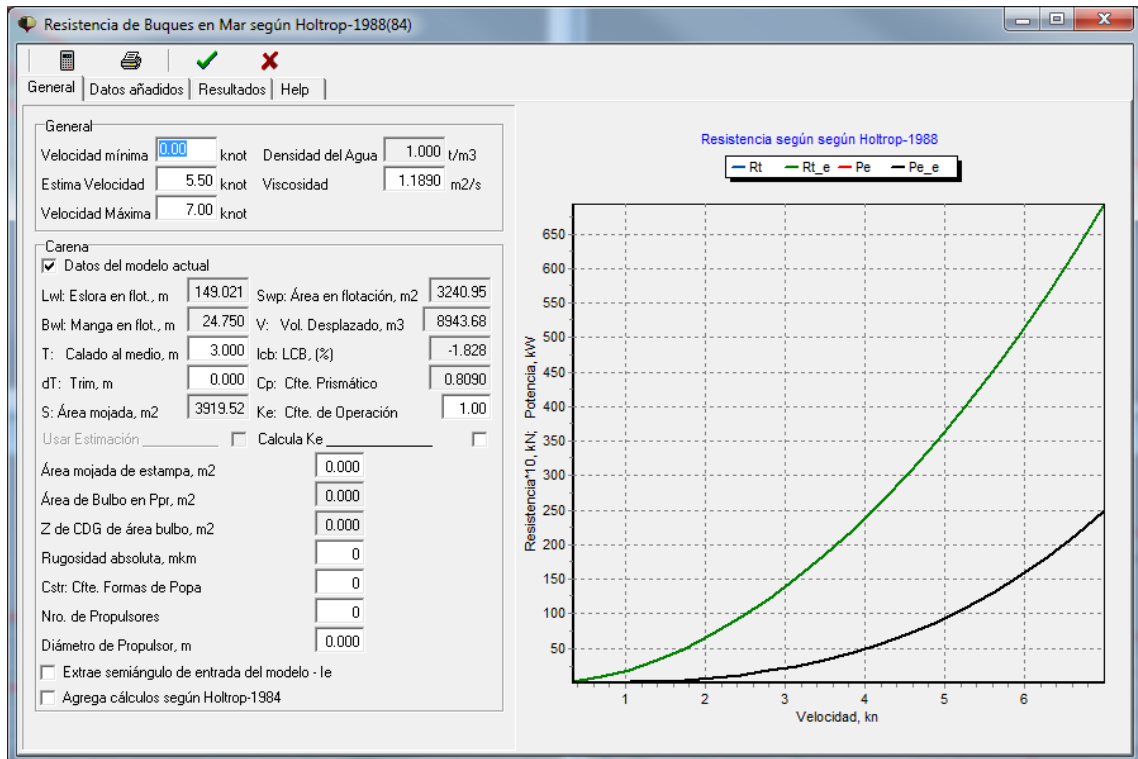
FIGURA A.1. Escritorio de FREE!ship



A.1. Análisis de resistencia en FREE!ship

Para calcular la resistencia al avance y la potencia, seleccionar *Método de Holtrop-1988(84)* para barcos en el mar en *Cálculos* → *Resistencia* ubicado en la barra de herramientas. Luego, escribir las velocidades de la embarcación en *General*. Activar *Datos del modelo actual* en *Carena*. El resultado muestra las gráficas que se ilustran en la figura A.2. Si desea más resultados en tablas, ver en la pestaña *Resultados*.

FIGURA A.2. Resultados de resistencia y potencia según Holtrop 1988(84)



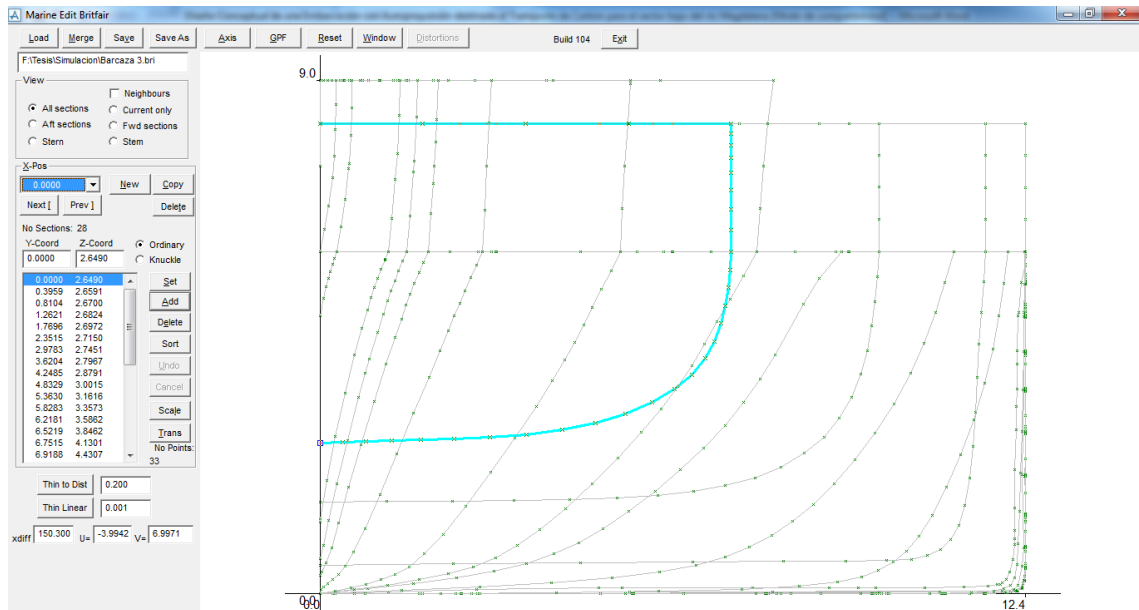
A.2. Análisis de resistencia en AVEVA Marine

El software AVEVA Marine es adquirido por la Universidad Tecnológica de Bolívar para su uso en la líneas de investigación bases de la maestría en Ingeniería Naval y Oceánica. Para el análisis de resistencia se debe crear previamente un nuevo proyecto a través del módulo *Project Tools*. Luego exportar y editar la geometría por el módulo *Marine Edit Britfair*. Después revisar sus líneas y formas en el módulo *Surface & Compartment*. Y por último realizar los respectivos cálculos a través del módulo *Hydrostatics & Hydrodynamics*.

Para exportar las coordenadas geométricas, en FREE!ship, dar clic en la barra de herramientas *Archivo* → *Exportar* → *Offset*. El módulo *Marine Edit Britfair* permite visualizar la geometría del casco por secciones como se muestra la figura A.3. Antes de trabajar, se debe editar el archivo que se ha exportado (organizar los valores siguiendo el formato como se muestra en la tabla A.1) y guardarlo con extensión *.bri*. Terminado el módulo anterior, se revisa las líneas y formas del casco en el módulo *Surface & Compartment*. Si presenta alguna irregularidad con la geometría del casco se debe volver a revisar una y otra vez las

coordenadas en el archivo y los nodos. Finalizando, se libera los cálculos geométricos en *File* → *Release* → *Calculation Geometry* ubicado en la barra de herramientas. Se espera que la ventana de comando no muestre errores. Con esto genera un archivo que permite ser leído en el módulo *Hydrostatics & Hydrodynamics*.

FIGURA A.3. Módulo *Marine Edit Britfair*



Ya posesionado en el módulo *Hydrostatics & Hydrodynamics* se detalla a continuación el procedimiento y las variables de entradas necesarias para la obtención de resultados. Desde el módulo *Surface & Compartment* se crea un archivo nuevo para ejecutarlo en *Hydrostatics & Hydrodynamics*. Luego, en la parte izquierda (*Calc Tree*) se localiza la función *Powering*. Escogemos *Powering Calculation* al extender el contenido, al presionar clic derecho del mouse muestra las opciones que en este caso seleccionamos *Edit*. Luego al surgir una nueva ventana se ingresa las variables necesarias en cada una de las pestañas. Estas son:

- General: Body Shape Coefficients.
- Loading Conditions: Mean Draft, CB, LCB from midships, CM, Wetted Surface Area, CWP y $1/2$ Entrance Angle.
- Resistance and Propulsion: Resistance Method, Propulsion Factors, Ship/Model Correlation, Speed From, Speed To y Speed Increment.
- Propeller Design Condition: Propeller Serie, Reynold's No. correction method, Propeller design parameters (Design diameter y Prop diameter) y Other propeller data (No. of propeller blades y Shaft height).

Al final, seleccionamos la función *Powering Calculation*, al presionar clic derecho del mouse muestra las opciones que en este caso escogemos *Calculate*. De esta forma se obtiene los resultados como *Data Summary*, *Optimum Propeller*, *Resistance y Powering*. En caso de mostrar error en la ventana de comandos, revisar los datos.

TABLA A.1. Formato de coordenadas para el módulo *Britfair* en AVEVA Marine

Contenido en el archivo	Explicación	
Britta	Nombre del casco arbitrario	
1	Iniciar sección en 1	
8 -4.42 -4.42	Número de nodos coordenadas sección x coordenadas sección x	Sección 1
0.00 0.00	y z	
0.04 0.00	y z	
0.04 9.20	y z	
3.52 9.88	etc...	
6.28 10.68		
8.84 12.08		
10.32 13.76		
11.12 16.24		
0	Fin de sección 1	
11 0 0	Número de nodos coordenadas sección x coordenadas sección x	Sección 2
0.00 0.00	y z	
0.16 0.00	y z	
0.24 5.00	y z	
0.56 7.20	etc...	
1.40 8.12		
2.68 8.72		
6.76 10.04		
8.76 11.16		
10.52 12.76		
11.56 14.60		
11.96 16.20		
0	Fin de sección 2	
...	Sección 3	
...	etc...	
...	...	
...	...	
0	Fin de sección xx	
8 162 162	Número de nodos coordenadas sección x coordenadas sección x	Sección n
0.00 3.50	y z	
0.00 4.00	y z	
0.00 6.00	y z	
0.00 8.00	etc...	
0.00 10.00		
0.00 12.00		
0.00 14.00		
0.00 16.00		
0	Fin de sección n	
0 0 0	Fin de archivo indicador	

Fuente: AVEVA, *Introduction to the Britfair format for hull definition*, ISHIPDESIGN Confidential, AVEVA Marine, Cambridge, Reino Unido, 2013.

Parte II
Artículos científicos

Diseño Conceptual de una Embarcación con Autopropulsión destinada al Transporte de Carbón para el sector bajo del Río Magdalena

Oscar D. ACOSTA-LOPERA, Jairo H. CABRERA-TOVAR

*Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Bolívar, Parque Industrial y Tecnológico Carlos Vélez Pombo, km 1 vía Turbaco, Cartagena, Colombia.
lopera1988@gmail.com*

Resumen: En este proyecto se desarrolla el diseño conceptual de una barcaza autopropulsada para el transporte de carbón en el río Magdalena entre los puertos de la ciudad de Barranquilla y Capulco, este último ubicado en el bajo Magdalena. En el diseño se consideran las restricciones físicas del río además de seleccionar las líneas y formas del casco más apropiadas del punto de vista de resistencia al avance y la propulsión. *Copyright © UPB 2013*

Palabras clave: barcaza autopropulsada, líneas y formas, resistencia al avance, río Magdalena, transporte de carbón.

Abstract: Conceptual design of an inland-water self-propulsion ship for coal transportation appropriate to Magdalena river low section, between the ports of Barranquilla and Capulco. The design considering the physical constraints of the river and define the appropriate hull lines in order of optimizing powering aspects.

Keywords: inland water self-propulsion ship, coal transportation, Magdalena River, hull lines, powering aspects.

UPB_autoArt 2013-07-19, s 2013-10-07

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente Colombia es el país con las mayores reservas de carbón en América Latina con recursos potenciales aproximados a 17 millones de t [1], y en función a la existencia de una creciente demanda internacional de este producto se hace necesario definir alternativas de transporte entre sus yacimientos y los principales puertos de exportación. Una alternativa ante dicho problema sería la utilización del recurso hídrico para el transporte de carbón como es el río Magdalena, la cual es la principal arteria fluvial que conecta los puertos ubicados en el norte del país con los campos de producción de este mineral. A pesar de que la alternativa fluvial es considerada la más viable para el transporte de amplios volúmenes de carga *vs.* distancia, lo que se observa en el país es el dominio de los sistemas terrestres y ferroviarios para el transporte del carbón. Sin embargo, la poca utilización que se hace a través del río se realiza por medio de sistemas convoy-barcaza-empujador [2] con bajas eficiencias operacionales comparada al sistema de embarcaciones con propulsión propia.

Este proyecto diseña en su etapa preliminar el concepto de una barcaza autopropulsada con sus dimensiones principales, considerando las condiciones físicas de río y sus restricciones de carga representadas en calados permitidos. Es considerado en el diseño un arreglo estructural de doble casco y compuertas en la cubierta, de manera a minimizar el riesgo de contaminación al medio ambiente del río. Los análisis de resistencia y potencia son basados en Holtrop [3] con correcciones debido al efecto de aguas poco profundas. Una herramienta de análisis, RESMAG, es

desarrollada para este estudio permitiendo la selección de la barcaza con menor resistencia al avance para las características propias del río Magdalena. Los resultados son finalmente comparados con un programa especializado de ingeniería naval. En una fase posterior, se realizarán los respectivos ensayos de validación de una manera experimental a través de un canal de pruebas que actualmente se encuentra en desarrollo en la Universidad Tecnológica de Bolívar (UTB) [4], siendo el primero y único en el país orientado a estos fines.

El diseño de embarcaciones fluviales apropiadas a las condiciones del río y la carga a ser transportada representa un gran impulso a la utilización del río Magdalena como alternativa de transporte. Se considera como una vía natural que une los principales centros industriales del interior del país con los puertos de exportación e importación localizados en la costa norte colombiana.

Además se debe considerar que actualmente se proyectan grandes obras de dragado y encauzamiento. Esto convierte el río Magdalena en la principal hidro vía del país que, comparado con otras alternativas de transporte, pueda representar mayores ventajas tanto económicas como ambientales.

Se espera que el producto final sea un modelo de selección de la embarcación apropiada a las condiciones del río. Para eso se utiliza el método de cálculo que determine la resistencia al avance y potencia para este tipo de embarcaciones. Con esto lleva en consideración las características propias del río Magdalena.

2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE NAVEGABILIDAD

El río Magdalena tiene una longitud de 1.497 km (930 millas) que fluye desde el sur hacia el norte del país [5]. Nace en el páramo de las Papas ubicado en el macizo colombiano, exactamente en la cordillera de los Andes, comprendido en el departamento del Huila, recorriendo los departamentos de Tolima, Cundinamarca, Boyacá, Caldas, Antioquia, Santander, Cesar, Bolívar, Magdalena y Atlántico. Además recibe los ríos San Jorge, Cesar y Cauca. Se divide en tres sectores llamados alto, medio y bajo Magdalena. El primer sector recorre algunos de los municipios cerca del macizo colombiano, San Agustín e Isnos, Timaná, Neiva, Villavieja, Girardot y Ambalema; el segundo sector pasa por los municipios de Marquita, Honda, Puerto Nare, Puerto Berrío, Barrancabermeja y Puerto Wilches; el último sector recorre los municipios de Gamarrá, El Banco, San Martín de Loba, Mompo, Magangué y Barranquilla [6]. El río desemboca en el mar Caribe por dos puntos, uno en Bocas de Ceniza cerca de Barranquilla y otro pasando por el canal del Dique cerca de la ciudad de Cartagena [7].

A pesar de la longitud, la extensión y potencial capacidad de comunicar las mineras ubicadas en el interior del país con los principales puertos del Caribe colombiano, la navegabilidad del río es considerada como una vía limitada. Solo los dos últimos sectores son navegables comercialmente, a menor escala desde Puerto Berrío hasta Barrancabermeja, y a mayor escala hasta Bocas de Ceniza. Esto significa que los recorridos tienen acceso a los dos puertos más importantes del país que son Cartagena y

Barranquilla. La demanda actual del transporte fluvial es de 2,48 millones de t anuales (2004), en el caso de las cargas en general, que además incluye carbón, es de aproximadamente 0,90 millones de t [7].

En los últimos años se han hecho obras para el mejoramiento de los puertos fluviales y la navegabilidad del río Magdalena. Los puertos ubicados en los municipios anteriormente han sufrido la falta de actividades de carga de manera fluvial. Hoy en día se realizaron mejoras con la modernización e instalaciones físicas, aumentando el movimiento de la carga de los ríos. Principalmente las embarcaciones transportan hidrocarburos y carbón, para el caso de los contenedores no existe flota apta para este tipo de carga aunque se está desarrollando. En cuanto a su navegabilidad se han hecho obras de encauzamiento permitiendo que las embarcaciones naveguen sin ninguna dificultad [7].

Los proyectos a mediano y largo plazo se realizarán la recuperación de la navegabilidad que incluye la construcción de puertos, sistemas de navegación satelital, obras de encauzamiento y mantenimiento del canal navegable. Para la demanda futura se espera que la carga sea de 8,3 millones de t al año, en el caso del carbón se estima que el producto alcance con un total de 1,8 millones de t [7].

El presente estudio se centrará en el diseño conceptual del casco de una embarcación con propulsión propia para el sector bajo del río Magdalena entre los puertos de Barranquilla y Capulco. Se

pueda ofrecer toda una potencialidad frente a las condiciones de navegabilidad proyectada para el río.

3. TRANSPORTE DE CARBÓN

En la ruta seleccionada (Capulco-Barranquilla) con una distancia aproximada de 500 km, se están desarrollando dos nuevos puertos especializados en carbón y gránules sólidos. En el puerto de Capulco se espera que la primera fase alcance la carga de 1 millón de t anuales, mientras que en Barranquilla se espera que la carga aumente hasta 3 millones [8].

El carbón es uno de los más importantes de los combustibles fósiles primarios, ya que es sólido y contiene material rico en carbono. Este apreciado material contiene principalmente hidrocarburos volátiles, azufre, nitrógeno, y otros minerales que quedan como cenizas al quemarlo [9]. Se clasifican según su contenido de carbono fijo, como la turba que con bajo contenido y alto índice de humedad; el lignito, de contenido alto es considerado el carbón de peor calidad; el carbón bituminoso, su poder calorífico es superior debido a su alto contenido; y la antracita, mayor contenido y máximo poder calorífico [10].

Las mayores reservas se encuentran en los departamentos de La Guajira y Cesar. Además con el 84 % del total de las reservas del país, seguido de Cundinamarca y Boyacá con el 6 % y por último Santander, Antioquia, Valle del Cauca y Cauca con el 3 %. Se estima que el 68 % es del tipo térmico y el 32 % es Coquizable [11].

Colombia está entre los 10 países productores de carbón en el mundo con una carga 74 millones de t. La minería de carbón juega un papel muy importante en la economía del país. Según cifras, durante el 2009 ganó más de USD\$5 billones en ingresos de exportación de carbón [12].

4. EMBARCACIONES FLUVIALES CARBONIFERAS

En Estados Unidos el río Mississippi es la principal arteria fluvial para el transporte de carbón que conecta a otros ríos como Ohio, Missouri, entre otros. El carbón es usado en su mayor porcentaje para el sector eléctrico, y otro para exportación en los puertos de Nueva Orleans. El modo de transporte más usado es el ferroviario, seguido de terrestre, barcasas y otros medios [13].

En Los Países Bajos es pionero en la flota del transporte fluvial a diferencia de los países europeos. Su flota es considerada como la más grande y moderna del continente, ya que cuenta con una amplia gama de tipos de embarcaciones con capacidad total de 7,4 millones de t. Las empresas que realizan esta actividad ha aumentado a 3.600 (2008). Alrededor del 5 % de toda la flota de Europa Occidental está bajo la bandera holandesa [14].

En Colombia el transporte fluvial de cargas mayores se realiza principalmente utilizando barcasas empujadas por remolcadores, con sistema denominado “Convoy”. Varía según su capacidad y conformación en serie y/o paralelo. El más largo alcanza una longitud de 254 m, con anchura de 26 m. Las características de los convoyes que operan actualmente varían según las condiciones

físicas y sectores que operan en el río. Para trayectos largos transportan aproximadamente 7.200 t usando un remolcador y seis barcazas con capacidad de transportar 1.200 t [2].

Esta propuesta busca dar respuesta a un sistema eficiente de transporte en función de las mejoras proyectadas para el río Magdalena en vista de convertirlo en una hidro vía. El sistema es basado en embarcaciones con propulsión propia que presenta mayores ventajas en maniobrabilidad y velocidad vs. capacidad de carga frente al sistema convoy utilizado actualmente, en función de este último de las condiciones de restricciones de calado, dependencia de la época de lluvias y presencia de reducidos radios de curvatura y giro.

5. METODOLOGÍA

La metodología está propuesta para la selección apropiada del concepto del casco de una embarcación fluvial para el río Magdalena, en su fase preliminar. Consiste inicialmente de un análisis paramétrico a partir de un conjunto de configuraciones geométricas de barcazas en operación y de diferentes configuraciones y orígenes. Luego de preseleccionar hasta tres configuraciones se realiza un análisis de flotabilidad y estabilidad a partir de las restricciones físicas de la ruta y del río. Un análisis posterior de resistencia y de potencia permite escoger el casco con las mejores condiciones de desempeño de punto de vista de resistencia al avance. Análisis estructural de la sección principal será finalmente necesario para la embarcación seleccionada

completando la metodología de selección del casco propuesta. Esto es detallado en la figura 1.

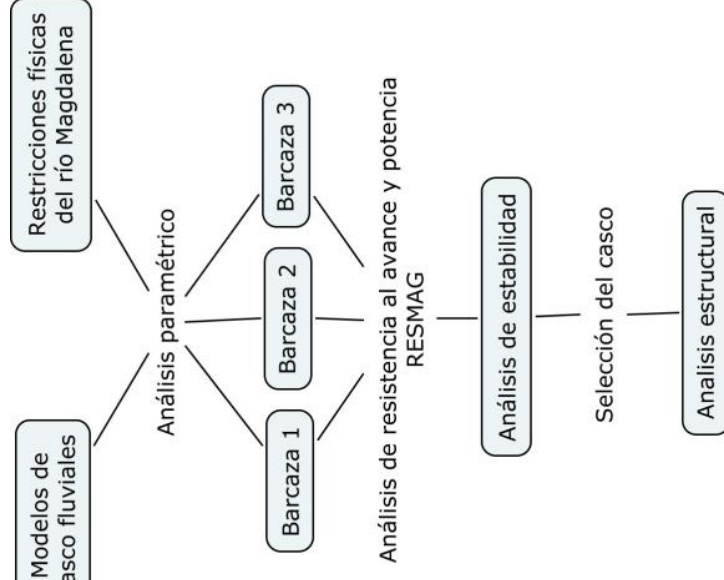


Figura 1. Metodología para la selección del casco

5.1. Modelo de casco y Restricciones Físicas del Río

Los modelos de casco corresponden a una base de datos de embarcaciones fluviales con diferentes coeficientes de forma y

Líneas de casco. Las restricciones físicas de río, calado, radios de curvaturas, presencia de puentes, canales, etc. deben ser consideradas como datos necesarios para el análisis paramétrico que resultará en la preselección de tres líneas y formas de embarcaciones. Para el sector de estudio, se presenta una profundidad mínima en Capulco de aproximadamente 4,5 m, definiendo el límite para estas embarcaciones a un calado no superior a 3 m. En la tabla 1 se describen las características de cada uno de los modelos preseleccionados y en la figura 2 se muestran las líneas de forma de las barcazas en su vista transversal.

Tabla 1. Dimensiones principales de las embarcaciones preseleccionadas

Dimensiones	Barcaza 1	Barcaza 2	Barcaza 3
Eslora (m)	159,60	160,31	150,00
Manga (m)	24,00	21,31	24,75
Calado (m)	3,00	3,00	3,00
Desplazamiento (t)	9.500,50	8.760,30	8.943,60

5.2. Análisis de estabilidad

El análisis de estabilidad se hace necesario para determinar las condiciones de equilibrio de una embarcación en la que un buque recupera su posición original. Existen dos tipos de estabilidad: estática y dinámica. La estabilidad estática analiza las condiciones de equilibrio en aguas tranquilas, por ejemplo, un río o un lago. En cambio la estabilidad dinámica la embarcación es sometida a condiciones de equilibrio en el mar, debido al efecto de fuerza de

olas y viento [15]. Los criterios de estabilidad sugeridos para este tipo de embarcaciones son adoptados por la Organización Marítima Internacional (IMO por sus siglas en inglés) [16]. La tabla 1 complementa información de los desplazamientos de las embarcaciones preseleccionadas.

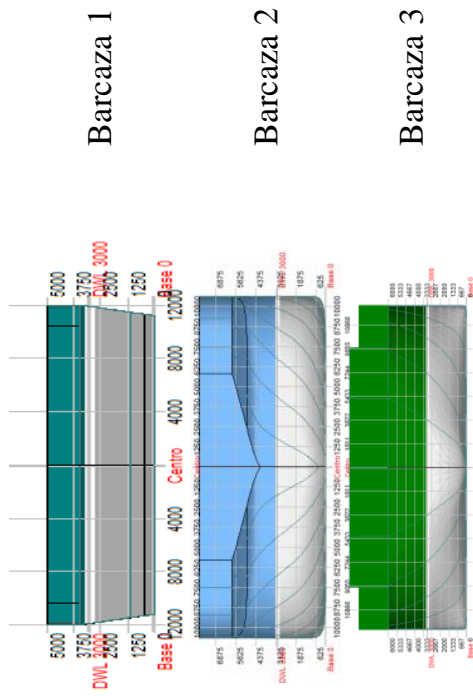


Figura 2. Vista transversal de los cascos preseleccionados

5.3. Análisis de resistencia

Para el análisis de resistencia al avance y criterio principal en la selección de la embarcación se desarrolló una herramienta de cálculo: RESMAG (evaluación de RESistencia al Avance para las condiciones y características del Río MAGdalena). Se fundamenta en el método de Holtrop y considera igualmente corrección por el efecto de aguas poco profundas basadas principalmente en el

método de Karpov [17]. Los resultados son verificados para el caso de Holtrop aplicando el software FREE!ship [18]. Además son presentados comparando, para las tres configuraciones preseleccionadas, los valores tanto de resistencia al avance como de potencia.

Método de Holtrop. El método de Holtrop permite estimar la resistencia al avance de una embarcación [19]. El cálculo de la resistencia total viene representado por la sumatoria de los componentes descritos de la siguiente manera

$$R_{Total} = R_F(1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (1)$$

donde R_F es la resistencia friccional, $1 + k_1$ es el factor de forma del casco, R_{APP} es resistencia de los apéndices, R_W es la resistencia de olas, R_B es la resistencia adicional debido a la presencia de bulbo en la proa, R_{TR} es la resistencia adicional debido a la popa sumergida, R_A es la resistencia en relación modelo-escala real de la embarcación.

El factor de forma viene representado de acuerdo con

$$1 + k_1 = f\left(\frac{B}{L}, \frac{T}{L}, \frac{L}{L_R}, lcb, \frac{L^3}{\nabla}, C_P\right) \quad (2)$$

donde B es la manga, L es la eslora, T es el calado, L_R es el parámetro que refleja la eslora, lcb es la posición longitudinal del centro de carena, ∇ es el volumen de cuerpo sumergido y C_P es el coeficiente prismático.

El cálculo de la resistencia en función de los apéndices es descrito de la siguiente forma

$$R_{APP} = \frac{1}{2} \rho V^2 S_{APP} (1 + k_2) C_F \quad (3)$$

donde ρ es la densidad del río, V es la velocidad, S_{APP} es el área mojada de los apéndices, $(1 + k_2)$ es el factor de resistencia al apéndice y C_F es el coeficiente de la resistencia friccional de la embarcación.

La resistencia debido a olas se representa por

$$R_W = f\left(F_n, C_M, \frac{\nabla}{L^3}, \frac{B}{T}, \frac{A_T}{BT}, T_f, h_b, C_P\right) \quad (4)$$

donde F_n es el número de Froude, C_M es el coeficiente de la sección media, A_T es el área de popa sumergida, A_{BT} es el área transversal por presencia de bulbo, T_f es la distancia vertical desde línea de quilla hasta la sección central del bulbo y h_b es la altura del bulbo. Existen tres ecuaciones de este tipo, ya que depende del número de Froude [20].

Para la resistencia en función de la relación modelo-escala real de la embarcación se calcula con

$$R_W = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_a \quad (5)$$

donde S es el área mojada del casco y C_a es el coeficiente de correlación.

Método de Karpov. Para el cálculo de la corrección de la resistencia al avance debido al fenómeno de aguas poco profundas se usa el método de A.B. Karpov [17]. La resistencia total en este caso es representada por

$$R_{total} = \frac{1}{2} \rho S ((C_F + C_a) V_1^2 + C_R V_2^2) \quad (6)$$

donde V_1 y V_2 son velocidades efectivas y C_R es el coeficiente de la resistencia residual de la embarcación. La evaluación de las velocidades efectivas se determina de la siguiente manera

$$V_1 = V/\alpha_* \text{ y } V_2 = V/\alpha_{**} \quad (7)$$

los coeficientes α_* y α_{**} son determinados por los diagramas propuestos por Karpov [17].

5.4. Análisis Estructural

Luego de la selección del casco por el criterio de resistencia al avance, corresponde ahora al diseño estructural de su sección principal. El dimensionamiento y arreglo estructural debe seguir los criterios mínimos exigidos por la normas clasificatorias para este tipo de embarcaciones, recomendadas principalmente por las pertenecientes a la Asociación Internacional de Sociedades Clasificadoras (IACS por siglas en inglés) [21]. El cálculo de las estructuras gigantes, refuerzos y laminas de la sección principal sigue dichas recomendaciones. La figura 3 detalla el arreglo

estructural de embarcación carbonífera en configuración de doble casco. Los resultados obtenidos de cálculo de inercia para de los elementos longitudinales fueron, para el módulo de sección, 2,8 m³, y para la inercia 7,51 m⁴. Estos valores fueron superiores al mínimo requerido por la Sociedad Clasificadora que son, para el módulo de sección, 1,98 m³ y para la inercia, 5,95 m⁴. El doble casco minimiza riesgo ambiental en el río, impidiendo derrames de carbón en caso que se presente averías en la embarcación, evitando la contaminación de las aguas. Además se añadieron compuertas ubicadas en la cubierta para evitar que las partículas de este mineral se esparzan por el ambiente.

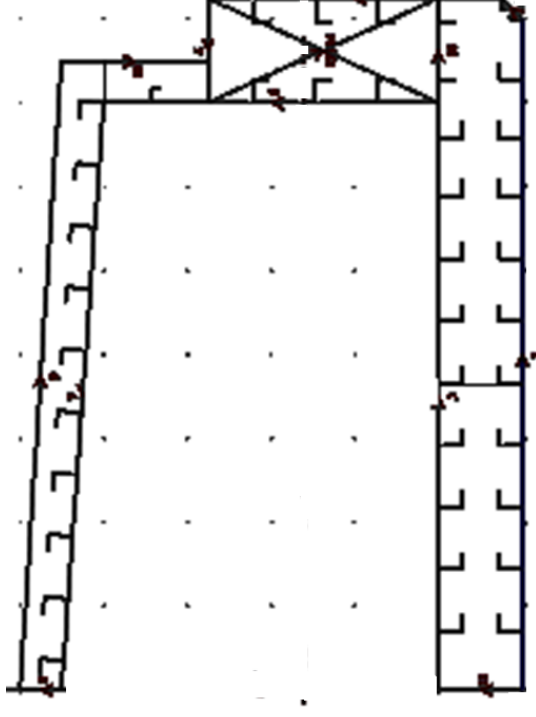


Figura 3. Arreglo Estructural para una Sección Media de Embarcaciones tipo Fluviales Carboníferas

6. RESULTADOS

En la figura 4 se muestra el comportamiento de la resistencia al avance de las embarcaciones preseleccionadas al aumentar su velocidad entre 4 y 7 nudos. La barcaza 1 presenta la mayor resistencia total entre todas las embarcaciones; mientras que las barcazas 2 y 3 sus valores de resistencia son inferiores a 70 kN a 7 nudos. La barcaza 3 presenta la menor resistencia y sería la mejor selección para el diseño, ya que su valor equivale a aproximadamente 50 kN. El anexo 1 se detalla el plano de líneas y formas de la barcaza autopropulsada 3 así como su vista isométrica.

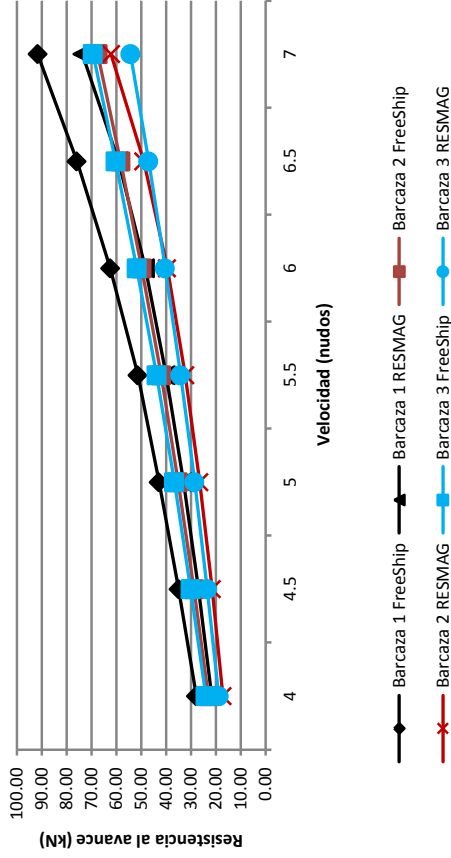


Figura 4. Análisis comparativo de las barcazas resistencia al avance

La figura 5 muestra el análisis de potencia de las barcazas. Sus valores de referencia son para el diseño de la hélice propulsora. Para el cálculo de la potencia del motor propulsor se deberá adicionar a dicha potencia las pérdidas por los eje(s) de transmisión y demás componentes presentes en este sistema. En el anexo 2 muestra los valores tanto de resistencia al avance como la potencia de cada uno de los modelos.

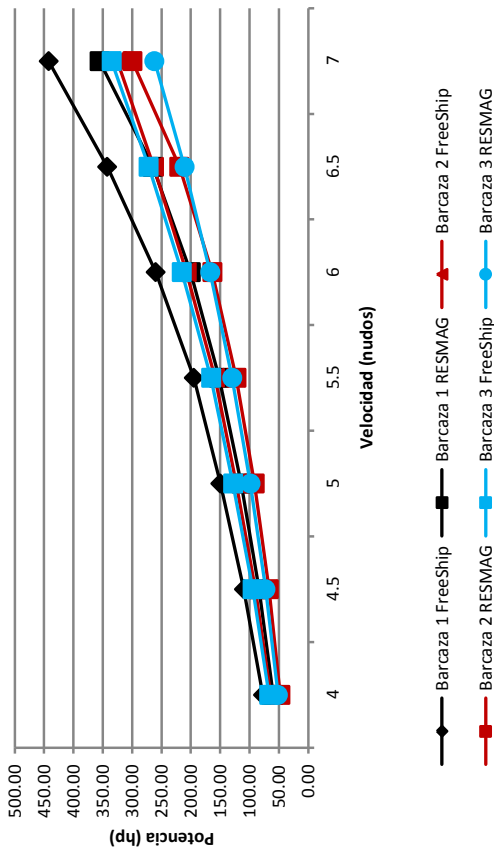


Figura 5. Análisis comparativo de las barcazas potencia

7. CONCLUSIONES

Se desarrolló una metodología de análisis que permite seleccionar el caso de una embarcación fluvial en su fase preliminar de diseño. Se desarrolló igualmente la herramienta computacional RESMAG que permite evaluar a partir de una base de datos las líneas y formas apropiadas a las restricciones del Río Magdalena. El caso de estudio se centra en la selección del casco en el diseño preliminar de una embarcación para el transporte de carbón entre los puertos de Capulco y Barranquilla.

Cabe resaltar que de acuerdo a los resultados hubo coherencias comparado con el método tradicional de Holtrop y que este último no considera las correcciones debido a los efectos de aguas poco profundas. Los resultados de RESMAG serán validados en una fase posterior a través de ensayos de un canal de pruebas en los laboratorios de la UTB.

REFERENCIAS

- [1] UPME, Carbón Colombiano, Fuente de Energía para el Mundo, Bogotá, Cundinamarca: Unidad de Planeación Minero Energético, 2005, p. 7.
- [2] SENA, «Estudio de Caracterización Transporte Acuatico, Subsector Transporte Fluvial,» Diciembre 2007. [En línea]. Available: <http://observatorio.sena.edu.co/mesas/01/TRANSPORTE%20ACUATICO.pdf>. [Último acceso: 28 Marzo 2013].
- [3] J. Holtrop, «A Statistical Analysis of Performance Test Results,» Febrero 1977. [En línea]. Available: http://seagrant.mit.edu/ESRDC_library/Holtrop-Holtrop-Statistical-Feb-1977.pdf.

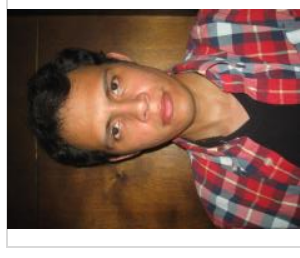
[Último acceso: 23 08 2013].

- [4] W. Toncel Zuleta y J. H. Cabrera Tovar, «Modelo de Diseño de un Canal de Ensayos Hidrodinámicos para Colombia,» de *3th International Ship Design & Naval Engineering Congress*, Cartagena, 2013.
- [5] Encyclopædia Britannica Ultimate Reference Suite, «Magdalena River,» Encyclopædia Britannica, Chicago, 2012.
- [6] ICANH, «Río Magdalena: Navegando por una nación,» Abril 2010. [En línea]. Available: http://www.icanh.gov.co/recursos_user/EXPOSICION%20Rio%20Magdalena.pdf. [Último acceso: 15 Agosto 2013].
- [7] CORMAGDALENA, «Visión Colombia 2019: Colombia Segundo Centenario,» 15 Agosto 2013. [En línea]. Available: http://fs03ejal.cormagdalena.com.co/php/cormagdalena/attachments/151_VISION%20Cormagdalena%202019%20-%20AGOSTO%2015%20-%2006.pdf. [Último acceso: 30 Agosto 2013].
- [8] SP Caribe, [En línea]. Available: <http://spscaribe.com/>. [Último acceso: 21 Febrero 2013].
- [9] Encyclopædia Britannica Ultimate Reference Suite, «Coal,» Encyclopædia Britannica, Chicago, 2012.
- [10] Microsoft Encarta, «Carbón,» Microsoft Corporation, 2009.
- [11] UPME, «Panorama Sector Carbonífero,» [En línea]. Available: http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/panorama/contenido/panorama.htm. [Último acceso: 2 Febrero 2013].
- [12] World Coal Association, «Coal - Energy for Sustainable Development,» 16 Abril 2012. [En línea]. Available: [http://www.worldcoal.org/bin/pdf/original_pdf_file/coal_-_energy_for_sustainable_development_final\(16_04_2012\).pdf](http://www.worldcoal.org/bin/pdf/original_pdf_file/coal_-_energy_for_sustainable_development_final(16_04_2012).pdf). [Último acceso: 2 Febrero 2013].
- [13] U.S. Energy Information Administration, «Coal Transportation Rates to the Electric Power Sector,» 16 Noviembre 2012. [En línea]. Available: <http://www.eia.gov/coal/transportationrates/trend-coal.cfm#fig3>. [Último

acceso: 23 Abril 2013].

- [14] Bureau Voorlichting Binnevaart, «Binnenvaart in cijfers.» *Blue Magazine*, p. 11, 11 Enero 2011.
- [15] Encyclopædia Britannica Ultimate Reference Suite, «Ship.» Encyclopædia Britannica, Chicago, 2012.
- [16] IMO, «Code On Intact Stability for All Types of Ships Covered Instruments, Resolution A.749 (18).» 4 Noviembre 1993. [En línea]. Available: [http://www.imo.org/blast/blastDataHelper.asp?data_id=22598&filename=A749\(18\)E.pdf](http://www.imo.org/blast/blastDataHelper.asp?data_id=22598&filename=A749(18)E.pdf). [Último acceso: 12 Septiembre 2013].
- [17] I. O. Velendnitsky, «Determination of Resistance of Displacement Ships In Shallow Water.» *Improvement of Inland Waterway Vessel and Barge Tow Performance*, n° 249, pp. 14-19, Septiembre 1982.
- [18] M. v. Engeland, «FREE!ship manual version 2.6.» 2006.
- [19] J. Holtrop y G. G. J. Mennen, «An Approximate Power Prediction Method.» 1982. [En línea]. Available: http://esrdc.mit.edu/library/ESRDC_library/Holtrop-Approximate-1982.pdf. [Último acceso: 1 Mayo 2013].
- [20] J. Holtrop, «A Statistical Re-Analysis of Resistance and Propulsion Data.» 1984. [En línea]. Available: http://esrdc.mit.edu/library/ESRDC_library/Holtrop-Stat-Re-Analysis-1984.pdf. [Último acceso: 23 Agosto 2013].
- [21] IACS, «International Association of Classification Societies Ltd.» 11 Septiembre 1968. [En línea]. Available: <http://www.iacs.org.uk>. [Último acceso: 16 Septiembre 2013].

AUTORES



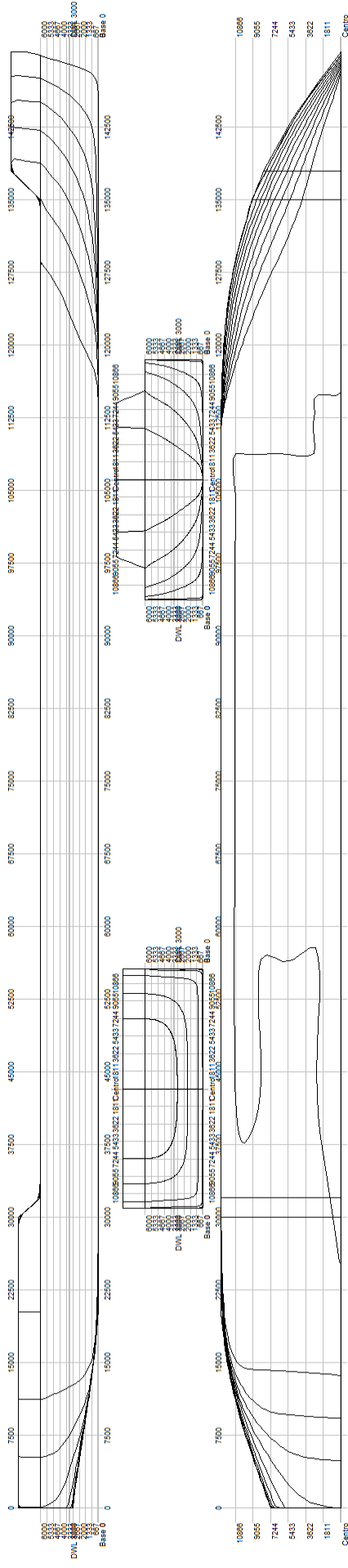
Oscar David ACOSTA LOPERA, nacido en Cartagena, Colombia. Estudiante de último año de Ingeniería Mecánica en la *Universidad Tecnológica de Bolívar* (UTB, 2014). Áreas de interés investigativo en diseño, arquitectura e ingeniería naval. Actualmente trabaja en el proyecto de grado bajo el mismo nombre del artículo en la UTB.



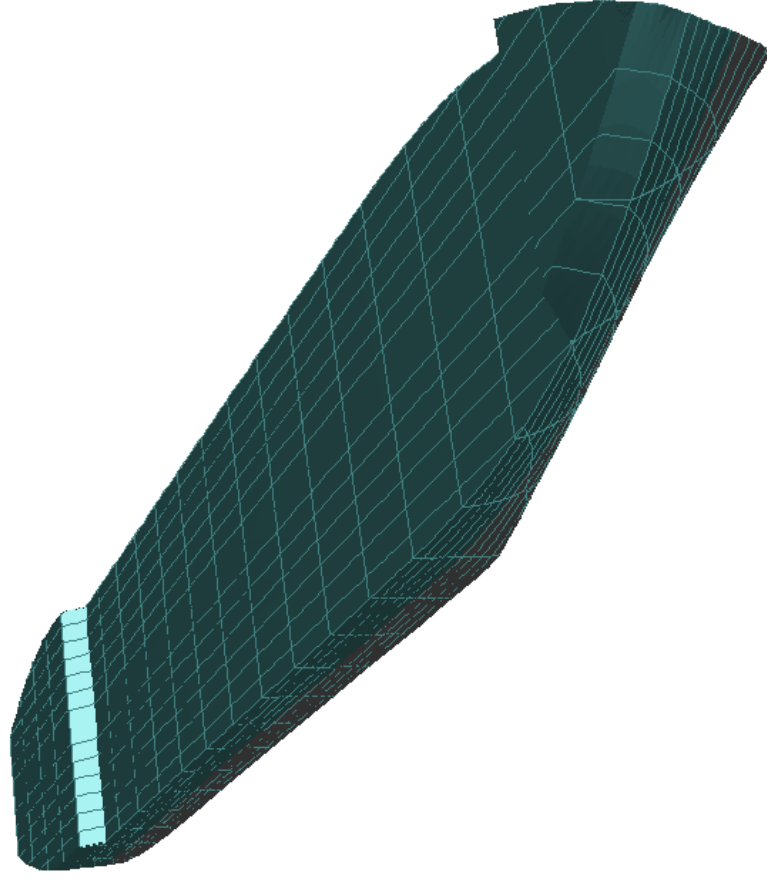
Jairo Humberto CABRERA TOVAR, nacido en Ibagué, Colombia. Obtiene el título de Ingeniería Naval en la *Escuela Naval de Cadetes "Almirante José Prudencio Padilla"* (ENAP, 1991), Magister, Doctorado y Postdoctorado en Ingeniería Naval y Oceánica en la *Universidad de São Paulo* (USP, 1994, 2000 y 2005). Áreas de trabajo en estructuras navales, hidrodinámica de buques y sistemas Offshore. Actualmente es docente y director de la maestría en Ingeniería Naval y Oceánica en la *Universidad Tecnológica de Bolívar* (UTB), investigador del grupo de investigación GIMAT (UTB), clasificada AI en Colciencias (2009) y es el director del proyecto de grado bajo el mismo nombre del artículo en la UTB.

ANEXOS

Anexo I: Planos de líneas & formas y vista isométrica de la barcaza seleccionada



A I. Figura 1. Planos de líneas & formas



A I. Figura 2. Vista isométrica de la barcaza seleccionada

Anexo II: Resultados de resistencia al avance y potencia.

V nudos	m/s	R_{Total} (kN)			Diferencia	P (hp)		
		FREE!ship	RESMAG	Diferencia		FREE!ship	RESMAG	Diferencia
Barcaza 1								
4,0	2,06	27,80	21,55	6,25	77,10	59,46	17,64	
4,5	2,31	34,91	26,94	7,97	109,59	83,64	25,96	
5,0	2,57	42,82	33,01	9,81	149,48	113,86	35,62	
5,5	2,83	51,30	39,98	11,32	194,72	151,69	43,02	
6,0	3,09	62,37	48,36	14,01	259,98	200,17	59,81	
6,5	3,34	75,80	59,07	16,73	342,59	264,89	77,69	
7,0	3,60	91,60	73,60	18,00	442,54	355,44	87,09	
Barcaza 2								
4,0	2,06	22,92	17,20	5,72	63,67	47,46	16,22	
4,5	2,31	28,75	21,53	7,22	90,32	66,84	23,48	
5,0	2,57	35,13	26,47	8,66	122,58	91,30	31,29	
5,5	2,83	41,90	32,28	9,62	158,91	122,48	36,43	
6,0	3,09	49,77	39,50	10,27	207,28	163,48	43,79	
6,5	3,34	58,27	48,99	9,28	262,84	219,69	43,15	
7,0	3,60	67,40	62,06	5,34	325,60	299,70	25,90	
Barcaza 3								
4,0	2,06	23,95	18,71	5,24	66,53	51,64	14,89	
4,5	2,31	30,04	23,37	6,67	94,38	72,55	21,83	
5,0	2,57	36,67	28,51	8,16	127,93	98,36	29,57	
5,5	2,83	43,70	34,15	9,55	165,62	129,59	36,03	
6,0	3,09	51,70	40,30	11,40	215,32	166,80	48,53	
6,5	3,34	60,23	46,98	13,25	271,74	210,66	61,07	
7,0	3,60	69,30	54,26	15,04	334,85	262,03	72,83	