



Investigación para la complementación de los estudios Fase II (Factibilidad) para la navegabilidad del río Atrato



INVESTIGACIÓN PARA LA COMPLEMENTACIÓN DE LOS ESTUDIOS FASE II (FACTIBILIDAD) PARA LA NAVEGABILIDAD DEL RÍO ATRATO

CONVENIO INTERADMINISTRATIVO 2141 de 2011

**MODELACIÓN HIDRO-MORFODINÁMICA DEL RÍO ATRATO
- INFORME 1: PUERTO DE QUIBDÓ -**

ABRIL DE 2013

QUIBDÓ - CHOCÓ

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	3
2	EL RÍO ATRATO Y EL PUERTO DE QUIBDÓ	5
2.1	Generalidades	5
2.2	Localización del Puerto	5
2.3	Variables hidrológicas relevantes	8
3	MODELACIÓN HIDROMORFODINÁMICA	10
3.1	Descripción del software de modelación	10
3.1.1	Generalidades	10
3.1.2	Flujo hidrodinámico	10
3.1.3	Transporte de sedimentos en suspensión	12
3.1.4	Transporte de sedimentos del lecho	12
3.1.5	Herramientas complementarias	15
3.2	Información de entrada	17
3.2.1	Requerimientos de información	17
3.2.2	Información disponible	17
3.3	Construcción del modelo	18
3.3.1	Delimitación del área de estudio	18
3.3.2	Diseño de la grilla computacional	18
3.3.3	Topo-batimetría	19
3.3.4	Rugosidad	20
3.4	Planteamiento de simulaciones con el modelo construido	21
4	RESULTADOS	22
4.1	Profundidad de flujo	22
4.2	Velocidad de flujo (promedio en la vertical)	23
5	DISCUSIÓN	25
5.1	Resultados a la luz de la infraestructura portuaria proyectada	25
5.2	Profundidad de socavación como resultado de la curvatura del canal y la protección de orilla	27
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	30
6.1	Conclusiones	30
6.2	Recomendaciones para el desarrollo de futuras fases	31

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Requerimientos mínimos de información para la construcción y operación del modelo hidrodinámico (2D)	17
Tabla 2. Resultados del proceso de calibración del coeficiente de rugosidad (n)	21
Tabla 3. Condiciones de frontera del modelo para diferentes escenarios hidrológicos.	21

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Localización general del Puerto multimodal de Quibdó (base cartográfica 2008)	7
Figura 2. Alineamiento preliminar de la infraestructura fluvial del puerto	7
Figura 2. Curva de duración de caudales medios diarios – Estación Quibdó	8
Figura 3. Curva de calibración Nivel - Caudal Estación Belén	9
Figura 2. Ejemplo de una grilla curvilínea generada a partir de Delft3D-RGFGRID.....	15
Figura 3. Ejemplo de una base topo-batimétrica construida a partir de Delft3D-QUICKIN	16
Figura 4. Ejemplo de visualización de resultados (vectores de velocidad) a partir de Delft3D-QUICKPLOT	16
Figura 5. Construcción de grilla computacional.....	19
Figura 6. Generación de superficie topo-batimétrica a partir de puntos de sondeo	20
Figura 7. Profundidad de flujo (m) en el sector de interés para diferentes escenarios hidrológicos	22
Figura 8. Velocidad de flujo (m/s) en el sector de interés para diferentes escenarios hidrológicos	23
Figura 9. Profundidad de flujo (m) en el canal de acceso con nivel de reducción (Q = Q95%)	25
Figura 10. Velocidad de flujo (m/s) en el canal de acceso en condiciones críticas de maniobrabilidad (Q = Q95%)	26

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de esta consultoría es realizar el complemento a los estudios Fase II del canal navegable del río Atrato, que realizó la UTCH en el marco del convenio 3479 de 2008, entre las poblaciones de Quibdó y Tarena en el Golfo de Urabá, utilizando metodologías y tecnologías de punta que le permitan al país avanzar en el tan necesario y anhelado desarrollo de la infraestructura de transporte para la competitividad.

Se entiende por “Estudios de un Canal Navegable Fluvial Fase II” todos los estudios y pre diseños que a través de metodologías y tecnologías avanzadas definen claramente el proyecto que cumplirá con lo exigido por los estándares internacionales en lo que tiene que ver con seguridad, comodidad, funcionalidad, desarrollo regional, impacto ambiental y conectividad.

En cuanto al Componente de Modelación Hidro-Morfodinámica, se contempló la construcción de modelos (2D) de los sitios que fueron identificados como críticos para la navegación (ó que requieren mayor detalle de estudio) en el desarrollo de los estudios del convenio 3479 de 2008, INVIA – UTCH; específicamente la Bifurcación – Isla Grande del Atrato (con sus brazos Murindó y Montaño) y el Delta del río Atrato.

Adicionalmente, en el desarrollo de la consultoría se decidió ampliar el alcance de la modelación para incluir el análisis hidrodinámico del río Atrato en el tramo correspondiente al puerto de Quibdó.

De acuerdo con lo anterior, se contempló subdividir el Componente de Modelación Hidro-Morfodinámica en tres (3) informes, según el sector modelado, considerando los diferentes objetivos, requerimientos y alcance de la modelación en cada uno de los sectores.

El presente se constituye como el Informe 1 del componente y presenta los resultados de la modelación hidrodinámica del río Atrato en el sector correspondiente al Puerto de Quibdó.

De acuerdo con lo convenido en el desarrollo de la consultoría, la propuesta metodológica para la modelación del río en el sector aferente al puerto de Quibdó, se resume a continuación:

1. Construcción de un modelo hidrodinámico (2D) a partir de información primaria de campo, empleando el paquete de modelación “Delft3D Hydro-Morphodynamics”, suministrado por el Instituto DELTARES de Holanda.

2. Planteamiento y ejecución de simulaciones con el modelo construido, orientadas a la obtención de la siguiente información (condiciones actuales):
 - Profundidades mínimas del río Atrato en el sector del Puerto de Quibdó (para determinar condiciones críticas de navegabilidad), a partir de simulaciones con caudales bajos.
 - Distribución de velocidades de flujo a lo largo y ancho del tramo modelado, para diferentes escenarios de caudal, requeridas para identificar potenciales problemas de maniobrabilidad.
 - Determinación de profundidades máximas de socavación, requeridas para el pre-diseño de estructuras sumergidas y de protección de banca en la zona del puerto
3. Recomendación de posibles medidas de intervención, para mejorar las condiciones de navegabilidad en sitios potencialmente problemáticos.
4. Interacción con profesionales del Instituto DELTARES y de otras áreas del proyecto, para la formulación de recomendaciones integrales.

Para el desarrollo del Componente de Modelación fue necesario contar con los resultados de los componentes de hidrometría, topo-batimetría e hidrología, que proporcionan la información requerida para la construcción y operación de los modelos descritos.

De igual manera, los resultados parciales y finales de la modelación fueron articulados con otros componentes de la consultoría para el pre-diseño de la infraestructura requerida en el puerto.

2 EL RÍO ATRATO Y EL PUERTO DE QUIBDÓ

2.1 Generalidades

El río Atrato nace en el cerro de Caramanta, sobre una cota de 3.700 msnm, en el municipio del Carmen de Atrato, en el departamento del Chocó.

Con una superficie aproximada de 36.586 km², la cuenca del Atrato se encuentra limitada por la cordillera Occidental, la serranía del Baudó y las prominencias del istmo de San Pablo. Su cuenca hidrográfica no es de gran tamaño pero, al encontrarse en la zona de mayor pluviosidad de América, se considera como una de las cuencas de mayor rendimiento del mundo.

El río tiene una longitud de 750 km y un ancho que varía entre 150 y 500 m, con profundidades que oscilan entre los 3 y 38 m. Desemboca en el golfo de Urabá por varias bocas que conforman el delta del río.

El río Atrato forma un amplio valle de tierras planas y anegadizas. Varios caseríos y núcleos urbanos se asientan en la proximidad de sus riberas y a lo largo de su extenso curso, siendo el más importante el Municipio de Quibdó, capital del Departamento del Chocó, que se constituye como el punto de división geográfica entre la cuenca alta y la cuenca media del río.

El río, en sus cuencas media y baja, presenta pendientes relativamente bajas, que permiten su navegación desde el Golfo de Urabá hasta el Municipio de Quibdó¹.

2.2 Localización del Puerto

El proyecto de Terminal Intermodal planteado en Quibdó, facilitara la operación de transferencia de la carga entre los modos Fluvial y Carretero.

Quibdó se encuentra conectada por carretera con la ciudad de Medellín, Pereira y la vía al Mar la cual se encuentra en construcción.

Para la ejecución del Estudio del Puerto se consideraron en primer lugar, la situación actual del Departamento del Chocó en términos de su infraestructura vial, los planes de inversión definidos a nivel central en el plan de desarrollo nacional, el nivel de ejecución de los mismos y los plazos y metas previstos. Se analizaron y estimaron los flujos futuros de carga, la competitividad del sistema generado con el desarrollo del proyecto

¹ INVIAS-IIAP (2013). INVESTIGACIÓN PARA LA COMPLEMENTACIÓN DE LOS ESTUDIOS FASE II (FACTIBILIDAD) PARA LA NAVEGABILIDAD DEL RÍO ATRATO, Volumen V – Complemento al Estudio de Hidrología, Quibdó, Chocó

y la potencialidad que el mismo ofrece para la gestación de nuevas actividades en la región.

Con base en las necesidades detectadas se dimensionaron las instalaciones requeridas, teniendo como punto de partida el área destinada por el municipio para estos fines y la evaluación multidisciplinaria realizada para su localización exacta (con especial énfasis en el impacto a nivel urbano y ambiental), para identificar las medidas de control y mitigación necesarias, así como los beneficios económicos y sociales derivados de su ejecución, estudios que fueron iniciados desde la fase previa de este proyecto (Convenio 3479 de 2008, INVIAST – UTCH) y complementados con el desarrollo de los diferentes componentes del presente Convenio.

De acuerdo con lo anterior, el sitio proyectado para el puerto se encuentra localizado en la margen derecha del río Atrato, entre las abscisas K483 y K484 aproximadamente (según abscisado realizado durante la fase previa de este proyecto), en la curva denominada Casimiro, unos 10 km aguas abajo de la cabecera de Quibdó. Se presume que las condiciones de profundidad dadas al exterior de dicha curva, permitirán conformar una zona de aproximación y maniobras lo suficientemente amplia, que facilite las operaciones de zarpe y atraque de las embarcaciones, suposición que debe ser validada a partir de los análisis planteados en el presente informe de modelación.

En la Figura 1 se presenta la localización general del puerto, dentro del contexto local del municipio y en la Figura 2 se presenta el alineamiento preliminar de la infraestructura fluvial: muelles (principal y de cabotaje), canal de acceso y dársena de maniobras.

De acuerdo con el pre-diseño de la infraestructura del puerto, resultado del desarrollo del Componente de Ingeniería Naval del presente Convenio, se requiere un canal de acceso de 94 m de ancho, una dársena de ciaboga de 85 m de radio y un calado mínimo de 2,7 m (incluye holgura para el paso de quilla).



Figura 1. Localización general del Puerto multimodal de Quibdó (base cartográfica 2008)



Figura 2. Alineamiento preliminar de la infraestructura fluvial del puerto

2.3 Variables hidrológicas relevantes

De acuerdo con lo consignado en el Complemento al Estudio de Hidrología del presente Convenio, el caudal medio del río Atrato a la altura de Quibdó es de 1000 m³/s, con un área de drenaje de 4.772 km², lo que equivale a un rendimiento medio de 209 l/s/km² hasta ese punto.

En las proximidades del malecón antiguo de Quibdó, se encuentra localizada la Estación Hidrológica Automática de Quibdó, operada por el IDEAM. Como parte del Complemento al Estudio de Hidrología, se actualizó la curva de duración de caudales medios diarios de dicha estación con los registros existentes hasta Diciembre de 2010, que caracteriza el comportamiento de los mismos en la zona de influencia del municipio y del puerto proyectado.

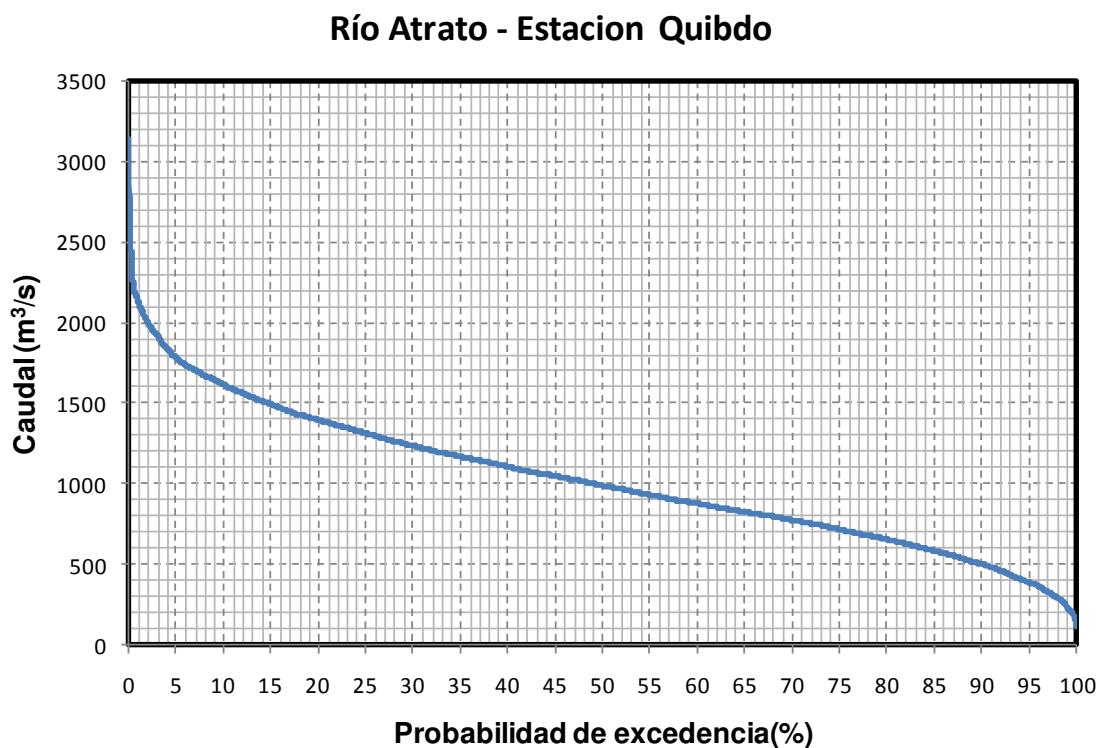


Figura 3. Curva de duración de caudales medios diarios – Estación Quibdó

Aproximadamente unos 12 km aguas abajo de la Estación de Quibdó, se encuentra la Estación Hidrológica Belén, en proximidades del sitio proyectado para el puerto multimodal. La curva de calibración Nivel – Caudal de dicha estación se revisó como

parte del Complemento al Estudio de Hidrología del presente Convenio y permite caracterizar los niveles de flujo en la frontera aguas abajo del tramo de estudio.

CURVA DE GASTOS RÍO ATRATO ESTACIÓN BELÉN

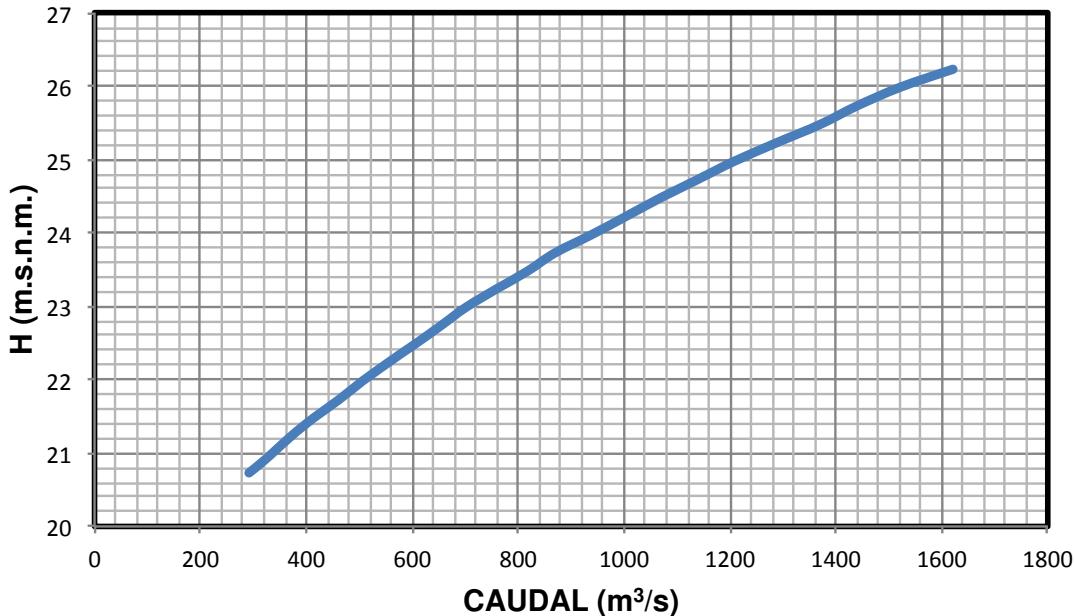


Figura 4. Curva de calibración Nivel - Caudal Estación Belén

Con la anterior información, es posible definir de forma precisa las variables hidrológicas en las fronteras del tramo a modelar, sin necesidad de extrapolar ó transponer información, minimizando la incertidumbre en los valores generados al interior del modelo.

3 MODELACIÓN HIDROMORFODINÁMICA

3.1 Descripción del software de modelación

Para el desarrollo de los modelos hidro-morfodinámicos requeridos, se recibió el paquete "Delft3D Hydro-Morphodynamics 4.00" por parte del Instituto DELTARES de Holanda. El software, cuyo código fue liberado recientemente por el desarrollador, podrá ser instalado en los computadores requeridos por el INVIA, sin limitación de licencias, para la futura operación de los modelos construidos.

A continuación, se presenta una descripción de los aspectos relevantes del software de modelación, extraídos de la documentación incluida con el software²:

3.1.1 Generalidades

El paquete Delft3D está compuesto por una serie de módulos (componentes), cada uno cubriendo un cierto rango de aspectos de un problema de ingeniería (hidrodinámica y transporte, calidad de agua, modelación ecológica, entre otros). Cada módulo puede ejecutarse de forma independiente ó en combinación con otros módulos. Para el caso específico de este estudio, el módulo principal a emplear será el Delft3D-FLOW.

El modulo Delft3D-FLOW es un programa de simulación hidrodinámica y de transporte de sedimentos multi-dimensional (2D y 3D), que calcula fenómenos de flujo y transporte no-permanentes que resultan de la aplicación de fuerzas meteorológicas y de mareas sobre una grilla rectilínea ó curvilínea definida por fronteras.

3.1.2 Flujo hidrodinámico

El Delft3D-FLOW resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido incompresible, bajo las suposiciones de "aguas poco profundas" (la aceleración vertical es pequeña en comparación con la aceleración gravitacional) y de "Boussinesq" (las variaciones de densidad son pequeñas en comparación con la densidad del agua como tal).

El sistema de ecuaciones está compuesto por la ecuación de continuidad y las ecuaciones de momento horizontal. Las ecuaciones, en su presentación 2D (valores promedio en profundidad), son las siguientes:

² DELTARES (2011) Delft3D-FLOW User Manual, Delft, The Netherlands

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(h \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(h \cdot v)}{\partial y} = S$$

En donde:

ζ	Nivel de la lámina de agua sobre un plano de referencia	[m]
h	Profundidad promedio de flujo	[m]
u, v	Velocidad media en la vertical sobre los ejes x, y respectivamente	[m/s]
S	Aportes ó extracciones de caudal por unidad de área	[m/s]

Ecuaciones de momento horizontal:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} = -g \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{C^2} \frac{u^2}{h} + HDT_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = -g \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{C^2} \frac{v^2}{h} + HDT_y$$

En donde:

g	Aceleración de la gravedad	[m/s ²]
C	Coeficiente de rugosidad de Chézy	[m ^{1/2} /s]
HDT	Término representativo de la difusión horizontal	[m/s ²]

En nuestro medio, es más común la utilización del coeficiente de Manning para representar la rugosidad. El software, en este caso, también permite al usuario definir la rugosidad de la superficie a partir del coeficiente de Manning. El módulo de cálculo emplea la siguiente equivalencia para resolver las ecuaciones de momento horizontal:

$$C = \frac{H^{1/6}}{n}$$

En donde:

H	Profundidad de flujo	[m]
n	Coeficiente de rugosidad de Manning	[s/m ^{1/3}]

3.1.3 Transporte de sedimentos en suspensión

En el modulo Delft3D-FLOW el transporte de sedimentos en suspensión se modela a través de una ecuación de advección-difusión. La presentación 2D (valores promedio en profundidad) de la ecuación de transporte es la siguiente:

$$\frac{\partial hc}{\partial t} + \frac{\partial huc}{\partial x} + \frac{\partial hvc}{\partial y} - h \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{s,x} \frac{\partial c}{\partial x} \right) - h \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{s,y} \frac{\partial c}{\partial y} \right) = hS$$

En donde:

c	Concentración de sedimentos en suspensión	[kg/m ³]
$\varepsilon_{s,x}$	Difusividad del sedimento en la dirección x	[m ² /s]
$\varepsilon_{s,y}$	Difusividad del sedimento en la dirección y	[m ² /s]
S	Re-suspensión ó caída de sedimentos por unidad de área	[kg/m ³ s]

3.1.4 Transporte de sedimentos del lecho

El transporte total de sedimentos en Delft3D-FLOW se determina a partir de la sumatoria del transporte de las fracciones finas y gruesas. El transporte de la fracción fina se calcula a partir de la ecuación descrita en el párrafo anterior, el transporte de la fracción gruesa se calcula a partir de expresiones semi-empíricas de predicción del transporte de sedimentos del lecho. El programa permite seleccionar entre múltiples expresiones de cálculo, la selección dependerá de las características del sedimento y las condiciones del problema.

Las características y formulaciones relevantes de cada predictor se discuten a continuación:

Engelund-Hansen

La fórmula en su origen fue pensada para la estimación del transporte de sedimentos de fondo únicamente, pero se encontró aplicable para el cálculo de transporte total cuando la fracción del material del lecho que se transporta en suspensión (material relativamente fino que se suspende temporalmente) juega un papel importante en la matriz de sedimentos en suspensión.

La ecuación de Engelund-Hansen para el cálculo de transporte por unidad de ancho se escribe de la siguiente manera:

$$q_s = d_s u^5$$

En donde:

$$d_s = \frac{0.05}{\sqrt{g} C^3 \Delta^2 D_{50}}$$

La fórmula es aplicable cuando se cumplen las siguientes condiciones (características del sedimento y condiciones de flujo):

$$\frac{w_s}{u_*} < 1 \quad u_* = \sqrt{g} / C \cdot u$$

$$0.19 \text{ mm} < D_{50} < 0.93 \text{ mm}$$

$$0.07 < \theta < 6 \quad \theta = u_*^2 / \Delta g D$$

En donde:

q_s	Transporte de sedimentos por unidad de ancho	$[\text{m}^2/\text{s}]$
u	Velocidad de flujo	$[\text{m/s}]$
u_*	Velocidad de corte	$[\text{m/s}]$
Δ	Densidad relativa del sedimento	$[-]$
θ	Parámetro de Shields	$[-]$
D_{50}	Tamaño medio de partícula en el sedimento de fondo	$[\text{m}]$
w_s	Velocidad de caída de la partícula	$[\text{m/s}]$

Meyer-Peter-Müller

La fórmula de Meyer-Peter-Müller es aplicable para la estimación del transporte de sedimentos de fondo únicamente y NO tiene en cuenta la posible fracción del material del lecho que se transporta temporalmente en suspensión. La ecuación de transporte por unidad de ancho suele presentarse de la siguiente manera:

$$q_s = 8D_{50} \sqrt{\Delta g D_{50}} (\mu \theta - \theta_{cr})$$

En donde:

$$\mu \quad \text{Factor de protuberancia del lecho} \quad [-]$$

θ_{cr} Valor crítico de Shields para inicio del movimiento. [-]

Su aplicabilidad, limitada a situaciones donde el transporte de fondo es predominante, está dada por las siguientes condiciones:

$$\frac{w_s}{u_*} > 1$$

$$D_{50} > 0.40\text{mm}$$

$$\mu\theta < 0.2$$

Van Rijn 2004

La fórmula de Van Rijn (2004) separa el transporte de sedimentos de fondo del transporte de material del lecho en suspensión. El transporte total de material del lecho se calcula como la suma de estas dos fracciones.

La ecuación suele escribirse de la siguiente manera:

$$m_s = b + s$$

$$b = \alpha_b 0.1 \sqrt{\Delta g D_{50}^3} D_*^{-0.3} T^{1.5}$$

$$s = \alpha_s f_{cs} u h C_a$$

En donde:

m_s	Transporte de sedimentos por unidad de ancho	$[\text{m}^2/\text{s}]$
b	Transporte de sedimentos de fondo por unidad de ancho	$[\text{m}^2/\text{s}]$
s	Transporte de sedim. en suspensión por unidad de ancho	$[\text{m}^2/\text{s}]$
α_s, α_b	Parámetros de calibración	[$]$
D_*	Parámetro adimensional de diámetros de partícula	[$]$
T	Parámetro adimensional de nivel de flujo	[$]$
f_{cs}	Factor de forma	[$]$
C_a	Concentración adimensional de referencia	[$]$

3.1.5 Herramientas complementarias

Aparte del modulo Delft3D-FLOW, para la construcción y operación de modelos se requiere la aplicación de las siguientes herramientas complementarias incluidas en el paquete:

- Delft3D-RGFGRID: Para la generación de grillas computacionales (rectilíneas ó curvilíneas)

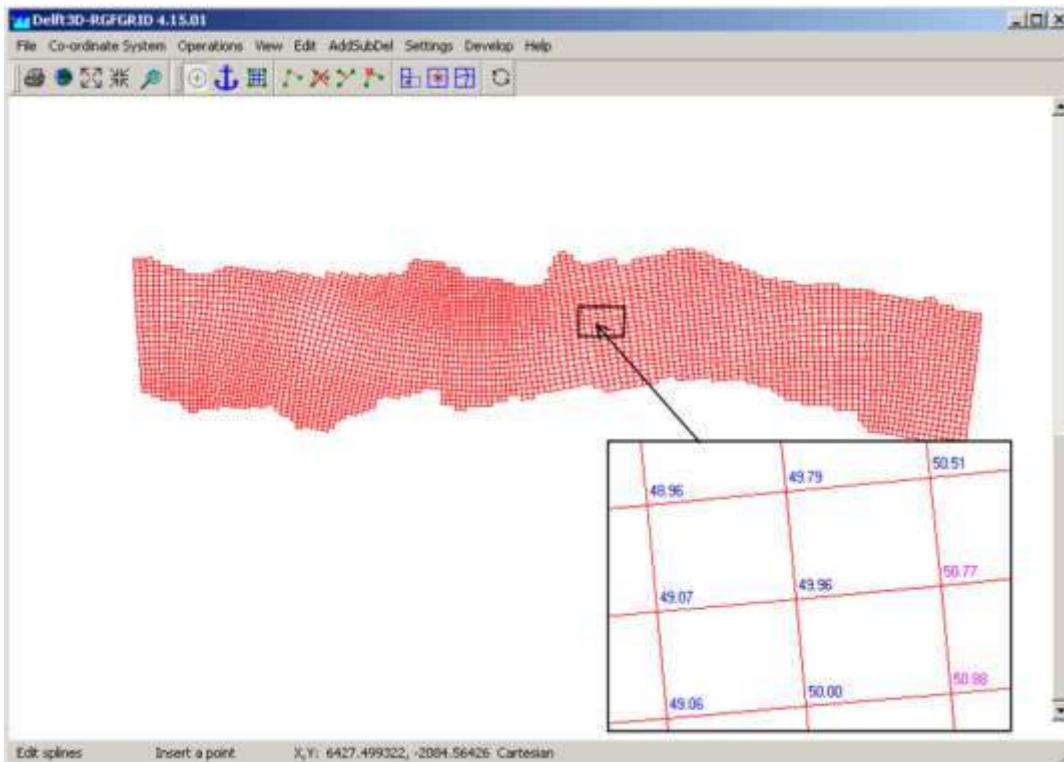


Figura 5. Ejemplo de una grilla curvilínea generada a partir de Delft3D-RGFGRID

- Delft3D-QUICKIN: Para preparar y manipular datos asociados a las celdas de la grilla (topo-batimetría del lecho, rugosidad, características del sedimento, entre otros)

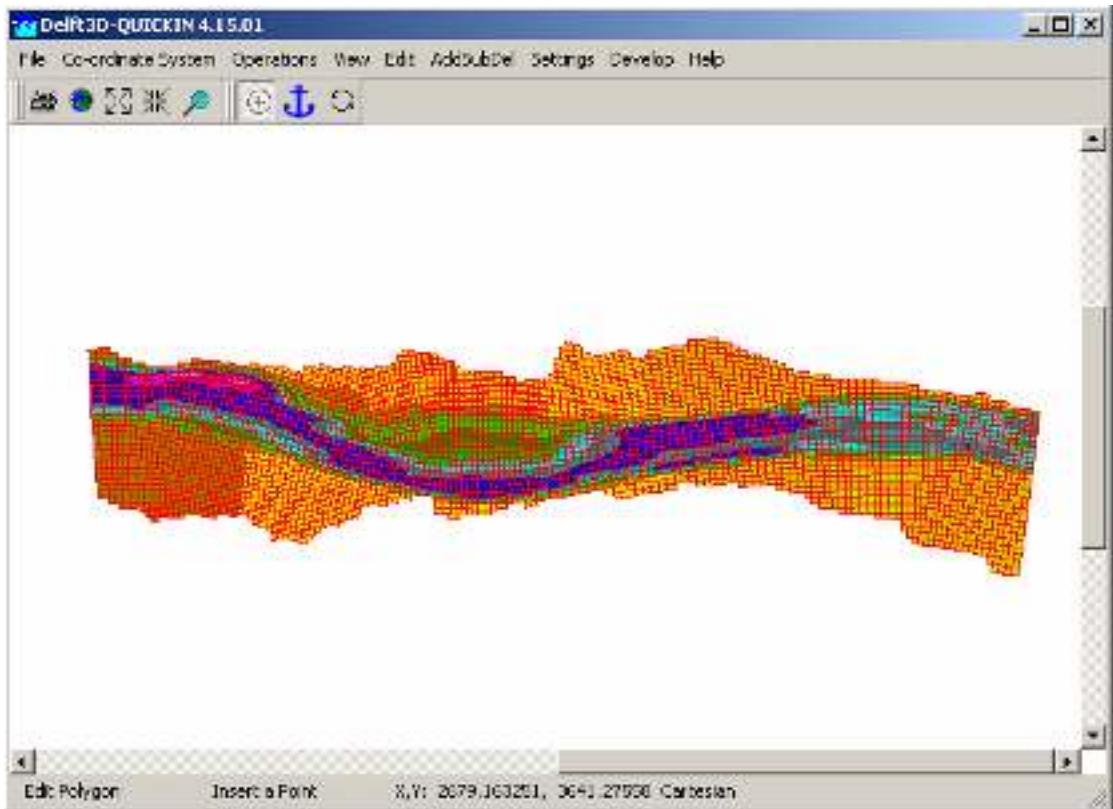


Figura 6. Ejemplo de una base topo-batimétrica construida a partir de Delft3D-QUICKIN

- Delft3D-QUICKPLOT: Para la visualización de resultados de simulaciones

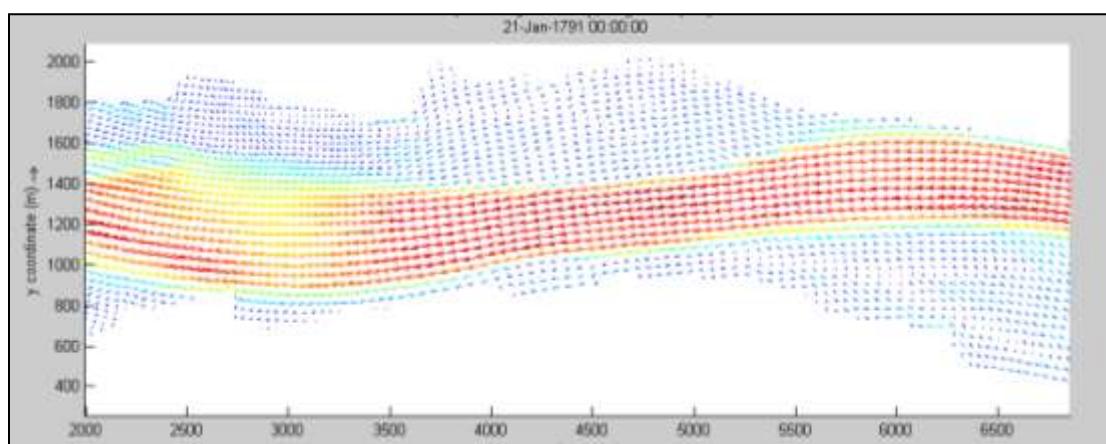


Figura 7. Ejemplo de visualización de resultados (vectores de velocidad) a partir de Delft3D-QUICKPLOT

3.2 Información de entrada

3.2.1 Requerimientos de información

El alcance de la modelación del río Atrato en el sector del Puerto de Quibdó, considera la construcción de un modelo hidrodinámico (2D) de la zona de estudio. Para lograr el objetivo de análisis en este sector, los requerimientos mínimos de información son los siguientes:

Tabla 1. Requerimientos mínimos de información para la construcción y operación del modelo hidrodinámico (2D)

Elemento a modelar	Información requerida
Río Atrato – Sector Puerto de Quibdó	<ul style="list-style-type: none">- Alineamiento de las bancas- Topo-batimetría del lecho de fondo- Caudales del río Atrato en el sector a modelar- Niveles de referencia aguas abajo del sector a modelar

3.2.2 Información disponible

- Alineamiento de las bancas: Se cuenta con cartografía digitalizada del río Atrato, obtenida a partir del Radar mapa año 2008, recopilado durante el desarrollo de la fase previa de este proyecto (Convenio 3479 de 2008, INVIAST – UTCH).
- Topo-batimetría del lecho de fondo: Se cuenta con el resultado de los sondeos topo-batimétricos del río Atrato entre la cabecera del municipio de Quibdó y la zona del puerto multimodal proyectado, realizados por el IDEAM en el mes de Septiembre del año 2012, como parte del componente de hidrometría del presente Convenio.
- Caudales del río Atrato en el sector a modelar: Se cuenta con la curva de duración de caudales medios diarios de la Estación Hidrológica Quibdó, obtenida como parte del componente de hidrología del presente Convenio, a partir del procesamiento de registros hasta el año 2010.

- Niveles de referencia aguas abajo del sector a modelar: Se cuenta con la curva de calibración Nivel – Caudal de la Estación Hidrológica Belén, revisada como parte del componente de hidrología del presente Convenio.

3.3 Construcción del modelo

3.3.1 Delimitación del área de estudio

El tramo a modelar se encuentra localizado entre la Estación Hidrológica de Quibdó (K493 + 500, según abscisado realizado durante la fase previa de este proyecto) y la Estación Hidrológica de Belén (K481 + 500), en una distancia de 12 km, que incluyen el paso por la cabecera del Municipio de Quibdó y el sitio proyectado para el puerto multimodal.

3.3.2 Diseño de la grilla computacional

La grilla computacional se construyó a partir de la herramienta Delft3D-RGFGRID, tomando el alineamiento de bancas definido en la cartografía 2008 como base.

La metodología para la construcción de grillas curvilíneas estructuradas parte del trazado de líneas de guía, longitudinales y transversales a la corriente, procurando intersecciones ortogonales entre las mismas.

La grilla inicial se genera a partir de las líneas de guía trazadas por el modelador y puede ser refinada posteriormente a partir de las herramientas incluidas en el software (herramientas de densificación, ortogonalización, adición/eliminación de celdas).

El proceso de diseño de la grilla para el modelo del río Atrato en el tramo descrito se visualiza en la siguiente figura:

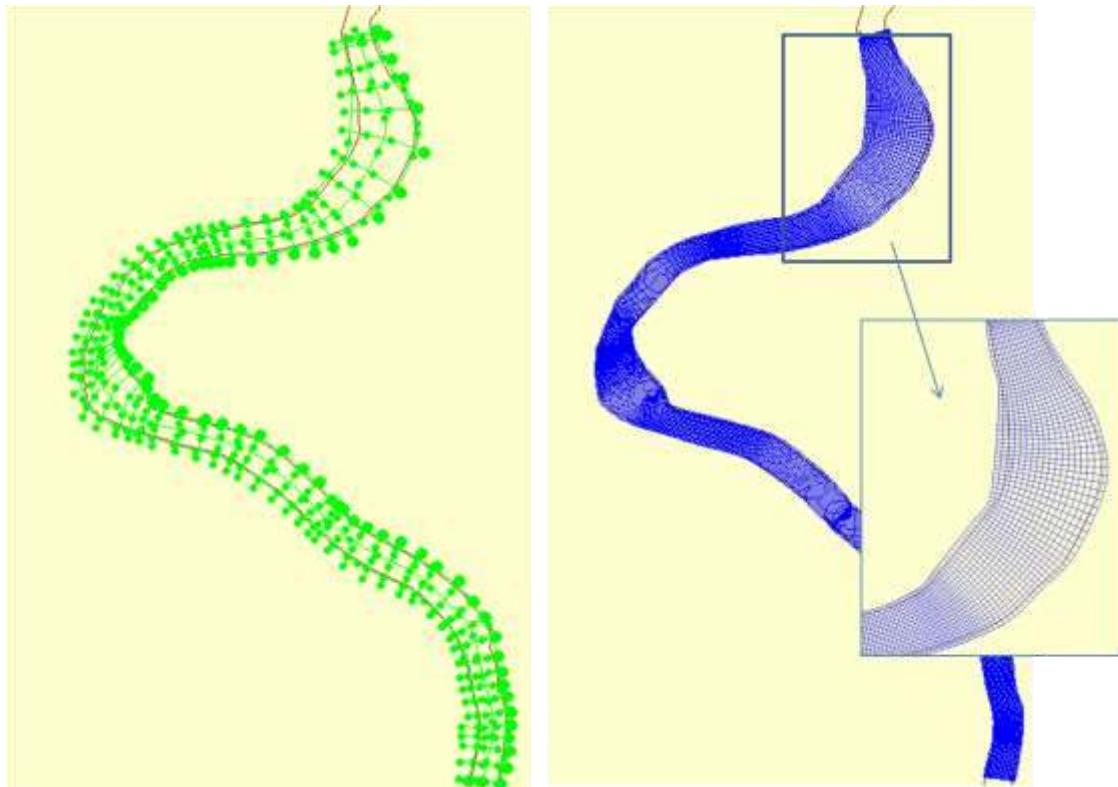


Figura 8. Construcción de grilla computacional

La grilla definitiva presenta una resolución promedio de 30 x 30 m (ligeramente variable por sector), que permite obtener un nivel de detalle adecuado para el análisis requerido.

3.3.3 Topo-batimetría

El modelo topo-batimétrico del río en el tramo descrito, se construyó a partir de la herramienta Delft3D-QUICKIN, tomando como base los puntos del sondeo realizado por el IDEAM durante el mes de Septiembre de 2012.

Los datos de profundidad resultantes del sondeo fueron procesados en conjunto con los datos de niveles del río (cota real) durante el tiempo de muestreo, inferidos a partir de los registros de nivel de flujo de las Estaciones Quibdó y Belén, para determinar las cotas del lecho de fondo.

Los puntos con valores de cota del lecho fueron interpolados, empleando las herramientas incluidas en el software, para generar las cotas del lecho en cada celda de la grilla.

El proceso de generación de la superficie topo-batimétrica se visualiza a continuación:

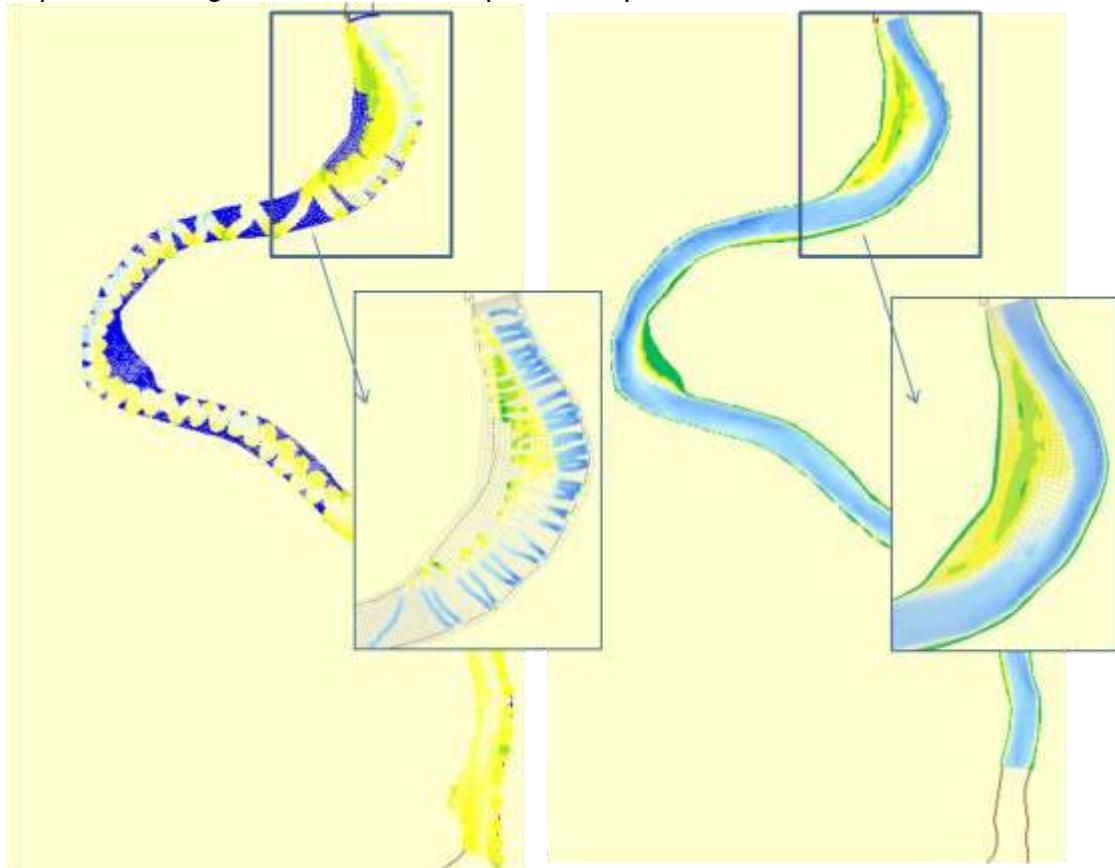


Figura 9. Generación de superficie topo-batimétrica a partir de puntos de sondeo

3.3.4 Rugosidad

La rugosidad del modelo se esquematizó empleando un coeficiente de rugosidad de Manning, con valor $n = 0,026 \text{ s/m}^{1/3}$ uniforme para todo el lecho.

El valor de “n” adoptado para el modelo se seleccionó como resultado de un proceso de calibración, comparando los niveles de agua calculados en la cabecera del modelo con los registrados en la Estación Hidrológica de Quibdó para los caudales simulados y variando el coeficiente de rugosidad del modelo hasta lograr el ajuste.

En la siguiente tabla se presenta la comparación de niveles de agua calculados -vs- registrados, para un caudal de $400 \text{ m}^3/\text{s}$ y diferentes valores del coeficiente de rugosidad. El valor “registrado” en la Estación Hidrológica de Quibdó se extrajo de la curva de gastos de dicha estación, revisada como parte del componente de hidrología del presente Convenio.

Tabla 2. Resultados del proceso de calibración del coeficiente de rugosidad (n)

Valor de "n" (s/m ^{1/3})	Nivel calculado (msnm)	Nivel registrado (msnm)	Diferencia (m)
0,024	23,44	23,50	-0,06
0,026	23,52	23,50	0,02
0,028	23,62	23,50	0,12

3.4 Planteamiento de simulaciones con el modelo construido

Para analizar el comportamiento hidrodinámico del río Atrato en la zona del puerto multimodal proyectado, se plantearon simulaciones con el modelo construido, en diferentes condiciones hidrológicas (caudales bajos, medios y altos).

En el escenario con caudal bajo, se transita un caudal correspondiente al Q95%, extraído de la curva de duración de caudales, definido como el caudal medio diario igualado ó excedido el 95% del tiempo, el cual fue adoptado como referencia para definir el nivel de reducción para navegación desde la primera fase de este proyecto (superado 347 días del año en promedio).

En los escenarios con caudales medio y alto, se transitan caudales correspondientes al Q50% (equivalente al caudal medio del río) y Q5% (caudal superado 18 días del año en promedio) respectivamente, para evaluar las condiciones de navegabilidad en la zona del puerto en situaciones diferentes y determinar el escenario crítico de maniobrabilidad.

A continuación se presentan los valores de caudal y nivel en las fronteras del modelo (extraídos de las curvas respectivas), para los diferentes escenarios hidrológicos descritos:

Tabla 3. Condiciones de frontera del modelo para diferentes escenarios hidrológicos

Escenario	Caudal aguas arriba (m ³ /s)	Nivel de flujo aguas abajo (msnm)
Caudal bajo (Q95%)	400	21,5
Caudal medio (Q50%)	1000	24,2
Caudal alto (Q5%)	1800	26,6

4 RESULTADOS

La evaluación de resultados se enfoca en la zona aferente al puerto proyectado, específicamente en el tramo denominado Casimiro, que en su curva externa (margen derecho) albergaría el canal de acceso y la dársena de maniobra.

A continuación se ilustran los resultados del modelo hidrodinámico para los diferentes escenarios hidrológicos considerados.

4.1 Profundidad de flujo

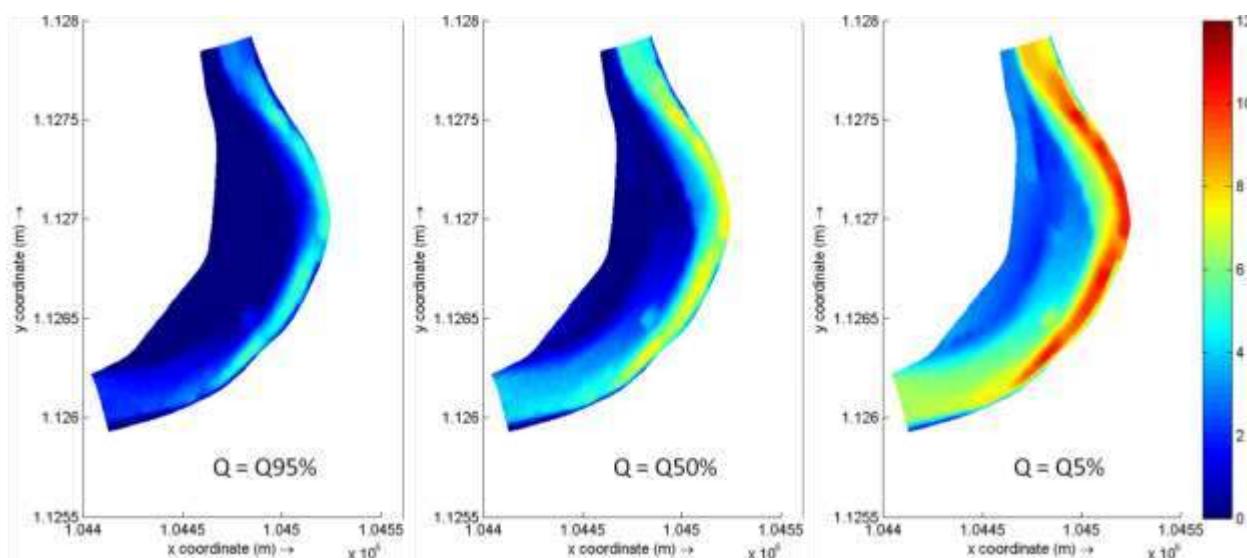


Figura 10. Profundidad de flujo (m) en el sector de interés para diferentes escenarios hidrológicos

En cuanto a profundidades de flujo, en general se observan valores significativamente mayores hacia la banca externa, característicos del flujo en curvas de este tipo. El cauce del río en este sector tiene un ancho cercano a los 500 m. Sin embargo, en la curva, el flujo se concentra en la parte externa, generando una playa seca sobre la barra interior, que sobresale en caudales menores. La concentración de flujo hacia la banca externa, hace que las profundidades en este sector sean considerables, inclusive durante caudales bajos.

En el escenario correspondiente al nivel de reducción (Caudal = Q95%, superado 347 días del año en promedio), se observan profundidades de flujo de entre 2 y 5 m a lo largo de la banca externa, con valores por encima de los 4 m en gran parte de la

longitud. La sección mojada en la parte más angosta de la curva presenta un ancho superficial cercano a los 180 m.

En caudales medios ($Q = Q50\%$), se observan profundidades de flujo de entre 5 y 7,5 m a lo largo de la banca externa. En esta condición, la sección mojada en la parte más angosta de la curva presenta un ancho superficial cercano a los 300 m.

En caudales altos ($Q = Q95\%$, valor superado 18 días del año en promedio), se observan profundidades de entre 7 y 11 m a lo largo de la banca externa. En esta condición, el cauce completo permanece sumergido (ancho superficial cercano a los 500 m), con profundidades cercanas a los 2 m en la parte más elevada de la barra de sedimentos.

4.2 Velocidad de flujo (promedio en la vertical)

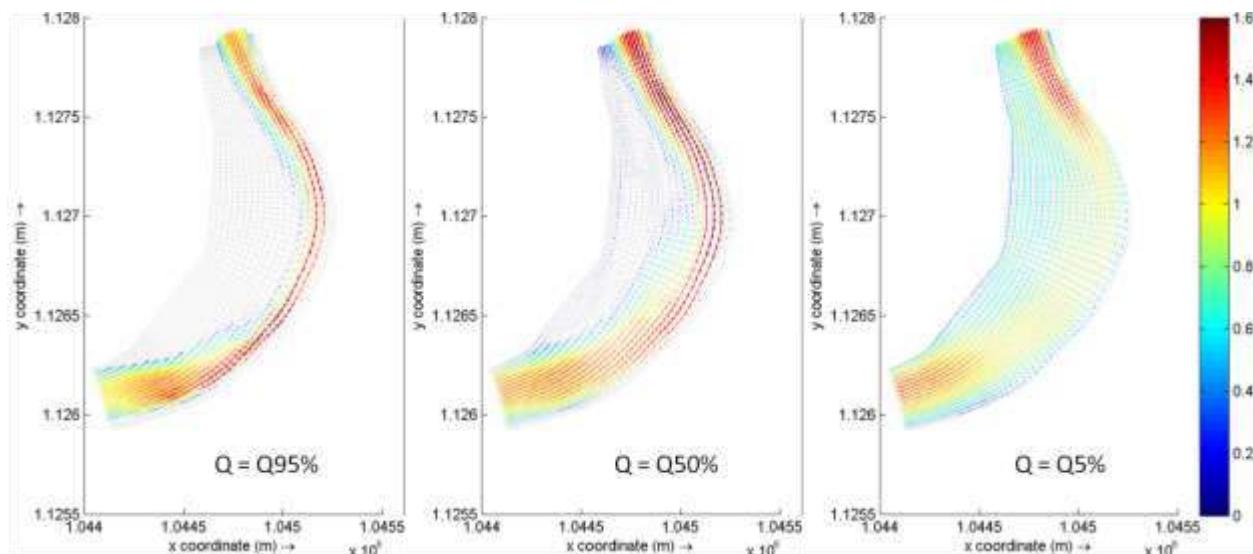


Figura 11. Velocidad de flujo (m/s) en el sector de interés para diferentes escenarios hidrológicos

En cuanto a velocidades promedio de flujo, de la misma manera que para el caso anterior, se observan valores significativamente mayores hacia la margen derecha, como resultado de la concentración de flujo en la banca exterior de la curva.

Sin embargo, en este caso, las velocidades en el sector de interés no resultan proporcionales al caudal que fluye por el río.

En el escenario con caudal medio ($Q = Q50\%$), el valor máximo de velocidad por la parte externa de la curva es de 1,6 m/s.

El valor máximo para caudales bajos ($Q = Q95\%$) resulta del mismo orden de magnitud (1,6 m/s), para un caudal significativamente menor. Lo anterior, como resultado de la concentración del flujo en una sección mucho más angosta.

Durante caudales altos ($Q = Q5\%$), las velocidades en la parte más pronunciada de la curva están en el orden de 1 m/s, resultado de la distribución del caudal en una sección mucho más amplia.

De acuerdo con esto, las corrientes críticas para la maniobrabilidad de embarcaciones en la zona proyectada del puerto, también pueden estar asociadas al escenario con caudales bajos.

5 DISCUSIÓN

5.1 Resultados a la luz de la infraestructura portuaria proyectada

Para analizar las repercusiones del comportamiento hidrodinámico del río Atrato en el sector del puerto proyectado, se exportaron los resultados de profundidad de flujo y velocidad media en la vertical para el escenario correspondiente al nivel de reducción ($Q = Q95\%$). Los valores provenientes de la grilla de cálculo del modelo se superpusieron al esquema de alineamiento de la infraestructura para verificar el cumplimiento de los requerimientos de navegabilidad.

La siguiente figura ilustra los valores de profundidad de flujo bajo el canal de acceso y la dársena de ciaboga, para el escenario con caudal correspondiente al nivel de reducción (profundidades menores a 1,8 m en rojo, entre 1,8 y 2,7 m en amarillo y mayores a 2,7 m en blanco):

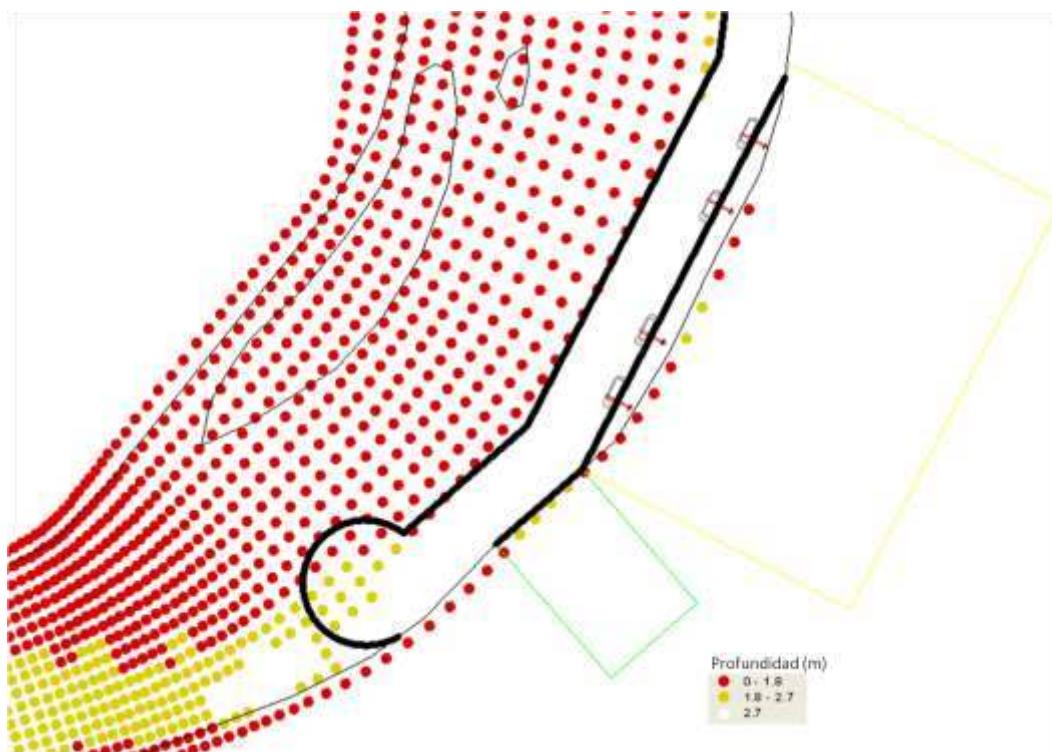


Figura 12. Profundidad de flujo (m) en el canal de acceso con nivel de reducción ($Q = Q95\%$)

De acuerdo con los resultados, el canal de acceso presenta profundidades superiores a las requeridas (2,7 m) en toda su longitud.

Sin embargo, en la dársena de ciaboga se presenta un sector de 11.200 m² (aproximadamente la mitad de la extensión de la dársena) con profundidades entre 1 y 2,5 m, que incumplen el requerimiento de calado. Para cumplir con la profundidad requerida, sería necesario remover una capa de 1,2 m en promedio en dicho sector, lo que equivale a un volumen de 13.500 m³ de sedimentos aproximadamente.

En cuanto a las corrientes esperadas, la siguiente figura ilustra la magnitud de la velocidad de flujo en el sector de interés, con valores entre 1,2 y 1,6 m/s en la dársena de ciaboga, que deben ser tenidas en cuenta para evaluar la capacidad de maniobra y potencia requerida por las embarcaciones en la zona de acceso al puerto.

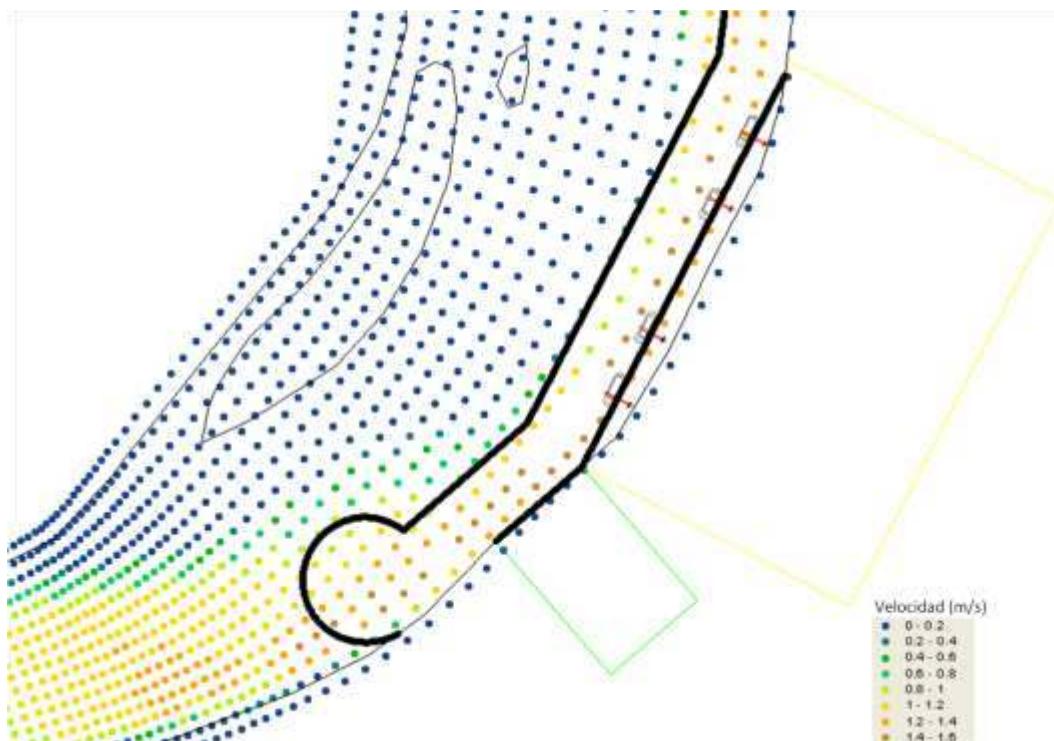


Figura 13. Velocidad de flujo (m/s) en el canal de acceso en condiciones críticas de maniobrabilidad (Q = Q95%)

5.2 Profundidad de socavación como resultado de la curvatura del canal y la protección de orilla

Las profundidades consideradas en la modelación hidrodinámica, son indicativas de la condición actual en el tramo de interés. Sin embargo, la evolución de la barra de sedimentos en la curva de Casimiro puede generar socavación adicional del lecho de fondo hasta llegar a un estado de equilibrio. Por otro lado, se prevé una protección de la orilla con tablestaca, para fijar la margen y estabilizar el talud en las inmediaciones del puerto propuesto, que puede generar un fenómeno de socavación local adicional.

En la literatura se encuentran expresiones como la de Thorne (1988)³ y Maynord (1996)⁴ para estimar la relación entre la profundidad máxima de una sección curva y la profundidad media del tramo.

Thorne (1988):

$$\frac{h_{\max}}{h_0} = 2.07 - 0.19 \log \left(\frac{R}{B_{ch}} - 1.5 \right)$$

Maynord (1996):

$$\frac{h_{\max}}{h_0} = 1.8 - 0.051 \frac{R}{B_{ch}} + 0.0084 \frac{B_{ch}}{h_0}$$

Donde,

h_{\max}	Profundidad máxima de flujo en la sección curva	[m]
h_0	Profundidad media de flujo en el tramo recto	[m]
R	Radio de la curva	[m]
B_{ch}	Ancho del cauce, medido en un tramo recto anterior/posterior a la curva	[m]

Del inventario de curvas del río Atrato, realizado durante la fase previa de este proyecto⁵, se obtuvo el radio de la curva de Casimiro, siendo este de 883 m. El ancho

³ THORNE, C.R. (1988), Bank processes on the Red River between Index, Arkansas and Shreveport, Louisiana. Final report to US Army European Research Office, Dept. Geography, Queen Mary College, London (en inglés).

⁴ MAYNORD, S.T. (1996), Toe-scorch estimation in stabilized bendways. J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol.122, No.8, pp.460-464 (en inglés)

del cauce a banca llena en los tramos rectos aledaños a dicha curva es del orden de 300 m. De acuerdo con esto, la relación h_{\max}/h_0 según los autores sería:

Thorne (1988): 2,04
Maynord (1996): 2,28

De acuerdo con los resultados del modelo hidrodinámico en condiciones de caudal medio, la profundidad promedio de flujo en los tramos rectos aledaños a la curva es del orden de 4 m.

De acuerdo con esto y según los resultados de las expresiones de Thorne (1988) y Maynord (1996), se podrían esperar valores de profundidad máxima en la curva Casimiro de entre 8,16 y 9,12 m, por efectos de la socavación natural por curvatura.

La profundidad máxima en la curva Casimiro, según resultados del modelo hidrodinámico (caudales medios), es actualmente de 7,5 m, por lo que, según la teoría podría esperarse una socavación natural adicional de entre 0,7 y 1,6 m en la parte más profunda de la curva.

Para el cálculo de la profundidad de socavación local por efecto de una protección de orilla con tablestaca, las formulaciones del reporte FAP21 (2001)⁶ han demostrado ser una buena aproximación para ríos con condiciones similares a las del Atrato. En dicho reporte se propone lo siguiente:

$$h_1 + y_{s,local} = K \left(h_1 u_1 \frac{B_{ch}}{B_{ch} - b} \right)^{2/3}$$

Donde:

h_1	Profundidad de flujo inmediatamente aguas arriba de la estructura	[m]
y_s	Profundidad de socavación local	[m]
K	Factor empírico para el tipo de estructura	[m]
u_1	Velocidad media de flujo en la vertical, aguas arriba de la estructura	[m]
b	Longitud de protrusión de la estructura al interior del cauce	[m]

De acuerdo con los resultados de la modelación, la profundidad de flujo inmediatamente aguas arriba del tramo a proteger con tablestaca (costado exterior de

⁵ INVIAST-UTCH (2010), ESTUDIOS Y ANÁLISIS PARA LA INVESTIGACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA, SOCIO-ECONÓMICA Y AMBIENTAL DEL CORREDOR ATRATO – SAN JUAN, Volumen III - Factibilidad y Escenario Futuro del Corredor Seleccionado

⁶ FAP21 (2001), Guidelines and design manual for standardized bank protection structures. Report to Government of Bangladesh, Ministry of Water Resources, Water Resources Planning Organization (en inglés)

la curva Casimiro) es del orden de 5 m, las velocidades críticas para socavación aguas arriba de la estructura proyectada están en el orden de los 1,2 m/s. Según la literatura, el factor K para el caso de una protección de orilla es de 2,6. La longitud de protrusión de una tablestaca en un río ancho como el Atrato puede considerarse como despreciable. De acuerdo con lo anterior, la profundidad máxima de flujo frente a la estructura, considerando únicamente el efecto de socavación local, sería:

$$h_1 + y_{s, local} = 8,6 \text{ m}$$

Al agregar el posible efecto por la curvatura natural del canal (calculado mediante relaciones como las de Thorne ó Maynord), obtenemos que la profundidad máxima frente a la tablestaca puede ser de entre 9,3 y 10,2 m durante caudales medios (entre 1,8 y 2,7 m mayor a la actual), que debe ser considerada para el diseño de la estructura de protección.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

De acuerdo con los resultados de la modelación hidrodinámica del río Atrato en el sector del puerto de Quibdó y con los análisis realizados a la luz de la infraestructura prevista, se puede concluir lo siguiente:

Con respecto a las condiciones de navegabilidad en el sector de interés:

- En términos de profundidad, en general se presentan condiciones favorables para la navegación, con valores por encima del calado requerido (2,7 m) en el canal de acceso (para condiciones hidrológicas con un 95% de excedencia) y una única restricción localizada hacia la margen izquierda de la dársena de ciaboga, donde se presentan profundidades de entre 1 y 2,5 m.
- En condiciones actuales, el área en la dársena de ciaboga que presentaría restricción para navegación tiene una extensión de 11.200 m² (1,1 hectáreas aprox.). Para cumplir con el requerimiento de calado en este sector, se tendrían que remover del orden de 13.500 m³ de sedimentos mediante dragado capital.
- En cuanto a las corrientes esperadas, el escenario crítico se presenta en condiciones de caudal bajo, como resultado de la concentración de flujo en la parte exterior de la curva (sección angosta).
- La magnitud de la velocidad de flujo en el sector de interés, presenta valores entre 1,2 y 1,6 m/s en la dársena de ciaboga, que deben ser tenidas en cuenta para evaluar la capacidad de maniobra y potencia requerida por las embarcaciones en la zona de acceso al puerto.

Con respecto a la potencial socavación del lecho en el sector de interés:

- Acorde con la teoría para la estimación de la profundidad de socavación por efecto del flujo en curvas y por efectos locales de protección de orilla, se podría esperar una socavación adicional de entre 1,8 y 2,7 m en la parte más profunda de la curva Casimiro, que debe ser tenida en cuenta para el diseño de estructuras sumergidas y de fijación de la banca en la zona del puerto.

6.2 Recomendaciones para el desarrollo de futuras fases

Para el desarrollo de estudios de modelación durante la fase de diseño detallado, se recomienda lo siguiente:

- Se debe incorporar la topografía de llanuras de inundación y zonas ribereñas al modelo, que permita realizar simulaciones hidrodinámicas en condiciones de caudal extremo, de manera que se pueda realizar la evaluación de la situación de inundabilidad del área prevista para el puerto y diseñar las medidas de protección requeridas.
- Se deben incorporar las características del material del lecho de fondo al modelo del puerto de Quibdó (no previsto dentro del alcance original del componente de modelación), para realizar simulaciones morfo-dinámicas que permitan hacer inferencias sobre la evolución de las zonas dragadas y estimar la recurrencia de mantenimientos, entre otros.