

**MODELACIÓN NUMÉRICA Y DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS CASO DE
ESTUDIO EL BANCO MAGDALENA (COLOMBIA)**

**LINA MARIA ABELLA CASTAÑO
COD: 2140422
GINA PAOLA VERGARA BARRERO
COD: 2140712**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
BOGOTA D.C., COLOMBIA
2018**

**MODELACIÓN NUMÉRICA Y DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS CASO DE
ESTUDIO EL BANCO MAGDALENA (COLOMBIA)**

**LINA MARIA ABELLA CASTAÑO
COD: 2140422
GINA PAOLA VERGARA BARRERO
COD: 2140712**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
AMBIENTAL**

**DIRECTOR:
MIGUEL ANGEL CAÑON RAMOS
INGENIERO AMBIENTAL
MSC(C) EN HIDROSISTEMAS**

**CODIRECTOR:
DARWIN MENA RENTERIA
INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO
ESPECIALISTA EN GESTIÓN AMBIENTAL
MAGISTER EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**DIRECTOR EXTERNO:
JOSE JAVIER OLIVEROS ACOSTA
INGENIERO AMBIENTAL
MAGISTER INGENIERIA CIVIL Y RECURSOS HIDRAULICOS
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
INGENIERIA AMBIENTAL
BOGOTA D.C., COLOMBIA
2018**

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Ciudad y fecha de presentación

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Este proyecto de grado va dedicado a nuestros padres, quienes nos brindaron apoyo incondicional en todo el transcurso de nuestros estudios, también a nuestro director y amigo Miguel Ángel Cañón Ramos, quien dispuso de su tiempo y conocimiento para que este proyecto se pudiera llevar cabo quien también nos aportó crecimiento a nivel personal, académico y laboral, agradecemos igual mente a José Javier Oliveros Acosta por su acompañamiento en todo este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

1. MARCO CONTEXTUAL	18
1.1 Descripción del área de estudio	18
1.2 Planteamiento del problema	19
2 OBJETIVOS	22
2.1 Objetivo general	22
2.2 Objetivos específicos	22
3 MARCO TEÓRICO	23
3.1 Procesamiento de información geográfica	24
3.2 Hidrología	26
3.2.1 Modelo hidrológico	26
3.2.2 Curva de duración de Caudales	27
3.2.3 Tránsito de hidrogramas	28
3.3 Modelación Hidrodinámica y de transporte de sedimentos	28
3.3.1 Ecuaciones de Gobierno	29
3.3.2 Plataforma de Modelación	32
3.3.3 Instrumentos de Campo	37
4 METODOLOGÍA	39
4.1 Fase 1	39
4.1.1 Obtención de Modelo de Elevación Digital	40
4.1.2 Consulta de Batimetría	41
4.1.3 Selección de Estaciones	41
4.1.4 Curvas de duración de caudales y niveles	42
4.1.5 Obtención de secciones transversales por Hec-GeoRas	43
4.1.6 Realización del Tránsito por medio de Hec-Ras	44
4.2 Fase 2	44
4.2.1 Generación del dominio computacional	44
4.2.2 Elaboración de la malla	45
4.2.3 Obtención de las profundidades	46
4.2.4 Preparación del modelo	47

4.3	Fase 3	47
4.3.1	Datos introductorios	47
4.3.2	Aplicación de las ecuaciones	47
4.3.3	Preparación del modelo	48
4.4	Fase 4	48
4.4.1	Toma de datos en campo	48
4.4.2	Identificación de los modelos	49
4.4.3	Corrida de los modelos	50
4.4.4	Generación de los resultados	50
5	RESULTADOS	51
5.1	Fase 1	51
5.1.1	Obtención de Modelo de Elevación Digital	51
5.1.2	Consulta de Batimetría	51
5.1.3	Selección de estaciones	52
5.1.4	Curva de duración de caudales y niveles	53
5.1.5	Obtención de las secciones transversales con Hec-GeoRas	57
5.1.6	Realización del tránsito en Hec-Ras	59
5.1.7	Obtención de las condiciones de contorno	61
5.2	Fase 2	61
5.2.1	Generación del dominio computacional	61
5.2.2	Generación de malla	62
5.2.3	Preparación del modelo	63
5.3	Fase 3	64
5.3.1	Datos Introductorios	64
5.3.2	Aplicación de las ecuaciones	64
5.4	Fase 4	65
5.4.1	Toma de datos en campo	65
5.4.2	Identificación de los modelos	71
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS	74
6.1	Generación y análisis de los modelos	74
6.1.1	Modelos Hidrodinámicos	74
6.1.2	Modelos de transporte de sedimentos	78
6.1.3	Relación ecuaciones de transporte de sedimentos	98
6.1.4	Ecuación seleccionada	101

7	IMPACTO SOCIAL	105
8	CONCLUSIONES	106
9	RECOMENDACIONES	108
10	REFERENCIAS	109

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1 Mapa del Río Magdalena.....	16
Figura 2 Ubicación área de estudio.	19
Figura 3 Ejemplo Modelo de Elevación Digital.....	25
Figura 4 Ejemplo Batimetrías	26
Figura 5 Curva de duración.....	27
Figura 6 Efecto del tránsito a lo largo de un canal.	28
Figura 7 Representación Aguas Someras [39].....	29
Figura 8 ADCP.....	37
Figura 9 Mira.....	37
Figura 10 Nivel	38
Figura 11 Cuchara de sedimentos.....	38
Figura 12 GPS	38
Figura 13 Estaciones escogidas y punto de corte modelación Brazo Mompox	42
Figura 14 Digitalización de la zona de estudio en ArcGis.	45
Figura 15 “Splines” en el área de estudio, Delft3D.....	45
Figura 16 Batimetrías en formato shape, en ArcGis.	46
Figura 17 Batimetrías de la zona, en Delft 3D.	46
Figura 18 Secciones transversales y puntos geodésicos cercanos.....	49
Figura 19 Modelo de elevación Digital área de estudio	51
Figura 20 Estaciones Seleccionadas.....	53
Figura 21 Curva de duración de caudales Peñoncito.	54
Figura 22 Curva de duración de niveles, Peñoncito.....	54
Figura 23 Curva de duración de caudales Las Aguadas.....	55
Figura 24 Curva de duración de niveles, Las Aguadas.	56
Figura 25 Curva de duración de Caudales, Brazo de Mompox.	56
Figura 26 TIN del brazo de Mompox.	57
Figura 27 Secciones transversales en Hec-GeoRas.	58
Figura 28: Secciones transversales en Hec-Ras.....	58
Figura 29 Nivel condición Máxima (10%).....	60
Figura 30 Nivel condición Media (50%)	60
Figura 31 Nivel condición Mínima (95%).....	61
Figura 32 : Dominio Computacional.	62
Figura 33: Malla Curvilínea	63
Figura 34: Profundidades	63
Figura 35: Fotos de la instalación de la mira en el brazo de Mompox.	67
Figura 36: Fotos de la instalación del adcp en la lancha, en la salida de campo.....	67
Figura 37: Fotos de la salida de campo	68
Figura 38: Secciones transversales en El Peñoncito.....	69

Figura 39: Secciones transversales en el punto de control.	70
Figura 40: Secciones transversales en el brazo de Mompox.	70
Figura 41: Secciones transversales en Las Aguadas.	71
Figura 42: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el modelo Hidrodinámico en condiciones mínimas.	76
Figura 43: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el modelo Hidrodinámico en condiciones medias.	77
Figura 44: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el modelo Hidrodinámico en condiciones máximas.	78
Figura 45: Comportamiento del nivel del lecho (m) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Van Rijn en condiciones mínimas.	80
Figura 46: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Van Rijn en condiciones mínimas.	81
Figura 47: Comportamiento del nivel del lecho (m) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Van Rijn en condiciones medias.	82
Figura 48: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Van Rijn en condiciones medias.	83
Figura 49: Comportamiento del nivel del lecho (m) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Van Rijn en condiciones máximas.	84
Figura 50: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Van Rijn en condiciones máximas.	85
Figura 51: Comportamiento del nivel del lecho (m) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Engelund - Hansen en condiciones mínimas.	86
Figura 52: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Engelund - Hansen en condiciones mínimas.	87
Figura 53: Comportamiento del nivel del lecho (m) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Engelund - Hansen en condiciones medias.	88
Figura 54: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Engelund - Hansen en condiciones medias.	89
Figura 55: Comportamiento del nivel del lecho (m) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Engelund - Hansen en condiciones máximas.	90
Figura 56: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Engelund - Hansen en condiciones máximas.	91
Figura 57: Comportamiento del nivel del lecho (m) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Meyer – Peter - Müller en condiciones mínimas.	93
Figura 58: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Meyer – Peter - Müller en condiciones mínimas.	94
Figura 59: Comportamiento del nivel del lecho (m) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Meyer – Peter - Müller en condiciones medias.	95
Figura 60: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Meyer – Peter - Müller en condiciones medias.	96

Figura 61: Comportamiento del nivel del lecho (m) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Meyer – Peter - Müller en condiciones máximas.....	97
Figura 62: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Meyer – Peter - Müller en condiciones máximas.....	98
Figura 63: Secciones transversales en la zona de estudio.	99
Figura 64: Nivel de la lámina de agua con las diferentes ecuaciones de transporte de sedimentos para el escenario mínimo.	100
Figura 65: Nivel de la lámina de agua con las diferentes ecuaciones de transporte de sedimentos para el escenario medio.	100
Figura 66: Nivel de la lámina de agua con las diferentes ecuaciones de transporte de sedimentos para el escenario máximo.	101
Figura 67: Resultados Hidrodinámicos y de transporte de sedimentos en el escenario mínimo.	102
Figura 68: Resultados Hidrodinámicos y de transporte de sedimentos en el escenario medio.	103
Figura 69: Resultados Hidrodinámicos y de transporte de sedimentos en el escenario máximo.....	103

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1 Batimetrías Cirmag.	52
Tabla 2 Caudales ingresados Hec-Ras por sección transversal	59
Tabla 3 Condiciones para obtención de Nivel aguas abajo	59
Tabla 4 Caudales y niveles condiciones Máximas, medias y mínimas aguas abajo.	60
<i>Tabla 5 Condiciones de contorno.</i>	61
<i>Tabla 6 Parámetros numéricos de la Malla en Delft 3D.</i>	62
<i>Tabla 7 Parámetros para los modelos.</i>	64
<i>Tabla 8 Parámetros para los modelos.</i>	64
Tabla 9 Parámetros método Engelund Hansen	65
Tabla 10 Parámetros método Meyer-Peter-Müller	65
Tabla 11: Traslado de cota del brazo de Mompox.	65
Tabla 12: Niveles en la estación Peñoncito.	66
Tabla 13: Niveles en la estación Las Aguadas.	66
Tabla 14: Niveles en El Brazo de Mompox.	66
Tabla 15 intervalo de valores de velocidad mostrados por las secciones transversales	69
Tabla 16: Datos tomados en campo para calibrar.	71
<i>Tabla 17: Métricas de desempeño.</i>	72
<i>Tabla 18: Métricas de desempeño para el rango escogido.</i>	73
<i>Tabla 19 Condiciones de contorno.</i>	74
<i>Tabla 20 Parámetros para los modelos.</i>	74
<i>Tabla 21 Parámetros para los modelos de transporte de sedimentos.</i>	74
<i>Tabla 22: Intervalos para los modelos hidrodinámicos.</i>	75
<i>Tabla 23: Intervalos para los modelos de transporte de sedimentos.</i>	79

CONTENIDO DE ECUACIONES

Ecuación 1	30
Ecuación 2	30
Ecuación 3	30
Ecuación 4: Van Rijn	31
Ecuación 5: Engelind- Hasen.....	31
Ecuación 6: Meyer-Peter-Müller	31
Ecuación 7	33
Ecuación 8	33
Ecuación 9	34
Ecuación 10	34
Ecuación 11	35
Ecuación 12	35
Ecuación 13	35
Ecuación 14	36
Ecuación 15	36
Ecuación 16	37
Ecuación 16	50
Ecuación 17	50
Ecuación 18	50

RESUMEN

En el municipio de El Banco Magdalena, Colombia se han presentado disminuciones en el caudal del brazo de Mompóx, afectando la actividad económica del municipio, relacionada a la baja oferta hídrica y alta demanda, lo que dificulta las actividades económicas como la navegabilidad, pesca y disponibilidad de agua; por lo que en esta investigación se llevará a cabo un modelo hidrodinámico y de transporte de sedimentos con previo procesamiento de datos hidrológicos para la determinación del comportamiento de caudales en series de tiempo, generando tres escenarios los cuales asume un caudal bajo, medio y alto obtenido de la curva de duración de caudales, esta modelación numérica y de transporte de sedimentos es llevada a cabo con el programa computacional DELFT 3D que resuelve las ecuaciones de aguas someras y para el transporte de sedimento se usaran tres ecuaciones entre las que esta Van Rijn, Engelund - Hansen y Meyer - Peter - Müller teniendo el modelo, se procederá a realizar una identificación con los datos observados en campo, para la calibración de este; obteniendo un diagnóstico de la zona para la identificación de las causas del problema.

En el procesamiento de la información hidrológica, fue necesario el uso de curvas de duración y tránsito de caudales, para determinar las condiciones de contorno de los modelos en tres escenarios mínimo, medio y máximo, se realizó una salida de campo en la cual se tomaron datos de nivel, velocidad y caudal, que ayudaron a realizar la calibración de los modelos, encontrando el número de Manning óptimo.

De acuerdo con los resultados obtenidos con las modelaciones, se pudo evidenciar un comportamiento inusual en la entrada de El Brazo de Mompox que se identifica probablemente como sedimentación en la banca derecha que no permite el paso del fluido en su totalidad.

ABSTRACT

In the municipality of El Banco Magdalena, Colombia has been decreases the flow of Mompox arm, affecting economic activity of the municipality related to low supply water and high demand, making it difficult to economic activities navigability, fishing and water availability; so in this research has been made a model of hydrodynamic and transport of sediments with previous hydrological data processing will be carried out for the determination of the behavior of flow time series, generating three scenarios which assume a low, medium and high flow duration curve, obtained this numerical and sediment transport modeling it is carried out with the DELFT 3D computer program that solves the equations of shallow waters and for the transport sediment used three equations involving Van Rijn, Engelund-Hansen and Meyer-Peter-Müller taking the model will proceed to make an identification with the data observed in the field, for calibration, obtaining a diagnosis of the area for the identification of the causes of the problem.

In the processing of hydrological information, the use of duration and transit flow curves was necessary to determine conditions of minimum outline of models in three scenarios, medium and maximum was a field trip in which level, speed and flow, data were taken, it helped to perform the calibration of the models, finding the number of optimal Manning according to the results obtained with the models, demonstrate a problema at the entrance of the arm of Mompox, which identifies probably as sedimentation in the right bank which does not allow the passage of the fluid in its entirety.

INTRODUCCIÓN

El Río Magdalena nace en la laguna que lleva su mismo nombre, la cual se localiza a 3350 de elevación sobre el páramo de las Papas, en el Macizo Colombiano. Su cuenca alta incluye todo el territorio del departamento del Huila, con una extensión de 19.890 Km², más 1.523 Km² del territorio del Cauca (correspondiente a la cuenca alta y media del río Páez), con lo que la superficie total de la cuenca que drena en este sector alcanza los 21.413 km² (Ver Figura 1) [1].

Esta cuenca es uno de los ejes más importantes del desarrollo económico del país, debido a que en su cuenca se produce el 85% del PIB nacional, a lo largo de su historia ha sido predominante en el comercio e intercambio de bienes: importaciones, exportaciones, transporte, pesca, entre otros, con su extensión de más de 1.500 kilómetros de recorrido pasa por más de 700 municipios.

El nivel de sus aguas presenta apreciables variaciones a causa de las fuertes precipitaciones locales, tanto sobre su cauce como en el de sus afluentes. Estas variaciones son más apreciables en sus sectores alto y medio, ya que en el bajo Magdalena la regulación es ejercida por la zona cenagosa, donde, además de disminuir las precipitaciones, se acumulan grandes cantidades de agua durante la época de lluvias, las cuales son devueltas al cauce en los períodos de estiaje o sequía, esta cuenca también se caracteriza por transportar altas cantidades de sedimentos, se estima un aporte de sedimentos a la depresión Momposina de 60 millones de metros cúbicos al año, de los cuales 34% provienen de la cuenca del Cauca y 66% de la del Magdalena [2].

componentes y muestren numerosas interacciones. [3], es por esto que se llevaron a cabo dos modelaciones con la ayuda de la herramienta DELFT 3D que es un programa computacional, que da solución a las ecuaciones de aguas somera y transporte de sedimentos en tres dimensiones XYZ, en unas condiciones de flujo tanto permanente como no permanente

La modelación hidrodinámica y transporte de sedimentos para este documento se realiza mediante el programa computacional mencionado, para así evaluar la dinámica del cuerpo hídrico analizando su comportamiento en cuanto a velocidades y concentración de sedimentos, con esta modelación se pretende dar una respuesta a la disminución de caudal registrada en los últimos años.

1. MARCO CONTEXTUAL

1.1 Descripción del área de estudio

Colombia se encuentra ubicada en el extremo noroccidental de América del sur, cuenta con una superficie de 1.141.748 km², limita al norte con Panamá y el mar Caribe, al oeste con Venezuela y Brasil, al sur con Perú y Ecuador y al oeste con el océano Pacífico; Colombia tiene una topografía de montañas: La cordillera de los Andes está separada por los ríos más importantes; el Magdalena y el Cauca. Además, contiene el 10% de la flora y fauna del mundo, pese a que su extensión geográfica apenas alcanza el 1% de la tierra. Debido a su ubicación geográfica y a sus condiciones de relieve, Colombia tiene una precipitación media anual de 3.000 mm aproximadamente, que representa una riqueza importante de recursos hídricos, cuando es comparada con el promedio mundial de precipitación anual, equivalente a 900 mm y con el promedio anual de Suramérica, del orden de los 1.600 mm [4] [5] [6] [7].

El río Magdalena es la principal arteria fluvial del país, el cual atraviesa todo el país de sur a norte, debido a que cuenta con una longitud de más de 1500 kilómetros, donde se encuentran ubicados 207 municipios incluido El Banco Magdalena, de estas aguas depende el abastecimiento de acueductos de diferentes poblaciones y actividades agropecuarias, industriales, de comercio, servicio y energéticas [8] [9] [10].

En Colombia se encuentra El Municipio de El Banco, el cual está ubicado en el departamento del Magdalena, limita al Norte con los municipios de Guamal (Magdalena) y Chimichagua (Cesar), al Occidente con el brazo de Mompo y el municipio de Hatillo de Loba (Bolívar); al Oriente con el Municipio de Tamalameque (Cesar) y el complejo cenagoso de Zapatosa y al Sur con el Río Magdalena y el municipio de El Peñón (Bolívar) [11].

En este proyecto se realizará una modelación hidrodinámica para analizar el movimiento del agua en el tramo del río Magdalena el cual separa los municipios del Banco de El Peñón y continúa hasta la separación entre San Martín de Loba de Hatillo de Loba e incluye la bifurcación del río Magdalena que forma el Brazo de Mompo, la cual se encuentra a la altura del municipio El Banco Magdalena (*Figura 2*), que desde este punto hasta la boca de Tacaloa tiene cerca de 145 kilómetros de extensión y transporta un caudal de aproximadamente 633 m³/s [12].

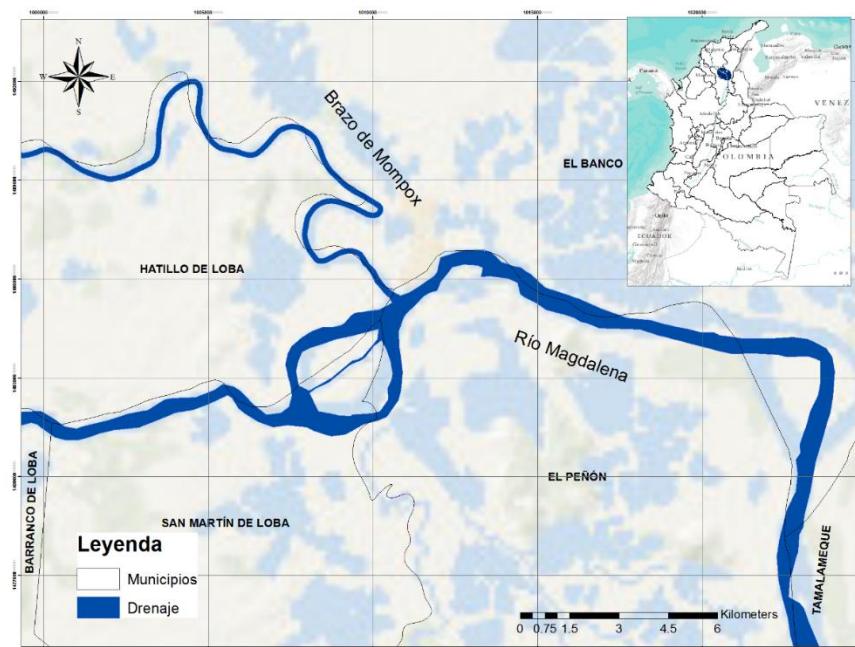


Figura 2 Ubicación área de estudio.
Fuente: Autores

Esta área de estudio ha presentado a través de los años una disminución de la cantidad de agua que entra al brazo de Mompox, generando desabastecimiento de agua en el municipio de El Banco y afectado las actividades económicas como la pesca agricultura y transporte en las poblaciones cercanas a el brazo [13] [14] [15] [16].

1.2 Planteamiento del problema

El río Magdalena es la principal arteria fluvial del país, el cual atraviesa todo el país de sur a norte, debido a que cuenta con una longitud de más de 1500 kilómetros, su cuenca ocupa el 49% el territorio continental del país, donde se encuentran ubicados 207 municipios incluido El Banco Magdalena, de estas aguas depende el abastecimiento de acueductos de diferentes poblaciones y actividades agropecuarias, industriales, de comercio, servicio y energéticas. El bajo Magdalena tiene una longitud de 428 kilómetros aproximadamente que abarca desde El Banco (Magdalena) hasta la desembocadura del río en Bocas de Ceniza y en Cartagena a través del canal del dique, en esta zona y en la cuenca media se presenta una situación crítica, debido a los bajos niveles en el Magdalena que se presentan en el recorrido desde Puerto Salgar hasta El Banco [8] [9] [10].

Inicialmente se observa que al nivel de la cuenca baja del Magdalena forman numerosas ciénagas debido a su pendiente suave, estas ciénagas actúan en la regulación de crecientes almacenando agua y en períodos de sequía devuelve el agua al río, las ciénagas comprenden desde la Ciénaga Grande de Santa Marta, al pie de la Sierra Nevada, hasta el canal del Dique y la depresión Momposina [9].

El brazo de Mompóx con aproximadamente 145 kilómetros de extensión, reportó variación de caudales en diferentes años, lo cual dio a conocer que este ha disminuido, en el año 2001 se reportó un caudal de 7,448 m³/s y en el 2013 fue de 7,100 m³/s, en el año 2016 se presentaron problemas de desabastecimiento de agua en el municipio de El Banco, tanto para la población del casco urbano como para la zona rural, por otro lado la navegabilidad en el río y la pesca en este se ha dificultado [13] [13] [14] [15] [16].

En el 2008 se inicia la construcción de un dique con 1.200 metros de longitud sobre la vía que dé El Banco, Magdalena, conduce a Tamalameque, Cesar, tiene como propósito el mejoramiento de la red vial y el control de inundaciones que afecta el ecosistema de la ciénaga de Zapatosa al igual que inundaciones en dos periodos del año en El Banco [17].

La disminución de caudal en el Río Magdalena en el brazo de Mompóx, ha mostrado consecuencias en cuanto al desarrollo de actividades económicas como la pesca y navegabilidad del río que permite el comercio en esta zona, y de abastecimiento de agua a la población, las causas de esto son inciertas, pueden deberse a varios factores uno de ellos puede ser la afectación del fenómeno del niño, que ha debilitado la fuerte corriente y la abundancia de agua en el Río, otro factor a considerar es la obra hidráulica que se encuentra circundante a la población de El Banco, esta puede causar la disminución del caudal debido a que generaría un arrastre de sedimentos que estaría disminuyendo la cantidad de agua que se dirige hacia el Brazo de Mompóx, afectando las condiciones de movimiento y cantidad de caudal.

En el 2015 se realizó una modelación numérica y de transporte de sedimentos para el río Magdalena sección Barrancabermeja- La Coquera (Colombia), con el cual se determinó la profundidad del agua, velocidad, caudal, dinámica del transporte de sedimentos y los patrones de erosión, en este también se pudo realizar la modelación junto con una obra hidráulica para poder observar el mantenimiento de la vía acuática con estos tipos de modelación se pueden reconocer algunas de las causas o factores que puedan estar alterando el caudal de los ríos para así realizar una correcta gestión del recurso hídrico [18].

La modelación hidrodinámica y de transporte de sedimentos podrá dar a conocer el movimiento, caudal y velocidad del río; que revelarían las posibles causas por las que la lámina de agua ha disminuido, lo que se evaluará es el comportamiento del río en diferentes tramos para así determinar en qué sección de este se dan las

pérdidas de la lámina de agua y establecer si el transporte y concentración de sedimentos son causantes de esta problemática.

La curva de duración de caudales logra la determinación de condiciones máximas, medias y mínimas, cuando se establece el porcentaje de ocurrencia de la lámina de agua, estas condiciones son pertinentes para la realización de diferentes escenarios de modelación.

Esta modelación servirá para analizar lo que puede estar causando la disminución de caudal presente en el tramo del río comprendido entre El banco y Brazo de Mompox. Es por esto por lo que se hace necesario establecer ¿Cuál es el comportamiento hidrodinámico y de transporte de sedimentos en el brazo de Mompóx (El Banco Magdalena)?

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Identificar la dinámica del agua y el transporte de sedimentos en el brazo de Mompox a la altura del municipio de El Banco debido a cambios en el comportamiento hidrodinámico.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar el comportamiento hidrológico, bajo tres condiciones de caudal mínimo, medio y máximo, para establecer condiciones de contorno.
- Evaluar mediante un modelo numérico bidimensional el comportamiento hidrodinámico y de transporte de sedimentos

3 MARCO TEÓRICO

El Río Magdalena es el eje a los diferentes servicios económicos y ambientales que son de importante sustento para el país; sin embargo las diferentes actividades que se desarrollan en torno a este, han generado impactos ambientales, como la disminución de la calidad del agua y el suelo, pérdida de biodiversidad y recursos forestales, afectando su disponibilidad de bienes y servicios, igualmente se ve afectado por los fenómenos del niño y la niña, provocando alteraciones de caudal que afectan directamente a la población, por esto se han llevado a cabo las diferentes modelaciones tanto hidrológica, hidrodinámica como de transporte de sedimentos para así encontrar más aspectos sobre su comportamiento para una adecuada toma de decisiones en cuanto al recurso hídrico y las diferentes problemáticas o riesgos que esté presente en su curso natural [19].

En lo relacionado a la hidrodinámica de la cuenca del río Magdalena se realizó en el 2015 un estudio que se enfocó en el último tramo del río, utilizando un modelo hidrodinámico; haciendo uso de las ecuaciones de Saint Venant; aplicando los principios de conservación de masa y cantidad de movimiento, se llevó a cabo su solución por medio del método Euleriano-Lagrangiano que hace énfasis a la definición de las líneas de corriente y las trayectorias de las partículas. El modelo que se utilizó para el estudio de la hidrodinámica y transporte de contaminantes es ANAITE/2D, la malla hidráulica se generó con Argus One [20].

En el 2015 se elaboró un documento sobre la simulación numérica de la dinámica del flujo y transporte de sedimentos en el Río Magdalena sección Barrancabermeja-La Coquera (Colombia), el cual fue realizado junto con Cormagdalena, donde fue usado el programa DELFT 3D (herramienta de modelación para investigar la hidrodinámica, el transporte de sedimentos y morfología y la calidad del agua de ríos, estuarios y ambientes costeros), al realizar la modelación del transporte de sedimentos fueron usadas diferentes ecuaciones, dando como resultado que la más adecuada para esta zona era la ecuación de Meyer-Peter-Müller donde se determinó que la variación de la velocidad es alta debido a los altos gradientes de transporte de sedimentos y los patrones de erosión [18].

Por otro lado, se concluyó que el modelo numérico se aproxima cualitativamente a las condiciones naturales para los diferentes flujos, y muestra la hidrodinámica y morfología cuando los rompeolas están presentes. Además, se estableció que para realizar una modelación hidrodinámica y morfológica del Río Magdalena la herramienta DELFT 3D es una buena opción [18].

En cuanto a uso y tratamiento de datos hidrológicos en el 2015 se elaboró una simulación de reglas de despacho, para la evaluación de la regulación hidrológica provocada por la operación del embalse hidrosogamoso y proponer que parámetros se deben tener en cuenta para que el proyecto hidroeléctrico opere sin afectar la regulación hidrológica, en este proyecto se utilizó la curva de duración de caudales

para el análisis de la frecuencia de los datos de caudales, por medio de esta curva de duración de caudales se obtiene el Índice de Retención y Regulación Hídrica el cual evalúa la capacidad de una determinada cuenca para mantener un régimen de caudales [21]

En el año 2013 se llevó a cabo un proyecto que realizó el tránsito de crecientes en una corriente, llevando a cabo una modelación hidrológica con el sistema HEC-HMS de las microcuencas aportantes al tramo del río Medellín comprendido entre la entrada a Girardota y El Hatillo para actualizar la modelación hidráulica con el sistema HEC-RAS [22].

En cuanto a modelación de transporte de sedimentos en el 2005 se realizó una investigación sobre la sedimentación en el tramo de la desembocadura hacia el mar caribe, el cual permitió definir los efectos que se pueden generar por la sedimentación acelerada que se asocian al deterioro de la cuenca. En el cual se concluye que en este tramo se ve afectada la navegabilidad, y presenta alteraciones ambientales que incluye la deforestación, contaminación y secado de humedales debido a las actividades humanas cercanas a la zona, algunas de estas generan erosión aumentando la carga de material que se trasporta en el río lo cual aumenta la sedimentación de este tramo [23].

Un modelo hidrodinámico necesita un dominio computacional establecido, la ayuda de un modelo de elevación del terreno sirve para la determinación de este, el uso de batimetrías da soporte de información al modelo para su completa realización, en cuanto a las entradas y salidas utilizando información hidrológica es base al igual que su tratamiento con los diferentes métodos existentes para establecer estas dentro del dominio, por último, el coeficiente de rugosidad de manning tiene un papel importante dentro de un modelo hidrodinámico, la obtención de este se logra dependiendo las características morfológicas.

3.1 Procesamiento de información geográfica

Gran parte de la información en un SIG proviene de cartografía ya existente, un sistema de información geográfica utiliza la potencia de procesamiento de la computadora para transformar la información digital, obtenida de fuentes con diferentes proyecciones y/o diferentes sistemas de coordenadas, a una proyección y sistema de coordenadas común. En el caso de las imágenes (ortofotos, imágenes de satélite, etc.) este proceso se denomina rectificación. [24]

La información geográfica puede ser consultada, transferida, transformada, superpuesta, procesada y mostradas utilizando numerosas aplicaciones de software. [24]

Los sistemas GIS pueden utilizar formatos raster (fotografías) y vectoriales (planos CAD) para integrar datos como fotografías, vídeo, imágenes satelitales, planos CAD, información obtenida a través de GPS (sistemas de posicionamiento global). [24]

Dentro de los formatos para la utilización de SIG mencionado antes son fotografías raster, como lo son los modelos de elevación digital.

Un modelo de elevación digital es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo, es por esto que se utiliza para reconocimiento del terreno al igual que para la extracción de valores que se tienen en el área del DEM. [25]

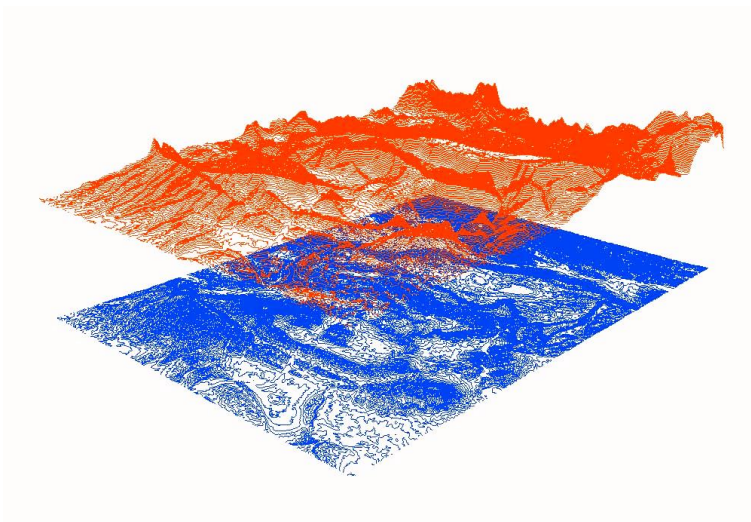


Figura 3 Ejemplo Modelo de Elevación Digital
Fuente: Mendiak

Con el soporte del modelo de elevación digital se debe considerar la obtención de batimetrías que su finalidad es la obtención de coordenadas (X, Y, Z) de todos estos puntos, lo que caracteriza los diferentes tipos de levantamientos batimétricos es la determinación de la profundidad, existen diferentes tipos de métodos topográficos en Batimetría como lo es método de posicionamiento planímetro, método de posicionamiento altimétrico y método de posicionamiento 3D

Como primer método, planimétrico, busca la realización de trabajos topográficos terrestres para poder representar la línea de costa y seguido de esto el levantamiento del relieve submarino; el segundo método, altimétrico, en el cual se determinan las altitudes de los distintos vértices de la red altimétrica refiriéndolas a la superficie del nivel medio del mar, por último, el método de posicionamiento 3D,

que es un método combinado para levantamiento batimétrico con GPS y ecosonda digital. [26]

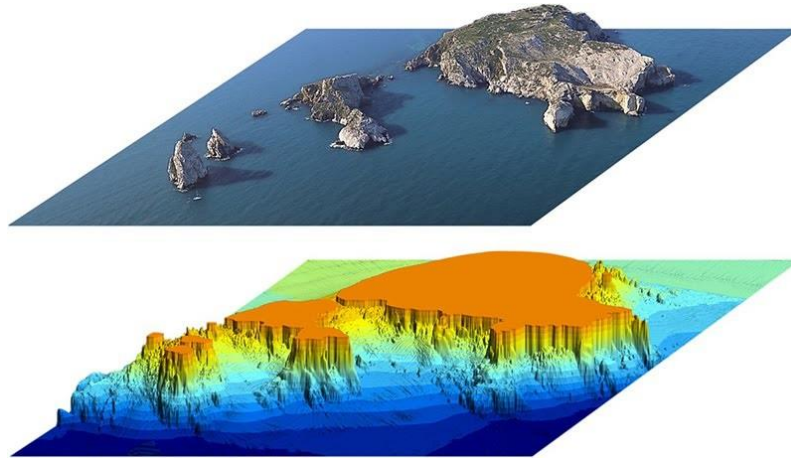


Figura 4 Ejemplo Batimetrías
Fuente: [27]

3.2 Hidrología

La hidrología es la ciencia que se enfoca en estudiar el ciclo hidrológico global; tanto los procesos de acumulación y circulación, como las variaciones tanto espaciales como temporales del agua en las etapas terrestres, oceánica y atmosférica, el movimiento del agua sobre y debajo de la superficie terrestre, desde el punto de vista cualitativo, cuantitativo y estadístico [28].

La hidrología permite alimentar las entradas del modelo hidrodinámico; esto se puede realizar con varios instrumentos, como lo son, las curvas de duración, el Balance hídrico, modelo lluvia-escorrentía y análisis de probabilidad.

3.2.1 Modelo hidrológico

Según el IDEAM la modelación hidrológica es una herramienta de gran importancia para el estudio de avenidas que se ha extendido por todo el mundo, fundamentalmente en países desarrollados. En la actualidad, con el empleo de estos modelos, se realiza el análisis y la prevención de las inundaciones; además, es posible manejar hipótesis suficientemente realistas o previsibles que ofrezcan un cierto grado de confianza para la toma de decisiones, ya sea en la ordenación del territorio en torno a los ríos o para exigir criterios de diseño de obras e infraestructuras capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia. Incluso, alertar a los servicios de protección civil y establecer

protocolos de actuación ante posibles situaciones de peligro por intensas lluvias [29].

La salida de los modelos hidrológicos varía dependiendo de las metas y objetivos del modelo. Algunos modelos se utilizan para predecir los totales mensuales de escorrentía, mientras que otros están diseñados para ver a las tormentas individuales. El resultado más común es el hidrograma o hidrograma de escurrimiento [29].

Los modelos lluvia escorrentía agregados son valiosos para predecir y simular los caudales con base en una conceptualización que represente en forma simplificada los procesos físicos en la cuenca: infiltración, evaporación, flujo subsuperficial y flujo subterráneo [30].

3.2.2 Curva de duración de Caudales

Es un procedimiento grafico para el análisis de la frecuencia de los datos de caudales que representan la frecuencia acumulada de ocurrencia de un caudal determinado, esto se muestra en una gráfica que tiene el caudal (Q) y el número de días del año que se expresa en % de tiempo, el cual representa que ese caudal en ese tiempo es excedido o igualado, como abscisa (Figura 5).

Para generar la curva de duración de caudales, se pueden utilizar datos de caudal, mensual o diario [31].

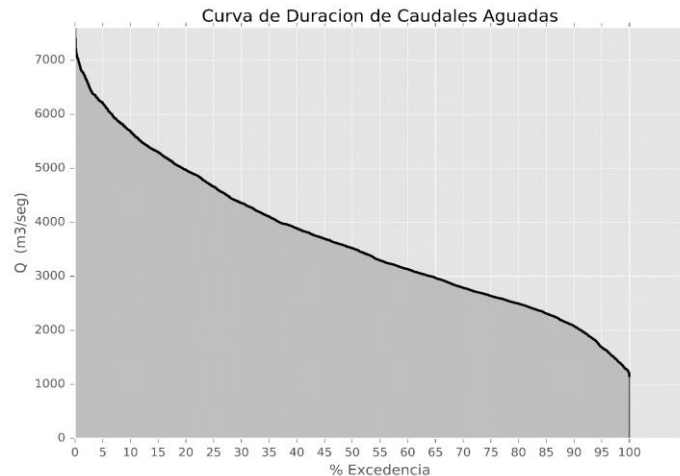


Figura 5 Curva de duración
Fuente: Autores

3.2.3 Tránsito de hidrogramas

El tránsito es dar a conocer cómo evoluciona un hidrograma a medida que pasa a lo largo de un cauce, deposito o embalse (Figura 6), el hidrograma generado al comienzo será más alto y de menor duración (A), en comparación con el ultimo el cual será más largo y aplanado (C), pero con el mismo volumen en los dos extremos; esto supone que no existen perdidas de volumen por infiltración o evaporación. Para representar un evento como estos se han desarrollado herramientas informáticas como el HEC-HMS, que es utilizado para modelar los factores hidrológicos, y el HEC-RAS, que es utilizado para modelar los factores hidráulicos [32] [33].

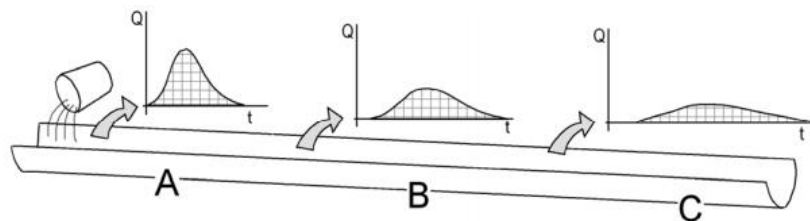


Figura 6 Efecto del tránsito a lo largo de un canal.

Fuente: [32]

3.3 Modelación Hidrodinámica y de transporte de sedimentos

La hidrodinámica es la parte de la dinámica que estudia el movimiento de los líquidos en relación con las causas que lo originan, lo cual permite entender, controlar y pronosticar, los procesos físicos que se tienen en los cuerpos de agua lenticos y loticos, aparte sirven como base para realizar modelos de transporte de sedimentos y de contaminantes [34]. También estos modelos sirven para ver daños, comportamiento e impacto que podría ocasionar una obra de ingeniería en un cuerpo de agua, estos modelos en ríos de llanura y ciénagas permiten una gran facilidad debido a que el costo económico y computacional es bajo, a comparación de realizar salidas de campo y compra de equipos que permitan ver el movimiento en este [35].

Este bajo costo computacional se debe a que, las condiciones que presenta un río o ciénaga, presenta características que permiten usar la ecuación de aguas someras que es una simplificación de la ecuación de Navier Stokes, debido a que presentan escalas mucho mayores en la horizontal que en la vertical [35].

El estudio de procesos hidrodinámicos en crecidas de grandes ríos de llanura es importante para evaluar la inundación de sus valles, consecuencias y problemas hidroambientales asociados. La modelación hidrodinámica constituye una

herramienta muy valiosa a la hora del análisis de esto. Por un lado, la modelación permite la evaluación del riesgo de inundaciones, además, los modelos hidrodinámicos pueden ser utilizados para representar otros subprocesos, tales como el transporte de sedimentos, contaminantes y el escurrimiento subterráneo en las planicies [36] [37].

Los resultados de velocidad de los modelos hidrodinámicos son usados para realizar un modelo de transporte de sedimentos, en tres dimensiones, que represente los fenómenos de advección y difusión [35].

3.3.1 Ecuaciones de Gobierno

3.3.1.1 Ecuación de Aguas Someras

La ecuación de aguas someras viene de una simplificación de las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales sirven para determinar la superficie libre del agua, y con algunas suposiciones se llega a la ecuación de aguas someras; como lo son: fluido incomprensible, distribución de presiones hidrostáticas, extensión en la vertical mucho menor que en la horizontal, velocidades verticales mucho menores que las horizontales, aceleración en la vertical despreciable, distribución de presiones hidrostáticas, fuerzas inerciales mucho mayores a las viscosas [38].

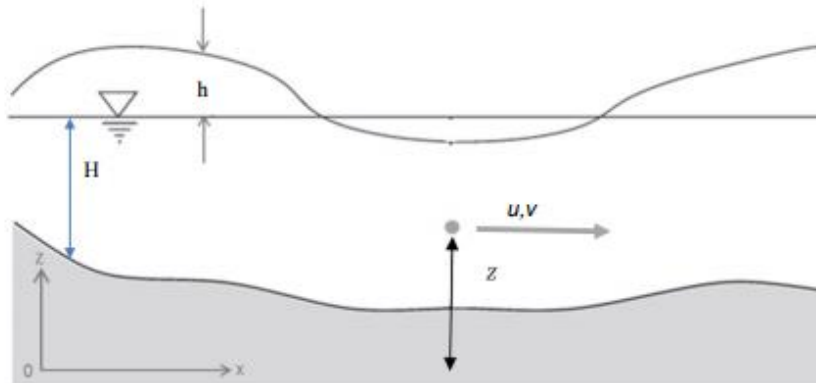


Figura 7 Representación Aguas Someras [39]
Fuente: Autores

La ecuación de aguas someras se puede representar con ayuda de la Figura 7, en donde se tiene en cuenta una capa del fluido en una superficie horizontal, siendo H una profundidad promedio del agua, h la perturbación de la superficie libre y u y v las velocidades horizontales (x , y) [39].

$$\frac{du}{dt} - fv + g \frac{\partial n}{\partial x} + bu = 0$$

Ecuación 1

$$\frac{dv}{dt} + fu + g \frac{\partial n}{\partial y} + bv = 0$$

Ecuación 2

$$\frac{dn}{dt} + \nabla * V(H + n) = 0$$

Ecuación 3

Las Ecuación 1 y Ecuación 2 corresponden a la conservación del momento y la Ecuación 3 a la conservación de la masa, en estas ecuaciones u y v son las velocidades en el plano horizontal, H la altura promedio del agua, h es la perturbación de la superficie libre, g la gravedad y f representa las fuerzas externas (fricción, viento, Coriolis, etc.) [38] [40].

3.3.1.2 Transporte de sedimentos

➤ Ecuaciones para el transporte de sedimento no cohesivo

Hay varios autores que han trabajado sobre ecuaciones del transporte de sedimentos no cohesivos, pero para este proyecto se van a tener en cuenta las ecuaciones de Van Rijn, el cual hace una diferencia entre la carga de fondo y los sedimentos suspendidos, de Engelund & Hansen y Meyer-Peter & Müller, en donde calculan el total del sedimento (fondo y suspensión) transportado [41] [42].

○ Ecuaciones de Van Rijn, 1993

La ecuación de Van Rijn fue derivada a través de análisis teóricos y verificada con datos de laboratorio y de campo utilizando sedimentos uniformes con diámetros de partículas comprendidos entre 0.2 mm y 2 mm [43] [44].

$$\frac{T_i}{Q} = \alpha_{vrf_i} \left[\frac{u - u_{ci}^{corr}}{\sqrt{(s-1)gd_i}} \right]^{2.4} \left(\frac{d_i}{h} \right)^{1.2}$$

Ecuación 4: Van Rijn

Fuente: [43]

○ **Ecuaciones de Engelund - Hansen, 1967**

La ecuación de E&H fue derivada mediante consideraciones teóricas y verificada con datos experimentales de sedimentos uniformes con diámetros comprendidos entre 0.19 mm y 0.93 mm. La misma proporciona el transporte total, pero para tensiones de corte moderadas puede ser aplicada para evaluar el transporte de fondo [43].

$$W_i = \alpha_{ehf_i} \left(\frac{u}{u_*} \right)^2 \tau_{*i} \xi_{0i}$$

Ecuación 5: Engelind- Hasen

Fuente: [43]

○ **Ecuaciones de Meyer - Peter - Müller, 1948**

La ecuación de MPM es una relación empírica basada en el exceso de la tensión de corte adimensional. La misma fue verificada con datos experimentales utilizando sedimentos uniformes y heterogéneos con diámetros comprendidos entre 0.4 mm e 28.65 mm. En la versión original, para sedimentos heterogéneos no se plantea el cálculo por clases granulométricas, sino que los autores sugieren utilizar el diámetro medio aritmético para calcular el transporte de fondo global [43].

$$W_i = \alpha_{mpm} f_i \mu^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{ci}^{corr}}{\mu \tau_i} \right)^{3/2}$$

Ecuación 6: Meyer-Peter-Müller

Fuente: [43]

3.3.2 Plataforma de Modelación

Para generar modelos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos, es necesario el uso de alguna herramienta computacional, ya sea modelos en una, dos o tres dimensiones.

3.3.2.1 DELFT 3D

El programa computacional Delft 3D, es un software que da solución a las ecuaciones de aguas somera y transporte de sedimentos en tres dimensiones XYZ, en unas condiciones de flujo tanto permanente como no permanente. Este programa realiza la discretización espacial de las ecuaciones de gobierno utilizando el método de diferencias finitas [41].

El software DELFT 3D hace uso del método de las diferencias finitas para la discretización espacial de las ecuaciones de gobierno, y esquema implícito ADI para discretizar la variable temporal (Luijendijk, 2001). Dicha discretización temporal es ventajosa debido a que este esquema es incondicionalmente estable, lo que quiere decir que no hay la restricción impuesta por el número de Courant (ver **Ecuación 16** Ecuación 16) que limita el tamaño del paso de tiempo en los esquemas explícitos. Sin embargo, la resolución de las ecuaciones matemáticas puede ser bastante complejas y el costo computacional puede ser más elevado que la contraparte explícita. Además, el hecho de que el modelo sea estable no te garantiza que la solución sea la correcta [42].

➤ Configuración del modelo numérico

A continuación, se presentarán las condiciones de la simulación que se tienen en cuenta para realzar el modelo numérico.

- **Modelo Digital del terreno**

Modelo digital de elevación y batimetrías, en donde se tendrán las alturas del terreno, correspondiente al área de estudio; en formato .xyz.

- **Área Computacional**

Está dividido en tres archivos, el primero es el archivo de los “splines” que son líneas longitudinales y transversales; las cuales bordean el área de estudio; adaptándose al forma del río; este se encuentra en formato Shockwave Flash Object (.spl), el segundo es la malla curvilínea que se genera a partir de los “splines”, la cual también rodea y se ajusta a los bordes del río y tiene un formato .GRD y por ultimo las

batimetrías las cuales se interpolan con la malla y se le asigna un valor a cada celda de la malla, este archivo está en formato .DEP.

○ Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno determinar la interacción del flujo con el medio que lo rodea y establece las características que tiene el flujo en las fronteras (entradas y salidas), hay diferentes tipos, entre esos esta Dirichlet el cual fija un valor en los puntos de la frontera y Neumann consiste en la variación de los parámetros en la frontera [45].

○ Ecuación aguas someras Delft 3D

En la anterior sección se presentaron las ecuaciones de aguas someras que se manejan en la teoría (Kundu & Cohen, 1990), en la presente sección se presentan las ecuaciones de aguas someras que maneja el software DELFT 3D. La ecuación (Ecuación 7) correspondiente a la ecuación de continuidad se representan en el modelo σ como [42]:

$$\frac{\delta\eta}{\delta t} + \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\alpha\alpha}}\sqrt{G_{\beta\beta}}} \frac{\delta(H + \eta)u\sqrt{G_{\alpha\alpha}}}{\delta\beta} \right) + \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\alpha\alpha}}\sqrt{G_{\beta\beta}}} \frac{\delta(H + \eta)v\sqrt{G_{\beta\beta}}}{\delta\alpha} \right) = (H + \eta)Q$$

Ecuación 7

Fuente: [42]

Dónde Q es el termino fuente que representa los aportes por unidad de superficie, debido a la descarga o la captación de agua (la precipitación y la evaporación) y $G_{\beta\beta}$ y $G_{\alpha\alpha}$ representan a los coeficientes de transformación de coordenadas curvilíneas (β , α) a coordenadas rectangulares (x , y) [42].

En las siguientes dos ecuaciones se presentan las ecuaciones de momentum, para los componentes de las velocidades horizontales, en los ejes x y y , según lo plantea (Hydraulics, 2014) [42]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\beta\beta}}} \frac{\partial u}{\partial \beta} + \frac{v}{\sqrt{G_{\alpha\alpha}}} \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \frac{w}{(H + \eta)} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\alpha\alpha}}\sqrt{G_{\beta\beta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\alpha\alpha}}}{\partial \beta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\alpha\alpha}}\sqrt{G_{\beta\beta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\beta\beta}}}{\partial \alpha} - f_v \\ = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\beta\beta}}} P_\beta + F_\beta + \frac{1}{(H + \eta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(V_\varepsilon \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\beta \end{aligned}$$

Ecuación 8

Fuente: [42]

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\beta\beta}}} \frac{\partial v}{\partial \beta} + \frac{v}{\sqrt{G_{\alpha\alpha}}} \frac{\partial v}{\partial \alpha} + \frac{w}{(H + \eta)} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\alpha\alpha}}\sqrt{G_{\beta\beta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\alpha\alpha}}}{\partial \alpha} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\alpha\alpha}}\sqrt{G_{\beta\beta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\alpha\alpha}}}{\partial \beta} - f_u \\ = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\alpha\alpha}}} P_\alpha + F_\alpha + \frac{1}{(H + \eta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(V_\varepsilon \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\alpha \end{aligned}$$

Ecuación 9

Fuente: [42]

En las ecuaciones (Ecuación 8) y (Ecuación 9) P_β y P_α representan los gradientes de presión, F_β y F_α representan el desequilibrio en los esfuerzos horizontales de Reynold's, M_β y M_α representan las contribuciones de fuentes externas o sumideros de momentum y V_ε representa el coeficiente de viscosidad turbulenta en la vertical. Observamos que las ecuaciones en DELFT 3D de momento varían significativamente respecto a las ecuaciones generales [42].

○ Transporte de sedimento

El módulo de transporte que maneja DELFT 3D tiene en cuenta tanto la carga suspendida como la de fondo, siendo compatible el modelo con sedimentos cohesivos y no cohesivos. Teniendo en cuenta las características de la carga de fondo y de la carga suspendida, y sus diferencias, el DELFT 3D utiliza la ecuación de advección – difusión tridimensional (Hydraulics, 2014). El modelo trabaja dependiendo de las cargas de cada tipo de partícula.

❖ Carga Suspendida

Para la solución del transporte de sedimentos en suspensión en las tres dimensiones, se maneja la ecuación advección – difusión (balance de masa), como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial t} + \frac{\partial uc^{(\ell)}}{\partial x} + \frac{\partial vc^{(\ell)}}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)^{(\ell)} c^{(\ell)}}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{s,x}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{s,y}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{s,z}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

Ecuación 10

Fuente: [42]

Donde $c^{(\ell)}$ es la concentración de la masa en una fracción de sedimento (ℓ) (u, v, w) son las tres componentes de velocidad de flujo, $(\varepsilon_{s,x}^{(\ell)}, \varepsilon_{s,y}^{(\ell)}, \varepsilon_{s,z}^{(\ell)})$ representan los valores de difusividad turbulenta en una fracción de sedimento (ℓ) y $w_s^{(\ell)}$ es la velocidad de caída o asentamiento en una fracción de sedimento (ℓ) .

○ Ecuación para el transporte de sedimento no cohesivo

Existen muchos autores que han trabajado sobre ecuaciones para el transporte de sedimentos No cohesivos (Hydraulics, 2014), sin embargo, en esta investigación trabaja con 34 los modelos de (Van Rijn, 1993) el cual tiene en cuenta la diferencia entre el transporte de sedimentos suspendidos y los de carga de fondo, el de (Engelund & Hansen, 1967) y (MeyerPeter & Müller, 1948) los cuales calculan el total (fondo y suspensión) del sedimento transportado. A continuación, se describen estos modelos:

❖ Van Rijn

La metodología consiste en calcular el transporte total, sumando los resultados del transporte por arrastre de fondo y el transporte en suspensión obtenidos de forma independiente. El sedimento es arrastrado en la columna de agua mediante la imposición de una concentración de referencia a la altura de referencia. A continuación, se presentan las ecuaciones de Van Rijn [46].

$$C_a = 0.015 \rho_s \frac{D_{50} (T_a)^{1.5}}{a (D.)^{0.3}}$$

Ecuación 11

Fuente: [42]

$$D. = D_{50} \left[\frac{(s-1)g}{v^2} \right]^{1/3}$$

Ecuación 12

Fuente: [42]

$$T_a = \frac{(\mu_c \tau_{b,cw} + \mu_w \tau_{b,w}) - \tau_{cr}}{\tau_{cr}}$$

Ecuación 13

Fuente: [42]

Donde C_a representa la concentración de referencia a una altura a , D es el diámetro de partículas adimensional, T_a representa el esfuerzo cortante sobre el lecho, μ_c es el factor de eficiencia del flujo, μ_w es el factor de eficiencia de las olas, τ_{ct} es el esfuerzo cortante crítico sobre el lecho, $\tau_{b,cw}$ representa el esfuerzo cortante en el lecho debido al flujo con presencia de olas, y $\tau_{b,w}$ representa el esfuerzo cortante en el lecho debido a las olas. [46]

❖ Ecuaciones de Engelund - Hansen, 1967

La metodología de (Engelund & Hansen, 1967) es utilizada con frecuencia en ríos y estuarios, y está basada en una consideración energética, la cual establece una relación entre los parámetros de transporte y movilidad. A continuación, se presentan las ecuaciones: [46]

$$S = S_b + S_{s,eq} = \frac{0.05 \propto q^5}{\sqrt{g} C^3 \Delta^2 D_{50}}$$

Ecuación 14

Fuente: [42]

Donde q es la magnitud de velocidad de flujo, Δ representa la densidad relativa ($\rho_s - \rho_w / \rho_w$), C es el coeficiente de fricción de Chézy, y $\propto$ es el coeficiente de calibración. [46]

❖ Ecuaciones de Meyer - Peter - Muller, 1948

Este método puede calcular el transporte de la carga de fondo a partir del coeficiente de rugosidad total de Chézy (C) y el coeficiente de rugosidad debido a la partícula. A continuación, se presentan las ecuaciones: [46]

$$S = 8 \propto D_{50} \sqrt{\Delta g D_{50}} (\mu \theta - \xi \theta_{cr})^{3/2}$$

Ecuación 15

Fuente: [42]

Donde $\propto$ es el coeficiente de calibración, representa la densidad relativa ($\rho_s - \rho_w / \rho_w$), μ_c es el factor de eficiencia del flujo, θ_{cr} representa el parámetro crítico de movilidad y ξ factor de exposición para la fracción de sedimento considerado. [46]

- **Criterios de estabilidad**

El número de Courant (CFL) está definido por la siguiente ecuación:

$$CFL = \frac{\Delta t(U + \sqrt{gH})}{\{\Delta x, \Delta y\}}$$

Ecuación 16

Fuente: [42]

Donde Δt es el paso de tiempo en segundo (s), g es la aceleración de la gravedad, H es la profundidad total del agua, U es la velocidad en cada celda y Δx , Δy son las escalas características del tamaño de la malla. Debido a que se usa un esquema implícito para discretizar la variable temporal la estabilidad del modelo no es un problema, lo que significa que no hay restricciones en el CFL, sin embargo, no se recomienda exceder el CFL de diez (Hydraulics, 2014) [42].

3.3.3 Instrumentos de Campo

Los instrumentos de campo fueron claves para la realización de esta investigación en cuanto a la calibración del modelo, los instrumentos utilizados en la salida de campo serán descritos a continuación:

- **ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler):** este es un instrumento hidroacústico que mide velocidad y corriente de agua en un rango determinado de profundidad (Figura 8).
- **Mira Topográfica:** Regla adecuada para medir diferencias en altura (Figura 9).
- **Nivel:** Mide desniveles entre puntos que se hayan a diferentes alturas (Figura 10).
- **Cuchara de Sedimento:** es un muestreador de sedimentos de fondo (Figura 11).
- **GPS:** Sistema de posicionamiento global (Figura 12).



Figura 8 ADCP

Fuente: [47]



Figura 9 Mira

Fuente: [47]



Figura 10 Nivel
Fuente: [47]



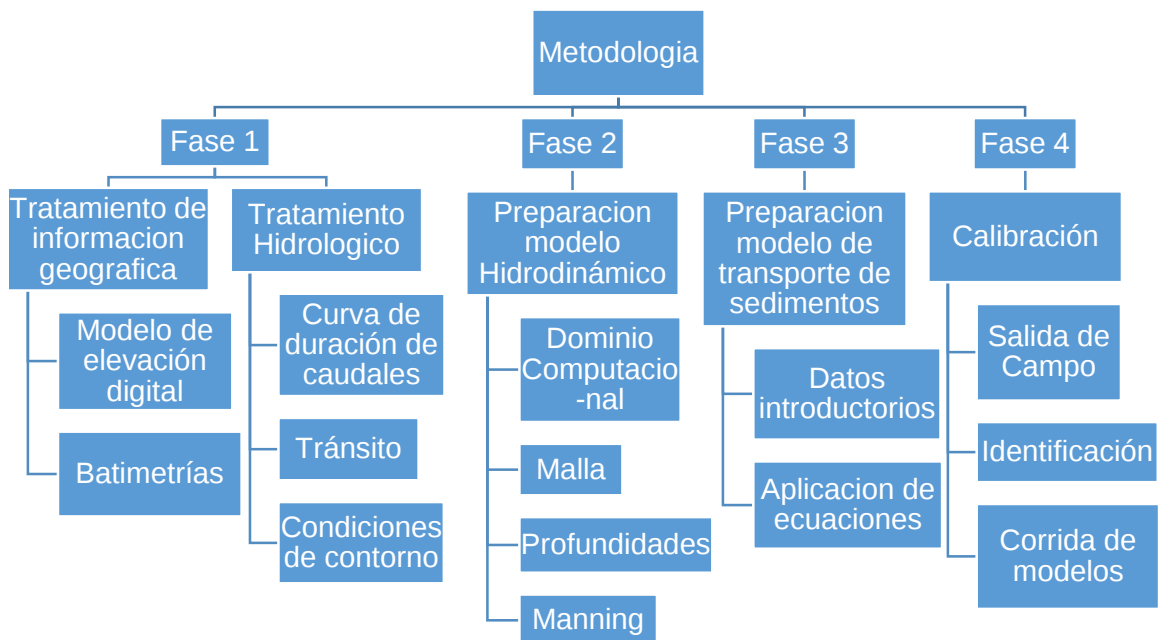
Figura 11 Cuchara de sedimentos
Fuente: [47]



Figura 12 GPS
Fuente: [47]

4 METODOLOGÍA

Para llevar a cabo esta investigación el proyecto se dividirá en cuatro fases, las cuales contienen las diferentes actividades que llevan al cumplimiento de los objetivos que se plantearon anteriormente, en la primera fase se presentan las actividades preliminares de recolección de información y se establecen las condiciones de frontera para los modelos, la segunda fase comprende las actividades necesarias para resolver el segundo objetivo específico, lo cual abarca la generación de un dominio computacional, malla, batimetría entre otros para generar un modelo hidrodinámico, en la tercera fase será necesario el modelo hidrodinámico generado en la fase anterior y se agregaran algunas ecuaciones de transporte de sedimentos para generar el modelo de transporte de sedimentos y en la última fase se llevara a cabo la calibración de los modelos, con ayuda de una salida de campo en donde se tomaran datos para llevar a cabo la parametrización.

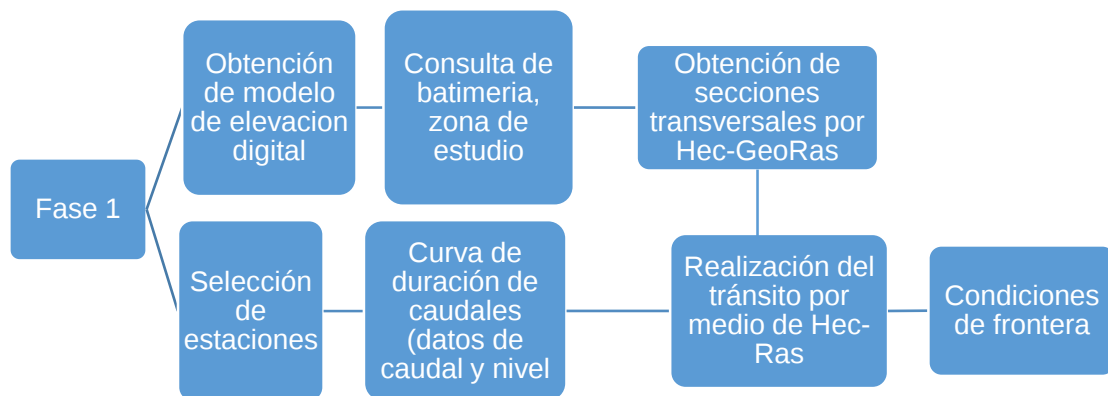


4.1 Fase 1

En esta fase se busca la obtención de la información principal que alimentará el modelo, es por esto que la búsqueda de datos en cuanto a terreno, comportamiento de caudales, niveles y morfología de la zona de estudio juegan un papel importante en esta fase que cuenta con los siguientes requerimientos y actividades:

- Modelo de elevación Digital con un tamaño de (12x12).
- Batimetrías con definición de (1x1).
- Recolección datos de estaciones hidrometeorológicas (caudal y nivel)
- Determinar condiciones máximas, medias y mínimas, por medio de la curva de duración de caudales
- Obtención de secciones transversales con ayuda de modelo de elevación digital.
- Tránsito con información de las secciones transversales obtenidas.

Para llegar a conseguir el objetivo de esta fase se plantearon diferentes actividades, dentro de las cuales esta:



4.1.1 Obtención de Modelo de Elevación Digital

Por la plataforma virtual Vertex, Nasa, es posible la extracción de diferentes modelos de elevación dependiendo la ubicación, es por esto que se vio la necesidad de especificar las coordenadas de El Banco, Magdalena, con esto surge el Raster para la realización de diferentes actividades dentro de la fase 1, como lo son determinar el dominio computacional para así especificar entradas y salidas, al igual que la realización de secciones transversales en Hec-GeoRas, debido a la necesidad de una superficie de red irregular triangular, para lo cual es base el modelo de elevación digital.

4.1.2 Consulta de Batimetría

Por medio del Cirmag (Centro de Investigación Científica del Río Magdalena) se brindó la información de batimetrías de la zona del brazo de Mompox y de El Banco, Magdalena, esto con el fin de la obtención de información del cuerpo hídrico en sus coordenadas (X, Y, Z), para así realizar el proceso de dominio computacional, generación de profundidades por medio de interpolación, dentro de la plataforma Delft 3D, que busca generar una de las condiciones iniciales necesarias para la corrida del modelo Hidrodinámico y de transporte de sedimentos.

4.1.3 Selección de Estaciones

Teniendo el área de estudio definida se ubicarán los puntos claves para la modelación, en los cuales es necesario tener datos diarios en un rango de 10 años mínimo de caudal y de nivel, es por esto por lo que se recopilarán las estaciones hidrometeorológicas, limnimétricas y limnigráficas, que limitan el área de estudio, ubicadas actualmente y teniendo en cuenta que se encuentren activas.

Estas estaciones corresponden aguas arriba estación Peñoncito (25027330), brazo de Mompox, estación San Roque (25027320) y aguas abajo estación Las Aguadas (25027490).

Sin embargo, la estación San Roque se encuentra alejada del dominio computacional determinado dentro del Brazo, por esto se utilizará igualmente la información de esta estación, pero es necesario realizar un tránsito con lo que se busca tener valores que están dentro del dominio.

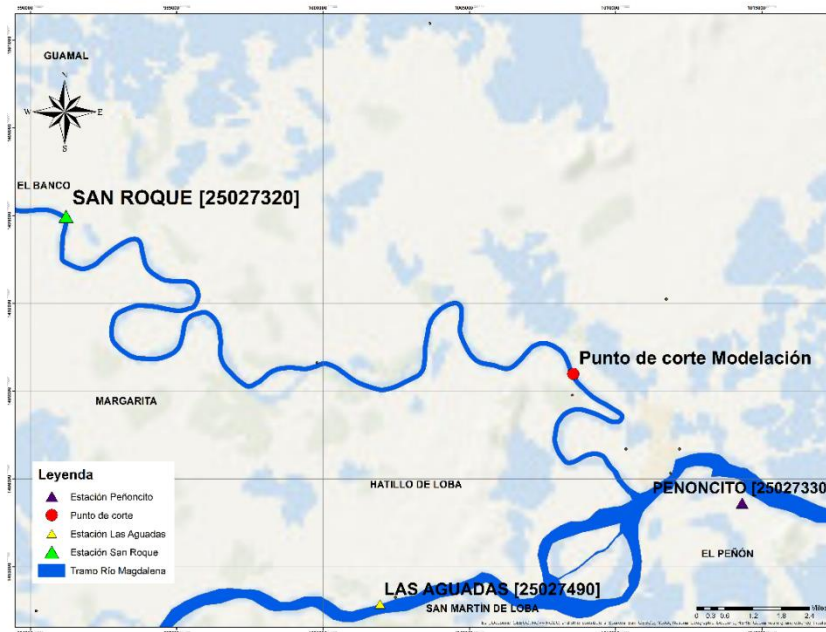


Figura 13 Estaciones escogidas y punto de corte modelación Brazo Mompox
Fuente: Autores

4.1.4 Curvas de duración de caudales y niveles

La curva de duración se representa gráficamente mostrando el análisis de frecuencia de datos de caudales, igual que la frecuencia acumulada de ocurrencia de un caudal determinado, se llevó a cabo este método debido la información histórica de caudales y niveles para la realización del análisis de frecuencia acumulada que se muestra en porcentaje de tiempo en el que un caudal determinado ocurre.

Dentro del análisis a realizar se clasificarán las estaciones más cercanas dentro del área de estudio que limitan a esta, las cuales se ubican aguas arriba del área de estudio que comprende la estación El Banco, aguas abajo la estación de Las Aguadas y como último límite de la zona de estudio se encuentra el brazo de Mompox, y se tiene como estación más cercana San Roque.

Por falta de información de niveles en la estación San Roque por su lejanía en el punto del Brazo de Mompox, se realiza un balance de masa, que permite saber el porcentaje de agua que se dirige hacia el brazo, sin embargo, es necesario llevar a cabo un tránsito por medio de Hec- Ras para poder conseguir los niveles en la zona de interés de las cuales no se pudieron adquirir, por medio de generación de secciones transversales y condiciones iniciales de caudales.

Con los datos de caudales y niveles diarios de cada estación con un rango mínimo de 10 años, se generará la curva de duración de caudales y niveles, utilizando el método de límites, y así generar las condiciones mínimas, medias y máximas en donde se tomarán los porcentajes del 90%, 50% y 10%, respectivamente, con los datos obtenidos se dará continuidad a las actividades de la metodología.

A continuación, se describe el proceso para generar una curva de duración de caudales paso a paso.

- Ordenar los datos de mayor a menor
- Calcular el rango $R = Q_{\text{mayor}} - Q_{\text{menor}}$
- Obtener el número de intervalos de clase $NC = 1,33 \ln(N) + 1$, donde N es el número de datos
- Calcular la amplitud $\Delta x = R / NC$
- Obtener los límites de intervalo de cada clase
 - $Ls1 = Q_{\text{max}}$
 - $LI1 = Ls1 - \Delta x$
 - $Ls2 = LI1$
 - $LI2 = Ls2 - \Delta x$
- Calcular la frecuencia absoluta (número de valores que se encuentra en cada intervalo de clase)
- Calcular el número de días en que un determinado caudal es igual o mayor al límite inferior de cada intervalo de clase (Acumulando los valores de la frecuencia absoluta)
- Expresar el paso anterior en porcentaje
- Graficar la curva eje y límite inferior de cada intervalo de clase y eje x porcentaje de días.

4.1.5 Obtención de secciones transversales por Hec-GeoRas

La información base para empezar con el proceso en Hec-GeoRas de creación de secciones transversales, consta del modelo de elevación digital en formato vectorial TIN (triangular irregular network), esta transformación de formato se puede obtener con la herramienta de ArcGis llamada Raster to TIN.

Seguida a la obtención del TIN se procede a la identificación y digitalización del flujo del cuerpo hídrico, se deben determinar las bancas de inundación en el tramo del río que hacen referencia a los límites de cada lado de este, es muy importante y se debe realizar la digitalización del sentido por el que va el flujo y la condición de Manning para cada banca que se haya ubicado, al tener listos estos pasos se pueden generar las secciones transversales automáticamente indicando distancia y ancho, seguido de esto se puede dar entrada a Hec-Ras para la obtención de niveles.

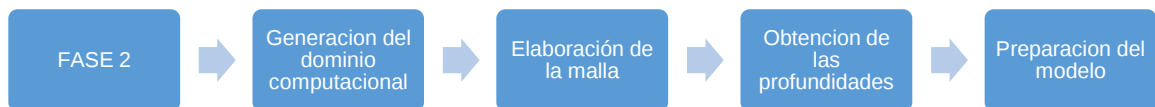
4.1.6 Realización del Tránsito por medio de Hec-Ras

El tránsito consiste en la utilización de caudales y niveles de las dos estaciones que se tienen como referencia (El Banco, Las Aguadas) para poder conseguir el nivel del brazo de Mompox que no cuenta con esta información, la realización de este se llevará por medio de Hec-Ras, se basa en la generación de niveles a partir de la información obtenida en Hec-GeoRas en cuanto a secciones transversales, como los caudales obtenidos por la curva de duración con sus respectivos porcentajes.

Los resultados obtenidos por la curva de duración de caudales, se utilizaron en la realización del tránsito, tomando los porcentajes conseguidos en cuanto a la ocurrencia de caudal y el resultado referente por cada uno de ellos, este procedimiento de ingreso de caudal, se realizó por cada sección transversal, para así generar el nivel en todo el tramo del Brazo de Mompox, que proporciona una de las condiciones iniciales necesarias para la corrida del modelo. es importante tener claro el coeficiente de rugosidad que se maneja en el río, en este caso se utilizó un coeficiente de rugosidad de (0,035) todo esto para poder concretar el nivel que se necesita como condición de contorno para el punto ubicado en el Brazo de Mompox.

4.2 Fase 2

En esta fase se generaron los insumos para llevar a cabo la corrida de los modelos hidrodinámicos para el banco Magdalena en condiciones mínimas, medias y máximas en la última fase.



4.2.1 Generación del dominio computacional

El dominio computacional se estableció según el área que abarca la modelación teniendo en cuenta imágenes satelitales, después digitalizar la zona de estudio en QGIS, para generarla en Delft3D.

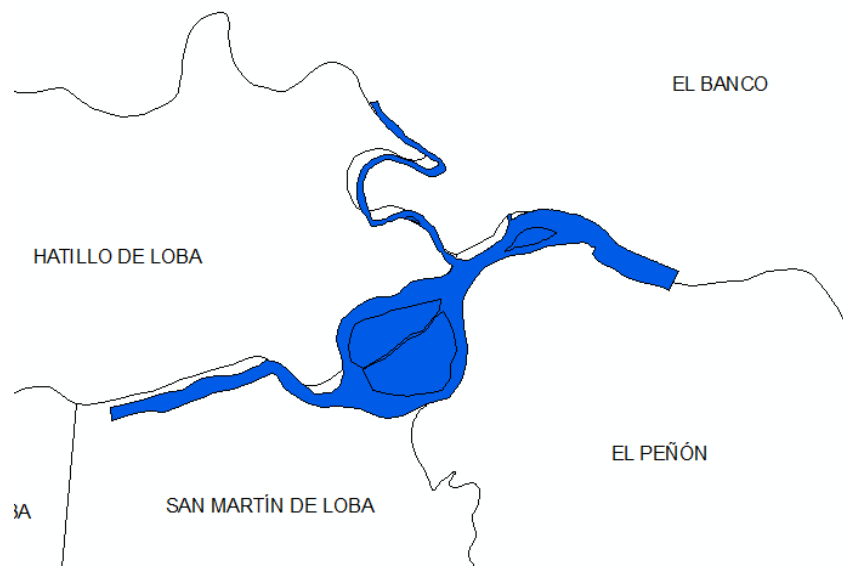


Figura 14 Digitalización de la zona de estudio en ArcGis.
Fuente: Autores

4.2.2 Elaboración de la malla

Para la realización de la malla fue necesario, primero crear líneas “splines” en el contorno del área de estudio, estas líneas deben ser generadas en el sentido del flujo; lo cual permite que, al generar la malla curvilínea, cumpla con ajustarse lo más posible a los límites del río y sus curvaturas.

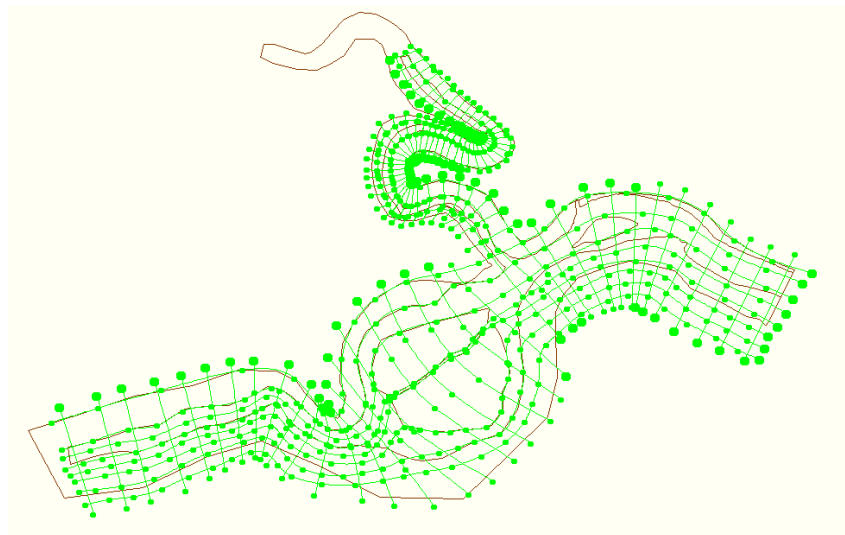


Figura 15 “Splines” en el área de estudio, Delft3D
Fuente: Autores

4.2.3 Obtención de las profundidades

Para la obtención de las profundidades, fue necesario contar con la información de la batimetría de la zona que se usó en la etapa uno, la cual fue entregada por el Cirmag (Centro de Investigación Científica del Río Magdalena), en formato shapefile (Figura 16), la cual debe ser convertida en xyz, un documento en blog de notas con tres columnas, distancia en “x”, “y” y la altura en z, para poder ser usada en el programa Delft 3D (Figura 17), en este caso se contó con datos de una definición de 1x1m para la zona, teniendo esta información en xyz, se interpola, para que cada una de las celdas de la malla generada en el paso anterior, se le asigne un valor de profundidad.

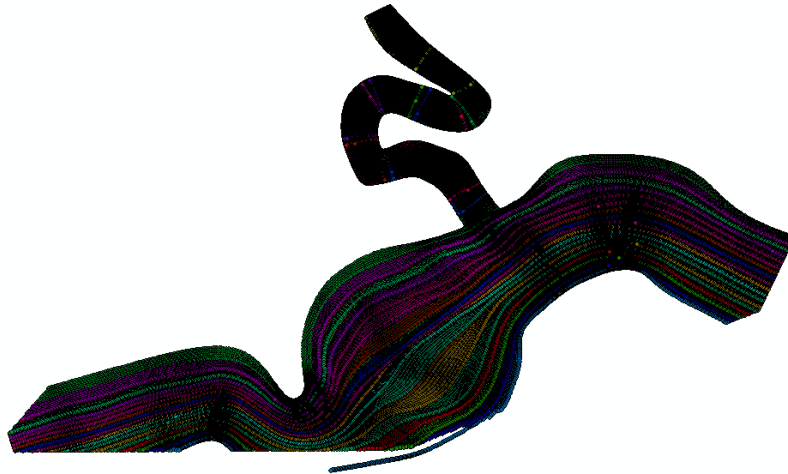


Figura 16 Batimetrías en formato shape, en ArcGis.
Fuente: Autores

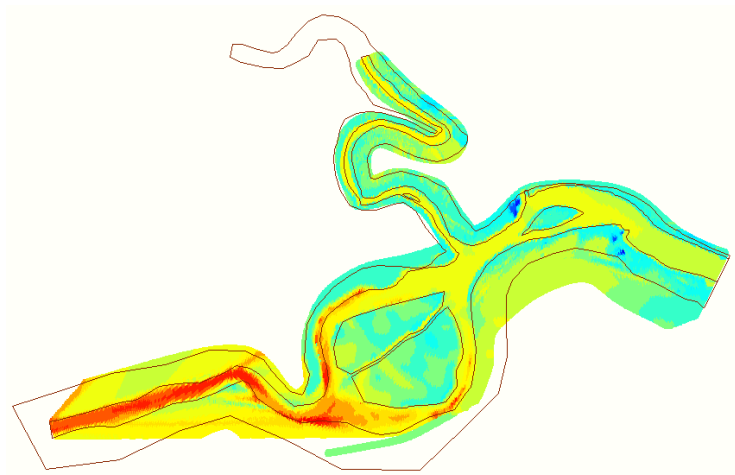


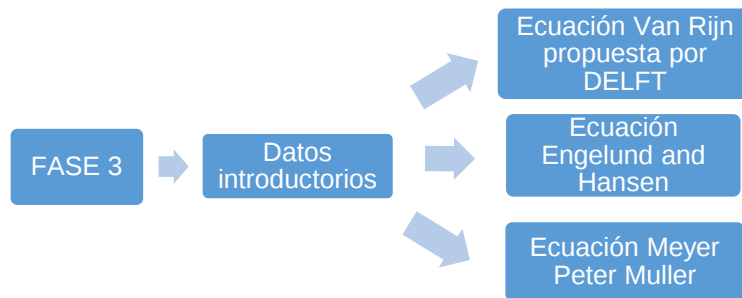
Figura 17 Batimetrías de la zona, en Delft 3D.
Fuente: Autores

4.2.4 Preparación del modelo

Después de haber generado los anteriores pasos, se ingresa la información para preparar la corrida de los tres escenarios, para esto se tuvo que ingresar las condiciones de contorno para cada uno de los escenarios (mínimo, medio y máximo), el número de Manning, el tiempo de modelación, condiciones iniciales, gravedad, densidad del agua, viscosidad.

4.3 Fase 3

Se generará la preparación para los modelos de transporte de sedimentos en el programa DEFLT 3D, donde se usaron tres ecuaciones las cuales son: Engelund and Hansen, Meyer Peter and Muller y Van Rijn (E&H, MPM y de Van Rijn).



4.3.1 Datos introductorios

En este paso se usó la información anteriormente generada como lo son las condiciones de contorno, malla y batimetrías; adicional a esto es necesario tener valores de tamaño de partícula como el D50 debido a que este valor define el tamaño representativo de los materiales y las condiciones iniciales (concentración por metro cúbico).

4.3.2 Aplicación de las ecuaciones

El programa Delft 3D, al usar el módulo de transporte de sedimentos, por defecto utiliza la ecuación de Van Rijn mencionada en el marco teórico, después se ingresan las ecuaciones de Engelund - Hansen y Meyer - Peter - Müller en un blog de notas que fue realizado según el manual del programa Delft3D, para preparar las modelaciones con las tres ecuaciones.

4.3.3 Preparación del modelo

Después de haber generado los anteriores pasos, se ingresa la información usada para preparar los modelos hidrodinámicos y además de estos otros parámetros como, condiciones iniciales para sedimentos, D50 y escala morfológica.

4.4 Fase 4

En esta fase se generó la calibración, y corrida de los modelos, para esto se realizó una salida de campo a El Banco Magdalena, donde se tomaron algunos datos para la identificación de los modelos y se usaron los insumos elaborados en las anteriores fases.



4.4.1 Toma de datos en campo

Se realizó una salida de campo en El Banco Magdalena, donde se tomaron datos de velocidad, batimetría y niveles en algunas secciones transversales de interés, como lo son, la entrada y las salidas del modelo, esto con ayuda de algunos equipos como lo son el ADCP (perfilador de corriente acústico Doppler), mira y nivel, las actividades se describen a continuación:

- Ubicar los puntos geodésicos cercanos a la zona de estudio, principalmente en la salida del brazo de Mompox que no cuenta con una estación (Figura 18).
- Trasladar el punto geodésico más cercano, hasta la salida del modelo en el brazo de Mompox, utilizando la mira y el nivel, para encontrar la altura en metros sobre el nivel del mar de este punto.
- Toma de niveles en los puntos de interés, entrada y salidas del modelo cada media hora.
- Toma de las secciones transversales en la entrada, salidas y un punto intermedio del modelo, con el adcp en donde se debe ir de banca a banca del río y repetir esto tres veces, por cada sección (Figura 18).

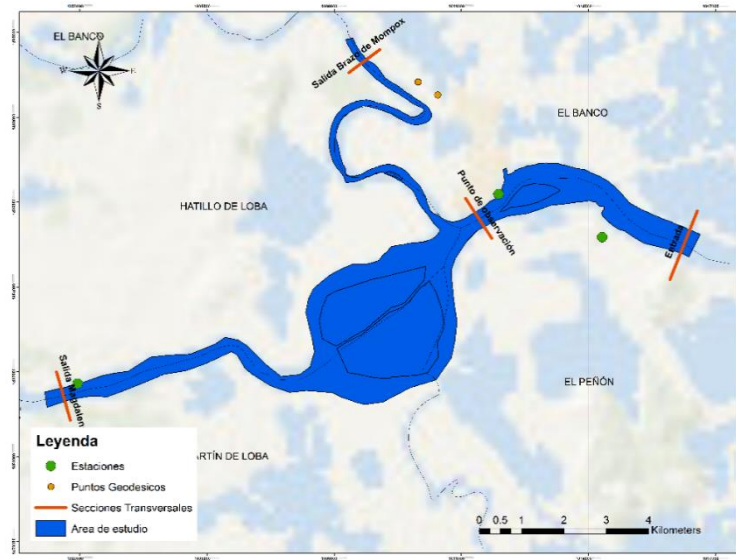


Figura 18 Secciones transversales y puntos geodésicos cercanos.
Fuente: Autores

4.4.2 Identificación de los modelos

Para realizar la identificación es necesario los datos tomados en campo y realizar los siguientes pasos [48]:

- Se realizará la corrida de varios modelos hidrodinámicos ingresando el caudal de entrada, y los niveles en las salidas a la misma hora tomados en campo, variando el número de Manning empezando con 0.035.
- Se analizarán los valores de nivel y velocidad en el punto de control en donde se tienen datos observados y simulados.
- Se realizaron tres métricas de desempeño para determinar el porcentaje de error entre los valores observados y simulados, las que se usaron fueron error medio absoluto (Ecuación 17), error medio relativo (Ecuación 18) y error medio relativo absoluto (Ecuación 19), donde n es el número total de datos, Q_i es el valor observado y $\hat{Q}_i$ el valor simulado, y así el error que se acerque más a cero, determinara el número de Manning más adecuado para el área de estudio [49].

Para esto se compararon los valores de error que presentaba cada uno de los métodos, seleccionando los valores más cercanos a cero con respecto a nivel y velocidad esto con la finalidad de escoger el número de Manning adecuado que muestre la mayor cantidad de métricas más cercanas a cero.

$$Error\ medio\ absoluto = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_i - \hat{Q}_i|$$

Ecuación 17

Fuente: [49].

$$Error\ medio\ relativo = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i - \hat{Q}_i}{Q_i} \right)^2$$

Ecuación 18

Fuente: [49].

$$Error\ medio\ relativo\ absoluto = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Q_i - \hat{Q}_i|}{Q_i}$$

Ecuación 19

Fuente: [49]

4.4.3 Corrida de los modelos

Se realizara la corrida de los modelos hidrodinámicos y de sedimentos en los tres escenarios (mínimo, medio y máximo) para lo que es necesario ingresar tanto las profundidades y la malla generada en la fase 2, las condiciones de frontera que se establecieron en la primera fase, el valor de Manning que se acercó más a cero según el error medio absoluto, tiempo de simulación y condiciones iniciales; esto para los modelos hidrodinámicos y para los de transporte de sedimentos aparte de la información anterior se debe ingresar el D50, el factor morfológico y el blog de notas según la ecuación de sedimentos que se vaya a usar.

4.4.4 Generación de los resultados

Después de realizar la corrida de los modelos en condiciones óptimas tanto para hidrodinámica como para transporte de sedimentos en sus tres escenarios (mínimo, medio y máximo), se mostraran los resultados analizando inicialmente los modelos hidrodinámicos, después los de transporte de sedimentos para todas las ecuaciones de transporte, realizar una comparación para escoger la ecuación más adecuada para la el área de estudio y por ultimo comparar los diferentes escenarios (mínimo, medio y máximo) de la ecuación de transporte de sedimentos escogida.

5 RESULTADOS

5.1 Fase 1

5.1.1 Obtención de Modelo de Elevación Digital

Por medio de la plataforma Vertex-Nasa, se consiguió la extracción del modelo de elevación digital de la zona de estudio con un tamaño de (12x12), para esto fue necesario el uso de las coordenadas obtenidas por la herramienta google earth, estas fueron respectivamente: $8^{\circ}59'33.75''$ N; $73^{\circ}58'02.05''$ O.

A continuación, se muestra el modelo de elevación digital de la zona (Figura 19).

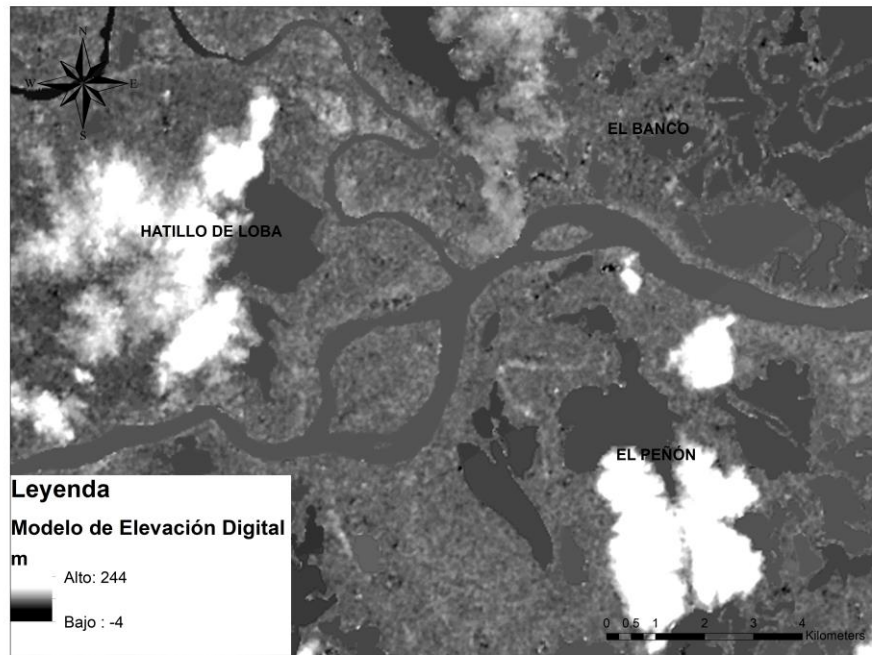


Figura 19 Modelo de elevación Digital área de estudio
Fuente: Autores

5.1.2 Consulta de Batimetría

Las batimetrías entregadas por el Cirmag (Centro de Investigación Científica del Río Magdalena), abarcan toda el área de estudio con una definición de 1x1m, algunas de las batimetrías se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Batimetrías Cirmag.

Objectid	X	Y	Z
1	1011484.97	1485826.73	23.50
2	1011485.21	1485826.93	23.50
3	1011485.50	1485827.18	23.51
4	1011486.32	1485827.91	23.53
5	1011486.70	1485828.25	23.54
6	1011487.33	1485828.80	23.55
7	1011487.85	1485829.26	23.56
8	1011488.19	1485829.56	23.57
9	1011488.67	1485829.93	23.59
10	1011489.22	1485830.36	23.61
11	1011489.62	1485830.67	23.62
12	1011490.09	1485831.03	23.62
13	1011490.58	1485831.30	23.63
14	1011491.10	1485831.59	23.63
15	1011491.42	1485831.76	23.63
16	1011491.76	1485831.95	23.63
17	1011492.17	1485832.17	23.64
18	1011492.46	1485832.28	23.64
19	1011492.74	1485832.39	23.64
20	1011493.38	1485832.64	23.64
21	1011493.68	1485832.75	23.65
22	1011493.95	1485832.85	23.65
23	1011494.54	1485833.06	23.65
24	1011495.00	1485833.16	23.66
25	1011495.66	1485833.31	23.66
26	1011497.76	1485833.62	23.65
27	1011498.63	1485833.68	23.59
28	1011498.93	1485833.69	23.58
29	1011499.56	1485833.64	23.54
30	1011499.91	1485833.61	23.53

Fuente: Autores.

5.1.3 Selección de estaciones

Se tuvieron en cuenta todas las estaciones cercanas al área de estudio para poder establecer las entradas y salidas de los modelos, cerca de la zona se encontraban 9 estaciones, descartando según el tipo de estación y su fecha de suspensión, ya que las estaciones necesarias para la investigación deben ser limnimétricas o limnigráficas activas que dieran valores de caudales y niveles diarios en una serie mínima de 10 años; quedaron seleccionadas dos estaciones que cumplieron con estas características, en la entrada esta la estación Peñoncito (25027330), a la salida del Magdalena Las Aguadas (25027490) (Ver Figura 20) y a la salida del brazo de Mompox, la estación más cercana con estas condiciones, se encontraba aproximadamente a 19 kilómetros del área de interés y por eso fue necesario realizar un tránsito.

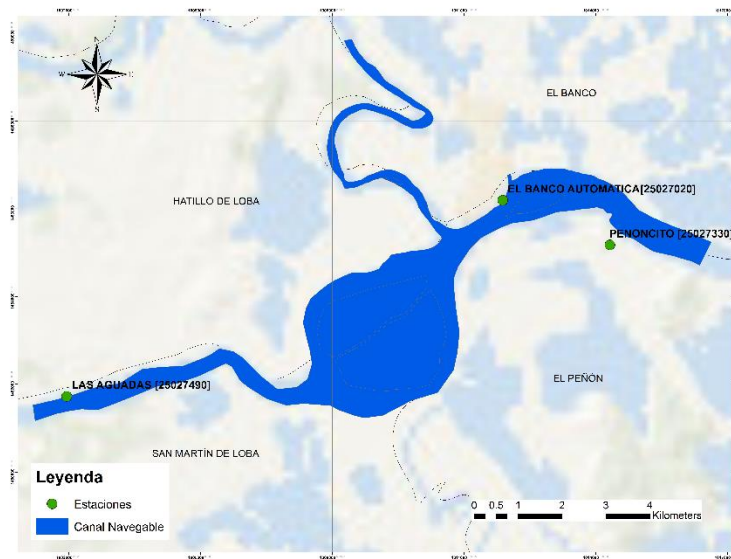


Figura 20 Estaciones Seleccionadas.
Fuente: Autores

5.1.4 Curva de duración de caudales y niveles

Las curvas de duración de caudales representan el porcentaje de tiempo en que un caudal es igualado o excedido, los caudales más grandes permanecen menos en el tiempo a comparación de los caudales bajos que permanecen más, en la zona de estudio el caudal que permanece el 10% de tiempo es de 5868.58 m³/s, el caudal que permanece el 50% del tiempo es de 3973,07 m³/s y el caudal que permanece el 90% del tiempo es de 1545.85 m³/s.

5.1.4.1 Entrada Estación El Banco

➤ Caudales

Para la estación de Peñoncito que se encuentra a la entrada del modelo, la curva de duración de caudales muestra la variación desde los 1000 m³/s, hasta los 7500 m³/s, siendo la condición máxima (10%) de 5868.58 m³/s, media (50%) de 3973,07 m³/s y mínima (90%) de 1545.85 m³/s (Figura 21).

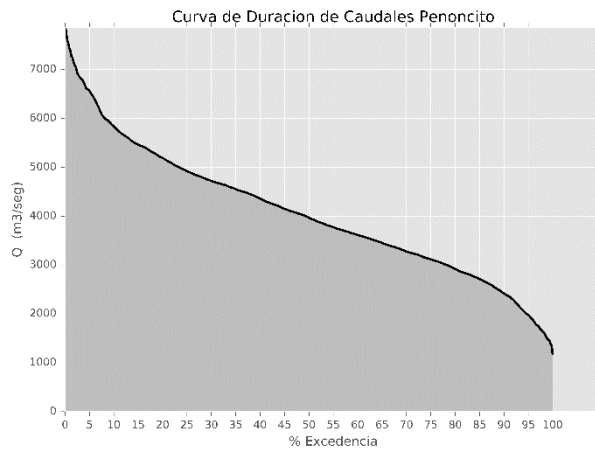


Figura 21 Curva de duración de caudales Peñoncito.
Fuente: Autores

➤ Niveles

Para la estación Peñoncito, la curva de duración de niveles muestra la variación desde los 23.31msnm hasta 28.69msnm, teniendo en cuenta que la cota a la que se encuentra la estación es de 19,61msnm, el nivel en condiciones mínimas (90%) es de 24,29msnm, medias (50%) de 26,24msnm y máximas (10%) de 28,2msnm (Figura 22).

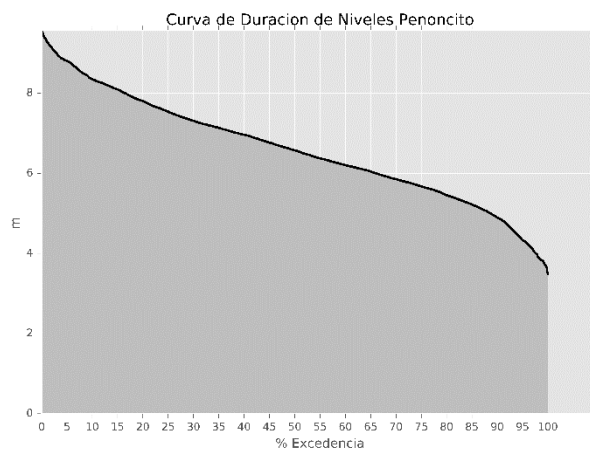


Figura 22 Curva de duración de niveles, Peñoncito.
Fuente: Autores

5.1.4.2 Salida Magdalena estación las aguadas

➤ Caudal

Para la estación de Las Aguadas que es una de las salidas del modelo que se encuentra sobre el río Magdalena, la curva de duración de caudales muestra la variación desde los 1000 m³/s, hasta los 7500 m³/s, siendo la condición máxima (10%) de 5534.69m³/s, media (50%) de 3460.38m³/s y mínima (90%) de 1904.65m³/s (Figura 23).

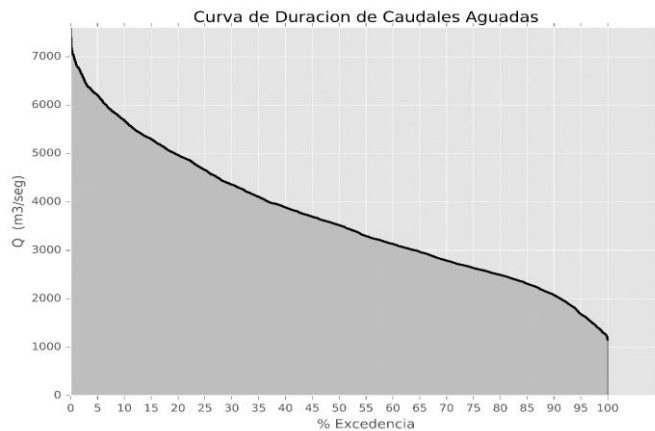


Figura 23 Curva de duración de caudales Las Aguadas.
Fuente: Autores

➤ Niveles

Para la estación de Las Aguadas, la curva de duración de caudales muestra la variación desde los 21,16msnm hasta 27,12msnm, teniendo en cuenta que la cota a la que se encuentra la estación es de 17,39msnm, el nivel en condiciones mínimas (90%) es de 26,58msnm, medias (50%) de 24,96msnm y máximas (10%) de 22,79msnm (Figura 24).

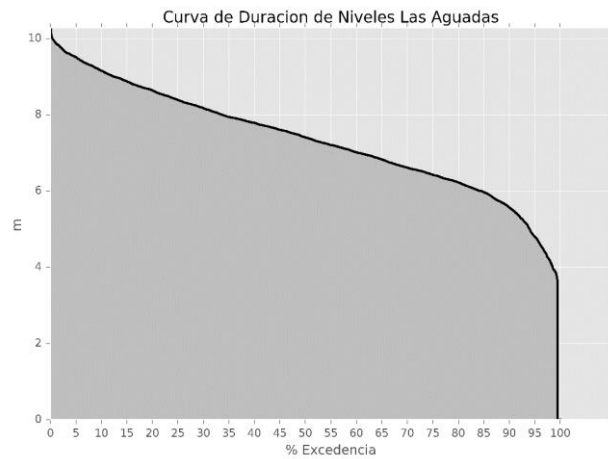


Figura 24 Curva de duración de niveles, Las Aguadas.
Fuente: Autores

5.1.4.3 Salida brazo de Mompox

➤ Caudal

Para la entrada del brazo de Mompox que servirá para realizar el tránsito, la curva de duración de caudales muestra la variación desde los 50m³/s, hasta los 1300m³/s, siendo la condición máxima (10%) de 729.51m³/s, media (50%) de 389.77m³/s y mínima (90%) de 70.02m³/s (Figura 25).

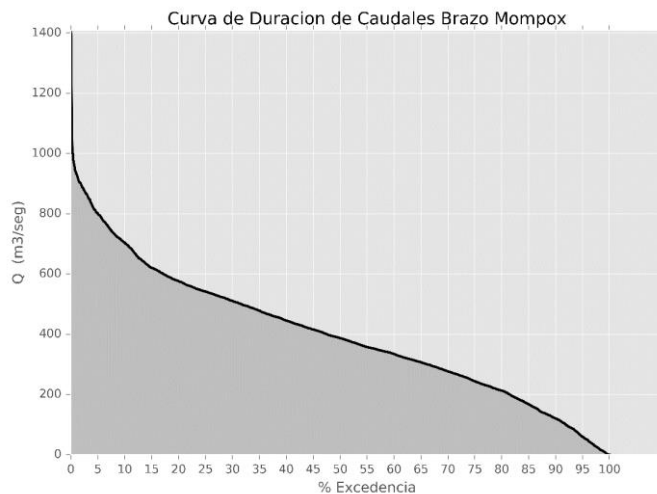


Figura 25 Curva de duración de Caudales, Brazo de Mompox.
Fuente: Autores

5.1.5 Obtención de las secciones transversales con Hec-GeoRas

En la Figura 26 se evidencia el TIN que se obtuvo a partir del modelo de elevación digital de la zona que hace referencia al Brazo de Mompox, para la obtención de secciones transversales que después se utilizarán para la realización del tránsito de caudales en Hec-Ras.

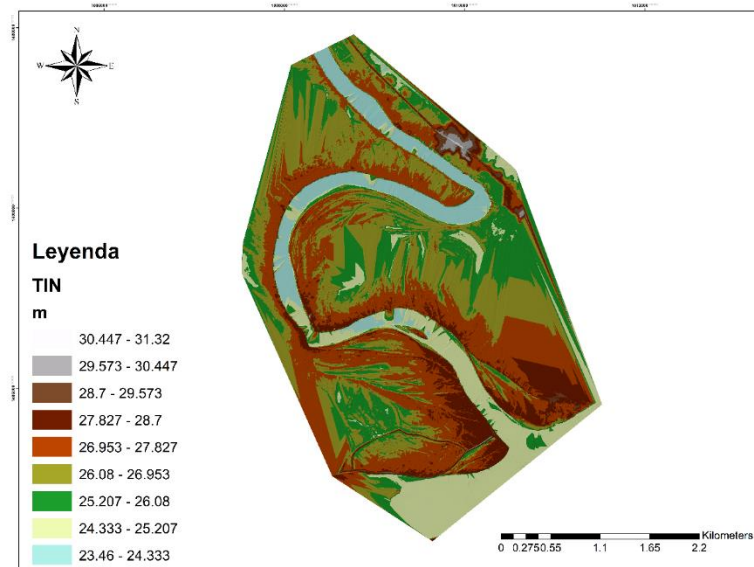


Figura 26 TIN del brazo de Mompox.
Fuente: Autores

Hec-GeoRas da la opción para la construcción de secciones transversales automáticamente, para esto se determina la distancia entre cada sección y la anchura en metros, para este caso cada sección cuenta con una distancia de 100 metros entre secciones, con un ancho promedio de 0,528 km de canal. Esto logró que el programa generará 93 secciones. El resultado se muestra a continuación (Figura 27).

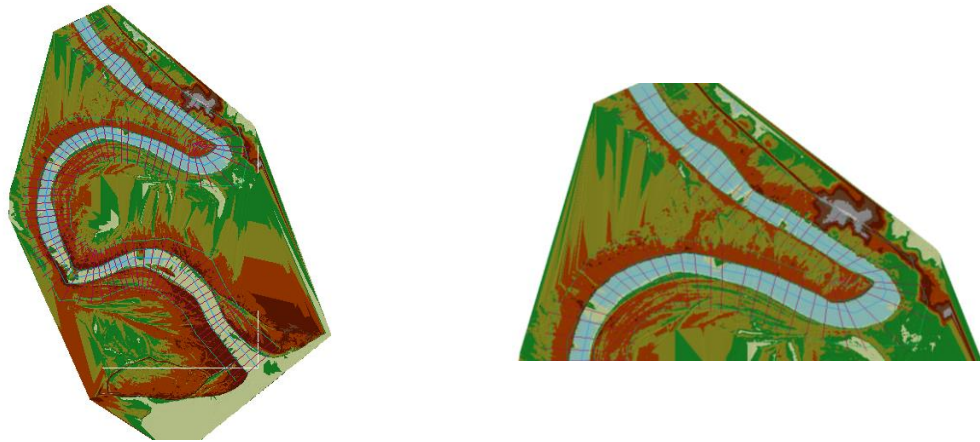


Figura 27 Secciones transversales en Hec-GeoRas.
Fuente: Autores

Las 93 secciones anteriormente conseguidas por medio de la extensión Hec-GeoRas, constan de un postproceso en Hec-Ras para la obtención de valores de profundidad, donde se llevó a cabo el tránsito, A continuación, se representan las secciones transversales que fueron exportadas a Hec-Ras (Figura 28)

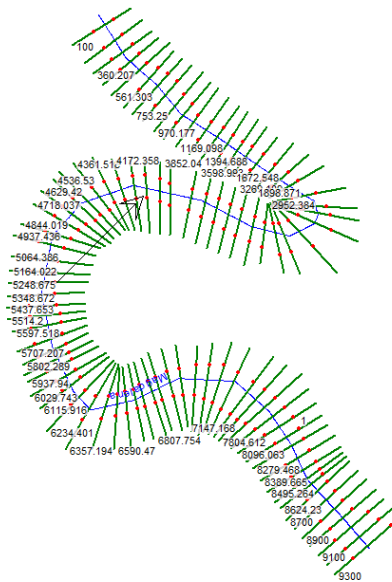


Figura 28: Secciones transversales en Hec-Ras.
Fuente: Autores

5.1.6 Realización del tránsito en Hec-Ras

La Tabla 2, muestra los caudales que se ingresaron por cada sección transversal, teniendo en cuenta los porcentajes de tiempo de excedencia obtenidos por la curva de duración.

Tabla 2 Caudales ingresados Hec-Ras por sección transversal

Porcentaje de tiempo permanencia (%)	Caudal (m ³ /s)
0.11	1295.82
0.13	1182.65
0.18	1069.57
0.68	956.29
3.56	843.12
8.23	729.94
15.45	616.76
30.87	503.59
48.99	390.41
69.48	277.23
84.73	164.05
95.24	50.88

Fuente: Autores

Se muestra el caudal 0.11% como el caudal que menos permanece en el tiempo, a diferencia del caudal del 95% que permanece la mayor parte del tiempo en el cuerpo hídrico, siendo un caudal bajo de 50.88 m³/s.

Los resultados generados por Hec-Ras generaron el nivel por cada sección transversal al realizar un tránsito de información existente, en la (Tabla 3) se muestra la información que generaron las secciones transversales, distancias de los márgenes del río, distancia entre bancas de inundación y el número de Manning adecuado según las condiciones morfológicas del río, este tomado como 0.035 según bibliografía [46] .

Tabla 3 Condiciones para obtención de Nivel aguas abajo

Distancias Aguas Abajo (m)		
Margen Izquierda	Canal	Margen Derecha
17.24	100	24.68
Numero de Manning		
Margen Izquierda	Canal	Margen Derecha
0.035	0.035	0.035
Bancas (m)		
Izquierda		Derecha
203.36		392.6

Fuente: Autores

Teniendo en cuenta las condiciones máximas, medias y mínimas que se determinaron para los escenarios de modelación, se muestra en la Tabla 4, los resultados obtenidos por el tránsito de nivel por cada condición.

En estos resultados se evidencia el aumento de nivel cuando se presenta un fenómeno extremo de caudal, alcanza un aumento de hasta 1 metro con respecto a su nivel permanente.

Tabla 4 Caudales y niveles condiciones Máximas, medias y mínimas aguas abajo.

Condición	Máximo 10%	Medio 50%	Mínimo 95%
Caudal (m3/s)	702.19	384.83	50.88
Nivel (m)	24.84	24.5	23.8

Fuente: Autores

En las siguientes figuras se identifican los niveles obtenidos por Hec-Ras por cada condición.

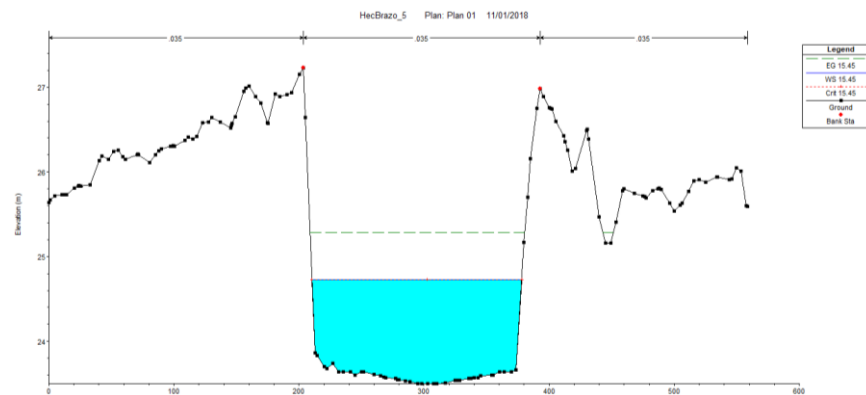


Figura 29 Nivel condición Máxima (10%)

Fuente: Autores

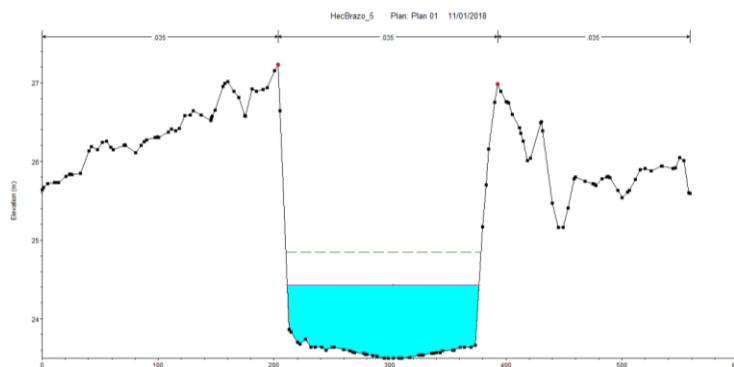


Figura 30 Nivel condición Media (50%)

Fuente: Autores

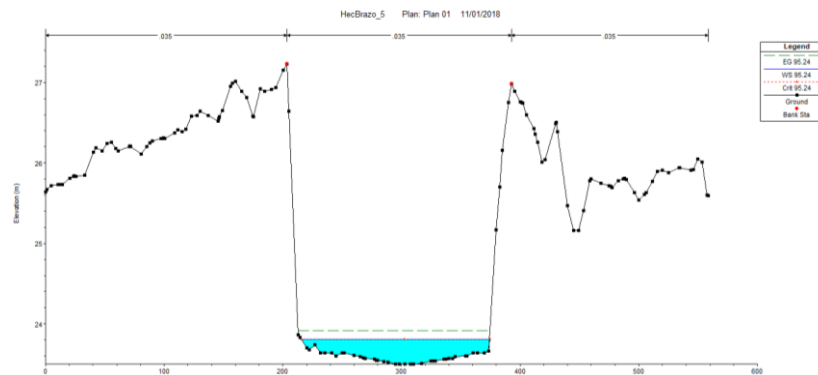


Figura 31 Nivel condición Mínima (95%)
Fuente: Autores

5.1.7 Obtención de las condiciones de contorno

Después de realizar los pasos anteriores, se generaron cada una de las condiciones de contorno para los tres escenarios de los modelos, lo cual es un insumo para estos, en donde las curvas de duración de caudal y nivel, nos sirvieron para la entrada y la salida del río Magdalena, y el tránsito para la salida del brazo de Mompox (Tabla 5).

Tabla 5 Condiciones de contorno.

Escenario	Entrada (m ³ /s)	Salida Río Magdalena (msnm)	Salida Brazo de Mompox (msnm)
Mínimo (90%)	1545.85	22.25	23.8
Medio (50%)	3973.07	24.96	24.5
Máximo (10%)	5868.58	26.55	25.87

Fuente: Autores

5.2 Fase 2

5.2.1 Generación del dominio computacional

Después de pasar la digitalización a Delft3D, el área de estudio se muestra en la (Figura 32).

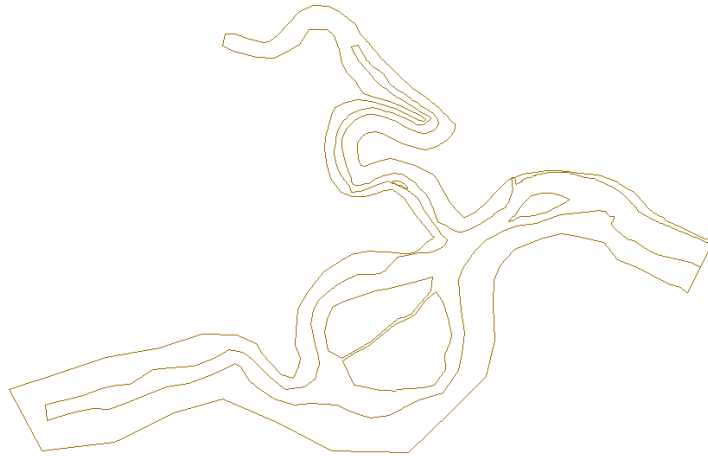


Figura 32 : Dominio Computacional.
Fuente: Autores

5.2.2 Generación de malla

Después de realizar los “splines” (Figura 15), se generó la malla que al suavizarla se ajustó a la forma del río (Figura 33) y cuenta con unos parámetros numéricos (Ver Tabla 6), en donde Δx y Δy es tamaño horizontal y vertical respectivamente del promedio de las celdas del dominio computacional, N y M el número de celdas en dirección “x” y “y” respectivamente y K el número total de celdas.

Tabla 6 Parámetros numéricos de la Malla en Delft 3D.

Parámetros	Valor
Δx	34.8 m aprox.
Δy	23.7 m aprox.
M	674
N	626
K	421924

Fuente: Autores

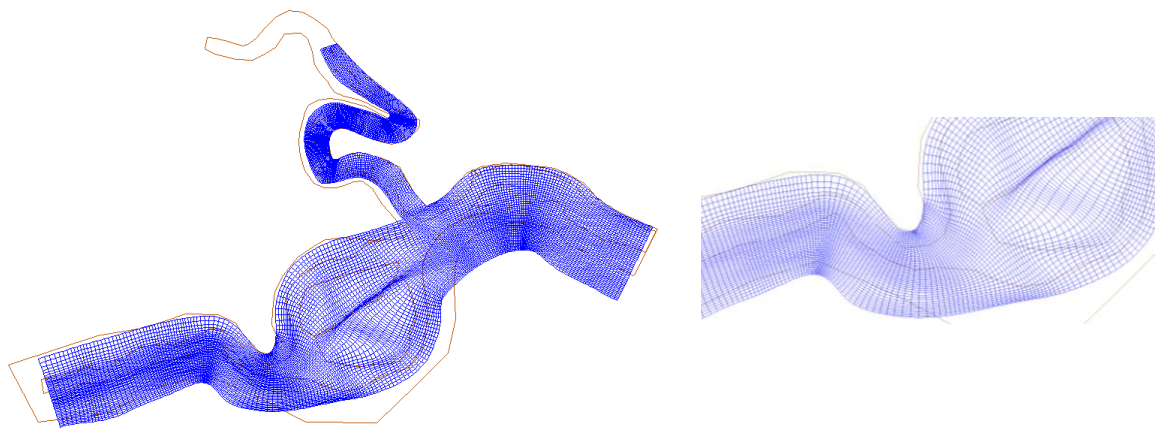


Figura 33: Malla Curvilínea
Fuente: Autores

Obtención de las profundidades

Después de interpolar las batimetrías a la malla, se generan las profundidades, donde a cada celda de la malla le corresponde un valor, estos van desde 22msnm hasta 34 msnm, siendo rojo los lugares más bajos y azul los más altos (Figura 34).

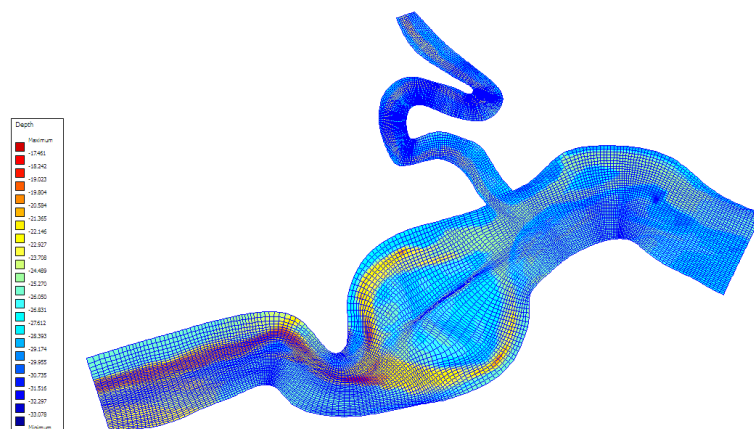


Figura 34: Profundidades
Fuente: Autores

5.2.3 Preparación del modelo

En esta parte se ingresan los insumos anteriormente mostrados (condiciones de contorno, dominio computacional, malla y profundidades) y además de eso el tiempo

de modelación, condición inicial, gravedad, Densidad del agua, viscosidad y el número de Manning inicial (Tabla 7) escogido según bibliografía [46], para preparar el modelo antes de generar la corrida de este.

Tabla 7 Parámetros para los modelos.

Parámetro	Valor
Tiempo de modelación (Días)	
Condición Inicial (m)	26
Gravedad (m/s^2)	9.81
Densidad del agua (kg/m^3)	1000
Viscosidad (m^2/s)	1
Manning	0.035

Fuente: Autores

5.3 Fase 3

5.3.1 Datos Introductorios

En la Tabla 8, se nombran las condiciones iniciales con sus respectivos valores, vemos que condición inicial de sedimento por metro cubico se introduce como cero para cuando se obtengan resultados del modelo este indique la cantidad de sedimento que transporta un determinado caudal, otro parámetro fue el D50 que significa el diámetro de apertura del tamiz por el que pasa el 50% del material fue de 250 μm que representa el material del lecho [50], el factor morfológico depende del modelo hidrodinámico debido a que se necesita un mayor porcentaje de tiempo para apreciar el cambio del movimiento de sedimentos que el movimiento normal del curso del agua, es decir por una hora de corrida del modelo hidrodinámico se necesitan 80 del modelo de transporte de sedimentos.

Tabla 8 Parámetros para los modelos.

Parámetro	Valor
Condición Inicial (kg/m^3)	0
D50 (μm)	250
Factor morfológico	80

Fuente: Autores

5.3.2 Aplicación de las ecuaciones

En esta fase de resultados de sedimentos se muestran a continuación los parámetros que tienen en cuenta los dos métodos alternativos la ecuación de Engelund Hansen (Tabla 9) y la ecuación de Meyer-Peter-Müller (Tabla 10) que se llevaron a cabo para la modelación de sedimentos según el manual de DELFT 3D, de donde se sacaron los valores de los parámetros.

Tabla 9 Parámetros método Engelund Hansen

Engelund Hansen Parámetros	
ACAL	1
D90	999 m
RKSC (altura rugosidad de fondo)	0.3 m
WS velocidad de caída de sedimentos	-2 m/s

Fuente: Autores

Tabla 10 Parámetros método Meyer-Peter-Müller

Meyer Peter Müller Parámetros	
Coeficiente de calibración	8
Power b	0
Power c	1.5
Factor de eficiencia	0.7
movilidad crítica $\theta_{c\beta}$	0.047

Fuente: Autores

5.4 Fase 4

5.4.1 Toma de datos en campo

La Salida de campo para la toma de datos se realizó al municipio de El Banco, Magdalena, los días 2, 3, 4 y 5 de noviembre del 2017 por parte de la Universidad Santo Tomás organizada por el Docente Miguel Ángel Cañón con el grupo perteneciente a la materia Modelación Avanzada del Recurso Hídrico en conjunto con la Maestría en Hidrosistemas de la Universidad Javeriana que proporcionó los equipos pertinentes para hacer la medición.

A continuación, se describen las actividades realizadas en la salida de campo:

- Se ubicaron los puntos geodésicos cerca de la zona, según el IGAC, los cuales se intentaron buscar en la zona de estudio y no se encontraban por lo que para encontrar la cota de la salida del brazo de Mompox fue necesario hacerlo desde la estación de El Banco.
- Se realizó el traslado de la cota de la estación de El Banco, hasta la salida del modelo en el brazo de Mompox, utilizando la mira y el nivel, la cual fue de 22.52msnm (Tabla 11).

Tabla 11: Traslado de cota del brazo de Mompox.

Estación del Banco	
Cota	19.61
Brazo Mompox	
Altura del equipo	1.16 m
Cota conocida	10 m
Cota	22.52 msnm

Fuente: Autores

- Se realizó la toma de los niveles en la entrada y las salidas del modelo; en donde para la estación Peñoncito (Tabla 12) y Las Aguadas (Tabla 13) se tomaron con ayuda de la mira del IDEAM y en el Brazo de Mompox (Tabla 14) fue necesario la instalación de una mira con ayuda de un palo de madera y una cinta métrica (Figura 35); estos datos fueron tomados cada media hora.

Tabla 12: Niveles en la estación Peñoncito.

El Peñoncito	
Hora	Nivel (m)
8:30	7.12
9:00	7.12
9:30	7.12
10:00	7.12
10:30	7.10
11:00	7.10
11:30	7.13

Fuente: Autores

Tabla 13: Niveles en la estación Las Aguadas.

Las Aguadas	
Hora	Nivel (m)
8:30 AM	8.16
9:00 AM	8.168
9:30 AM	8.172
10:00 AM	8.175
10:30 AM	8.16
11:00 AM	8.16
11:30 AM	8.16

Fuente: Autores

Tabla 14: Niveles en El Brazo de Mompox.

Brazo de Mompox	
Hora	Nivel(m)
9:10 AM	78.0
9:30 AM	78.0
10:00 AM	77.5
10:30 AM	77.8
11:00 AM	77.1
11:30 AM	77.3
12:00 PM	77.3

Fuente: Autores





Figura 35: Fotos de la instalación de la mira en el brazo de Mompox.
Fuente: Autores

- La toma de las secciones transversales de interés, se tomaron con ayuda del adcp, este equipo va puesto en un lado de la lancha totalmente asegurado, la lancha debe ir de banca a banca del río, asegurándose que el agua pase por el equipo en el sentido de la corriente (Figura 36 y Figura 37), los datos tomados por el adcp son mostrados en el programa WinRiver.

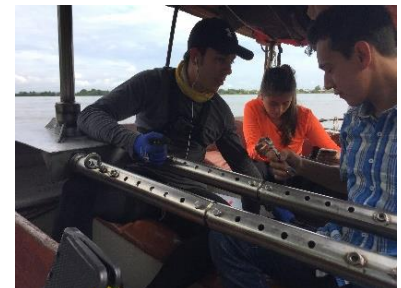
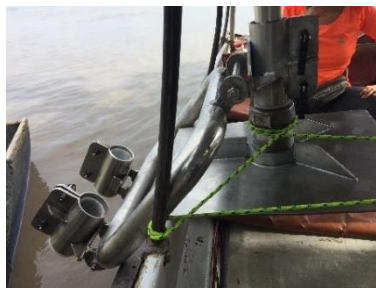
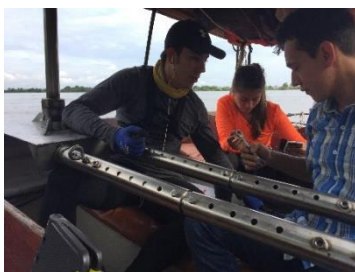


Figura 36: Fotos de la instalación del adcp en la lancha, en la salida de campo.
Fuente: Autores

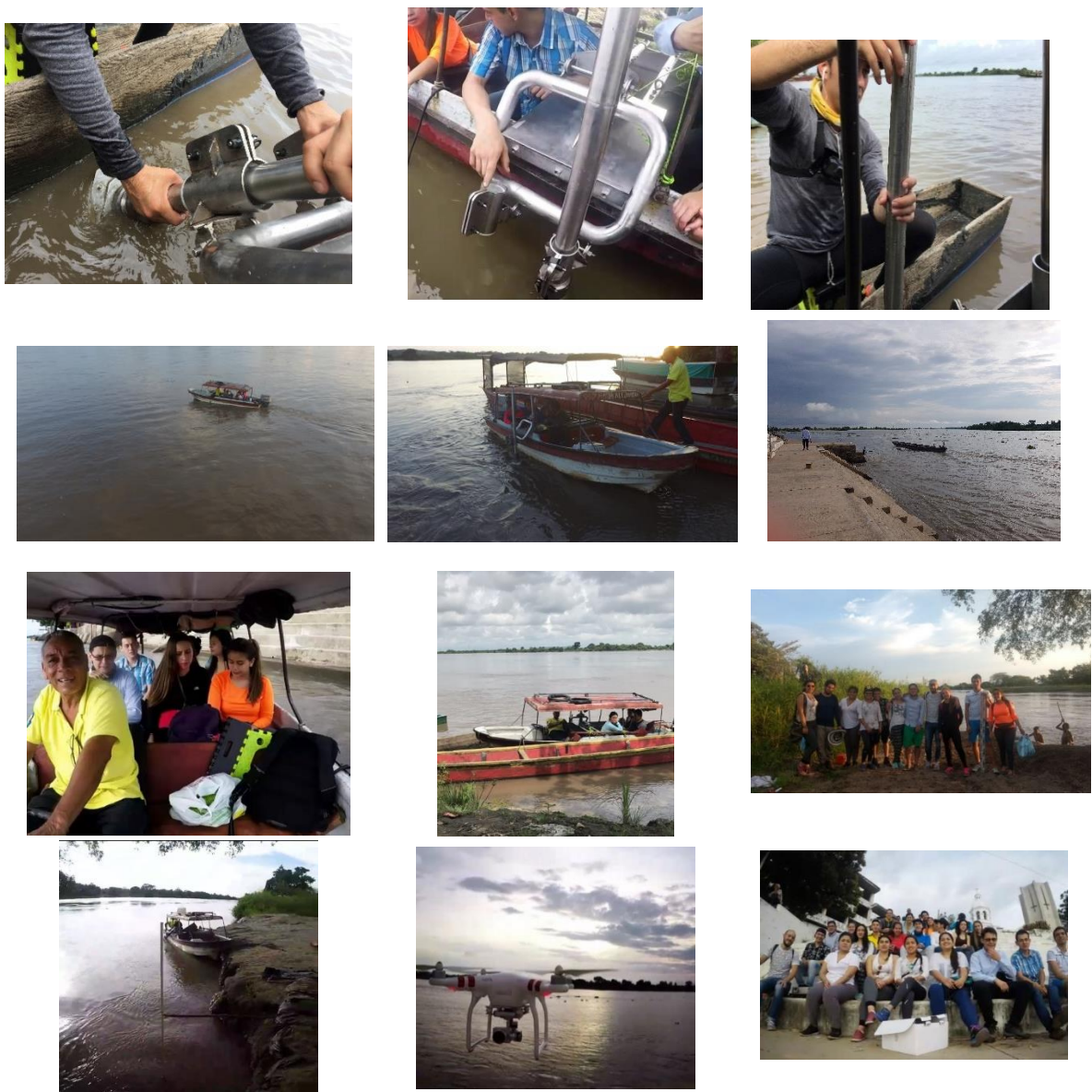


Figura 37: Fotos de la salida de campo
Fuente: Autores

El programa WinRiver muestra la información tomada por el adcp, de velocidad, caudal y nivel. A continuación, se mostrarán las secciones transversales tomadas por el adcp en campo, en los puntos de interés la sección se repitió entre 3 o 4 veces, en la Tabla 15 se muestran los intervalos de valores de velocidad que presenta cada color.

Tabla 15 intervalo de valores de velocidad mostrados por las secciones transversales

Color	Intervalo (m/s)
Morado – Azul	0.005-0.504
Azul – Verde	0.504-1.002
Verde- Amarillo	1.002-1.501
Amarillo- Rojo	1.501-1.999

Fuente: Autores

- Entrada estación El Peñoncito: En donde las velocidades van desde 0.005m/s a 2.01m/s y las profundidades están entre 3.1m a 12.8m (Figura 38).

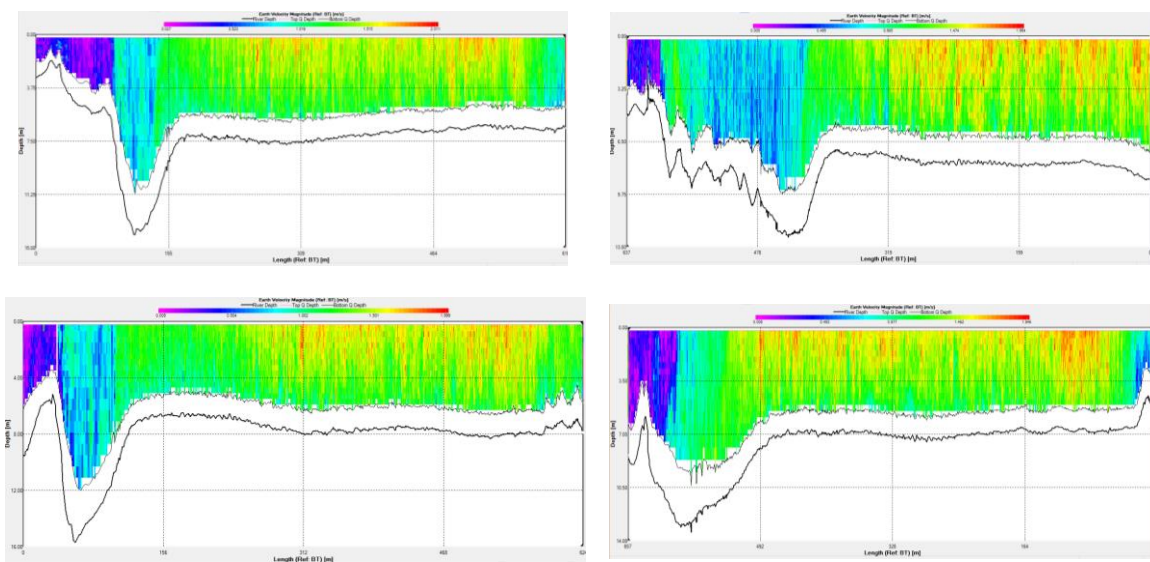
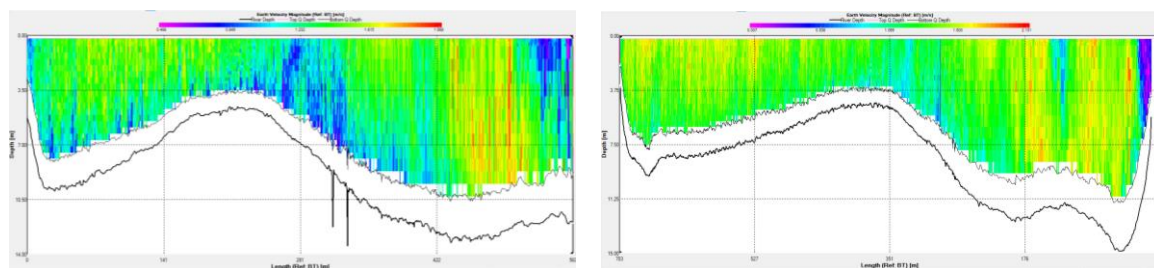


Figura 38: Secciones transversales en El Peñoncito.

Fuente: Autores

- Punto de control: En donde las velocidades van desde 0.007m/s a 2.36m/s y las profundidades están entre 3.5m a 9.75m (Figura 39).



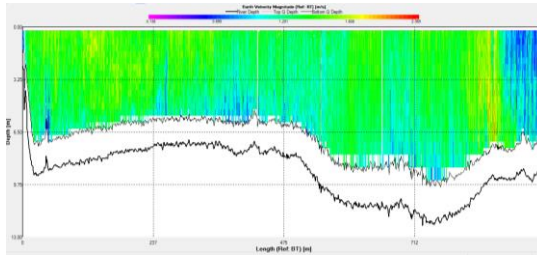


Figura 39: Secciones transversales en el punto de control.
Fuente: Autores

- Salida brazo de Mompox: En donde las velocidades van desde 0.03m/s a 1.67m/s y las profundidades están entre 2.0m a 7m (Figura 40).

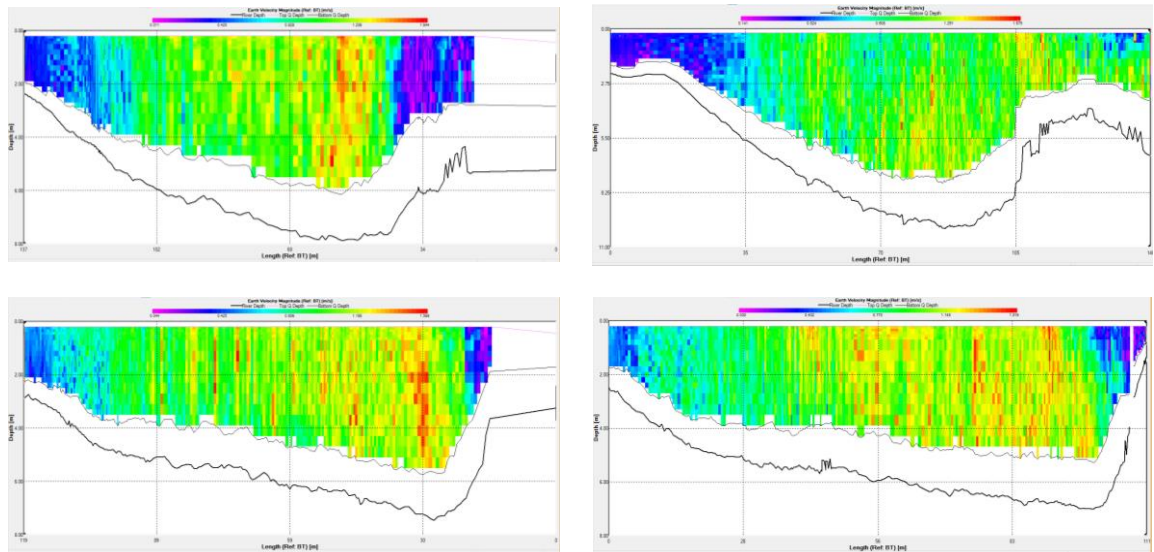


Figura 40: Secciones transversales en el brazo de Mompox.
Fuente: Autores

- Salida estación las aguadas: En donde las velocidades van desde 0.11m/s a 2.2m/s y las profundidades están entre 2.75m a 7m (Figura 41).

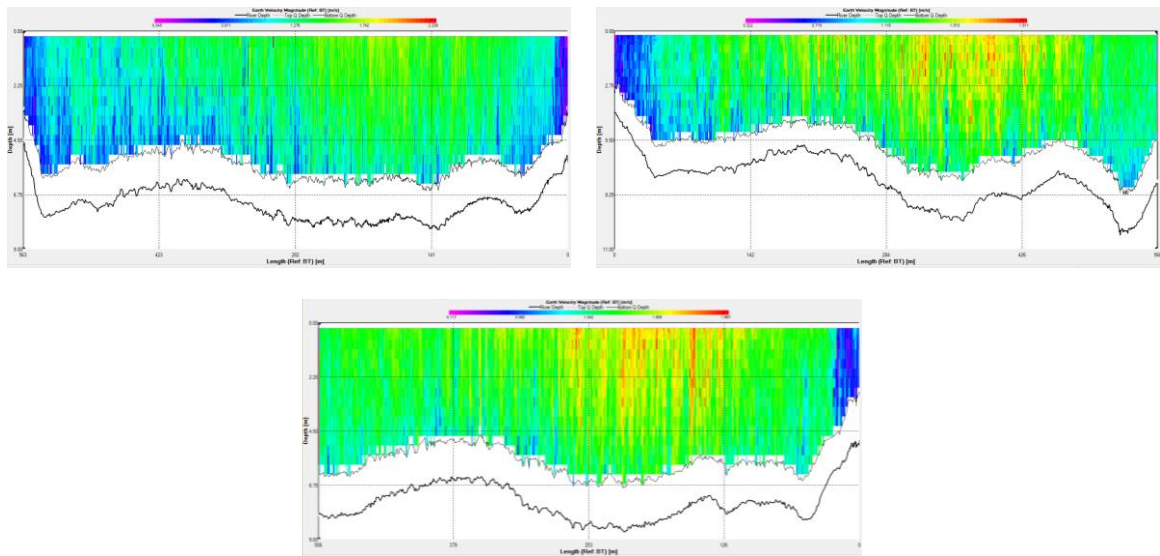


Figura 41: Secciones transversales en Las Aguadas.
Fuente: Autores

5.4.2 Identificación de los modelos

Para realizar la identificación de los modelos, se tuvo en cuenta el valor de caudal tomado por el adcp en la estación de El Peñón, y los niveles registrados en Las Aguadas y El brazo de Mompo, estos datos fueron tomados en la salida de campo realizada el día 02 de noviembre y la hora para los datos que se estableció fue a las 10:00 AM (Ver Tabla 16).

Tabla 16: Datos tomados en campo para calibrar.

Escenario	Entrada (m ³ /s)	Salida Río Magdalena (msnm)	Salida Brazo de Mompo (msnm)
Datos Calibración	4061.41	25.56	25.42

Fuente: Autores

Se realizó la corrida de diferentes modelos variando el número de Manning, comparando los resultados de nivel y velocidad con los datos observados del punto de control tomado por el adcp.

Se muestran a continuación las métricas escogidas para la obtención del Manning ideal para la realización de los modelos, las métricas muestran error relativo, error absoluto y por último la unión de estos; teniendo el absoluto como un promedio que

se realiza en cuanto a los datos simulados y observados y el relativo expresando la calidad de la medición realizada.

los errores se determinaron para nivel y velocidad teniendo en cuenta que los datos más pequeños de error se diferencian con un color amarillo, seguido de un color verde que muestra la segunda categoría de datos menores.

Para la determinación del Manning se identificaba el valor que tuviera errores cercanos a cero, diferenciados con color amarillo y verde, el valor que presentara una mayor cantidad de datos representados con estos colores mostrados en las diferentes métricas analizadas mostraba un error mínimo, por esto se tomó el Manning de 0.04 (Tabla 17).

Tabla 17: Métricas de desempeño.

Manning	EMA Error medio absoluto		MRE Error medio relativo		MARE Error medio absoluto relativo	
	Nivel	Velocidad	Nivel	Velocidad	Nivel	Velocidad
0.022	4.001	0.903	0.584	0.654	0.758	0.728
0.03	2.259	0.619	0.125	0.353	0.324	0.510
0.033	2.208	0.521	0.126	0.268	0.326	0.434
0.035	2.175	0.480	0.129	0.235	0.328	0.401
0.037	2.139	0.433	0.132	0.203	0.329	0.364
0.04	2.099	0.366	0.141	0.140	0.333	0.297
0.045	2.079	0.301	0.159	0.110	0.347	0.258
0.05	2.074	0.258	0.182	0.084	0.364	0.221
0.055	2.094	0.224	0.211	0.060	0.384	0.188

Fuente: Autores

Después de realizar las métricas de desempeño con varios valores de Manning, para identificar el mejor para la zona de estudio, se observó que el más apropiado estaba entre los valores 0.037 y 0.04; por lo que se realizaron la corrida de modelos con los siguientes valores de Manning 0.0375, 0.038, 0.0385, 0.039 y 0.0395 y se realizaron las métricas de desempeño teniendo en cuenta los valores del punto de control que fueron tomados en campo.

Posteriormente se realiza la comparación entre cada número de Manning teniendo en cuenta los valores más cercanos a cero de cada una de las métricas y con esto se determinó que el valor óptimo para el área de estudio es de 0.04, debido a que era el valor en el que todas las métricas daban los valores más cercanos a cero, esto determina la validez y calidad de los datos simulados con respecto a los observados (Tabla 18).

Tabla 18: Métricas de desempeño para el rango escogido.

MANNING	EMA Error medio absoluto		MRE Error medio relativo		MARE Error medio absoluto relativo	
	Nivel	Velocidad	Nivel	Velocidad	Nivel	Velocidad
0.037	2.139	0.433	0.132	0.203	0.329	0.364
0.038	2.129	0.406	0.135	0.176	0.331	0.342
0.0385	2.123	0.415	0.137	0.177	0.331	0.347
0.039	2.114	0.386	0.137	0.171	0.332	0.328
0.0395	2.104	0.375	0.138	0.163	0.332	0.319
0.04	2.099	0.366	0.141	0.140	0.333	0.297

Fuente: Autores

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Generación y análisis de los modelos

Dentro de la generación de resultados, se presentan los modelos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos realizando la comparación con las tres condiciones; máximas (10%), medias (50%) y mínimas (90%), la Tabla 19 muestra las condiciones de contorno establecidas. También para estos modelos se establecieron otros parámetros como tiempo de modelación, condición inicial entre otros que se muestran en la Tabla 20 y Tabla 21.

Tabla 19 Condiciones de contorno.

Escenario	Entrada (m ³ /s)	Salida Rio Magdalena (msnm)	Salida Brazo de Mompox (msnm)
Mínimo (90%)	1545.85	22.25	23.8
Medio (50%)	3973.07	24.96	24.5
Máximo (10%)	5868.58	26.55	25.87

Fuente: Autores

Tabla 20 Parámetros para los modelos.

Parámetro	Valor
Tiempo de modelación (Días)	3
Condición Inicial (m)	26
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Viscosidad (m ² /s)	1
Manning	0.04
Paso del tiempo (min)	0.5

Fuente: Autores

Tabla 21 Parámetros para los modelos de transporte de sedimentos.

Parámetro	Valor
Condición Inicial (kg/m ³)	0
D50 (μm)	250
Factor morfológico	80

Fuente: Autores

6.1.1 Modelos Hidrodinámicos

A continuación, se mostrarán los resultados en los modelos hidrodinámicos los cuales tuvieron un tiempo de modelación de 4320min en los diferentes escenarios (mínimo, medio y máximo), teniendo en cuenta los intervalos de valor según el color (Tabla 22). El sentido del flujo se ve reflejado con las flechas que se muestran en las imágenes, haciendo énfasis a la entrada del brazo.

Tabla 22: Intervalos para los modelos hidrodinámicos.

Color	Intervalo valor
Blanco- Azul oscuro	0 - 0.5 m/s
Azul Oscuro- Azul Aguamarina	0.5 – 1.0 m/s
Azul aguamarina – Verde	1.0 – 1.5 m/s
Verde - Amarillo	1.5 – 2.0 m/s
Amarillo – Naranja	2.0 – 2.5m/s
Naranja – Rojo	2.5 – 3.0 m/s

Fuente: Autores

6.1.1.1 Mínimo

Se puede ver en el comportamiento del modelo, el cambio de velocidades considerando que es un escenario de condiciones mínimas se evidencia una variación de velocidad en el modelo que va de un rango de 0.2 a 1.9m/s, en donde el flujo del Rio Magdalena a la entrada del modelo viene con una velocidad 0.6m/s con un nivel de 29msnm, a la altura del municipio de El Banco, se presenta una velocidad de 1.5m/s debido a la reducción del cauce, al entrar al brazo esta velocidad disminuye considerablemente llegando a 0.3m/s y un nivel de 27msnm, previo a las islas se registra una velocidad de 1.2m/s y un nivel de 25msnm y aguas abajo del dominio computacional el Rio Magdalena muestra una velocidad de 1.4m/s con un nivel de 23m, estos valores son tomados en el minuto 3840 debido a que el modelo permanece constante y estable (Figura 42).

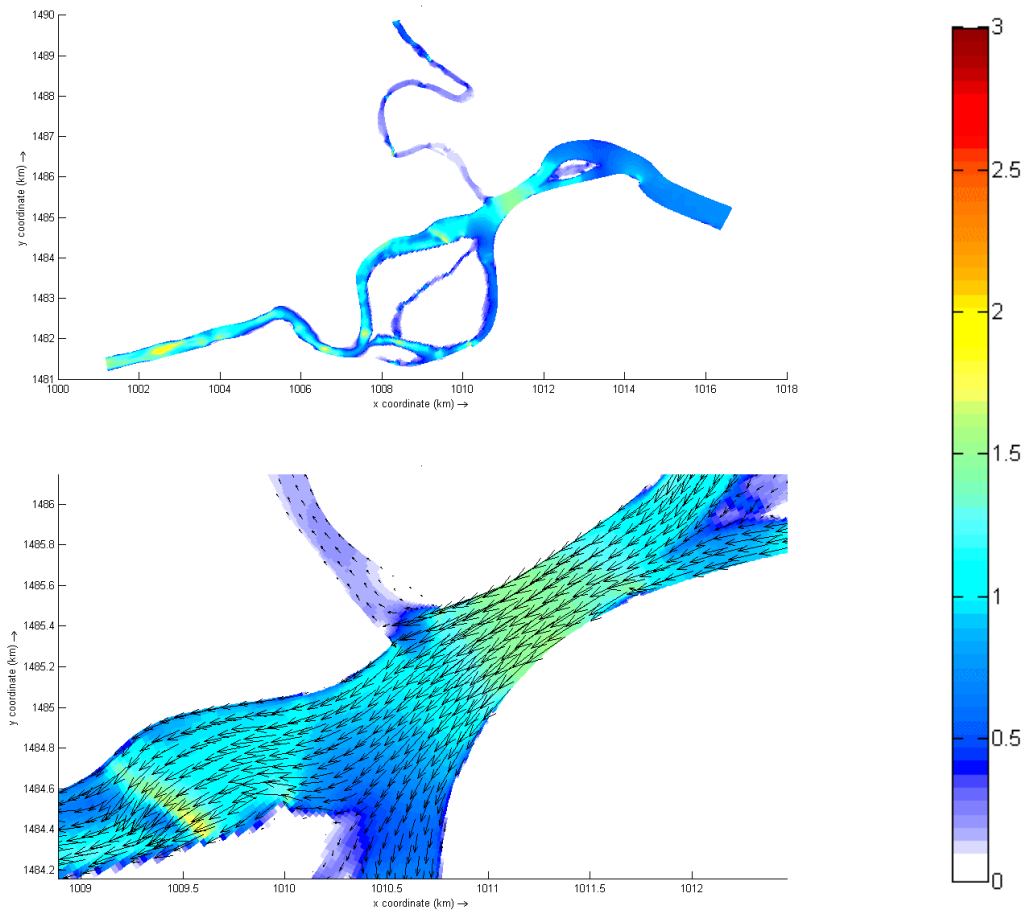


Figura 42: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el modelo Hidrodinámico en condiciones mínimas.
Fuente: Autores

6.1.1.2 Medio

Se puede ver en el comportamiento del modelo, el cambio de velocidades considerando que es un escenario de condiciones medias se evidencia una variación de velocidad en el modelo que va de un rango de 0.3 a 2.4m/s, en donde el flujo del Rio Magdalena a la entrada del modelo viene con una velocidad 1m/s con un nivel de 30msnm, a la altura del municipio de El Banco, se presenta una velocidad de 2.4m/s debido a la reducción del cauce, al entrar al brazo esta velocidad disminuye considerablemente llegando a 0.9m/s y un nivel 28.8msnm, previo a las islas se registra una velocidad de 1.3m/s y un nivel de 28.4m y aguas abajo del dominio computacional el Rio Magdalena muestra una velocidad de 1.8m/s con un nivel de 25.6msnm, estos valores son tomados en el minuto 3840 debido a que el modelo permanece constante y estable (Figura 43).

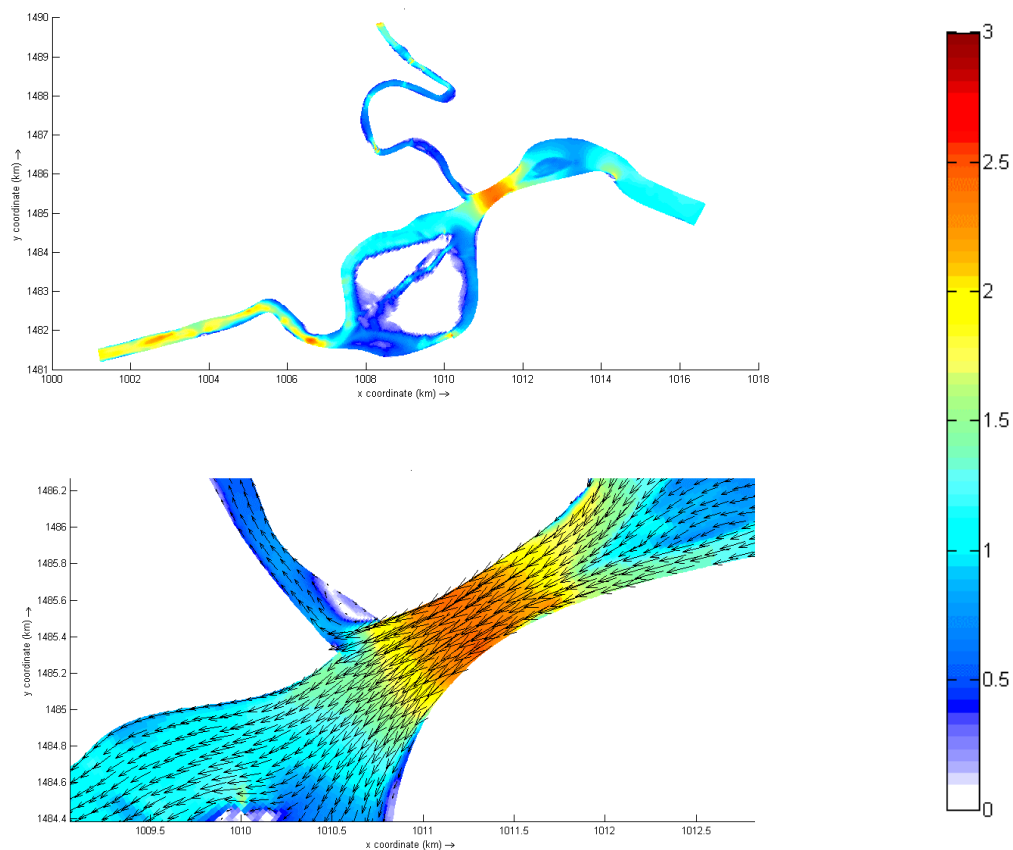


Figura 43: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el modelo Hidrodinámico en condiciones medias.
Fuente: Autores

6.1.1.3 Máximo

Se puede ver en el comportamiento del modelo, el cambio de velocidades considerando que es un escenario de condiciones Máximas se evidencia una variación de velocidad en el modelo que va de un rango de 0.3 a 3m/s, en donde el flujo del Rio Magdalena a la entrada del modelo viene con una velocidad 1.3m/s con un nivel de 32msnm, a la altura del municipio de El Banco, se presenta una velocidad de 3m/s debido a la reducción del cauce, al entrar al brazo esta velocidad disminuye considerablemente llegando a 1.2m/s y un nivel 30msnm, previo a las islas se registra una velocidad de 1.3m/s y un nivel de 30msnm y aguas abajo del dominio computacional el Rio Magdalena muestra una velocidad de 2.4m/s con un nivel de 26.8msnm, estos valores son tomados en el minuto 3840 debido a que el modelo permanece constante y estable (Figura 44).

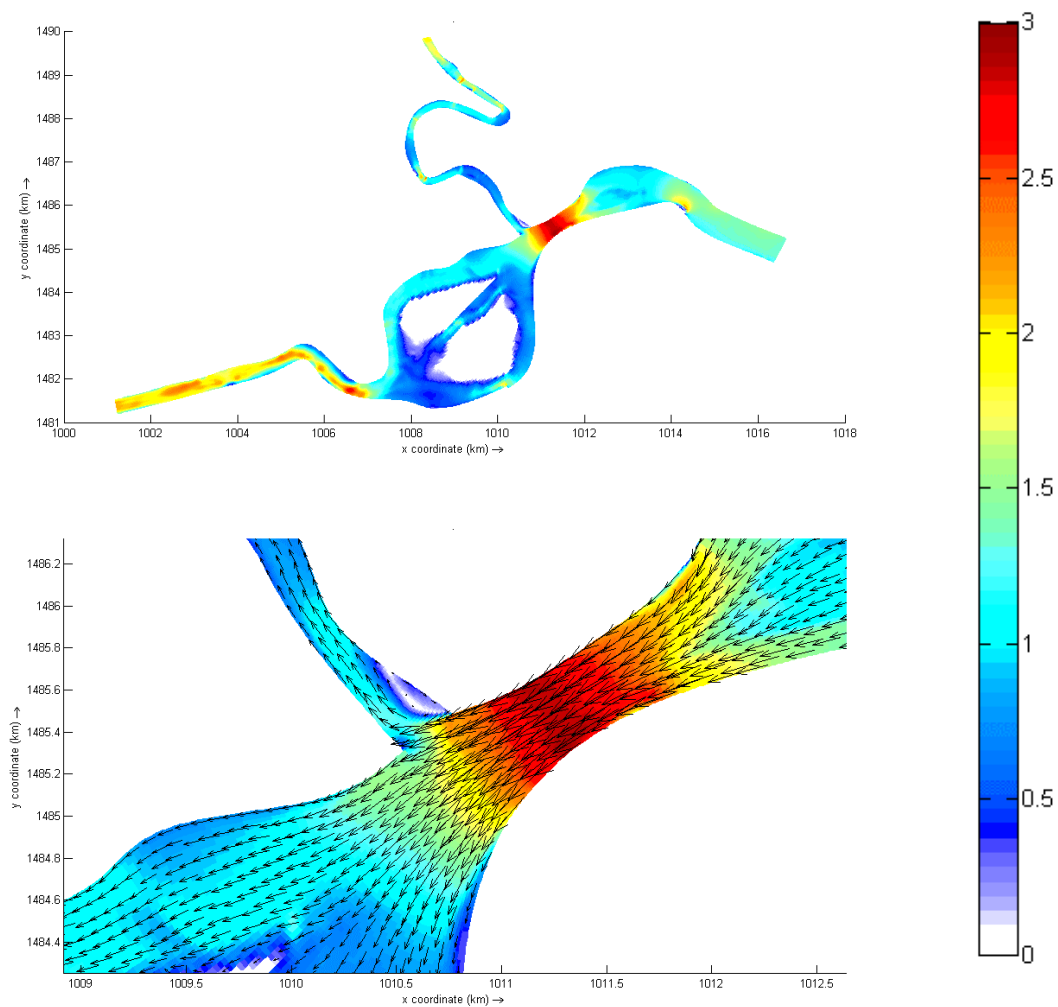


Figura 44: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el modelo Hidrodinámico en condiciones máximas.

Fuente: Autores

Se escogieron los tres escenarios mínimo, medio y máximo para evidenciar el comportamiento climático que presenta la zona en las diferentes épocas del año, presentando fluctuaciones en el cuerpo hídrico.

6.1.2 Modelos de transporte de sedimentos

A continuación, se mostrarán los resultados de los modelos de transporte de sedimentos para las tres ecuaciones, Van Rijn, Engelund – Hansen las cuales trabajan con lechos de arenas que tiene un diámetro entre 0.062-2mm y Meyer - Peter – Müller que trabaja con gravas las cuales cuentan con un diámetro de 2-

65mm, para cada una de estas se muestran los diferentes escenarios (mínimo, medio y máximo) teniendo en cuenta los intervalos de valor según el color para los modelos hidrodinámicos (Tabla 22) y de transporte de sedimentos (Tabla 23).

Tabla 23: Intervalos para los modelos de transporte de sedimentos.

Color	Intervalo valor
Morado- Azul oscuro	0 - 10 m
Azul Oscuro- Azul Aguamarina	10 – 15 m
Azul aguamarina – Arena	15 – 20 m
Arena – Verde Claro	20 – 25 m
Verde Claro– Verde Oscuro	25 – 33 m

Fuente: Autores

6.1.2.1 Van Rijn

- Mínimo

Se presenta el comportamiento de transporte de sedimentos con la ecuación Van Rijn en condiciones mínimas, donde se identifica con la escala de color el nivel del lecho, mostrando los valores bajos como erosión, y los valores más altos como proceso de sedimentación [46], se evidencia que aguas arriba tiene un nivel de sedimentación de 23m y el nivel del agua en 28.5msnm, al seguir el curso para entrar al brazo de Mompox, se incrementa aún más este nivel de sedimentación, llegando a 28m, lo cual logra una obstrucción de la entrada de casi el 70% impidiendo el paso de la totalidad del flujo, aguas abajo del dominio computacional se ve identificado el proceso de erosión que se genera por altas velocidades que evitan la acumulación de sedimentos en esta zona con un nivel de 14m y un nivel del agua de 22.8msnm (Figura 45).

Esta ecuación presenta un comportamiento inusual ya que evidencia sedimentación en diferentes tramos a lo largo del dominio computacional, por otro lado, se observa inestabilidad numérica debido a que no se solucionan las ecuaciones en todos los nodos de la malla generando vacíos en el modelo (Figura 45).

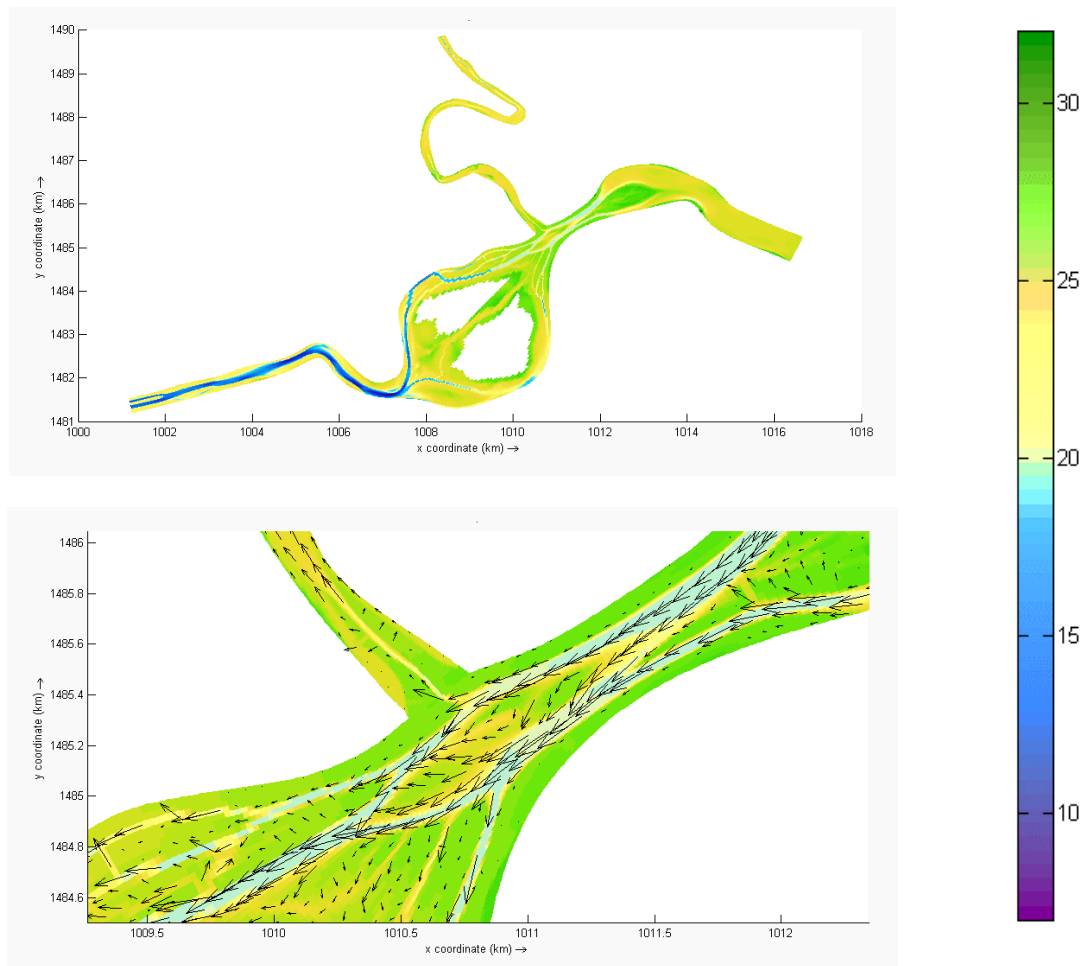


Figura 45: Comportamiento del nivel del lecho (m) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Van Rijn en condiciones mínimas.
Fuente: Autores

Analizando el modelo hidrodinámico obtenido, se ve una relación de los procesos de erosión y sedimentación con la velocidad, donde se muestra una mayor velocidad cuando existen procesos erosivos y baja velocidad que provoca la acumulación de sedimentos, se evidencia una variación de velocidades antes de la entrada al brazo y al ingreso del brazo, estas velocidades pasan de ser 1 m/s a 0.5 m/s con un nivel de 27msnm a 26.5msnm respectivamente (Figura 46).

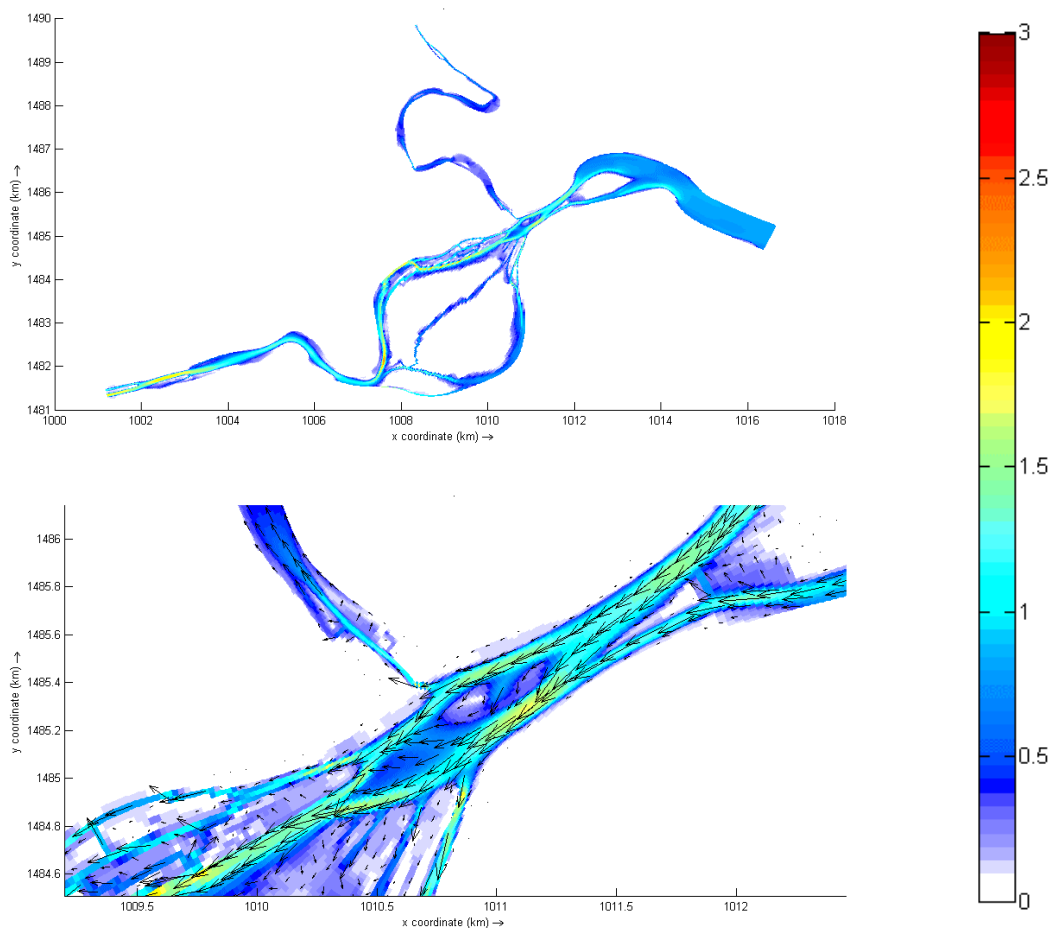


Figura 46: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Van Rijn en condiciones mínimas.

Fuente: Autores

- Medio

Se presenta el comportamiento de transporte de sedimentos con la ecuación Van Rijn en condiciones Medias, donde se identifica con la escala de color el nivel del lecho, mostrando los valores bajos como erosión, y los valores más altos como proceso de sedimentación [46], se evidencia que aguas arriba tiene un nivel de sedimentación de 23m y el nivel del agua en 28.5msnm, al seguir el curso para entrar al brazo de Mompox, se incrementa aún más este nivel de sedimentación, llegando a 28m, lo cual logra una obstrucción de la entrada de casi el 70% impidiendo el paso de la totalidad del flujo, aguas abajo del dominio computacional se ve identificado el proceso de erosión que se genera por altas velocidades que evitan la acumulación de sedimentos en esta zona con un nivel de 14m y un nivel del agua de 22.8msnm.

Esta ecuación presenta un comportamiento inusual ya que evidencia sedimentación en diferentes tramos a lo largo del dominio computacional, por otro lado, se observa inestabilidad numérica debido a que no se solucionan las ecuaciones en todos los nodos de la malla generando vacíos en el modelo (Figura 47).

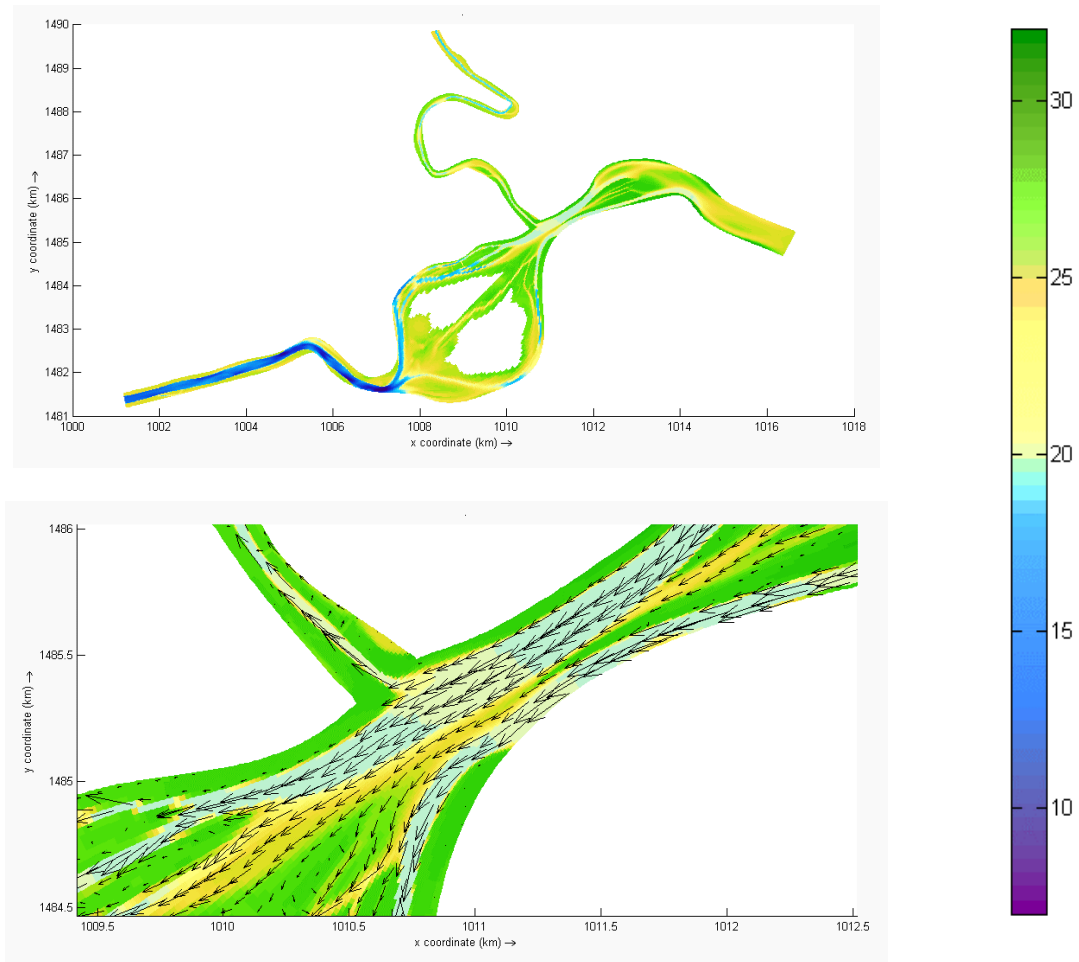


Figura 47: Comportamiento del nivel del lecho (m) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Van Rijn en condiciones medias.
Fuente: Autores

Analizando el modelo hidrodinámico obtenido, se ve una relación de los procesos de erosión y sedimentación con la velocidad, donde se muestra una mayor velocidad cuando existen procesos erosivos y baja velocidad que provoca la acumulación de sedimentos, se evidencia una variación de velocidades antes de la entrada al brazo y al ingreso del brazo, estas velocidades pasan de ser 1 m/s a 0.5 m/s con un nivel de 27msnm a 26.5msnm respectivamente (Figura 48).

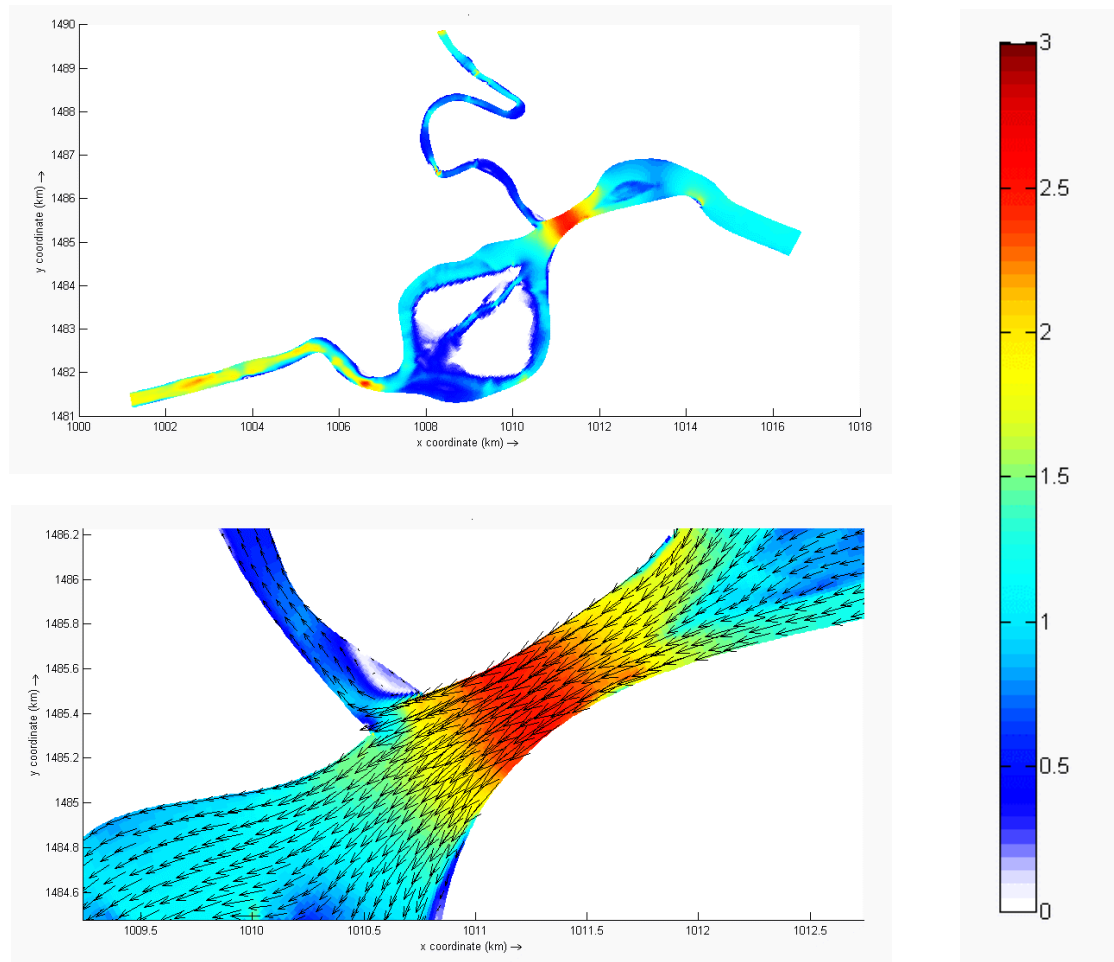


Figura 48: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Van Rijn en condiciones medias.
Fuente: Autores

- Máximo

Se presenta el comportamiento de transporte de sedimentos con la ecuación Van Rijn en condiciones maximas, donde se identifica con la escala de color el nivel del lecho, mostrando los valores bajos como erosión, y los valores más altos como proceso de sedimentación [46], se evidencia que aguas arriba tiene un nivel de sedimentación de 25m y el nivel del agua en 30msnm, al seguir el curso para entrar al brazo de Mompox, se incrementa aún más este nivel de sedimentación, llegando a 30m, lo cual logra una obstrucción de la entrada de casi el 70% impidiendo el paso de la totalidad del flujo, aguas abajo del dominio computacional se ve identificado el proceso de erosión que se genera por altas velocidades que evitan la acumulación de sedimentos en esta zona con un nivel de 19m y un nivel del agua de 26.3msnm (Figura 49).

Esta ecuación presenta un comportamiento inusual ya que evidencia sedimentación en diferentes tramos a lo largo del dominio computacional, por otro lado, se observa inestabilidad numérica debido a que no se solucionan las ecuaciones en todos los nodos de la malla generando vacíos en el modelo (Figura 49).

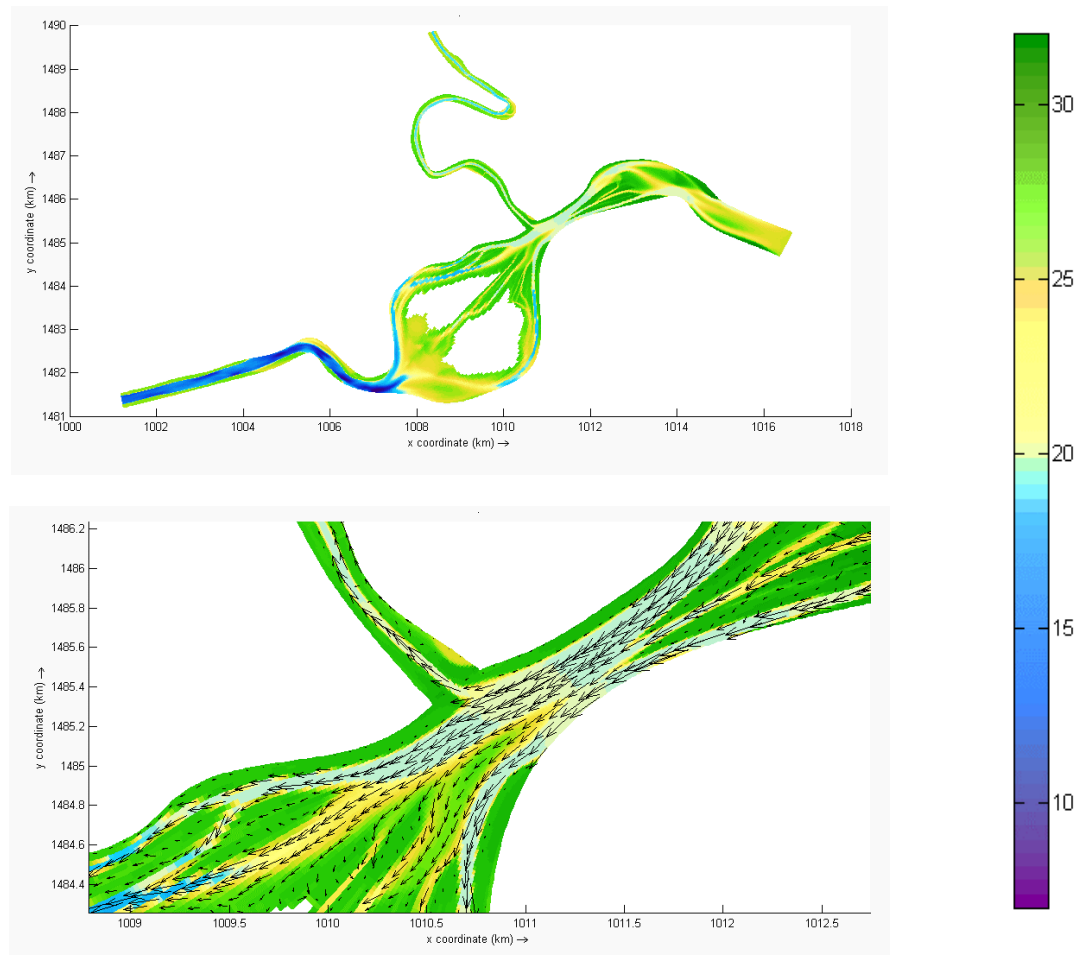


Figura 49: Comportamiento del nivel del lecho (m) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Van Rijn en condiciones máximas.

Fuente: Autores

Analizando el modelo hidrodinámico obtenido, se ve una relación de los procesos de erosión y sedimentación con la velocidad, donde se muestra una mayor velocidad cuando existen procesos erosivos y baja velocidad que provoca la acumulación de sedimentos, se evidencia una variación de velocidades antes de la entrada al brazo y al ingreso del brazo, estas velocidades pasan de ser 2.5 m/s a 1.5 m/s con un nivel de 30msnm a 29msnm respectivamente (Figura 50).

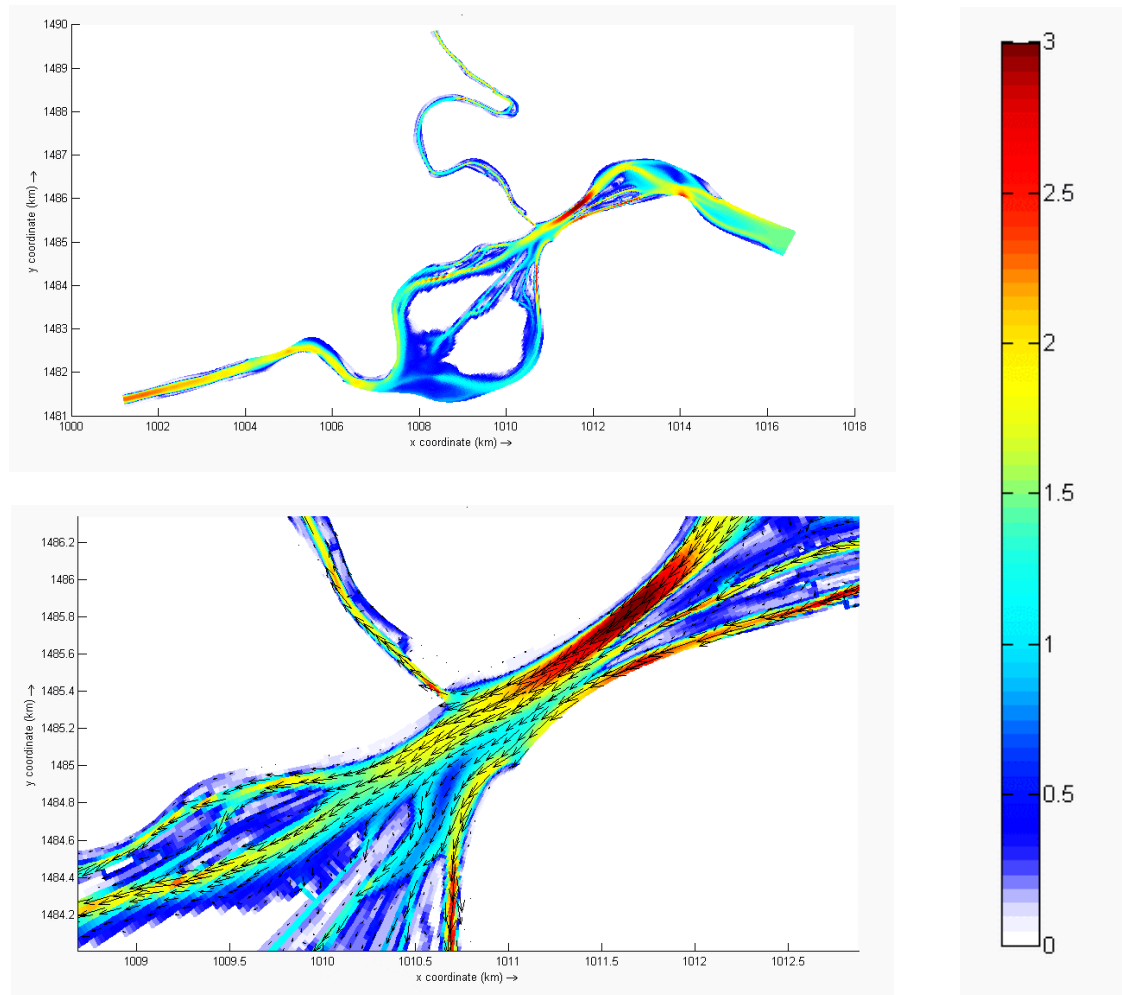


Figura 50: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Van Rijn en condiciones máximas.

Fuente: Autores

6.1.2.2 Engelund & Hansen

- Mínimo

Se presenta el comportamiento de transporte de sedimentos con la ecuación Engelund & Hansen en condiciones mínimas, donde se identifica con la escala de color el nivel del lecho, mostrando los valores bajos como erosión, y los valores más altos como proceso de sedimentación [46], se evidencia que aguas arriba tiene un nivel de sedimentación de 25m y el nivel del agua en 28msnm, al seguir el curso para entrar al brazo de Mompox, se incrementa más este nivel de sedimentación en la banca derecha e izquierda, llegando a 27m, aguas abajo del dominio

computacional se ve identificado el proceso de erosión que se genera por altas velocidades que evitan la acumulación de sedimentos en esta zona con un nivel de 18m y un nivel del agua de 23msnm (Figura 52).

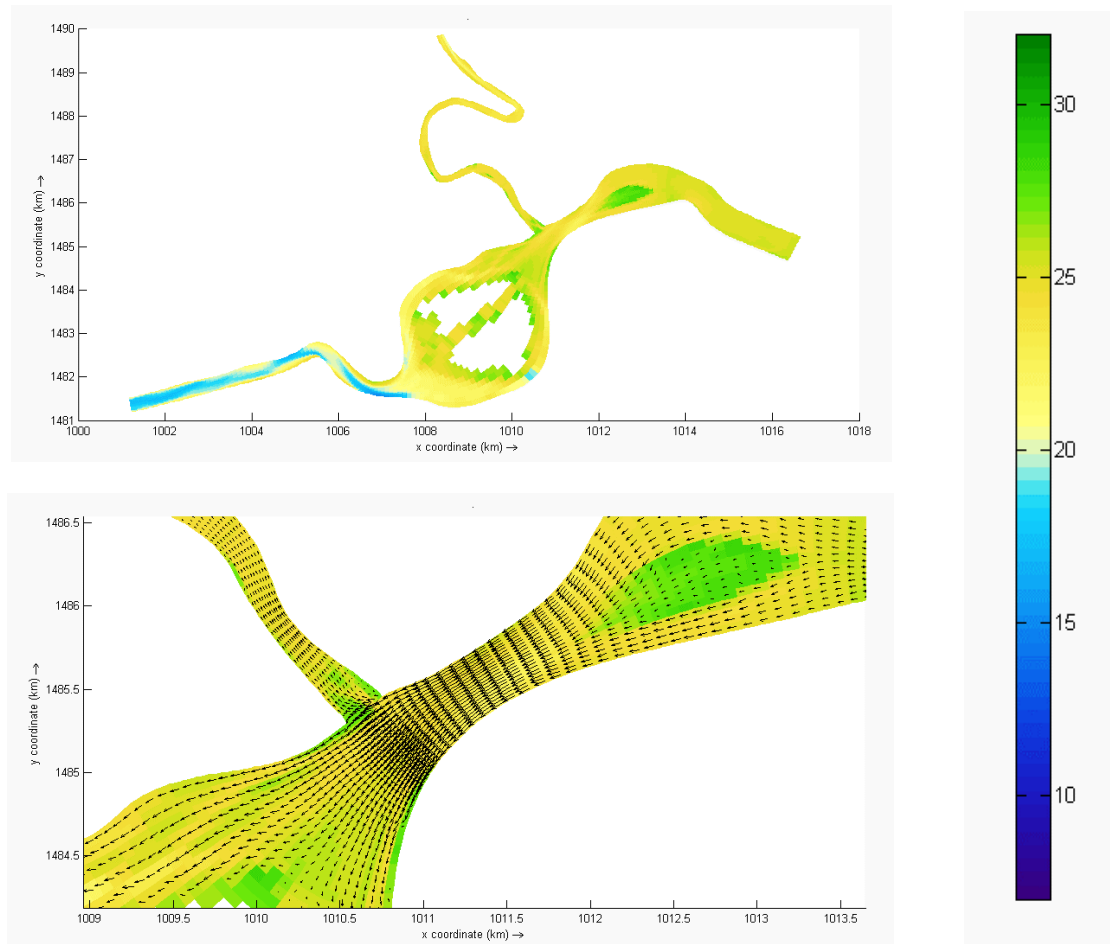


Figura 51: Comportamiento del nivel del lecho (m) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Engelund - Hansen en condiciones mínimas.
Fuente: Autores

Analizando el modelo hidrodinámico obtenido, se ve una relación de los procesos de erosión y sedimentación con la velocidad, donde se muestra una mayor velocidad cuando existen procesos erosivos y baja velocidad que provoca la acumulación de sedimentos, se evidencia una variación de velocidades antes de la entrada al brazo y al ingreso del brazo, estas velocidades pasan de ser 1.2 m/s a 0.5 m/s con un nivel de 27msnm a 26msnm respectivamente (Figura 52).

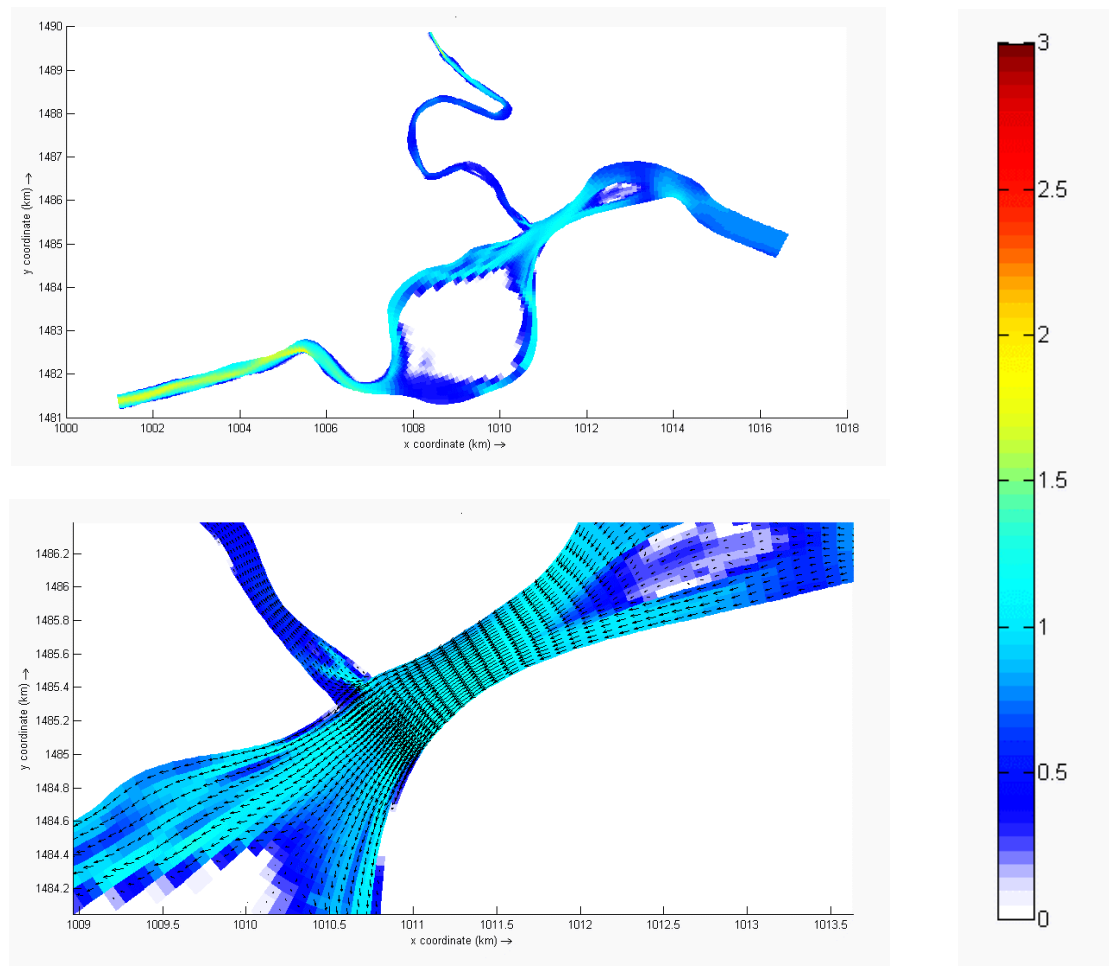


Figura 52: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Engelund - Hansen en condiciones mínimas.
Fuente: Autores

- Medio

Se presenta el comportamiento de transporte de sedimentos con la ecuación Engelund & Hansen en condiciones medias, donde se identifica con la escala de color el nivel del lecho, mostrando los valores bajos como erosión, y los valores más altos como proceso de sedimentación [46], se evidencia que aguas arriba tiene un nivel de sedimentación de 25m y el nivel del agua en 30msnm, al seguir el curso para entrar al brazo de Mompox, se incrementa aún más este nivel de sedimentación, llegando a 28m, lo cual logra una obstrucción de la entrada en el costado izquierdo de casi el 70% impidiendo el paso de la totalidad del flujo, aguas abajo del dominio computacional se ve identificado el proceso de erosión que se genera por altas velocidades que evitan la acumulación de sedimentos en esta zona con un nivel de 16m y un nivel del agua de 25.5msnm (Figura 53).

Esta ecuación presenta un comportamiento inusual ya que evidencia sedimentación en diferentes tramos a lo largo del dominio computacional, por otro lado, se observa inestabilidad numérica debido a que no se solucionan las ecuaciones en todos los nodos de la malla generando vacíos en el modelo (Figura 53).

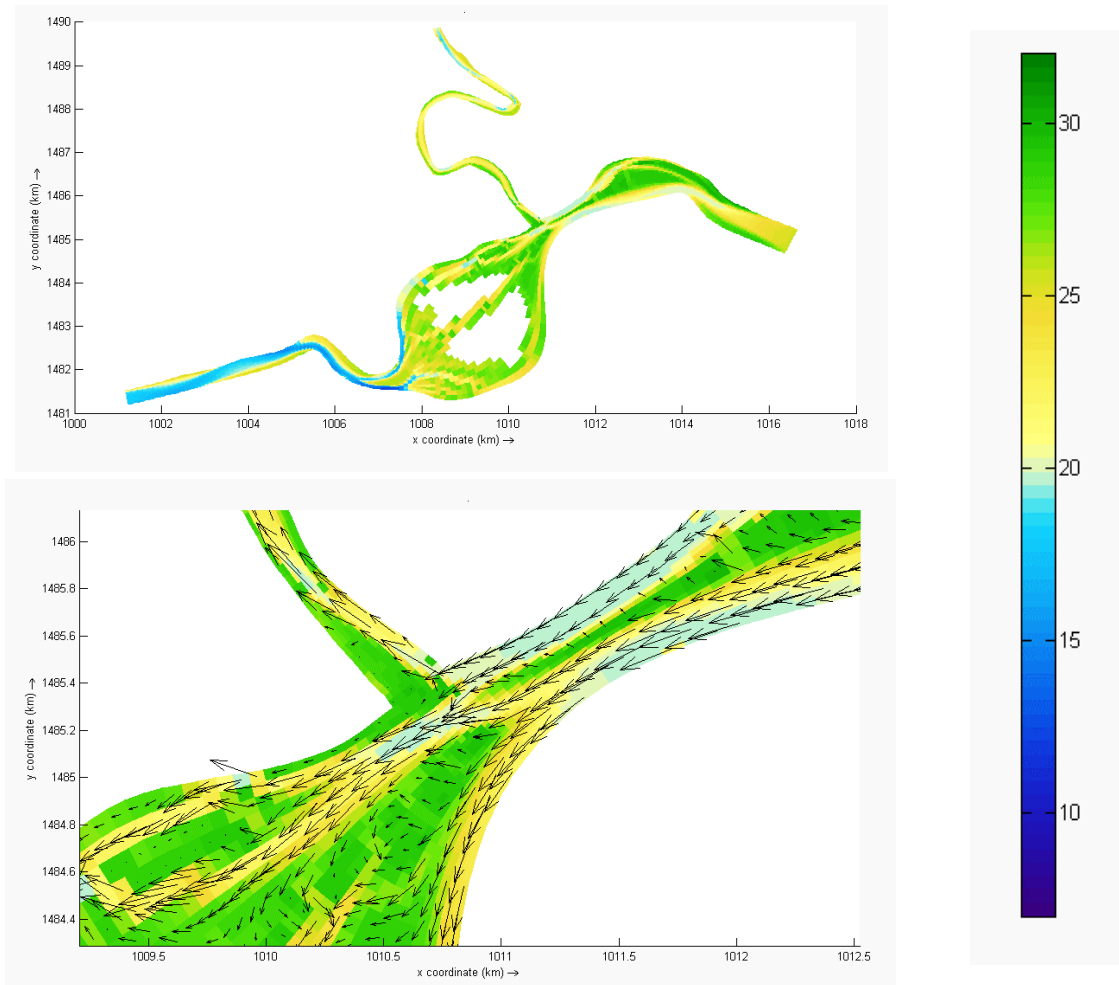


Figura 53: Comportamiento del nivel del lecho (m) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Engelund - Hansen en condiciones medias.

Fuente: Autores

Analizando el modelo hidrodinámico obtenido, se ve una relación de los procesos de erosión y sedimentación con la velocidad, donde se muestra una mayor velocidad cuando existen procesos erosivos y baja velocidad que provoca la acumulación de sedimentos, se evidencia una variación de velocidades antes de

la entrada al brazo y al ingreso del brazo, estas velocidades pasan de ser 2.5m/s a 1.5m/s con un nivel de 29msnm a 28.5msnm respectivamente (Figura 54).

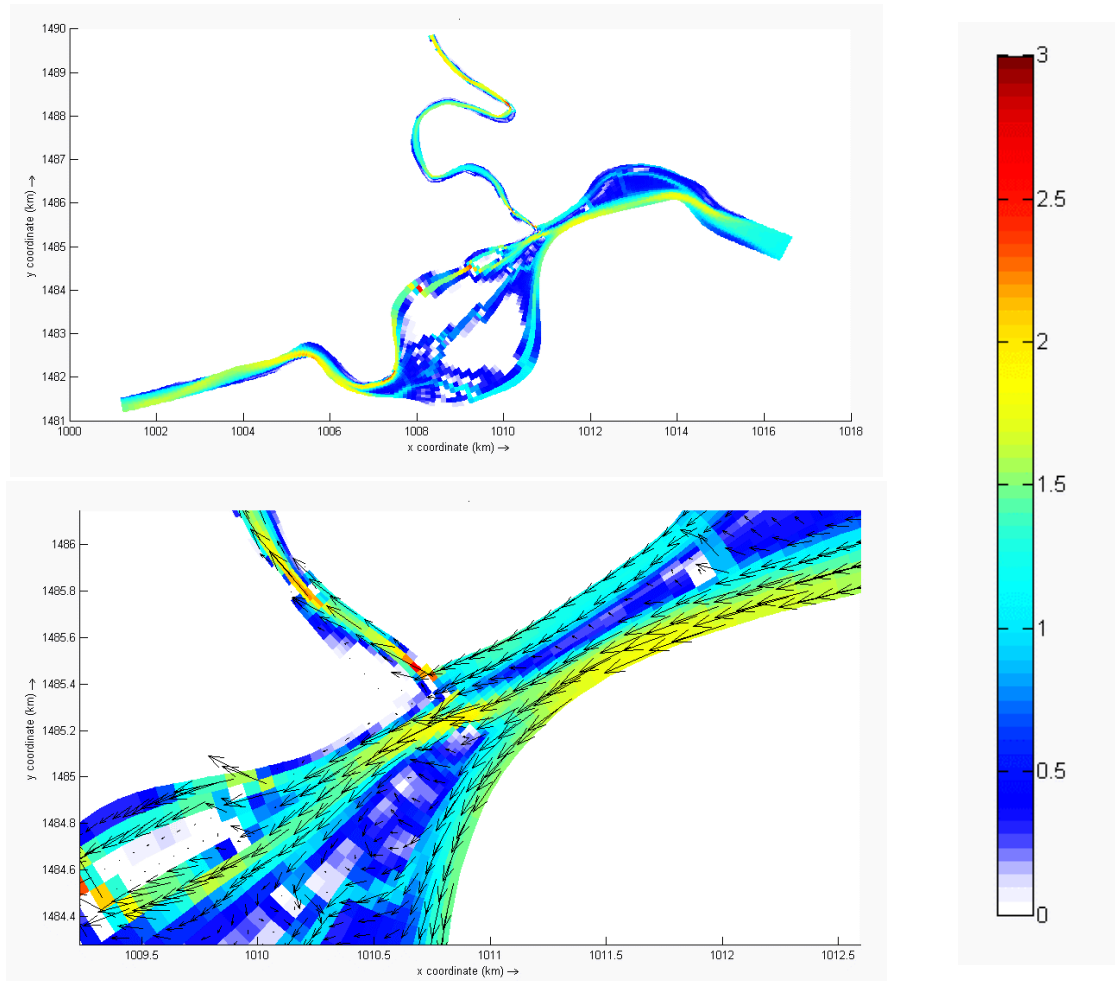


Figura 54: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Engelund - Hansen en condiciones medias.
Fuente: Autores

- Máximo

Se presenta el comportamiento de transporte de sedimentos con la ecuación Engelund & Hansen en condiciones máximas, donde se identifica con la escala de color el nivel del lecho, mostrando los valores bajos como erosión, y los valores más altos como proceso de sedimentación [46], se evidencia que aguas arriba tiene un nivel de sedimentación de 25m y el nivel del agua en 30msnm, al seguir el curso

para entrar al brazo de Mompox, se incrementa aún más este nivel de sedimentación, llegando a 30.2m, lo cual logra una obstrucción de la entrada en el costado izquierdo de casi el 70% impidiendo el paso de la totalidad del flujo, aguas abajo del dominio computacional se ve identificado el proceso de erosión que se genera por altas velocidades que evitan la acumulación de sedimentos en esta zona con un nivel de 16m y un nivel del agua de 27msnm (Figura 55).

Esta ecuación presenta un comportamiento inusual ya que evidencia sedimentación en diferentes tramos a lo largo del dominio computacional, por otro lado, se observa inestabilidad numérica debido a que no se solucionan las ecuaciones en todos los nodos de la malla generando vacíos en el modelo (Figura 55).

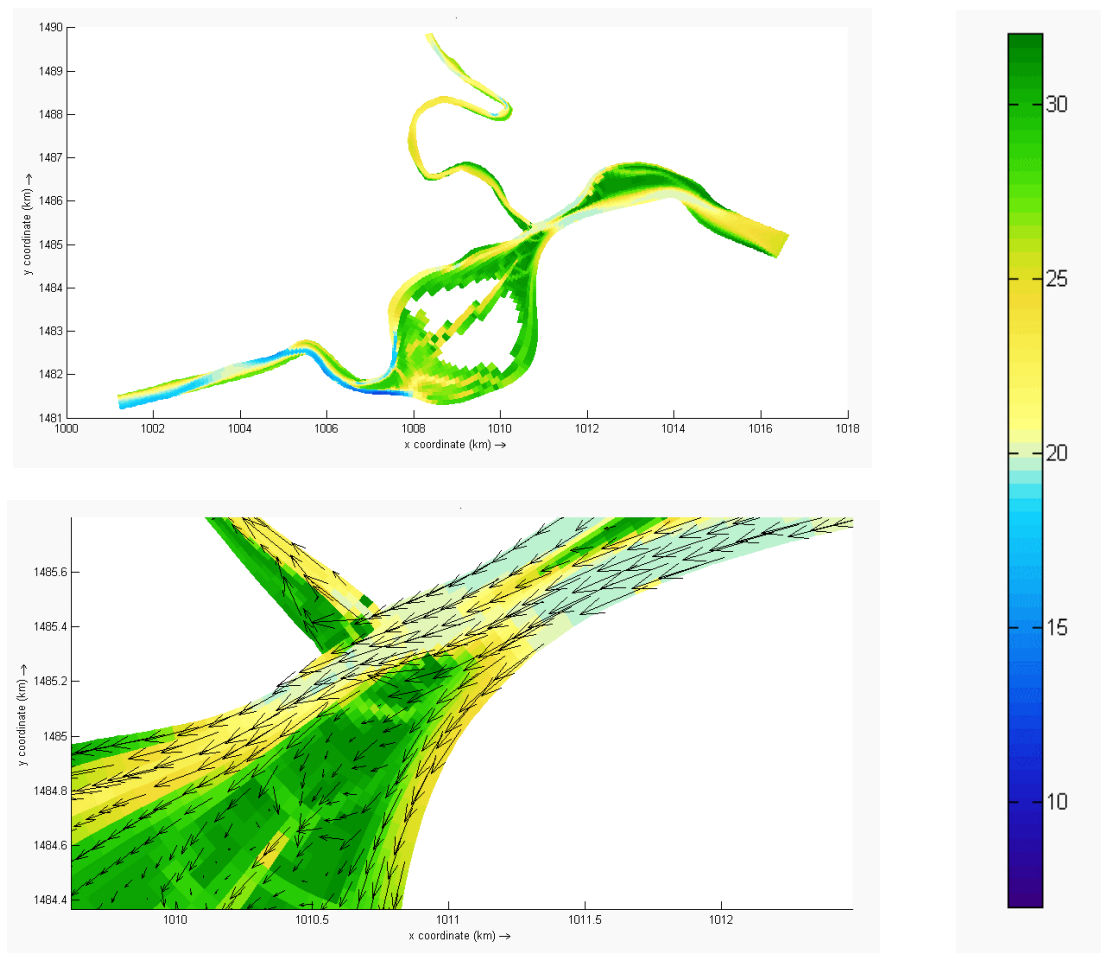


Figura 55: Comportamiento del nivel del lecho (m) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Engelund - Hansen en condiciones máximas.
Fuente: Autores

Analizando el modelo hidrodinámico obtenido, se ve una relación de los procesos de erosión y sedimentación con la velocidad, donde se muestra una mayor velocidad cuando existen procesos erosivos y baja velocidad que provoca la acumulación de sedimentos, se evidencia una variación de velocidades antes de la entrada al brazo y al ingreso del brazo, estas velocidades pasan de ser 2.2m/s a 2.5m/s con un nivel de 30msnm para las dos ubicaciones (Figura 56).

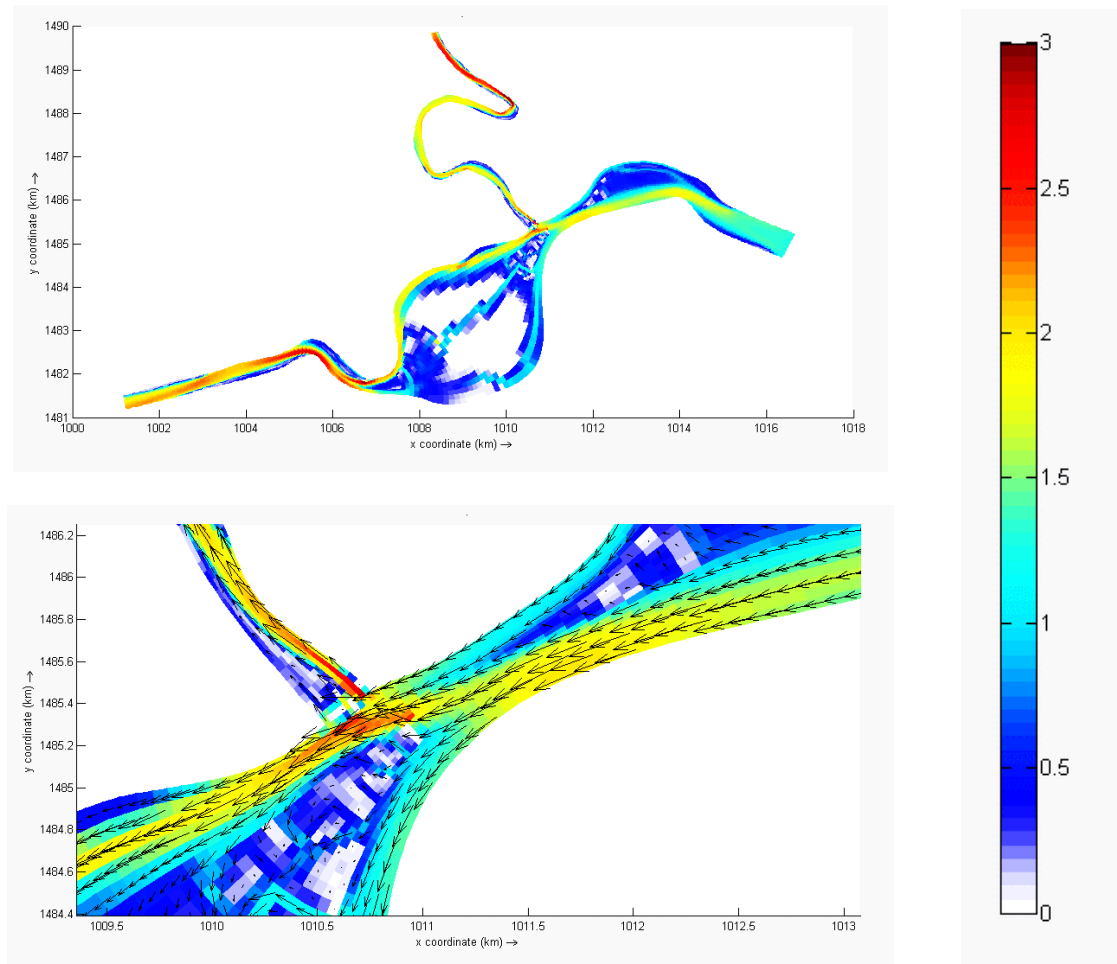


Figura 56: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Engelund - Hansen en condiciones máximas.

Fuente: Autores

6.1.2.3 Meyer – Peter – Müller

- Mínimo

Se presenta el comportamiento de transporte de sedimentos con la ecuación Meyer-Peter-Müller en condiciones mínimas, donde se identifica con la escala de color el nivel del lecho, mostrando los valores bajos como erosión, y los valores más altos como proceso de sedimentación [46], se evidencia que aguas arriba tiene un nivel de sedimentación de 26m y el nivel del agua en 28.5msnm, al seguir el curso para entrar al brazo de Mompox, se incrementa aún más este nivel de sedimentación, llegando a 28m presentándose una acumulación en las bancas derecha e izquierda, lo cual logra una obstrucción de la entrada de casi el 70% impidiendo el paso de la totalidad del flujo, aguas abajo del dominio computacional se ve identificado el proceso de erosión que se genera por altas velocidades que evitan la acumulación de sedimentos en esta zona con un nivel de 16m y un nivel del agua de 22.8msnm, la dirección correspondiente al flujo se ve reflejado por las flechas que muestra el modelo, estas representan como el flujo de agua disminuye al entrar al brazo y como este se desvía al chocar con las bancas que muestran alto grado de sedimentación (Figura 57).

Esta ecuación resuelve en la totalidad del dominio computacional, debido a que no muestra vacíos de información en el modelo.

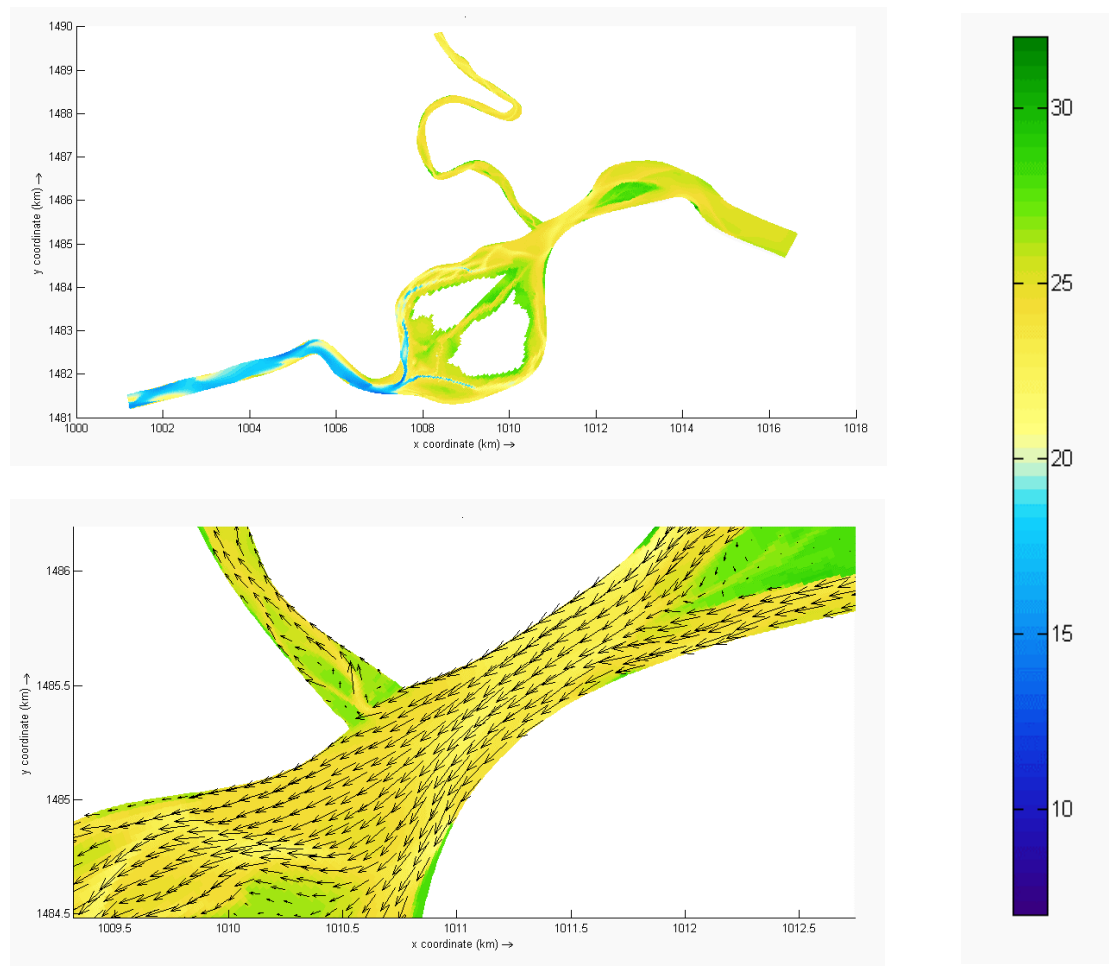


Figura 57: Comportamiento del nivel del lecho (m) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Meyer – Peter - Müller en condiciones mínimas.
Fuente: Autores

En cuanto al comportamiento hidrodinámico a la entrada al brazo de Mompox se evidencian velocidades que oscilan en la zona de interés entre 0.6 a 1.2 m/s con un nivel de 26.8m, donde en la entrada del brazo se genera una barrera de sedimentos contando con un nivel de aproximadamente 27 metros, logrando así una desviación del flujo, haciéndolo pasar por el centro del brazo, pero en un mínimo porcentaje de cantidad de agua (Figura 58, Figura 57).

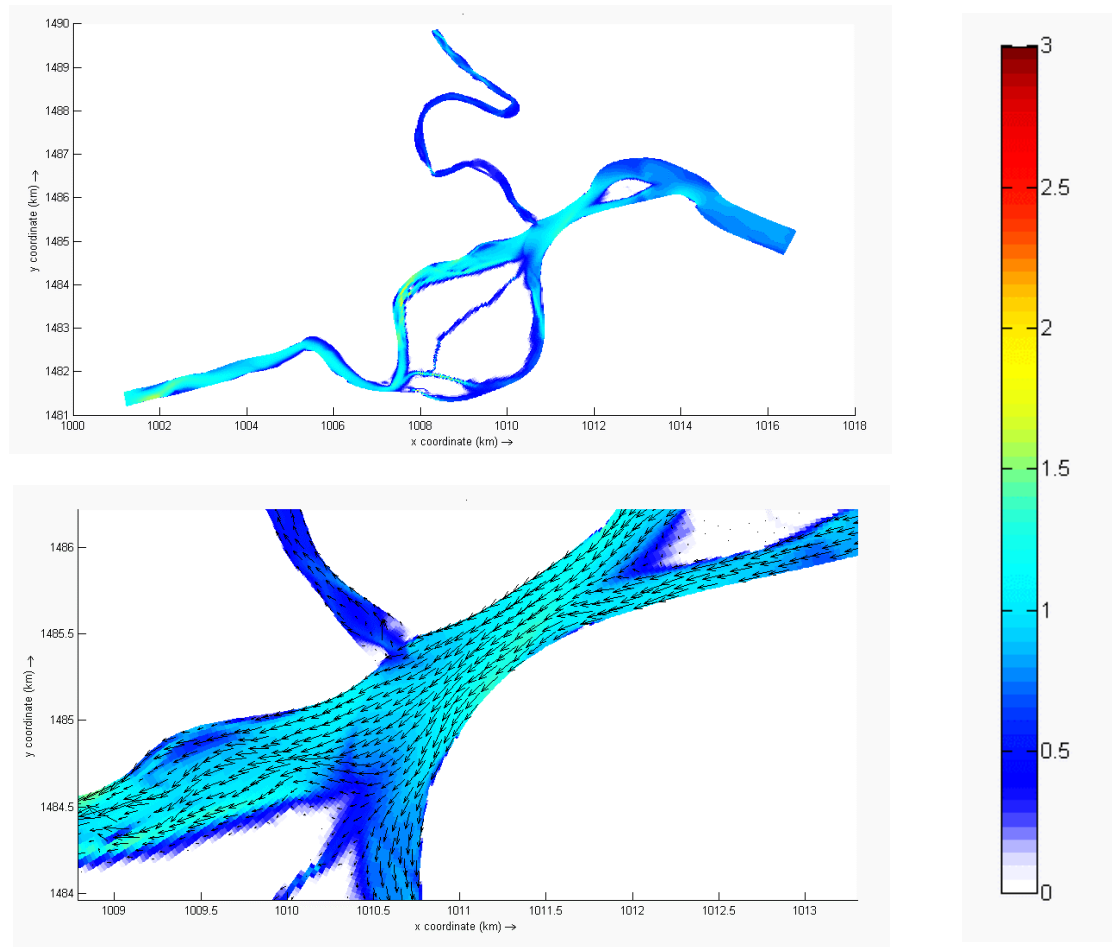


Figura 58: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Meyer – Peter - Müller en condiciones mínimas.
Fuente: Autores

- Medio

Se presenta el comportamiento de transporte de sedimentos con la ecuación Meyer-Peter-Müller en condición media, donde se identifica con la escala de color el nivel del lecho, mostrando los valores bajos como erosión, y los valores más altos como proceso de sedimentación [46], se evidencia que aguas arriba tiene un nivel de sedimentación de 27.5m y el nivel del agua en 29.5msnm, al seguir el curso para entrar al brazo de Mompox, se incrementa aún más este nivel de sedimentación, llegando a 28.6m presentándose una acumulación en las bancas derecha e izquierda, lo cual logra una obstrucción de la entrada de casi el 70% impidiendo el paso de la totalidad del flujo, aguas abajo del dominio computacional se ve identificado el proceso de erosión que se genera por altas velocidades que evitan la acumulación de sedimentos en esta zona con un nivel de 17m y un nivel del agua

de 24.5msnm, la dirección correspondiente al flujo se ve reflejado por las flechas que muestra el modelo, estas representan como el flujo de agua disminuye al entrar al brazo y como este se desvía al chocar con las bancas que muestran alto grado de sedimentación (Figura 59).

Esta ecuación resuelve en la totalidad del dominio computacional, debido a que no muestra vacíos de información en el modelo.

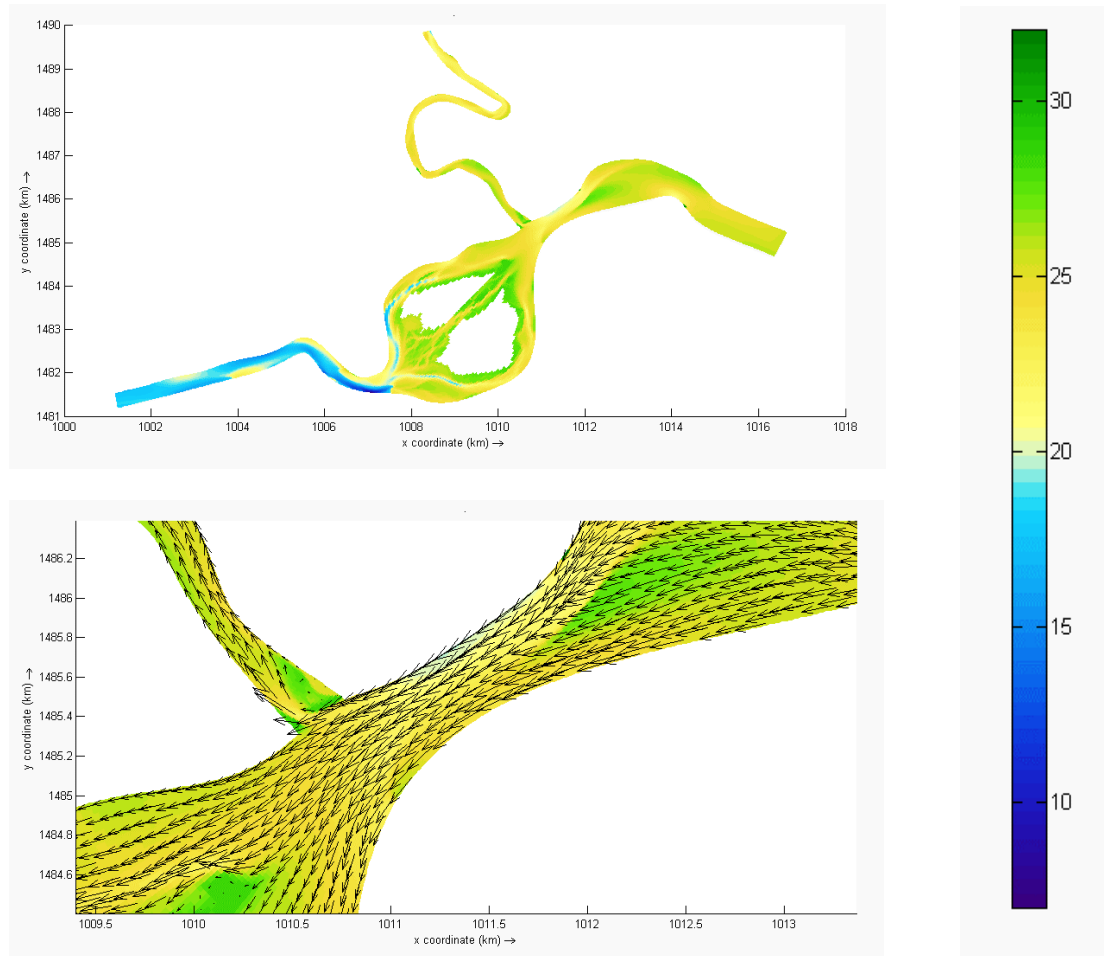


Figura 59: Comportamiento del nivel del lecho (m) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Meyer – Peter - Müller en condiciones medias.

Fuente: Autores

En cuanto al comportamiento hidrodinámico a la entrada al brazo de Mompox se evidencian velocidades que oscilan en la zona de interés entre 0.7 - 2 m/s, donde

previamente a la entrada del brazo las velocidades están en 1.8 m/s y en la entrada del brazo es de 1.5m/s donde se genera una barrera de sedimentos con un nivel de aproximadamente 27 metros, logrando así una desviación del flujo, haciéndolo pasar cerca de la banca izquierda del brazo, pero en un menor porcentaje de agua (Figura 60, Figura 59).

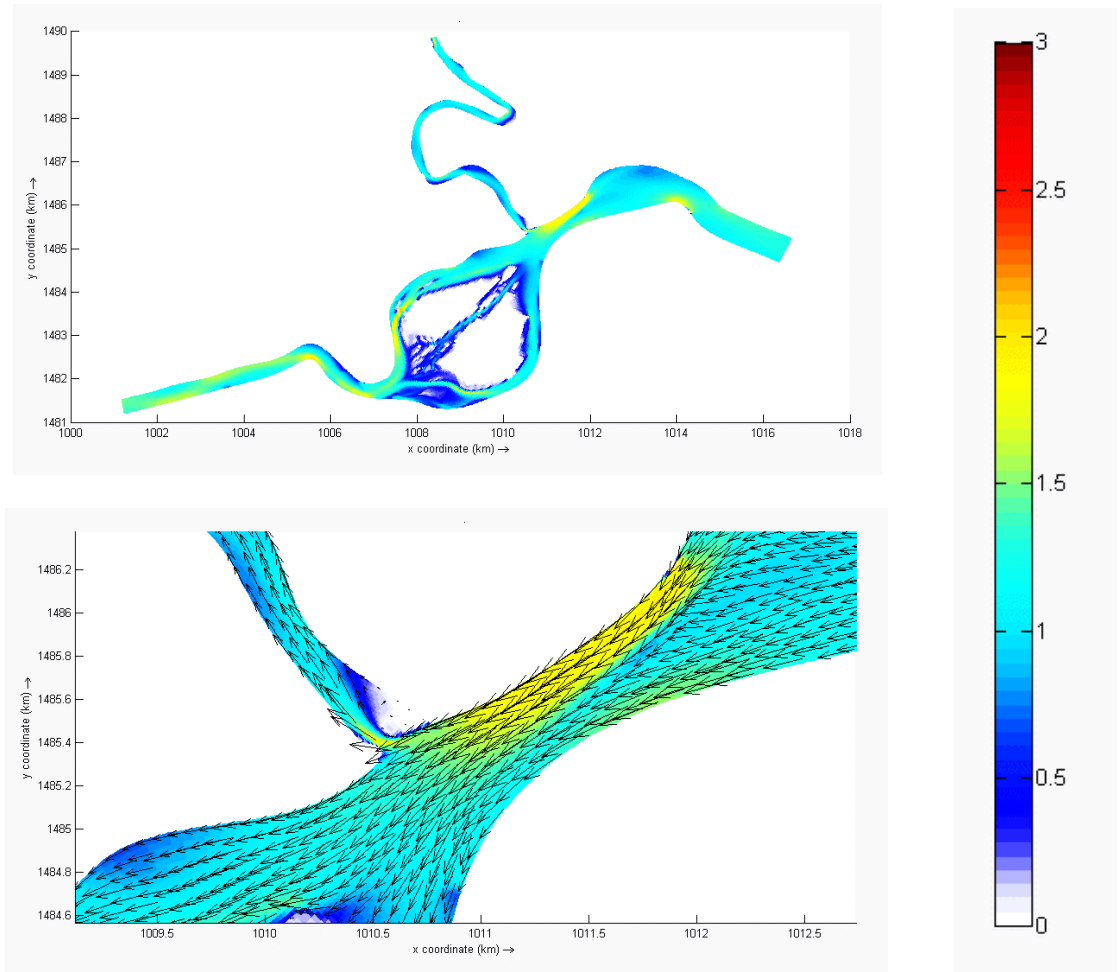


Figura 60: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Meyer – Peter - Müller en condiciones medias.

Fuente: Autores

- Máximo

Se presenta el comportamiento de transporte de sedimentos con la ecuación Meyer-Peter-Müller en condiciones máximas, donde se identifica con la escala de color el nivel del lecho, mostrando los valores bajos como erosión, y los valores más altos como proceso de sedimentación [46], se evidencia que aguas arriba tiene un nivel de sedimentación de 28m y el nivel del agua en 31.4msnm, al seguir el curso para entrar al brazo de Mompox, se incrementa aún más este nivel de sedimentación,

llegando a 29m presentándose una acumulación en las bancas derecha e izquierda, lo cual logra una obstrucción de la entrada de casi el 70% impidiendo el paso de la totalidad del flujo, aguas abajo del dominio computacional se ve identificado el proceso de erosión que se genera por altas velocidades que evitan la acumulación de sedimentos en esta zona con un nivel de 17.5m y un nivel del agua de 26.4msnm, la dirección correspondiente al flujo se ve reflejado por las flechas que muestra el modelo, estas representan como el flujo de agua disminuye al entrar al brazo y como este se desvía al chocar con las bancas que muestran alto grado de sedimentación. (Figura 61).

Esta ecuación se resuelve en la totalidad del dominio computacional, debido a que no muestra vacíos de información en el modelo.

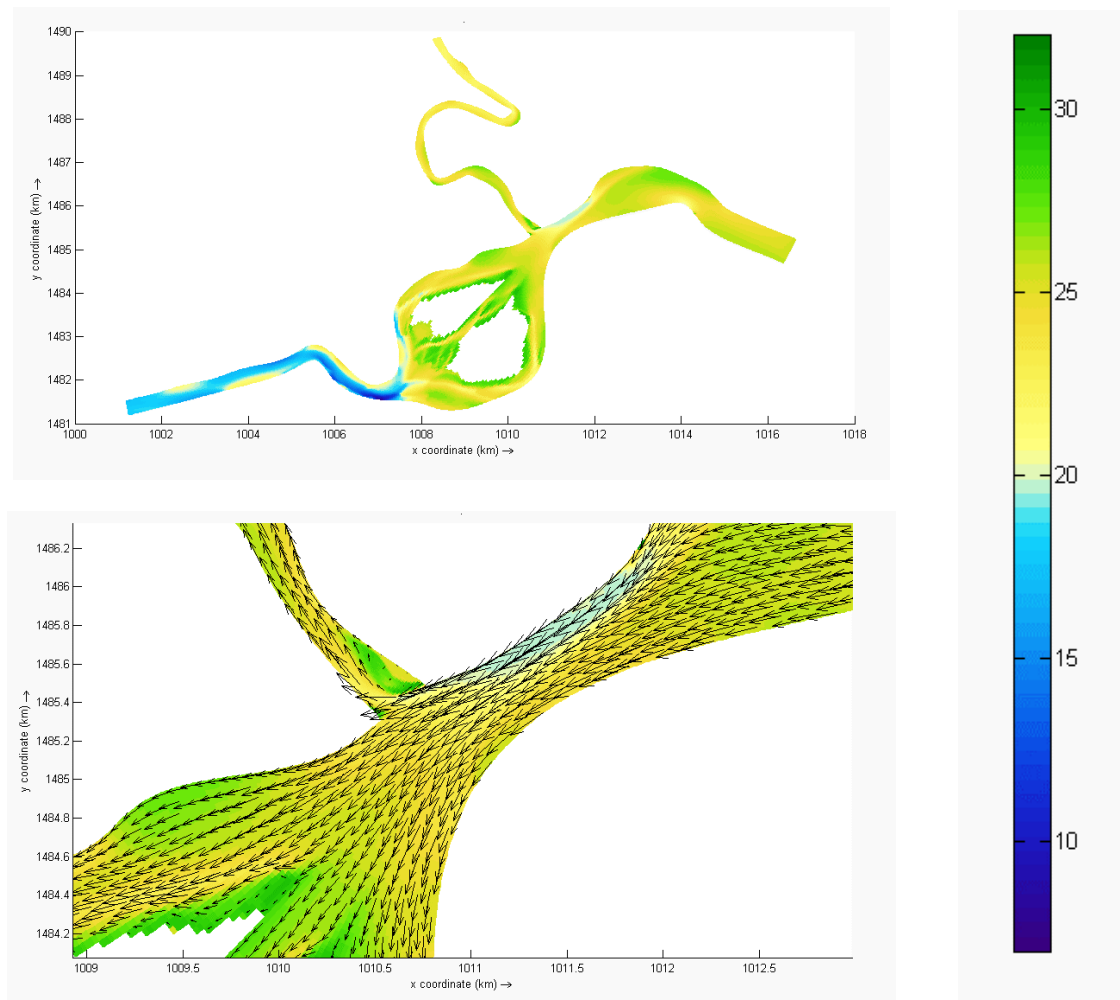


Figura 61: Comportamiento del nivel del lecho (m) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Meyer – Peter - Müller en condiciones máximas.

Fuente: Autores

En cuanto al comportamiento hidrodinámico a la entrada al brazo de Mompox se evidencian velocidades que oscilan en la zona de interés entre 0.5 a 2.5 m/s, donde previamente a la entrada del brazo la velocidad es de 2.3 m/s y en la entrada del brazo es de 1.7m/s, logrando así una desviación del flujo, haciéndolo pasar cerca de la banca izquierda del brazo, pero en un menor porcentaje de agua (Figura 62, Figura 61).

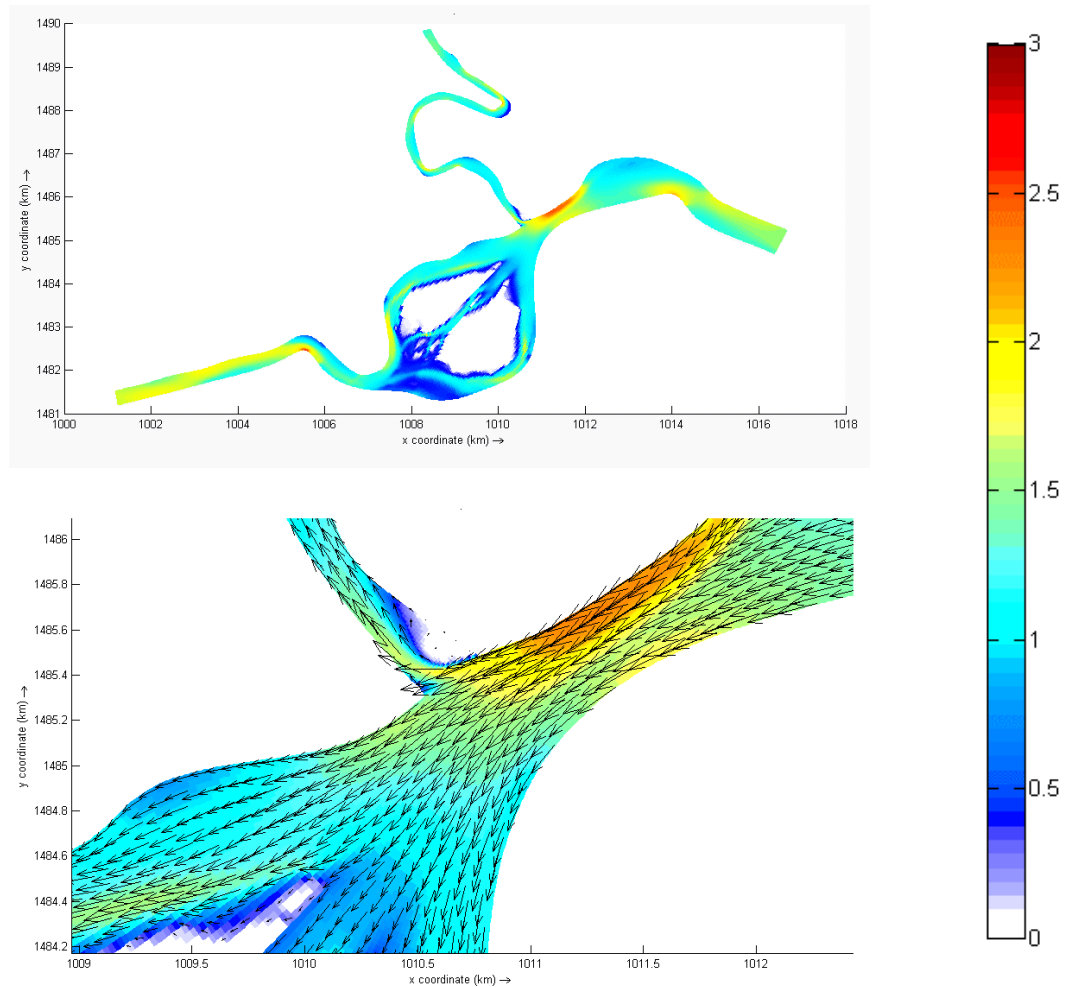


Figura 62: Comportamiento de la velocidad (m/s) en el Modelo de transporte de sedimentos con la ecuación Meyer – Peter - Müller en condiciones máximas.

Fuente: Autores

6.1.3 Relación ecuaciones de transporte de sedimentos

Para saber cuál de las ecuaciones tiene un comportamiento más parecido al observado en campo, se realizó una comparación de los niveles de agua sobre

diferentes secciones transversales del río (Ver Figura 63), teniendo en cuenta el nivel de agua del modelo hidrodinámico con los datos tomados en campo (hidrodinámico base) y los niveles con las diferentes ecuaciones de transporte de sedimentos, para los escenarios mínimo medio y máximo [42].

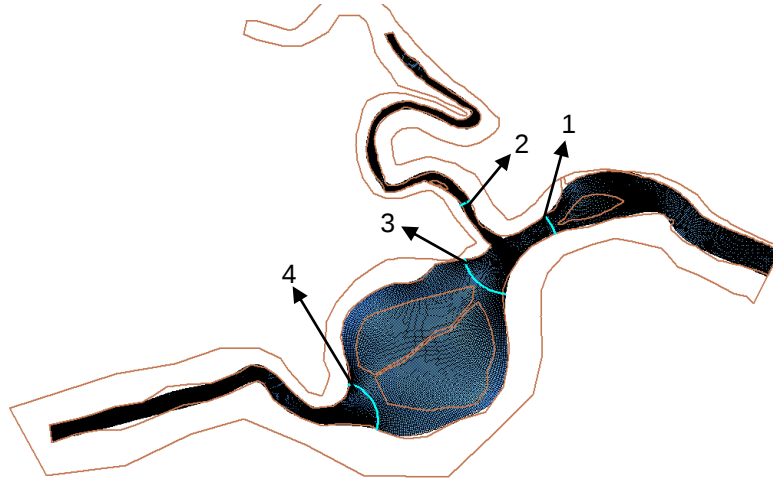
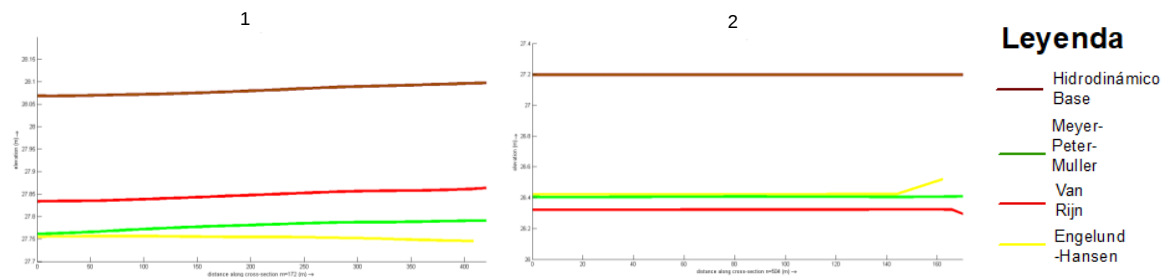


Figura 63: Secciones transversales en la zona de estudio.
Fuente: Autores

6.1.3.1 Mínimo

En este escenario se pudo observar que en la primera y segunda sección transversal tienen un comportamiento similar tanto el hidrodinámico base como con las ecuaciones de transporte de sedimentos, pero para la tercera y cuarta sección, se logra observar que la ecuación que tiene un comportamiento similar a la hidrodinámica base es la de Meyer – Peter – Müller (Figura 64).



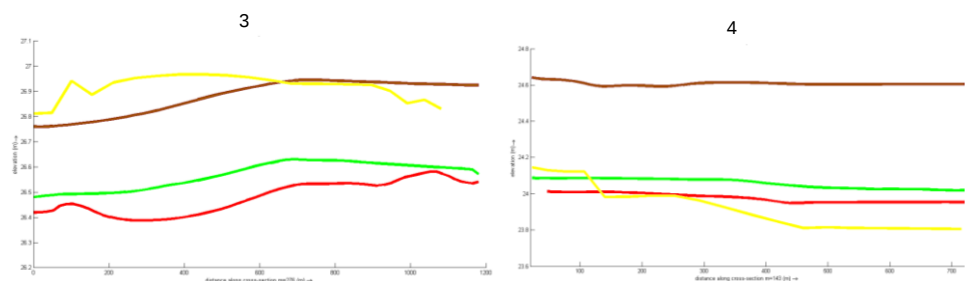


Figura 64: Nivel de la lámina de agua con las diferentes ecuaciones de transporte de sedimentos para el escenario mínimo.

Fuente: Autores

6.1.3.2 Medio

En este escenario se pudo observar que en la primera y segunda sección transversal tienen un comportamiento similar tanto el hidrodinámico base como con las ecuaciones de transporte de sedimentos, aunque la de Meyer – Peter – Müller está más cercana a la hidrodinámica base, pero para la tercera y cuarta sección, se logra observar que no solo estas dos se encuentran más cercanas, sino que también tienen un comportamiento similar(Figura 65).

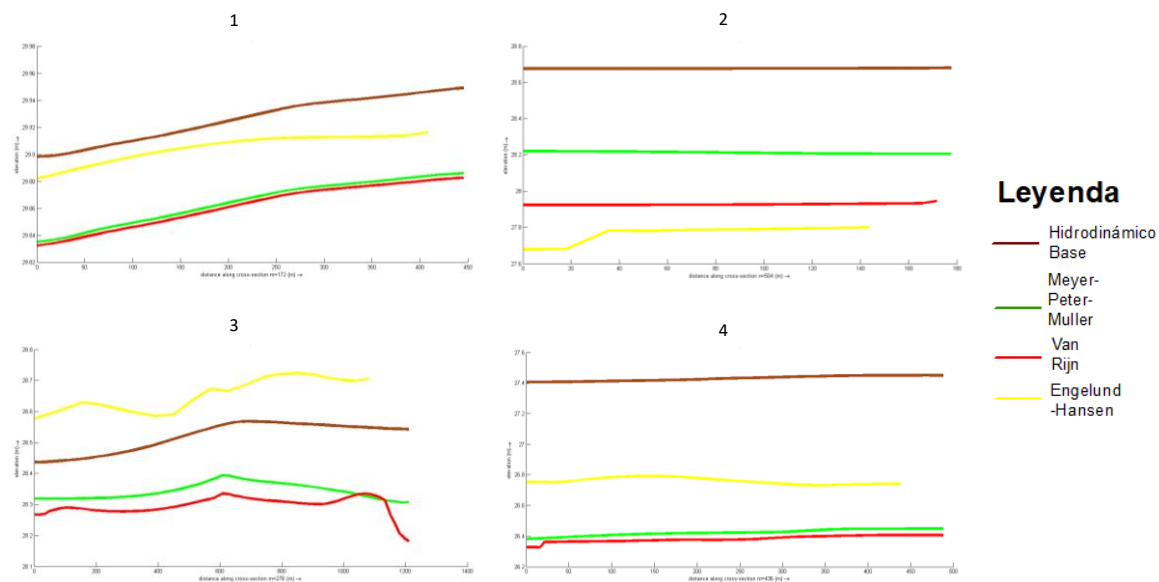


Figura 65: Nivel de la lámina de agua con las diferentes ecuaciones de transporte de sedimentos para el escenario medio.

Fuente: Autores

6.1.3.3 Máximos

En este escenario se pudo observar un comportamiento similar al escenario medio en donde la primera y segunda sección transversal tienen un comportamiento parecido tanto el hidrodinámico base como con las ecuaciones de transporte de sedimentos, aunque la de Meyer – Peter – Müller está más cercana a la hidrodinámica base, pero para la tercera y cuarta sección, se logra observar que no solo estas dos se encuentran más cercanas, sino que también tienen un comportamiento similar (Figura 66).

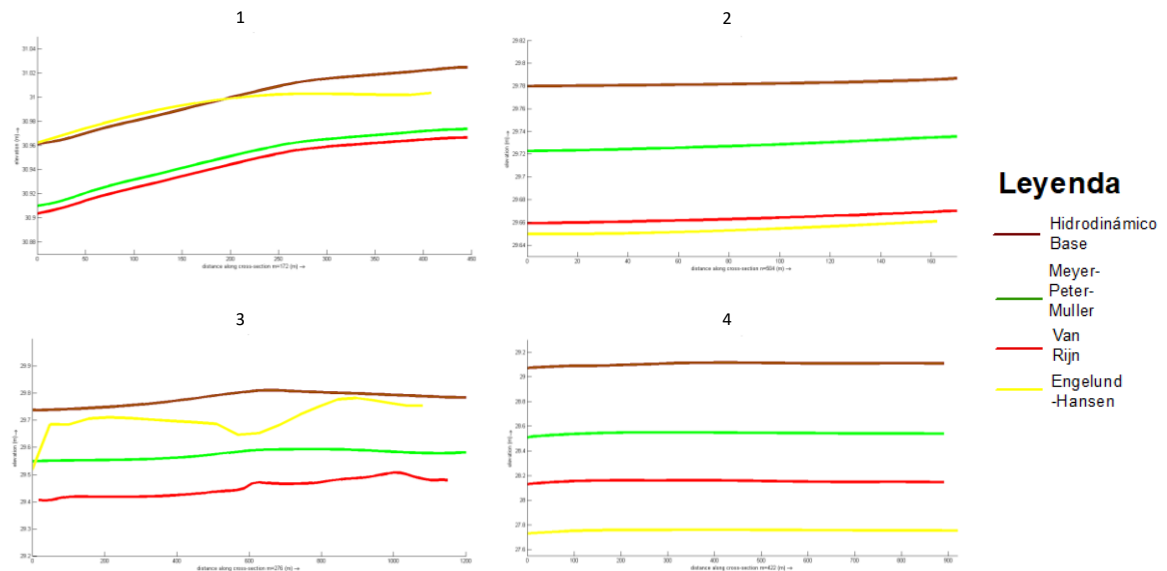


Figura 66: Nivel de la lámina de agua con las diferentes ecuaciones de transporte de sedimentos para el escenario máximo.

Fuente: Autores

Teniendo en cuenta la comparación establecida se establece que la ecuación de Meyer – Peter – Müller, es la más adecuada al área de estudio, debido a que presenta comportamientos similares en los niveles de agua en diferentes secciones transversales, también tiene mejores comportamientos en los modelos, y no genera inestabilidad numérica.

6.1.4 Ecuación seleccionada

Después de determinar que la ecuación que se comportaba de mejor manera es la de Meyer – Peter – Müller, se analizaron los tres escenarios (mínimo, medio y máximo).

En el escenario mínimo se observa un aumento de la velocidad a la altura del municipio de El Banco de aproximadamente 1.2m/s debido a la reducción en el ancho del cauce, la entrada del brazo de Mompox presenta una sedimentación con un nivel de 26m en la banca izquierda y derecha, lo que disminuye la cantidad de flujo, en donde el valor de la velocidad de entrada es de 1.2m/s, sin embargo, va disminuyendo desde la entrada a la salida del brazo (Figura 67).

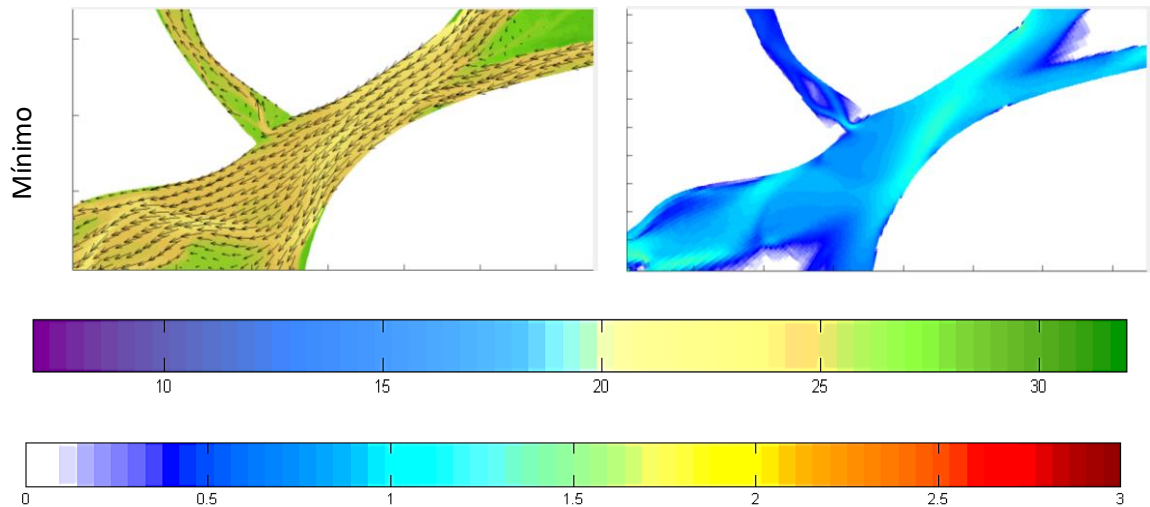


Figura 67: Resultados Hidrodinámicos y de transporte de sedimentos en el escenario mínimo.

Fuente: Autores

Para el escenario medio se observa un aumento de la velocidad antes de la entrada del brazo de aproximadamente 1.8m/s debido a la reducción en el ancho del cauce lo que ocasiona una erosión en la banca derecha con un nivel de 19m, la entrada del brazo evidencia una sedimentación de 28m en la banca derecha lo cual logra disminuir la cantidad de flujo presentando una velocidad de 1.7m/s que va disminuyendo desde la entrada hasta la salida del brazo (Figura 68).

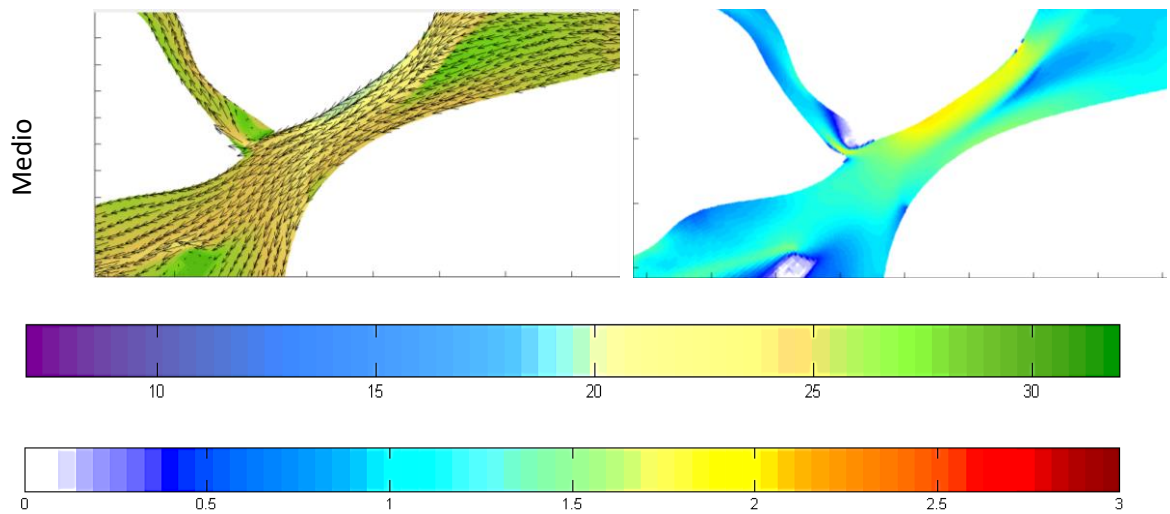


Figura 68: Resultados Hidrodinámicos y de transporte de sedimentos en el escenario medio.

Fuente: Autores

Para el escenario máximo se observa un aumento de la velocidad antes de la entrada del brazo de aproximadamente 2.5m/s debido a la reducción en el ancho del cauce lo que ocasiona una erosión en la banca derecha con un nivel de 17m, la entrada del brazo evidencia una sedimentación de 29m en la banca derecha lo cual logra disminuir la cantidad de flujo presentando una velocidad de 1.9m/s que va disminuyendo desde la entrada hasta la salida del brazo (Figura 69).

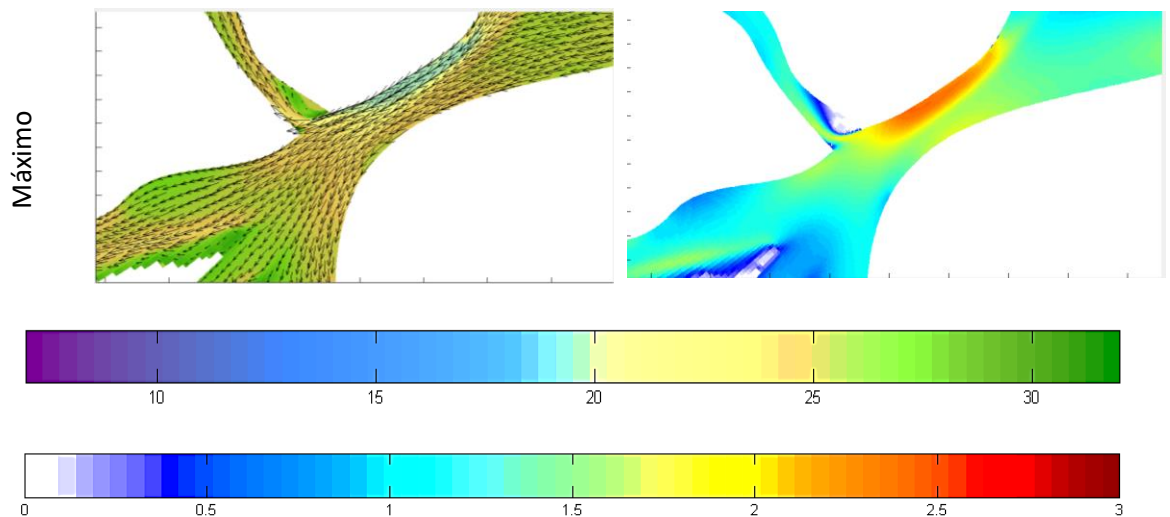


Figura 69: Resultados Hidrodinámicos y de transporte de sedimentos en el escenario máximo.

Fuente: Autores

Los modelos realizados muestran un comportamiento en donde a medida que los caudales son mayores las velocidades y la erosión aumenta antes de la entrada del brazo debido a la reducción del canal, lo que podría generar altos niveles del lecho en el municipio de El Banco; por otra parte, el agua choca contra el sedimento que se encuentra en la entrada del brazo que tiende a depositarse en la banca derecha y reduce el espacio de entrada para el flujo, disminuyendo los niveles de agua en el brazo, afectando las actividades económicas y sociales de la población.

7 IMPACTO SOCIAL

Este trabajo es una de las primeras investigaciones que involucra modelación hidrodinámica y de transporte de sedimentos en la zona de El Banco, Magdalena.

Los resultados de esta investigación van encaminados a dar respuesta a la incógnita que ha sido, el bajo nivel de agua alcanzado en los últimos tiempos en El Banco (Magdalena), haciendo uso de conocimiento en hidrología, modelación hidrodinámica y de transporte de sedimentos, así como los programas HEC-RAS, ArcGis, DELFT3D.

Identificando las posibles causas de la disminución de los niveles en el Brazo de Mompo analizando los diferentes modelos generados hidrodinámico y de transporte de sedimentos, dando un diagnostico que podría ampliarse con más investigación para la generación de soluciones optimas a esta problemática en un futuro.

8 CONCLUSIONES

En el sector del brazo se presenta una sedimentación en la banca derecha, la cual podría impedir el paso del agua en toda la sección transversal, por lo que el agua se desvía hacia el lado izquierdo, esto genera bajos niveles en el brazo de Mompox que afecta las actividades económicas y sociales de la población.

El tramo previo a la entrada del brazo presenta una mayor velocidad a medida que los caudales aumentan, lo cual genera una erosión en la banca derecha que se podría evidenciar en el aumento del nivel del lecho en este sector.

La ecuación que más se acopló al comportamiento hidrodinámico y de sedimentos fue la de Meyer-Peter-Müller, esta ecuación se enfoca en tamaños de partícula con un diámetro de 2 a 65 mm, la cual mostró una mayor estabilidad numérica, debido a que no presento vacíos en los modelos, esto permitió realizar un análisis más detallado del comportamiento de la lámina de agua y de los sedimentos en los diferentes escenarios específicamente en el brazo de Mompox.

Es necesario el procesamiento de datos hidrológicos, para general las entradas y salidas de los modelos hidrodinámicos y de transporte sedimentos, en este caso se usaron las herramientas de las curvas de duración y el tránsito, para poder conseguir las condiciones de frontera que alimentarían los modelos llevados a cabo.

Para la calibración fue necesario una toma de datos en campo, esto con el fin de generar confiabilidad en los resultados y realizar análisis con más información y mayor profundidad, al poder formar la comparación de lo obtenido por el programa con lo observado en campo.

La calibración se llevó a cabo con el objetivo de encontrar el valor optimo del coeficiente de rugosidad de la zona de estudio, este depende de las características morfológicas, el cual se pudo determinar con los datos observados y simulados y así realizar una identificación con el método de búsqueda exhaustiva, para lo cual se obtuvo que el valor optimo del coeficiente es de 0.04.

La plataforma DELFT 3D es una herramienta que tiene módulos para realizar modelaciones hidrodinámicas y de transporte de sedimentos con diferentes ecuaciones, y genera mallas curvilíneas que permiten adaptarse a las curvaturas de los ríos, este programa presento buenos resultados según el punto de control establecido en el que se tomaron los datos en campo, comparado con lo simulado en el programa.

Una posible solución al problema presentado en el área de estudio, es realizar un dragado en donde se está presentando la acumulación de sedimentos, de tal forma que, el agua pueda ingresar por la totalidad de la sección transversal de la entrada del brazo de Mompox.

9 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un trabajo futuro, en el cual basado en el problema encontrado en la entrada del brazo de Mompox, que desarrolle una solución a esta problemática, y así reestablecer totalmente las actividades económicas y sociales a la población en cualquier condición del río tanto mínimo como máximo.

Para tener una mayor confiabilidad en la información brindada por los modelos sería necesario realizar más secciones transversales en el trabajo de campo que permita comparar otros puntos del modelo y entre esas una en la entrada de El Brazo de Mompox que permita confirmar el problema encontrado en este estudio.

Para la generación de cualquier modelo es conveniente realizar una calibración, para poder tener un mayor porcentaje de confiabilidad sobre los resultados encontrados en comparación a si solo se lleva a cabo la simulación.

Para seguir trabajando con esta investigación, se podría llevar a cabo las modelaciones en diferentes programas que manejen las mismas ecuaciones de aguas someras y así comparar el desempeño de las herramientas con respecto a los resultados que se obtengan.

10 REFERENCIAS

- [1] M. S. Ramírez y A. O. Amaya, «El río Magdalena: Localización, origen y recorrido,» 2008.
- [2] CORMAGDALENA, «ATLAS CUENCA DEL RÍO MAGDALENA».
- [3] «DEPOSITO DE DOCUMENTOS DE LA FAO,» [En línea]. Available: <http://www.fao.org/docrep/w7452s/w7452s01.htm>. [Último acceso: 2018].
- [4] Asociacion Mundial Del Agua y CEPAL, «INFORME NACIONAL SOBRE LA GESTION DEL AGUA EN COLOMBIA,» Recursos Hídricos, Agua Potable y Saneamiento, Colombia, 2000.
- [5] J. S. Gutiérrez Patiño, «GEOPOLÍTICA, RECURSOS NATURALES Y ZONAS ESTRATÉGICAS EN COLOMBIA,» Universidad Militar Nueva Granada, Colombia, 2015.
- [6] OFICINA DE INFORMACIÓN DIPLOMÁTICA, «COLOMBIA República De Colombia,» Ministerio de Asuntos Exteriores, 2017.
- [7] RED Europea de Hermandad y SOLIDARIDAD con Colombia, «ANTECEDENTES, CONTEXTO Y JUSTIFICACIÓN,» Red Colombia.
- [8] Procuraduría General de la Nación, «RIO MAGDALENA Informe social, economico y ambiental,» Barranquilla, 2013.
- [9] Atlas cuenca del Río Magdalena.
- [10] CORMAGDALENA, «Caracterización física demográfica, social y economica de los municipios ribereños de la jurisdiccion de la corporacion autonoma regional del Río grande de la Magdalena,» 2013.
- [11] M. OLIVEROS DEL VILLAR, «Plan de Desarrollo Municipal “CAPACIDAD, GESTIÓN Y DESARROLLO”,» REPUBLICA DE COLOMBIA DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA MUNICIPIO DE EL BANCO, 2004-2007.
- [12] Elpaís, «Ideam mantiene alerta por bajos caudales de los ríos Cauca y Magdalena,» *El País.com.co*, 25 enero 2016.
- [13] E. Bernal Duffo, «El Río Magdalena: Escenario primordial de la patria,» revista credencial , 2013.

- [14] L. C. García Lozano, «Región de Mompox: síntesis de estudios de evaluación ambiental regional para el sector transporte,» Medellín, 2001.
- [15] El Tiempo, «La lenta agonía del río Magdalena ante fenómeno del Niño,» 2016.
- [16] L. O. Gámez, «Sesenta mil personas en emergencia por falta de agua en El Banco, Magdalena,» Blue Radio, 2016.
- [17] «Amigos de El Banco Magdalena, Ciudad Imperio de la Cumbia,» 2013. [En línea]. Available: <http://elbancomagdalena.blogspot.com.co/2008/03/se-inicia-construccion-del-dique.html>.
- [18] J. L. Sanchez Lozano, J. J. Oliveros Acosta, J. A. Escobar Vargas, M. Yossef, C. Cardona y C. Garay, «NUMERICAL SIMULATION OF FLOW AND SEDIMENT TRANSPORT DYNAMICS ON THE MAGDALENA RIVER SECTION OF BARRANCABERMEJA-LA COQUERA (COLOMBIA),» IAHR, 2015.
- [19] PROCURADURIA GENERAL DE LA NACION, «RIO MAGDALENA Informe Social, Economico y Ambiental,» Procuraduría Delegada para Asuntos Ambientales y Agrarios, Barranquilla, 2013.
- [20] F. T. Bejarano, H. Ramírez-León y C. R. Cuevas, «Validación de un modelo hidrodinámico y calidad del agua para el Río Magdalena, en el tramo adyacente a Barranquilla, Colombia,» Barranquilla, 2015.
- [21] O. J. B. Ruiz, «Modelación matemática de tres posibles escenarios de operación de un embalse y su efecto en la dinámica hídrica aguas abajo. caso hidrosogomoso y la comunidad de peces de la cienaga el llanito(Barrancabermeja, Colombia),» Bogotá, Colombia , 2015.
- [22] A. F. M. Muñoz, «Modelación del Tránsito de crecientes con el HEC-HMS y HEC-RAS en un tramo del Río Medellín,» Envigado, Colombia , 2013.
- [23] I. A. Quintero Espinosa, «Estudio del Transporte de Sedimentos en el Río Grande de la Magdalena: Canal de acceso al Puerto de Barranquilla,» Universidad Nacional Autónoma De México, México, 2005.
- [24] O. R. Lazo, «Sistema de Bibliotecas- Sistemas de información geográfica,» [En línea]. Available: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/indata/v02_n2/sistemas.htm#TIPOS. [Último acceso: Enero 2018].

- [25] INEGI, «INEGI- Modelos Digitales de Elevación,» [En línea]. Available: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx>. [Último acceso: Enero 2018].
- [26] M.Farjas, «Levntamientos Batimétricos».
- [27] Sónar, «Batimetrías».
- [28] A. F. Breña Puyol y M. A. Jacobo Villa, «Principios y fundamentos de la hidrologia superficial,» Universidad Autonoma Metropolitana, Mexico, 2006.
- [29] IDEAM, «modelación Hidrológica».
- [30] L. CARVAJAL y E. ROLDÁN, «CALIBRACION DEL MODELO LLUVIA-ESCORRENTIA AGREGADO GR4J APLICACIÓN: CUENCA DEL RÍO ABURRÁ,» *Dyna* , nº 152, p. 15, 2007 .
- [31] «ANÁLISIS DE CAUDALES,» p. CAPITULO 7 .
- [32] J. Sanchez San Roman, «Transito de Hidrogramas,» Universidad Salamanca, España, 2013.
- [33] A. F. MARÍN MUÑOZ, «MODELACIÓN DEL TRÁNSITO DE CRECIENTES CON EL HEC-HMS Y HEC-RAS EN UN TRAMO DEL RÍO MEDELLÍN,» Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado, 2013.
- [34] Real, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad, «Hidrodinámica».
- [35] N. Triviño Leon, «Modelacion numerica bidimensional de escenarios de inundacion en el municipio Nechi (Antioquia),» Pontificia Universidad Javeriana, Bogota, 2015.
- [36] M. Garcia, P. Basile y H. Riccardi, «Modelación hidrodinámica de sistema cauce-planicie con celdas amorfas, de tramo del río Paraná Inferior,» Universidad Nacional de Rosario, Argentina , 2000.
- [37] M. Garcia, P. Basile , G. Riccardi y H. Stenta, «Modelacion Hidrodinamica de sistemas Cauce-Planicie de inundacion en grandes rios aluviales de llanura.,» Argentina, 2007.
- [38] P. K. Kundu y I. M. Cohen, «FLUID MECHANICS,» Academic Press, California, 1990.
- [39] D. Wirasaeta, E. Kubatko, C. Michoski, S. Tanaka, J. Westerink y C. Dowson, «Discontinuous Galerkin Methods with Nodal and Hybrid Modal/Nodal Triangular, Quadrilateral, and Polygonal Elements for Nonlinear Shallow Water Flow,» U.S.A, 2014.

- [40] M. Taylor, A. Chen y S. Ashby, «Statistical models for predicting rainfall in the Caribbean,» 2005.
- [41] D. Hydraulics, «Delft3D-FLOW User Manual.,» DELTARES, 2014.
- [42] J. J. Oliveros Acosta, «Construcción de un modelo numérico hidrodinámico y de transporte de sedimentos en obras de encauzamiento en el tramo Barrancabermeja - La Coquera del Río Magdalena,» Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2015.
- [43] P. A. Basile, «REVISIÓN DE ECUACIONES DE TRANSPORTE MODIFICADAS PARA SEDIMENTOS HETEROGÉNEOS,» Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas., CÓRDOBA, 2000.
- [44] L. Castillo Elsitdié, J. Martín Vide y M. D. Marín Martín, «Coeficientes de resistencia, transporte de sedimentos y,» Madrid, 2009.
- [45] R. Ramirez, «Ecuaciones en Derivadas Parciales,» Mat-Web, [En línea]. Available: <http://www.ma1.upc.edu/~ed/edp.pdf>.
- [46] J. J. O. Acosta, *Construcción de un modelo numérico hidrodinámico y de transporte de sedimentos en obras de encauzamiento en el tramo Barrancabermeja- La Coquera del Río Magdalena*, Bogotá, 2015.
- [47] Pontificia Universidad Javeriana , «Protocolo para salidas de campo».
- [48] E. A. Dominguez Calle, «Protocolo de modelación matemática de procesos hidrológicos,» Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM , Bogotá, 2000.
- [49] E. Domínguez, C. W. Dawson, . A. Ramírez y R. J. Abrahart, «THE SEARCH FOR ORTHOGONAL HYDROLOGICAL MODELLING METRICS: A CASE STUDY OF TWENTY MONITORING STATIONS IN COLOMBIA,» Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2010.
- [50] L. G. Cruz Velasco, «Facultad de ingeniería Civil -Mec. Suelos I (Geotecnología),» Universidad del Cauca.
- [51] M. L. M. SANTAENGRACIA, «CURVAS DE GASTO - DETERMINACIÓN Y VARIACIÓN TEMPORAL».
- [52] E. Alfaro, D. Hernandez y A. Benzanilla, «Uso de un modelo de aguas someras para analizar la influencia del Atlántico Tropical Norte y del Pacífico Ecuatorial del Este sobre la circulación

atmosferica en los mares Intra-Americanos,» *Revista de Climatologia*, vol. 7, nº 1578-8768, pp. 16-26, 2007.