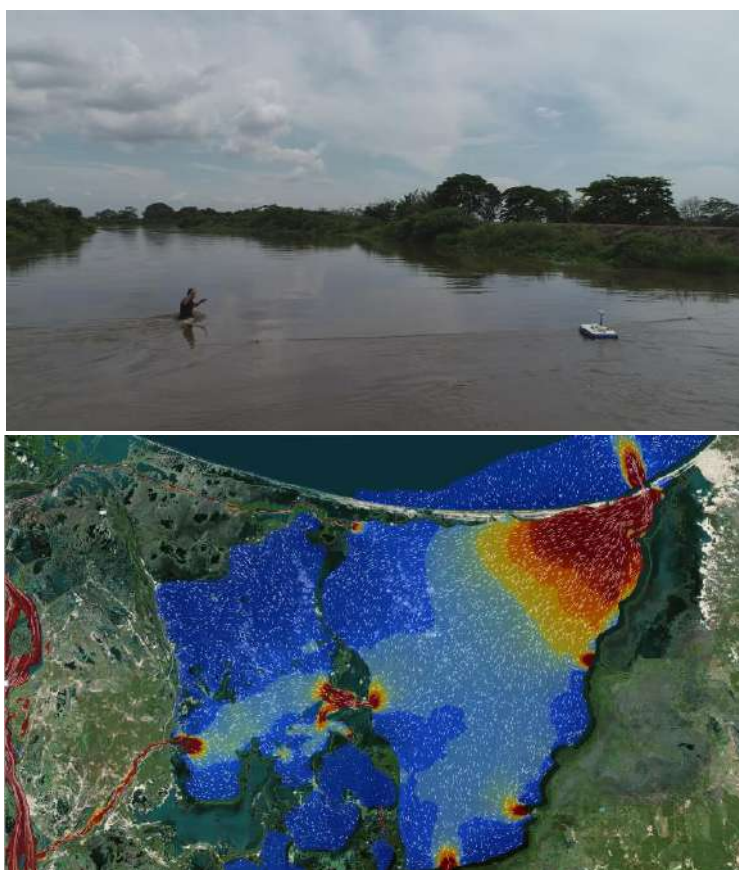




CONVENIO INTERADMINISTRATIVO No. 209 DE 2017 PRY-GEO-018-17

Estudio integral de la Ciénaga Grande de Santa Marta - Fase II (B): modelaciones hidráulica, hidrosedimentológica y biogeoquímica

Anexo 3.2. Modelo hidrodinámico para la condición actual y escenarios (climáticos y nuevas aperturas)



Santa Marta, Diciembre 7 de 2018

Convenio CORPAMAG-INVEMAR 209

CUERPO DIRECTIVO

Director

Francisco Armando Arias Isaza

Subdirector Coordinación de Investigaciones (SCI)

Jesús Antonio Garay Tinoco

Subdirectora de Recursos y Apoyo a la Investigación (SRA)

Sandra Rincón Cabal

Coordinadora

Coordinación e Información para la Gestión Marina y Costera (GEZ)

Paula Cristina Sierra Correa

Coordinador

Programa Biodiversidad y Ecosistemas Marinos (BEM)

David Alonso Carvajal

Coordinador

Programa Valoración y Aprovechamiento de Recursos Marinos Vivos (VAR)

Mario Rueda Hernández

Coordinadora

Programa Calidad Ambiental Marina (CAM)

Luisa Fernanda Espinosa Díaz

Coordinadora

Programa de Geociencias Marinas (GEO)

Constanza Ricaurte Villota

Coordinador Servicios Científicos (CSC)

Julián Mauricio Betancourt

Programa Geociencias Marinas y Costeras (GEO)

Constanza Ricaurte Villota

Martha Bastidas Salamanca

Contratistas GEO

Fabián Mauricio Caicedo Carrascal

Julián Dario Arbeláez Salazar

Imagen de portada:

Río Fundación

Mapa de velocidades y trayectorias de flujo del modelo Hidrodinámico



El INVEMAR, realiza investigación básica y aplicada de los recursos naturales renovables y del medio ambiente en los litorales y ecosistemas marinos y oceánicos de interés nacional con el fin de proporcionar el conocimiento científico necesario para la formulación de políticas, la toma de decisiones y la elaboración de planes y proyectos que conduzcan al desarrollo de éstas, dirigidos al manejo sostenible de los recursos, a la recuperación del medio ambiente marino y costero y al mejoramiento de la calidad de vida de los colombianos, mediante el empleo racional de la capacidad científica del instituto y su articulación con otras entidades públicas y privadas.

Calle 25 No. 2 -55 Playa Salguero – Rodadero, Santa Marta, Colombia. PBX: (57) (5) 4328600

Fax: (57) (5) 4380801, [http:// www.invemar.org.co](http://www.invemar.org.co)

CLÁUSULA DERECHOS DE AUTOR

"De acuerdo con la Decisión Andina 351 de 1993, Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993 y demás normas modificatorias, complementarias y concordantes la presente propuesta de carácter científico goza de protección legal, siendo el INVEMAR el único titular de los derechos patrimoniales de autor, por lo que tiene el control sobre cualquier forma de utilización y ostenta la facultad exclusiva para autorizar o prohibir cualquier explotación que sobre la obra se realice, incluyendo la reproducción, comunicación, distribución pública, traducción, adaptación, arreglo o cualquiera otra forma de la obra. Por todo lo anterior para su utilización se requerirá autorización previa y expresa, no requerirá autorización para el ejercicio del derecho de cita en las reproducciones parciales para lo cual se deberá indicar expresamente la fuente y la autoría de INVEMAR"

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	10
2	OBJETIVOS	11
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	11
2.1.1	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>11</i>
3	METODOLOGÍA	12
3.1	INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	12
3.1.1	<i>Información topobatimétrica</i>	<i>13</i>
3.1.2	<i>Levantamiento de los ceros de mira.....</i>	<i>20</i>
3.1.3	<i>Registros de cotas de lámina de agua</i>	<i>22</i>
3.1.4	<i>Registros del comportamiento del nivel del mar.....</i>	<i>25</i>
3.2	MODELO HIDRODINÁMICO PARA LOS AÑOS 2017 Y 2018.....	27
3.2.1	<i>Descripción detallada de la topología del modelo hidrodinámico para los años 2017 y 2018</i>	<i>28</i>
4	RESULTADOS	32
4.1	CALIBRACIÓN	32
4.1.1	<i>Estación Renegado</i>	<i>32</i>
4.1.2	<i>Estación Aguas Negras.....</i>	<i>33</i>
4.1.3	<i>Estación Clarín Los Cocos.....</i>	<i>33</i>
4.1.4	<i>Estaciones Nueva Venecia y Aguas Vivas.....</i>	<i>34</i>
4.2	ALGUNOS RESULTADOS RELEVANTES	37
4.2.1	<i>Influencia del nivel del mar en los niveles del complejo CGSM en marzo de 2018</i>	<i>37</i>
4.2.2	<i>Mapa de velocidades máximas y mínimas.....</i>	<i>39</i>
4.2.3	<i>Mapa de profundidades máximas y mínimas.....</i>	<i>41</i>
4.3	SERIES DE TIEMPO DE CAUDALES PARA EL BALANCE HÍDRICO CONDICIÓN ACTUAL	43
4.3.1	<i>Caño Renegado</i>	<i>43</i>
4.3.2	<i>Caño Alfandoque</i>	<i>43</i>
4.3.3	<i>Caño Aguas Negras</i>	<i>44</i>
4.3.4	<i>Caño Clarín Los Cocos.....</i>	<i>44</i>
4.3.5	<i>Caño Grande</i>	<i>45</i>
4.3.6	<i>Caño Boca de la Barra.....</i>	<i>45</i>
4.3.7	<i>Serie de tiempo de cotas de lámina de agua</i>	<i>46</i>
4.4	MODELO HIDRODINÁMICO CONDICIÓN NORMAL O MEDIA.....	46

4.4.1	<i>Topología del modelo hidrodinámico de condición normal o media</i>	46
4.4.2	<i>Caño Renegado</i>	49
4.4.3	<i>Caño Alfandoque</i>	49
4.4.4	<i>Caño Aguas Negras</i>	50
4.4.5	<i>Caño Clarin Los Cocos</i>	50
4.4.6	<i>Caño Grande</i>	50
4.4.7	<i>Caño Boca de la Barra</i>	51
4.4.8	<i>Serie de tiempo cota de lámina de agua CGSM</i>	51
4.5	MODELO HIDRODINÁMICO CONDICIÓN NIÑO	52
4.5.1	<i>Caño Renegado</i>	54
4.5.2	<i>Caño Alfandoque</i>	55
4.5.3	<i>Caño Aguas Negras</i>	55
4.5.4	<i>Caño Clarín</i>	56
4.5.5	<i>Caño Grande</i>	56
4.5.6	<i>Boca de la Barra</i>	57
4.5.7	<i>Cotas de Lámina de agua CGSM</i>	57
4.6	MODELO HIDRODINÁMICO CONDICIÓN NIÑA	58
4.6.1	<i>Validación con la extensión de inundación</i>	62
4.6.2	<i>Estimación de caudales de desbordamiento del río Magdalena</i>	63
4.7	MODELO HIDRODINÁMICO APERTURA DE CAÑO EL SALADO	64
4.7.1	<i>Caudales estimados Caño El Salado</i>	65
4.7.2	<i>Efecto de El Salado en Caño Grande</i>	66
4.8	MODELO HIDRODINÁMICO APERTURA DE BARRA VIEJA	66
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
6	REFERENCIAS	71

Índice de Figuras

Figura 3-1 Levantamientos batimétricos-----	14
Figura 3-2 Batimetría Río Aracataca-----	15
Figura 3-3 Batimetría Río Fundación -----	15
Figura 3-4 Batimetría Río Sevilla-----	16
Figura 3-5 Modelo Digital de Terreno versión 1.0-----	16
Figura 3-6 Secciones batimétricas del río Magdalena -----	17
Figura 3-7 Modelo Digital de Terreno versión 2.0 complementado -----	18
Figura 3-8 Sección transversal caño Renegado antes y después de la corrección-----	18
Figura 3-9 Sección transversal caño Clarín antes y después de la corrección-----	19
Figura 3-10 Modelo Digital de Terreno versión 3.0 complementado y corregido -----	19
Figura 3-11 Localización estaciones hidrológicas de monitoreo de la CGSM -----	20
Figura 3-12 Ejemplo de levantamiento de la cota del cero de una mira o estación hidrológica -----	21
Figura 3-13 Procedimiento levantamiento del cero de mira de la estación del río Fundación. Fuente: (GUTIERREZ, 2018)-----	21
Figura 3-14 Serie de tiempo de Cota de Lámina de agua de la estación Renegado -----	22
Figura 3-15 Serie de tiempo de Cota de Lámina de agua de la estación Aguas Negras---	23
Figura 3-16 Serie de tiempo de Cota de Lámina de agua de la estación Nueva Venecia--	23
Figura 3-17 Serie de tiempo de Cota de Lámina de agua de la estación Clarín Los Cocos	23
Figura 3-18 Serie de tiempo de Cota de Lámina de agua de la estación Aguas Vivas -----	23
Figura 3-19 Series de tiempo de cota de lámina de agua de todas las estaciones-----	24
Figura 3-20 Series de tiempo de cotas de lámina de agua de las estaciones del sector norte -----	24
Figura 3-21 Series de tiempo de cotas de lámina de agua de los ríos de la margen oriental -----	24
Figura 3-22 Series de tiempo del mareógrafo instalado en Santa Marta-----	25
Figura 3-23 Localización del mareógrafo Santa Marta -----	25
Figura 3-24 Registros del nivel del mar para los años 2017 a 2018 -----	26
Figura 3-25 Registros del nivel del mar para los meses de enero y febrero de 2018 -----	26
Figura 3-26 Topología del modelo hidrodinámico-----	27
Figura 3-27 Vista en perfil y frontal aguas debajo de la compuerta en el caño Renegado	28
Figura 3-28 Perfil longitudinal Caño Renegado-----	29
Figura 3-29 Caño aguas negras-----	29
Figura 3-30 Caño Aguas Negras antes y después del rompimiento-----	30

Figura 3-31 Series de tiempo de caudales de los ríos-----	30
Figura 4-1 Cotas de Lámina de Agua registrada y simulada estación Renegado -----	32
Figura 4-2 Caudales aforados y simulados estación Renegado-----	32
Figura 4-3 Cotas de Lámina de Agua registrada y simulada estación Aguas Negras-----	33
Figura 4-4 Caudales aforados y simulados estación Aguas Negras -----	33
Figura 4-5 Cotas de Lámina de Agua registrada y simulada estación Clarín Los Cocos ---	34
Figura 4-6 Caudales aforados y simulados estación Clarín Los Cocos -----	34
Figura 4-7 Cotas de Lámina de Agua registrada y simulada estación Nueva Venecia ----	35
Figura 4-8 Series de tiempo de Cotas de lámina de agua estación Aguas Vivas-----	35
Figura 4-9 Caudales no registrados en la estación Fundación Abajo 2017 a 2018 -----	35
Figura 4-10 Caudales no registrados en la estación Fundación Abajo para noviembre de 2017 -----	36
Figura 4-11 Caudales registrados en la estación Aracataca Abajo para noviembre de 2017 -----	36
Figura 4-12 Caudales registrados en la estación Sevilla abajo para noviembre de 2017--	36
Figura 4-13 Serie de tiempo del nivel medio del mar relacionado con Nueva Venecia y Aguas Vivas -----	37
Figura 4-14 Serie de tiempo del nivel medio del mar de Febrero a Mayo de 2018-----	38
Figura 4-15 Mapa de velocidades y direcciones de flujo para el 05 de marzo de 2018----	38
Figura 4-16 Mapa de velocidades y direcciones de flujo para la Boca de la Barra.-----	39
Figura 4-17 Mapa de velocidades y direcciones de flujo para Caño Grande-----	39
Figura 4-18 Mapa de velocidades para el 21 de mayo de 2018 8:00 pm -----	40
Figura 4-19 Mapa de velocidades para el 28 de febrero de 2018 11:00 pm -----	41
Figura 4-20 Mapa de profundidades mínimas -----	42
Figura 4-21 Mapa de profundidades máximas-----	42
Figura 4-22 Serie de tiempo de caudales Caño Renegado -----	43
Figura 4-23 Serie de tiempo de caudales Caño Alfandoque-----	43
Figura 4-24 Serie de tiempo de caudales Caño Aguas Negras-----	44
Figura 4-25 Serie de tiempo de caudales Caño Clarín Los Cocos-----	44
Figura 4-26 Serie de tiempo de caudales caño Grande -----	45
Figura 4-27 Serie de tiempo de caudales caño Grande -----	45
Figura 4-28 Serie de tiempo de cotas de lámina de agua CGSM -----	46
Figura 4-29 Serie de tiempo de caudales del río Magdalena para el año medio 2013-----	47
Figura 4-30 Series de tiempo caudales de los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla año medio 2013 -----	47

Figura 4-31 Registro de nivel del mar estación Santa Marta DIMAR 2013-----	48
Figura 4-32 Topología Modelo hidrodinámico condición normal o media -----	48
Figura 4-33 Serie de tiempo de caudales caño Renegado condición media 2013 -----	49
Figura 4-34 Serie de tiempo de caudales caño Alfandoque condición media 2013-----	49
Figura 4-35 Serie de tiempo de caudales caño Aguas Negras condición media -----	50
Figura 4-36 Serie de tiempo de caudales caño Clarín Los Cocos condición media -----	50
Figura 4-37 Serie de tiempo de caudales caño Grande condición media -----	51
Figura 4-38 Serie de tiempo de caudales Boca de la Barra condición media 2013 -----	51
Figura 4-39 Serie de tiempo de cotas de lámina de agua CGSM condición media 2013---	52
Figura 4-40 Serie de tiempo de caudales del río Magdalena para el año niño 2015 -----	52
Figura 4-41 Series de tiempo caudales de los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla año niño 2015 -----	53
Figura 4-42 Registro de nivel del mar estación Santa Marta DIMAR 2015-----	53
Figura 4-43 Topología Modelo hidrodinámico condición el Niño-----	54
Figura 4-41 Serie de tiempo de caudales caño Renegado condición el Niño -----	54
Figura 4-45 Serie de tiempo de caudales caño Alfandoque condición el Niño 2015-----	55
Figura 4-46 Serie de tiempo de caudales caño Aguas Negras condición el Niño 2015 ----	55
Figura 4-47 Serie de tiempo de caudales caño Clarín condición el Niño 2015 -----	56
Figura 4-48 Serie de tiempo de caudales caño Grande condición el Niño 2015 -----	56
Figura 4-49 Serie de tiempo de caudales Boca de la Barra condición el Niño 2015-----	57
Figura 4-50 Serie de tiempo de cotas de lámina de agua CGSM condición el Niño 2015 -	57
Figura 4-51 Serie de tiempo de caudales del río Magdalena para el año niña 2011 -----	58
Figura 4-52 Series de tiempo caudales de los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla año niña 2011 -----	59
Figura 4-53 Registro de nivel del mar estación CIOH Cartagena 2011 -----	59
Figura 4-54 Topología Modelo hidrodinámico condición la Niña 2011 -----	60
Figura 4-55 Extensión de inundación procesada por IDEAM-----	60
Figura 4-56 Dique margen derecha río Magdalena -----	61
Figura 4-57 Estructuras de control dique margen derecha sobre cada caño -----	61
Figura 4-58 Variación espacial del n de Manning en la malla computacional-----	62
Figura 4-59 Validación con la extensión de inundación IDEAM niña 2011 -----	62
Figura 4-53 Desbordamiento margen derecha río Magdalena 17 de enero de 2011-----	63
Figura 4-61 Serie de tiempo de caudales margen occidental del complejo CGSM-----	64
Figura 4-62 Caños que se encuentran en proceso de dragado -----	64

Figura 4-57 Topología Modelo hidrodinámico	65
Figura 4-64 Serie de tiempo de caudales Caño el Salado	65
Figura 4-65 Serie de tiempo Caño Grande con caño el Salado	66
Figura 4-66 Localización general de Paleocauces	66
Figura 4-67 Localización específica Paleocauce Barra Vieja	67
Figura 4-68 Mapa de velocidades y trayectorias de flujo sin Paleocauce	67
Figura 4-69 Mapa de velocidades y trayectorias de flujo con Paleocauce	68
Figura 4-70 perfil Longitudinal CGSM con y sin Paleocauce	68

Índice de Tablas

Tabla 3-1 Levantamientos batimétricos	14
Tabla 3-2 Cotas de los cerros de mira de las estaciones.....	22

"Los deltas son ambientes hidrodinámicos y sedimentológicos de transición, sujetos a las influencias tanto fluviales como oceánicas. Por lo tanto, son sitios frágiles donde numerosos parámetros influyen sobre su equilibrio. Siendo además lugares privilegiados para las instalaciones humanas, es necesario respecto a ellos, la adquisición de un conocimiento científico preciso con el fin de asegurar una buena gestión".

Jacques Gayet. Citado por Juan D. Restrepo Angel.

"Las lagunas costeras son por ende fenómenos de origen geológico reciente y de vida corta, estando en permanente alteración por erosión y depósito de sedimentos y por fluctuaciones del nivel del mar de carácter eustático (debidos a cambios del volumen de agua del océano) e isostáticos (debidos a cambios del nivel de la tierra). Además, las descargas de los ríos afluentes y los rangos de las mareas están variando permanentemente, por lo que las lagunas costeras nunca logran alcanzar un estado de equilibrio definitivo. Son sistemas complejos de vida efímera, en permanente interacción y modificación, y fácilmente afectables por acciones externas".

Salvador F. Farreras S.

1 Introducción

Se presenta una descripción y análisis de la información disponible para la elaboración del modelo hidrodinámico y de transporte de sedimentos. Dicha información consiste principalmente en series de tiempo de las cotas de lámina de agua, series de tiempo de caudal para cada una de las estaciones, aforos sólidos, granulometrías del material en suspensión y granulometrías de material del fondo de la Ciénaga de Pajaral y cuerpo principal de la Ciénaga Grande de Santa Marta.

Con esta nueva información fue posible elaborar el modelo hidrodinámico para los años 2017 y 2018, el cual fue calibrado y validado teniendo en cuenta las series de tiempo de las cotas de lámina de agua de cada una de las estaciones hidrológicas que monitorean el complejo cenagoso y cada uno de los tributarios. A partir de este modelo se pretende elaborar un modelo de transporte y deposición de sedimentos que incluya la influencia del viento, tanto para la condición actual, para los escenarios prospectivos de apertura de nuevos canales y escenarios de variabilidad climática.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Elaboración del modelo hidrodinámico que sirva como insumo para el balance hídrico del complejo CGSM y el modelo hidrosedimentológico del complejo CGSM para los escenarios prospectivos de apertura de nuevos canales y paleocauces.

2.1.1 *Objetivos específicos*

A partir de los registros de niveles de las estaciones hidrológicas y mareográficas y las cotas del cero de mira de las estaciones, elaborar las series de tiempo de cotas de lámina de agua para cada una de las estaciones.

Elaborar el modelo de hidrodinámico para la condición actual 2017 y 2018 debidamente calibrado y validado con la información hidrológica recopilada y verificada en cada una de las estaciones.

Generar las series de caudales necesarias para la elaboración del balance hídrico para cada uno de los caños y cuerpos de agua que interactúan con el complejo CGSM, para el escenario de condición actual 2017 – 2018.

A partir de las series de caudales generadas en el componente de hidrología elaborar el modelo hidrodinámico para el escenario climático de condición media, es decir, sin fenómenos de variabilidad climática.

A partir de las series de caudales generadas en el componente de hidrología elaborar el modelo hidrodinámico para el escenario climático condición El Niño o volúmenes de ingreso de agua dulce mínimos.

A partir de las series de caudales generadas en el componente de hidrología elaborar el modelo hidrodinámico para el escenario climático condición La Niña o volúmenes de ingreso de agua dulce máximos.

Elaborar el modelo hidrodinámico con apertura de canales y paleocauces, para el escenario climático de condición normal, es decir, sin fenómenos de variabilidad climática.

3 Metodología

En el presente capítulo se presenta de manera detallada la metodología utilizada para la elaboración del modelo hidrodinámico del complejo cenagoso Ciénaga Grande de Santa Marta el cual sirve de base para la elaboración del balance hídrico y del modelo de transporte y depositación de sedimentos.

En general la metodología llevada a cabo parte de la información disponible para la elaboración de un modelo hidrodinámico calibrado para los años 2017 y 2018 y a partir de dicho modelo se elaboraron los demás escenarios de variabilidad climática y de apertura de canales, siguiendo los pasos mostrados a continuación:

1. A partir de los registros de niveles de las estaciones hidrológicas y mareográficas y las cotas del cero de mira de las estaciones, se elaboraron las series de tiempo de cotas de lámina de agua para cada una de las estaciones con el fin de realizar el análisis hidrodinámico de direcciones de flujo y como insumo base para la calibración del modelo hidrodinámico.
2. Haciendo uso del Modelo Digital de Terreno continuo existente a 2018 y las series de tiempo de caudales elaborados en el componente de hidrología y los registros de nivel del mar en Santa Marta, elaborar el modelo hidrodinámico para el escenario de condición actual 2017 y 2018, con su respectiva calibración y validación a través de las cotas de lámina de agua y las imágenes de satélite disponibles del espejo de agua.
3. Con este modelo calibrado y validado y las series de tiempo de caudales elaborados en el componente de hidrología para cada uno de los escenarios de: condición normal (año 2013), condición seca (2015) y condición húmeda (2011) se elaboraron los modelos hidrodinámicos teniendo en cuenta los registros del nivel del mar para cada uno de los años.
4. Luego de la ejecución de cada uno de los modelos se generaron las series de tiempo de caudales para cada uno de los escenarios, los cuales sirvieron como base para la elaboración del balance hídrico.
5. Como escenarios prospectivos se planteó la apertura del caño el Salado, dado que se contaba con las secciones de diseño del mismo y adicionalmente este se encuentra en etapa de construcción y por ende se pretendía verificar cuál sería su efecto sobre el complejo cenagoso.
6. De otro lado se elaboró el modelo hidrodinámico con la apertura del Paleocauce Barra vieja con el fin de observar el efecto de esta apertura en la interacción con el mar caribe.
- 7.

3.1 Información disponible

En el presente numeral se presenta de manera detallada la información disponible de topobatimetrías e hidrología al año 2018 para la elaboración del modelo hidrodinámico del complejo Ciénaga Grande de Santa Marta.

3.1.1 Información topobatimétrica

La información topobatimétrica ha sido construida a través de un ensamble de batimetrías realizadas desde el año 2015 hasta el 2018 y un modelo digital de superficie georreferenciado obtenido de una misión radar de la empresa Airbus Defence and Space.

3.1.1.1 Topografía del complejo CGSM

La topografía del área seca del complejo CGSM fue elaborado por INVEMAR a partir de un Modelo Digital de Superficie denominado WorldDEM core que comercializa la empresa Airbus Defence and Space, resultado de la misión del radar TanDEM- X (s RD 01). A dicho modelo se le removió la información de alturas que no son parte de la superficie terrestre, tales como, bosque de manglar, edificaciones y cultivos.

Para la georreferenciación del modelo digital de superficie y la corrección de las alturas fue necesaria la toma de 93 puntos dispersos sobre el modelo, de los cuales 21 corresponden a puntos de control tomados en intersecciones de vías o puentes.

Para la toma de puntos de altimetría fue empleando el GPS TOPCON GRS1 y el GEOMAX ZENITH 35 de tecnología GNSS con DGPS, tomándose un total de 72 puntos distribuidos alrededor del área de estudio, principalmente en lugares con coberturas densas como las plantaciones de palma o en los bordes de cuerpos de agua, para tener un mejor empalme con la batimetría.

El área total del modelo topobatimétrico es de aproximadamente 382.363 hectáreas, se extiende de Oeste a Este desde los 74°57' 45,612" W hasta los 74° 09' 51,9" W, entre norte y sur desde los 11°06' 32,68 N hasta los 10° 01' 0,08" N.

3.1.1.2 Batimetrías al año 2018 del Complejo Cenagoso de la CGSM

En el informe técnico final denominado "Caracterización y diagnóstico topobatimétrico, sedimentológico e hidrológico de la CGSM e implementación de modelo hidrológico", elaborado durante la ejecución del Convenio Interadministrativo N°. 430 de 2017 PRY-GEO-009-17, presentado en diciembre de 2017 den Santa Marta (Colombia) por los contratistas Alfredo Gutierrez Cantillo (hidrógrafo) y Jorge Luis Sánchez (hidrólogo Modelador) presenta la metodología y resultados de la elaboración del Modelo Digital de Elevación topobatimétrico de la Ciénaga Grande de Santa Marta y sus principales caños, la cual se resume a continuación.

La obtención de datos batimétricos se efectuó bajo los estándares Hidrográficos Internacionales de la OHI-S44 (OHI, 2008), empleando una ecosonda digital de precisión centimétrica y posicionamiento con sistema de GPS diferencial (DGPS), con corrección diferencial geoestacionario, de precisión submétrica conectados a un computador portátil y siguiendo con precisión las líneas batimétricas previamente diseñadas para los recorridos.

A los datos se le aplicaron las respectivas reducciones de mareas, calado, y correcciones por velocidad del sonido en el agua dando como resultado final las profundidades corregidas que posteriormente fueron exportadas a diferentes formatos para el uso de los Sistemas de Información Geográfica.

En la Tabla 3-1 se presenta el resumen de los cuerpos de agua a los cuales se les realizó la respectiva batimetría, especificando el año del levantamiento y el área del espejo de agua para el caso de las ciénagas y la longitud del cauce en el caso de los caños.

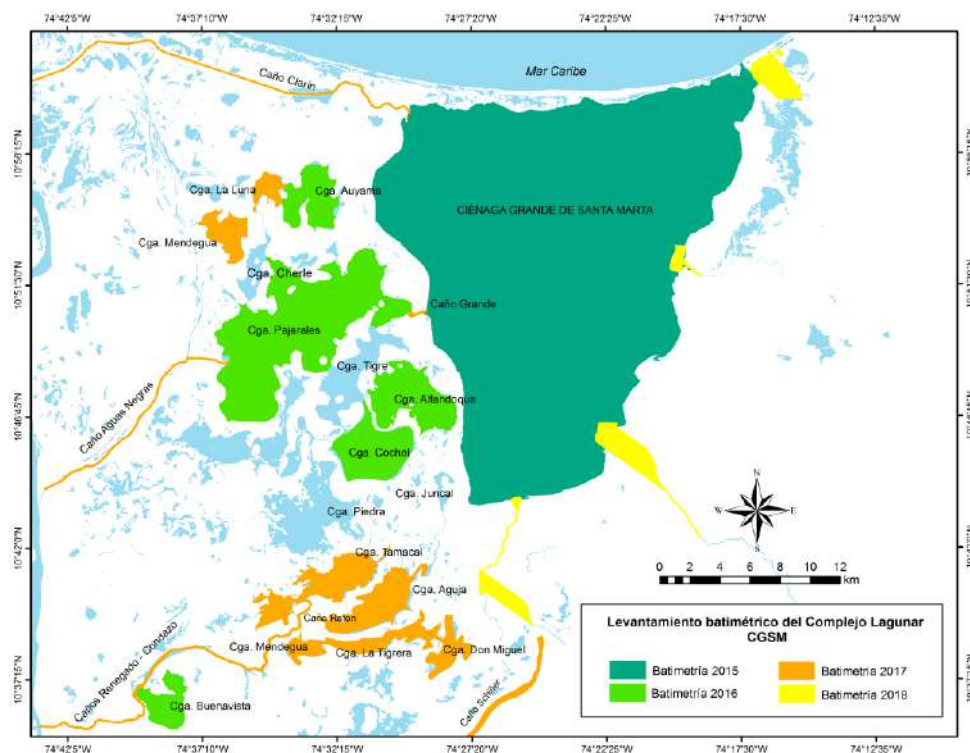


Figura 3-1 Levantamientos batimétricos

Ciénaga	Año	Área levantada (km ²)
Ciénaga Grande	2015	450
Ciénaga Pajarales	2016	67.3
Ciénaga Alfandoque	2016	15.2
Ciénaga Conchal	2016	16.0
Ciénaga Piedra	2017	21.0
Total		569.5

Caño	Año	Km Sondeados
Caño Clarín	2017	135.0
Caño Aguas Negras	2017	93.2
Caño Grande	2017	12.86
C. Renegado - Condazo	2016	102.4
Total		343.4

Tabla 3-1 Levantamientos batimétricos

Batimetrías del año 2018¹

Las batimetrías elaboradas en el año 2018 fueron elaboradas por A.G.C dentro del contrato 05-088-2018, el cual tenía como objeto: *"Realización de los levantamientos batimétricos de los tramos finales de los ríos Aracataca, Fundación y Sevilla, hasta su desembocadura en la ciénaga Grande de Santa Marta."*

En dicho contrato se realizó el levantamiento del río Aracataca desde su desembocadura hasta la estación Aracataca Abajo para un total de 10.5 Km, el cual se realizó del 29 de septiembre al 01 de octubre.

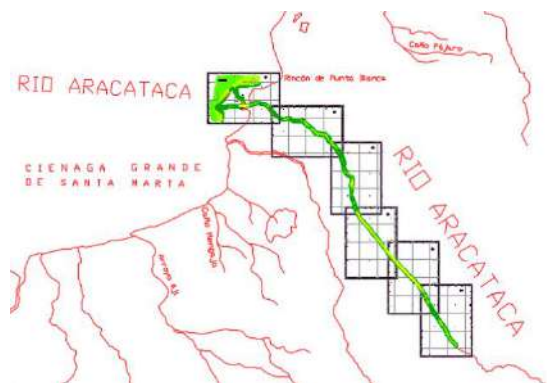


Figura 3-2 Batimetría Río Aracataca

El río Fundación fue levantado desde su desembocadura en la CGSM hasta la estación hidrológica Fundación Abajo, para un total de 12.2 Km desde el 26 al 28 de septiembre de 2018.

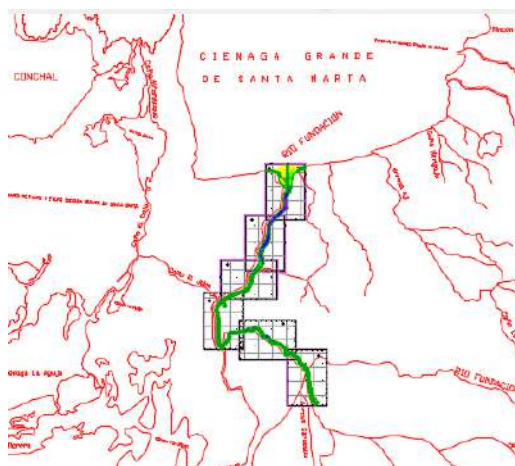


Figura 3-3 Batimetría Río Fundación

En cuanto al río Sevilla no se pudo acceder solo hasta 1.8 Km aguas arriba de la desembocadura debido a que en el momento de la realización de la batimetría se encontraba con una gran cantidad de macrófitas acuáticas flotantes lo cual no permitió el acceso de la lancha. Dicho levantamiento se realizó del 02 al 04 de octubre de 2018.

¹ Fuente: (GUTIERREZ, 2018)

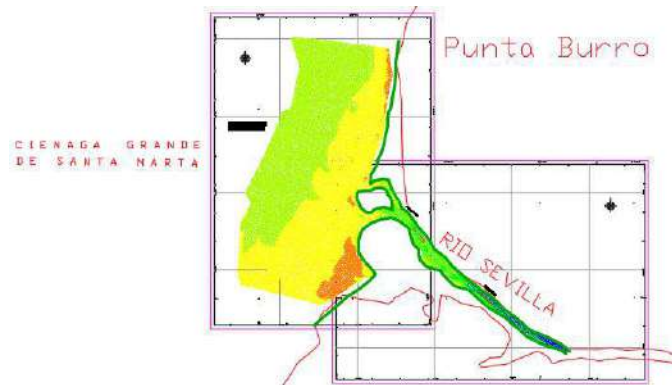


Figura 3-4 Batimetría Río Sevilla

Adicionalmente se realizó el levantamiento de una parte de la Ciénaga del Sevillano, con el fin de tener en cuenta la interacción de este cuerpo de agua.

Cabe aclarar que al momento de la elaboración del presente informe todavía no habías sido integrada al MDT, de tal manera que no fueron utilizadas en el presente trabajo.

3.1.1.3 Modelo Digital de Terreno versión 1.0

A partir de las batimetrías y el modelo topobatimétrico se elaboró por parte de INVEMAR un Modelo Digital de Terreno (MDT) continuo, el cual representa muy bien la interconexión de los cauces con las ciénagas y el terreno fuera de las ciénagas. Es de aclarar que los espacios en blanco corresponden a sitios en los cuales no se contaba con información batimétrica y por tanto presentan discontinuidad en el MDT.

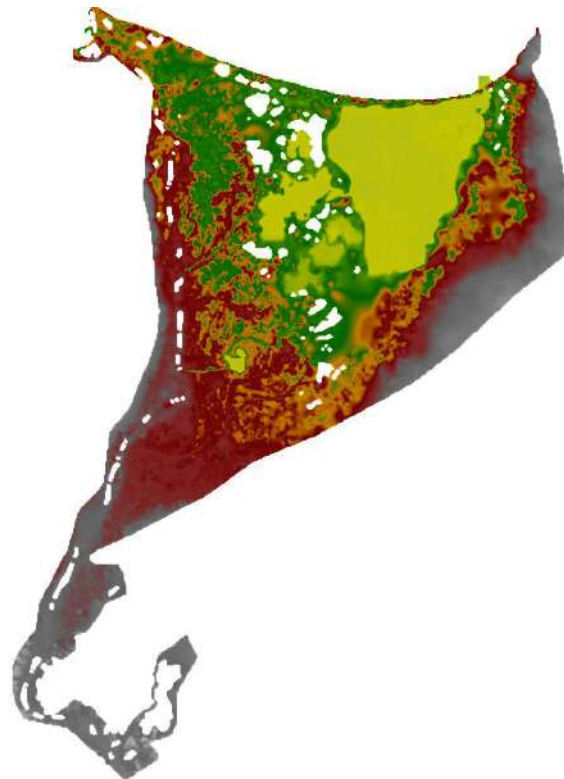


Figura 3-5 Modelo Digital de Terreno versión 1.0

3.1.1.4 Modelo Digital de Terreno versión 2.0

El MDT versión 1.0 fue complementado a partir de información batimétrica levantada en el río Magdalena mediante secciones transversales espaciadas aproximadamente cada 1.0 KM desde el municipio de Plato (Magdalena) hasta el Puente Pumarejo en la Ciudad de Barranquilla (Atlántico).



Figura 3-6 Secciones batimétricas del río Magdalena

Adicionalmente para los cuerpos cenagosos que no contaban con batimetría (Ver espacios en blanco de la Figura 3-5) se asumió una profundidad media del cuerpo de agua de 1.0 m, con el fin de que en el MDT quedara sin ninguna discontinuidad

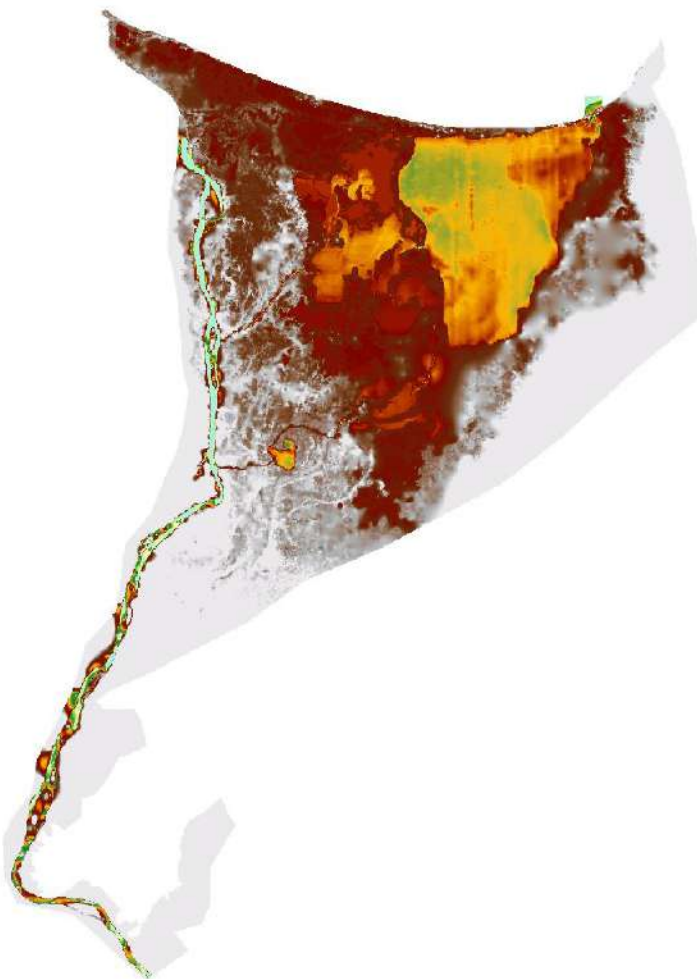


Figura 3-7 Modelo Digital de Terreno versión 2.0 complementado

3.1.1.5 Modelo Digital de Terreno versión 3.0

Luego de realizar una revisión exhaustiva al MDT V2 y realizar algunas simulaciones en el modelo hidrodinámico implementado, se encontró que existían errores en los caños, ya que se había tomado el dato de profundidad para su elaboración, en lugar de las cotas de fondo, razón por la cual dichos caños tenían profundidades menores (Ver Figura 3-8y Figura 3-9).

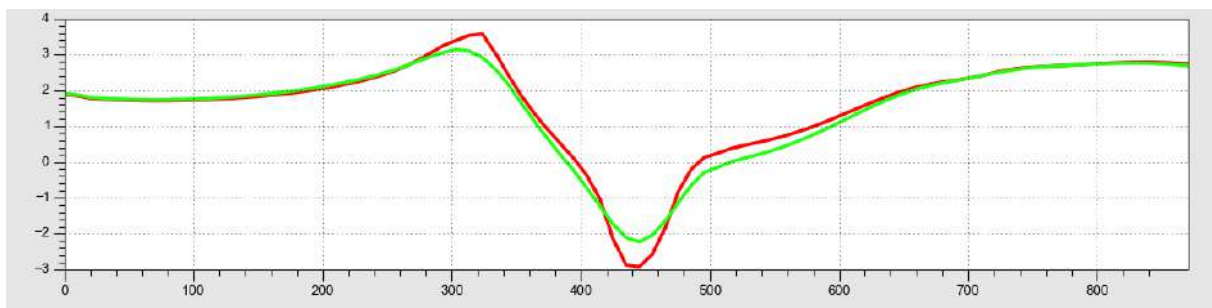


Figura 3-8 Sección transversal caño Renegado antes y después de la corrección

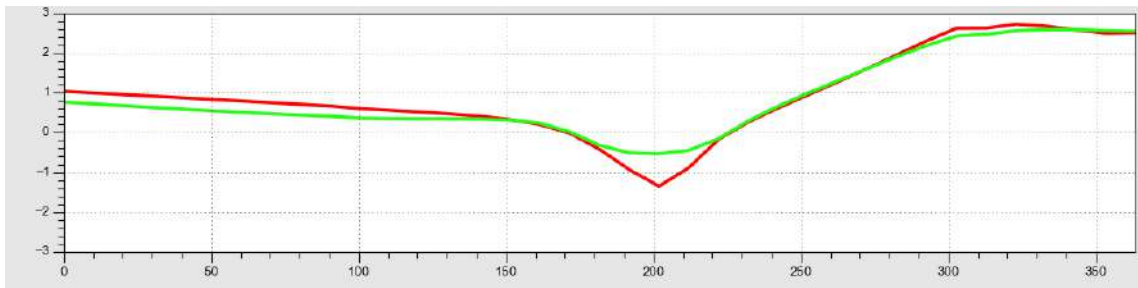


Figura 3-9 Sección transversal caño Clarín antes y después de la corrección

Adicionalmente dado que se contaba con batimetrías del lecho marino al Norte de la CGSM se solicitó la inclusión de dichas batimetrías con el fin de que la condición de frontera aguas abajo del modelo hidrodinámico fuera la marea en el mar Caribe.

Con estas correcciones se elaboró el MDT complementado y corregido V3 entregado el 3 de octubre de 2018 por parte de INVEMAR.

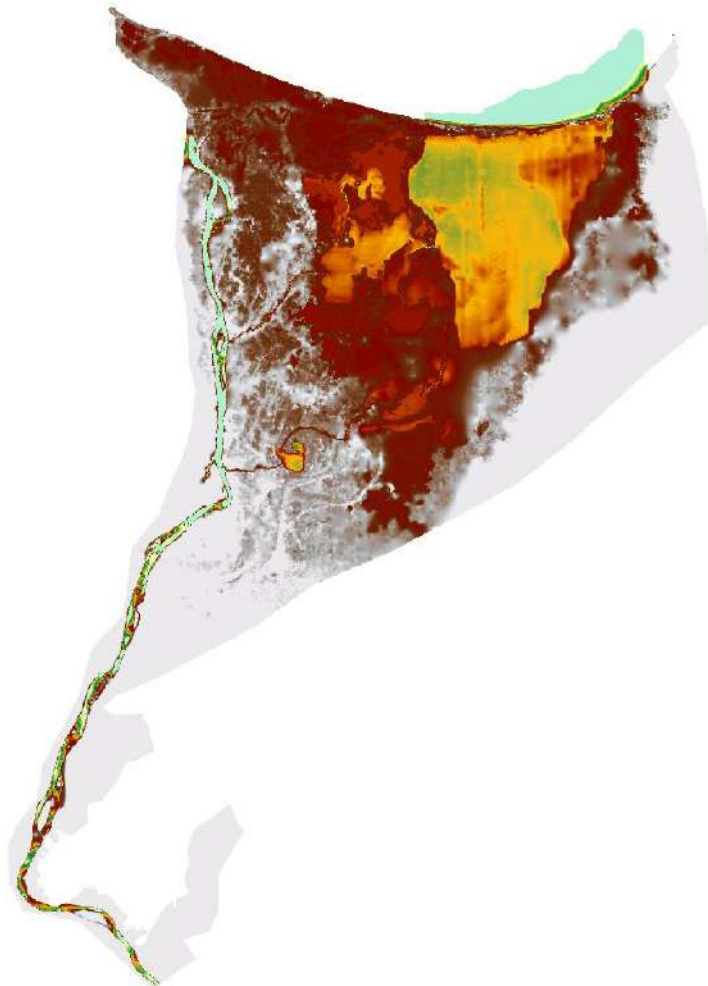


Figura 3-10 Modelo Digital de Terreno versión 3.0 complementado y corregido

Dicho modelo digital de terreno versión 3.0 fue el usado en el presente proyecto para realizar el modelo hidrodinámico, es decir, no cuenta con las batimetrías levantadas en el año 2018, lo cual se recomienda realizar para la elaboración de posteriores modelos.

3.1.2 Levantamiento de los ceros de mira

Con el fin de calcular las cotas de lámina de agua de cada una de las estaciones que actualmente monitorean los niveles del complejo CGSM y los cauces tributarios para poder ser usados en el proceso de calibración y validación del modelo hidrodinámico, se solicitó el levantamiento topográfico de las cotas de los ceros de las miras de las estaciones hidrológicas de monitoreo de la CGSM (Ver Figura 3-11).

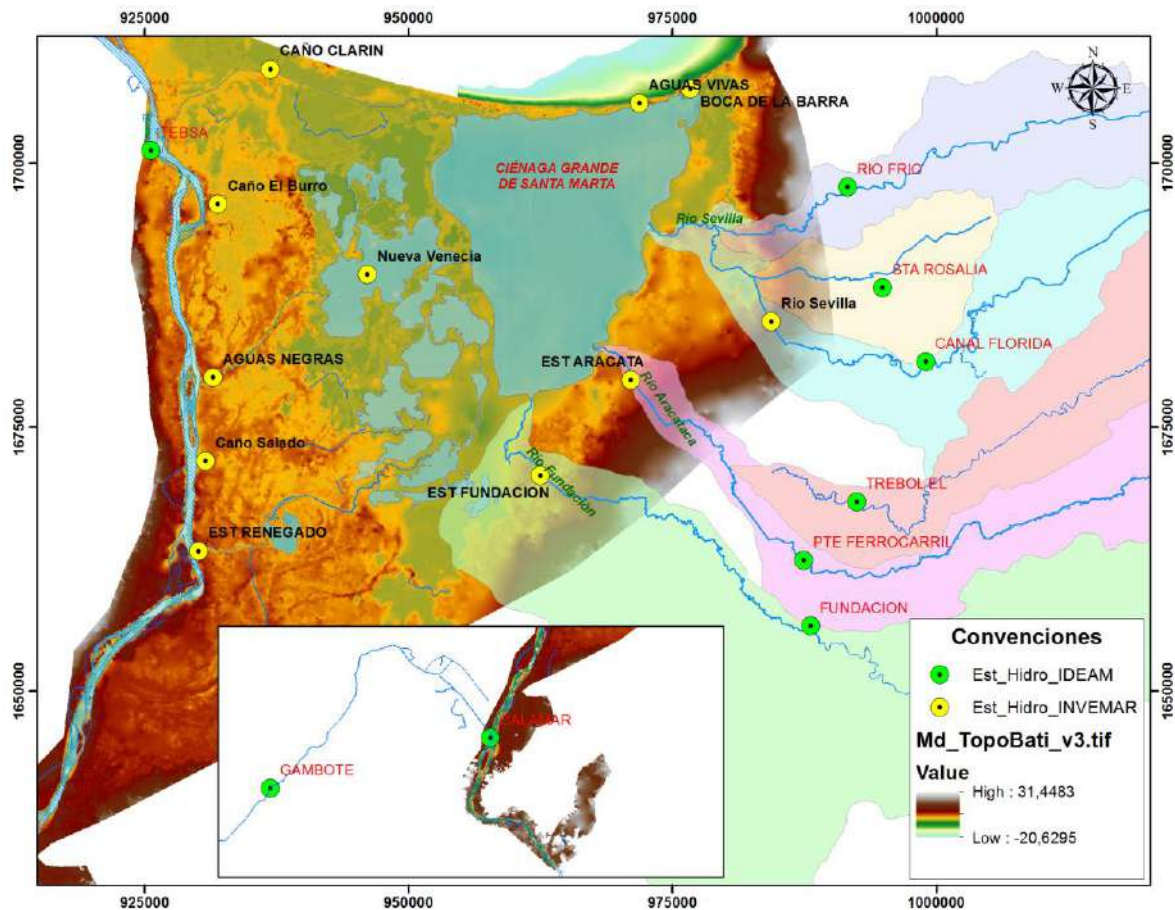


Figura 3-11 Localización estaciones hidrológicas de monitoreo de la CGSM

Dicha cota del cero de mira de la estación hidrológica no es más que la localización respecto a un datum de referencia (ejm: nivel medio del mar) del cero de las miras que registran los niveles alcanzados por un cuerpo de agua, de tal manera que al sumar estos registros a la cota cero se obtiene la cota de lámina de agua en el sitio donde se encuentra instalada la estación.

En la Figura 3-12 y Figura 3-13 se presenta a manera de ejemplo el procedimiento de levantamiento de la cota del cero de mira de la estación Fundación. Dicho procedimiento consistió en ubicar la Base del GPS sobre un vértice del IGAC ubicado dentro del poblado del Retén (Magdalena). Posteriormente se estableció el BM en cercanías a la mira tomándose cota sobre el nivel del mar y finalmente se realizó una nivelación de precisión entre el BM y la mira para calcular la cota del cero de la estación hidrológica.

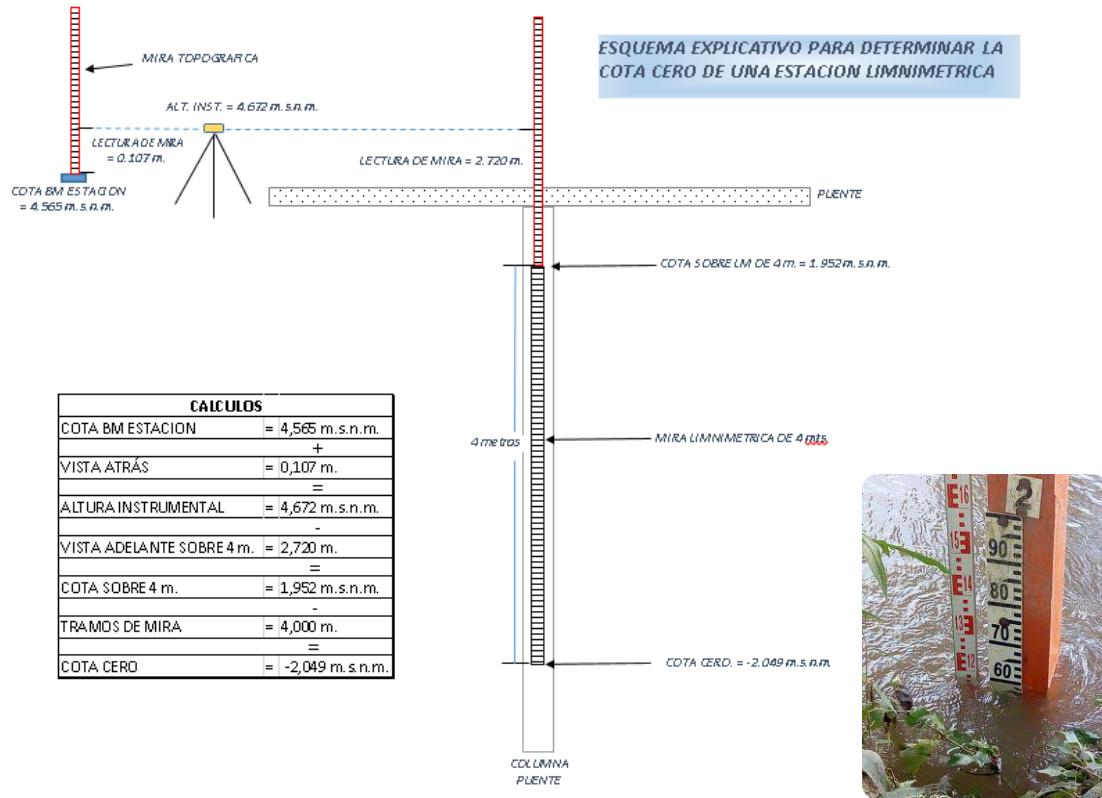


Figura 3-12 Ejemplo de levantamiento de la cota del cero de una mira o estación hidrológica



Figura 3-13 Procedimiento levantamiento del cero de mira de la estación del río Fundación. Fuente: (GUTIERREZ, 2018)

Como resultado de este procedimiento se obtuvieron las cotas de los ceros de mira para cada una de las estaciones cuyo resultado se presenta en la

Tabla 3-2.

ESTACIÓN	Cota del cero de Mira [msnm]
RENEGADO	-2.049
CAÑO BURRO	-0.397
AGUAS NEGRAS	-0.152
TEBSA	0.072
LOS_COCOS	-2.093
AGUAS VIVAS	-0.200
NUEVA VENECIA	-0.250
RIO SEVILLA	3.370
RIO ARACATACA	0.680
RIO FUNDACIÓN	-0.530

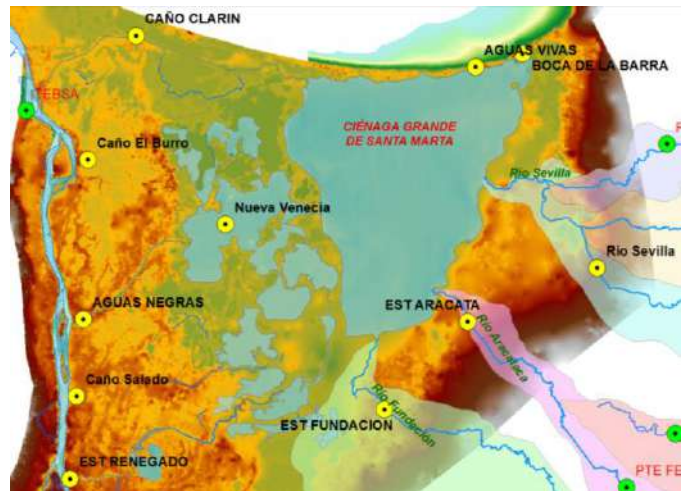


Tabla 3-2 Cotas de los ceros de mira de las estaciones

3.1.3 Registros de cotas de lámina de agua

A partir de las cotas de los ceros de mira de las estaciones y los registros de niveles de cada una, se procedió a calcular las series de tiempo de las Cotas de Lámina de Agua para los registros disponibles (Julio de 2017 a Septiembre de 2018), lo cual no es más que la suma del registro de nivel de cada lectura con la cota del cero de la mira.

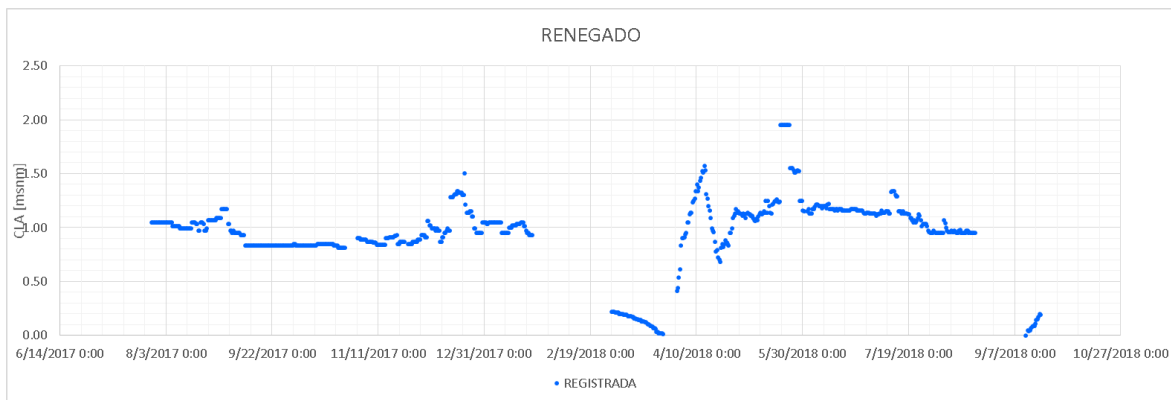


Figura 3-14 Serie de tiempo de Cota de Lámina de agua de la estación Renegado

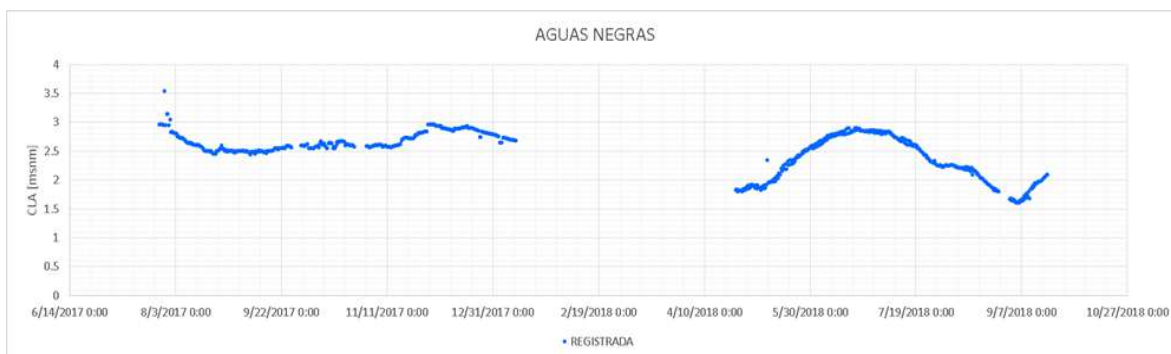


Figura 3-15 Serie de tiempo de Cota de Lámina de agua de la estación Aguas Negras



Figura 3-16 Serie de tiempo de Cota de Lámina de agua de la estación Nueva Venecia



Figura 3-17 Serie de tiempo de Cota de Lámina de agua de la estación Clarín Los Cocos

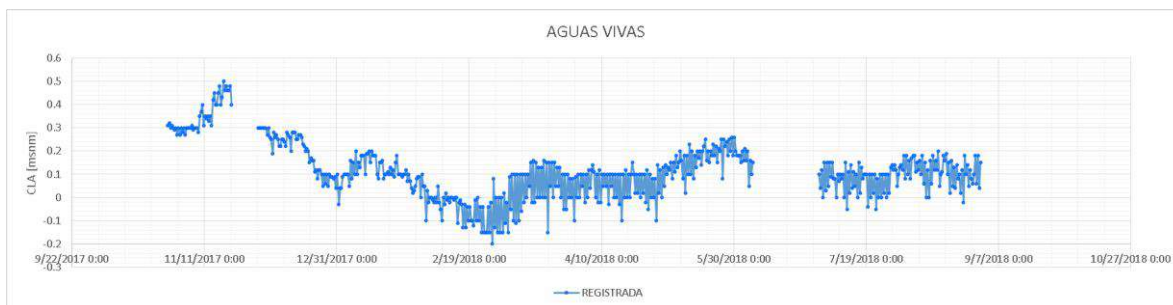


Figura 3-18 Serie de tiempo de Cota de Lámina de agua de la estación Aguas Vivas

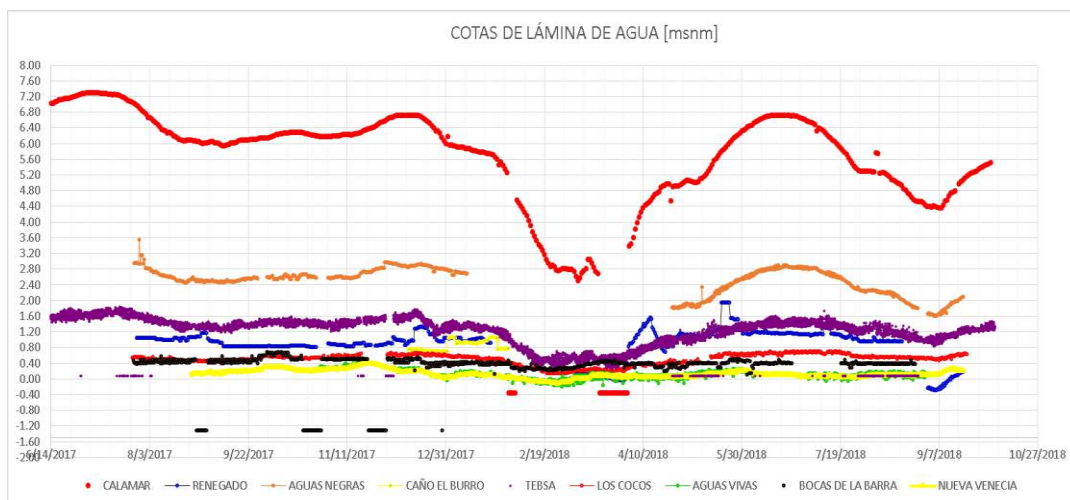


Figura 3-19 Series de tiempo de cota de lámina de agua de todas las estaciones

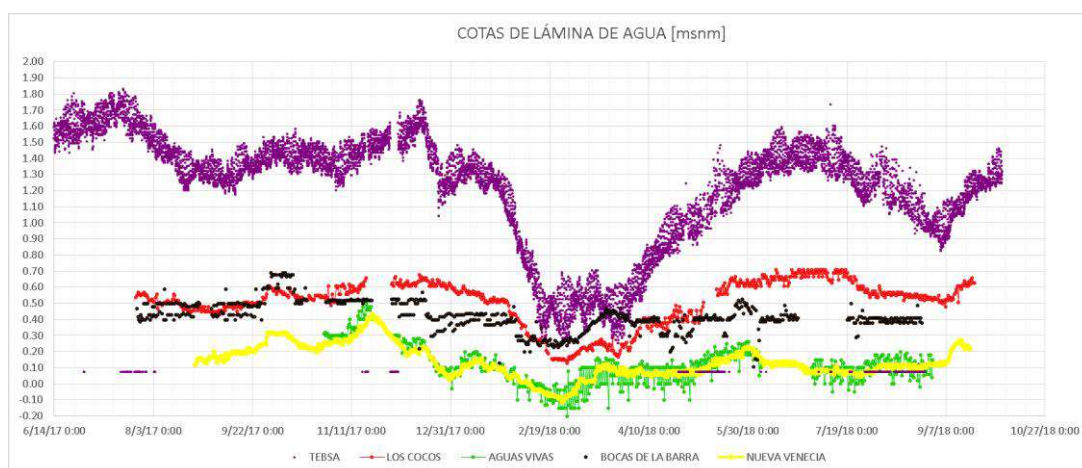


Figura 3-20 Series de tiempo de cotas de lámina de agua de las estaciones del sector norte

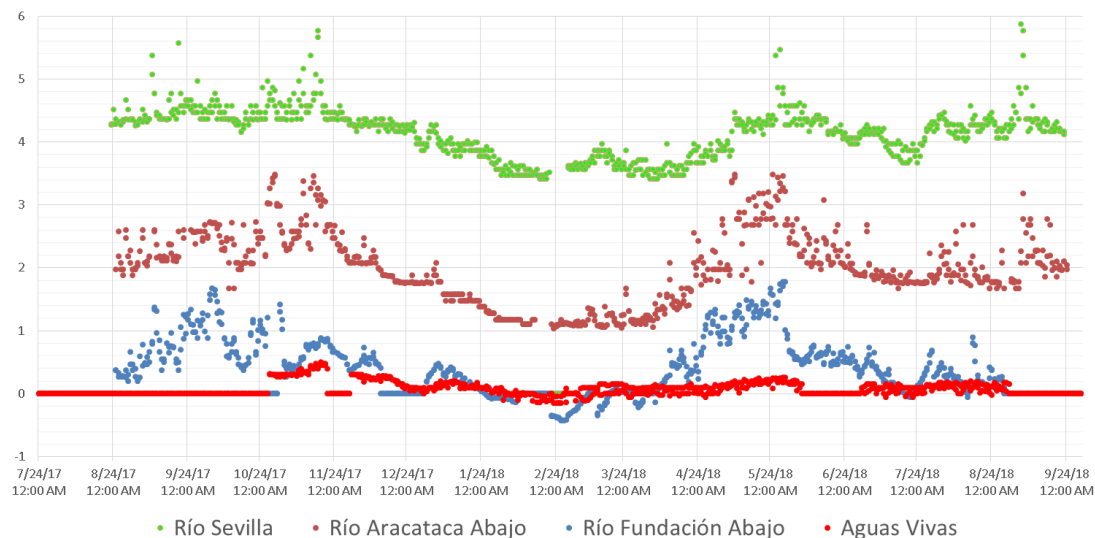


Figura 3-21 Series de tiempo de cotas de lámina de agua de los ríos de la margen oriental

3.1.4 Registros del comportamiento del nivel del mar

Respecto a los registros del nivel del mar se obtuvieron las series de nivel del mar de la estación Santa Marta operada por la DIMAR y publicada en línea en tiempo real (Ver Figura 3-22). Dicho mareógrafo tiene registros desde el año 2012 hasta la fecha a una resolución temporal de un dato cada minuto, registrado por medio de un sensor de radar, otro de burbuja y otro de presión.

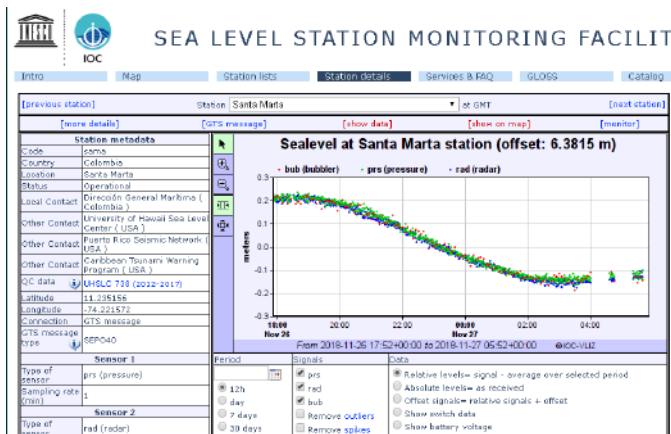


Figura 3-22 Series de tiempo del mareógrafo instalado en Santa Marta²

Dicha mareógrafo se encuentra localizada en el muelle localizado en la estación de Guardacostas de Santa Marta (Ver Figura 3-23).

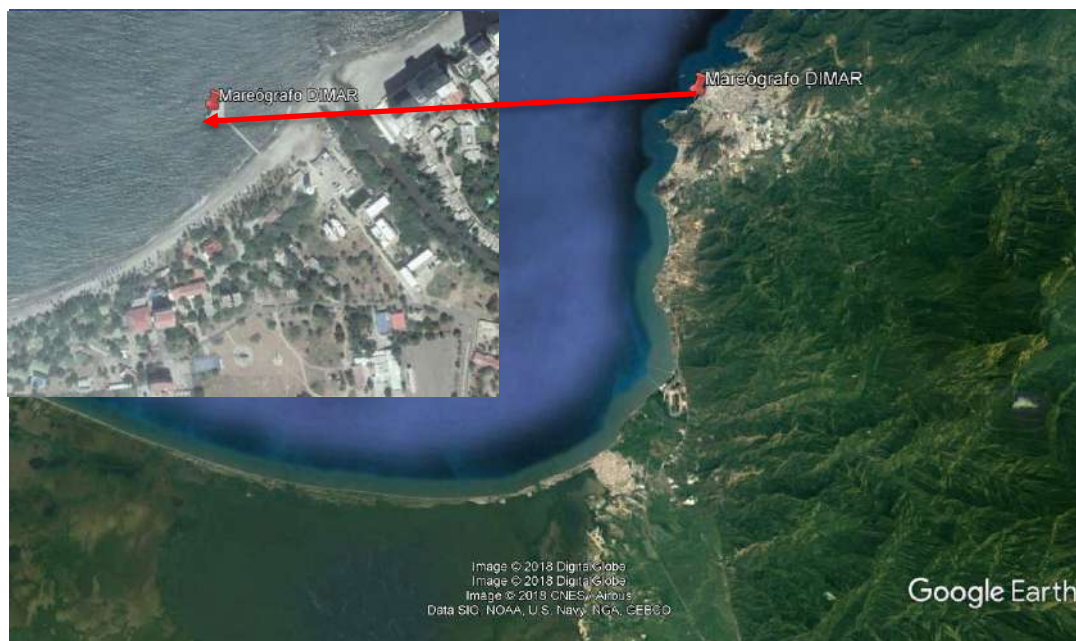


Figura 3-23 Localización del mareógrafo Santa Marta

² Fuente: <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=sama>

En la Figura 3-24 se presentan los registros del nivel del mar para los años 2017 y 2018, tiempo en el cual presentó sus niveles máximos en los meses de noviembre de 2017 y septiembre de 2018 y niveles mínimos entre la última semana de enero y la cuarta de febrero de 2018.

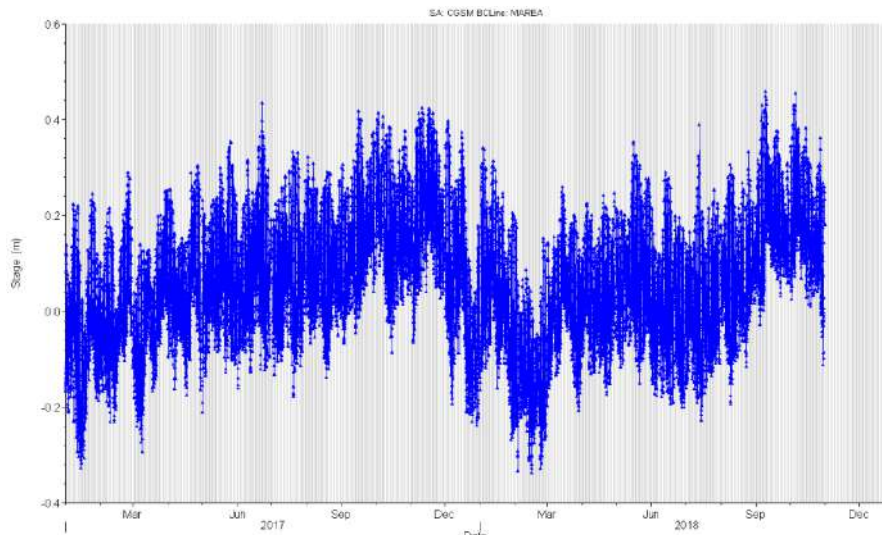


Figura 3-24 Registros del nivel del mar para los años 2017 a 2018

En la Figura 3-25 se presenta el registro de nivel del mar para los meses de enero y febrero de 2018 en donde se observa el descenso del nivel medio de mar y la variación diaria de la marea. Las barras en gris indican noche y las barras en blanco indican día, por tanto al observar los registros la marea se puede clasificar como de tipo diurna mixta con una amplitud media en cuadratura (mareas muertas) de 0.2 m y en sicigia (mareas vivas) de 0.5 m.

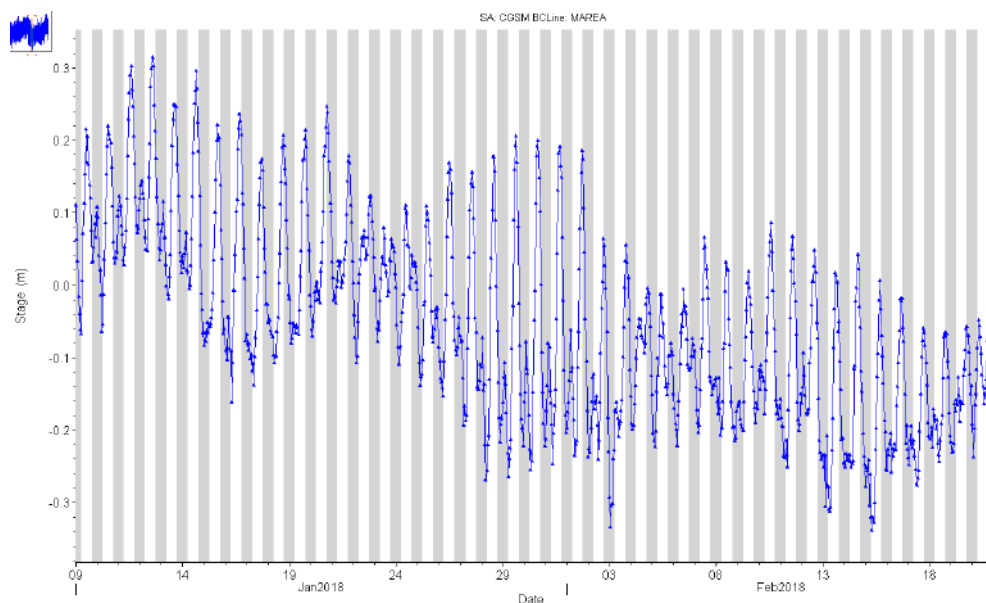


Figura 3-25 Registros del nivel del mar para los meses de enero y febrero de 2018

3.2 Modelo hidrodinámico para los años 2017 y 2018

A partir de la información disponible se procedió a elaborar un modelo hidrodinámico, teniendo en cuenta que para esta etapa del proyecto no se tiene en cuenta la influencia del viento sobre la dinámica del complejo Cenagoso, dado que el principal objetivo es determinar los volúmenes de agua transportados y almacenados para las condiciones actuales, con el fin de realizar el balance hídrico de todo el complejo Cenagoso.

Dicho modelo hidrodinámico tipo 1D – 2D, puede representar la variación espacial y temporal del espejo de agua de la Ciénaga y la variación temporal de caudales y niveles en los distintos cuerpos de agua tributarios, la preferencia de direcciones de flujo en épocas húmeda y seca, y las tendencias de cambios en trayectorias en la Boca de la Barra como función de la marea.

En la Figura 3-26 se presenta la topología del modelo hidrodinámico en la cual la ciénaga de Pajarales, cuerpo principal de la CGSM y la porción del mar caribe al norte de la CGSM se modelaron de tipo bidimensional; mientras que las ciénagas del lado sur del complejo se modelaron de tipo unidimensional, es decir, como simples almacenamientos.

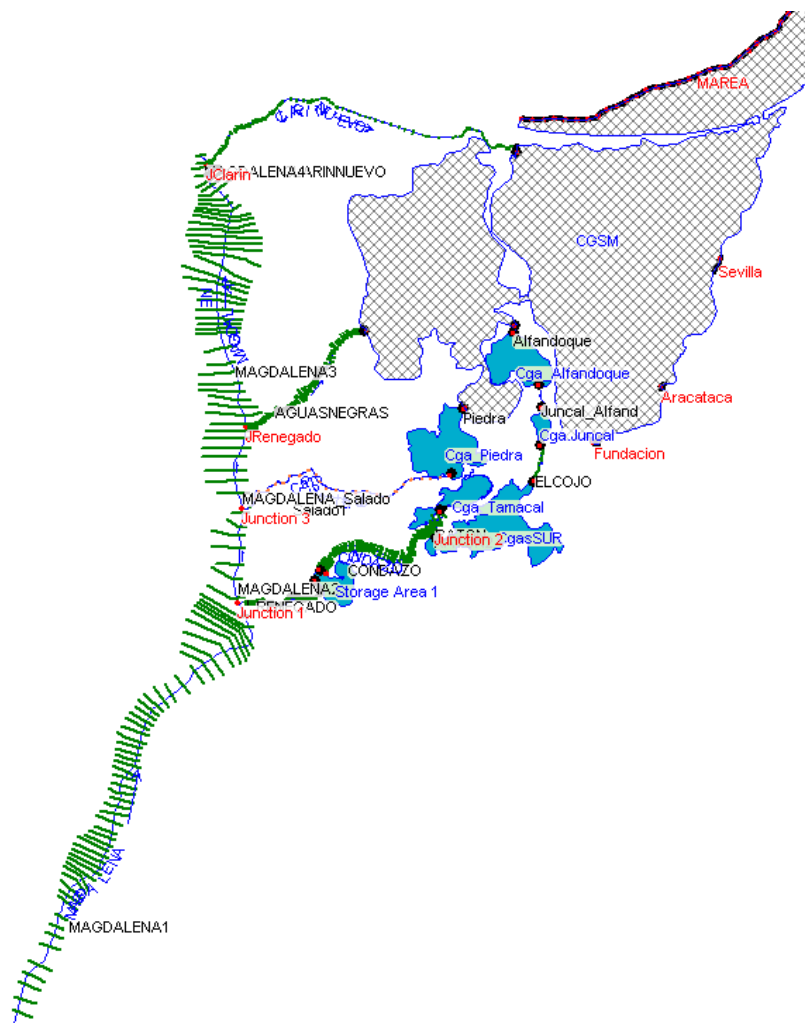


Figura 3-26 Topología del modelo hidrodinámico

Tal como se puede apreciar los caños y ríos se modelaron de tipo unidimensional compuestos por un eje principal y secciones con diferentes espaciamientos.

3.2.1 Descripción detallada de la topología del modelo hidrodinámico para los años 2017 y 2018

Para elaborar el modelo hidrodinámico se hizo uso del software HEC RAS 5.0.6, con una topología de tipo unidimensional y bidimensional, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- 1) El río Magdalena fue modelado considerando el tramo comprendido entre la estación Calamar aguas bajo del Canal del Dique y la estación de Tebsa en Barranquilla.
- 2) Los caudales del río Magdalena fueron determinados en el componente de hidrología a partir de la diferencia de caudales entre las estaciones Calamar y Gambote, dado que la estación Calamar registra los caudales antes de la derivación del canal del Dique.
- 3) Los caños Renegado, Aguas Negras y Clarín se modelaron de manera unidimensional integrados a la Ciénaga de Buenavista, a la ciénaga de Pajarales y a la Ciénaga Grande de Santa Marta respectivamente. Dichos caños fueron conectados al río Magdalena de tal manera que las derivaciones de caudal hacia los mismos fueran establecidas a partir del gradiente hidráulico existente entre el río Magdalena y el complejo Cenagoso, es decir, en función de las cotas de lámina de agua del río Magdalena en cada instante de tiempo y la cota de lámina de agua en el complejo Cenagoso.
- 4) Para el caso del caño Renegado no se tiene en cuenta la estructura de control que se encuentra en el mismo, dado que como se pudo evidenciar en la visita de campo, dicha estructura tiene una compuerta y presenta obstrucciones por el material flotante transportado por el río Magdalena, lo cual hace que solo fluyan, según los aforos realizados en el año 2017, caudales entre 3.0 y 6.0 m³/s.

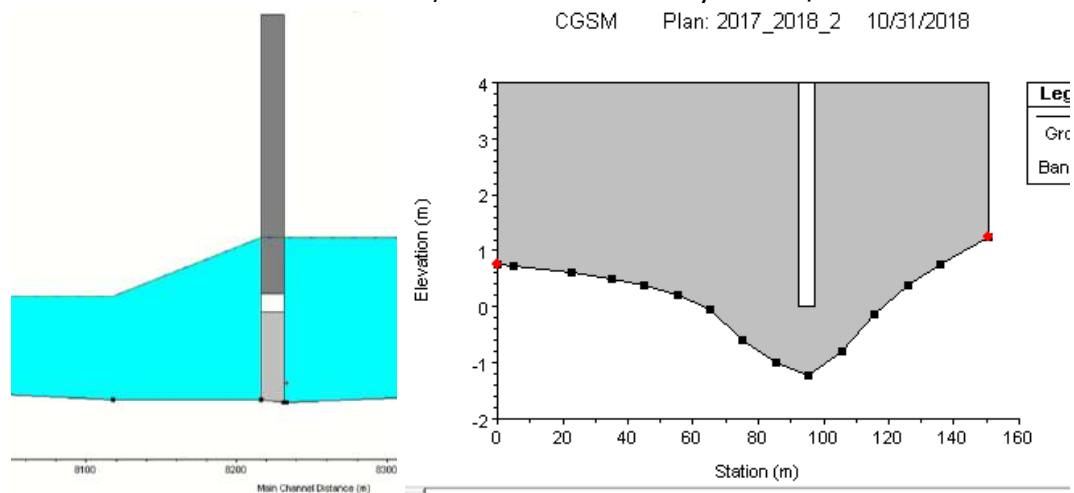
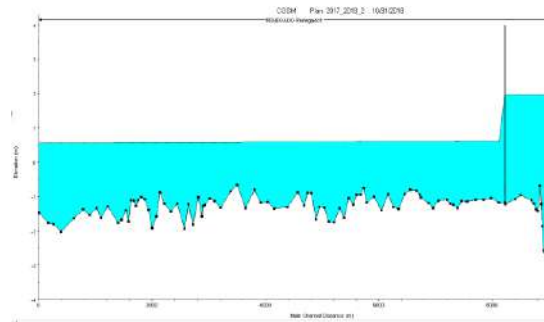


Figura 3-27 Vista en perfil y frontal aguas debajo de la compuerta en el caño Renegado



Río Magdalena

Figura 3-28 Perfil longitudinal Caño Renegado



Figura 3-29 Caño aguas negras

- 1) El caño Aguas Negras, aunque también cuenta con una estructura de control, esta se encuentra fuera de servicio dado que se abrió un rompedero antes de dicha estructura lo cual hace que el agua derivada desde el río Magdalena fluya por un canal paralelo en la margen izquierda.





Figura 3-30 Caño Aguas Negras antes y después del rompimiento

- 2) Todo el complejo Cenagoso Pajarales, Piedra, Ahuyama, cuerpo principal CGSM y mar Caribe se modeló de tipo bidimensional incluyendo los caños Grande y Boca de la Barra.
- 3) La condición de frontera aguas abajo del río Magdalena son los registros de cotas de lámina de agua de la estación Tebsa.
- 4) La condición de frontera en el mar Caribe son los registros de nivel del mar del mareógrafo Santa Marta operado por la DIMAR.
- 5) Los aportes de los ríos que descienden de la Sierran Nevada de Santa Marta fueron determinados en el componente de hidrología a partir de los registros diarios de caudal de las estaciones localizadas aguas debajo de la Zona Bananera.

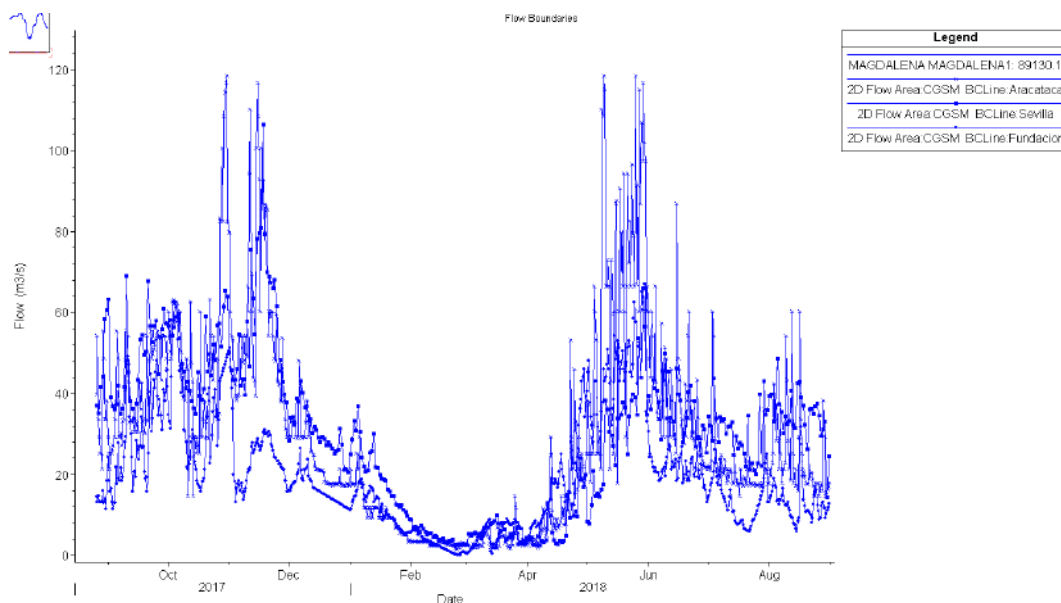


Figura 3-31 Series de tiempo de caudales de los ríos

- 6) Se realizó la modelación de una año hidrológico comprendido entre el 26 de agosto de 2017 a 31 de agosto de 2018.
- 7) La resolución temporal del modelo es de 30 minutos para los cálculos hidráulicos y de 60 minutos para la presentación de resultados, por tanto los efectos de la marea son bien representados por el modelo.

4 Resultados

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos tanto para la calibración como para cada uno de los escenarios de variabilidad climática y escenarios prospectivos de apertura del caño El Salado y el paleocauce Barra Vieja de conexión con el mar Caribe.

4.1 Calibración

Tal como se describió anteriormente la calibración se realizó para los años 2017 y 2018 ajustando el modelo de tal manera que se obtuvieran las cotas de lámina de agua registradas en cada una de las estaciones así como los caudales aforados en cada una de las campañas de aforo.

4.1.1 Estación Renegado

En la Figura 4-1 y Figura 4-2 se presentan los resultados de los ajustes de cotas de lámina de agua registradas y simuladas para el caso del caño Renegado. Si bien el modelo no se ajusta muy bien a las cotas de lámina de agua, esto debido al control hidráulico ejercido por la compuerta y al desconocimiento de su funcionamiento y parámetros hidráulicos que rigen su comportamiento, el modelo ajusta muy bien a los registros de caudales aforados, presentando valores entre $5 \text{ m}^3/\text{s}$ a $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

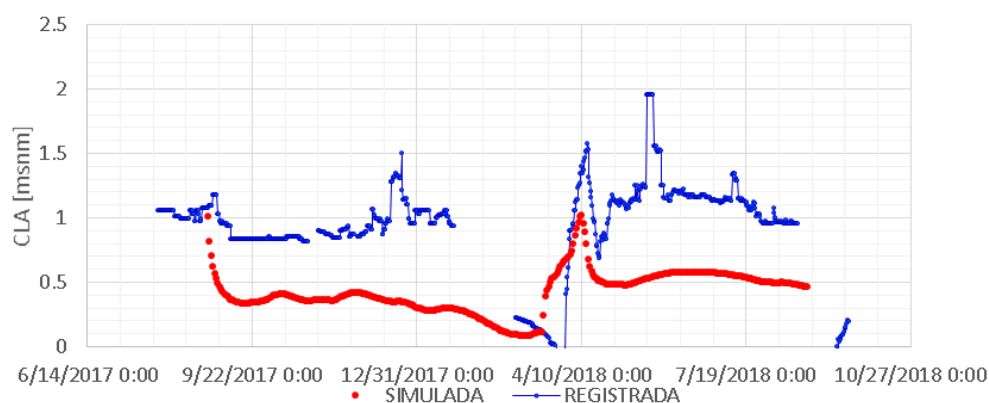


Figura 4-1 Cotas de Lámina de Agua registrada y simulada estación Renegado

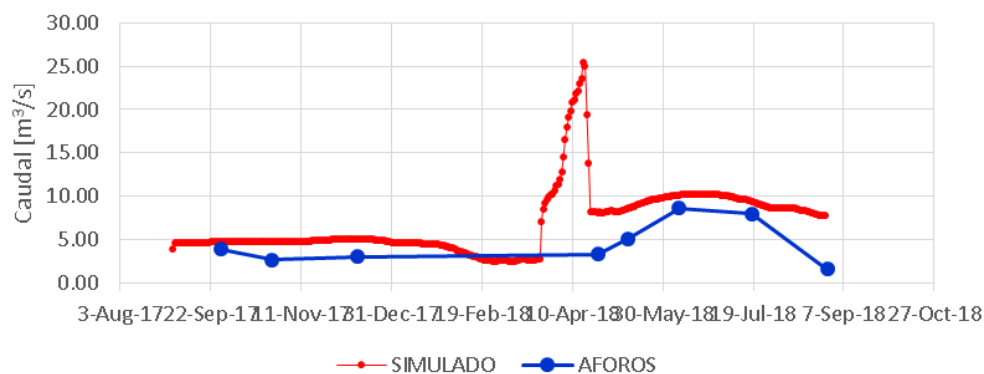


Figura 4-2 Caudales aforados y simulados estación Renegado

El pico de nivel y caudal mostrado en las Figura 4-1 y Figura 4-2 respectivamente, corresponde con una limpieza y apertura de la compuerta, la cual fue tomada en cuenta dentro del modelo.

4.1.2 Estación Aguas Negras

Respecto a la estación Aguas Negras se presenta un muy buen ajuste tanto para las cotas de lámina de agua como para los caudales aforados, teniendo en cuenta que para la época entre enero y abril de 2018 no se cuenta con datos de niveles registrados en la estación pero si se contó con dos aforos, lo cual indica que el modelo representa muy bien las condiciones de niveles mínimos para el caso donde no se cuenta con los registros de nivel.

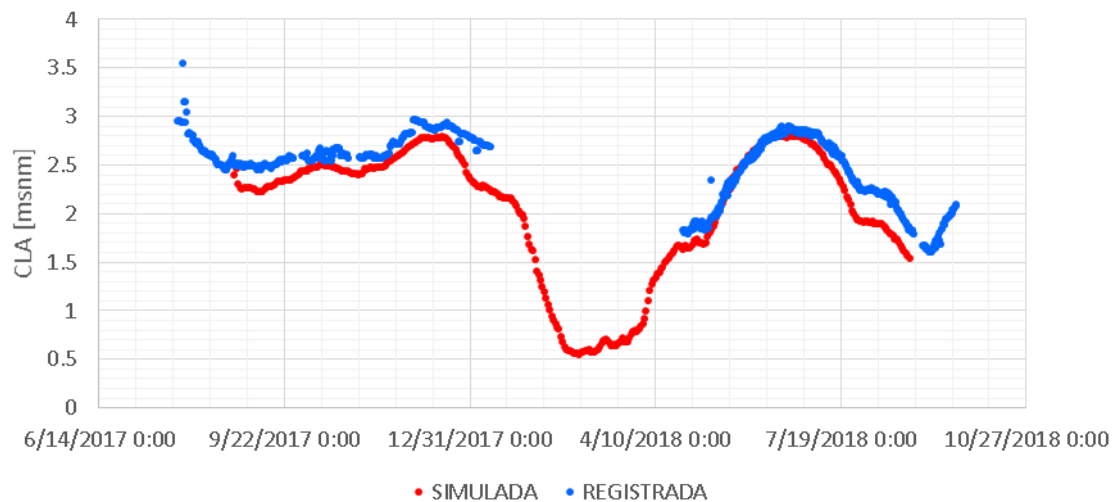


Figura 4-3 Cotas de Lámina de Agua registrada y simulada estación Aguas Negras

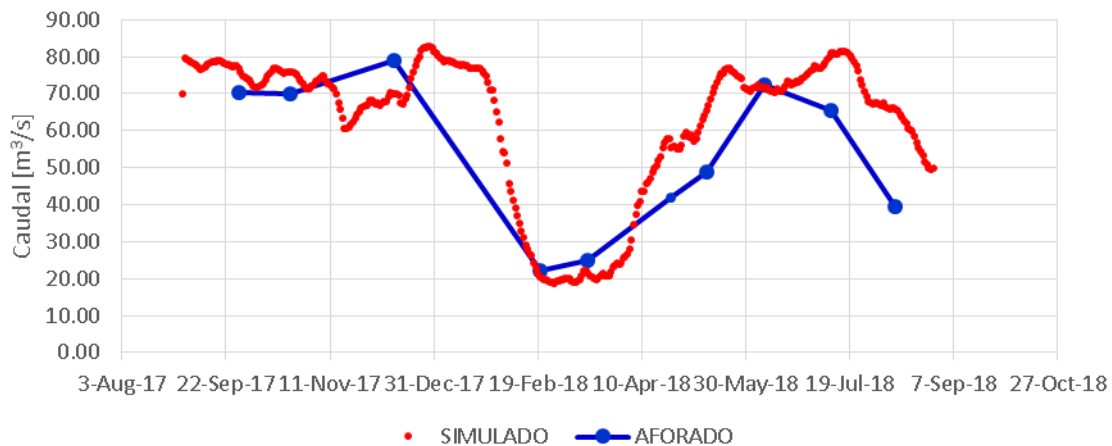


Figura 4-4 Caudales aforados y simulados estación Aguas Negras

4.1.3 Estación Clarín Los Cocos

En la estación Clarín los Cocos se presenta un muy buen ajuste para las cotas de lámina de agua para el período de análisis. Respecto a los caudales presenta una diferencia de 2.5

m^3/s por debajo de los valores registrados, pero se puede considerar que para (Ver Figura 4-5 y Figura 4-6).

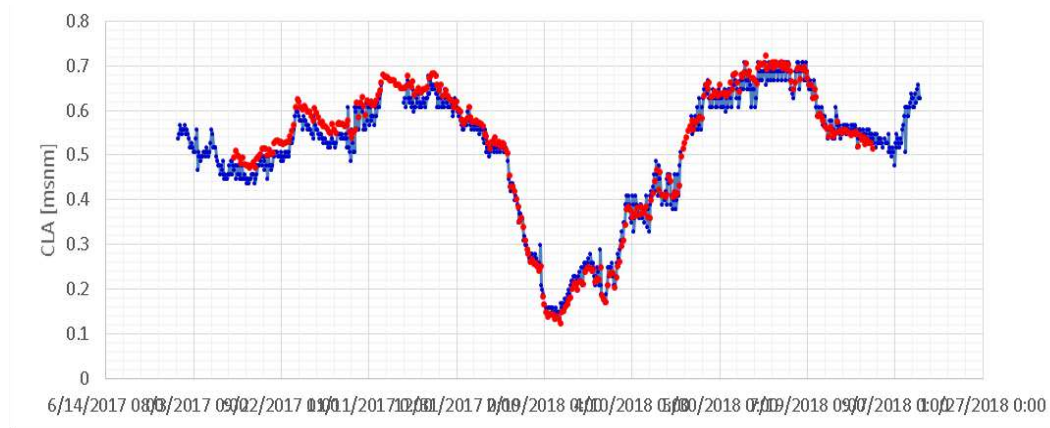


Figura 4-5 Cotas de Lámina de Agua registrada y simulada estación Clarín Los Cocos



Figura 4-6 Caudales aforados y simulados estación Clarín Los Cocos

4.1.4 Estaciones Nueva Venecia y Aguas Vivas

Para el caso de las estaciones Nueva Venecia y Aguas Vivas instaladas en Pajarales y CGSM respectivamente (Ver Figura 4-7 y Figura 4-8), se observa como en noviembre de 2017 el modelo no representa muy bien las cotas de lámina de agua registradas en ese mes, lo cual puede ser explicado al revisar los datos de caudal de la estación Fundación Abajo en donde para esta época no se registraron las crecientes que se presentaron entre el 13 al 21 de noviembre que si fueron registradas en la estación Fundación localizada aguas arriba en el centro poblado de Fundación (Ver Figura 4-10).

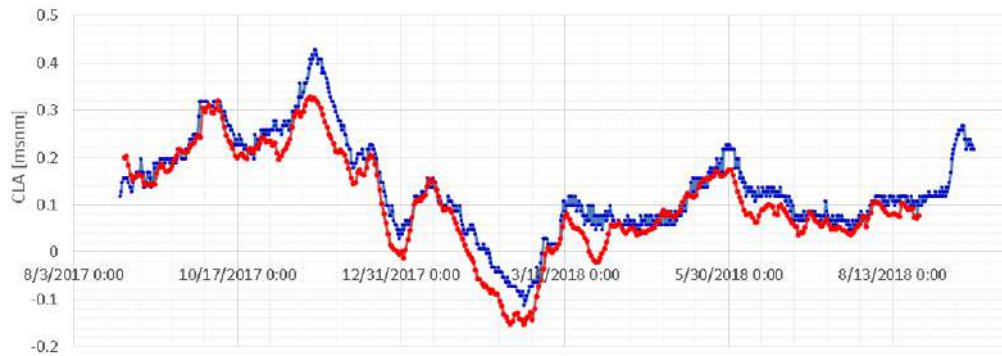


Figura 4-7 Cotas de Lámina de Agua registrada y simulada estación Nueva Venecia

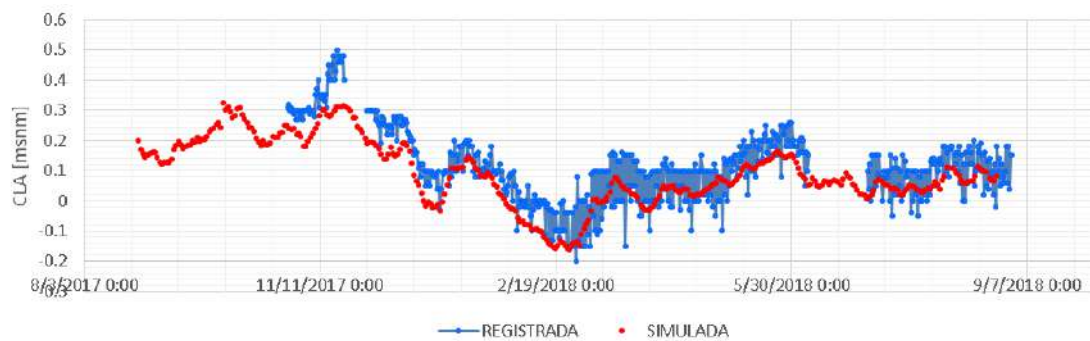


Figura 4-8 Series de tiempo de Cotas de lámina de agua estación Aguas Vivas

4.1.4.1 Falta de registros de nivel en río Fundación

En la Figura 4-9 y Figura 4-10 se presenta la falta de los datos de las crecientes del 13 al 21 de noviembre, el cual es el volumen que hace falta para que el modelo se ajuste a lo registrado, ya que como puede verse en mayo y junio de 2018 cuando se registran caudales de alrededor de 100 m³/s aguas arriba en la estación de Fundación abajo se registran caudales de alrededor de 60 m³/s.

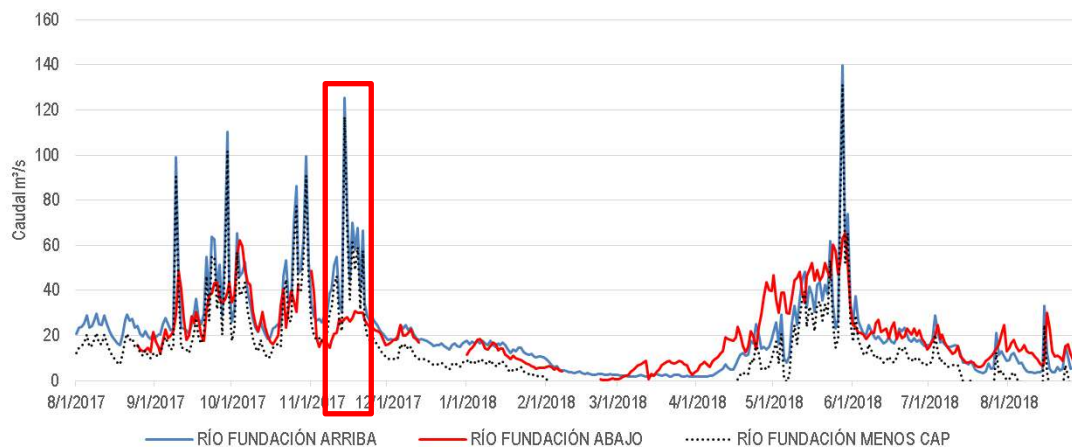


Figura 4-9 Caudales no registrados en la estación Fundación Abajo 2017 a 2018

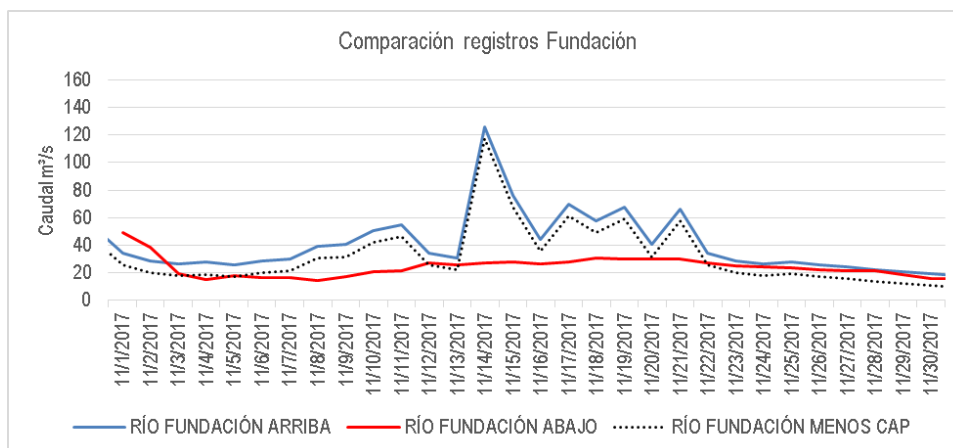


Figura 4-10 Caudales no registrados en la estación Fundación Abajo para noviembre de 2017

Para la misma época de noviembre de 2017 los ríos Sevilla y Aracataca reflejaron el mismo comportamiento de incremento de caudal que el río Fundación aguas arriba, pero estos si fueron registrados en las estaciones ubicadas aguas debajo de la zona Bananera (Ver Figura 4-11 y Figura 4-12).

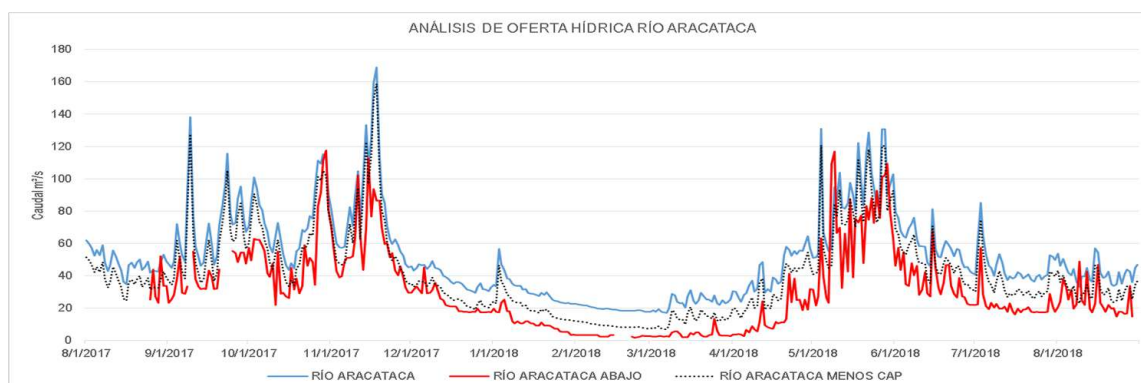


Figura 4-11 Caudales registrados en la estación Aracataca Abajo para noviembre de 2017



Figura 4-12 Caudales registrados en la estación Sevilla abajo para noviembre de 2017

Lo anterior refleja la gran influencia que tienen los aportes del río Fundación sobre el comportamiento del complejo CGSM, dado que aunque los ríos Aracataca y Sevilla

ingresaron volúmenes de agua importantes hizo falta el volumen que debió aportar el río Fundación para lograr un mejor ajuste del modelo para el mes de noviembre.

4.2 Algunos resultados relevantes

Tal como se pudo evidenciar en el proceso de calibración del modelo se pueden extraer gran cantidad de resultados para hacer distintos tipos de análisis desde el punto de vista de variaciones temporales y espaciales de las principales variables hidráulicas tales como la velocidad, la profundidad, los caudales, las cotas de lámina de agua, el esfuerzo cortante entre otros.

A continuación se presentan algunos resultados relevantes dentro del análisis del comportamiento del complejo CGSM.

4.2.1 Influencia del nivel del mar en los niveles del complejo CGSM en marzo de 2018

De otro lado al observar los incrementos de nivel de las Ciénagas de Pajarales y cuerpo principal de la CGSM ocurridos entre el 01 al 20 de marzo de 2018 y comparar con los registros de nivel del mar Caribe, se pudo establecer que durante esta época, la cual es caracterizada por bajos aportes de agua dulce tanto de los ríos que descienden de la Sierra Nevada de Santa Marta como por los caños que conectan con el río Magdalena, se presentó un ingreso de agua salada hacia el complejo lo cual incrementó los niveles (Ver Figura 4-13 y Figura 4-14).

Lo anterior se pudo evidenciar en el modelo hidrodinámico al observar las direcciones preferenciales de flujo (Ver Figura 4-15) tanto en la Boca de La Barra como en el caño Grande, en donde los flujos de agua provenían desde el mar hacia el espejo de agua principal y posteriormente hacia la ciénaga de Pajarales.

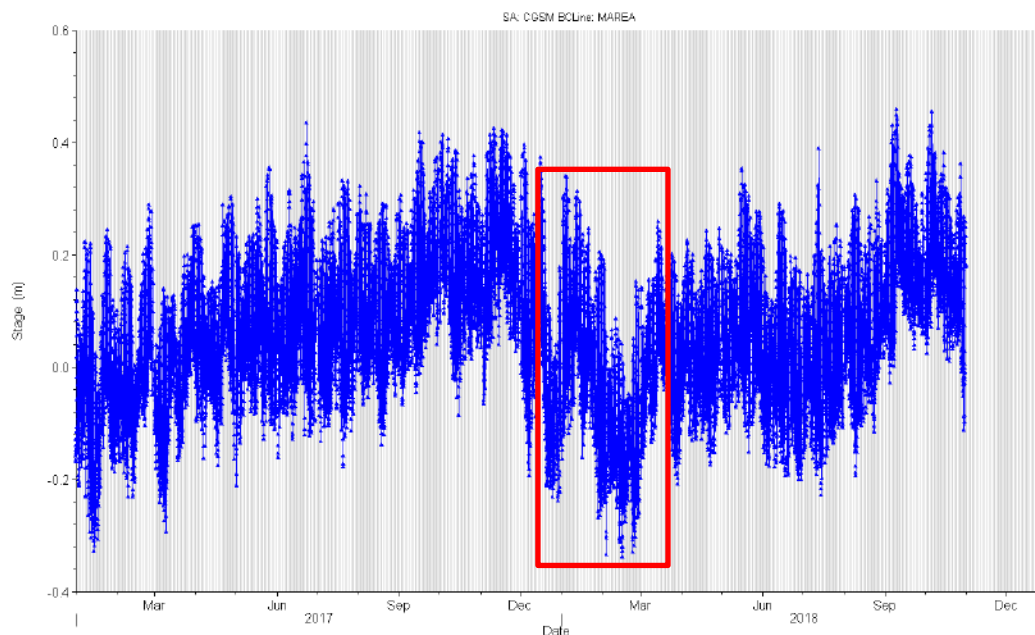


Figura 4-13 Serie de tiempo del nivel medio del mar relacionado con Nueva Venecia y Aguas Vivas

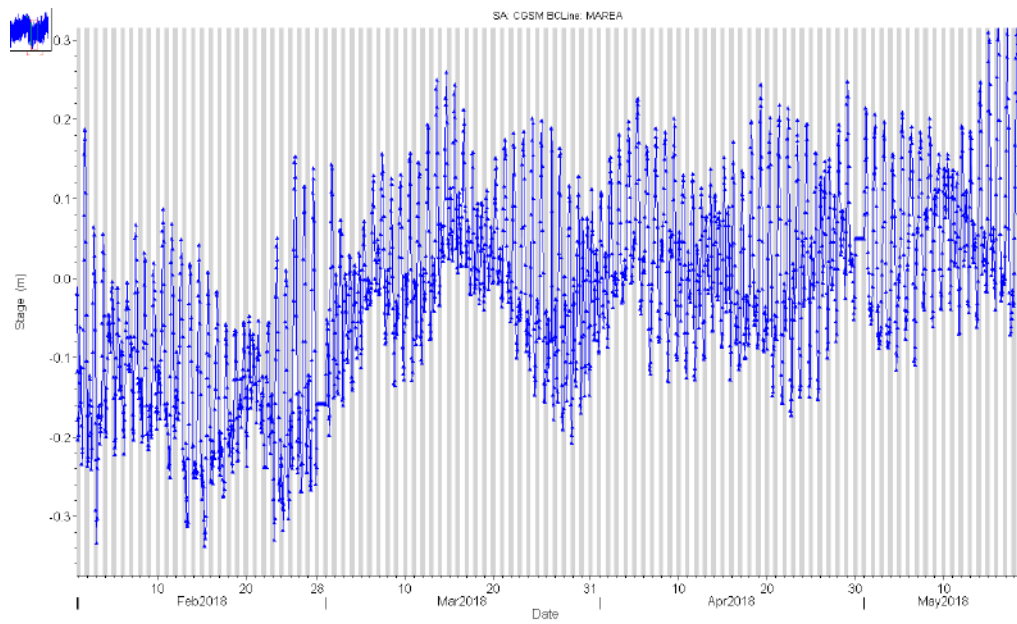


Figura 4-14 Serie de tiempo del nivel medio del mar de Febrero a Mayo de 2018

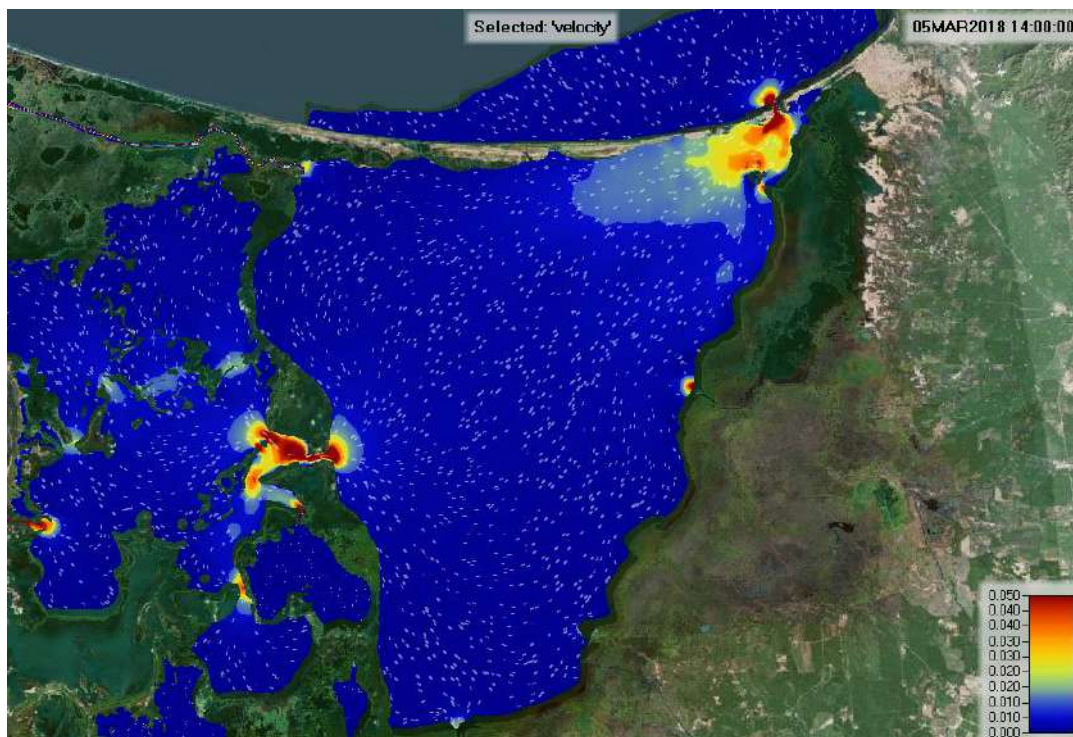


Figura 4-15 Mapa de velocidades y direcciones de flujo para el 05 de marzo de 2018

En la Figura 4-16 y Figura 4-17 se presentan las velocidades y direcciones de flujo para el 29 de febrero de 2018 y 07 de marzo de 2018. Para el caso del 29 de febrero de 2018 el agua está fluyendo desde la ciénaga de Pajarales hacia la CGSM y posteriormente hacia el mar caribe a través de la Boca de La Barra. Mientras que para el 7 de marzo de 2018 el

agua está fluyendo desde el mar Caribe a través de la Boca de la Barra hacia la CGSM y posteriormente hacia la Ciénaga de Pajarales a través de Caño Grande.

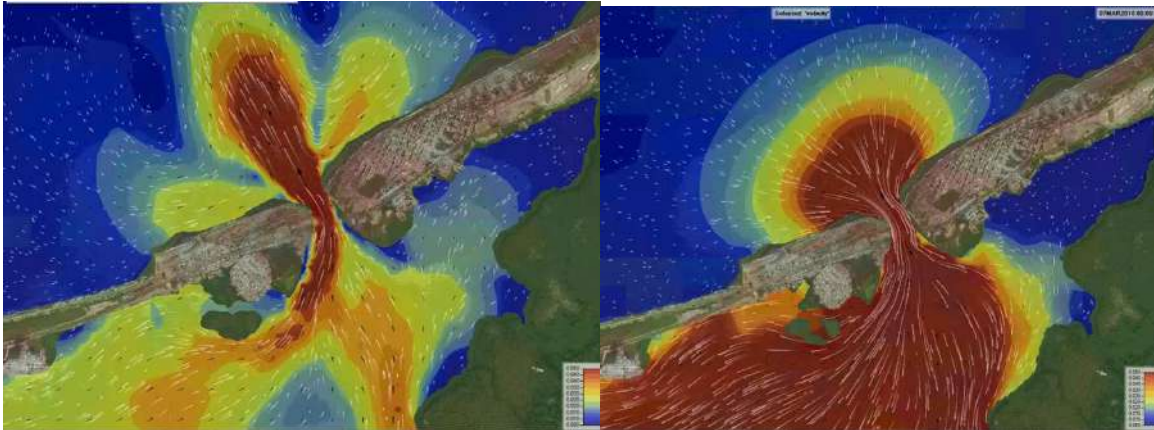


Figura 4-16 Mapa de velocidades y direcciones de flujo para la Boca de la Barra.

Lo anterior explica tanto el incremento de niveles en el complejo cenagoso producto del ingreso de agua salada principalmente y la gran dinámica de flujo bidireccional que presentan tanto el caño Boca de La Barra como el caño Grande.

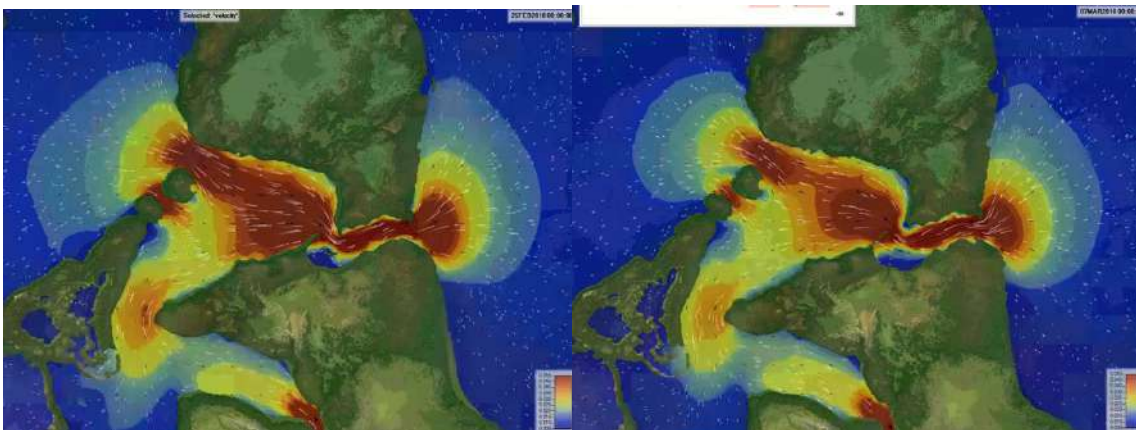


Figura 4-17 Mapa de velocidades y direcciones de flujo para Caño Grande

4.2.2 Mapa de velocidades máximas y mínimas

Al realizar un análisis sobre las velocidades máximas que se presentaron para el período de análisis 2017 2018 para el complejo CGSM se pudo evidenciar que estas se presentan como es de esperarse para las épocas de mayo y noviembre principalmente que es cuando se presentaron los aportes más altos de todos los tributarios. Tal fue el caso del 21 de mayo de 2018 a las 8 pm (Ver Figura 4-18) en el cual se presentaron velocidades en el cuerpo de agua principal y en la Ciénaga de Pajarales de alrededor de 0.012 m/s (1.2 cm/s), en caño Grande de alrededor de 0.15 m/s (15 cm/s) y en la boca de la Barra 0.7 m/s (70 cm/s) saliendo agua hacia el mar Caribe.

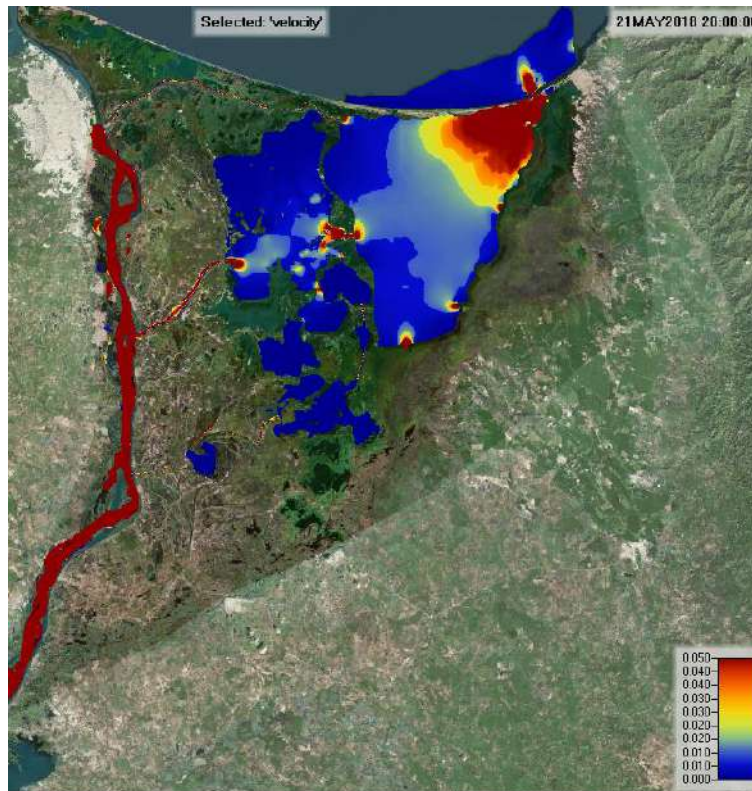


Figura 4-18 Mapa de velocidades para el 21 de mayo de 2018 8:00 pm

Para el caso de las velocidades mínimas en el complejo se presentaron en el mes de febrero de 2018 con valores en el espejo de agua principal y en Pajarales menores a 1 cm/s, mientras que en caño Grande fueron velocidades de 8 cm/s y en la Boca de la Barra se presentaron velocidades de 15 cm/s con flujo de salida hacia el mar Caribe (Ver Figura 4-19).

De esta manera se pueden analizar las velocidades para cualquier día dentro del período de análisis y contrastarlos con las medidas de velocidades registradas con los aforos realizados.

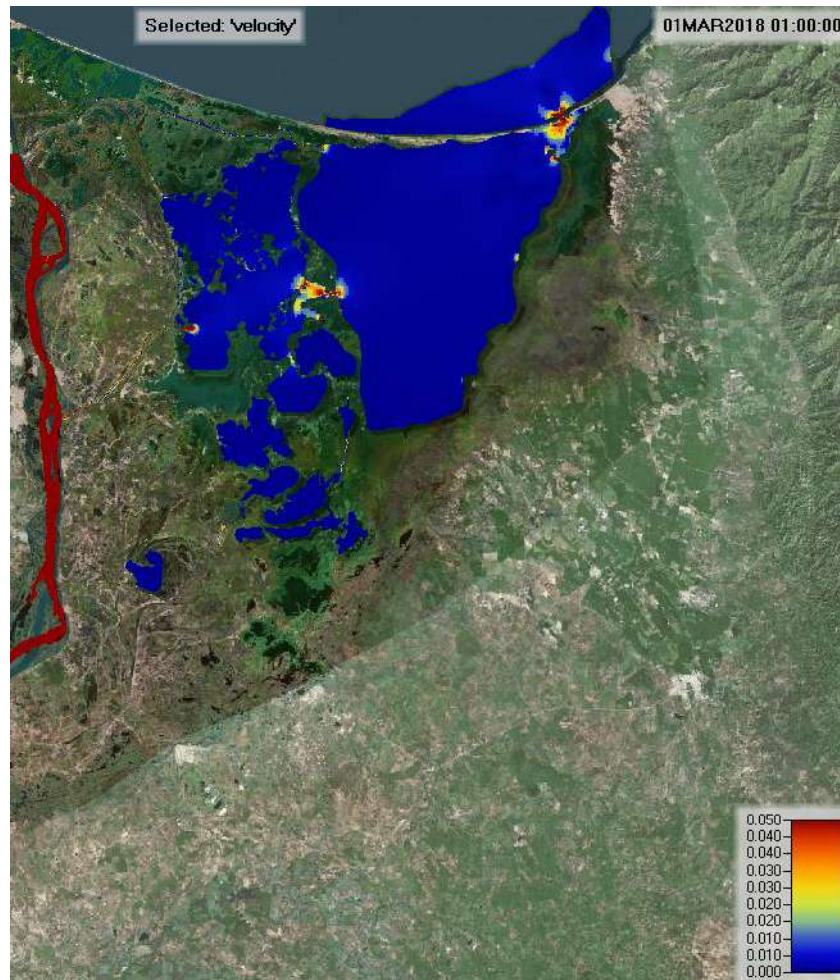


Figura 4-19 Mapa de velocidades para el 28 de febrero de 2018 11:00 pm

4.2.3 Mapa de profundidades máximas y mínimas

Así mismo se realizó el análisis de profundidades máximas y mínimas para el complejo CGSM. Para el caso de las profundidades mínimas se obtuvieron valores en el espejo Principal que están entre 2.0 m a 0.4 m (Ver Figura 4-20).

En cuanto a las profundidades máximas se presentan profundidades de 2.3 m en las zonas más profundas a 1.0 m en las zonas menos profundas (Ver).

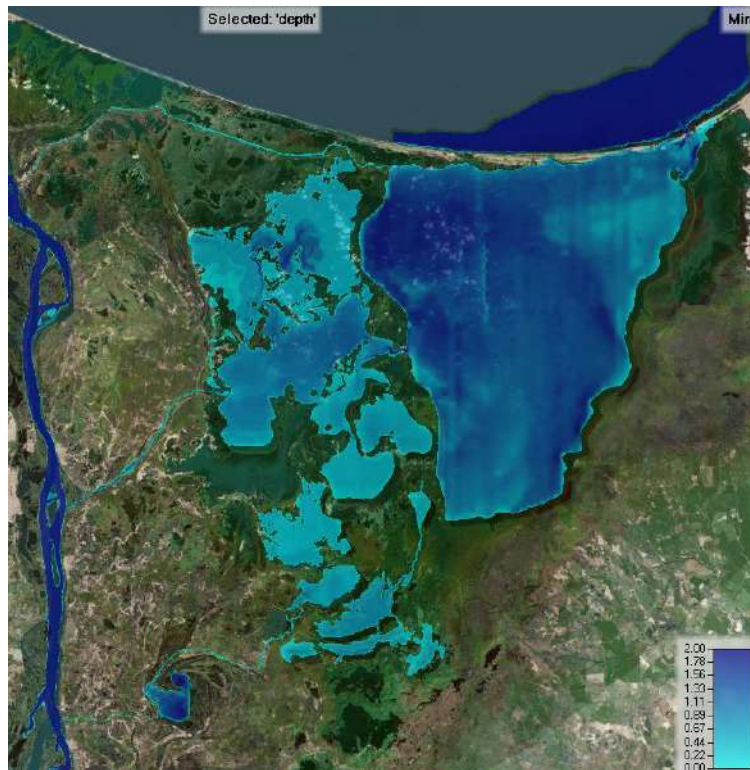


Figura 4-20 Mapa de profundidades mínimas

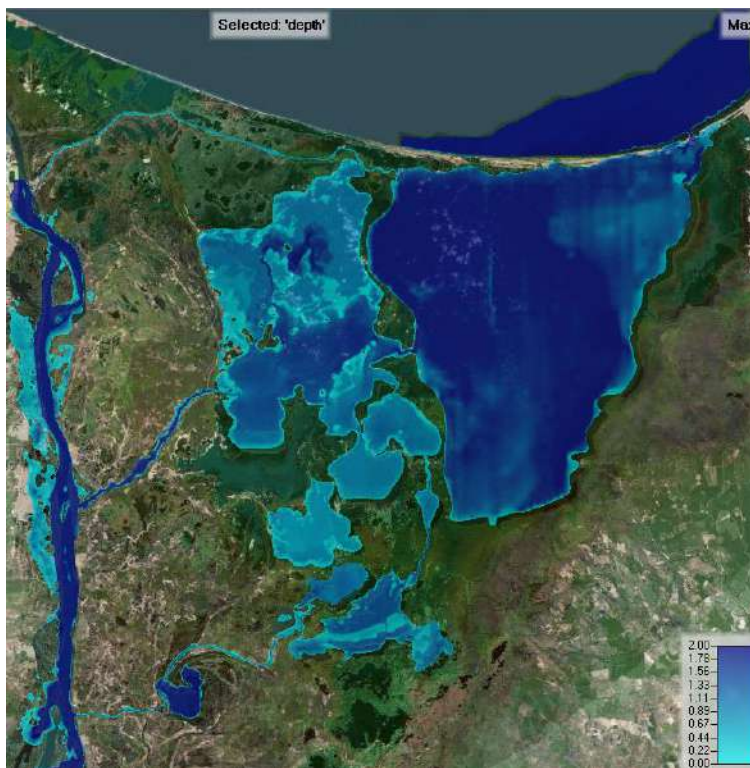


Figura 4-21 Mapa de profundidades máximas

4.3 Series de tiempo de caudales para el balance hídrico condición actual

A partir del modelo calibrado se procedió a extraer las series de tiempo con resolución horaria de caudales para los caños que interconectan todo el complejo Cenagoso con el fin de poder ser usados para la realización del balance hídrico.

4.3.1 Caño Renegado

Tal como se describió anteriormente el caño presenta una estructura de control en el inicio de su recorrido, por tanto los caudales están regulados, por tanto según el modelo hidrodinámico dicho caño transportó caudales entre los 5 m³/s y 10 m³/s para el período de análisis 2017 a 2018, con la ocurrencia de un pico de caudal de 25 m³/s para el 14 de abril de 2018 debido al mantenimiento y apertura de la compuerta.

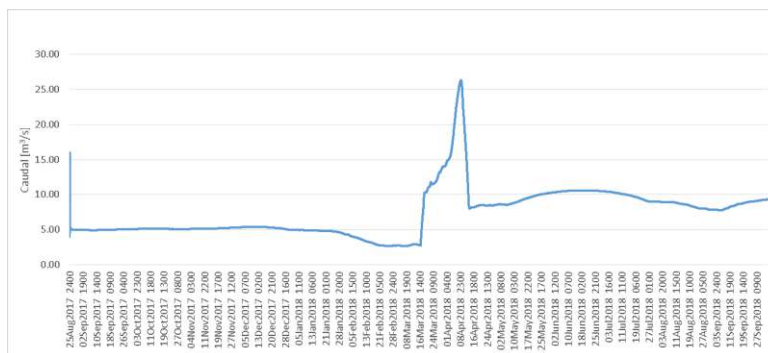


Figura 4-22 Serie de tiempo de caudales Caño Renegado

4.3.2 Caño Alfandoque

Las aguas que transitan por el caño Renegado son transportadas hacia la Ciénaga de Buenavista para posteriormente transitar por caño Condazo y conectarse con las ciéngas localizadas en el costado sur del complejo, y terminar su recorrido en la ciénaga de Alfandoque la cual se conecta con el complejo de Pajarales a través del caño Alfandoque, el cual para el período de análisis transportó agua en ambas direcciones, hacia Pajarales y desde Pajarales con caudales de alrededor de 10 m³/s.

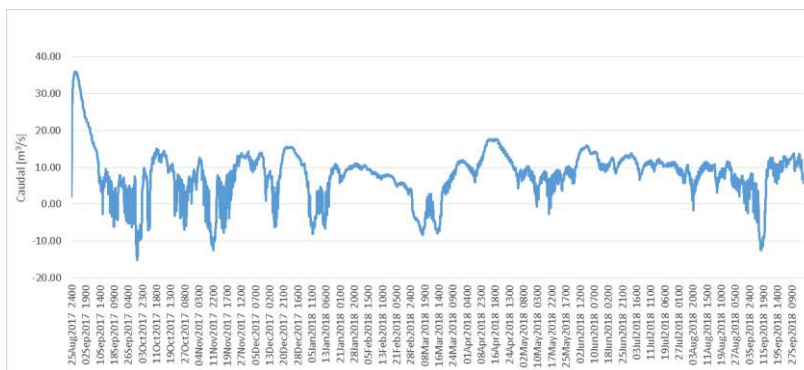


Figura 4-23 Serie de tiempo de caudales Caño Alfandoque

4.3.3 Caño Aguas Negras

Aunque el caño Aguas Negras contaba con una estructura de control esta no está en operación dado que fue abierto un boquete aguas arriba de la misma y el agua está fluyendo sin control a través del mismo, con caudales que están alrededor de 80 m³/s para época de aguas altas y de 12 m³/s para época de aguas bajas.

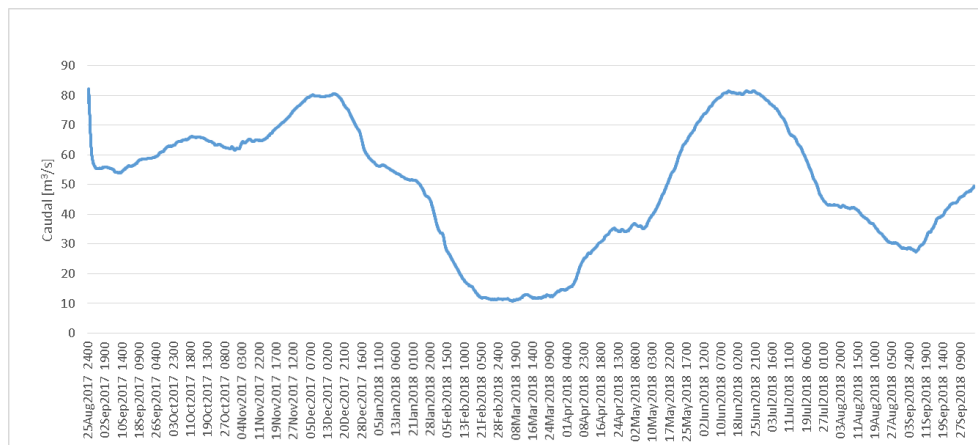


Figura 4-24 Serie de tiempo de caudales Caño Aguas Negras

4.3.4 Caño Clarín Los Cocos

El caño Clarín es el caño que se encuentra más aguas abajo del río Magdalena por tanto es que el menor capacidad de transporte tiene. Aunque no tiene ninguna estructura de control, este caño transporta entre 10 m³/s a 3 m³/s, para las épocas de niveles altos y bajos respectivamente, estando influenciado por el comportamiento de la marea y adicionalmente posee unas conexiones el Clarín Viejo, Ciénaga del Torno, Ciénaga de Ahuyama entre otras, localizadas en el costado noroccidental de la CGSM, las cuales no fueron tenidas en cuenta para el modelo debido a que no se cuenta con la información batimétrica de dichas conexiones y ciénagas.

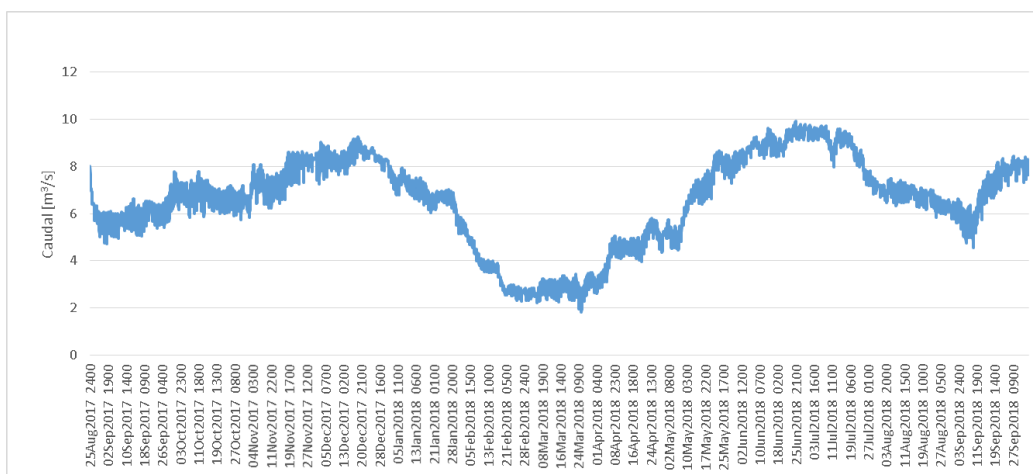


Figura 4-25 Serie de tiempo de caudales Caño Clarín Los Cocos

4.3.5 Caño Grande

El caño Grande es la principal conexión entre el cuerpo de agua principal de la CGSM y la Ciénaga de Pajarales, por tanto tiene una alta dinámica, lo cual ha sido evidenciado en campo en los aforos que se han realizado y que ha sido bien representado por el modelo hidrodinámico. Dicho caño presenta flujo bidireccional controlado por la marea y transporta caudales entre los 50 m³/s y 150 m³/s.

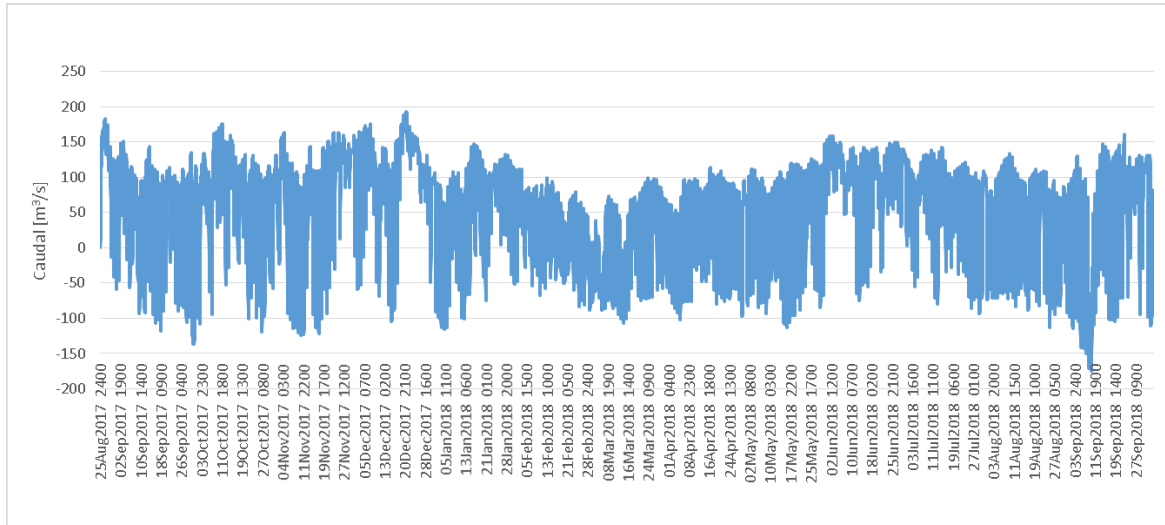


Figura 4-26 Serie de tiempo de caudales caño Grande

4.3.6 Caño Boca de la Barra

La Boca de la Barra es la principal conexión del mar caribe con la CGSM y presenta flujo bidireccional controlado por la marea transportando caudales entre los 200 m³/s y 700 m³/s para el período de análisis 2017 a 2018.

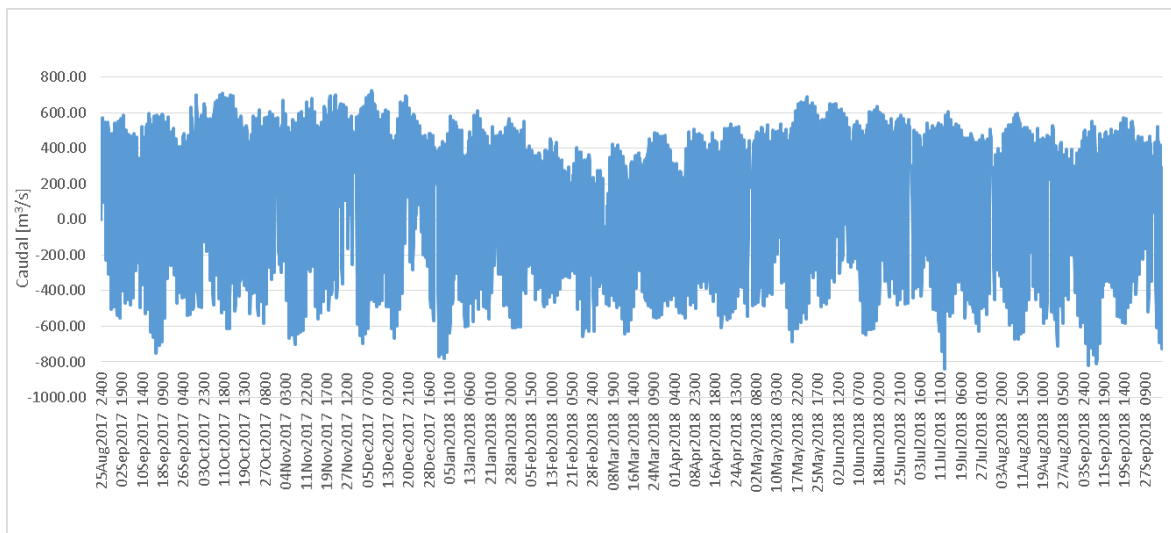


Figura 4-27 Serie de tiempo de caudales caño Boca de la Barra

4.3.7 Serie de tiempo de cotas de lámina de agua

Con el fin de que en el balance hídrico se tenga en cuenta el almacenamiento de agua en la CGSM se extrajeron los resultados de la serie de tiempo de cotas de lámina de agua las cuales pueden ser usadas para obtener las series de tiempo de volumen de agua almacenado a partir de las curvas cota volumen.

Tal como se puede ver en la Figura 4-28 la lámina de agua de la CGSM presentó valores máximos de alrededor de 0.3 msnm para noviembre de 2017 y mínimos de alrededor de -0.15 msnm para el mes de febrero de 2018.

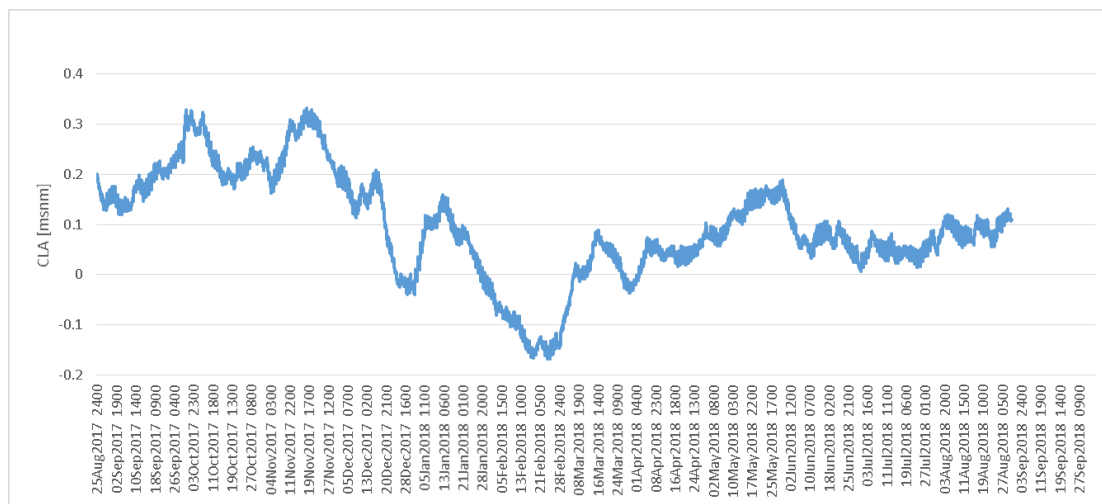


Figura 4-28 Serie de tiempo de cotas de lámina de agua CGSM

Cabe aclarar que las series de tiempo de los ríos que descienden de la Sierra Nevada de Santa Marta son analizadas en el componente de balance hídrico y son datos de entrada para el modelo hidrodinámico.

4.4 Modelo hidrodinámico condición normal o media

Del análisis hidrológico realizado en el contrato paralelo a este del contratista Fabián Caicedo se determinó que el año más reciente con condiciones medias o normales, es decir, sin ninguna influencia de los fenómenos de variabilidad climática fue el año 2013. Por tanto se procesaron todas las series de tiempo requeridas para la ejecución del modelo, es decir, la serie de tiempo de caudales del río Magdalena, la serie de tiempo de caudales de los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla y las series de tiempo de niveles del mar de la estación Santa Marta propiedad de la DIMAR.

4.4.1 Topología del modelo hidrodinámico de condición normal o media

La topología del Modelo hidrodinámico es la misma que para el escenario de condición actual 2017-2018, con las siguientes modificaciones:

- 1) Las series de tiempo de caudales del río Magdalena son los registros de la estación Calamar menos los registros de caudal de la estación Gambote en el canal del dique para el año 2013, en la cual los caudales máximos estuvieron alrededor de 8000 m³/s para los meses de junio y noviembre y diciembre; mientras que los caudales mínimos se presentaron en el mes de febrero con alrededor de 2600 m³/s (Ver Figura 4-29).



Figura 4-29 Serie de tiempo de caudales del río Magdalena para el año medio 2013

- 2) Las series de tiempo de los caudales de los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla son las registradas en las estaciones aguas arriba de la zona Bananera operadas por el IDEAM, pero sustrayendo las concesiones registradas en Corpamag para cada una de las cuencas de los ríos (Ver Figura 4-30). Tal como se puede apreciar los caudales más altos los presentó el río Fundación en junio con caudales máximos de 140 m³/s y en septiembre con 180 m³/s, mientras que para la misma fecha el río Aracataca presentó caudales de alrededor 100 m³/s y 60 m³/s, respectivamente. Y el río Sevilla 40 m³/s y 60 m³/s.

Los caudales mínimos se presentaron en la temporada seca de enero a marzo con caudales de alrededor de 4 m³/s para el río Fundación y hasta cero m³/s para los ríos Aracataca y Sevilla. Lo anterior ha sido comprobado en campo en las campañas de aforos dado que en estas épocas los ríos se pueden transitar a pie de un lado a otro.

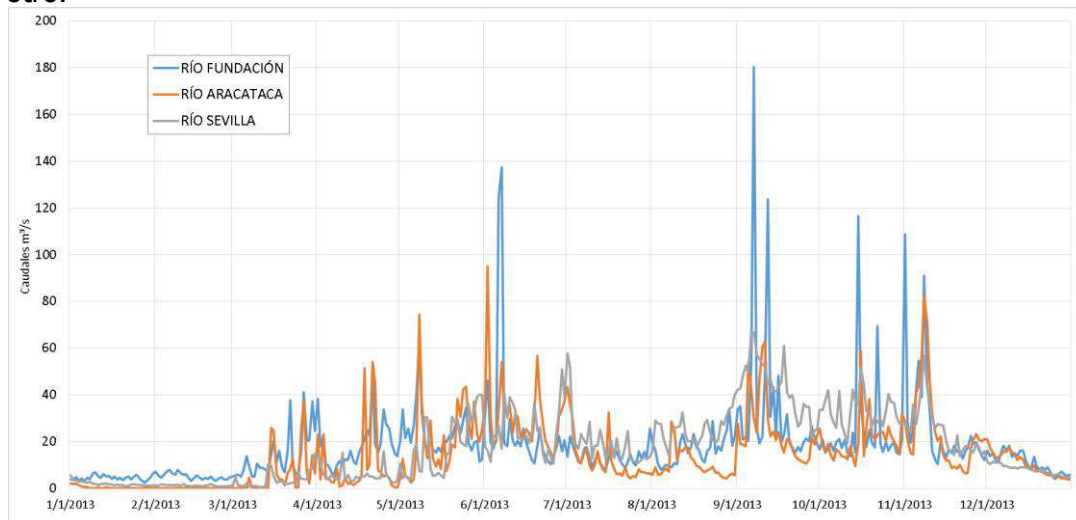


Figura 4-30 Series de tiempo caudales de los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla año medio 2013

- 3) La serie de tiempo del nivel del mar es la serie de tiempo registrada en la estación Santa Marta de la DIMAR para el año 2013 (Ver Figura 4-32). Tal como se puede observar los niveles mínimos del mar se presentaron en febrero con valores medios de -0.2 m con una amplitud media de 0.45 m, mientras que los máximos se

presentaron en octubre con valor medio de 0.2 m con una amplitud media de 0.35 m.

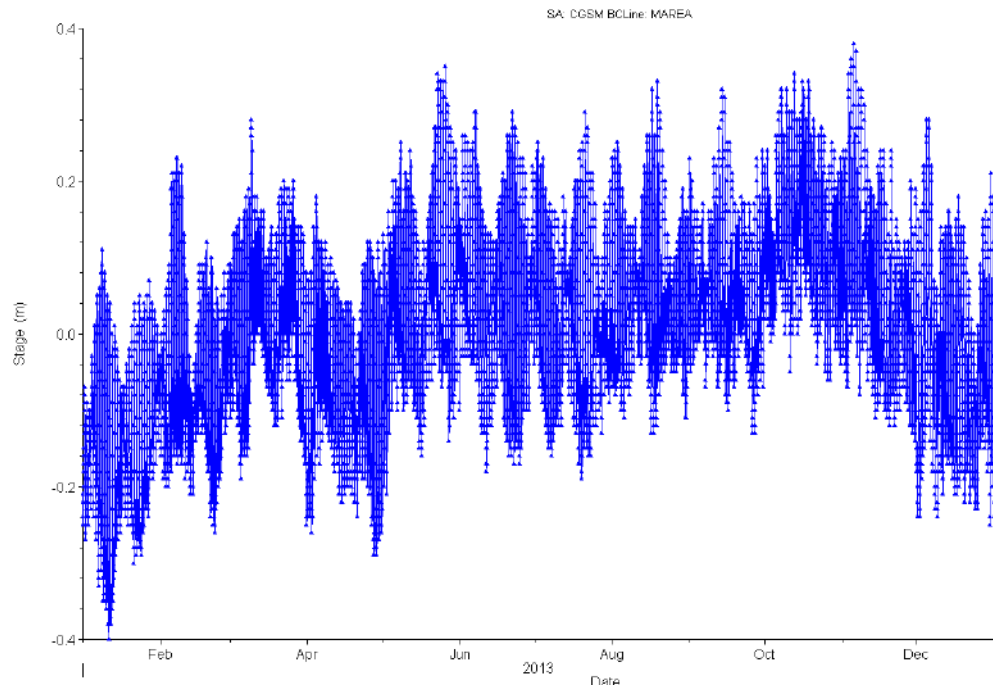


Figura 4-31 Registro de nivel del mar estación Santa Marta DIMAR 2013

- 4) La compuerta del caño renegado se dejó con una apertura del 50 cm.
- 5) El tiempo de cálculo es de 30 minutos y el de elaboración de resultados de 1 hora.

En la Figura 4-32 se presenta la topología del modelo hidrodinámico en donde los ríos y caños se modelaron unidimensional y los complejos de Pajarales, CGSM y el mar caribe se modelaron bidimensionales.

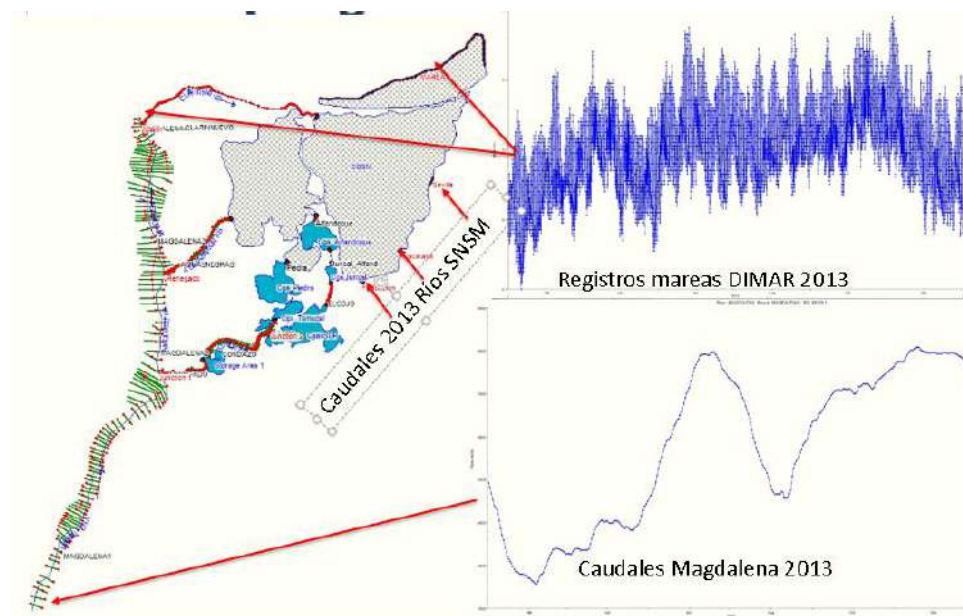


Figura 4-32 Topología Modelo hidrodinámico condición normal o media

Con esta topología se procedió a correr el modelo hidrodinámico para la condición normal o media del año 2013 con el fin de obtener los caudales que fluyeron por cada uno de los caños y las cotas de lámina de agua de la CGSM, tal como se presenta a continuación.

4.4.2 Caño Renegado

Como resultado del modelo se obtuvieron los caudales que fluyeron por el caño Renegado, presentando sus valores mínimos en enero con alrededor de 4 m³/s y máximos de casi 10 m³/s para la primera semana de junio y noviembre y diciembre (Ver Figura 4-33).

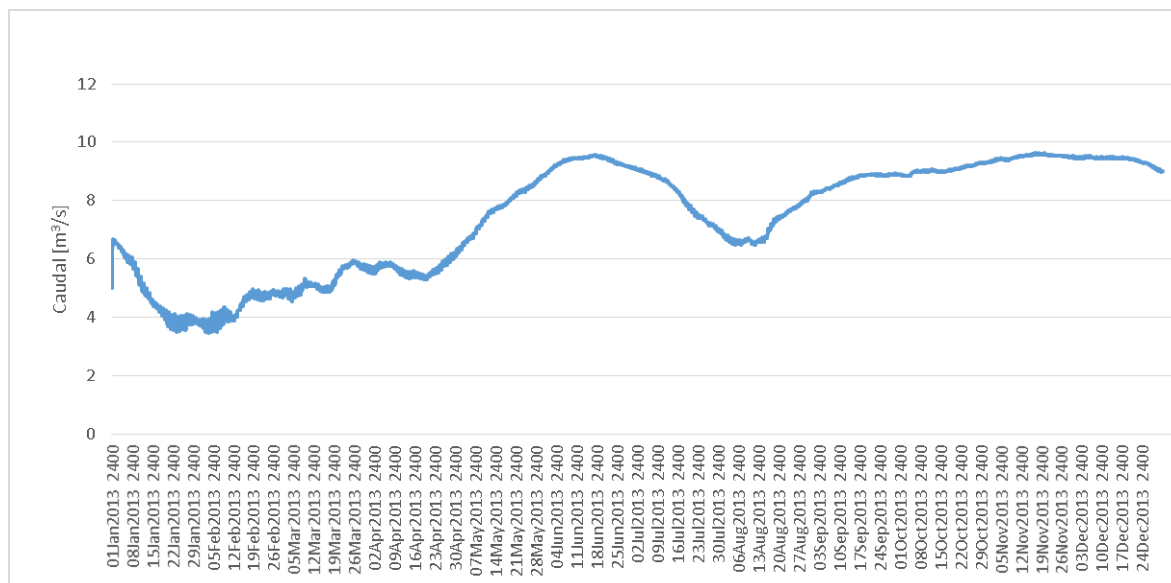


Figura 4-33 Serie de tiempo de caudales caño Renegado condición media 2013

4.4.3 Caño Alfandoque

El caño Alfandoque presentó flujo bidireccional, es decir, desde y hacia el complejo de Pajarales con caudales alrededor de 15 m³/s hacia Pajarales y 5 m³/s de Pajarales a la ciénaga de Alfandoque.

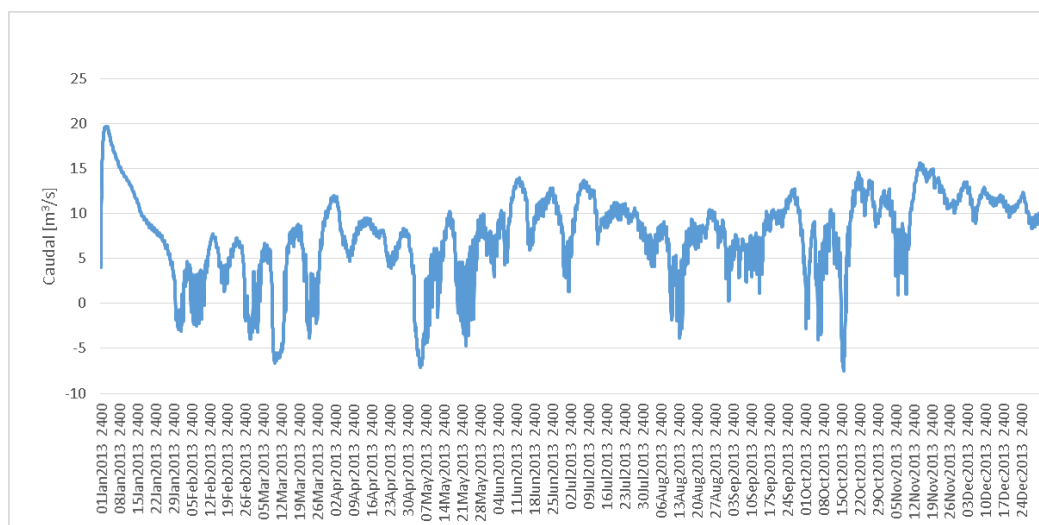


Figura 4-34 Serie de tiempo de caudales caño Alfandoque condición media 2013

4.4.4 Caño Aguas Negras

El caño Aguas Negras presentó el régimen bimodal que caracteriza el río Magdalena presentado valores mínimos de 10 m³/s en los meses de enero a abril. Los caudales máximos en junio y noviembre a diciembre con valores alrededor de los 50 m³/s.

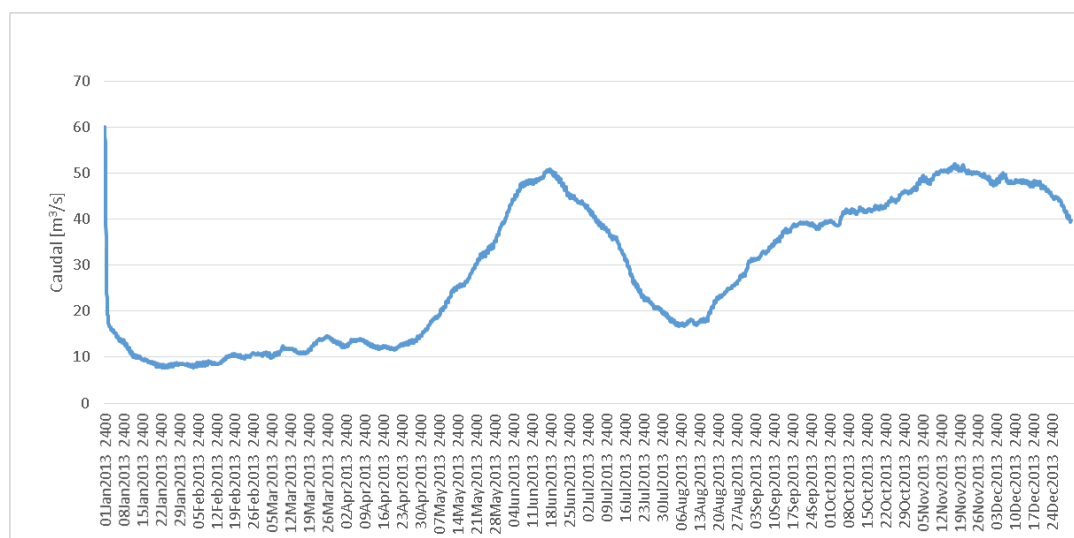


Figura 4-35 Serie de tiempo de caudales caño Aguas Negras condición media

4.4.5 Caño Clarín Los Cocos

El caño Clarín nuevo transporte caudales del río Magdalena hacia la CGSM con mínimos de alrededor de 1.0 m³/s en el mes de enero y máximos de alrededor de 4 m³/s que se presentaron en octubre (Ver Figura 4-36). Se puede observar la influencia de la marea tanto en los registros de nivel como en el comportamiento del caudal que fluye por el año Calrín.

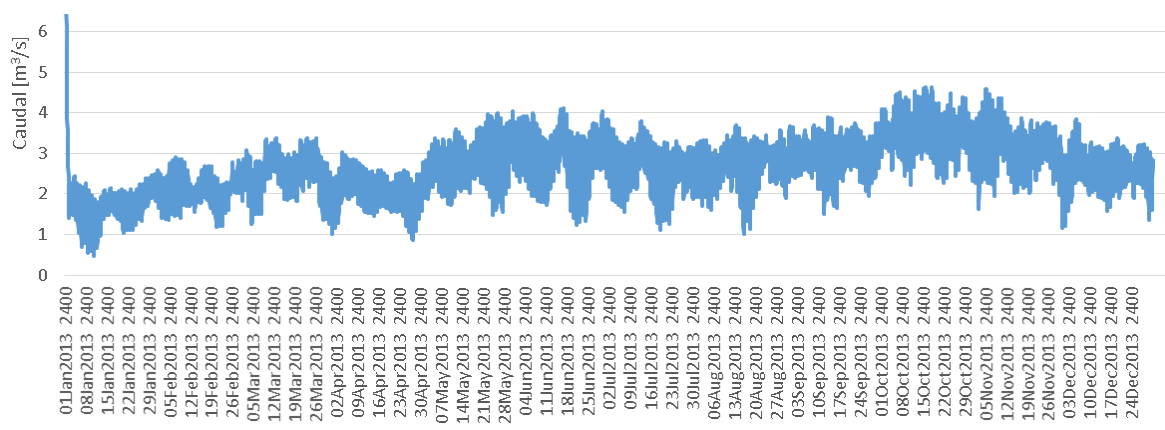


Figura 4-36 Serie de tiempo de caudales caño Clarín Los Cocos condición media

4.4.6 Caño Grande

El caño Grande presentó flujo bidireccional entre la CGSM y el complejo de Pajarales con caudales entre 100 a 150 m³/s (Ver Figura 4-37). Cabe aclarar los valores negativos indican que el agua fluyó del espejo principal de la CGSM hacia el complejo de Pajarales. En la segunda semana de junio y la segunda semana de noviembre el flujo estuvo principalmente en la dirección de Pajarales a la CGSM, dado que el caño aguas negras presentó los valores más altos de caudal para estas épocas (Ver Figura 4-35).

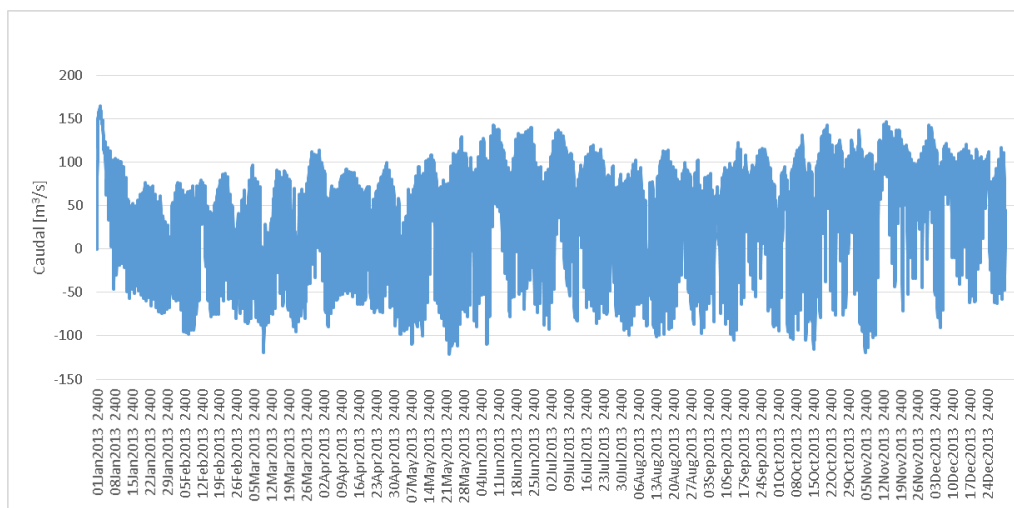


Figura 4-37 Serie de tiempo de caudales caño Grande condición media

4.4.7 Caño Boca de la Barra

La Boca de la Barra presentó un flujo bidireccional entre el mar Caribe y la CGSM con caudales de alrededor de 600 m³/s, en ambas direcciones. Cabe aclarar que los valores negativos de caudal corresponden a la dirección de flujo Mar Caribe – CGSM (Ver Figura 4-38).

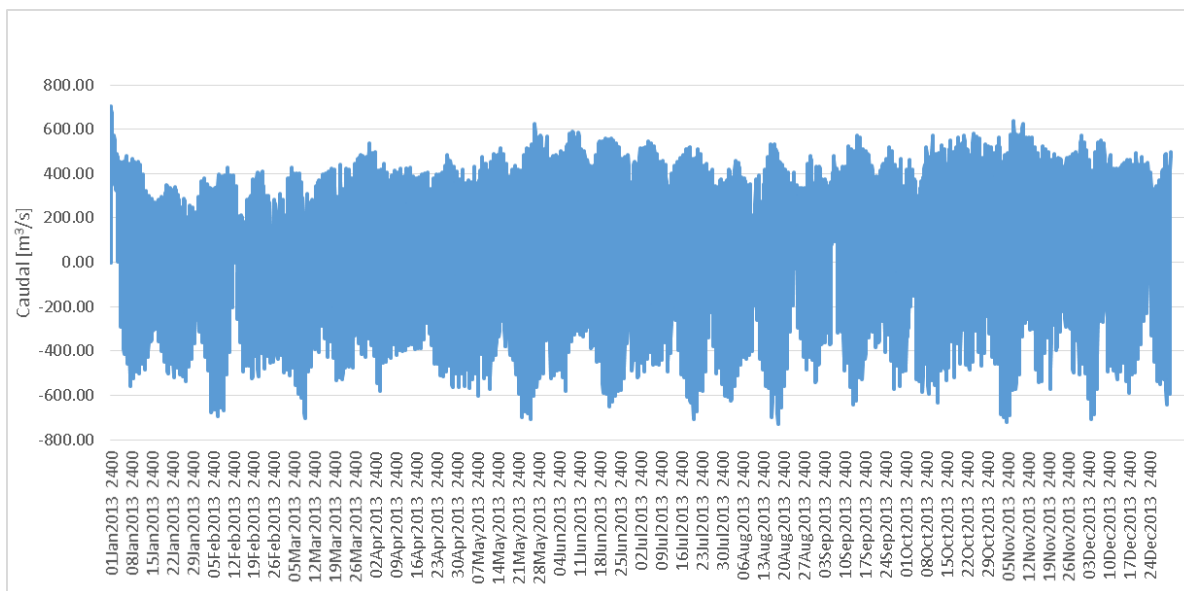


Figura 4-38 Serie de tiempo de caudales Boca de la Barra condición media 2013

4.4.8 Serie de tiempo cota de lámina de agua CGSM

En cuanto a la cota de lámina de agua de la CGSM, tiene un comportamiento directamente relacionado con los aportes de agua dulce de cada uno de los tributarios. Sus valores mínimos de alrededor de -0.15 m se presentaron en febrero mientras que sus valores máximos se presentaron en junio con alrededor de 0.15 m y noviembre con alrededor de 0.2 m (Ver Figura 4-39).

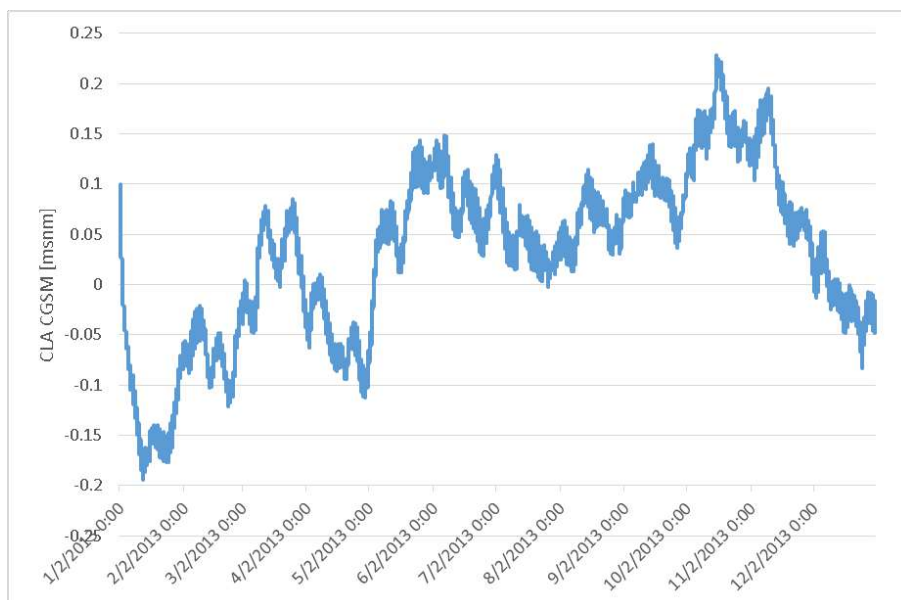


Figura 4-39 Serie de tiempo de cotas de lámina de agua CGSM condición media 2013

4.5 Modelo hidrodinámico condición niño

Del análisis hidrológico realizado en el contrato paralelo a este del contratista Fabián Caicedo se determinó que el año más reciente con condiciones niño o secas, fue el año 2015. Por tanto, se procesaron todas las series de tiempo requeridas para la ejecución del modelo, es decir, la serie de tiempo de caudales del río Magdalena, la serie de tiempo de caudales de los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla y las series de tiempo de niveles del mar de la estación Santa Marta propiedad de la DIMAR.

- 6) Las series de tiempo de caudales del río Magdalena son los registros de la estación Calamar menos los registros de caudal de la estación Gambote en el canal del dique para el año 2015, en la cual los caudales máximos estuvieron alrededor de 6000 m³/s para los meses de junio y noviembre; mientras que los caudales mínimos se presentaron en el mes de marzo con alrededor de 3000 m³/s (Ver Figura 4-43).

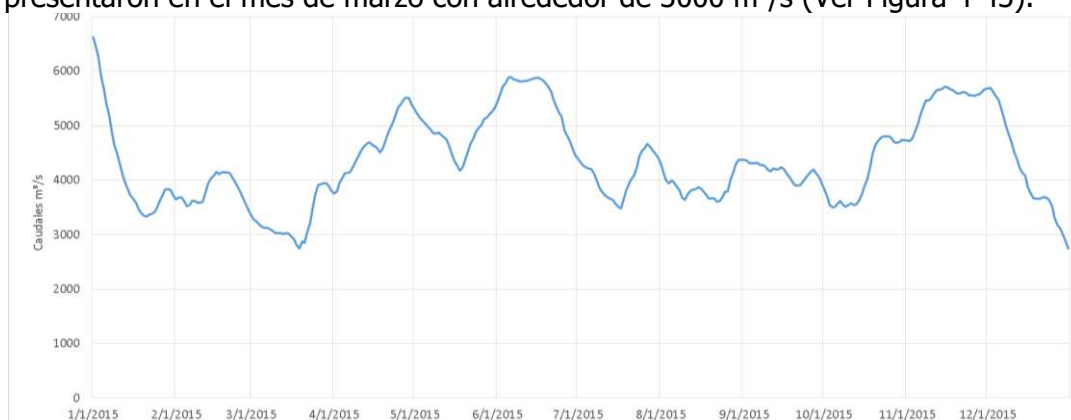


Figura 4-40 Serie de tiempo de caudales del río Magdalena para el año niño 2015

- 7) Las series de tiempo de los caudales de los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla son las registradas en las estaciones aguas arriba de la zona Bananera operadas por el IDEAM, pero sustrayendo las concesiones registradas en Corpamag para cada una de las cuencas de los ríos (Ver Figura 4-41). Tal como se puede apreciar los caudales

más altos los presentó el río Fundación en mayo con caudales máximos de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ y en septiembre con $50 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el río Aracataca presentó caudales de alrededor $50 \text{ m}^3/\text{s}$ en julio y $40 \text{ m}^3/\text{s}$ en noviembre.

El río Sevilla presentó caudales máximos de alrededor de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ en los meses de junio y octubre – noviembre.

Los caudales mínimos se presentaron en la temporada seca de enero a marzo con caudales de alrededor de $4 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río Fundación y hasta cero m^3/s para los ríos Aracataca y Sevilla. Lo anterior ha sido comprobado en campo en las campañas de aforos dado que en estas épocas los ríos se pueden transitar a pie de un lado a otro.

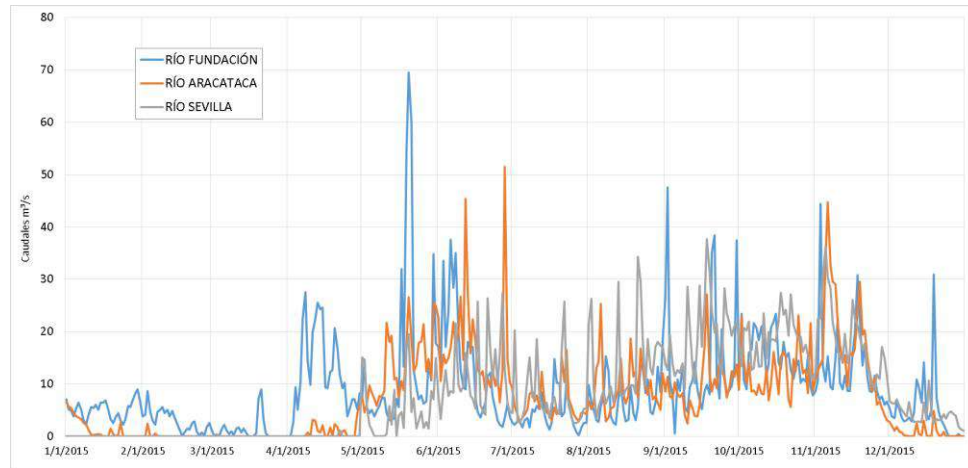


Figura 4-41 Series de tiempo caudales de los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla año niño 2015

- 8) La serie de tiempo del nivel del mar es la serie de tiempo registrada en la estación Santa Marta de la DIMAR para el año 2015 (Ver Figura 4-42). Tal como se puede observar los niveles mínimos del mar se presentaron en enero con valores medios de -0.2 m con una amplitud media de 0.30 m , mientras que los máximos se presentaron en agosto con valor medio de 0.2 m con una amplitud media de 0.35 m .

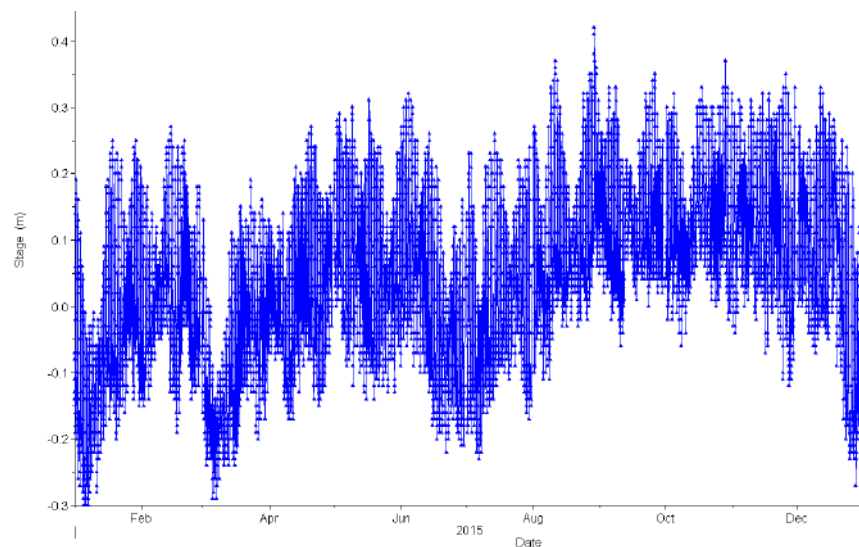


Figura 4-42 Registro de nivel del mar estación Santa Marta DIMAR 2015

- 9) La compuerta del caño renegado se dejó con una apertura del 50 cm.
- 10) El tiempo de cálculo es de 30 minutos y el de elaboración de resultados de 1 hora.

En la Figura 4-43 se presenta la topología del modelo hidrodinámico en donde los ríos y caños se modelaron unidimensional y los complejos de Pajarales, CGSM y el mar caribe se modelaron bidimensionales.

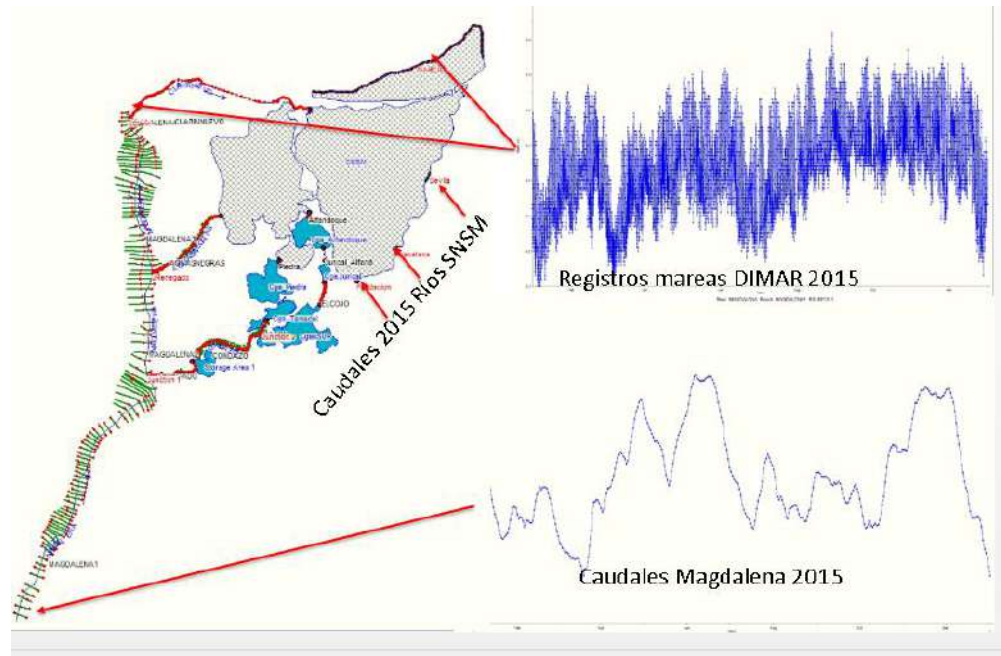


Figura 4-43 Topología Modelo hidrodinámico condición el Niño

4.5.1 Caño Renegado

El caño Renegado presentó caudales entre 4.0 m^3/s como caudal mínimo en marzo y de 8 m^3/s como caudales máximos en los meses de junio y noviembre, siguiendo el comportamiento bimodal del río Magdalena.

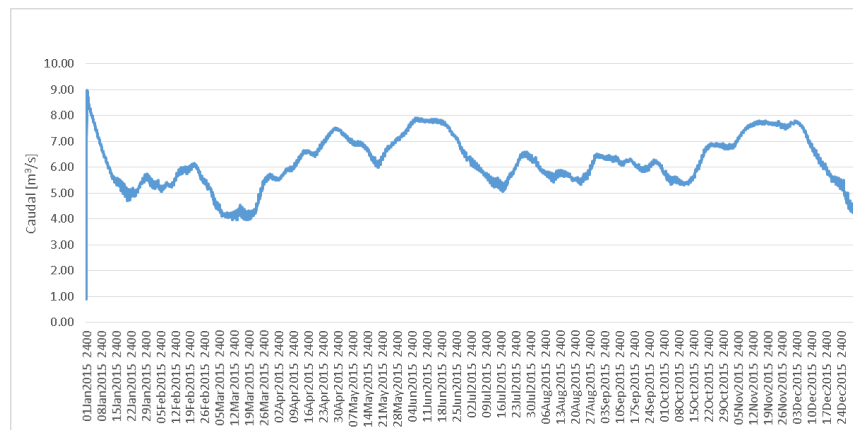


Figura 4-44 Serie de tiempo de caudales caño Renegado condición el Niño

4.5.2 Caño Alfandoque

El caño Alfandoque presentó comportamiento bidireccional, pero con una tendencia muy marcada a que estuvo fluyendo principalmente desde Alfandoque hacia el complejo de Parajales, es decir, en la condición seca los aportes por el caño Renegado son significativos para el complejo de Pajarales y por ende para todo el complejo CGSM.

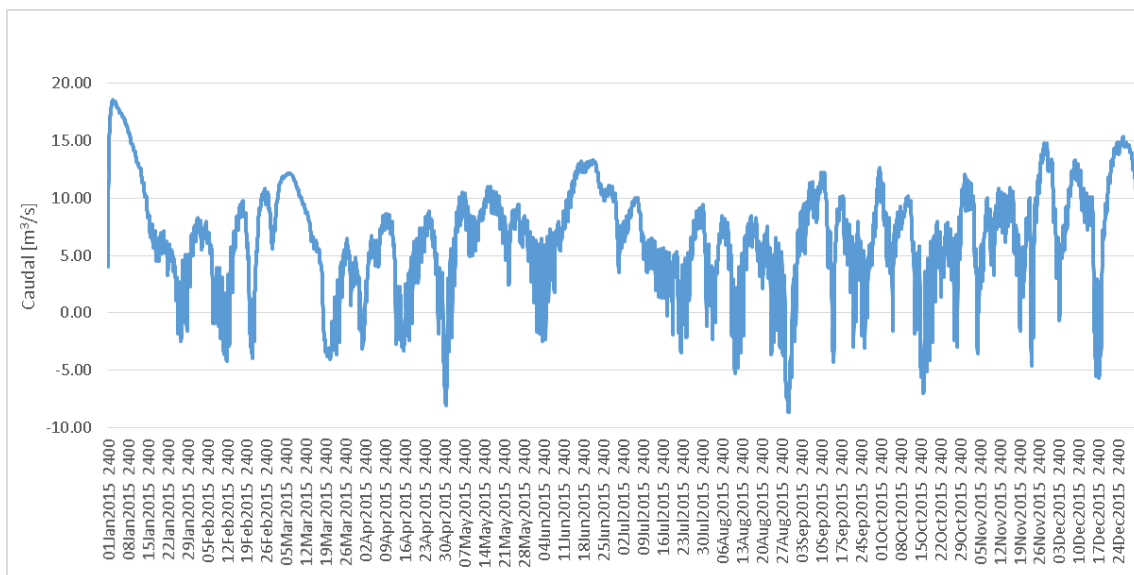


Figura 4-45 Serie de tiempo de caudales caño Alfandoque condición el Niño 2015

4.5.3 Caño Aguas Negras

El caño Aguas Negras siguiendo el comportamiento bimodal del río Magdalena presentó los caudales más bajos en el mes de marzo con alrededor de 8 m³/s y y caudales máximos en junio y noviembre de alrededor de 26 m³/s, lo cual explica nuevamente los aportes significativos del caño Renegado a todo el complejo, dado que para condiciones máximas transportaba alrededor de la tercera parte de lo que transportó el caño Aguas Negras.

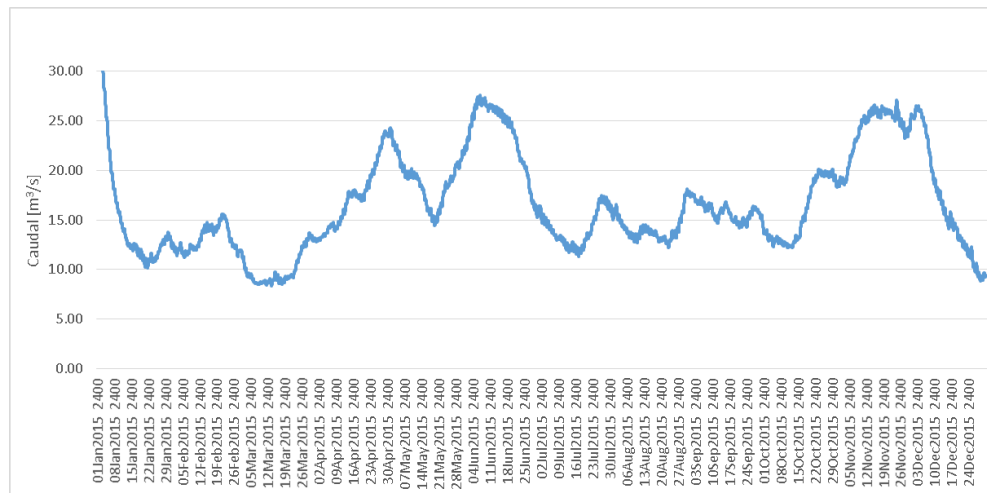


Figura 4-46 Serie de tiempo de caudales caño Aguas Negras condición el Niño 2015

4.5.4 Caño Clarín

El caño Clarín con su marcada influencia por las fluctuaciones de la marea presentó caudales mínimos de alrededor de 1.5 m³/s para el mes de marzo y máximos de 4 m³/s para el mes de noviembre (Ver Figura 4-47).

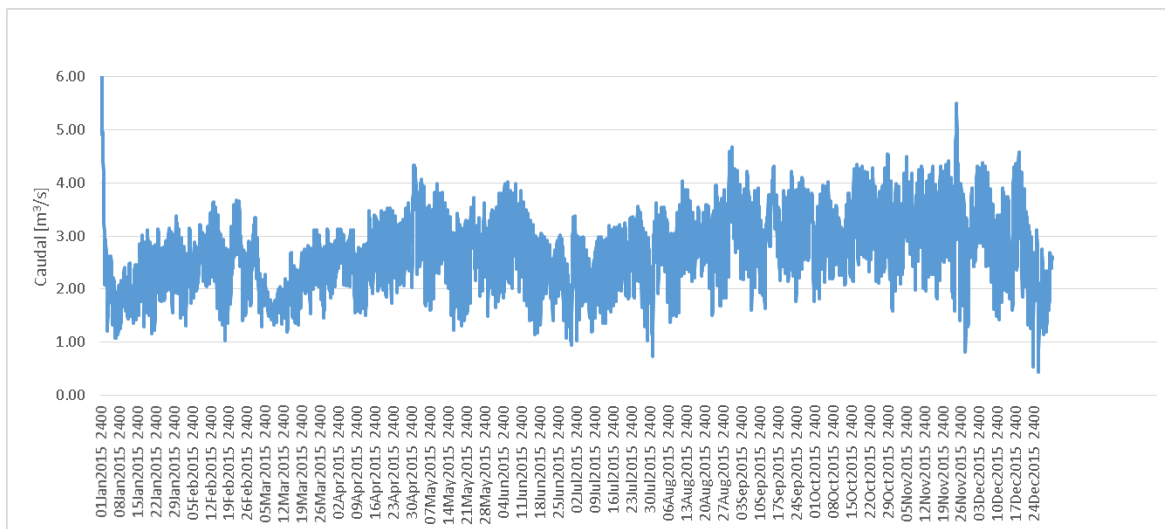


Figura 4-47 Serie de tiempo de caudales caño Clarín condición el Niño 2015

4.5.5 Caño Grande

El caño grande presentó flujo bidireccional con caudales entre 100 a 150 m³/s. En la primera semana del mes de marzo presentó flujo preferencial desde el complejo de Pajarales hacia la CGSM, esto es el efecto de los bajos aportes de los ríos de la Sierra Nevada, dado que para esta época son nulos. Adicionalmente el mar Caribe presentó sus niveles mínimos de -0.2 m para esta época y por ende el sistema fluyó principalmente desde el río Magdalena hacia el complejo CGSM (Ver Figura 4-48).

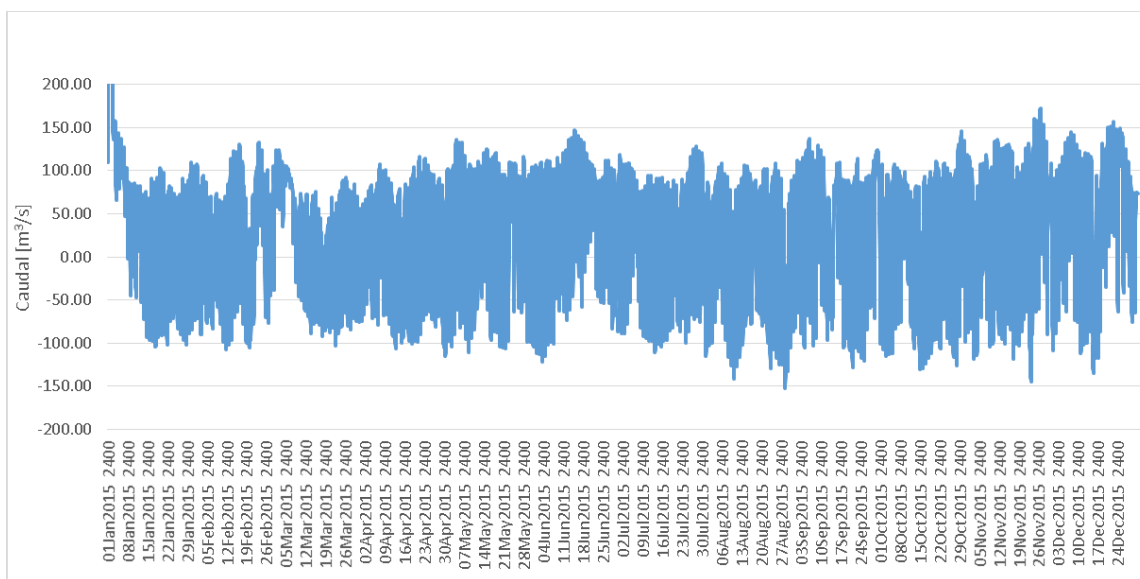


Figura 4-48 Serie de tiempo de caudales caño Grande condición el Niño 2015

4.5.6 Boca de la Barra

La boca de la Barra presentó flujo bidireccional con caudales alrededor de $600 \text{ m}^3/\text{s}$, presentando el mismo comportamiento de caño Grande en la primera semana del mes de marzo en la cual el agua fluyó principalmente desde el complejo CGSM hacia el mar Caribe.

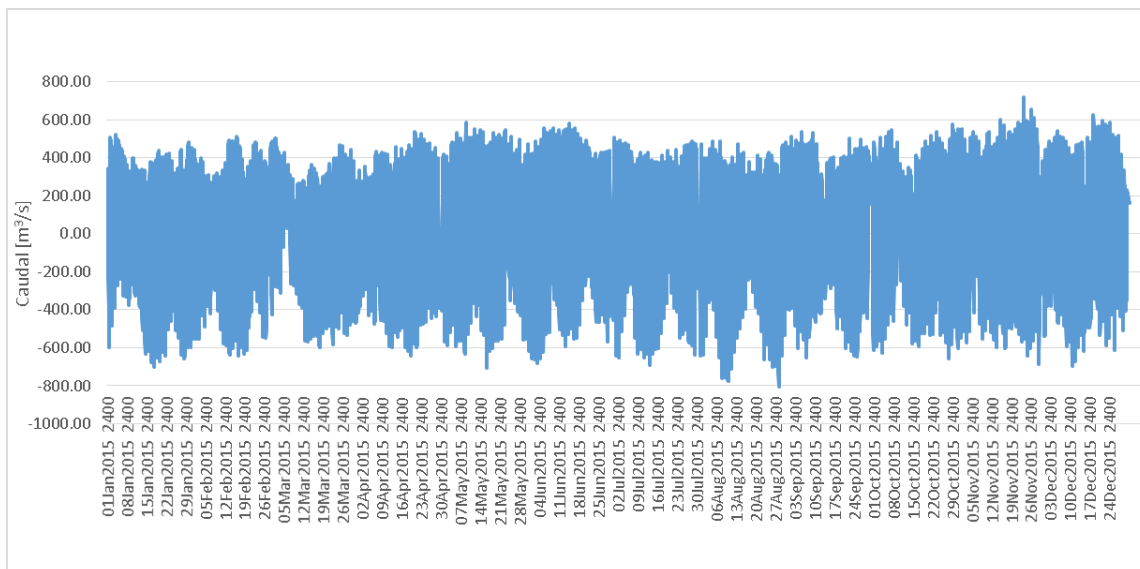


Figura 4-49 Serie de tiempo de caudales Boca de la Barra condición el Niño 2015

4.5.7 Cotas de Lámina de agua CGSM

Respecto a la variación de las cotas de lámina de agua de la CGSM se presentaron los valores mínimos la primera semana del mes de marzo, coincidiendo con los niveles mínimos del mar Caribe con valores alrededor de 0.16 m. En cuanto a los niveles máximos esto se presentaron principalmente en noviembre con valores de alrededor de 0.17 m.

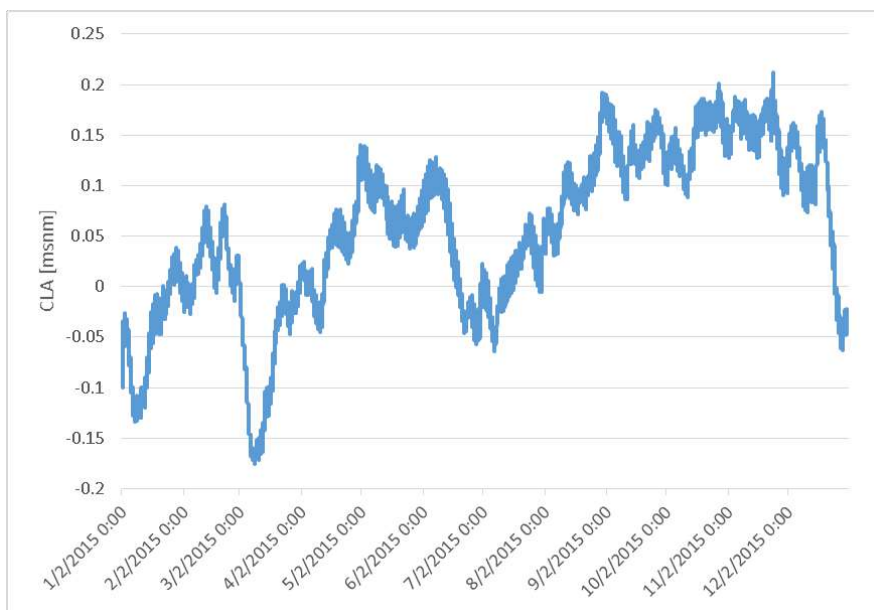


Figura 4-50 Serie de tiempo de cotas de lámina de agua CGSM condición el Niño 2015

4.6 Modelo hidrodinámico condición niña

Del análisis hidrológico realizado en el contrato paralelo a este del contratista Fabián Caicedo se determinó que el año más reciente con condiciones niña o húmedas, fue el año 2011. Por tanto, se procesaron todas las series de tiempo requeridas para la ejecución del modelo, es decir, la serie de tiempo de caudales del río Magdalena, la serie de tiempo de caudales de los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla y las series de tiempo de niveles del mar de la estación del CIOH en Cartagena operada por el Ideam.

- 1) Las series de tiempo de caudales del río Magdalena son los registros de la estación Calamar menos los registros de caudal de la estación Gambote en el canal del dique para el año 2011, en la cual los caudales máximos estuvieron alrededor de 12000 m³/s para los meses de junio y noviembre; mientras que los caudales mínimos se presentaron en el mes de marzo con alrededor de 5500 m³/s (VerFigura 4-51).

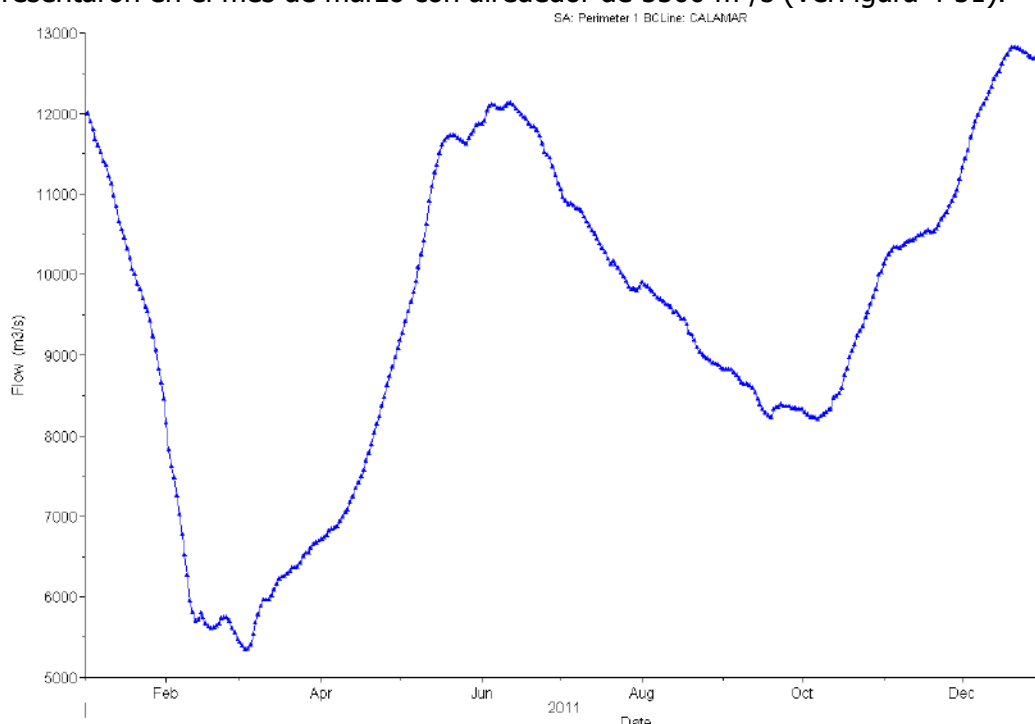


Figura 4-51 Serie de tiempo de caudales del río Magdalena para el año niña 2011

- 2) Las series de tiempo de los caudales de los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla son las registradas en las estaciones aguas arriba de la zona Bananera operadas por el IDEAM, pero sustrayendo las concesiones registradas en Corpamag para cada una de las cuencas de los ríos (Ver Figura 4-52). Tal como se puede apreciar los caudales más altos los presentó el río Aracataca en noviembre con caudales máximos de 200 m³/s, mientras que el río Fundación presentó caudales de alrededor 160 m³/s en noviembre al igual que el río Sevilla. Los caudales mínimos se presentaron en la temporada seca de enero a marzo con caudales de alrededor de 5 m³/s para el río Fundación, el río Aracataca alrededor de 4 m³/s y el Sevilla con aportes mínimos de 1.0 m³/s.

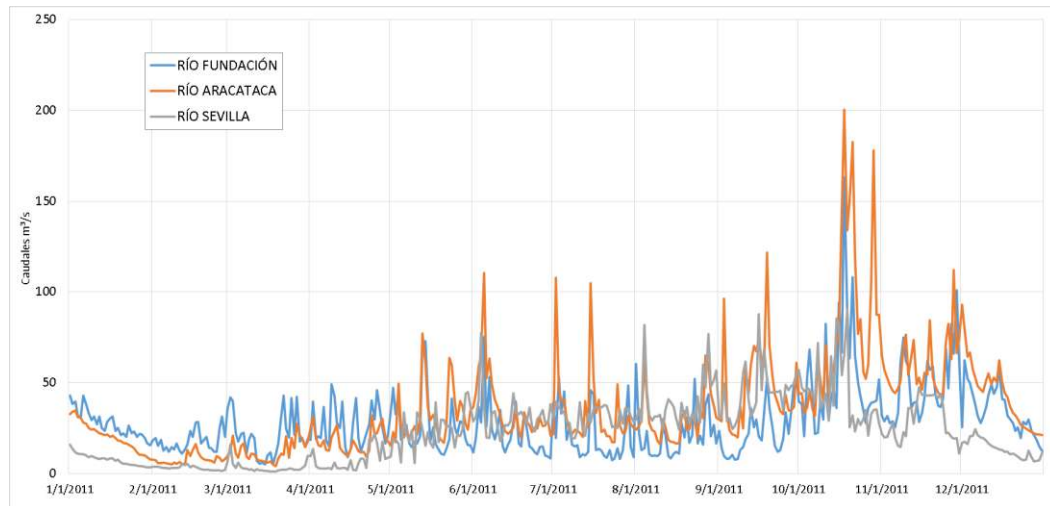


Figura 4-52 Series de tiempo caudales de los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla año niña 2011

- 3) La serie de tiempo del nivel del mar es la serie de tiempo registrada en la estación CIOH Cartagena para el año 2011 dado que para este año el mareógrafo de Santa Marta no se encontraba instalado (Ver Figura 4-53). Tal como se puede observar los niveles mínimos del mar se presentaron en febrero con valores medios de -0.2 m con una amplitud media de 0.4 m, mientras que los máximos se presentaron en noviembre con valor medio de 0.15 m con una amplitud media de 0.5 m.

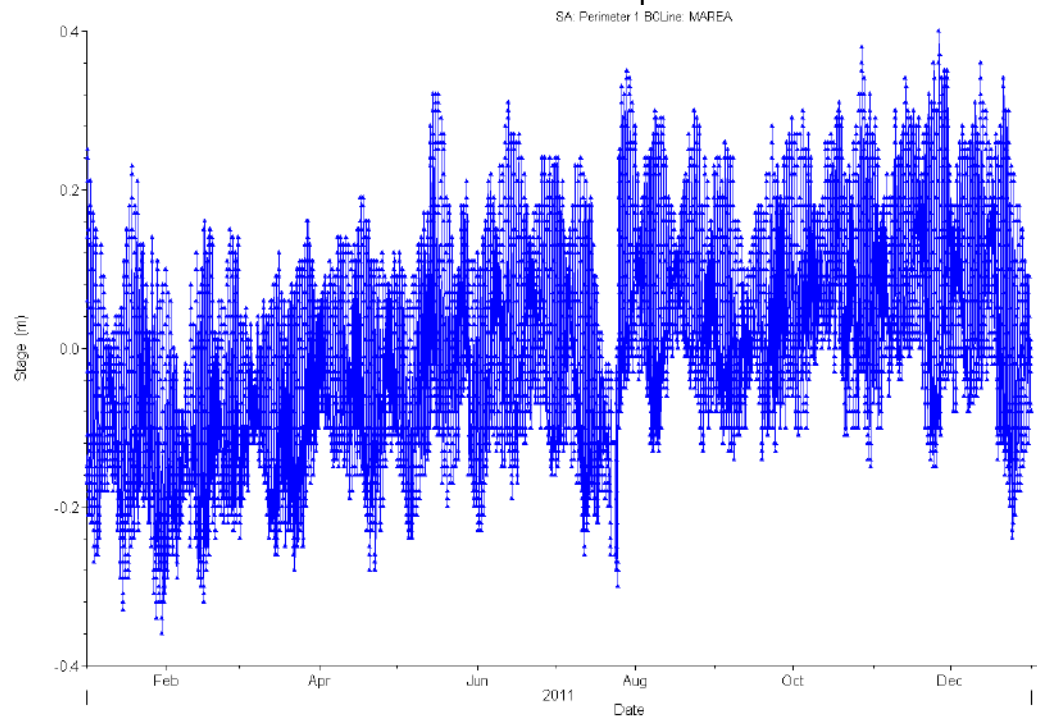


Figura 4-53 Registro de nivel del mar estación CIOH Cartagena 2011

- 4) La compuerta del caño renegado se dejó con una apertura del 50 cm.
 5) El tiempo de cálculo es de 30 minutos y el de elaboración de resultados de 1 hora.
 6) Para el caso del modelo de condición húmeda o niña la topología tuvo que ser cambiada a completamente bidimensional (Ver Figura 4-54), esto debido a que para

el año 2011 el río Magdalena presentó desbordamiento hacia su margen derecha en dirección de la CGSM (Ver Figura 4-55), por tanto el modelo unidimensional no tiene la capacidad de modelar dicho comportamiento.

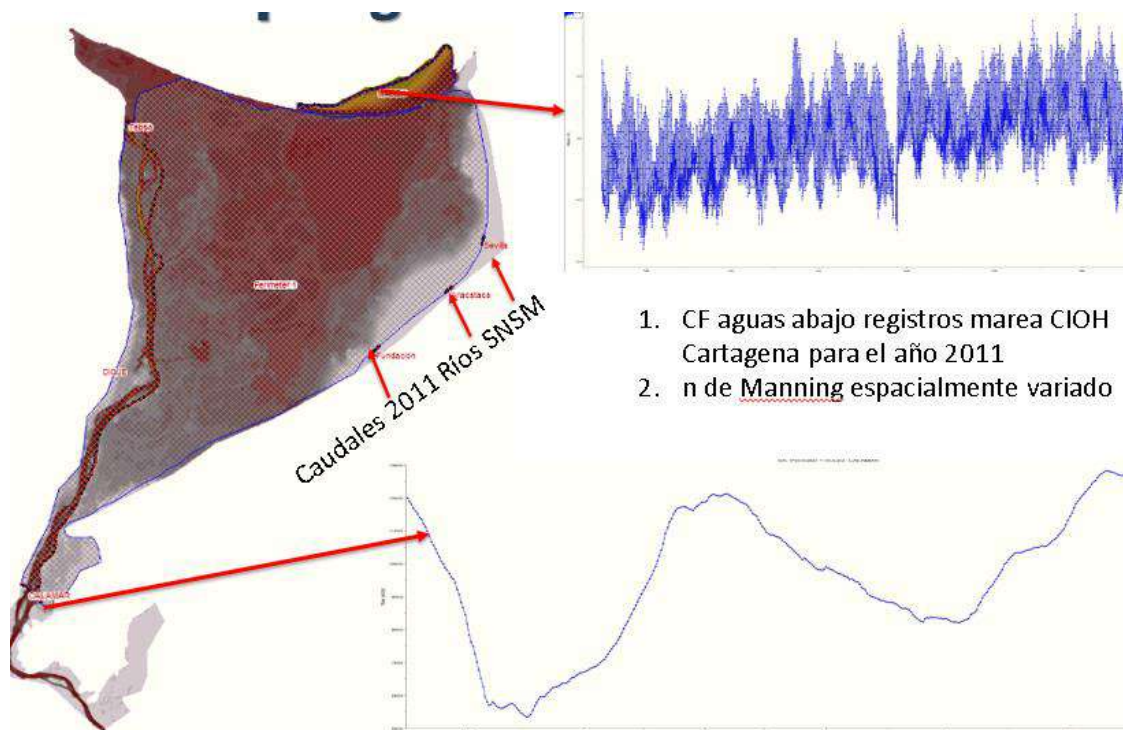


Figura 4-54 Topología Modelo hidrodinámico condición la Niña 2011

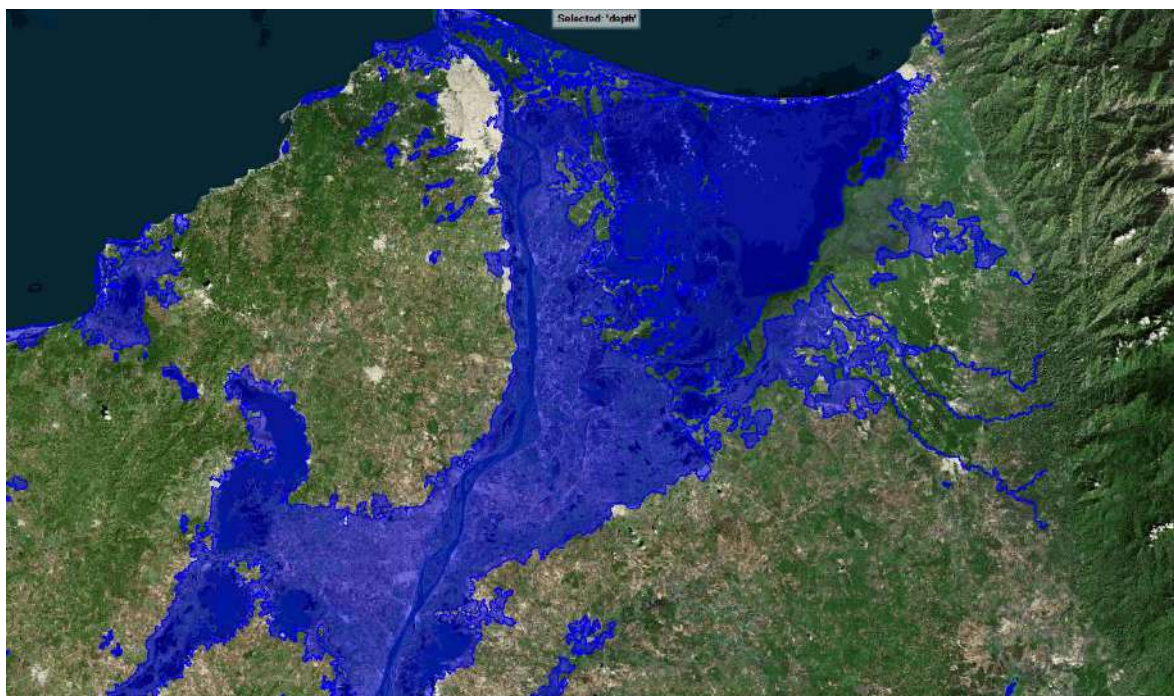


Figura 4-55 Extensión de inundación procesada por IDEAM

- 7) Dado que el modelo Digital de Terreno no cuenta con el dique de la margen derecha del río Magdalena se procedió a incorporarlo iniciando con una cota desde 10 msnm (Calamar) hasta 2.3 msnm (Clarín). Cabe aclarar que esto es una suposición sustentada en corridas previas del modelo para ajustar la extensión de inundación modelada a registrada por IDEAM.
- 8) El dique tiene una compuerta en Renegado con apertura de 0.5 m y aperturas en caño Aguas Negras y Caño Clarín (Ver Figura 4-57).

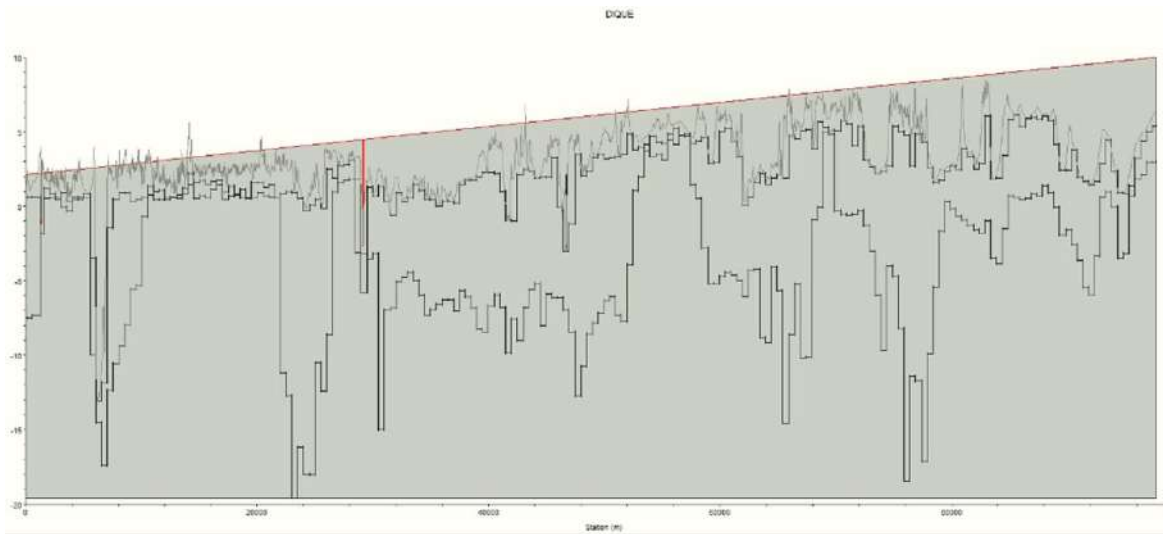
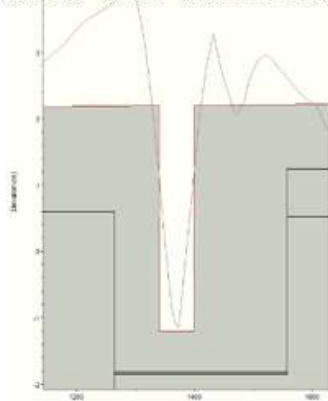
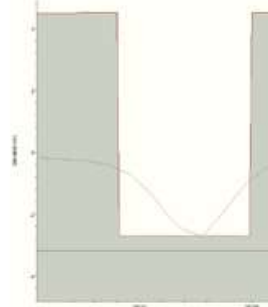


Figura 4-56 Dique margen derecha río Magdalena

Apertura Caño Clarín Nuevo



Apertura Caño Aguas Negras



Compuerta Caño Renegado

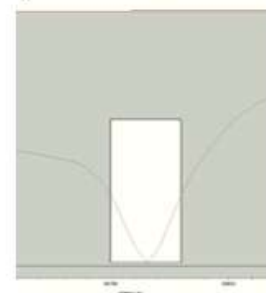


Figura 4-57 Estructuras de control dique margen derecha sobre cada caño

- 9) Dado que el agua fluye sobre diferentes coberturas y usos de suelo se procedió a realizar la variación espacial de la rugosidad representada por el n de Manning, en función de la cobertura y uso del suelo (Ver Figura 4-58).

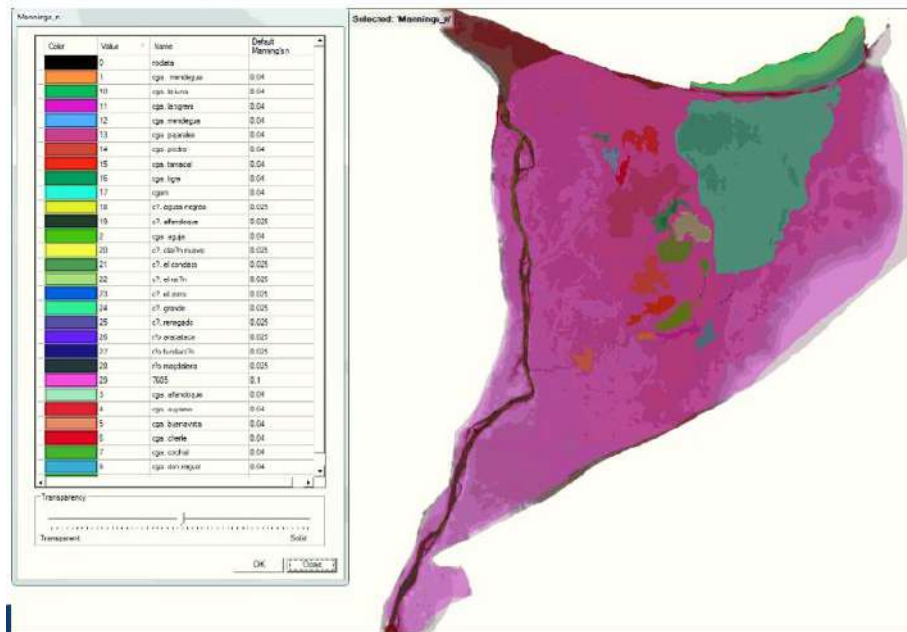


Figura 4-58 Variación espacial del n de Manning en la malla computacional

4.6.1 Validación con la extensión de inundación

Dado que no se cuenta con registros de niveles ni caudales en el complejo CGSM para el año niña 2011, se procedió a validar los resultados del modelo con la extensión de inundación registrada por IDEAM para lo cual se logró un muy buen ajuste entre lo registrado y lo simulado. En la Figura 4-59 se presenta en azul la extensión de inundación registrada por IDEAM y en rojo la extensión de inundación simulada por el modelo hidrodinámico.

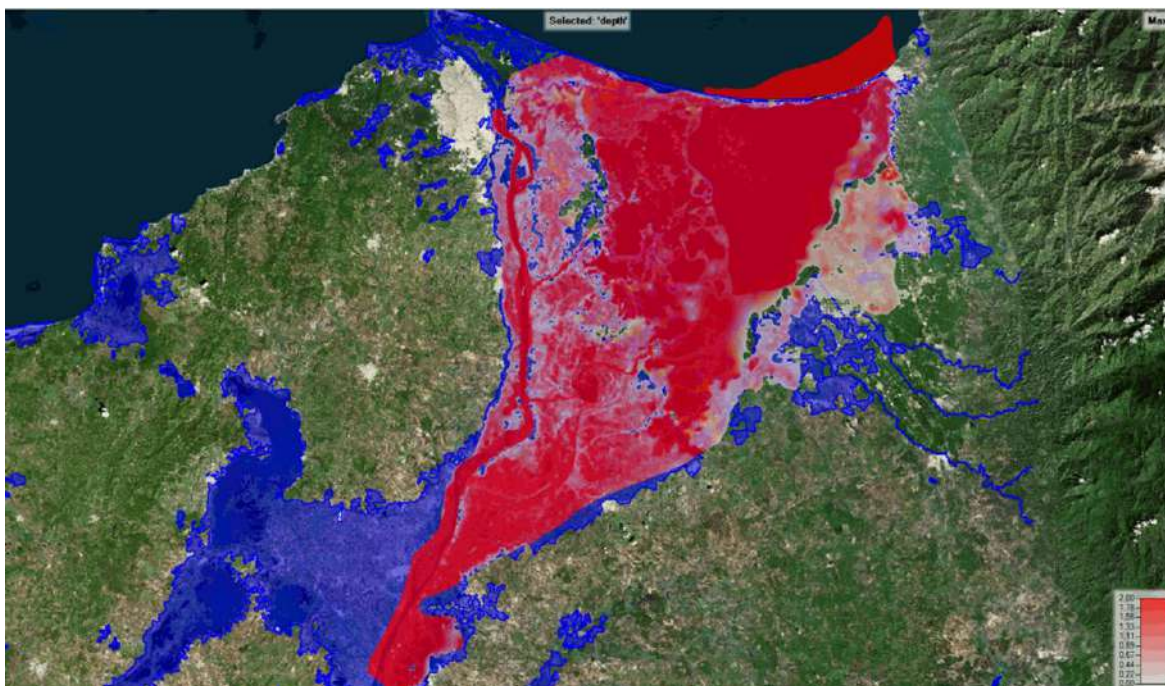


Figura 4-59 Validación con la extensión de inundación IDEAM niña 2011

4.6.2 Estimación de caudales de desbordamiento del río Magdalena

Tal como se describió anteriormente para el año niña 2011 le río Magdalena presentó un desbordamiento hacia la CGSM lo cual incrementó de manera considerable los aportes del río hacia el complejo.

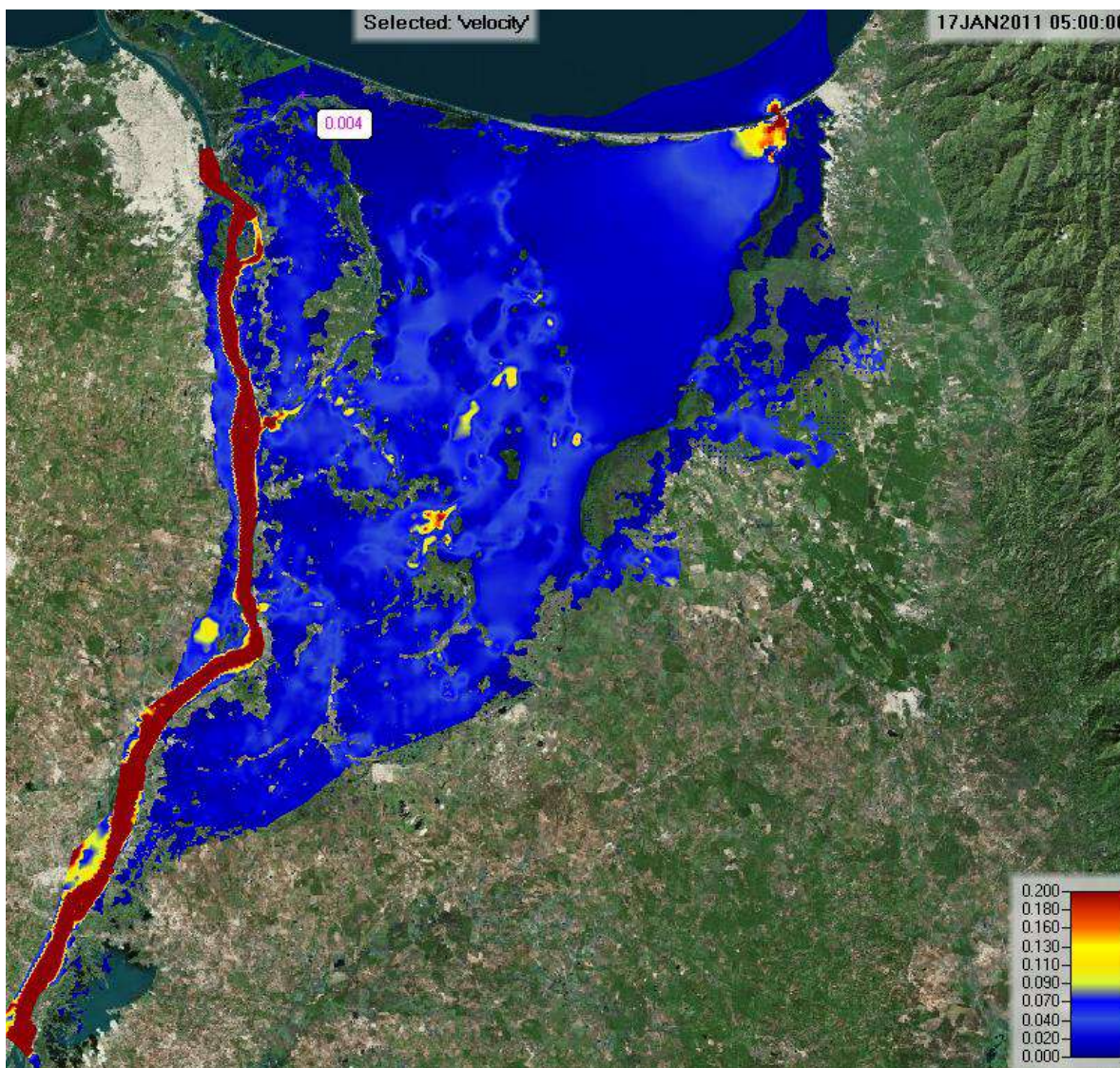


Figura 4-60 Desbordamiento margen derecha río Magdalena 17 de enero de 2011

Como resultado de este desbordamiento se transportaron caudales de alrededor de 1000 m^3/s en enero de 2011 y de 1500 m^3/s en los meses de junio-julio y diciembre, meses en los cuales no se evidencia el efecto de la marea sobre el comportamiento de la Boca de la Barra debido a que estaba transportando esos caudales hacia el mar Caribe (Ver Figura 4-61). En los intermedios de esas épocas si se observa una marcada influencia de la marea sobre los caudales transportados por la Boca de La Barra. De otro lado el caño Renegado a través de su compuerta pudo hacer transportado 150 m^3/s durante todo el período.

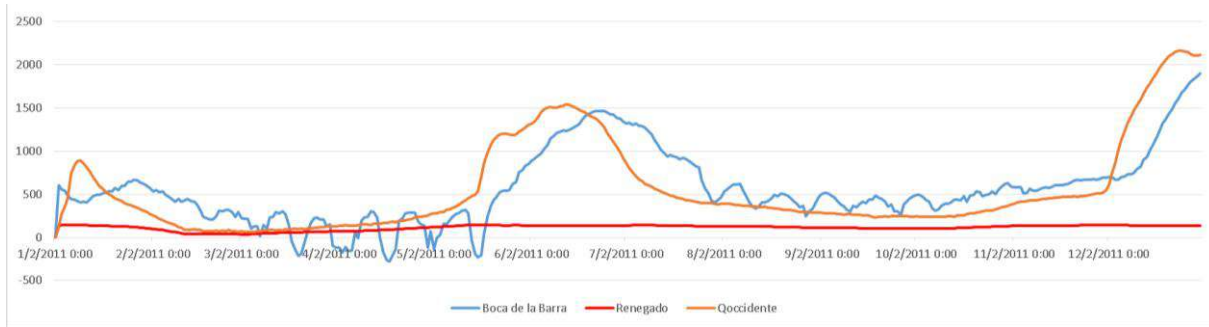


Figura 4-61 Serie de tiempo de caudales margen occidental del complejo CGSM

4.7 Modelo hidrodinámico apertura de Caño el Salado

El objetivo de este modelo prospectivo de apertura del Caño El Salado es estimar los caudales adicionales que transportaría este caño tanto en época seca como húmeda y la influencia que esto tendría en el comportamiento en la Ciénaga de Piedra, el complejo de Pajarales y caño Grande principalmente.

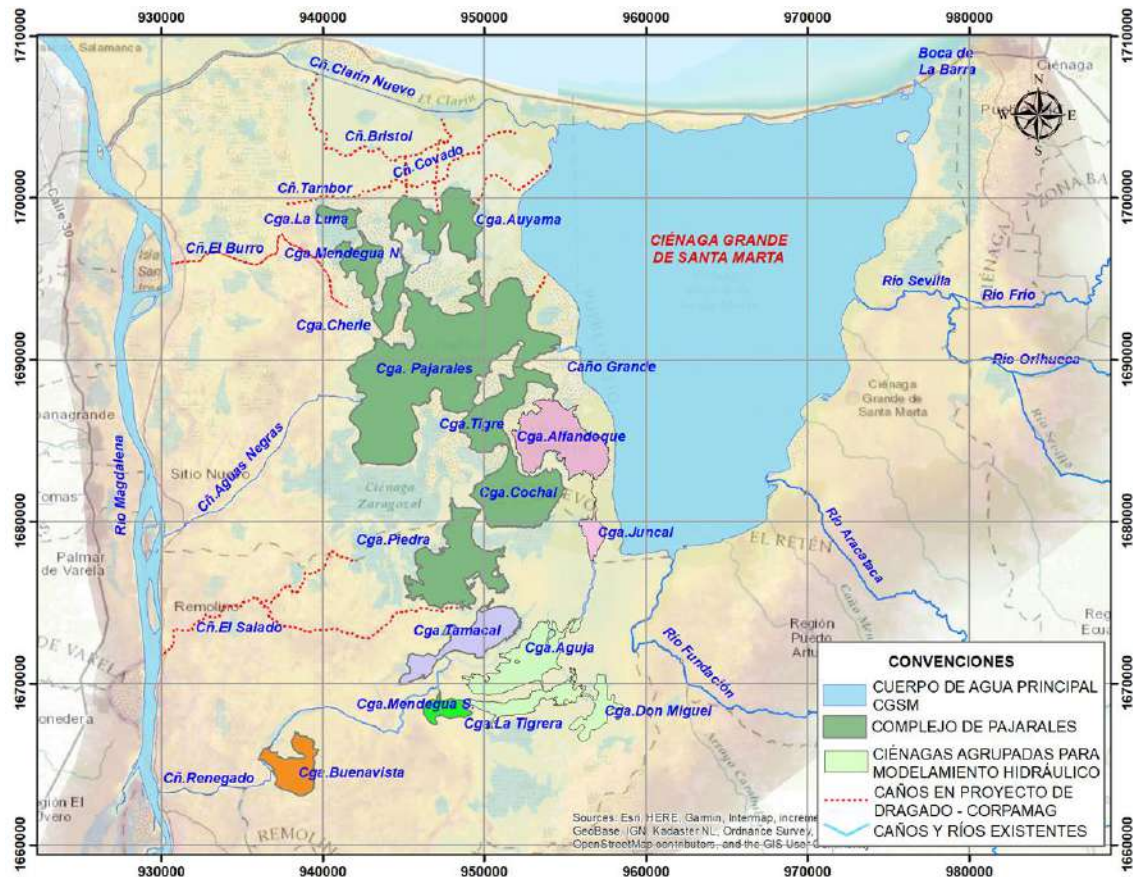


Figura 4-62 Caños que se encuentran en proceso de dragado

El caño El Salado es un caño que se encuentra en proceso de dragado con el fin de conectar el río Magdalena aguas abajo del caño Renegado con la Ciénaga de Piedra, su sección de diseño es trapezoidal con un ancho de base de 10 m, profundidades de 2.0 y taludes 1:1 (Ver Figura 4-62). Este caño fue agregado al modelo para modelarlo de tipo unidimensional.

Se realizó la simulación para el período de análisis actual 2017 y 2018 dado que es para el período donde se cuenta con información registrada de niveles y caudales en el complejo y por tanto permite un análisis comparativo de sus efectos.

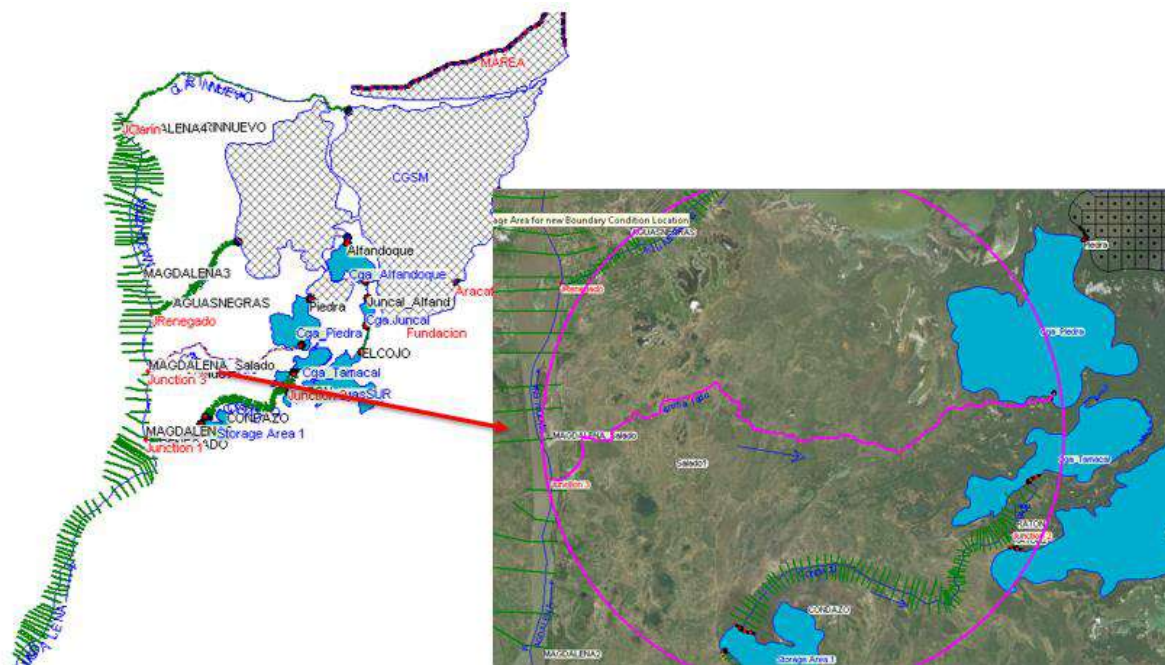


Figura 4-63 Topología Modelo hidrodinámico

4.7.1 Caudales estimados Caño El Salado

Según los resultados del modelo hidrodinámico para la apertura del caño El Salado, este presentaría el comportamiento bimodal característico del río Magdalena con caudales máximos para el período de análisis de alrededor de $65 \text{ m}^3/\text{s}$ para los meses de noviembre y junio, y caudales mínimos en el mes de marzo de $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

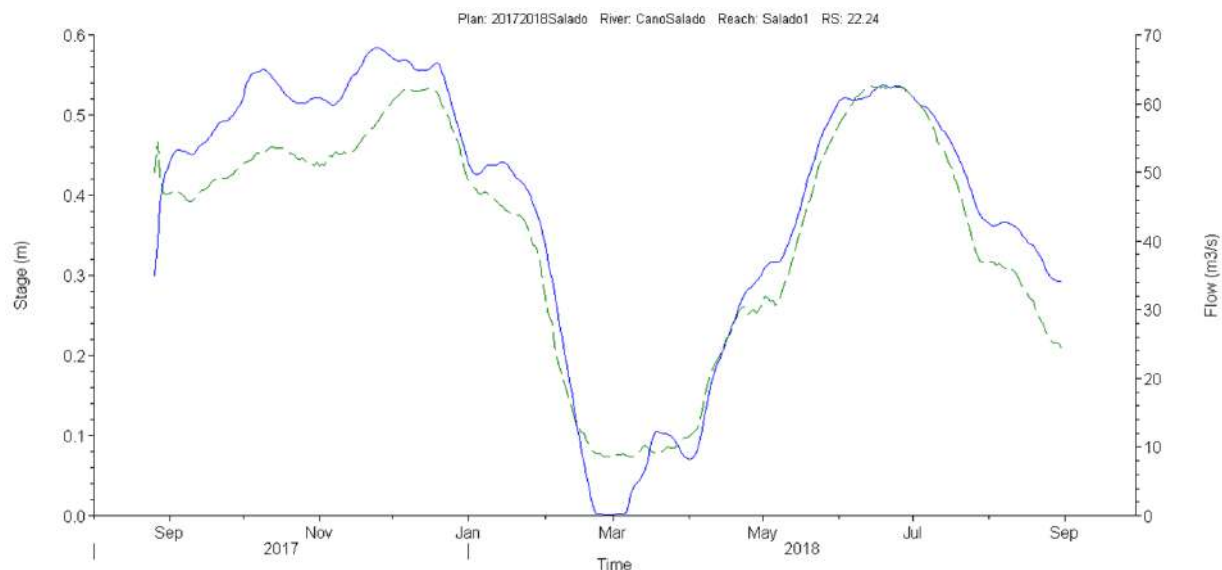


Figura 4-64 Serie de tiempo de caudales Caño el Salado

4.7.2 Efecto de El Salado en Caño Grande

La apertura del caño El Salado sobre el Caño Grande sería el aumento de caudales transportados por caño Grande principalmente en época húmeda, pasando de transportar hacia la CGSM 140 m³/s a 200 m³/s.

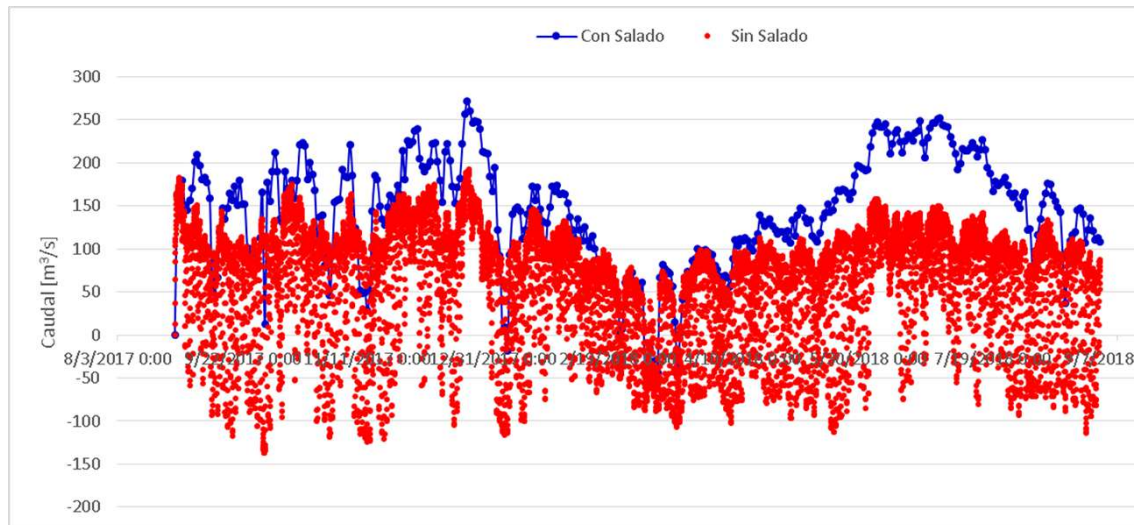


Figura 4-65 Serie de tiempo Caño Grande con caño el Salado

4.8 Modelo hidrodinámico apertura de Barra Vieja

Para el caso de la apertura de Paleocauces que aumenten la interacción con el mar Caribe se configuró el modelo con la apertura en Barra Vieja, de acuerdo a la localización de los Paleocauces determinados por INVEMAR (Ver Figura 4-66 y Figura 4-67).

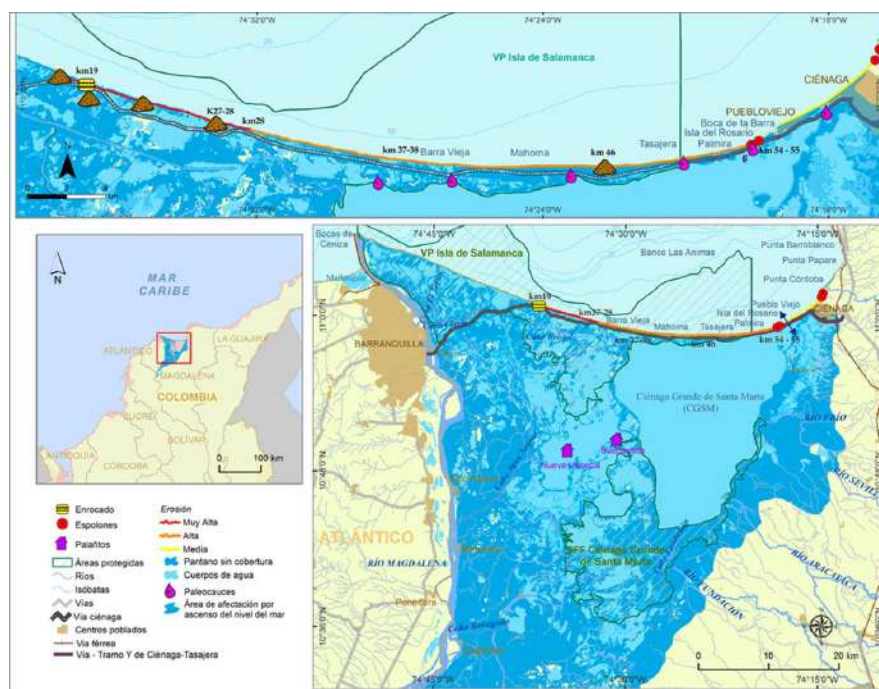


Figura 4-66 Localización general de Paleocauces



Figura 4-67 Localización específica Paleocauce Barra Vieja

En la Figura 4-68 se presenta el mapa de velocidades y trayectorias del flujo para el caso del escenario 2017-2018 sin la apertura del Paleocauce, en donde el flujo tiene una dirección de circulación principalmente marca de occidente a oriente para descargar por la Boca de la Barra.

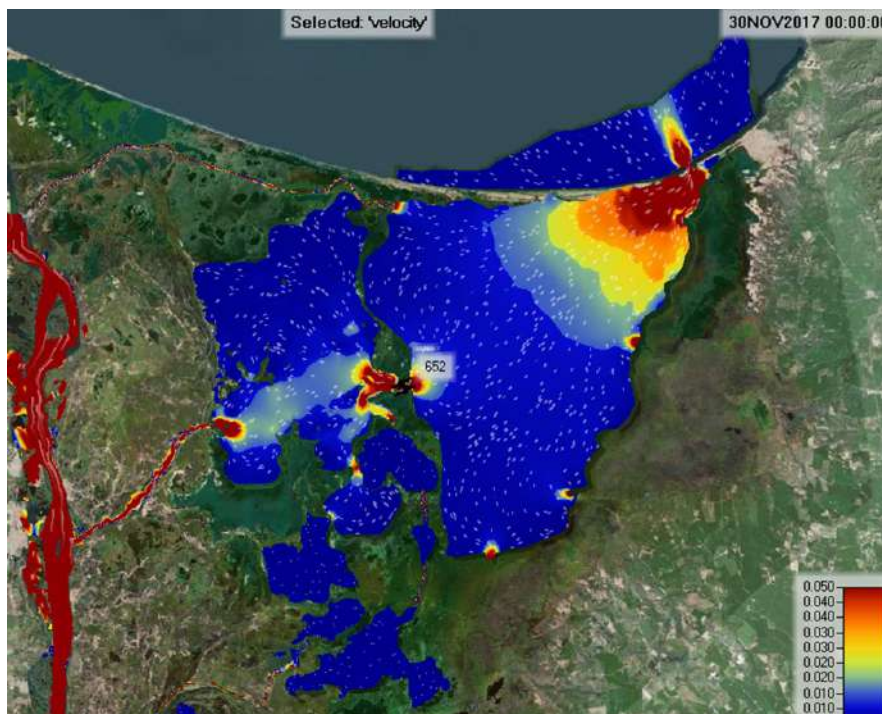


Figura 4-68 Mapa de velocidades y trayectorias de flujo sin Paleocauce

Con la apertura del Paleocauce con unas dimensiones similares a la Boca de la barra se presenta un cambio principalmente en las trayectorias del flujo, presentándose un flujo de agua por la Boca de la Barra y otro por la Boca de Barra Vieja (Ver Figura 4-69).

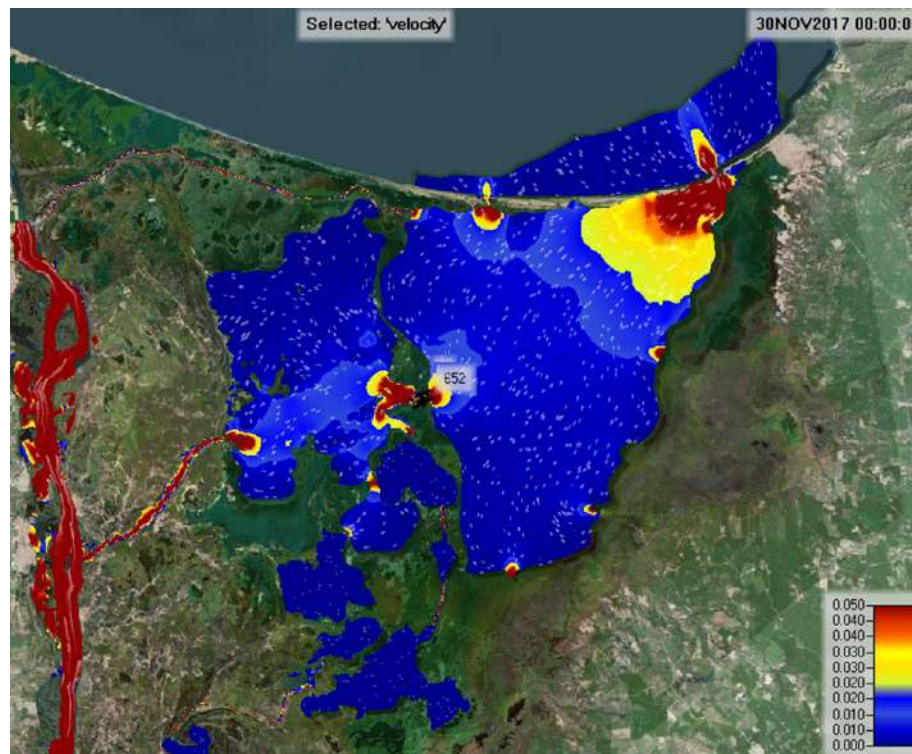


Figura 4-69 Mapa de velocidades y trayectorias de flujo con Paleocauce

Respecto a la variación en cotas de lámina de agua, la diferencia es mínima, es decir, la CGSM seguiría presentando las mismas profundidades medias pero con variación en las trayectorias de flujo (Ver Figura 4-70).

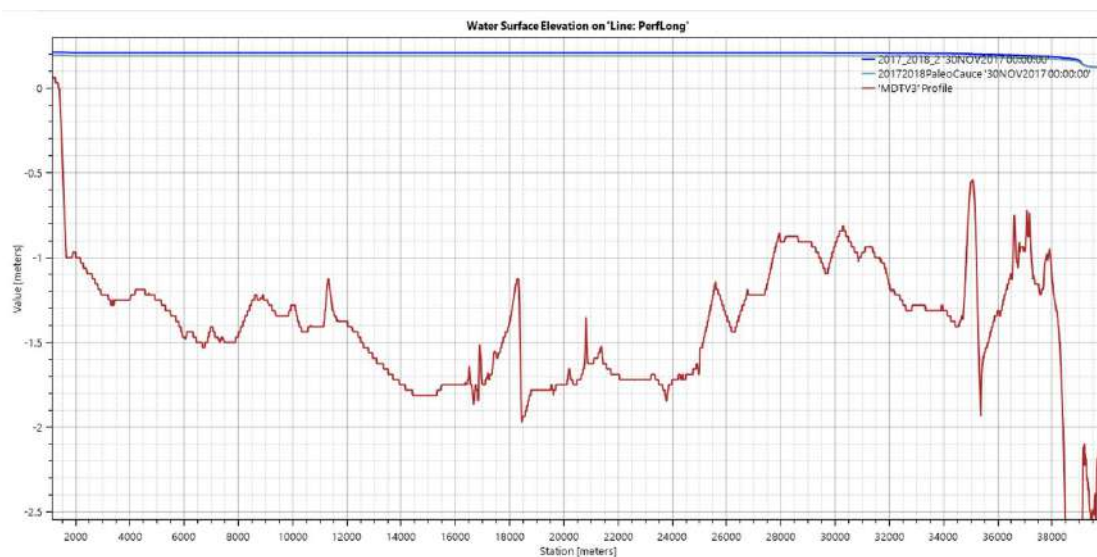


Figura 4-70 perfil Longitudinal CGSM con y sin Paleocauce

5 Conclusiones y recomendaciones

El presente modelo hidrodinámico, permite entender el comportamiento hidrodinámico del complejo cenagoso y permite determinar los caudales captados a través de los caños que fluyen desde el río Magdalena, así como también las transferencias de flujo entre cuerpos de agua, cambios de cotas de lámina de agua en cada cuerpo de agua y por ende los volúmenes de agua almacenados para cada instante de tiempo.

Los resultados obtenidos describen la dinámica actual del transporte, muestran una dinámica compleja con flujos bidireccionales principalmente en la boca de la Barra lo cual permite establecer el régimen hidrológico de cada uno de los cuerpos de agua que componen el complejo CGSM, los volúmenes de intercambio entre los cuerpos de agua, la variación de niveles de las ciénagas y su capacidad de amortiguación.

Los caños Renegado y Aguas Negras tienen mayor capacidad hidráulica de transporte de agua y sedimento dado que para todas las configuraciones de flujo tienen un gradiente hidráulico mayor, que el caño Clarín, el cual al estar ubicado en el costado norte del complejo cenagoso y estar conectado tanto al río Magdalena como a la CGSM se encuentra influenciado por el comportamiento de las mareas, es decir, tanto en su conexión con el río Magdalena como en su conexión con la CGSM tiene como control hidráulico el comportamiento de las mareas.

Las crecientes de los Ríos de la Sierra Nevada de Santa Marta tienen una marcada influencia en los niveles de la CGSM, ya que esta es un cuerpo de agua somero con una baja capacidad de amortiguación.

Los resultados para cada uno de los escenarios de variabilidad climática permitieron establecer el comportamiento en el transporte de agua para cada uno de los cuerpos de agua lo cual es el insumo para la realización de los balances hídricos.

El análisis de la apertura del caño el Salado dio como resultado que tendría el mismo comportamiento bimodal del Río Magdalena y el caño Aguas Negras con caudales máximos para el período actual de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ y caudales mínimos de $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

La apertura de un Paleocauce en Barra Vieja cambiaría las trayectorias de flujo del espejo de agua principal de la CGSM ya que mejora el intercambio con el mar Caribe sin afectar las profundidades medias de la CGSM. Esto haría que las crecientes de cada uno de los tributarios transiten más rápidamente a través de todo el complejo mejorando la mezcla de aguas dulce y salada.

Se recomienda incluir el levantamiento topobatimétrico de los ríos que descienden de la Sierra Nevada de Santa Marta. Dicha batimetría se hace necesaria toda vez que se debe realizar el tránsito hidráulico de las crecientes de cada uno de los ríos, ya que como se han descrito son de tipo súbitas y por tanto al entrar en el tramo de baja pendiente de la zona bananera presentan una atenuación de los picos de caudal, debido al tránsito hidráulico a lo largo de cada uno de los cauces. Esto conllevaría a que en el modelo hidrodinámico representen mejor las condiciones de ingreso de caudales de los ríos que descienden de la Sierran Nevada de Santa Marta.

Se deben realizar los levantamiento batimétricos de las adecuaciones hidráulicas realizadas a los caños de interconexión entre las ciénagas que se han realizado en los últimos años o

contar con los planos record de dichas adecuaciones con el fin de actualizar el modelo digital de terreno y por ende el modelo hidrodinámico a las verdaderas condiciones actuales.

Se recomienda la instalación de estaciones hidrológicas de tipo automático tanto en la desembocadura del río Magdalena como en la Boca de la Barra con su respectivo levantamiento de cota cero, con el fin de tener georreferenciado el comportamiento de las mareas, el cual es el control hidráulico principal del complejo de la CGSM.

6 Referencias

- Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente; Centro de Estudios Técnicos e Investigaciones Hidráulicas; CETIH; INDERENA; Universidad de los Andes. (1978). *Diagnóstico sobre el comportamiento hídrico de la Ciénaga Grande de Santa Marta : informe final*. Bogotá: INDERENA.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Bogotá: McGrawHill.
- COLCIENCIAS. (1993). *Modelacion hidrodinamica de la Ciénaga Grande de Santa Marta* . Bogotá: UNIANDES.
- Corpamag. (2016). *Formulación POMCA complejo de Humedales Ciénaga Grande de Santa Marta*. Santa Marta: Corpamag.
- Deeb Sossa S en C. (1993). *Plan de recuperación del complejo lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta : informe final*. Bogotá: CORPAMAR - DNP.
- Díaz Granados, M., Camacho , L., & Maestre , A. (2008). Modelación de balances hídricos de ciénagas fluviales y costeras colombianas. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de los Andes*, 12-20.
- García, F., Palacio , C., & García Uriel. (2010). Constituyentes de Marea en la Bahía de Santa Marta. *DYNA*, Vol. 78, Núm. 167 (2011), 1-7.
- GUTIERREZ, A. (2018). *Informe técnico del levantamiento batimétrico del río Fundación, Río Aracataca, y Río Sevilla*. Santa Marta: INVEMAR.
- IDEAM - CORMAGDALENA. (2001). *Macrozonificación de la cuenca Magdalena Cauca*. Bogotá: IDEAM.
- IDEAM. (2012). *Nivel del mar y régimen de marea en las estaciones mareográficas de Colombia*. Bogotá: IDEAM.
- INVEMAR. (2009). *Estudio batimétrico y sedimentológico de la Ciénaga Grande de Santa Marta y la plataforma somera al frente de la barra de Salamanca*. Santa Marta: INVEMAR.
- INVEMAR. (2015). *Dinámica Sedimentológica de la Ciénaga Grande de Santa Marta (Caribe Colombiano)*. Santa Marta: INVEMAR.
- INVEMAR. (2016). *Dinámica sedimentológica de la Ciénaga Grande de Santa Marta (Caribe Colombiano) Fase II*. Santa Marta: INVEMAR.

- INVEMAR. (2017). *Caracterización y diagnóstico topobatimétrico, sedimentológico e hidrológico de la CGSM e implementación de modelo hidrológico*. Santa Marta: INVEMAR.
- INVEMAR. (2017). *Conexión de las condiciones hidrosedimentológicas en el complejo lagunar Ciénaga Grande de Santa Marta*. Santa Marta: INVEMAR.
- Prandle, D. (2009). *ESTUARIES. Dynamics, Mixing, Sedimentation and Morphology*. New York: Cambridge University Press.
- Restrepo Angel , J. D., & Correa Arango, I. D. (1991). *Geología y oceanografía del delta del río San Juan*. Medellín: Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Saldarriaga , J. G. (1991). Modelación hidrodinámica de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Primer paso para un modelo ecológico. *Revista de Ingeniería Uniandes*, 25-32.
- Velez, J. I., Múnera, J. C., & Poveda, G. (2003). Dinámica hidrológica de la Ciénaga Grande de Santa Marta mediante técnicas de sensores remotos. *Reseachgate*, 1-17.