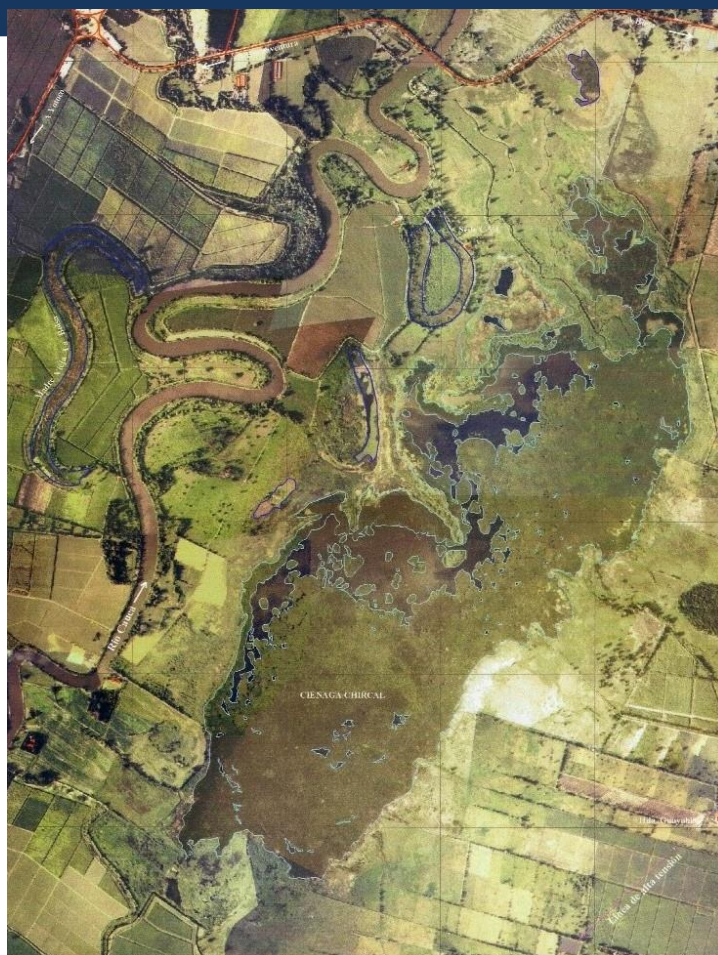




2016

PLANTEAMIENTO Y ANÁLISIS DE DIFERENTES SISTEMAS DE CONEXIÓN RÍO CAUCA- LAGUNA DE SONSO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CIRCULACIÓN DE LAS CORRIENTES EN LA LAGUNA



Brayan Felipe Muñoz Ledezma & Cindy
Yohana Pérez Toro

PLANTEAMIENTO Y ANÁLISIS DE DIFERENTES SISTEMAS DE CONEXIÓN RÍO CAUCA-
LAGUNA DE SONSO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CIRCULACIÓN DE LAS CORRIENTES
EN LA LAGUNA.

BRAYAN FELIPE MUÑOZ LEDEZMA
CINDY YOHANA PÉREZ TORO

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Sanitario y Ambiental

DIRECTOR
CARLOS ALBERTO RAMÍREZ CALLEJAS
Ingeniero Civil M.sc.

CO-DIRECTOR
JOSÉ LUÍS GARCÍA VÉLEZ
Ingeniero Civil M.sc.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
SANTIAGO DE CALI
2016

PLANTEAMIENTO Y ANÁLISIS DE DIFERENTES SISTEMAS DE CONEXIÓN RÍO CAUCA-
LAGUNA DE SONSO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CIRCULACIÓN DE LAS CORRIENTES
EN LA LAGUNA.

Mg. CARLOS ALBERTO RAMIREZ
DIRECTOR

CO-DIRECTOR
Mg. JOSE LUIS GARCIA

JURADO 1

JURADO 2

Santiago de Cali 24 de agosto de 2016

DEDICATORIA

A Dios y familia

AGRADECIMIENTOS

A Dios por habernos guiado a través de este camino colmado de experiencias y aprendizajes hacia nuestro éxito como futuros profesionales.

A nuestras familias por su paciencia, apoyo, amor incondicional, confianza y motivación de querer brindarnos un futuro mejor.

A nuestra institución por los saberes compartidos, sus herramientas de apoyo y espacios brindados para llevar a cabo nuestro cometido.

A nuestros amigos por brindarnos su apoyo, conocimientos, consejos y sus palabras de aliento en el transcurso de esta etapa de nuestras vidas.

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
3. ANTECEDENTES	3
4. JUSTIFICACIÓN	6
5. OBJETIVOS	7
5.1. OBJETIVO GENERAL	7
5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
6. MARCO TEÓRICO	8
6.1. SISTEMA Y SISTEMAS NATURALES	8
6.2. ECOSISTEMA	8
6.3. HUMEDALES	9
6.3.1. FUNCIONES DE LOS HUMEDALES	9
6.3.2. DEGRADACIÓN DE HUMEDALES	10
6.4. LAGUNA	10
6.5. CUENCA HIDROGRÁFICA	10
6.6. MODELACIÓN MATEMÁTICA	10
6.6.1. MODELACIÓN HIDRODINÁMICA	11
6.6.2. ECUACIONES HIDRODINÁMICAS DE NAVIER-STOKES	11
6.6.3. MODELOS MATEMÁTICOS	18
6.6.4. CALIBRACIÓN DEL MODELO	29
6.6.5. VALIDACIÓN DEL MODELO	30
7. METODOLOGÍA	30
7.1. RECOPIACIÓN, PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	31
7.1.1. ESTACIONES HIDROMÉTRICAS Y CLIMATOLÓGICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO	31
7.1.2. INFORMACIÓN HIDROLÓGICA DISPONIBLE	31
7.1.3. INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA Y BATIMÉTRICA DISPONIBLE	32
7.1.4. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE	33
7.2. CARACTERIZACIÓN	33
7.2.1. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	33

7.2.2.	CARACTERÍSTICAS FISIGRÁFICAS DE LA LAGUNA DE SONSO	36
7.2.3.	CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS Y MORFOLÓGICAS DEL RÍO CAUCA EN EL SECTOR MEDIACANOA	41
7.2.4.	CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS E HIDROLÓGICAS	43
7.3.	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO HIDRODINÁMICO (MOHID)	53
7.3.1.	REPRESENTACIÓN DE LA TOPOGRAFÍA Y LA BATIMETRÍA DEL SISTEMA RÍO CAUCA – LAGUNA DE SONSO	53
7.3.2.	CONSTRUCCIÓN DE LA MALLA DE CÁLCULO	54
7.3.3.	ESQUEMATIZACIÓN DE LA BATIMETRÍA	57
7.3.4.	CONDICIONES DE FRONTERA	58
7.3.5.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO	59
7.3.6.	CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO	67
7.3.7.	VERIFICACIÓN DEL MODELO	68
7.3.8.	ANÁLISIS DE LA HIDRODINÁMICA EN LA LAGUNA	71
7.4.	PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA HIDRODINÁMICA EN LA LAGUNA DE SONSO	74
7.4.1.	PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS EN EL SISTEMA RÍO CAUCA – LAGUNA DE SONSO	74
7.4.2.	SITIOS DE CAPTACIÓN	76
7.4.1.	PERIODO DE SIMULACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE CONEXIÓN DEL SISTEMA RÍO CAUCA – LAGUNA DE SONSO	78
7.4.2.	CONDICIONES HIDRÁULICAS EN LOS SITIOS DE CAPTACIÓN	78
7.4.3.	RESULTADOS DE LAS ALTERNATIVAS DE CONEXIÓN DEL SISTEMA RÍO CAUCA – LAGUNA DE SONSO	81
7.4.4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	92
8.	CONCLUSIONES	94
9.	RECOMENDACIONES	97
10.	BIBLIOGRAFÍA	98

Índice de Figuras

FIGURA 1.	TRAMO ELEMENTAL DE UN CANAL PARA LA DEDUCCIÓN DE LAS ECUACIONES DE SAINT-VENANT	13
FIGURA 2.	JERARQUÍA DE ESTRUCTURA GENERAL DEL MODELO MOHID	20
FIGURA 3.	RELACIÓN DE INFORMACIÓN ENTRE MODELOS ANIDADOS	23
FIGURA 4.	FLUJO DE INFORMACIÓN BATIMÉTRICA A OTROS MÓDULOS	23
FIGURA 5.	RELACIÓN DE INFORMACIÓN DEL MÓDULO HIDRODINÁMICO Y OTROS.....	24
FIGURA 6.	APLICACIÓN DE LA SEGUNDA LEY DE NEWTON SOBRE UN VOLUMEN INFINITESIMAL DE CONTROL DEFORMABLE	25
FIGURA 7.	INFORMACIÓN DE ENTRADA Y SALIDA DEL MÓDULO GEOMÉTRICO.....	27
FIGURA 8.	FLUJO DE INFORMACIÓN DEL MÓDULO SUPERFICIE.....	28
FIGURA 9.	ESQUEMA DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES METODOLÓGICOS EN EL PRESENTE ESTUDIO	30
FIGURA 10.	RED DE MEDICIÓN DE LA ZONA DE INFLUENCIA DE LA LAGUNA DE SONSO.....	31
FIGURA 11.	UBICACIÓN DE LA RESERVA NATURAL DEL HUMEDAL LAGUNA DE SONSO, FUENTE: CVC (2007)	35

FIGURA 12. GEOLOGÍA REGIONAL DEL ÁREA DE ESTUDIO	37
FIGURA 13. GEOMORFOLOGÍA REGIONAL DEL ÁREA DE ESTUDIO	41
FIGURA 14. VARIACIÓN DEL FONDO DE LA SECCIÓN DEL RÍO CAUCA A LA ALTURA DE LA ESTACIÓN MEDIACANOA PARA EL PERIODO COMPRENDIDO ENERO 1999 Y AGOSTO 2004 FUENTE: CVC (2013)	42
FIGURA 15. NIVELES FREÁTICOS Y DIRECCIONES DE FLUJO PARA EL MES DE NOVIEMBRE DE 2009	47
FIGURA 16. CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES HORARIOS EN EL RÍO CAUCA, ESTACIÓN MEDIACANOA	49
FIGURA 17. CURVA DE DURACIÓN DE NIVELES HORARIOS EN EL RÍO CAUCA, ESTACIÓN MEDIACANOA	49
FIGURA 18. CURVA DE DURACIÓN DE NIVELES HORARIOS EN LA ESTACIÓN LAGUNA DE SONSO	50
FIGURA 19. CURVA DE DURACIÓN DE NIVELES HORARIOS EN LA ESTACIÓN CAÑO CARLINA O CAÑO NUEVO	51
FIGURA 20. NIVELES DE AGUA MEDIOS DIARIOS EN LAS ESTACIONES LAGUNA DE SONSO Y RÍO CAUCA - MEDIACANOA. PERIODO 1988-2006	52
FIGURA 21. REPRESENTACIÓN DE LOS PUNTOS TOPOBATIMÉTRICOS EN EL MODELO MOHID	53
FIGURA 22. ESQUEMATIZACIÓN DE LOS POLÍGONOS QUE REPRESENTAN EL ÁREA DE ESTUDIO	54
FIGURA 23. MALLA DE CÁLCULO DEL SISTEMA RÍO CAUCA – LAGUNA DE SONSO	56
FIGURA 24. BATIMETRÍA DEL SISTEMA RÍO CAUCA – LAGUNA DE SONSO	58
FIGURA 25. FRONTERAS ABIERTAS EN EL MODELO DEL SISTEMA RÍO CAUCA - LAGUNA DE SONSO	59
FIGURA 26. UBICACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS PUNTOS DE CONTROL PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	60
FIGURA 27. VELOCIDAD DEL FLUJO PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE RUGOSIDAD EN RÍO CAUCA-MEDIACANOA, CAÑO NUEVO Y LAGUNA DE SONSO	62
FIGURA 28. PROFUNDIDAD DEL FLUJO PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE RUGOSIDAD EN RÍO CAUCA-MEDIACANOA	63
FIGURA 29. PROFUNDIDAD DEL FLUJO PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE RUGOSIDAD EN LAGUNA DE SONSO	63
FIGURA 30. VELOCIDAD DEL FLUJO PARA DIFERENTES VALORES DE VISCOSIDAD EN RÍO CAUCA-MEDIACANOA, CAÑO NUEVO Y LAGUNA DE SONSO	65
FIGURA 31. PROFUNDIDAD DEL FLUJO PARA DIFERENTES VALORES DE VISCOSIDAD EN RÍO CAUCA-MEDIACANOA	66
FIGURA 32. PROFUNDIDAD DEL FLUJO PARA DIFERENTES VALORES DE VISCOSIDAD EN LAGUNA DE SONSO	66
FIGURA 33. NIVELES DE AGUA MEDIDOS Y CALCULADOS POR EL MODELO PARA CALIBRACIÓN, EN LAS ESTACIONES RÍO CAUCA- MEDIACANOA, CAÑO NUEVO Y LAGUNA DE SONSO. PERIODO DE INVIERNO 07-05-08 A 12-05-08	69
FIGURA 34. NIVELES DE AGUA MEDIDOS Y CALCULADOS POR EL MODELO PARA VERIFICACIÓN, EN LAS ESTACIONES RÍO CAUCA- MEDIACANOA, CAÑO NUEVO Y LAGUNA DE SONSO. PERÍODO DE VERANO 11-08-09 A 16-08-09	70
FIGURA 35. PATRÓN DE FLUJO CALCULADO EN LA LAGUNA DE SONSO PARA LA CONDICIÓN DE VERANO. FECHA: 12-08-09 HORA: 12:00	72
FIGURA 36. PATRÓN DE FLUJO CALCULADO EN LA LAGUNA DE SONSO PARA LA CONDICIÓN DE INVIERNO. FECHA: 08-05-08 HORA: 12:00	73
FIGURA 37. NIVELES DE AGUA MEDIOS DIARIOS EN LA ESTACIÓN LAGUNA DE SONSO Y EN LA ABCISA K211+156 DEL RÍO CAUCA EN LA FRONTERA DE ENTRADA	75
FIGURA 38. SECCIONES TRANSVERSALES EN EL SITIO DE	76
FIGURA 39. SECCIONES TRANSVERSALES EN EL SITIO DE CAPTACIÓN 2. K215+580	76
FIGURA 40. LOCALIZACIÓN DE LOS SITIOS DE CONEXIÓN ENTRE LA LAGUNA DE SONSO Y EL RÍO CAUCA	77
FIGURA 41. LOCALIZACIÓN DE PUNTOS DE CONTROL UTILIZADOS EN LA MODELACIÓN DE ALTERNATIVAS DE CONEXIÓN RÍO CAUCA – LAGUNA DE SONSO	78
FIGURA 42. CURVA DE DURACIÓN DE NIVELES DE AGUA DE LA LAGUNA DE SONSO Y LA ABCISA K213+112 CORRESPONDIENTE A CAPTACIÓN 1	79
FIGURA 43. CURVA DE DURACIÓN DE NIVELES DE AGUA DE LA LAGUNA DE SONSO Y LA ABCISA K215+580 CORRESPONDIENTE A LA CAPTACIÓN 2	80
FIGURA 44. ESQUEMA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL PARA LA CAPTACIÓN 1. K213+112	80
FIGURA 45. ESQUEMA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL PARA LA CAPTACIÓN 2. K215+580	80

FIGURA 46. PATRÓN DE FLUJO CALCULADO EN LA LAGUNA DE SONSO PARA LA CONDICIÓN ACTUAL. FECHA: 13-09-08 HORA: 12:00	82
FIGURA 47. PATRÓN DE FLUJO CALCULADO EN LA LAGUNA DE SONSO PARA LA ALTERNATIVA 1A. FECHA: 13-09-08 HORA: 12:00	83
FIGURA 48. PATRÓN DE FLUJO CALCULADO EN LA LAGUNA DE SONSO PARA LA ALTERNATIVA 1B. FECHA: 13-09-08 HORA: 12:00	84
FIGURA 49. PATRÓN DE FLUJO CALCULADO EN LA LAGUNA DE SONSO PARA LA ALTERNATIVA 2A. FECHA: 13-09-08 HORA: 12:00	85
FIGURA 50. PATRÓN DE FLUJO CALCULADO EN LA LAGUNA DE SONSO PARA LA ALTERNATIVA 2B. FECHA: 13-09-08 HORA: 12:00	86
FIGURA 51. PATRÓN DE FLUJO CALCULADO EN LA LAGUNA DE SONSO PARA LA ALTERNATIVA 3A. FECHA: 13-09-08 HORA: 12:00	87
FIGURA 52. PATRÓN DE FLUJO CALCULADO EN LA LAGUNA DE SONSO PARA LA ALTERNATIVA 3B. FECHA: 13-09-08 HORA: 12:00	88
FIGURA 53. PATRÓN DE FLUJO CALCULADO EN LA LAGUNA DE SONSO PARA LA ALTERNATIVA 4A. FECHA: 13-09-08 HORA: 12:00	89
FIGURA 54. PATRÓN DE FLUJO CALCULADO EN LA LAGUNA DE SONSO PARA LA ALTERNATIVA 4B. FECHA: 13-09-08 HORA: 12:00	90
FIGURA 55. VELOCIDAD DEL AGUA PARA LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE CONEXIÓN EN EL PUNTO DE CONTROL SUR DE LA LAGUNA DE SONSO PARA LOS DÍAS 13 Y 14 DE SEPTIEMBRE DE 2008.....	91
FIGURA 56. VELOCIDAD DEL AGUA PARA LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE CONEXIÓN EN EL PUNTO DE CONTROL CENTRO DE LA LAGUNA DE SONSO PARA LOS DÍAS 13 Y 14 DE SEPTIEMBRE DE 2008.....	91
FIGURA 57. VELOCIDAD DEL AGUA PARA LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE CONEXIÓN EN EL PUNTO DE CONTROL NORTE DE LA LAGUNA DE SONSO PARA LOS DÍAS 13 Y 14 DE SEPTIEMBRE DE 2008.....	92

Índice de Tablas

TABLA 1. PRINCIPALES MÓDULOS DE MOHID	21
TABLA 2. PERIODOS DE REGISTRO DE NIVELES DE AGUA EN LAS ESTACIONES RÍO CAUCA-MEDIACANOA, LAGUNA DE SONSO Y CAÑO NUEVO	32
TABLA 3. PERIODOS DE REGISTRO DE CAUDALES EN LA ESTACIÓN RÍO CAUCA MEDIACANOA.....	32
TABLA 4. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN TOPOBATIMÉTRICA DISPONIBLE.....	33
TABLA 5. CARACTERÍSTICAS DE LAS ALTERNATIVAS DE CONEXIÓN RÍO CAUCA-LAGUNA DE SONSO PROPUESTAS POR RODRÍGUEZ & JOJOA (2011).....	45
TABLA 6. VELOCIDADES DEL AGUA EN LA LAGUNA DE SONSO OBTENIDAS EN EL ESTUDIO DE SIMULACIÓN DE RODRÍGUEZ & JOJOA (2011).....	45
TABLA 7 INTERVALO DE TIEMPO CONSIDERANDO DIFERENTES PROFUNDIDADES DEL SISTEMA	56
TABLA 8 DESCRIPCIÓN DE LOS CAMBIOS DE NIVELES ENTRE LOS SISTEMAS DE ELEVACIONES	57
TABLA 9 COEFICIENTES DE RUGOSIDAD DE MANNING UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	61
TABLA 10 PARÁMETROS Y COEFICIENTES IMPLEMENTADOS EN LA CALIBRACIÓN	67
TABLA 11. DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS DE CONEXIÓN EN EL SISTEMA RÍO CAUCA – LAGUNA DE SONSO.....	74
TABLA 12. NIVELES DE AGUA IGUALADOS O EXCEDIDOS EL 25 %, 50% Y 75 % DEL TIEMPO PARA LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA LAGUNA DE SONSO Y LAS CAPTACIONES O CONEXIONES 1 Y 2.....	79
TABLA 12. VALORES PROMEDIOS DE VELOCIDAD DEL AGUA OBTENIDOS EN LOS PUNTOS DE CONTROL EMPLEADOS EN LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE CONEXIÓN.....	81

RESUMEN

De acuerdo con la importancia de los servicios ecosistémicos prestados por el humedal Laguna de Sonso como hábitat de fauna y flora y, regulador de caudales en época de crecientes del río Cauca, se considera necesaria su preservación ralentizando su ciclo natural de colmatación. En busca de una solución, en el presente trabajo se llevó a cabo en primera instancia la caracterización hidráulica e hidrológica de la zona de estudio, seguidamente se evaluó su comportamiento hidrodinámico para época de invierno y verano por medio del modelo numérico MOHID bidimensionalmente. Finalmente se evaluaron ocho alternativas de conexión río Cauca-laguna de Sonso, variando el ancho y el número de conexiones tanto en la zona sur como en la norte, en donde la alternativa que consiste en dos conexiones en el sur y tres en el norte de 20 m de ancho cada uno, presentó los mejores resultados con un aumento de velocidades en la zonas sur, centro y norte de la laguna, además de reducir las zonas muertas principalmente en el sur y centro de la misma.

Palabras Clave: *Modelación Hidrodinámica, Circulación de corrientes, Laguna de Sonso.*

1. INTRODUCCIÓN

La laguna de Sonso se localiza 5 Km al sur del municipio de Buga sobre la margen derecha del río Cauca; limita por el norte con el río Guadalajara, al sur con el río Sonso, al occidente con el río Cauca y al oriente con el parteaguas de la cordillera Central (CVC-Asoyotoco, 2007). Se extiende de sur a norte a lo largo de 12 Km y ocupa una extensión de 2045 hectáreas, de las cuales 745 corresponden a espejo lagunar y 1300 a zona amortiguadora. Se abastece en gran parte del agua proveniente del río Cauca en época de lluvia y del acuífero de la zona norte de la laguna, recargado principalmente por el río Guadalajara y algunas acequias localizadas en la zona oriental del sistema. Debido a su extensión y ubicación, la laguna de Sonso contribuye a regular los caudales del río Cauca durante las crecientes del mismo; aunque las múltiples intervenciones antrópicas a las que ha sido sometida en las últimas décadas ha ido disminuyendo su capacidad (Tobasura, 2006).

El cuerpo de agua de la laguna de Sonso se ha venido deteriorando debido a las numerosas intervenciones que en ella se han realizado, entre otras: se tienen el cierre del Caño Carlina en su parte norte debido a la construcción de la carretera Buga- Loboguerrero en el año de 1966, el cual interrumpió la comunicación entre la laguna y el río Cauca; la construcción de diques marginales en el sector sur de la laguna, los cuales cerraron el paso hacia la laguna de los ríos Sonso y Cauca, afectando gravemente los flujos de agua y sedimentos en la dirección sur-norte; y, las descargas de aguas residuales agrícolas y porcícolas a través de varios caños y canales (CVC-Asoyotoco, 2007).

Las intervenciones antrópicas han deteriorado la calidad del agua y la circulación de las corrientes en la laguna, generando cortos circuitos, zonas muertas y limitando la comunicación con los diferentes ríos, en especial con el río Cauca, lo cual, a su vez, ha ocasionado el deterioro ambiental de la laguna.

Por la importancia que representa el humedal Laguna de Sonso, en cuanto a sus servicios ecosistémicos directos como: la pesca del Bocachico (*Prochilodus magdalenae*), los Bagres (*Pseudopimelodus bufonius*), los Barbudos (*Rhamdia quelem*), la Tilapia Mossambica (*Oreochromis mossambicus*) y los Viringos (*Apteronotus* sp), esenciales para el sustento de la comunidad aledaña; ser hábitat de 55 especies de aves migratorias y un sitio importante para su observación; así como regulador de las crecientes del río protegiendo los asentamientos humanos de desarrollo incompleto ubicados en la zona norte de la laguna (CVC-Asoyotoco, 2007), el presente estudio busca, en aras de su recuperación y como un primer paso, aportar a una mayor comprensión del comportamiento hidrodinámico en la laguna, utilizando como herramienta la modelación matemática.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los humedales, como ecosistemas, son de gran importancia para la conservación de la biodiversidad, como recurso natural, regulador hidrológico y el bienestar de la humanidad. El reconocimiento de su relevancia se materializó a nivel global a través de la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional, especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas, denominada Convención Ramsar; en el año 1971, esta convención se constituye en el primer tratado vanguardista e intergubernamental sobre conservación y uso sostenible de los recursos naturales (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2013).

La laguna de Sonso se ha visto afectada por el monocultivo de la caña de azúcar y la construcción de obras civiles como diques marginales e infraestructura vial, llevándola a una contaminación y desecamiento progresivos. En otras épocas la laguna, estuvo ocupada por masas de agua de gran importancia para el cultivo y la producción de bocachico y tilapia, no obstante cumplía de función de reservorio temporal de agua para la regulación de los caudales de las crecientes del río Cauca, además de su importante valor paisajístico y servir de sitio de paso para numerosas aves migratorias (Tobasura, 2006).

El problema ambiental de la laguna de Sonso empezó en los años cincuenta, cuando sin autorización legal un habitante de la zona construyó en el extremo sur un jarillón para evitar las inundaciones en época de invierno por parte de los ríos Cauca y Sonso, además el posterior daño a los cultivos en las fincas aledañas. A raíz de esto, por el estancamiento del agua y la eutrofización causada por el uso de pesticidas y herbicidas en los cultivos de caña, se propició el crecimiento y propagación de la vegetación acuática, principalmente el buchón o jacinto de agua, impidiendo el acceso a los pescadores (Tobasura, 2006). Seguidamente, en la década de los sesenta para el año de 1966, se construyó la carretera Buga – Loboguerrero; la cual implicó el cierre del Caño Carlina y las otras salidas de la laguna en su parte norte; no obstante; para tratar de garantizar una comunicación entre el río Cauca y la laguna se construyó el Caño Nuevo, ubicado aguas arriba de las salidas anteriores, con una longitud de 1.5 km. El Caño Nuevo es el único canal por donde actualmente ocurre un intercambio de agua y sedimentos entre el río Cauca y la laguna (CVC-Asoyotoco, 2007). Además, a la entrada de este canal artificial se instaló una compuerta; la cual agravó aún más el estado de la laguna, ya que impidió la circulación de los peces desde el río hacia la laguna, esta compuerta fue retirada poco tiempo después debido a la presión ejercida por las comunidades y liderada por el biólogo Aníbal Patiño; por otra parte, la sedimentación produjo una pérdida significativa de la profundidad del agua; también, las descargas de aguas residuales domésticas, provenientes de los asentamientos subnormales, y agropecuarias han deteriorado la calidad de sus aguas, alterando la vida y el equilibrio del ecosistema; disminuyendo su productividad biológica (Tobasura, 2006).

Con el fin de lograr la recuperación del principal humedal del Valle del Cauca se requiere de un plan de manejo integral en el que a través de estudios y ejecución de obras e intervenciones se procure

restablecer las diferentes funciones y servicios de este ecosistema. Uno de los primeros estudios a realizar debe estar orientado a lograr una mejor comprensión del comportamiento hidrodinámico al interior de la laguna. El presente estudio tiene como finalidad contribuir a la comprensión de los procesos de circulación de las corrientes en esta así como plantear y evaluar, mediante la modelación matemática, diferentes alternativas estructurales orientadas a mejorar la circulación de las corrientes al interior de la laguna.

3. ANTECEDENTES

Uno de los seis escenarios de estudio del primer trabajo de Limnología en Colombia fue la laguna de Sonso. Molano (1954) calculó la extensión de la laguna basado en fotografías aéreas proporcionadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, midiendo 9 Km de largo por 2.5 Km de ancho y un área de 14 km², aproximadamente. También mencionó la existencia de dos canales en la reserva natural; uno de ellos, el canal Los Pescadores (Antiguo Caño Carlina), ubicado a 250 m aguas abajo del puente de Mediacanoa y que descarga las aguas de la laguna al río Cauca; el segundo, el canal El Verde, que servía de entrada a la laguna en el sur a unos 7 Km aguas arriba del puente de Mediacanoa. En dicho estudio también se realizaron mediciones de profundidades, análisis de corrientes y de la climatología. La profundidad promedio reportada fue de 2.4 m, se observó un oleaje en el sentido norte-sur debido al viento; respecto al clima reportó que la temperatura media fue de 23 °C y la precipitación promedio 1156 mm anuales.

Según los reportes e informes disponibles la primera obra que afectó la hidrodinámica de la laguna fue la construcción en 1955 de un jarillón en la parte sur de la laguna, la cual tenía como fin impedir la entrada de las aguas de desborde de los ríos Sonso y Cauca para evitar las inundaciones de las propiedades de los terratenientes del sector. Hasta entonces, la vegetación acuática era arrastrada desde la laguna hacia el río Cauca por el caño Carlina debido al flujo que existía en la laguna en la dirección sur-norte (Patiño, 1970).

En el año de 1967, al rectificar la carretera Buga-Mediacanoa, con el fin de no realizar la construcción de puentes sobre los pontones ubicados en el Caño Carlina se decidió construir otro canal de acceso para los pescadores denominado Caño Nuevo, con una longitud de 1.5 km y que desemboca aguas arriba de las antiguas salidas; desde entonces dicho canal se convirtió en el único medio de intercambio de agua y sedimentos entre el río Cauca y la laguna (CVC-Asoyotoco, 2007).

En 1995 el ingeniero Julián Ramírez realizó para la CVC un estudio hidráulico y de sedimentos de la laguna de Sonso, en el cual se propuso la construcción de un canal de entrada del río Cauca por el costado sur de la laguna y tres canales de salida hacia el mismo río por el costado norte, las cuales serían el Caño Nuevo, el Caño Carlina (el cual debía ser rehabilitado) y otro canal ubicado más al norte (Ramírez, 1995; citado por CVC (2007)).

En el año 2000, la Gobernación del Valle del Cauca declaró la laguna de Sonso como patrimonio ecológico del Valle del Cauca por ser un ecosistema valioso que subsiste en la planicie vallecaucana, constituyéndose en un lugar de singular valor ecológico para el departamento por su paisaje, su alto potencial turístico, recreacional y la diversidad de su flora y fauna (CVC-Asoyotoco, 2007).

En el año 2002 el ingeniero Roberto Montiel realizó un análisis de los diferentes estudios efectuados en la laguna de Sonso; propuso un sistema hidráulico para reconectar la laguna con el río Cauca, recomendó protección contra la erosión en el sector, un canal sin revestimiento como trampa de sedimentos, previamente evaluado por parte del grupo de gestión ambiental, ya que esta solución modificaría sustancialmente las condiciones ambientales (Montiel, 2002; citado por Vallejo, (2008)).

En el año 2004 Martínez y Posso en su investigación “Balance Hídrico del Humedal Laguna de Sonso y Caracterización de sus Procesos Hidrodinámicos a través de la Simulación Numérica” sustentan que la actual conexión de la laguna de Sonso con el río Cauca resulta inadecuada porque durante la mayor parte del tiempo no se presenta flujo en cerca del 70 % del espejo lagunar; los flujos más importantes se presentan en la zona norte de la laguna en cercanías de su conexión con el Caño Nuevo. En las zonas centro y sur de la laguna únicamente existe flujo cuando se presenta ingresos de grandes volúmenes de agua provenientes del río Cauca; cuando el flujo se presenta en el sentido laguna-río las velocidades máximas son ligeramente superiores a las velocidades máximas observadas cuando el flujo se da en sentido contrario. Esto debido a que el Caño Nuevo presenta una pendiente positiva en dirección hacia el río (Martínez y Posso, 2004).

En el año 2006, en el estudio “Modelación Integrada de Calidad del Agua y de Ecosistemas en la laguna de Sonso” Vélez, concluyó que la cantidad de buchón existente en la laguna estaba afectando en gran medida la calidad del agua y el balance hidrológico; los tributarios de la parte oriental de la laguna aportan aproximadamente el 70 % de los nutrientes que llegan a la laguna a través de corrientes superficiales; finalmente, planteó que para reducir las cantidades de buchón existente en la laguna es necesario reducir al menos en un 80 % el vertimiento de compuestos orgánicos e inorgánicos que contengan fósforo (Vélez, 2006; citado por Rodriguez y Jojoa, 2011).

En el año 2007, la Asociación de Usuarios para la Protección y Mejoramiento de las Cuencas Hidrográficas de los ríos Yotoco y Mediacanoa; ASOYOTOCO, conjuntamente con la autoridad ambiental, la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC, presentan el Plan de manejo ambiental del humedal laguna de Sonso. En este plan se destaca que el flujo hidráulico de la laguna se ha visto afectado debido a las intervenciones antrópicas como la construcción de la carretera Buga-Loboguerrero y los diques alrededor de la laguna. También se mencionan los problemas por acumulación de sedimentos y el vertimiento de aguas residuales provenientes de la agroindustria y la población aledaña (CVC-Asoyotoco, 2007).

En el año 2008, Vallejo realizó un estudio basado en la modelación hidrodinámica de la laguna de Sonso y su interrelación con el río Cauca; en él planteó alternativas con el fin de mejorar la hidrodinámica de la laguna, y recomendó la simulación de escenarios con más de una entrega de agua del río Cauca a la laguna (Vallejo , 2008).

En el año 2008 el grupo de investigación HIDROMAR de la Universidad del Valle presentó un estudio cuyo objetivo era la caracterización y modelación hidrodinámica de la laguna de Sonso. Entre las recomendaciones principales proponen realizar estudios para establecer el origen y la dinámica de sedimentos dentro de la laguna, debido a que la posible desaparición del cuerpo lagunar depende principalmente de ello (Bocanegra, Ricardo, 2008).

Rodríguez y Jojoa en el año 2011 llevaron a cabo un estudio sobre la caracterización hidroclimatológica y geomorfológica en la laguna de Sonso, efectuándose una aproximación al balance hídrico de la laguna, además de la implementación de un modelo matemático bidimensional para el estudio del comportamiento hidrodinámico de ésta y su interacción con el río Cauca; a partir de estos resultados se plantearon seis alternativas diferentes para el mejoramiento del flujo al interior del humedal, incluyendo un canal al sur de 16 m de ancho donde se conecten río – laguna y una expansión del canal Caño Nuevo a 21 m de ancho (Rodríguez y Jojoa, 2011).

En el estudio realizado por ASOCARS-UNIVALLE (2013), mediante el modelo matemático unidimensional MIKE 11, se llevó a cabo un análisis de los posibles efectos sobre la hidrodinámica de la laguna y los niveles de agua en el río Cauca de 34 alternativas diferentes, considerando tres tipos de conexiones río-laguna (con diferentes configuraciones de anchos y niveles de la estructura de entrada o conexión con la laguna), así: (i) El canal Caño Nuevo en la zona norte de la laguna (K223+037), (ii). Una conexión en la zona sur de la laguna (en la abscisa K206+272) y (iii) La combinación de estas dos conexiones, operando de manera simultánea y permanente. La modelación se realizó considerando que se tienen, a lo largo del corredor río Cauca, diques marginales de protección distanciados 60 m del cauce del río y la ocurrencia de una creciente con un período de retorno de 30 años

De acuerdo con los resultados del escenario con dos conexiones (una en la parte sur y otra en la parte norte (Caño Nuevo)), los niveles de agua en el río serían ligeramente más bajos que en la condición actual de una conexión única al norte a través de Caño Nuevo.

En cuanto al escenario con doble conexión de la laguna al río cauca en los extremos sur y norte (Caño Nuevo) se analizaron los caudales en los dos canales de conexión; se observó que el canal ubicado en la zona sur de la laguna es el encargado de ingresar caudal a la laguna para los diferentes anchos de entrada evaluados y a su vez el canal Caño Nuevo ubicado en la zona norte de la laguna se comporta como un canal que permite el ingreso y salida de caudal. Esto comprueba la importancia de establecer un segundo canal de conexión que comunique al río Cauca con la zona

sur de la laguna de Sonso ya que se generaría un incremento en los caudales que circularían al interior de la laguna, permitiendo un mayor recambio de las aguas en su interior.

4. JUSTIFICACIÓN

La laguna de Sonso es el humedal más importante del Valle del Cauca, declarado como reserva natural por medio del Acuerdo CVC No. 17 de octubre de 1978; hace parte del ecosistema bosque seco tropical inundable del complejo del Alto río Cauca. Este humedal alberga aproximadamente 150 especies típicas, entre ellas: 78 aves, 12 peces, 2 anfibios, 5 reptiles, 35 mamíferos y 18 especies de flora. La laguna también es considerada una zona recreativa con valor paisajístico; además, en el año 2000 es declarada por la Gobernación del Departamento como patrimonio ecológico del Valle del Cauca (CVC-Asoyotoco, 2007). De igual modo, este ecosistema brinda sustentabilidad económica a las familias del sector a través de actividades como la pesca. En marzo del año 2012, la CVC capacitó a 47 pescadores de la laguna con el objetivo de explicar la problemática que han traído las especies invasoras como la tilapia nilótica, pero en dicha jornada también se logró evidenciar la abundancia de especies nativas como el bocachico. Las comunidades de veredas, como Puerto Bertín, El Porvenir y La Palomera al oeste del municipio de Buga, tienen la pesca como actividad primordial para su sustento (CVC, 2012).

No obstante, la laguna se encuentra gravemente amenazada y con alto riesgo de desaparición debido a diferentes problemáticas ambientales que inciden en el libre desarrollo de los ecosistemas presentes, y que se han generado en gran medida por las actividades antropogénicas; entre ellas se pueden mencionar: (a) la construcción, a mediados de la década del 50, de diques en el sector sur para la protección de inundaciones provocadas por los desbordamientos de los ríos Sonso y Cauca principalmente; dichas obras afectaron la hidrodinámica de la laguna, suspendiendo el flujo en el sentido sur-norte, provocando una mayor sedimentación y favoreciendo el crecimiento excesivo del buchón (Jacinto de agua) en el cuerpo lagunar; (b) el taponamiento del caño Carlina debido a la construcción de la vía Buga- Loboguerrero, la cual interrumpió la conexión entre la laguna y el río Cauca en la parte norte; esto conllevó a la apertura del canal Caño Nuevo, convirtiéndolo en la única comunicación entre el río y la laguna; (c) en cuanto al monocultivo de caña de azúcar hay un aporte excesivo de nutrientes que eutrofizan la laguna y esto a su vez, junto con las bajas velocidades de circulación, promueven el desarrollo y enraizamiento de las plantas acuáticas, el desecamiento de pantanos y madre viejas; cerca del 70 % de la laguna está invadida de material vegetal (País, 2008), la cual consume el oxígeno disuelto y disminuye la lámina de agua; (d) el uso de herbicidas, fungicidas y fertilizantes por parte de la industria cañera y la presencia de sustancias tóxicas que se infiltran en el suelo o que escurren con el agua lluvia a través de las acequias tributarias de la laguna y, (e) el vertimiento de aguas residuales domésticas que aportan una carga orgánica contaminante considerable a este cuerpo de agua léntico, lo cual implica alteraciones perjudiciales de su calidad con relación a los usos posteriores y con su función ecológica.

Debido a la importancia que tiene la laguna para la región, este estudio pretende hacer aportes para su recuperación, generando beneficios de manera integral en los aspectos ambientales, sociales, económicos y culturales, todo ello bajo escenarios representativos, utilizando como herramienta principal la modelación numérica.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo General

Analizar diferentes sistemas de conexión río Cauca-Laguna de Sonso para el mejoramiento de la circulación de las corrientes en la laguna mediante la modelación matemática.

5.2. Objetivos específicos

- Caracterizar hidrológica e hidráulicamente la laguna de Sonso.
- Implementar un modelo hidrodinámico que represente el comportamiento de la circulación de corrientes en el interior de la laguna de Sonso.
- Plantear y modelar alternativas para el mejoramiento de la hidrodinámica en la laguna de Sonso.
- Analizar comparativamente las diferentes propuestas de conexión para el mejoramiento de la hidrodinámica en la laguna de Sonso.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. Sistema y Sistemas Naturales

Se define un sistema como un conjunto de componentes que se integran entre sí con un objetivo en común; la relación entre estos implica que una modificación en uno de ellos repercute y afecta todo el sistema. Una de las características fundamentales que presenta un sistema es que guarda cierta relación jerárquica entre los elementos que lo componen; de este modo cada nivel de jerarquía ejerce su influencia en los niveles inmediatamente inferiores. Sin embargo, esta subordinación entre los componentes es incompleta, conservando así un cierto grado de autonomía. Este concepto permite entender, por ejemplo, la importancia de analizar el ecosistema como un todo, para entender la crisis de una especie en particular o entender las interrelaciones e interdependencias del sistema humano con el sistema natural y sus componentes (Pérez, 2015).

En este sentido se define el sistema natural como la biosfera integrada con su conjunto de subsistemas y elementos, flujos de materia y energía, de la cual el hombre hace parte y que se diferencia del resto por ser el único animal capaz de adaptarse a tan amplia gama de subsistemas o ecosistemas y de lograr su transformación. Dicho proceso de transformación ha logrado la alteración de las poblaciones, la regularidad de los ciclos de materia, los flujos de energía y, con ello, todo el equilibrio dinámico del sistema (Bifani, 1999).

6.2. Ecosistema

Los ecosistemas son sistemas naturales, esto es, un conjunto de elementos, componentes o unidades relacionadas entre sí. Cada uno de sus componentes puede estar en diferentes estados o situaciones; el estado seleccionado del sistema en un momento dado es producto de las interacciones que se dan entre los componentes (Sánchez, 2003).

Los componentes del ecosistema son tanto bióticos como abióticos. Los componentes bióticos incluyen organismos vivos, como plantas, animales, hongos y microorganismos del suelo. Los componentes abióticos pueden ser de origen orgánico, como la capa de hojarasca que se acumula en la superficie del suelo (mantillo) y la materia orgánica incorporada en los agregados del suelo. De igual forma, los componentes abióticos incluyen elementos no orgánicos, como las partículas de suelo mineral, las gotas de lluvia, el viento y los nutrientes del suelo (Sánchez, 2003).

Los ecosistemas son sistemas complejos en los cuales se producen interrelaciones no lineales entre sus componentes a diferentes escalas espacio-temporales. Desde el punto de vista económico, los ecosistemas proveen servicios ecosistémicos (SE) que mejoran el bienestar humano y normalmente están en condiciones de bienes públicos y recursos comunes (ten Brink et al., 2013).

Los ecosistemas pueden clasificarse de forma general, en océanos, ríos, bosques, pantanos, humedales, etc., o bien de forma más específica, por ejemplo, un área pequeña como un charco. Pero no existe un límite exacto de donde comienza y termina un ecosistema (Machado et al., 2008).

6.3. Humedales

Los humedales son cualquier unidad funcional del paisaje que no siendo un río ni un lago constituye una anomalía hídrica positiva en relación con un territorio adyacente más seco. El exceso de humedad debe ser suficientemente importante como para afectar los procesos biológicos (González, 1999). La Convención de Ramsar define los humedales como “extensiones de marismas, pantanos, turberas o aguas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancados o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” (Convención Ramsar, 1971).

Existe un agrupamiento extenso en variedad y cantidad de hábitats por parte de la Convención Ramsar; su más breve clasificación incluye al menos 30 categorías de humedales naturales y 9 artificiales. Una clasificación aún más simple está conformada por 7 unidades paisajísticas que corresponden a humedales u otros sistemas de los que estos hacen parte; entre ellos se tienen: estuarios, costas abiertas, llanuras de inundación, pantanos de agua dulce, lagos, turberas y bosques de inundación (Duguan, 1992).

6.3.1. Funciones de los Humedales

Los humedales tienen componentes físicos, biológicos y químicos, tales como suelo, agua, nutrientes, además, especies animales y vegetales. Los procesos que se dan por la relación entre estos componentes y dentro de cada uno de ellos permiten que el humedal desempeñe ciertas funciones, como el control de inundaciones y la protección contra tormentas, y que genere productos, tales como, vida silvestre, pesquería y recursos forestales. Además, existen atributos a escala de ecosistemas, que incluyen la diversidad biológica y la singularidad del patrimonio cultural que poseen valor, ya sea porque permiten ciertos usos o porque tienen valor en sí mismos. Es la combinación de estas funciones, productos y atributos de los ecosistemas la que hace que los humedales sean importantes para la sociedad (Duguan, 1992; Convención Ramsar, 1971).

La retención de nutrientes y sedimentos en los humedales es con frecuencia un fenómeno estacional, ya que en ciertos períodos del año los humedales se desempeñan como “fuentes” y en otros como “sumideros” de sedimentos y nutrientes. En los humedales con temperaturas templadas, por ejemplo, la retención de nutrientes es mayor durante el período de crecimiento, cuando la actividad microbiana es mayor en el agua y las plantas son más productivas (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2013).

6.3.2. Degradación de humedales

Como un fenómeno natural los humedales en el tiempo sufren un proceso de colmatación debido a la acumulación de sedimentos; debido a este proceso el cuerpo lagunar presenta cambios morfológicos, pasando a convertirse en pantano, seguidamente en pastizal y finalmente en bosque. No obstante, los humedales son sistemas muy vulnerables a los cambios que se pueden dar en el medio. La actividad humana es uno de los principales responsables de la degradación de este tipo de ecosistemas. La excesiva productividad agrícola y ganadera, el cambio en el uso de los suelos, la contaminación de aguas y riberas, la caza de fauna nativa y la extracción de especies vegetales son algunas de las acciones que ponen en constante peligro la existencia de los humedales (Olivares, 2009).

6.4. Laguna

Son cuerpos de agua con aparente similitud con los lagos; su existencia puede corresponder a cualquier origen, drenaje y dimensiones. Permanecen relativamente estancados y son un tanto inestables, con variaciones en el nivel de agua; pueden ser temporales o permanentes, dependiendo del régimen pluvial. Son depósitos con una profundidad media menor a los 8 m y de forma cóncava. Esta profundidad tiende a provocar una turbiedad que origina una menor transparencia del agua en comparación con un lago, la cual frecuentemente resulta de color pardo por la presencia de materia orgánica, por el crecimiento de algas y por la presencia de sólidos suspendidos (Cervantes, 2007) .

6.5. Cuenca Hidrográfica

Es una porción de terreno delimitada hidrográficamente por la divisoria de aguas, que corresponden a las cimas de las colinas o las montañas que rodean los terrenos y sus componentes ladera abajo. Las cuencas son producto de procesos geomorfológicos. Entre ellos, se incluyen patrones geológicos locales y modificaciones sufridas en la superficie del terreno por procesos fluviales y tectónicos, que se pueden interpretar en mapas cartográficos o fotografías aéreas, mediante análisis fisiográfico (Núñez, 2001).

6.6. Modelación Matemática

La modelación matemática es un intento de explicar matemáticamente fragmentos de los diferentes procesos en el mundo real. Los modelos han sido creados en las ciencias tanto físicas, como biológicas y sociales. Los componentes son extraídos del cálculo, el álgebra, la geometría y otros campos afines (Brito et al., 2011).

Es importante destacar que el modelo matemático no es único, pueden existir varias representaciones matemáticas que describen un mismo fenómeno, por lo tanto se hace necesario una validación. La forma de abordar matemáticamente el modelo tampoco es única, elemento que permite verificar la versatilidad de la matemática, así como su consistencia (Camarena, 2012).

6.6.1. Modelación Hidrodinámica

La hidrodinámica es la parte de la ciencia que se encarga de estudiar los fluidos en movimiento. Son tres las ecuaciones fundamentales que permiten describir un fluido en movimiento (conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía). Dentro de las aplicaciones de la hidrodinámica se tienen: estudio en presas hidráulicas y construcción de todo tipo de estructuras hidráulicas, como canales, presas, sedimentadores, vertederos y tuberías, entre otras (Giménes, 2005).

Según Mellor y Blumberg (1987), en los últimos años se han desarrollado diversos modelos hidrodinámicos bidimensionales y/o tridimensionales en diferentes institutos o universidades; en su mayoría estos modelos se han efectuado principalmente para áreas costeras con el fin de estudiar los efectos de los vertimientos contaminantes. Recientemente, algunos de estos modelos se han acoplado con módulos biológicos, de transporte de contaminantes y sedimentos (EMGESA, 2006).

La modelación hidrodinámica conforma entonces una herramienta necesaria para la cuantificación del comportamiento de diferentes cuerpos de agua, permitiendo de este modo determinar la variación espacio - temporal de velocidades y profundidades bajo la influencia de condiciones tanto internas como externas. El acoplamiento entre un modelo hidrodinámico y uno biológico y de calidad de agua puede complementar el comportamiento del cuerpo de agua, identificando la variabilidad espacial y temporal de constituyentes de interés. Al final, los modelos hidrodinámicos acoplados contribuyen a analizar y comparar de manera relativa diferentes escenarios de manejo potencialmente aplicables a diferentes sistemas (EMGESA, 2006).

6.6.2. Ecuaciones Hidrodinámicas de Navier-Stokes

Las ecuaciones que rigen la mecánica de fluidos se obtienen a partir de los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica aplicada a un fluido. Las tres ecuaciones mencionadas en el ítem anterior hacen referencia a los tres fenómenos de transporte que se producen en un fluido: transporte de masa, de movimiento y de energía. A este conjunto de ecuaciones, dadas en su forma diferencial, se les denomina ecuaciones de Navier-Stokes (Casado *et al.*, 2012).

En la hidrodinámica clásica se pueden obtener ecuaciones que demuestren el flujo de masa, de energía y de momento hacia un sistema a través de la ecuación de transporte de Reynolds. En

términos generales, dicha ecuación relaciona los cambios de alguna propiedad del fluido al seguir un elemento de fluido determinado moviéndose en el espacio, con los cambios temporales de la misma propiedad pero manteniendo fijo un determinado volumen de control (Shames, 2001).

6.6.2.1. Ecuación de Conservación de la Masa

La ecuación de continuidad para un flujo no permanente de densidad variable a través de un volumen de control puede escribirse como la Ecuación 1 (Chow, *et al.*, 1994).

$$0 = \frac{d}{dt} \iiint_{v.c.} \rho dV + \iint_{s.c.} \rho V dA \quad \text{Ecuación 1}$$

Considerando un volumen de control elemental de longitud d_x en un canal. En la Figura 1 se puede observar tres vistas del volumen de control: (a) una vista en alzada desde el lado (corte longitudinal), (b) una vista en planta desde arriba, y (c) una sección transversal del canal. El caudal de entrada en el volumen de control es la suma del caudal Q que entra en el volumen de control desde el extremo de aguas arriba del canal y del caudal de entrada lateral q que entra en el volumen de control como flujo distribuido a lo largo de los lados del canal. Las dimensiones de q son las del caudal por unidad de longitud de canal, de tal manera que el caudal de entrada lateral es qdx y la tasa de entrada de masa es como se observa en la Ecuación 2 (Chow, *et al.*, 1994).

$$\iint_{entrada} \rho V \cdot dA = -\rho(Q + qdx) \quad \text{Ecuación 2}$$

Es negativa porque los flujos de entrada se consideran como negativos en el teorema de transporte de Reynolds. El flujo de masa hacia afuera del volumen de control se representa como la Ecuación 3 (Chow, *et al.*, 1994).

$$\iint_{salida} \rho V \cdot dA = -\rho\left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx\right) \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde $\partial Q / \partial x$ es la tasa de cambio del flujo en el canal con respecto a la distancia. El volumen del elemento de canal es $A dx$, donde A es el área promedio de la sección transversal, luego la tasa de cambio de la masa almacenada dentro del volumen de control se puede observar en la Ecuación 4 (Chow, *et al.*, 1994).

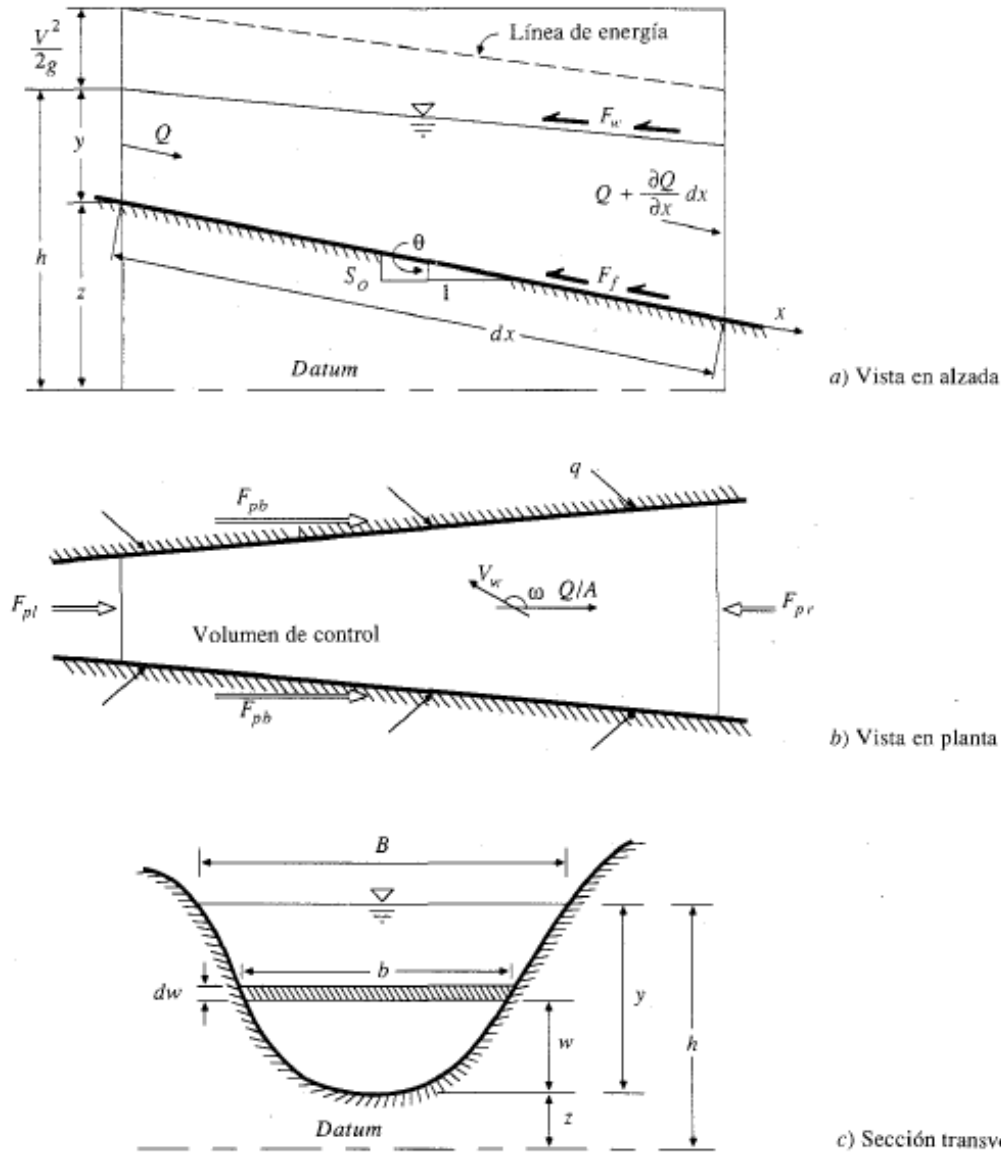


Figura 1. Tramo elemental de un canal para la deducción de las ecuaciones de Saint-Venant
Fuente: Chow, *et al.* (1994)

$$\frac{d}{dt} \iiint_{v.c.} \rho dV = \frac{\partial(\rho A dx)}{\partial t} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde se usa la derivada parcial porque el volumen de control se define con un tamaño fijo (a pesar de que el nivel del agua puede variar dentro él). El flujo neto de salida de masa del volumen de control se encuentra al sustituir las ecuaciones Ecuación 2 y la Ecuación 4 en la Ecuación 5. (Chow, *et al.*, 1994).

$$\frac{\partial(\rho A dx)}{\partial t} - \rho(Q + q dx) + \rho \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx \right) = 0 \quad \text{Ecuación 5}$$

Suponiendo que la densidad del fluido ρ es constante, la Ecuación 5 se simplifica dividiéndola por ρdx y reordenando para producir la forma conservativa de la ecuación de continuidad (Chow, *et al.*, 1994).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q = 0 \quad \text{Ecuación 6}$$

La cual es aplicable a una sección transversal del canal. Esta ecuación es válida para canales prismáticos o no prismáticos; un canal prismático es aquel en el cual la forma de la sección transversal no varía a lo largo del canal y la pendiente del lecho es constante (Chow, *et al.*, 1994).

Para algunos métodos de solución de las ecuaciones de Saint-Venant, se usa la forma no conservativa de la ecuación de continuidad, en la cual la velocidad de flujo promedio V es una variable independiente, en lugar de Q . Esta forma de la ecuación de continuidad puede deducirse para un ancho unitario de flujo dentro del canal, despreciando el flujo de entrada lateral, tal como sigue. Para un ancho unitario de flujo $A = y \times 1 = y$ y $Q = VA = Vy$. Sustituyendo en Ecuación 6 se obtienen las ecuaciones 7 y 8 (Chow, *et al.*, 1994).

$$\frac{\partial(Vy)}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad \text{Ecuación 7}$$

$$V \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad \text{Ecuación 8}$$

6.6.2.2. Ecuación de Cantidad de Movimiento

El momentum se define como el producto entre la masa de una partícula y su vector velocidad. En mecánica clásica es la segunda ley de Newton la que provee la relación fundamental entre la resultante de las fuerzas que actúan sobre una partícula y la variación temporal del cambio de momentum. Es de primordial interés en mecánica de fluidos ya que engloba los mecanismos de resistencia, esfuerzos de corte internos y de frontera, propulsión y fuerzas en cuerpos sumergidos. (Barrero & Pérez, 2005).

Ecuaciones del Movimiento

Las ecuaciones del movimiento se derivan a partir de la segunda Ley de Newton aplicada a un elemento de volumen resultando las Ecuaciones 9, 10 y 11 con 'U', 'V' y 'W' como las componentes del vector velocidad en las direcciones 'x', 'y' y 'z', respectivamente (Barrero & Pérez, 2005):

$$\rho \frac{DU}{Dt} = \rho f_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho f_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$\rho \frac{DW}{Dt} = \rho f_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad \text{Ecuación 11}$$

donde:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \quad \text{Ecuación 12}$$

f_x, f_y, f_z son las fuerzas másicas en las direcciones x, y, z respectivamente; σ_{ii} representa los esfuerzos normales y τ_{ij} los esfuerzos tangenciales. Mediante el equilibrio del momento de las fuerzas superficiales se demuestra que $\tau_{ij} = \tau_{ji}$ (Barrero & Pérez, 2005).

La Ecuación 11 es general y puede aplicarse a cualquier tipo de fluido. Sin embargo, dicha ecuación aún no es capaz de determinar las ecuaciones del movimiento. El problema se resuelve si se pueden relacionar los esfuerzos con las deformaciones que experimenta el volumen de fluido. Para hacer esta relación es necesario definir el comportamiento reológico del fluido. Para un fluido Newtoniano la componente según x está dada por la Ecuación 13 (Barrero & Pérez, 2005):

$$\begin{aligned} \rho \frac{DU}{Dt} = \rho f_x + \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} [\mu \nabla \cdot \vec{V}] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad \text{Ecuación 13}$$

Si la viscosidad es constante y el fluido incompresible la ecuación anterior se reduce a la Ecuación 14 de Navier-Stokes (Barrero & Pérez, 2005).

$$\rho \frac{DU}{Dt} = \rho f_x - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \mu \nabla^2 U \quad \text{Ecuación 14}$$

En general:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{f} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad \text{Ecuación 15}$$

donde $\vec{V} = (u, v, w)$ y $\vec{f} = (f_x, f_y, f_z)$

La manipulación de la Ecuación 15 conduce a ciertos casos particulares. Por ejemplo, si el fluido es ideal se obtienen las ecuaciones de Euler: Si las fuerzas másicas son originadas sólo por el campo gravitacional, se puede definir una presión motriz $\hat{p} = p + gh$, donde g es el peso específico del fluido y h un eje vertical, positivo hacia arriba. Así la ecuación de Euler puede escribirse como la ecuación 16 (Barrero & Pérez, 2005):

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla \hat{p} \quad \text{Ecuación 16}$$

Si el flujo es permanente, obtenemos la Ecuación 17 de Bernoulli (Barrero & Pérez, 2005):

$$B = \frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + h = \text{Constante} \quad \text{Ecuación 17}$$

La Ecuación 15 puede aplicarse tanto a flujos laminares como turbulentos. Hay que tener presente, sin embargo, que por su naturaleza el movimiento turbulento no es permanente, por lo que la aplicación directa de la Ecuación 15 a tales flujos no es posible. En la práctica se trabaja con cantidades medias temporales utilizando las ecuaciones de Reynolds. Estas ecuaciones se obtienen al descomponer V y p de la Ecuación 15 en una componente media temporal y una fluctuante que es función del tiempo; es decir, la Ecuación 18 (Barrero & Pérez, 2005):

$$\begin{aligned} (u, v, w) &= (\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}) + (\acute{u}, \acute{v}, \acute{w}) \\ p &= \bar{p} + \acute{p} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde la prima indica la componente fluctuante. Al reemplazar la Ecuación 18 en la Ecuación 15 se puede usar la ecuación de continuidad y promediar en el tiempo, se obtiene entonces la Ecuación 19 (Barrero & Pérez, 2005):

$$\begin{aligned} \rho \frac{D\bar{u}}{Dt} &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} - \rho \left[\frac{\partial}{\partial x} \overline{u^2} + \frac{\partial}{\partial x} \overline{u\acute{v}} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{u\acute{w}} \right] \\ \rho \frac{D\bar{v}}{Dt} &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} - \rho \left[\frac{\partial}{\partial x} \overline{u\acute{v}} + \frac{\partial}{\partial x} \overline{v^2} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{v\acute{w}} \right] \\ \rho \frac{D\bar{w}}{Dt} &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} - \rho \left[\frac{\partial}{\partial x} \overline{u\acute{w}} + \frac{\partial}{\partial x} \overline{v\acute{w}} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{w^2} \right] \end{aligned} \quad \text{Ecuación 19}$$

Los términos en corchetes corresponden a los esfuerzos aparentes o de Reynolds. Hay que insistir que estos "esfuerzos" indican un flujo de momentum (Barrero & Pérez, 2005).

6.6.2.3. Ecuación de la Energía

Cuando se suma en cada uno de los instantes de la trayectoria que describe un cuerpo la energía potencial más la energía cinética correspondientes se obtiene un valor constante como resultado en la energía mecánica, denominada ley de conservación de la energía mecánica, donde, la energía potencial perdida es igual a la energía cinética ganada; significa que el valor disminuido en la energía potencial se incrementa en la energía cinética, de tal manera que la energía mecánica es la misma en toda la trayectoria del cuerpo. Es por este principio que un péndulo simple no se detiene hasta que alguna fuerza no conservativa logre frenarlo, como el rozamiento con el aire.

El principio de la conservación de la energía expresa que la variación en la unidad de tiempo de la energía total (interna más cinética) contenida en un volumen de fluido es igual al trabajo por unidad de tiempo (potencia) de las fuerzas de superficie y másicas que actúan sobre él, más el calor que recibe en la unidad de tiempo por conducción, radiación y reacción química. El principio de conservación de la energía se expresa como la Ecuación 20 (Barrero & Pérez, 2005).

$$\rho \frac{D(e + v^2/2)}{Dt} = \nabla \cdot (\tilde{\tau} \cdot v) + \rho f_{m \cdot v} - \nabla \cdot q + Q_r + Q_q \quad \text{Ecuación 20}$$

6.6.2.4. Ecuación de Bernoulli

El principio de Bernoulli, también denominado ecuación de Bernoulli o Trinomio de Bernoulli, describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente. Fue expuesto por Daniel Bernoulli en su obra Hidrodinámica (1738) y expresa que en un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido. La energía de un fluido en cualquier momento consta de tres componentes: Cinética, es la energía debida a la velocidad que posee el fluido; Potencial Gravitacional, es la energía debido a la altitud que un fluido posea; y Energía de presión, es la energía que un fluido contiene debido a la presión que posee. La Ecuación 21 conocida como "Ecuación de Bernoulli" (Trinomio de Bernoulli) consta de estos mismos términos (Toro, 2005):

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 + \rho g h_2 \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde g es el valor de la aceleración de la gravedad, P_1 y P_2 son las presiones en el fluido, ρ es la masa distribuida, v_1 y v_2 son los valores de las velocidades, h_1 y h_2 son las alturas o niveles del fluido respecto a un nivel de referencia elegido arbitrariamente (Toro, 2005).

6.6.3. Modelos Matemáticos

El uso de modelos matemáticos es común en la solución de problemas de flujos a superficie libre. Dependiendo de la situación se pueden usar modelos unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales. Normalmente se usa un modelo unidimensional cuando no se necesita el campo de velocidades y basta con obtener la variación espacial y temporal de la cota del agua en un flujo a superficie libre; ejemplos de este tipo de estudios son los sistemas de canales, redes de drenaje y el efecto en el almacenamiento de una laguna conectada al mar por medio de un canal. En casos donde sea necesario conocer el campo de velocidades se usa un modelo bidimensional o tridimensional. Para este estudio se hará énfasis en los modelos bidimensionales, ya que con ellos es posible resolver gran cantidad de problemas prácticos; además, la teoría presentada puede ser fácilmente generalizable (Jimenez & Berezowsky, 2004). Entre los modelos bidimensionales más usados se tienen los siguientes: IBER, FVCOM, SOBEK Y MOHID.

6.6.3.1. IBER

Es un software de modelación hidrodinámica bidimensional; dentro de su núcleo de herramientas presenta ciertas aplicaciones basadas en modelos numéricos de utilidad importante en hidráulica y en morfología fluvial; entre sus aplicaciones importantes están: el cálculo de flujos en ríos, la definición de zonas inundables, evaluación de zonas de riesgo, delimitación de vías de intenso escurrimiento, el transporte de sedimentos y el transporte de fondo junto con el flujo de marea en estuarios. IBER presenta ventajas respecto a la modelación unidimensional, ya sea en régimen variable o permanente, ya que es capaz de simular con mayor ajuste a la realidad todas aquellas situaciones en las cuales el flujo no es exclusivamente unidireccional. Su cálculo se fundamenta en resolver las ecuaciones del flujo en lámina libre para aguas poco profundas (ecuación de Saint Venant); además, tanto el componente hidrodinámico como el de sedimentos resuelven las ecuaciones de forma integral utilizando el método de volúmenes finitos (Jordan de Urries, 2013).

6.6.3.2. FVCOM

El modelo FVCOM o Finite Volume Coastal Ocean Model, es un modelo moderno pues fue desarrollado en los últimos diez años, con buenas herramientas y su presentación gráfica es de calidad. Este modelo considera una importante limitación respecto a permiso de licencia, debido a que no puede ser usado con fines comerciales, por lo que su uso está dirigido a usuarios de universidades y ministerios. Su sistema operativo de preferencia es Linux (INH, 2010).

6.6.3.3. SOBEK

Software utilizado en los sistemas hídricos en zonas fluviales, urbanas y rurales. Está estructurado por módulos, brindando una visión global en el comportamiento de un sistema hídrico. De igual modo permite analizar el flujo unidimensional o bidimensional a través de puentes y estructuras hidráulicas que por medio de métodos convencionales son difíciles de evaluar. El modelo se centra en una modelación interactiva que mejora con la inclusión de la topografía del terreno, siendo por tanto una herramienta muy útil a la hora de determinar áreas inundables y de entender la verdadera dinámica del flujo (Pérez, 2012).

6.6.3.4. MOHID

MOHID o Modelo Hidrodinámico, posee módulos para estimar desde el transporte de sedimentos hasta la calidad de las aguas, además de una interfaz que funciona en Windows, su licencia no presenta restricciones y está en constante actualización, parte de la comunidad del modelo la integran españoles, lo que hace atractivo la cercanía del idioma (MARETEC, 2014).

Para la modelación hidrodinámica en la Laguna de Sonso, de acuerdo con los objetivos de este estudio, se seleccionó este modelo debido que puede ser analizado bidimensionalmente, ha sido utilizado por la comunidad científica en diferentes partes del mundo quienes a su vez con su experiencia han realizado aportes para su mejoramiento, tiene la facilidad para ejecutar diferentes aplicaciones al mismo tiempo, la versión del software es gratuita (MOHID ESTUDIO 2015), ha sido utilizado en el país, mostrando buenos resultados, además de ser recomendado por el uso en un escenario similar como el embalse del Muña en Bogotá, utiliza la discretización espacial usando la técnica de volúmenes finitos (las coordenadas espaciales son independientes, y se puede elegir cualquier geometría para cada dimensión), lo que permite una mayor flexibilidad en la subdivisión del dominio vertical y horizontal, su interfaz gráfica presenta gran similitud a la usada por Microsoft office, particularidad que lo diferencia en gran medida de otros modelos facilitando de su uso, los creadores del sistema de modelación brindan periódicamente cursos de capacitación y aprendizaje, también cuentan con plataformas virtuales como son: la página de MOHID WATER; MOHID WIKI y, el Foro, donde se puede interactuar o consultar con la comunidad de usuarios dudas específica.

6.6.3.4.1. Descripción General

Actualmente, MOHID está integrado por diferentes ejecutables como lo son MOHID Agua (WATER), MOHID Suelo (SOIL) y MOHID Tierra (LAND). Estas herramientas pueden ser usadas para estudiar el ciclo del agua en un ambiente integrado, permitiendo simular procesos físicos y biogeoquímicos, tanto en el agua como en los sedimentos. En el contexto de la informática ha sido posible clasificar MOHID como un sistema de tamaño considerablemente grande (Braunschweig *et al.*, 2007).

- MOHID Agua: Programa para simular la dinámica de cuerpos de agua, como océanos, estuarios, embalses, entre otros.
- MOHID Suelo: Modulo que se utiliza para simular el flujo de agua en el suelo, relacionando parámetros como la presión y la conductividad.
- MOHID Tierra: El más reciente ejecutable del sistema de modelación de MOHID, está diseñado para modelar procesos que se producen en cuencas hidrográficas, como escorrentía e infiltración.

6.6.3.4.2. Características principales

Este software presenta adaptación a nuevas áreas de aplicación, facilidad para ejecutar diferentes aplicaciones al mismo tiempo, se puede utilizar el modelo en cualquier dimensión. (1D, 2D y 3D), posee discretización espacial utilizando la técnica de volúmenes finitos (las coordenadas espaciales son independientes, y se puede elegir cualquier geometría para cada dimensión), lo que permite una mayor flexibilidad en la subdivisión del dominio vertical y horizontal y permite la utilización de modelos anidados, con algunas limitaciones dado el poder computacional disponible.

6.6.3.4.3. Estructura general del modelo

Los módulos contenidos en el programa están estructurados de acuerdo a una jerarquía, la cual se puede apreciar en la Figura 2.

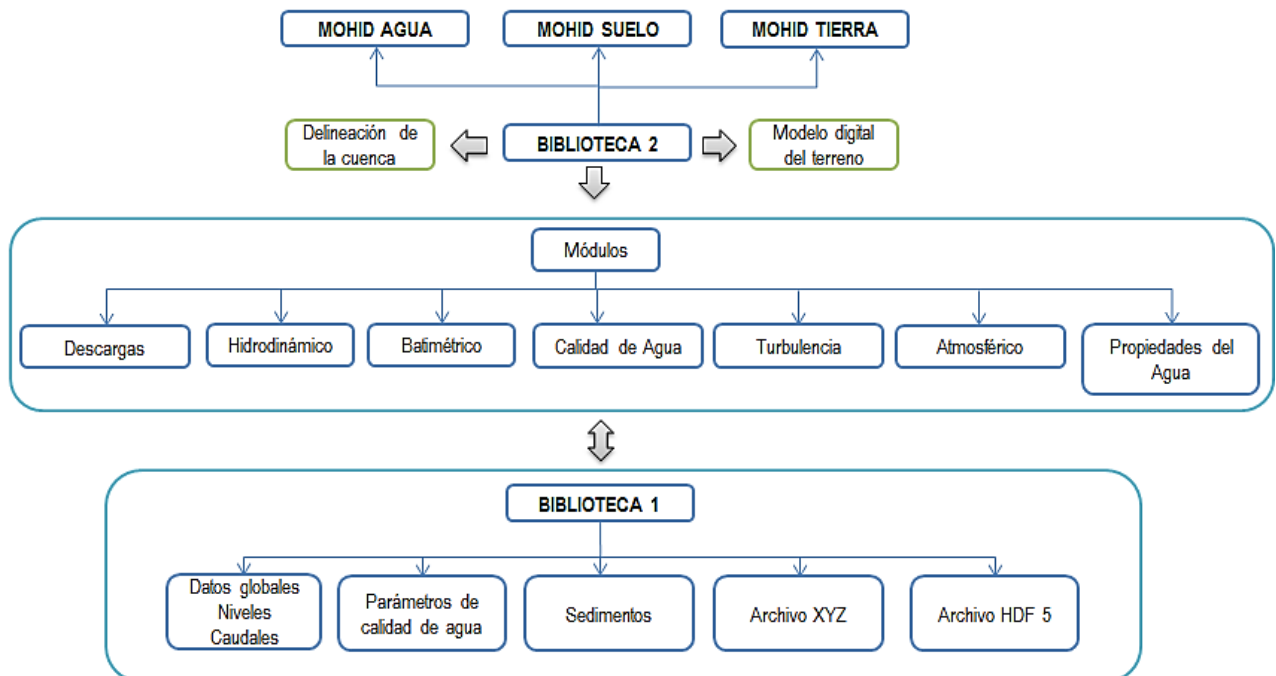


Figura 2. Jerarquía de estructura general del modelo MOHID

Fuente: Barreto *et al.* (2009)

Como se puede apreciar los tres componentes principales del modelo MOHID (Agua, Suelo y Tierra) se ubican en la parte superior de la estructura piramidal. La información requerida por cada componente ejecutable se organiza en bibliotecas. Las bibliotecas son de suma importancia pues tienen la función de resolver problemas específicos, entre ellos, numéricos, procesamiento de entrada y salida de datos, entre otros. En la biblioteca 1 se encuentran las funciones que realizan el procesamiento de entrada y salida de datos, es decir, lee archivos como datos de entrada a las simulaciones que realice el programa y escribe en archivos los resultados, los cuales pueden ser analizados o utilizados para un post-procesamiento a partir de otras herramientas. En esta biblioteca se realizan funciones de cálculo como por ejemplo resolver sistemas de ecuaciones lineales, así como también presenta módulos para manejar el tiempo (módulo Model), que, entre otras cosas, sirve para coordinar las simulaciones (Barreto *et al.*, 2009).

Por su parte, la biblioteca 2 se basa en los módulos existentes de la biblioteca 1 para realizar cálculos, que a su vez sirven para otros módulos que se encuentran más arriba en la estructura del marco de modelación de MOHID; una de las funciones más importantes de esta biblioteca es la que realizan los módulos que modelan la discretización del dominio en mallas, módulos para modelar interacción del cuerpo de agua con la atmósfera, y módulos que realizan cálculos para las propiedades biogeoquímicas (Barreto *et al.*, 2009).

6.6.3.4.4. Principales módulos de MOHID

En la actualidad MOHID está compuesto por más de 40 módulos. Cada módulo tiene la función de gestionar cierto tipo de información. Los principales módulos se listan en la Tabla 1 (Neves *et al.*, 2006).

Tabla 1. Principales módulos de MOHID

Nombre de Módulo	Descripción
Model	Administra el intercambio de información entre el módulo hidrodinámico y los dos módulos de transporte (Lagrangiano y Euleriano). También administra el flujo de información entre modelos anidados (Padre-Hijo).
Batimétrico	Almacena, procesa y suministra la información batimétrica a los módulos clientes (hidrodinámico, euleriano, lagrangiano, entre otros).
Hidrodinámico	Calcula los niveles de agua, las velocidades y los caudales.
Geométrico	Almacena y actualiza la información de volúmenes finitos.
Euleriano	Coordina y maneja la evolución de las propiedades del agua utilizando un modelo Euleriano de transporte.
Lagrangiano	Utiliza el concepto de trazador, cuyas propiedades fundamentales son la posición espacial (x, y, z) de las partículas utilizadas como trazadores, su volumen y la concentración de determinadas propiedades de interés, como pueden ser cualquiera de

Nombre de Módulo	Descripción
	las evaluadas en el módulo de calidad de aguas (por ejemplo algún contaminante).
Turbulencia	Modela unidimensionalmente la turbulencia.
Propiedades del Agua	Ordena la evolución de las propiedades del agua como: temperatura, salinidad, oxígeno, etc.
Calidad de agua	Simula la producción primaria, secundaria y el ciclo de los nutrientes de ecosistemas.
Surface	Plantea las condiciones de frontera en la superficie de la columna de agua y representa la influencia de forzantes externos atmosféricos, como el viento y el sol en la superficie

Fuente: Neves *et al.* (2006)

Las reseñas generales de los módulos que se presentan a continuación se obtuvieron de documentos, manuales, artículos y publicaciones de los principales investigadores y autores del sistema de modelación MOHID.

6.6.3.4.5. Módulo Model

Se considera el principal módulo de la arquitectura de MOHID Agua; es el encargado de coordinar el flujo de información entre los diferentes modelos y la evolución del tiempo de simulación. Las principales funciones de este módulo son: la coordinación de ejecución de los módulos hidrodinámicos y de transporte (euleriano y lagrangiano) en un solo modelo; la sincronización y la comunicación de modelos anidados. Cuando el escenario analizado incluye modelos anidados, la comunicación entre modelos se realizan en una sola vía y de forma recursiva; es decir, las condiciones iniciales y demás datos que se calculan durante la simulación se envían desde el modelo superior al inferior (padre – hijo). Cabe mencionar que cada modelo puede tener uno o más modelos anidados, quienes a su vez pueden tener otros modelos dependientes. En la Figura 3 se puede apreciar un diagrama con la relación de interdependencia de modelos anidados (Neves *et al.*, 2006).

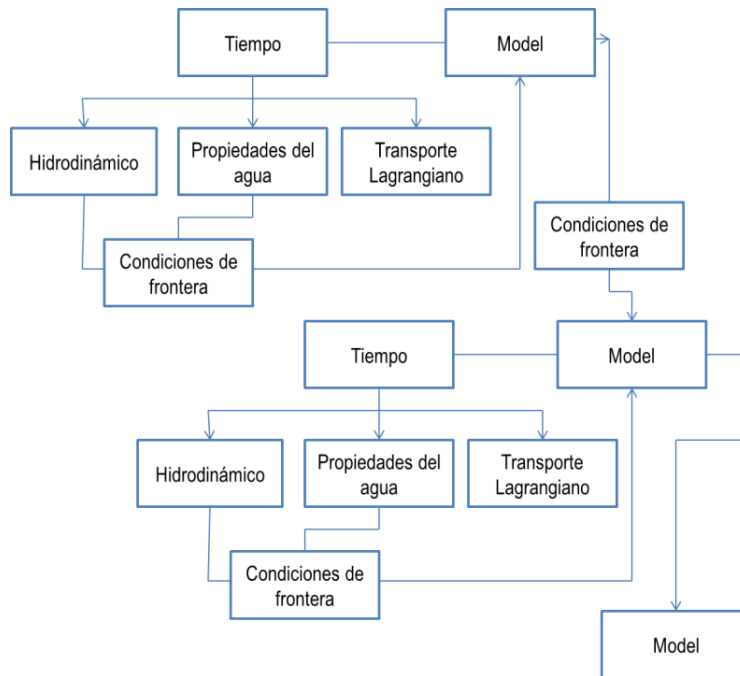


Figura 3. Relación de información entre modelos anidados
Fuente: Neves *et al.* (2006)

6.6.3.4.6. Módulo Batimétrico

En la jerarquía del modelo MOHID el módulo batimétrico presenta el nivel más bajo; su función principal es la de leer la información batimétrica en un archivo de entrada tipo ASCII para luego enviarla a los módulos que la requieran (módulos clientes). Los datos de batimetría pueden ser almacenados en una malla de tipo regular con espaciamiento variable en las direcciones “X” y “Y”; cabe mencionar que se debe especificar la profundidad en todos los puntos sobre esta malla. Existe variedad en cuanto al tipo de coordenadas horizontales a usar, siendo las más utilizadas las coordenadas métricas y geográficas.

La Figura 4 presenta la relación de flujo de información entre el módulo batimétrico y otros módulos (Neves *et al.*, 2006).

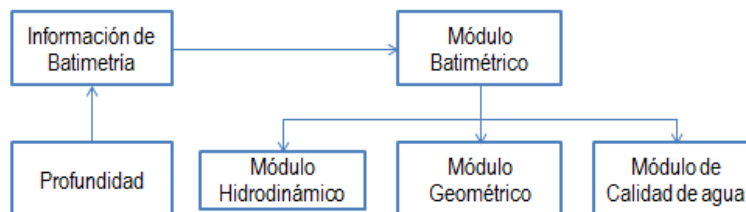


Figura 4. Flujo de información batimétrica a otros módulos
Fuente: Neves *et al.* (2006)

6.6.3.4.7. Módulo Hidrodinámico

El oficio principal del módulo hidrodinámico es calcular los niveles, las velocidades y los caudales, información que, a su vez es brindada a otros módulos que la requieran. En la Figura 5 se puede observar la relación del flujo de información entre dichos módulos.

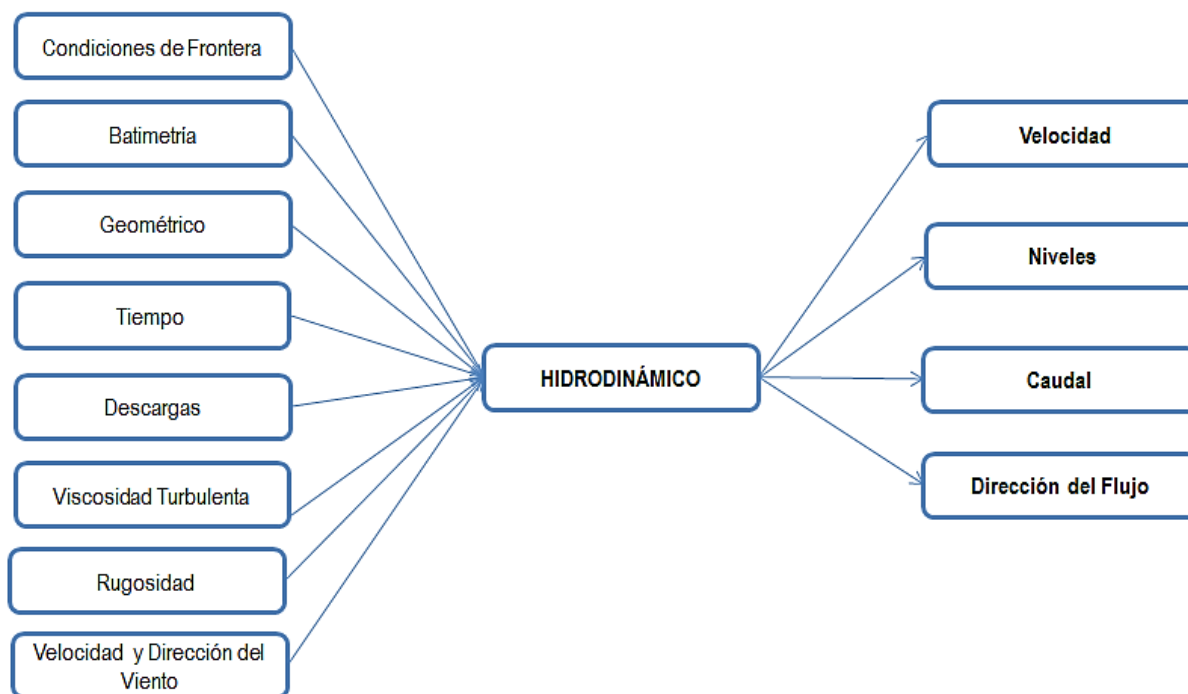


Figura 5. Relación de información del módulo hidrodinámico y otros
Fuente: Neves *et al.* (2006)

Para el cálculo de dichos parámetros, el módulo hidrodinámico utiliza las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes, cuya solución está basada en las aproximaciones de Boussinesq y Reynolds. Las ecuaciones 22, 23 y 24 representan la variación de la velocidad respecto al tiempo en cada dirección. Los primeros tres términos en el lado derecho de cada ecuación hacen referencia al balance de los transportes advectivos, los últimos tres a la difusión turbulenta, y por su parte los términos centrales se refieren a la fuerza de Coriolis y al gradiente de presión (ver Figura 6) (Neves *et al.*, 2006).

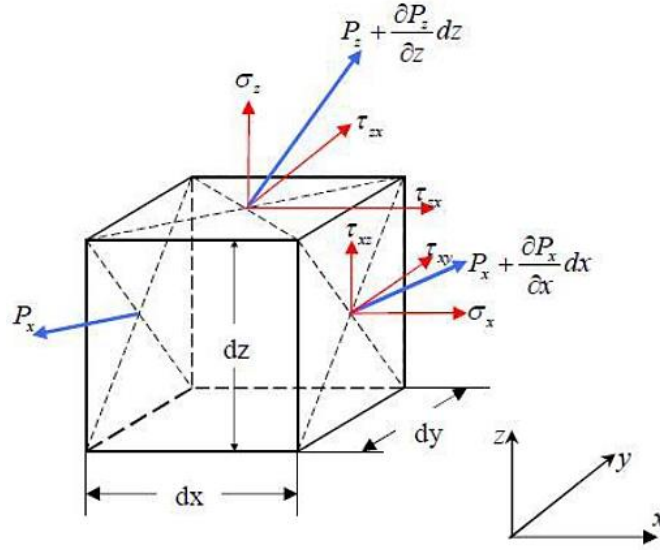


Figura 6. Aplicación de la Segunda Ley de Newton sobre un volumen infinitesimal de control deformable

Fuente: Neves *et al.* (2006)

Las ecuaciones del balance de momentum para las velocidades promedio del flujo horizontal, en su forma cartesiana son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -\frac{\partial(uu)}{\partial x} - \frac{\partial(uv)}{\partial y} - \frac{\partial(uw)}{\partial z} + fu - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \left((v_H + v) \frac{\partial u}{\partial x} \right)}{\partial x} \\ & + \frac{\partial \left((v_H + v) \frac{\partial u}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left((v_t + v) \frac{\partial u}{\partial z} \right)}{\partial z} \end{aligned}$$

Ecuación 22

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} = & -\frac{\partial(vu)}{\partial x} - \frac{\partial(vv)}{\partial y} - \frac{\partial(vw)}{\partial z} + fv - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \left((v_H + v) \frac{\partial v}{\partial x} \right)}{\partial x} \\ & + \frac{\partial \left((v_H + v) \frac{\partial v}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left((v_t + v) \frac{\partial v}{\partial z} \right)}{\partial z} \end{aligned}$$

Ecuación 23

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} = & -\frac{\partial(wu)}{\partial x} - \frac{\partial(wv)}{\partial y} - \frac{\partial(ww)}{\partial z} + fw - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial w} + \frac{\partial \left((v_H + v) \frac{\partial w}{\partial x} \right)}{\partial x} \\ & + \frac{\partial \left((v_H + v) \frac{\partial w}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left((v_t + v) \frac{\partial w}{\partial z} \right)}{\partial z} \end{aligned}$$

Ecuación 24

Donde 'u', 'v' y 'w' son las componentes del vector velocidad en las direcciones 'x', 'y' y 'z', respectivamente, 'f' es el parámetro de Coriolis, 'v_H' y 'v_t' es la viscosidad turbulentas en las direcciones vertical y horizontal, 'v' es la viscosidad cinemática (1,3 x10⁻⁶ m²/s), y 'p' es la presión.

La velocidad vertical se calcula a partir de la Ecuación 25 (ecuación de continuidad) (Neves *et al.*,2006).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{Ecuación 25}$$

Ahora integrando entre el fondo (-h) y la profundidad (z) por medio de la Ecuación 26 se calcula w:

$$W(Z) = \left\{ \partial_x \left[\int_{-h}^z u \, dx \right] + \partial_y \left[\int_{-h}^z v \, dx \right] \right\} \quad \text{Ecuación 26}$$

El nivel de la superficie libre del agua se obtiene integrando la ecuación de continuidad en la columna de agua (entre la elevación de la superficie libre $n(x, y)$ y el fondo (-h)), se tiene la Ecuación 27 (Neves *et al.*,2006).

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \left\{ \partial_x \left[\int_{-h}^z u \, dz \right] - \partial_y \left[\int_{-h}^z v \, dz \right] \right\} \quad \text{Ecuación 27}$$

Se asume la aproximación hidrostática con la Ecuación 28.

$$\frac{\partial p}{\partial z} + g\rho = 0 \quad \text{Ecuación 28}$$

donde:

‘g’: gravedad

‘ρ’: densidad del agua.

Luego, si la presión atmosférica ‘ P_{ATM} ’ es sustraída de ‘ ρ ’, la densidad es dividida por una constante de referencia ‘ ρ_0 ’ y una desviación de p' de aquella constante de referencia, y luego de integrar de la superficie libre a la profundidad ‘z’, donde la presión es calculada, llegamos a la Ecuación 29 (Neves *et al.*,2006):

$$P(Z) = P_{ATM} + g\rho_0(n - z) + g \int_{-h}^z n p' \, dz \quad \text{Ecuación 29}$$

La ecuación que relaciona la presión a cualquier profundidad con la presión atmosférica al nivel de la superficie, el nivel del mar y la presión anormal generada entre el nivel del mar y el de la superficie libre del agua. Utilizando esta expresión y la aproximación de Boussinesq, el gradiente horizontal de presión en la dirección ‘xj’ puede ser dividida en tres parámetros, como se observa en la Ecuación 30 (Neves *et al.*,2006).

$$\partial_{xj}p = \partial_{xj}P_{ATM} - g\rho_0 * \partial_{xj}\partial n - g \int_{-h} n \partial_{xj}\rho' dz \quad \text{Ecuación 30}$$

De esta última ecuación se tiene que el gradiente total de presión es la suma de los gradientes atmosférico, de elevación de la superficie (gradiente de presión barotrópico) y el gradiente de distribución de la densidad (gradiente de presión baroclínico). Por último, para su operación el modelo MOHID obtiene la densidad de parámetros como la salinidad y la temperatura, además, sustituye la descomposición del gradiente de presión (Ecuación 30) en las ecuaciones de la evolución temporal de la velocidad (Neves *et al.*, 2006).

6.6.3.4.8. Módulo Geométrico

La función principal del módulo geométrico es almacenar y actualizar la información sobre los volúmenes finitos, calculando las áreas laterales y los volúmenes de discretización según la demanda; para llevar a cabo dicho procedimiento el módulo se basa en el nivel de agua brindado por el módulo hidrodinámico y la información de batimetría ingresada. Los valores estimados en el módulo geométrico sirven a su vez de información de entrada para los cálculos subsiguientes de los módulos Lagrangiano, Calidad de Agua, Turbulencia e Hidrodinámico. En la Figura 7 se esquematiza el flujo de información del presente módulo y su relación con otros (Neves *et al.*, 2006).

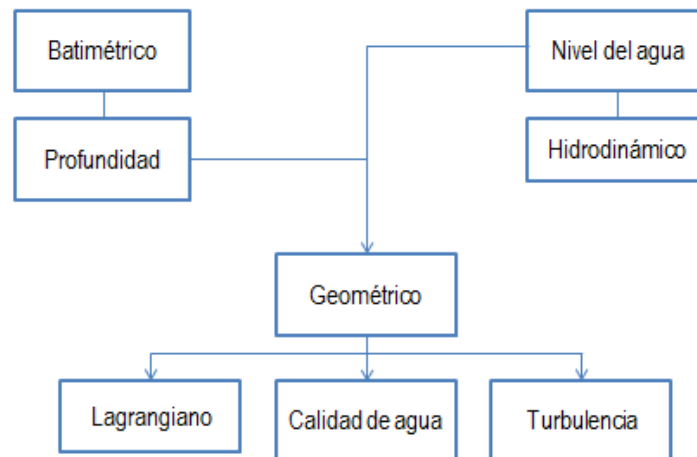


Figura 7. Información de entrada y salida del Módulo Geométrico
Fuente: Neves *et al.* (2006)

El paradigma de volúmenes finitos utilizado por MOHID permite que la solución de las ecuaciones de conservación sea independiente de la geometría de cada celda o volumen de control, debido a que únicamente se requiere el flujo a través de las caras de la celda; de este modo se logra una separación total entre las variables físicas y la geometría. Debido a que el volumen de cada celda es

un parámetro que puede variar a lo largo de la simulación, la geometría es calculada y actualizada en cada paso de la simulación una vez se han calculado las variables físicas (Neves *et al.*,2006).

6.6.3.4.9. Módulo superficie (Modulo de Interacción Agua-Aire)

Este módulo plantea las condiciones de frontera en la superficie de la columna de agua y representa la influencia de externos atmosféricos como el viento y el sol en la superficie del agua. Hay dos tipos de condiciones: una dada por el usuario, usualmente datos meteorológicos (velocidad del viento, temperatura del aire, nubosidad, punto de rocío, etc.); y, otras condiciones de borde calculadas automáticamente por el modelo a partir de las condiciones o datos meteorológicos, tales como el estrés del viento, la radiación solar, el calor latente, el calor sensible, la radiación infrarroja, entre otros. En la Figura 8 se puede apreciar el flujo de información del presente módulo (Neves *et al.*,2006).

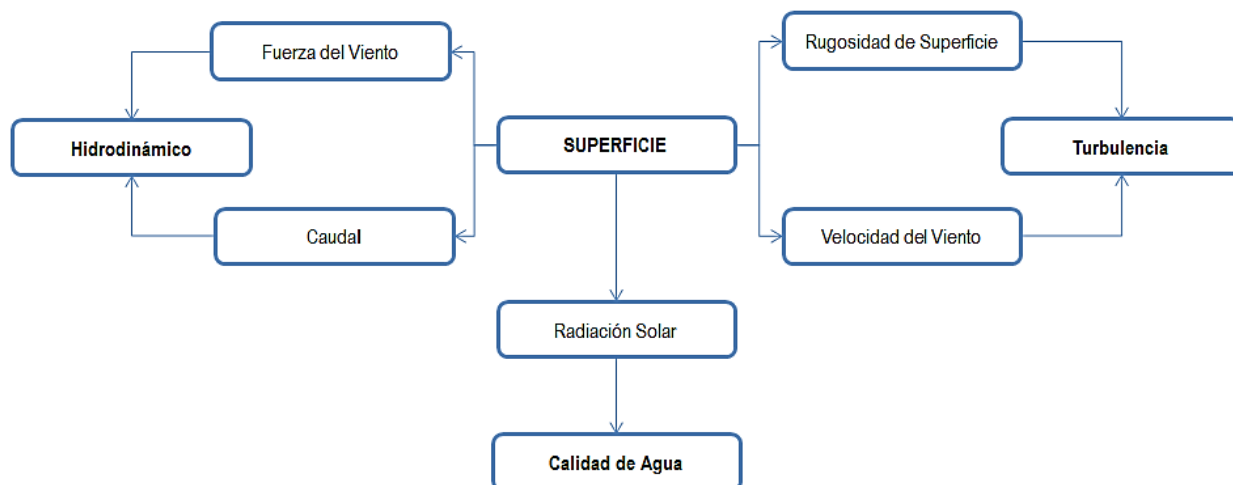


Figura 8. Flujo de información del módulo superficie
Fuente: Neves *et al.*(2006)

6.6.3.4.10. Módulo Euleriano

El módulo Euleriano o de propiedades del agua coordina la evolución de las propiedades del agua; dicha función es posible gracias al apoyo de otros módulos, como el de Advección – Difusión, el cual determina el transporte por difusión y por advección de las propiedades; ó el módulo de calidad de agua, que se encarga de calcular los procesos biogeoquímicos. Por medio de este módulo MOHID puede simular diferentes propiedades como la temperatura, la salinidad, la densidad, los coliformes, la DBO, el OD, los sedimentos cohesivos, el fitoplancton y los contaminantes, entre otros (Neves *et al.*,2006).

La primera ecuación empleada en el módulo Euleriano es la ecuación de transporte advectivo y flujo difusivo de una propiedad 'N' (Ver ecuación 31).

$$\partial_t N = \partial_x(uN) - \partial_y(vN) - \partial_z(wN) + \partial_x(V_H \partial_x N) + \partial_y(V_H \partial_y N) + \partial_z((V_t + V_N) \partial_z N) \quad \text{Ecuación 31}$$

donde:

'u', 'v' y 'w': componentes de la velocidad en las direcciones 'x', 'y' y 'z'.

V_H : difusión turbulenta horizontal.

V_t : difusión turbulenta vertical.

V_N : difusividad molecular

La evolución de 'N' en el tiempo es el balance del transporte advectivo por el flujo dominante, la turbulencia y la fuente de donde la propiedad proviene (Neves *et al.*, 2006).

La Ecuación 32 del módulo Euleriano hace referencia a la ecuación simplificada de densidad, cabe mencionar que dicha igualdad es una aproximación para aguas poco profundas (Neves *et al.*, 2006):

$$\rho = \left(\frac{5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S}{1779.5 + 11.25T - 0.074T^2 - (3.8 + 0.01T)S + 0.698(5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S)} \right) \quad \text{Ecuación 25}$$

donde:

T: Temperatura

S: Salinidad

6.6.4. Calibración del Modelo

Es el proceso de ajuste de los elementos geométricos simplificados (batimetría, contornos de estructuras, etc.) y de los valores de los parámetros empíricos (hidráulicos, de sedimentos, de transporte, de calidad del agua, etc.) que aparecen en las diferentes ecuaciones (hidrodinámicas, de los sedimentos, etc.), de tal manera que los eventos simulados en el modelo reproduzcan de la manera más precisa los eventos de la naturaleza (Ramírez, 2016).

Es una de las fases con mayor relevancia en el proceso de implementación del modelo. El objetivo de la calibración es representar los procesos hidrodinámicos (niveles, velocidades, caudales, profundidades) en el sistema para una condición real, disponiendo de datos e información de campo a través del ajuste o modificación de los parámetros físicos dentro de rangos físicamente válidos como: rugosidad, viscosidad de remolino o turbulenta, etc. El ajuste o modificación de un parámetro debe hacerse con base en la física de los datos y en el conocimiento de los procesos en el sistema o área en estudio. Algunos parámetros susceptibles de ajuste pueden ser las condiciones de frontera (especialmente en un modelo Bidimensional de Costas, Estuarios, etc.), la batimetría, la rugosidad

del fondo, la viscosidad turbulenta (modelos bidimensionales), la fricción debida al viento, etc (Ramírez, 2016).

6.6.5. Validación del Modelo

Es el proceso de demostración de que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico, para períodos determinados y condiciones diferentes a las existentes en el periodo de calibración. De esta manera se dice que un modelo ha sido validado si su precisión y capacidad predictiva en el período de validación muestran errores o límites aceptables. Como se menciona, la validación de un modelo se hace para un lugar determinado pues es imposible, realizar una validación generalizada (así como es imposible realizar una calibración generalizada). Usualmente, la validez de un modelo para un período diferente al de calibración se asume como verdadera considerando condiciones futuras similares a las actuales (Refsgaard y Knudsen, 1996).

7. METODOLOGÍA

En la Figura 9 se presentan los principales componentes metodológicos desarrollados en el presente estudio.

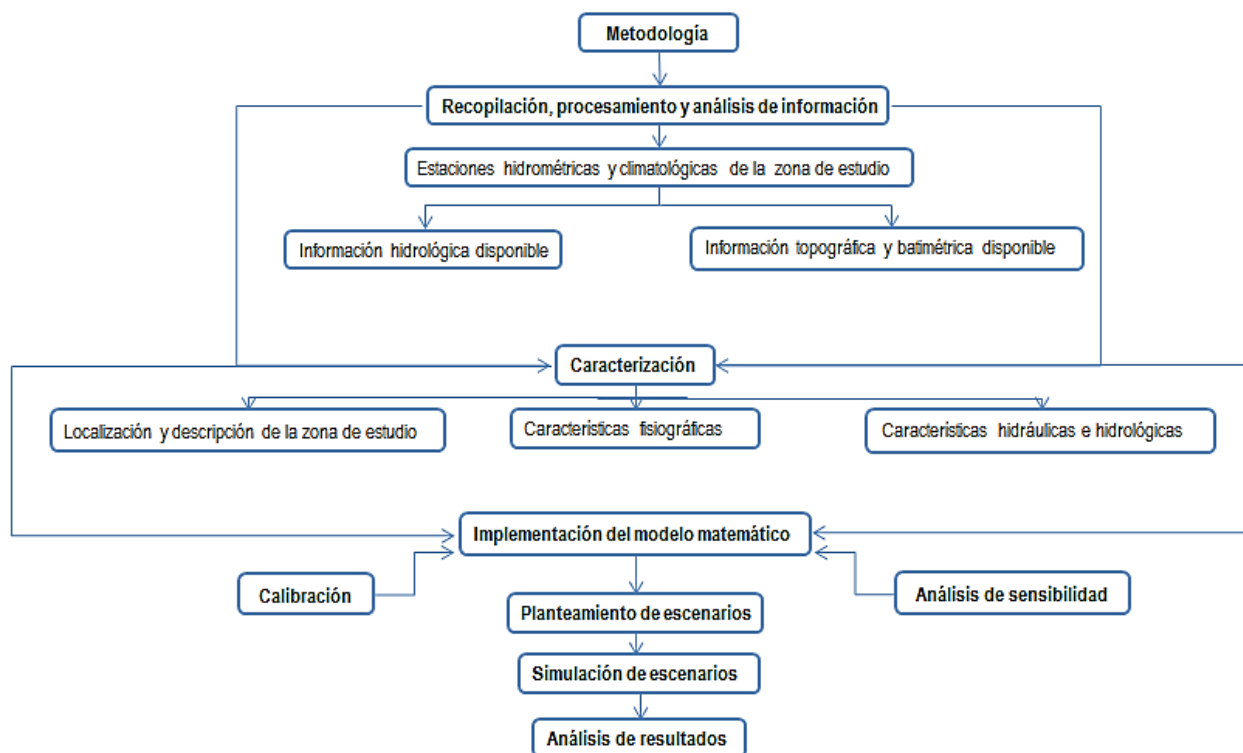


Figura 9. Esquema de los principales componentes metodológicos en el presente estudio

7.1. Recopilación, procesamiento y análisis de Información

7.1.1. Estaciones hidrométricas y climatológicas de la zona de estudio

A partir del catálogo de estaciones de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC se encontró que la red de medición en la zona de influencia de la laguna de Sonso está compuesta por tres estaciones hidrométricas que son río Cauca-Mediacaño, Laguna de Sonso y Caño Nuevo, y una climatológica Garzonero. Este sistema de estaciones se eligió de acuerdo con el área de incidencia, la proporción y la condición de los datos recopilados. La Figura 10 presenta la ubicación de las diferentes estaciones en la zona de interés del estudio.

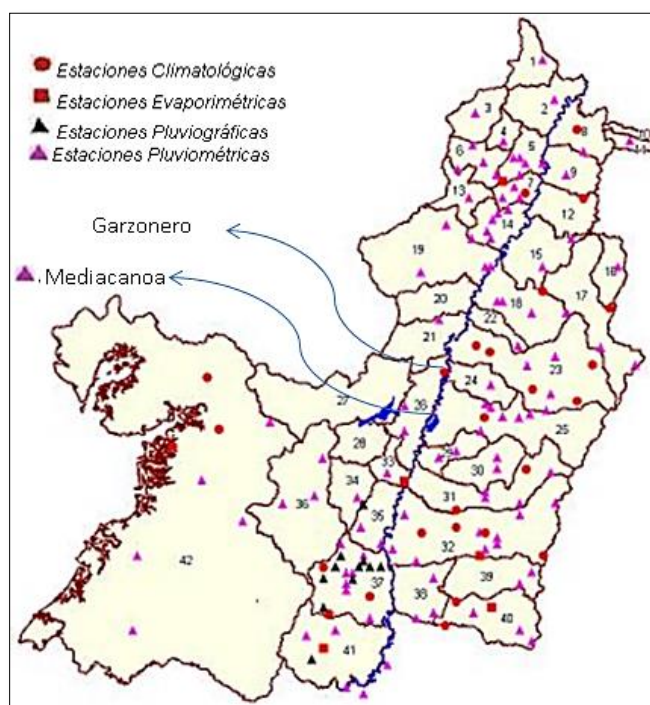


Figura 10. Red de medición de la zona de influencia de la laguna de Sonso

Fuente: CVC (2016)

7.1.2. Información Hidrológica Disponible

Se realizó una revisión bibliográfica de los principales estudios que relacionan las variables hidráulicas e hidrológicas de la zona de estudio con el fin de establecer las principales condiciones actuales del sistema hídrico a modelar.

La información hidrológica disponible es registrada por la CVC en su gran mayoría, los registros que se tienen son de las estaciones río Cauca -Mediacaño, Laguna de Sonso y Caño Nuevo en cuanto a niveles y caudales como se observa en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2. Periodos de registro de niveles de agua en las estaciones río Cauca-Mediacanoa, Laguna de Sonso y Caño Nuevo

Estación	Niveles Diarios	Niveles Mínimos Mensuales	Niveles Medios Mensuales	Niveles Máximos Mensuales
Río Cauca-Mediacanoa	Enero 2000-Diciembre 2014	Enero 1990-Septiembre 2015	Enero 1990-Septiembre 2015	Enero 1990-Septiembre 2015
Laguna de Sonso	Enero 2000-Marzo 2010	Enero 1990-Marzo 2010	Enero 1990-Marzo 2010	Enero 1990-Marzo 2010
Caño Nuevo	Enero 2000-may. 2015	Enero 1990-Mayo 2015	Enero 1990-Mayo 2015	Enero 1990 -Mayo 2015

Tabla 3. Periodos de registro de caudales en la estación Río Cauca-Mediacanoa

Estación	Caudales Horarios	Caudales Medios Mensuales	Caudales Máximos Mensuales
Río Cauca - Mediacanoa	Enero 1990- Diciembre 2015	Enero 1990-Septiembre 2015	Ene. 1990-Septiembre. 2015

En la estación climatológica de Garzonero se dispone de datos de temperatura, brillo solar, humedad relativa, precipitación y evaporación para el periodo enero 1990 – diciembre 2014. Los valores de velocidad del viento usados fueron tomados del estudio realizado por CVC-Asoyotoco (2007), los cuales oscilan entre 1 y 5 m/s, en este caso se tomó un valor de velocidad constante de 5 m/s en la dirección norte.

7.1.3. Información Topográfica y Batimétrica Disponible

La información topobatimétrica más actualizada disponible corresponde a: (i) levantamiento batimétrico del río Cauca realizado por la CVC en el año 2012; (ii) levantamiento batimétrico de la laguna de Sonso y Caño Nuevo realizado por HIDROMECÁNICAS en el año 2012; (iii) levantamiento topobatimétrico de la planicie aluvial del río Cauca realizado por la CVC en el año 2012 y, (iiii) levantamiento topográfico del sistema río Cauca – laguna de Sonso efectuado con tecnología LIDAR realizado por CVC en el año 2012.

La Tabla 4 presenta el número de puntos, el área y niveles máximos y mínimos obtenidos a partir de la información topobatimétrica disponible

Tabla 4. Recopilación de información topobatimétrica disponible

Componentes del Sistema	Número Puntos	Área (Ha)	Cotas Terreno (msnm.)		
			CT máximo	CT mínimo	Cero mira
Río Cauca	149502	125.44	935.20	923.72	927.60
Caño Nuevo	4631	2.55	932.52	927.83	928.99
Laguna Sonso	482871	535.46	931.98	929.17	930.92

7.1.4. Procesamiento y análisis de la información disponible

Los datos históricos de caudales y niveles fueron analizados rigurosamente, para descartar información incoherente que afectara una adecuada representación del sistema.

La información de topografía y batimetría de la zona fue digitalizada y unificada en herramientas computacionales como ArcGis y Autocad, para finalmente ser ingresada al modelo.

7.2. Caracterización

Inicialmente se realizó una búsqueda y recopilación de los diferentes estudios realizados sobre la laguna al igual que, los datos hidrológicos, climatológicos, fisiográficos, topográficos y batimétricos disponibles y caracterización y usos de los suelos en la zona de la laguna; la información se obtuvo de diferentes fuentes, especialmente de la CVC (entidad que realiza monitoreos regulares en el río Cauca y la laguna de Sonso) y la Universidad del Valle. A partir de esta información se realizó una caracterización de la zona de estudio que abarcó todos los componentes anteriormente mencionados y que permitió representar las condiciones naturales del sistema.

7.2.1. Localización y Descripción de la Zona de Estudio

Se consultó información de diferentes estudios realizados en el área de influencia para resaltar las principales características físicas de la laguna de Sonso, así como también del río Cauca, principalmente en el tramo paralelo al cuerpo lagunar.

El área de estudio está localizada al norte del departamento del Valle del Cauca, sobre la margen derecha del río Cauca, entre los municipios de Buga, Yotoco y Guacarí (ver Figura 11), correspondiente al sistema Laguna de Sonso esta se encuentra específicamente en jurisdicción del municipio de Buga, corregimiento el Porvenir, vereda Mediacanoa (Tobasura, 2006).

La laguna de Sonso se ubica en la llanura delimitada por los ríos Sonso, al sur, y Guadalajara al norte, en las coordenadas medias cartesianas origen Bogotá, Norte: 919.000 y Este: 1'081.000, con

una altitud promedio sobre el nivel del mar de 930.0 m. El área total de la reserva natural es de 2045 Ha, de las cuales 745 corresponden al espejo lagunar (ver Figura 11) (Tobasura, 2006). La zona presenta una temperatura promedio mensual multianual de 32.4° C, una máxima mensual multianual de 33.9°C y una mínima mensual multianual de 30.75°C de acuerdo con los datos presentados por CVC de la estación climatológica El Garzonero.



Figura 11. Ubicación de la Reserva Natural del Humedal Laguna de Sonso, Fuente: CVC (2007)

7.2.2. Características Fisiográficas de la Laguna de Sonso

7.2.2.1. Estratigrafía

Las unidades litoestratigráficas (ver Figura 12) que conforman la zona de estudio se describen a continuación de antiguo a reciente de acuerdo con INGEOMINAS (1985).

7.2.2.1.1. Formación Volcánica (Kv)

La formación volcánica corresponde a las rocas volcánicas básicas que afloran en la cordillera Occidental, al occidente de la falla Cali-Patía, conformadas por lavas basálticas, diabasas e intrusiones de gabro (HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, 2001).

7.2.2.1.2. Depósitos aluviales del río Cauca (Qal)

Corresponden a los depósitos antiguos del río Cauca, acumulados como producto de su evolución y divagación de su cauce, conformando una zona plana. Sobre esta unidad se han depositado los abanicos aluviales y se han desarrollado las formas actuales de los diferentes drenajes que dividen el área. Son depósitos sueltos, conformados por materiales heterogéneos de gravas, arenas, limos y arcillas (HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, 2001).

7.2.2.1.3. Abanicos coluvioaluviales (Qca)

Corresponde a los depósitos de tipo coalescente asociados a flujos torrenciales dejados por los principales afluentes del río Cauca, como el río Guadalajara al llegar a la planicie aluvial del Cauca, debido a una pérdida repentina en la capacidad de arrastre de las corrientes al encontrar una disminución en la pendiente. Estas unidades tienen una forma de abanico, cuya parte distal está conformada por materiales finos y mejor seleccionados que los ubicados hacia el ápice, donde son más gruesos y mal calibrados. Los suelos transportados, formados en este ambiente fluvial, son predominantemente arcillosos y limosos, cuya consistencia va aumentando con la profundidad (HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, 2001).

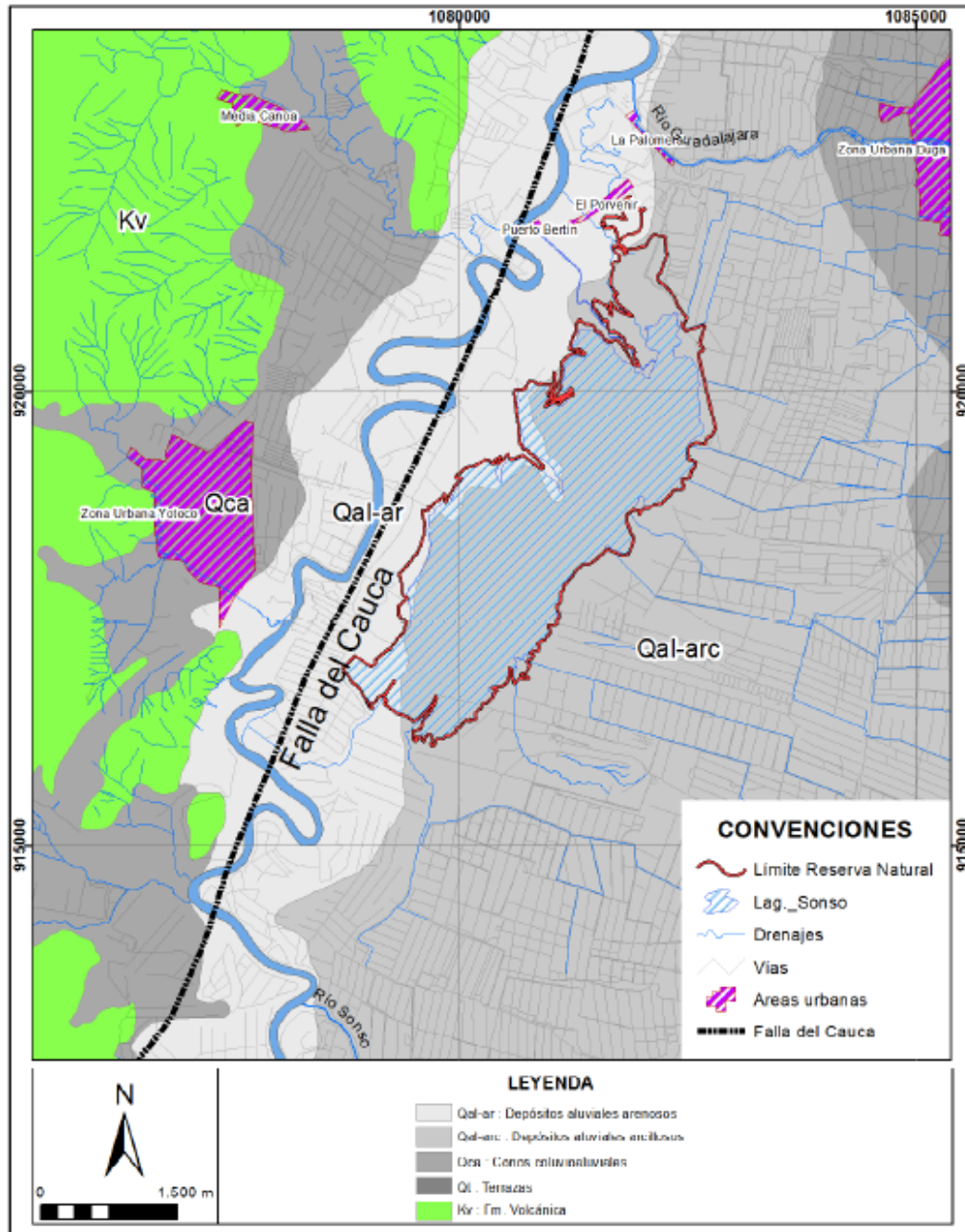


Figura 12. Geología regional del área de estudio
Fuente: Modificado de INGEOMINAS (1985)

7.2.2.2. Geomorfología

El valle del río Cauca se constituye en una gran unidad morfológica regional de planicie aluvial desarrollada por la dinámica del río Cauca durante el período cuaternario, delimitado por las cordilleras Occidental y Central (CVC-FUNDACIÓN SAMARENA, 2010). La configuración morfológica regional del área de estudio muestra tres paisajes: planicie aluvial de desborde, planicie aluvial de piedemonte y montaña, los cuales están relacionados respectivamente con los esfuerzos

tectónicos que levantaron la cordillera Occidental y los procesos denudativos-acumulativos de la zona plana (HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, 2001).

7.2.2.3. Morfogénesis

A escala local del área de estudio se identifican las unidades que se presentan en el mapa geomorfológico (ver Figura 13) las cuales se describen a continuación (HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, 2001).

7.2.2.3.1. Planicie aluvial de desborde

La planicie aluvial de desborde está representada por una zona de terreno plano entre las colinas, los abanicos aluviales o las acumulaciones de pie de vertiente y el cauce del río Cauca. Dentro de este gran paisaje se han identificado las siguientes unidades geomorfológicas (HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, 2001):

7.2.2.3.2. Lecho mayor del río Cauca (Lm)

El río Cauca en este sector no presenta un lecho mayor definido, debido a la construcción de diques de protección sobre esta unidad y la nivelación posterior de los terrenos que lo conformaban. Una angosta franja de terreno entre el talud del lecho menor y los diques, de 20 m a 30 m de ancho en la mayoría de los casos, constituye lo que se podría denominar un lecho mayor; en las curvas internas de algunos meandros esta unidad se hace un poco más amplia. Generalmente esta unidad es ocupada por las aguas del río en períodos de niveles altos. La vegetación natural, que generalmente se desarrolla en este tipo de unidades y que le brinda protección a los taludes del río, ha sido destruida casi en su totalidad. Ocasionalmente se observan viviendas y algunos cultivos localizados dentro de la unidad, lo cual contribuye a la desestabilización de las orillas. Los materiales que conforman esta unidad generalmente son limos, arenas finas y arcillas, poco consolidados (HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, 2001).

7.2.2.3.3. Diques Naturales (Dn)

En el sector sur se encontraron vestigios de diques naturales (albardones) en pequeños tramos sobre la margen del río Cauca que por su escasa elevación y la falta de continuidad no brindan ninguna protección contra las inundaciones y son fácilmente sobrepasados por los niveles altos del río. Sobre este sector del río Cauca generalmente se encuentran localizadas algunas viviendas (HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, 2001).

7.2.2.3.4. Zonas bajas inundables (Zi)

Esta unidad corresponde a áreas de terreno que no han sido adecuadas y se encuentran en su estado natural, localizadas generalmente entre el río Cauca y un dique construido, presentan un relieve plano a plano-cóncavo. Por influencia del río presentan niveles freáticos altos y se encharcan con facilidad, generalmente se encuentran en rastrojo. Los materiales que constituyen estas unidades son principalmente arcillas de color pardo a gris oscuro, con moteados de color ocre, las cuales corresponden a manchas ferruginosas como consecuencia del mal drenaje y las fluctuaciones del nivel freático (HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, 2001).

7.2.2.3.5. Playones y ciénagas (Py)

Esta unidad corresponde a la antigua planicie aluvial de desborde del río Cauca, que era la zona de amortiguación de sus niveles máximos; se extendía a todo lo largo del valle aluvial, estaba constituida por numerosas ciénagas y bajos en los cuales se almacenaba el agua de desborde por algún tiempo y al bajar los niveles del río desaguaban lentamente, quedando sin embargo las zonas más profundas llenas de agua la mayor parte del año, constituyendo de esta forma ciénagas y lagunas de cierta importancia, entre estas la laguna de Sonso (HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, 2001).

Los materiales que conforman estos playones generalmente son limos finos productos de la decantación en aguas tranquilas (HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, 2001).

7.2.2.3.6. Planicie aluvial (Pla)

Esta unidad corresponde a la mayor parte del área plana de la zona de estudio. Actualmente, con los trabajos de adecuación de tierras que se han desarrollado en toda esta zona, incluyendo no sólo canales de drenaje sino trabajos de nivelación de tierras y protección contra inundaciones, la zona ha experimentado un cambio radical, de tal forma que se puede considerar que la mayor parte del área es una unidad bien drenada, los bajos inundables son muy localizados y algunos están en proceso de ser adecuados por los dueños de las fincas (HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, 2001).

El material que constituye esta unidad está representado principalmente por arcillas y limos, localmente se encuentran arenas finas especialmente en aquellos sectores correspondientes a antiguos explayamientos como los localizados en la parte norte frente al municipio de Tuluá y en las zonas cercanas a las colinas. En general predomina en los suelos un alto contenido de materia orgánica (HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, 2001).

7.2.2.3.7. Planicie aluvial de piedemonte

Este paisaje corresponde a las acumulaciones de origen fluvial de pie de vertiente; en general presentan un relieve ligeramente inclinado, con una pendiente mínima (3 a 5 %) hacia la planicie, su parte terminal se confunde con ésta. Se distinguen las siguientes unidades (HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, 2001).

7.2.2.3.7.1. Abanicos Aluviales (Ab)

Los abanicos aluviales o conos de deyección han sido formados por las principales corrientes que descienden de la cordillera, los más grandes corresponden a los formados por el río Guadalajara (HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, 2001).

Estas unidades no presentan procesos erosivos importantes, dadas sus condiciones topográficas de mínima pendiente. Algunos pequeños arroyos se han formado sobre su superficie, por acción de las aguas de escorrentía. Los materiales predominantes en esta unidad son limos y arcillas hacia la parte baja y arenas en los sectores cercanos a la vertiente, las cuales alternan con algunos cascajos y cantos rodados (HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, 2001).

7.2.2.3.7.2. Planicie coluvio-aluvial (Pca)

Son acumulaciones al pie de la vertiente que sirven de contacto entre ésta y la planicie, han sido formadas por el aporte de materiales provenientes de la parte alta, transportados por diferentes fuentes de agua y la escorrentía superficial. Poseen una topografía plana, con muy escasa pendiente (3 a 5 %). Presentan un buen drenaje por las características de los suelos, ya que los materiales que conforman estas acumulaciones tienen un mayor contenido de arenas. Los materiales dominante en esta unidad son arcillas limos y arenas en menor proporción (HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, 2001).

7.2.2.3.7.3. Pie de vertiente de la Cordillera Occidental

El paisaje de pie de la vertiente de la cordillera central se presenta como límite oriental de la zona plana, donde tienen origen los principales ríos de la región como son el Sonso y Guadalajara. Debido a que la mayor parte de los arroyos que bajan de las estribaciones de la cordillera tienen un recorrido relativamente corto, no desarrollan una gran energía, por lo tanto no tiene mucho poder de arrastre de sedimentos hacia la planicie (U.T. HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, 2001).

Los materiales predominantes en la vertiente de la cordillera se encuentran representados por rocas sedimentarias, basalto, andesita, conglomerado, arcillolita y toba, hacia la parte media y baja de la

vertiente; en la parte alta predominan materiales terciarios, principalmente dioritas y cuarzo dioritas, así como areniscas y limolitas del cretácico (HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, 2001).

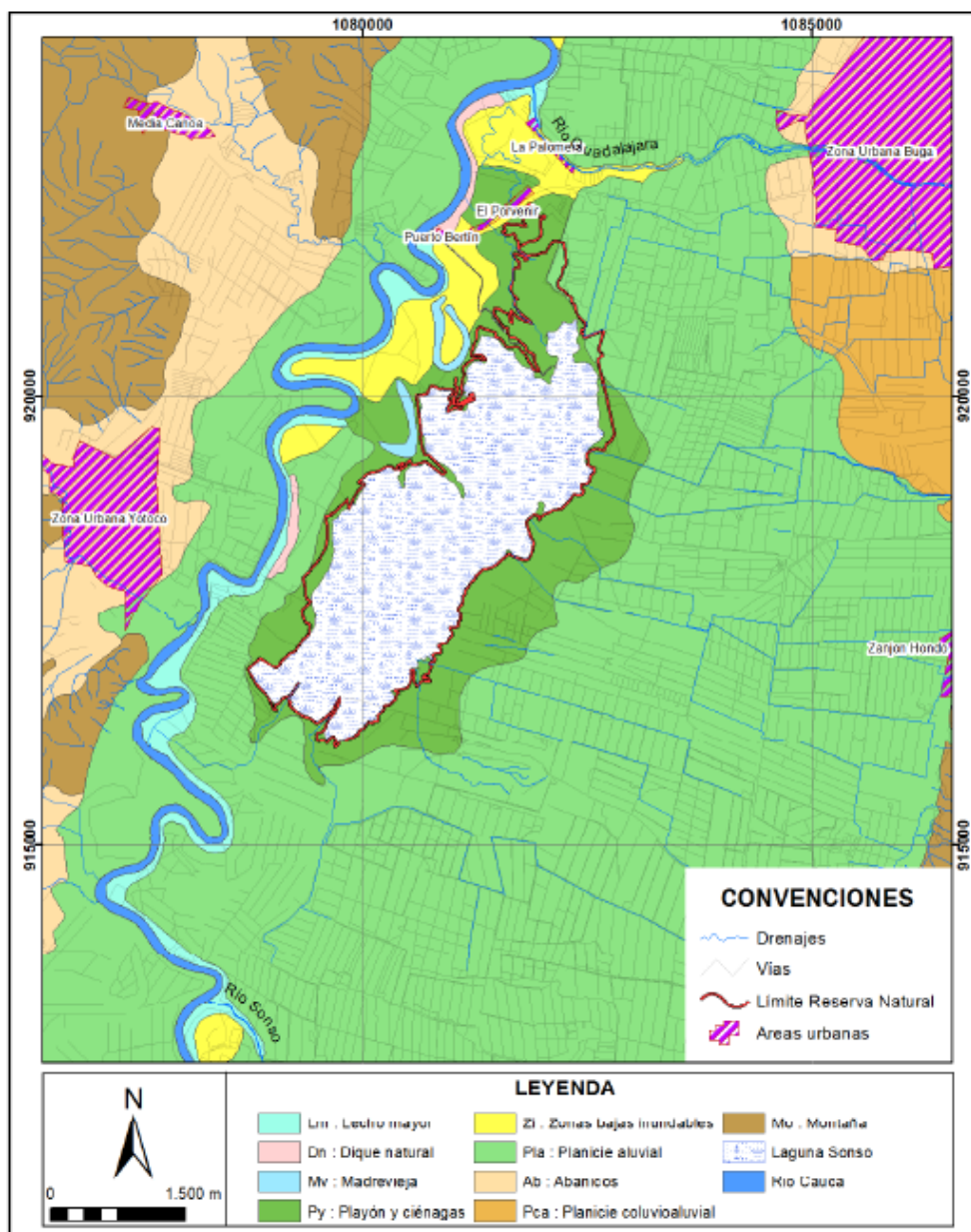


Figura 13. Geomorfología regional del área de estudio
Fuente: HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES (2001)

7.2.3. Características Hidráulicas y Morfológicas del río Cauca en el Sector Mediacanoa

7.2.3.1. Pendiente Hidráulica

En toda la cuenca del río Cauca la información relacionada con la pendiente hidráulica es escasa. Solo se dispone de algunos valores en El Estudio Morfológico del Río Cauca en las estaciones

hidrométricas (desde Salvajina hasta la Virginia entre 1976 y 1980), en el Estudio de Navegabilidad del Río Cauca (desde la Balsa hasta Puerto Isaacs en el año 1986) y en la campaña de seccionamiento del Proyecto PMC (desde Salvajina hasta la Virginia en 1998). El tramo del sector de Mediacanoa presenta una pendiente aproximada de 1.62×10^{-4} m/m y un coeficiente de rugosidad de Chezy 54.53 $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ (CVC-Universidad del Valle, 2001).

7.2.3.2. Geometría Hidráulica

Se presenta la variación de la geometría del fondo del río Cauca en el sector de Mediacanoa a partir de las mediciones realizadas por la CVC en el periodo comprendido entre enero de 1999 y agosto de 2004, donde se evidencia una predominancia del thalweg o parte más profunda en la margen izquierda del río y una tendencia a la sedimentación en la margen derecha. En la Figura 14 se puede observar la variación del fondo de la sección del río Cauca a la altura de la estación de río Cauca-Mediacanoa.

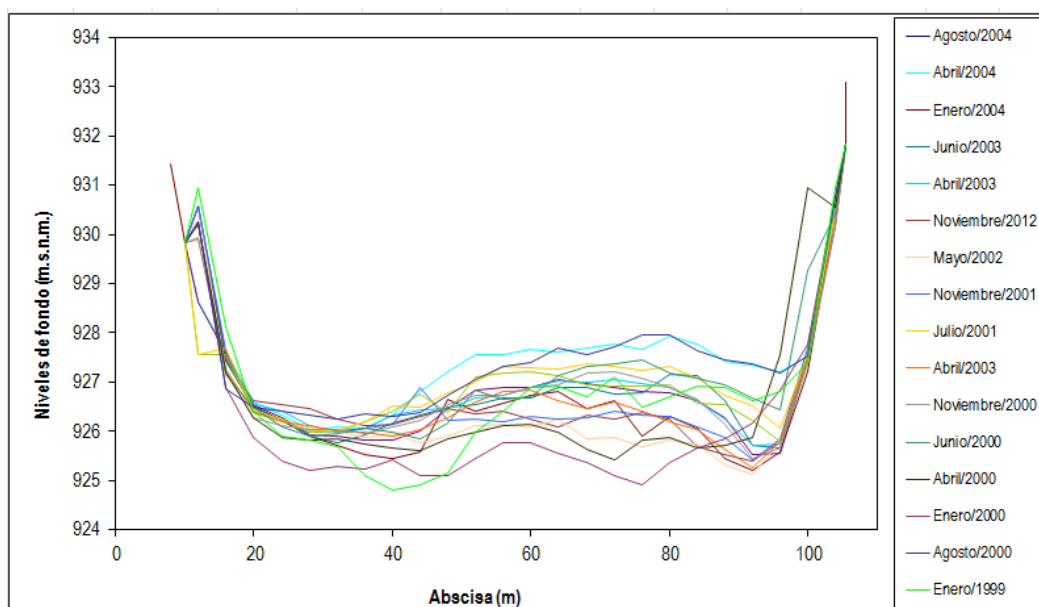


Figura 14. Variación del fondo de la sección del río Cauca a la altura de la estación río Cauca-Mediacanoa para el periodo comprendido enero 1999 y agosto 2004 Fuente: CVC (2013)

7.2.3.3. Movilidad Horizontal

El cauce del río Cauca es de morfología sinuosa o con meandros. Presenta un caudal único y se observan tramos rectos alternados con curvas o meandros de diferentes radios de curvatura. Los meandros presentan una evolución que consiste en un desplazamiento en dirección aguas abajo y una profundización de las orillas, en dirección perpendicular a la anterior. En el tramo de Mediacanoa comprendido entre las abscisas K211+156 y K224+836 se presenta una sinuosidad moderada de 1.69 de acuerdo con los valores de longitud aproximados del eje del río de 13680 m y del valle de 8107 m en la zona de estudio que lo clasifica en Meándrico con curvas alternas unidas

por tramos rectos y curvos., de pendiente baja como se menciona anteriormente, además presenta erosión en las márgenes exteriores de las curvas, al igual que profundas depresiones del fondo en las curvas, altas velocidades en la cercanía de las márgenes cóncavas y los tirantes en las transiciones son menos profundos si se comparan con los que ocurren en las curvas (Vide, 2007)

7.2.3.4. Formas de Fondo

La clasificación general del tipo de formas del fondo para el tramo Mediacanoa corresponde a fondo plano, rizos y predominantemente dunas de acuerdo con Simmons-Richardson, Van Rijn, Van den Berg & Van Gelder (CVC-Universidad del Valle, 2001).

7.2.4. Características Hidráulicas e Hidrológicas

7.2.4.1. Patrón de flujo

La Laguna de Sonso a través del tiempo ha venido presentando una serie de cambios en su morfología, debido a su misma evolución natural y a las diferentes intervenciones antrópicas de las últimas décadas. A continuación se mencionan algunos aspectos importantes de este proceso de variación morfológica con base en los estudios realizados a la fecha.

Este ecosistema lagunar fue evaluado por Molano Campuzano (1954) en su trabajo de Limnología en Colombia. En dicho estudio se menciona la existencia de un sistema de intercambio de flujos entre el río Cauca y la laguna por dos canales, uno de ellos de entrada en sentido río-laguna, ubicado en la parte sur, y, otra conexión en la parte norte, conocida como el caño Carlina, consistente de tres canales naturales que descargaban las aguas de la laguna al río; de esta manera se tenía un flujo en la laguna en sentido sur-norte con la energía suficiente para evacuar parte de los sedimentos en suspensión y de material vegetal flotante.

Posteriormente, en el año 1965 el profesor del departamento de Biología de la Universidad del Valle Aníbal Patiño menciona que el régimen hidrológico de la laguna se modificó significativamente debido a la construcción de terraplenes en la parte sur, pues esto impedía que entraran los flujos desbordados provenientes de los ríos Sonso y Cauca.

Según Carlos Gonzales (1982), el sistema hidráulico de la laguna comprendía entradas de agua a la laguna desde el río Cauca en la zona sur por el sector de Albornoz, en la parte occidental en las curvas del río Cauca debido al efecto de la fuerza centrífuga que hacía sobrepasar la banca, pero, solo con niveles muy próximos a este nivel, y, en la parte norte, antes de la construcción de la carretera Buga- Buenaventura, se presentaban entradas desde el río Cauca por varios canales, principalmente por el caño Carlina, dichos canales comprendían sus respectivos puentes. Luego de la construcción de la carretera Buga-Loboguerrero dichos canales desaparecieron. Debido a esto se

construye en la parte norte el Caño Nuevo, el cual se convirtió finalmente en la única conexión entre el río Cauca y la Laguna; por ello en la actualidad un porcentaje importante de las aguas que deberían desbordarse desde los ríos Sonso y Cauca hacia la laguna permanecen encauzadas en los ríos debido a los diques construidos en las últimas décadas.

7.2.4.2. Velocidad del flujo

Históricamente en la laguna de Sonso no se han realizado mediciones de velocidad del flujo; los aportes aquí expuestos son los resultados de estudios basados en la simulación numérica.

Martínez y Posso (2004) en su investigación “Balance Hídrico del Humedal Laguna de Sonso y Caracterización de sus Procesos Hidrodinámicos a través de la Simulación Numérica” sustentan que aunque no existe información sobre las intensidades de las corrientes en la laguna, las velocidades máximas (promedio en la vertical o profundidad) son bajas, pues las secciones transversales de la laguna son de gran tamaño; sin embargo, un valor alto que podría presentarse en ella es del orden de 0.5 m/s y por otra parte se han realizado aforos en el canal Caño Nuevo, donde las velocidades más altas son del orden de 1 m/s.

En el estudio “Modelación hidrodinámica bidimensional del sistema río Cauca- Laguna de Sonso y estudio de una alternativa para mejorar la hidrodinámica de la laguna”, realizado por el Ingeniero Joel Armando Vallejo (2008), se utilizó el modelo bidimensional MIKE 21 de diferencias finitas para describir el comportamiento de dicho sistema. En este estudio se simularon tres escenarios: el primero corresponde a un periodo de lluvias comprendido entre el 13 y el 23 de enero de 1999, obteniendo velocidades máximas de 1 m/s en la parte sur de la laguna, disminuyendo a 0,5 m/s en la zona central y aumentando nuevamente en la parte norte, donde la laguna descarga sus aguas nuevamente al río Cauca.

El segundo escenario corresponde a un periodo de sequía comprendido entre el 27 de julio y el 11 de agosto de 1999, obteniendo velocidades nulas en la zona sur de la laguna, y que aumentan levemente a medida que los flujos se acercan al Caño Nuevo en la parte norte de la laguna (velocidad máxima calculada 0,06 m/s).

En el tercer escenario se consideró la conexión entre el río Cauca y la Laguna en el sector sur por medio de una canal de sección rectangular de 10 metros de ancho, una pendiente del 1 % y profundidad media de 0.80 m. Los cambios en las características hidrodinámicas considerando esta conexión se resumen así: en la zona sur y en gran parte de la laguna las velocidades dejan de ser nulas, alcanzando valores máximos de 0.15 m/s, lo que permite un aumento en los niveles en la parte sur y, por ende, siempre una circulación de las corrientes en sentido sur-norte.

Rodríguez y Jojoa (2011) en el “Estudio y evaluación de alternativas para la restauración de la hidrodinámica de la laguna de Sonso” implementaron el modelo matemático bidimensional CCHE2D

para estudiar el comportamiento hidrodinámico de la laguna y su interacción con el río Cauca. Plantearon seis alternativas de conexión río – laguna diferentes, consistentes en la construcción de un canal en el sector sur de la laguna y la ampliación del actual canal Caño Nuevo. En la Tabla 5 se muestran las características consideradas en las diferentes alternativas planteadas.

Tabla 5. Características de las alternativas de conexión río Cauca-laguna de Sonso propuestas por Rodríguez & Jojoa (2011)

Alternativa	Ancho del canal proyectado en la parte sur (m)	Ancho promedio del canal Caño Nuevo(m)
1	16	14 (Condición actual)
2	20	
3	24	
4	16	21
5	20	
6	24	

Fuente: Rodríguez & Jojoa (2011)

En la Tabla 6 se resumen los resultados obtenidos por Rodríguez & Jojoa (2011) en las simulaciones de las velocidades de las corrientes para las alternativas propuestas. Se observó un incremento en la velocidad del flujo en las zonas centro y sur de la laguna, una vez establecida la conexión, para todas las alternativas evaluadas.

Tabla 6. Velocidades del agua en la laguna de Sonso obtenidas en el estudio de simulación de Rodríguez & Jojoa (2011)

Alternativas	Velocidad del Agua (m/s)				
	Canal de entrada al sur de la laguna	Laguna			Caño Nuevo
		Zona Sur	Zona Centro	Zona Norte	
Sin conexión	-----	0.00	0.00	0.17	0.46
1	0.95	0.02	0.01	0.15	0.51
2	0.93	0.01	0.00	0.16	0.50
3	0.89	0.01	0.01	0.16	0.50
4	0.97	0.02	0.01	0.25	0.75
5	0.97	0.01	0.01	0.25	0.81
6	0.92	0.01	0.02	0.21	0.85

Fuente: Rodríguez & Jojoa (2011)

También se apreció para las tres alternativas iniciales una similitud en el comportamiento hidrodinámico de los flujos en el Caño Nuevo y velocidades ligeramente superiores a la condición natural del sistema, lo que representa un patrón de flujo positivo proveniente de la laguna. Para

estas condiciones se seleccionó la hidrógrafa del periodo comprendido entre el 24 de julio y el 01 de agosto del año 2000, que corresponde esencialmente a una época de caudales medios.

7.2.4.3. Dinámica de recarga y descarga del acuífero adyacente a la laguna de Sonso

En la Figura 15 se muestran las líneas isopiezométricas correspondientes al periodo junio 2009 a marzo de 2010 según los estudios realizados por CVC y la Fundación Samarena (2010); en esta se puede observar el sentido del flujo desde el acuífero hacia la laguna. En general, se pueden resaltar dos comportamientos: el primero corresponde al aporte que hace el acuífero por la zona sur de la laguna hacia el río Cauca y que permite el flujo a través de las haciendas El Guabito, La María y La Rochela; es de gran importancia este comportamiento debido a que permite demostrar que hay más de un aporte de agua del acuífero hacia el río Cauca y que se pueden presentar zonas donde el flujo tiende a descargar perpendicularmente a lo largo de su cauce en el sector de confluencia con la laguna de Sonso (CVC-FUNDACIÓN SAMARENA, 2010).

El segundo comportamiento a resaltar tiene que ver con la recarga de la zona oriental de la laguna proveniente de la cordillera central; esta zona incluye las haciendas del oriente y del nororiente de la cuenca de drenaje, como son: Los Samanes, Guayabito, La Gloria, Guaymaral, San Isidro y La Miel. Las líneas piezométricas en la zona Norte muestran una tendencia de drenaje que apunta hacia el sur y que en principio estaría en discordancia con el sentido de flujo del acuífero regional. No obstante, se debe tener en cuenta que estas isopiezas corresponden a la zona superficial del acuífero (primeros 10 m) y que están relacionadas más directamente con los flujos locales. Este resultado corrobora el obtenido a través de los isotopos estables, donde se observa una relación directa entre las aguas del río Guadalajara y el acuífero de la zona norte del humedal (CVC-FUNDACIÓN SAMARENA, 2010).

De igual forma, las líneas isopiezas ratifican el sentido de flujo que inicialmente quedó planteado por los resultados del estudio de hidroquímica, en donde el gradiente de concentraciones iónicas describe la misma dirección de flujo que se muestra en las líneas isopiezas (CVC-FUNDACIÓN SAMARENA, 2010).

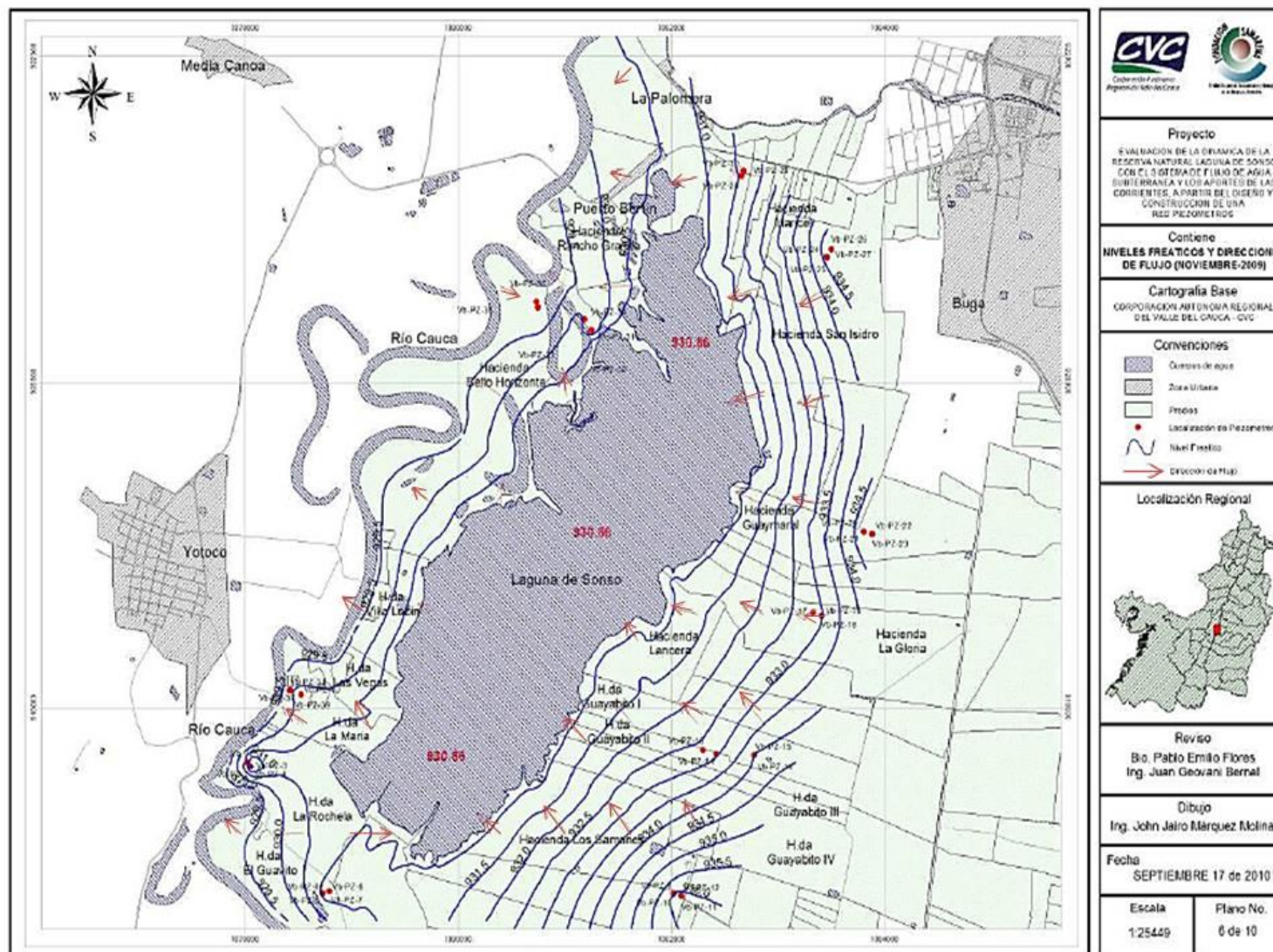


Figura 15. Niveles freáticos y direcciones de flujo para el mes de noviembre de 2009
Fuente: CVC-FUNDACIÓN SAMARENA (2001)

7.2.4.4. Análisis Hidrológico

En el año 1985 entró en operación el embalse multipropósito de Salvajina, construido para generar energía eléctrica y regular caudales máximos durante las crecientes en el río Cauca para el control de inundaciones y caudales mínimos durante los periodos de verano para el control de la contaminación en el río Cauca. Con la regulación de las crecientes, ahora el río presenta un caudal más estable, lo cual se traduce en un menor ataque de las corrientes sobre los taludes del cauce, es decir que el agente erosivo ha disminuido su acción y, por lo tanto, los cambios en la morfología del cauce se han reducido en igual proporción desde 1986 hasta el presente, como se evidencia en las fotografías aéreas identificadas (U.T. HIDROMECAÑICAS-INESCO-PLANES, 2001). Sin embargo, al regular los caudales máximos del río Cauca se reduce la frecuencia de desbordamiento del Cauca, lo cual implica una disminución de los aportes de caudal del río a la laguna.

Entre los ríos Sonso y Guadalajara se localiza la Laguna de Sonso, cuya reserva ocupa una extensión de 745 ha y se constituye en el mayor vaso regulador de la región, el cual recibe el aporte de las aguas de escorrentía provenientes de la cordillera central y de los canales de irrigación de la planicie en este sector. El río Cauca en la época de caudales altos le aporta agua a la laguna a través de un canal denominado Caño Nuevo.

Hace algunas décadas, cuando no se había construido el dique de protección sobre la margen derecha del río Cauca, durante las épocas de lluvias el río se desbordaba e inundaba la laguna con relativa frecuencia. En la actualidad, debido a la existencia del dique marginal, solamente cuando el río Cauca presenta niveles de agua excepcionalmente altos el río se desborda e inunda la laguna por algunos sectores

En la Figura 16 se presenta la curva de duración de caudales horarios en la estación río Cauca-Mediacanoa ubicada unos 200 m aguas abajo de la confluencia del Caño Nuevo al río Cauca. De la curva de duración de caudales se obtienen caudales de 424.6 m³/s, 271.5 m³/s y 176.0 m³/s que pueden ser igualados o excedidos el 25 %, el 50 % y el 75 % del tiempo, respectivamente.

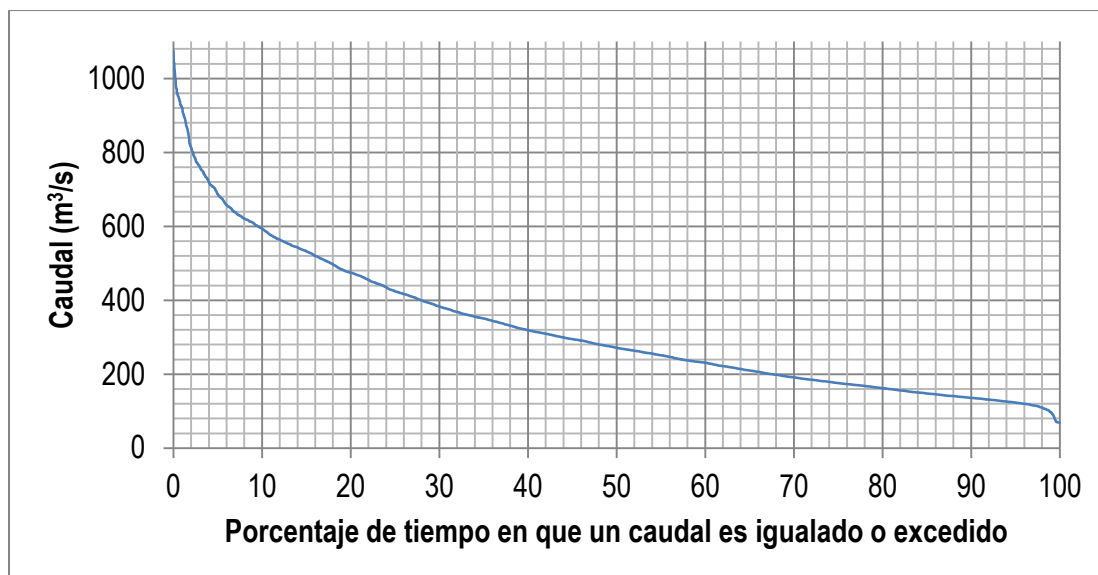


Figura 16. Curva de duración de caudales horarios en el río Cauca, estación río Cauca- Mediacanoa
Periodo: 01-01- 2000 a 30-11-2015

Igualmente se elaboró la curva de duración de niveles de agua en el río Cauca en la estación Mediacanoa (ver Figura 17). De la curva de duración de niveles se obtienen niveles de 931.70 msnm, 930.60 msnm y 929.78 msnm que pueden ser igualados o excedidos el 25 %, el 50 % y el 75 % del tiempo, respectivamente. Para este análisis se tuvo en cuenta el cero de mira de la estación hidrométrica Mediacanoa en el río Cauca con la cota IGAC 927.60 msnm.

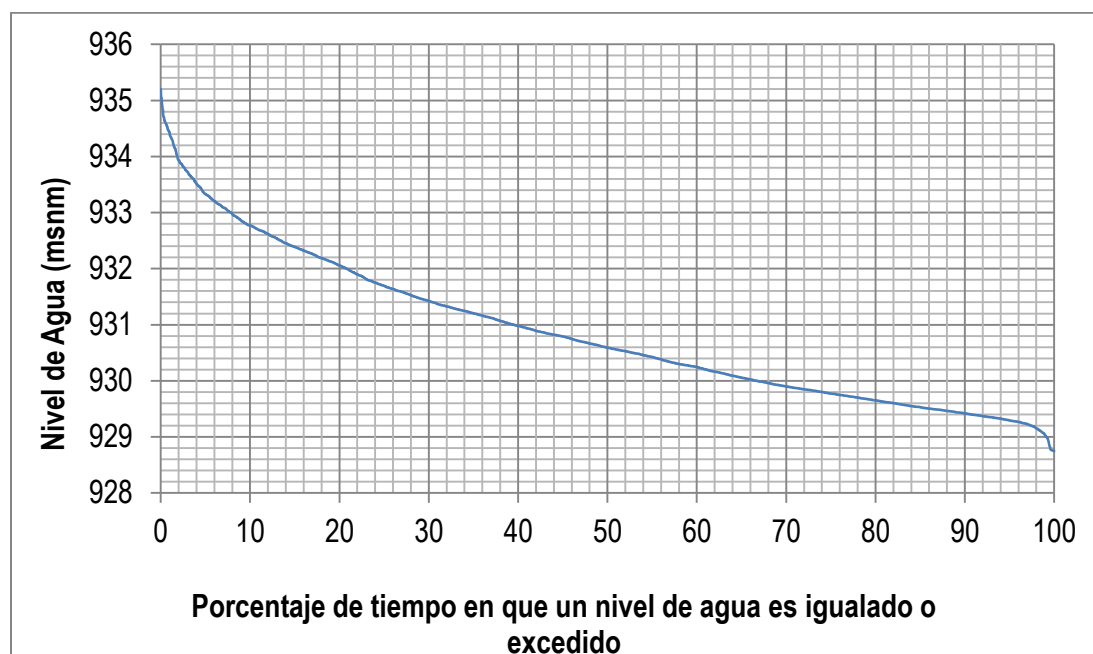


Figura 17. Curva de duración de niveles horarios en el río Cauca, estación río Cauca- Mediacanoa
Periodo: 01-01- 2000 a 30-11-2015

En la Figura 18 se presenta la curva de duración de niveles de agua horarios en la laguna de Sonso. De la curva de duración de niveles se obtienen niveles de 932.18 msnm, 931.71 msnm y 931.52 msnm que pueden ser igualados o excedidos el 25 %, el 50 % y el 75 % del tiempo, respectivamente. Para este análisis se tuvo en cuenta el cero de mira de la estación hidrométrica Laguna de Sonso ubicada en el occidente de la misma, ubicado en la cota IGAC 930.922 msnm.

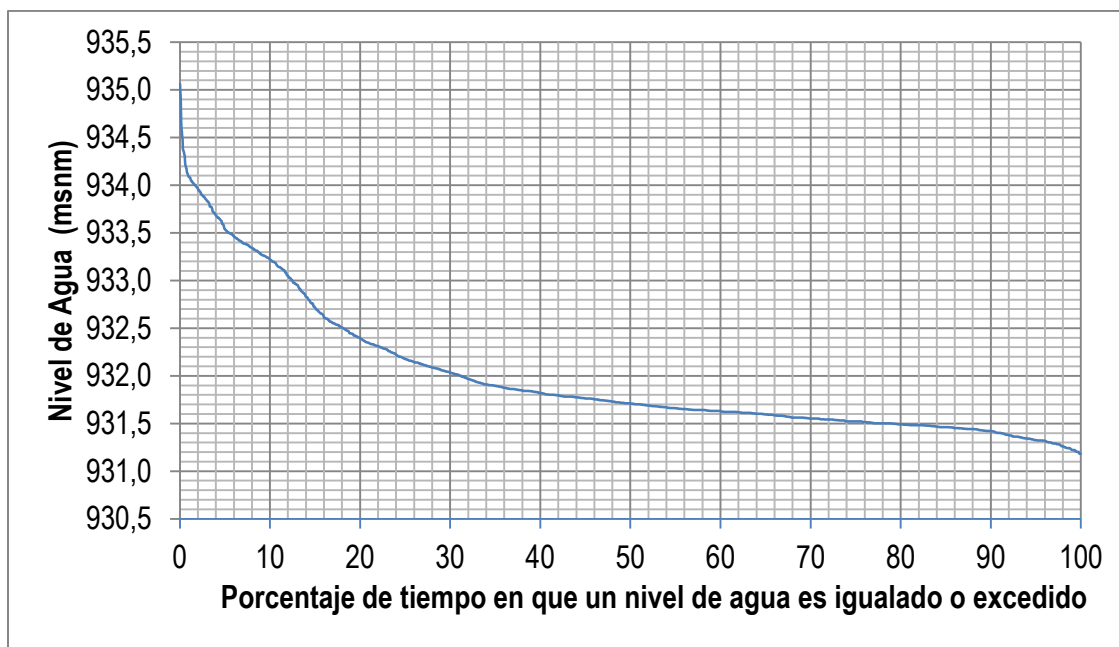


Figura 18. Curva de duración de niveles horarios en la estación Laguna de Sonso
Período: 01-01- 2000 a 31-03-2010

En la Figura 19 se presenta la curva de duración de niveles de agua diarios en la estación Caño Carlina o Caño Nuevo, ubicada aproximadamente 200 m aguas arriba de su confluencia con el río Cauca. De la curva de duración de niveles se obtienen niveles de 932.02 msnm, 931.0 msnm y 930.19 msnm que pueden ser igualados o excedidos el 25 %, el 50 % y el 75 % del tiempo, respectivamente. Para este análisis se tuvo en cuenta el cero de mira de la estación hidrométrica Caño Carlina con la cota IGAC 928.99 msnm.

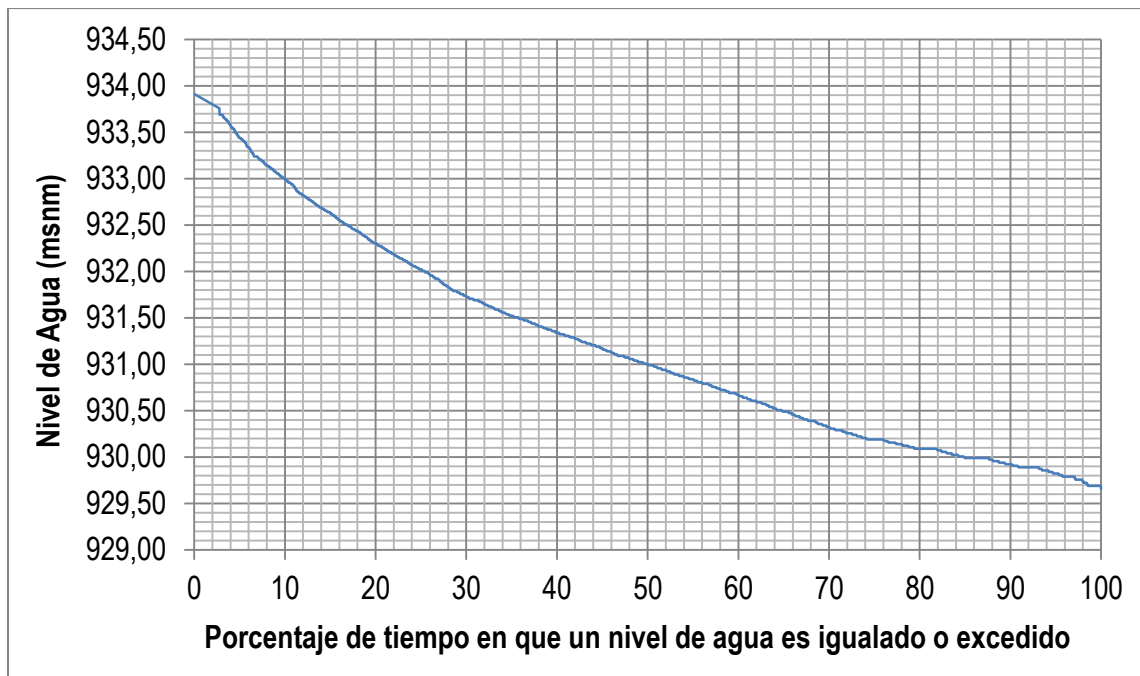


Figura 19. Curva de duración de niveles horarios en la estación Caño Carlina o Caño Nuevo
Período: 01-01- 2000 a 31-08-2015

En la Figura 20 se registra la variación de los niveles de agua diarios para el periodo octubre de 1988-abril de 2006 en las estaciones río Cauca-Mediacanoa y Laguna de Sonso. Se puede apreciar que durante los periodos de invierno los niveles de agua en la laguna aumentan considerablemente en respuesta al incremento en los niveles de agua en el río Cauca. Una vez alcanzado el nivel máximo de la creciente en el río, los niveles de agua en la laguna descienden casi a la misma tasa en que descienden los niveles en el río; esto evidencia la estrecha relación que existe entre la variación de los niveles de agua en la laguna respecto a los del río Cauca en los periodos de invierno (Bocanegra, 2008).

Este hecho muestra que el mayor aporte de agua a la laguna durante el invierno lo realiza el río Cauca, superando el volumen de precipitación y las descargas de las acequias. La alta sensibilidad de los niveles de agua en la laguna ante cambios en los niveles de agua en el río implica, además, que la mayor parte del intercambio río – laguna se presenta como flujo superficial y que el flujo subterráneo es de menor intensidad. Esto se puede explicar por el predominio de los suelos arcillosos muy poco permeables, y de baja porosidad existentes en el lecho y diferentes estratos de la laguna (Martínez y Posso, 2004).

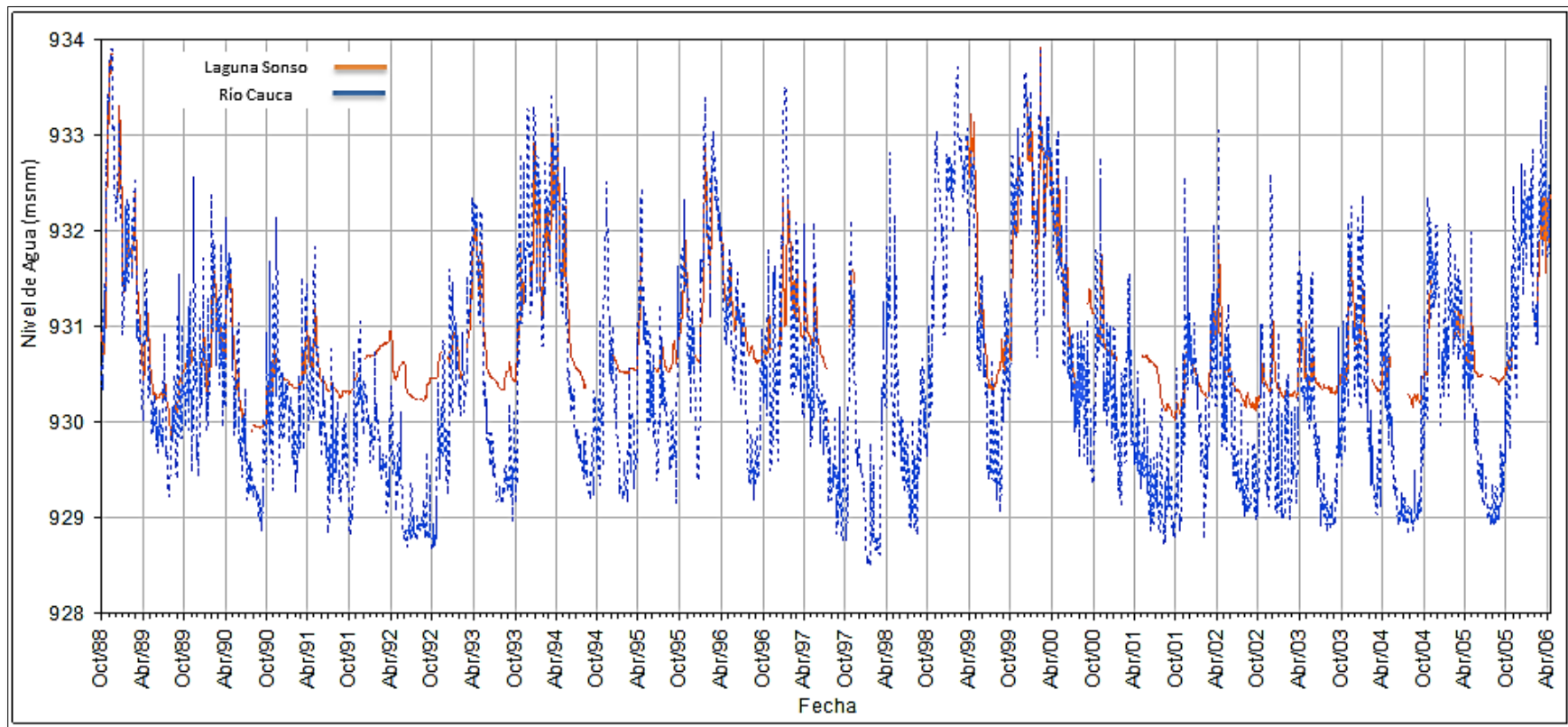


Figura 20. Niveles de agua medios diarios en las estaciones Laguna de Sonso y río Cauca-Mediacanoa. Periodo 1988-2006
Fuente: Bocanegra (2008)

7.3. Implementación del modelo matemático hidrodinámico (MOHID)

7.3.1. Representación de la topografía y la batimetría del sistema río Cauca – laguna de Sonso

A partir del levantamiento batimétrico del río Cauca en el tramo Salvajina - La Virginia, realizado por la CVC en el año 2012, se obtuvo información del sector de la laguna de Sonso, entre las abscisas K211+156 y K224+ 836, con secciones transversales cada 500 m, aproximadamente, para un total de 23 secciones; a ello se sumó la información del levantamiento topográfico de la planicie aluvial del río Cauca efectuado con tecnología LIDAR y realizado por CVC en el año 2012. La abscisa K0+000 se halla en el eje de la represa de Salvajina.

En la Figura 21 se puede observar un esquema con la representación de los puntos topobatimétricos en el modelo MOHID, cada punto contiene información de coordenadas “X”, “Y” y la elevación sobre el nivel del mar. La línea de color amarillo indica el tramo de la carretera Buga-Buenaventura en el sector de Mediacanoa.

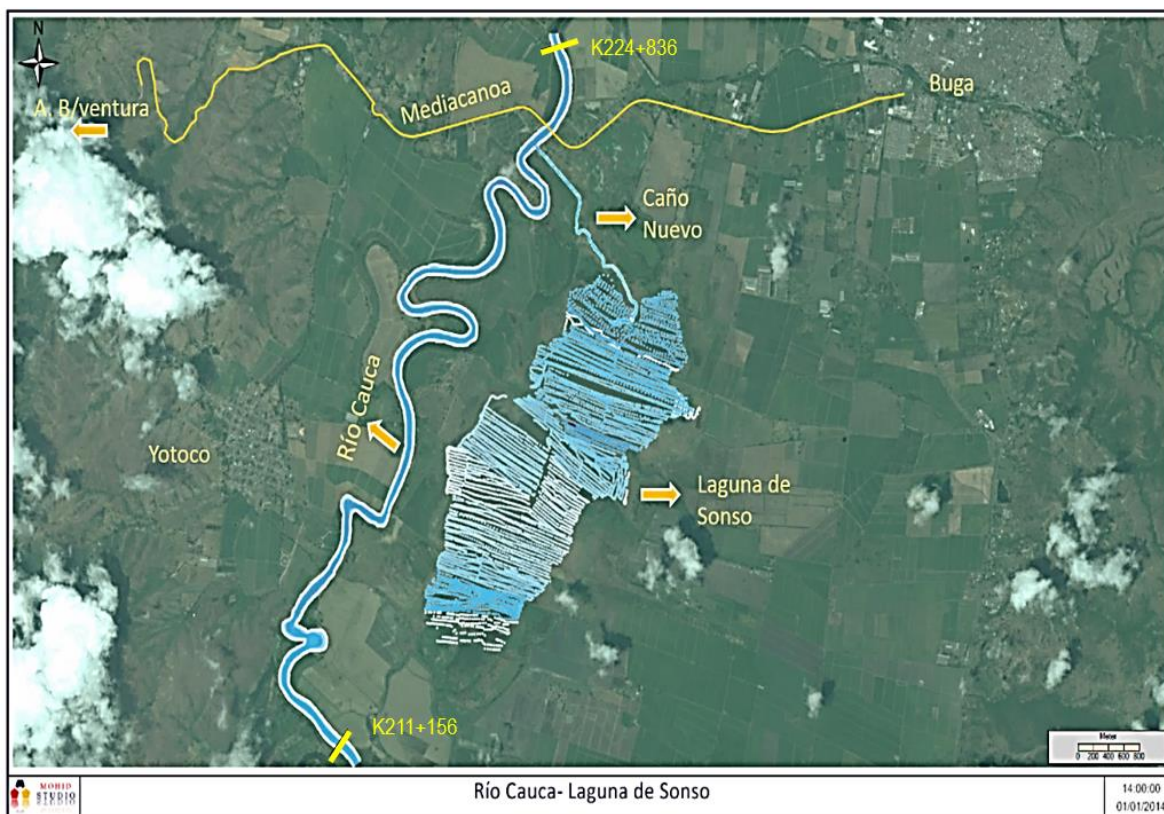


Figura 21. Representación de los puntos topobatimétricos en el modelo MOHID

7.3.2. Construcción de la malla de cálculo

Se diferenciaron los cuerpos hídricos río Cauca, Caño Nuevo y laguna de Sonso de la superficie terrestre por medio de polígonos construidos sobre las márgenes izquierda y derecha del río Cauca. La margen derecha incluyó el área representativa del sistema laguna de Sonso y Caño Nuevo. La Figura 22 presenta la esquematización del sistema a modelar; el área contenida en los polígonos de color verde corresponde al área que se excluye en el proceso de cálculo.

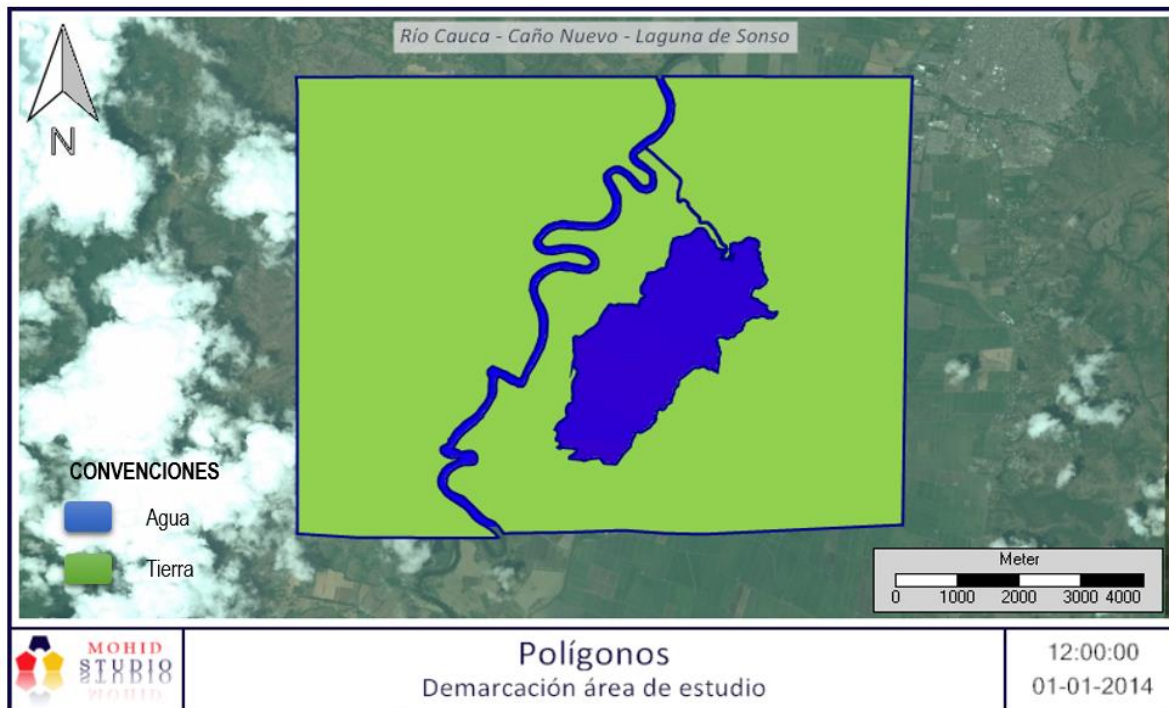


Figura 22. Esquematización de los polígonos que representan el área de estudio

El área del sistema a modelar se representó a través de una malla uniforme. La selección del tamaño de las celdas resulta de un compromiso entre el grado de detalle requerido para representar los diferentes elementos y contornos del sistema físico y el tiempo computacional total. Un tamaño de celda muy pequeño permite representar con gran detalle toda la configuración morfológica del sistema, pero, puede implicar un tiempo computacional excesivamente largo. Se evaluaron tres alternativas de tamaño de celdas cuadradas ($\Delta x = \Delta y$) de 5 m, 10 m y 20 m, respectivamente.

La selección final del tamaño de celda consideró criterios como el tiempo computacional, la estabilidad durante los cálculos del modelo y la representatividad del sistema, teniendo en cuenta que lo conforman un canal (Caño Nuevo) un cuerpo de agua lótico (río Cauca) y un cuerpo de agua léntico (laguna de Sonso). De las dimensiones de celdas evaluadas, el tiempo computacional para una celda cuadrada de 5 m resultó demasiado extenso; por su parte, la malla de celdas de 20 m redujo considerablemente el tiempo computacional pero el tamaño de celda resulta relativamente

grande y no permite representar convenientemente el Caño Nuevo, que presenta un ancho medio de 12 m.

En dichas simulaciones alternando el tamaño de la malla se pudo observar que:

- El tiempo computacional total requerido para simular un periodo de 3 días naturaleza empleando una malla de celda de 5 m es aproximadamente 33 horas.
- La malla de celda de 10 m se considera suficientemente representativa y el tiempo computacional requerido para simular un periodo de 3 días naturaleza es aproximadamente 15 horas
- El tiempo computacional total requerido para simular un periodo de 3 días naturaleza empleando una malla de celda de 20 m se redujo aproximadamente el 27% respecto al tiempo de simulación requerido para una malla de celda de 10 m; además, como se indicó previamente, la malla de celda de 20 metros no permitió modelar adecuadamente el Caño Nuevo.

Finalmente se optó por una malla de celdas de 10 m de lado y para garantizar la estabilidad numérica del modelo se estimaron los intervalos de tiempo computacional máximos, considerando para ello la condición de Courant. El número de Courant está dado por la Ecuación 32. En el modelo MOHID se recomienda que sea menor o igual a 4.0.

$$C = \sqrt{gh_{\text{máx}}} * \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad \text{Ecuación 32}$$

donde:

g = Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

$h_{\text{máx}}$ = Profundidad de agua máxima (m)

Δt = Intervalo de tiempo utilizado por las ecuaciones (s)

Δx = Tamaño de la malla en la dirección "x" (m)

Despejando Δt y adoptando un número de Courant máximo de 4.0 se obtiene la Ecuación 33:

$$\Delta t \leq \frac{4\Delta x}{\sqrt{gh_{\text{máx}}}} \quad \text{Ecuación 33}$$

Se determinaron valores de intervalo de tiempo considerando diferentes profundidades de agua en el sistema río-laguna del sistema y una malla de 10 m, los resultados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7 Intervalo de tiempo considerando diferentes profundidades del sistema

Δx (m)	C	$h_{\text{máx}}$ (m)	Δt (s)
10	4	6	5.21
		7	4.82
		8	4.51
		10	4.04
		12	3.60

Se efectuaron simulaciones inicialmente adoptando un intervalo computacional de 4.5 s, pero el modelo se hacía inestable y se interrumpían los cálculos. Por ello gradualmente se fue reduciendo el valor de Δt hasta que se garantizara la estabilidad numérica, la cual se logró para un valor de $\Delta t = 2.50$.

Siguiendo las recomendaciones del manual del modelo MOHID se optó por girar la malla de cálculo de tal modo que la dirección principal de las líneas de flujo fuera aproximadamente perpendicular a la frontera de entrada en el río Cauca. La malla fue orientada 30° respecto al eje S – N en sentido de las manecillas del reloj, con origen en las coordenadas (-76.3901, 3.8371) y con celdas de igual tamaño (10 m x 10 m). El número final de celdas en la dirección “X” es de 400 y en la dirección “Y” de 800. El área total de la malla de cálculo es 32 km² (ver Figura 23).

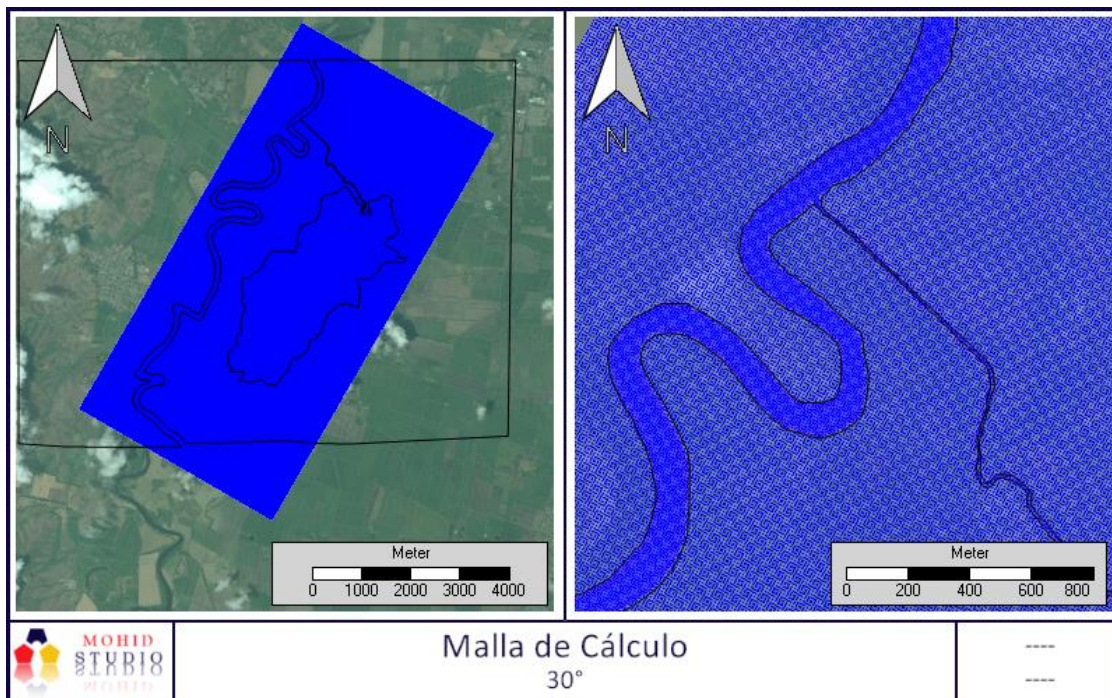


Figura 23. Malla de cálculo del sistema río Cauca – laguna de Sonso

7.3.3. Esquematización de la batimetría

Una vez digitalizados y unificados todos los puntos con información topográfica y batimétrica se procedió a construir su representación en el modelo, los datos de coordenadas fueron proyectados en el sistema WGS 1984 y las profundidades tomando como nivel de referencia o datum el cero de mira de la estación río Cauca-Mediacanoa (927.60 msnm). Según el modelo MOHID todos los puntos que se encuentren por debajo de este datum tendrán valores positivos y los puntos que se hallen por encima tendrán valores negativos. En la Tabla 8 se presentan la descripción de algunos puntos en los sistemas de elevaciones.

Tabla 8 Descripción de los cambios de niveles entre los sistemas de elevaciones

Niveles (msnm)	Nivel en MOHID (m)	Descripción
924.00	3.6	thalweg estación río Cauca-Mediacanoa
927.60	0	Cero mira estación río Cauca-Mediacanoa
928.99	-1.39	Cero mira en la estación Caño Nuevo
930.92	-3.32	Cero mira en la estación laguna de Sonso
935.40	-7.8	Nivel máximo de agua en estación río Cauca-Mediacanoa

El procedimiento para generar la batimetría en el modelo consistió en convertir un archivo shape (tipo *.shp), el cual incluye todas las tripletas de valores (coordenadas "X", "Y" y profundidades "Z") a tipo *.xyz a través de la herramienta (File Conversion) del modelo MOHID; luego, junto con la malla de cálculo y los polígonos, se generó la batimetría por medio de la herramienta GridData, utilizando como método de interpolación la triangulación entre puntos cercanos.

7.3.3.1. Ajuste de la batimetría

El modelo MOHID cuenta con la herramienta (Edit Grid Data) que permite realizar ajustes en las celdas una vez se haya creado la batimetría; los principales ajustes se efectuaron en el canal Caño Nuevo, en el cual por su tamaño y su morfología, algunas celdas quedaban pobremente conectadas, generando errores inmediatos que no permitían iniciar el cálculo computacional; otro ajuste menor, pero de gran importancia, fue corregir los niveles en algunas celdas ubicadas sobre la margen izquierda del río Cauca, en los cuales el valor resultante del proceso de interpolación fue -55, valor que en MOHID representa inestabilidad. La batimetría resultante tiene un área aproximada de 6.64 km² (ver Figura 24).

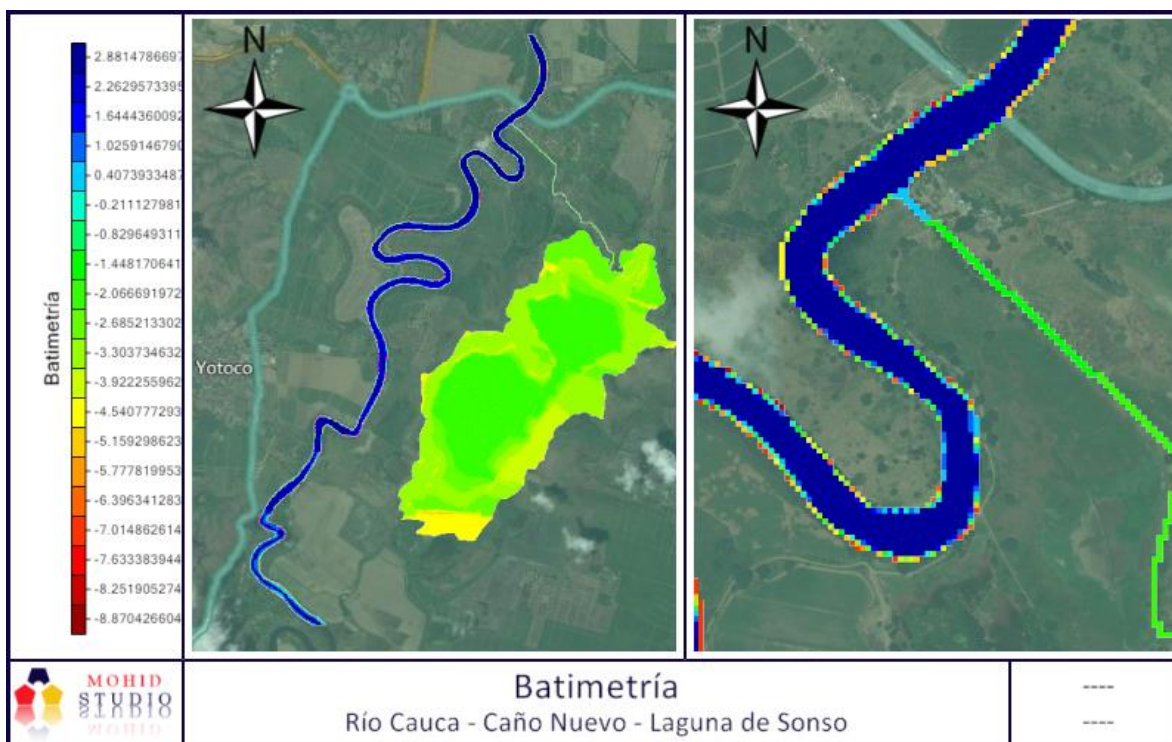


Figura 24. Batimetría del sistema río Cauca – laguna de Sonso

7.3.4. Condiciones de frontera

Las condiciones hidrodinámicas de las fronteras abiertas del modelo hacen referencia a los valores de los niveles de agua en el río Cauca. En la Figura 25 se puede apreciar la ubicación de las fronteras del modelo y la representación de las secciones transversales del río Cauca en ellas a partir de la información topobatimétrica disponible.

Debido a que en las fronteras abiertas ubicadas sobre el río Cauca no se cuenta con estaciones hidrométricas, se encontró apropiado determinar los niveles de agua en ellas a partir de los datos registrados en la estación más cercana, en este caso la estación hidrométrica de río Cauca-Mediacanoa. Para realizar dicha estimación el parámetro principal utilizado fue la pendiente hidráulica media adoptada por (CVC-Universidad del Valle, 2001) con un valor de 2.50×10^{-4} m/m.

Las distancias medidas por el eje del río entre la estación río Cauca-Mediacanoa y las fronteras de entrada y salida son 12649.58 m y 1030.45 m, respectivamente; por lo tanto, los niveles de agua en la frontera de entrada corresponden a los niveles obtenidos en la estación río Cauca-Mediacanoa más el desnivel calculado a partir de la pendiente media del río Cauca en el sector. La diferencia de niveles entre la estación río Cauca-Mediacanoa y las fronteras abiertas de entrada y salida son 3.16 m y 0.25 m, respectivamente.

Las cotas de fondo del río Cauca en la sección de frontera de entrada en estación río Cauca-Mediacanoa y en la frontera de salida son 924.4 msnm, 924.03 msnm y 923.24 msnm,

respectivamente. La pendiente de fondo se determinó a partir de la información batimétrica obtenida por la CVC en el levantamiento realizado en el año 2012. La longitud por el eje del río Cauca entre las fronteras es de 13680 m. La pendiente media del fondo se calculó a partir de la Ecuación 34:

$$S_0 = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad \text{Ecuación 34}$$

donde:

S_0 = Pendiente de fondo

ΔY = Diferencia de niveles de fondo entre las secciones de las fronteras en el río Cauca

ΔX = Longitud por el eje del río Cauca entre las secciones de las fronteras abiertas

Reemplazando se tiene que la pendiente media del fondo del río Cauca en el sector de estudio es:

$$S_0 = \frac{(924.4 - 923.24)m}{(13680)m} = 8.4 * 10^{-5} m/m$$

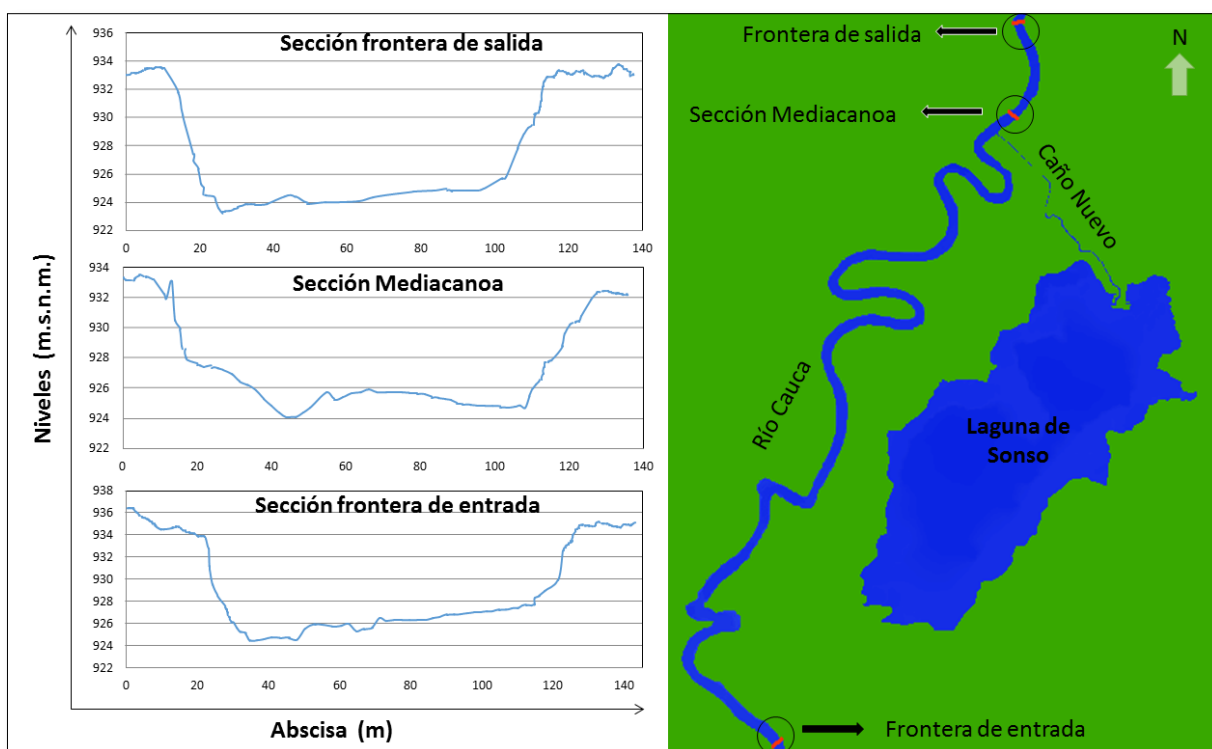


Figura 25. Fronteras abiertas en el modelo del sistema río Cauca-laguna de Sonso

7.3.5. Análisis de sensibilidad del modelo

Los modelos incluyen una serie de parámetros físicos y numéricos que deben ser estimados de tal forma que se logre una adecuada representación del sistema; algunos parámetros pueden tener una mayor incidencia en la hidrodinámica del sistema que otros. Para estimar el grado de influencia de

algunos parámetros en la presente modelación se realizó un análisis de sensibilidad donde se evaluaron las variaciones en las profundidades y las velocidades del agua cuando se varían la rugosidad y viscosidad turbulenta.

Para comparar los resultados, se adoptó como referencia una simulación con un (Δx) y (Δt) que permitió la resolución de las ecuaciones del modelo con esfuerzos computacionales razonables, dichos parámetros fueron: un tamaño de celda de 10 m y un intervalo de tiempo computacional de 2.5 s. Se realizó una serie de simulaciones variando únicamente un parámetro y dejando fijos los demás. Las corridas para el análisis de sensibilidad se hicieron en régimen no permanente (condiciones de frontera variables). La condición hidrodinámica en las fronteras abiertas corresponde a niveles de agua obtenidos a partir de las mediciones en la estación río Cauca-Mediacanoa, considerando la pendiente hidráulica media (definida en la sección 7.3.4.).

El tiempo de naturaleza simulado en esta etapa fue de 72 horas comprendidas entre el 21 y el 24 de mayo de 2009, periodo de aguas medias con registro continuo de niveles en las estaciones o puntos de puntos de control de río Cauca-Mediacanoa, Caño Nuevo y Laguna de Sonso. Los resultados obtenidos durante las primeras 18 horas en los puntos de control de Mediacanoa y Caño Nuevo se excluyeron debido a que en dicho periodo el modelo presenta inestabilidad. En el punto de control Laguna de Sonso, el periodo de inestabilidad resultó mayor (48 horas), por tanto, los resultados obtenidos hacen referencia a las últimas 24 horas del periodo de naturaleza simulado. En la Figura 26 se puede apreciar la localización de los puntos de control utilizados en el análisis de sensibilidad.



Figura 26. Ubicación esquemática de los puntos de control para el análisis de sensibilidad

7.3.5.1. Rugosidad

El modelo MOHID utiliza en las ecuaciones hidrodinámicas el coeficiente de rugosidad de Manning. Para el análisis de la influencia de este parámetro sobre la profundidad y la velocidad de flujo se realizaron simulaciones variando dicho coeficiente en un rango de valores que contemplan rugosidades debidas al lecho del río Cauca, de Caño Nuevo y la laguna; se tuvieron en cuenta para el análisis de sensibilidad los valores obtenidos por Posso y Martínez (2004); quienes determinaron coeficientes de rugosidad en el rango 0.027-0.055 en Caño Nuevo en función de la variación de niveles; en el caso de la laguna de Sonso se adoptó un coeficiente de rugosidad de 0.035, establecido por Chow (1994) para planicies de inundación con pasto alto, asemejándose a las condiciones de cuerpos de agua lenticos, y en el río Cauca de 0.040 para corrientes en planicies naturales, serpenteantes y con bancos de arena. Cabe mencionar que el presente modelo considera un único parámetro de rugosidad para todo el sistema. En la Tabla 9 se presentan los coeficientes de rugosidad utilizados para el análisis de sensibilidad de este estudio, en este rango se incluyen los valores previamente mencionados para los diferentes componentes del sistema.

Tabla 9 Coeficientes de rugosidad de Manning utilizados en el análisis de sensibilidad

Coeficiente Rugosidad Manning (n)	Periodo de Simulación (horas)	Tiempo computacional (horas)
0.021	72	18
0.033		
0.045		

En la Figura 27 se puede observar el comportamiento de la velocidad para los tres coeficientes de rugosidad en los diferentes puntos de control establecidos. De acuerdo con los resultados obtenidos se puede ver que hay un comportamiento inversamente proporcional entre la velocidad del flujo y la variación de la rugosidad, con tendencias a presentarse un aumento de la velocidad a medida que disminuye el valor de rugosidad; encontrándose, además que existe una baja alteración en la modificación de este parámetro. La variación de la profundidad del agua en el punto de control Mediacanoa y Laguna de Sonso se presenta en las Figuras 28 y 29, respectivamente, de este se puede deducir que no existe una variación de la profundidad respecto a los diferentes valores de rugosidad implementados.

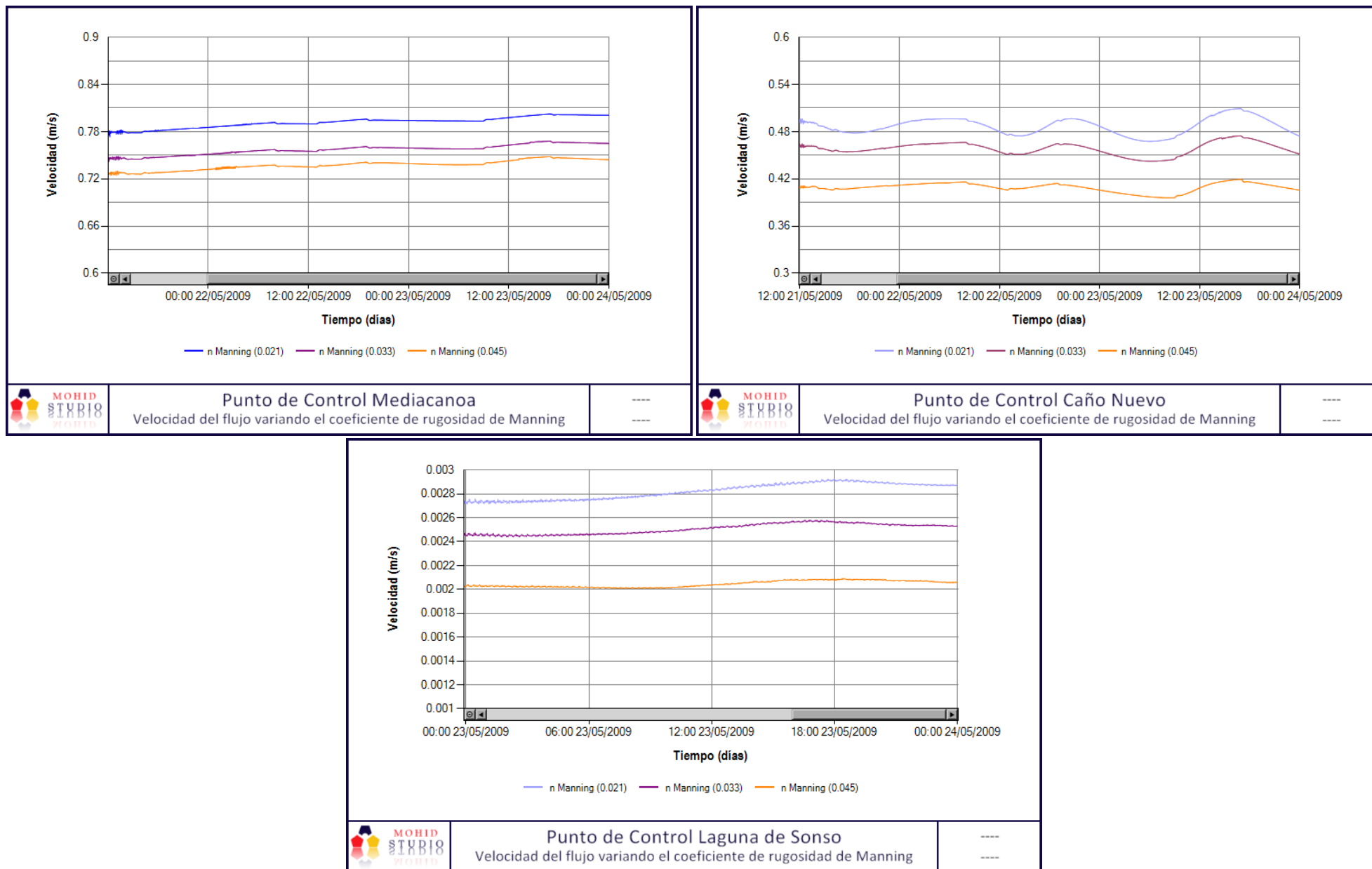


Figura 27. Velocidad del flujo para diferentes coeficientes de rugosidad en Río Cauca-Mediacanoa, Caño Nuevo y Laguna de Sonso

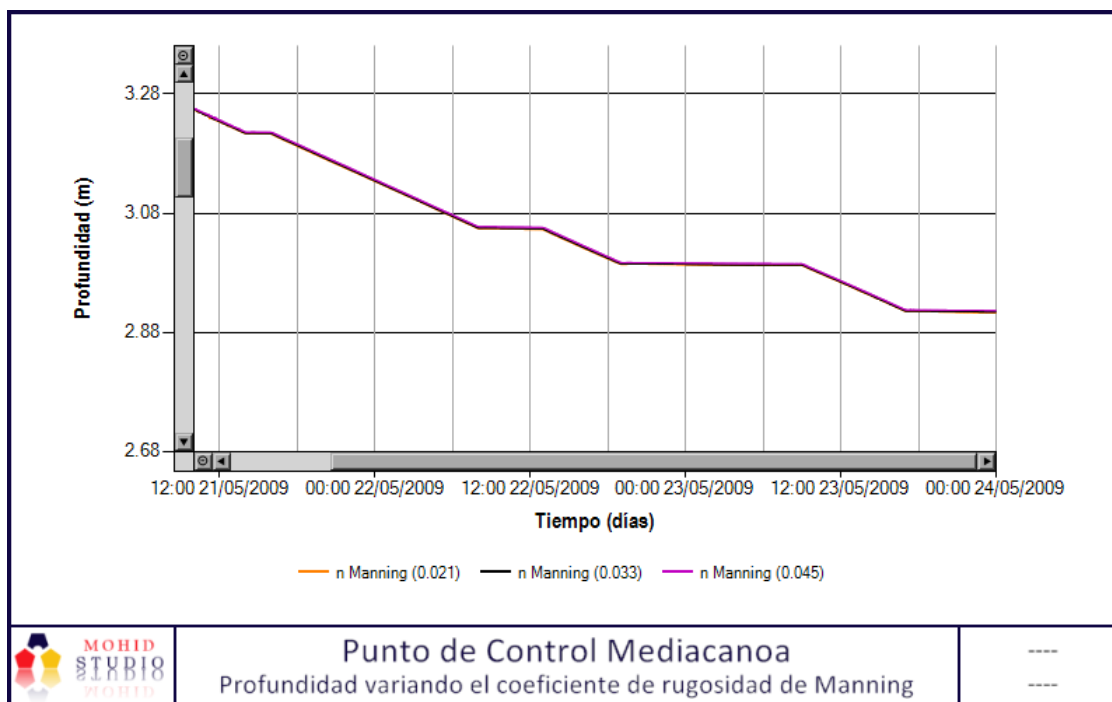


Figura 28. Profundidad del flujo para diferentes coeficientes de rugosidad en Río Cauca-Mediacaño

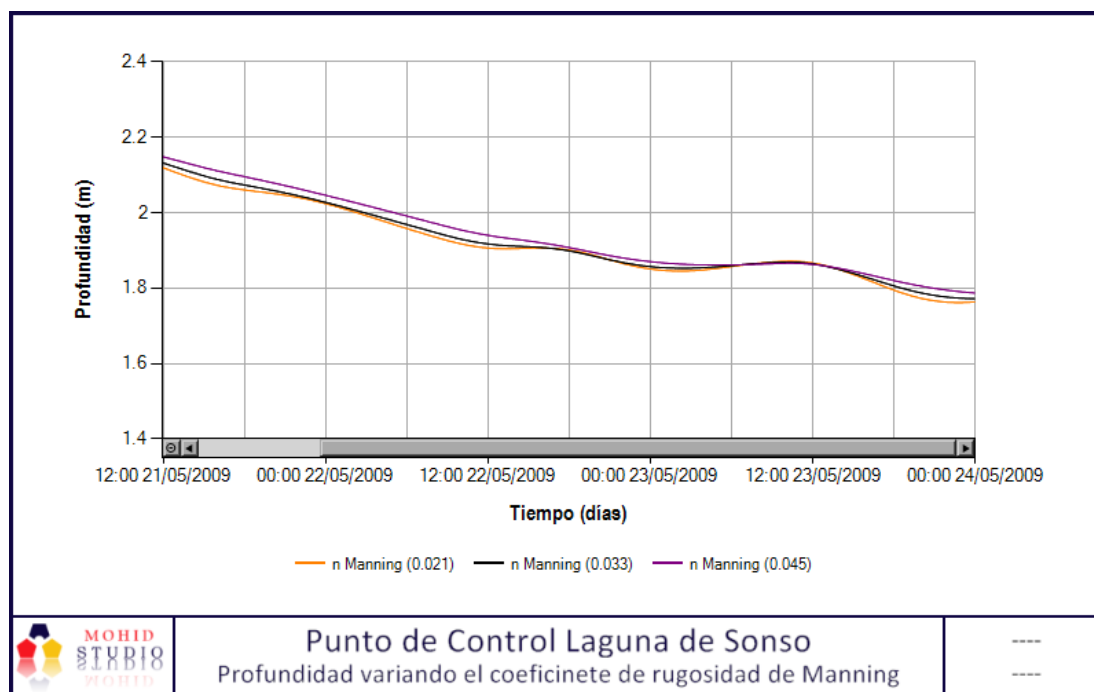


Figura 29. Profundidad del flujo para diferentes coeficientes de rugosidad en Laguna de Sonso

7.3.5.2. Viscosidad turbulenta horizontal

En las guías de implementación del modelo se recomienda utilizar la relación 1:10 entre el valor de viscosidad turbulenta y el tamaño del lado de la celda de la malla, es decir 1 m. En torno a los productos obtenidos en las simulaciones (ver Figura 30) se puede observar que hay un comportamiento inversamente proporcional entre las variables velocidad del flujo y viscosidad turbulenta, con tendencias a presentarse una disminución en la velocidad del flujo a medida que aumenta el valor de la viscosidad; a partir de estos resultados se puede decir que existe una alteración muy baja de la velocidad del flujo en los puntos de control modificando este parámetro, también se observó que a valores bajos de viscosidad el modelo presenta mayor inestabilidad.

En las Figuras 31 y 32 se presenta la variación de la profundidad para diferentes valores de viscosidad turbulenta en el punto de control Mediacanoa y Laguna de Sonso, donde tampoco se observaron cambios significativos.

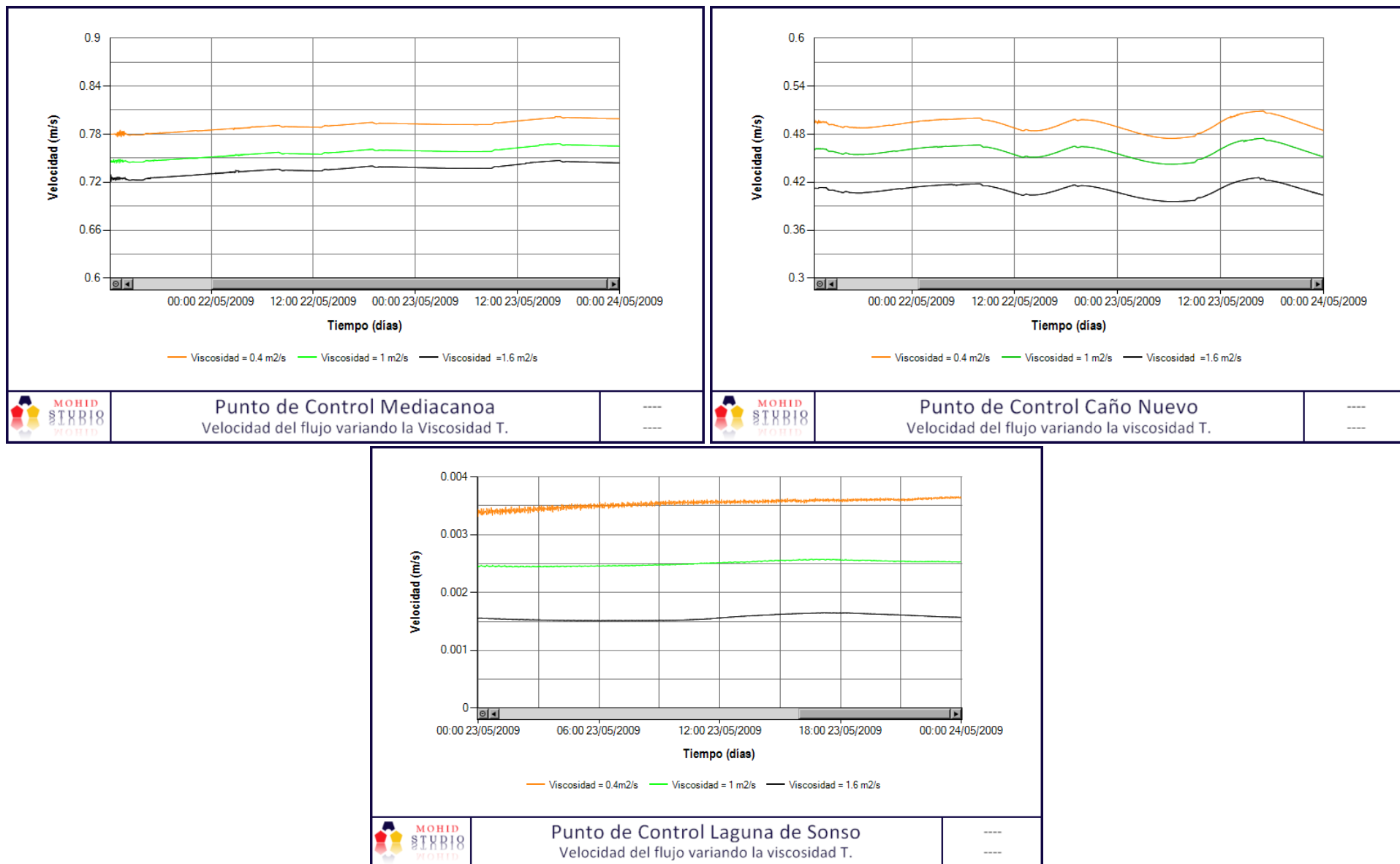


Figura 30. Velocidad del flujo para diferentes valores de viscosidad en Río Cauca-Mediacanoa, Caño Nuevo y Laguna de Sonso

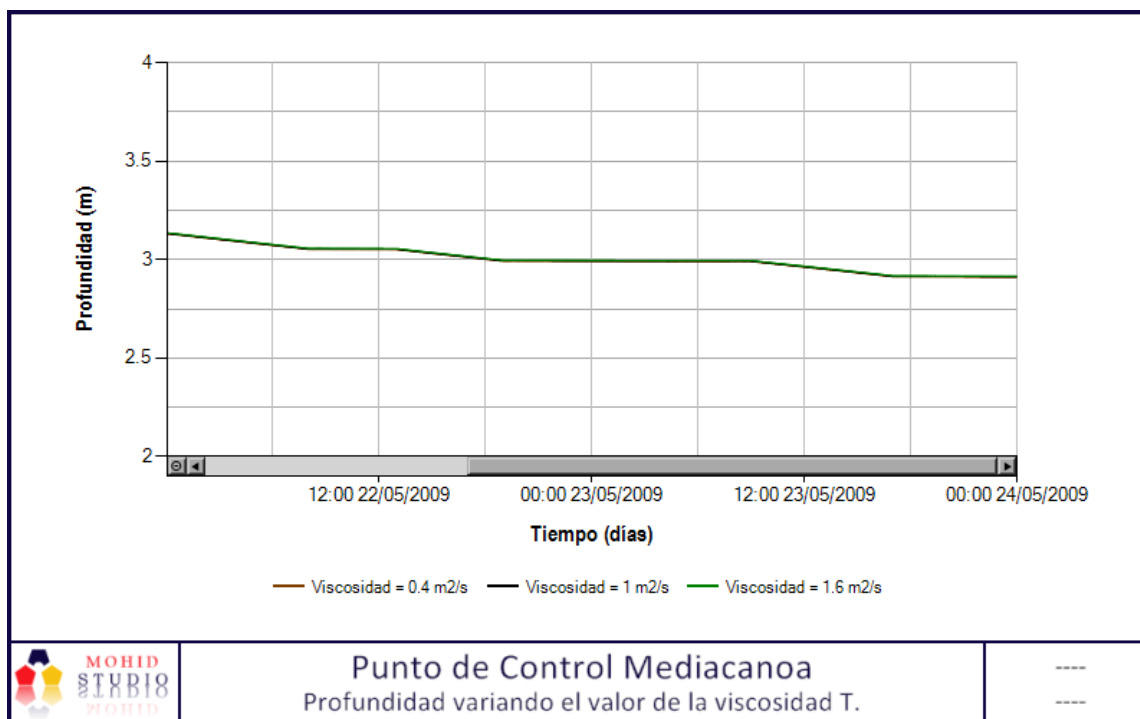


Figura 31. Profundidad del flujo para diferentes valores de viscosidad en Río Cauca-Mediacaño

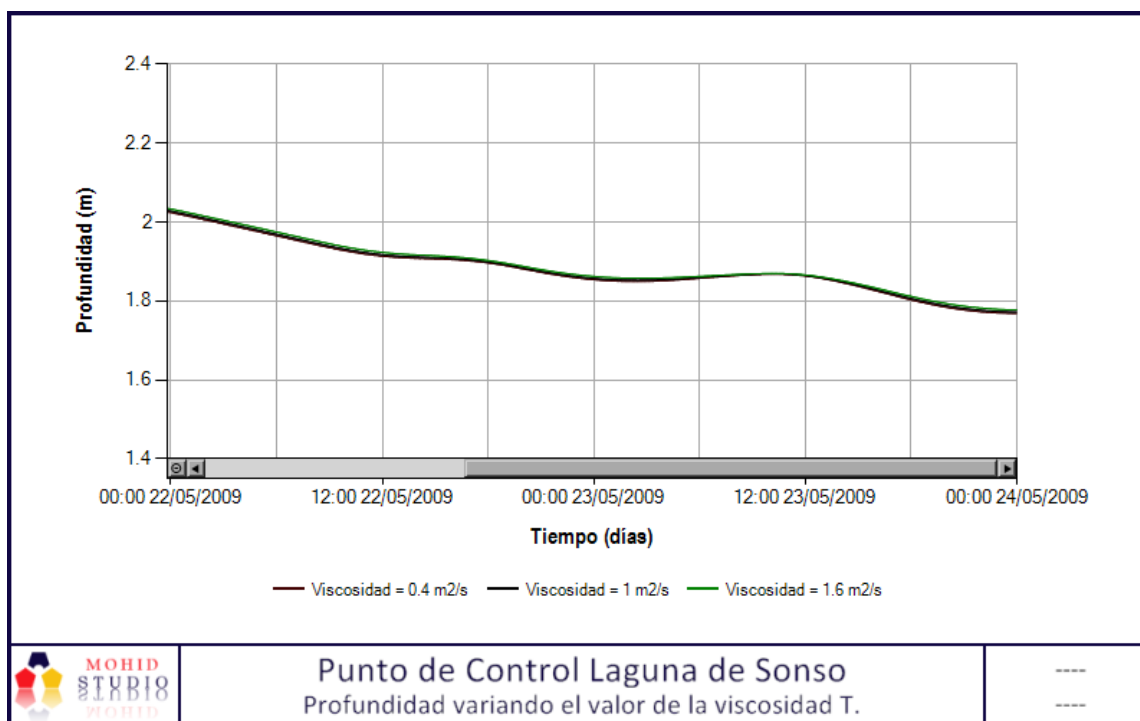


Figura 32. Profundidad del flujo para diferentes valores de viscosidad en Laguna de Sonso

7.3.6. Calibración del modelo hidrodinámico

Durante el proceso de calibración del modelo hidrodinámico se ajustaron gradualmente el coeficiente de rugosidad de Manning y la viscosidad turbulenta; también se revisaron y ajustaron, cuando se encontró necesario, los niveles batimétricos y topográficos, las condiciones de frontera y las condiciones iniciales en el modelo. Para comprobar la representación adecuada en el modelo del comportamiento del sistema río-laguna se compararon los resultados de los niveles de agua calculados por el modelo y los niveles de agua medidos en campo en los sitios o puntos de control, como son las estaciones hidrométricas río Cauca-Mediacanoa, Caño Nuevo y Laguna de Sonso.

Se realizó la calibración para las condiciones hidrodinámicas del periodo comprendido entre el 7 y 12 de mayo de 2008 (época de invierno); para este periodo se contó con información continua de niveles de agua en todas las estaciones hidrométricas.

7.3.6.1. Condiciones iniciales y de fronteras del modelo

Como se mencionó en la sección 7.3.4, las condiciones hidrodinámicas en las fronteras abiertas del modelo, se determinaron a partir de la pendiente hidráulica adoptada por (CVC-Universidad del Valle, 2001). Debido a que el modelo presentó dificultades para las simulaciones con niveles correspondientes a aguas altas (invierno), se implementó como condición inicial en todo el sistema, el nivel en la frontera abierta de entrada para el instante de tiempo $t=0$.

7.3.6.2. Ajuste de parámetros físicos y computacionales

A partir de los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad se decidió implementar como parámetros y coeficientes en la modelación, los presentados en la Tabla 10. Se optó por usar el valor medio del coeficiente de rugosidad de Manning de 0.033 ya que no se presentaron cambios significativos de la velocidad y profundidad del agua respecto a la variación de este parámetro, en cuanto a la viscosidad turbulenta horizontal se eligió el valor de $1.6 \text{ m}^2/\text{s}$ debido a que con este valor se redujo la inestabilidad presentada por el modelo durante el periodo de adaptación.

Tabla 10 Parámetros y coeficientes implementados en la calibración

Parámetros y Coeficientes	Valor	Unidad
Δt	2.5	s
Δx	10	m
C Manning (n)	0.033	$\text{s}/\text{m}^{1/3}$
Viscosidad T	1.6	m^2/s

7.3.6.3. Resultados de la calibración hidrodinámica

En la Figura 33 se presenta los resultados de niveles de agua obtenidos por el modelo en los diferentes puntos de control y los medidos en campo en las estaciones hidrométricas existentes en la zona de estudio. Se puede inferir que las diferencias entre los niveles de agua medidos en campo y calculados por el modelo se pueden considerar aceptables.

7.3.7. Verificación del modelo

Después de calibrado el modelo se procedió a hacer una verificación a partir de datos de campo continuos obtenidos para condiciones hidráulicas en periodo de estiaje, comprendido entre el 11 y 16 de agosto de 2009. En este periodo fue necesario definir la condición inicial en todo el sistema de tal forma que se diera un intercambio de información en las celdas de la malla, que se ve reflejado como un nivel mínimo en todo el sistema. Los resultados de esta simulación se observan en la Figura 34.

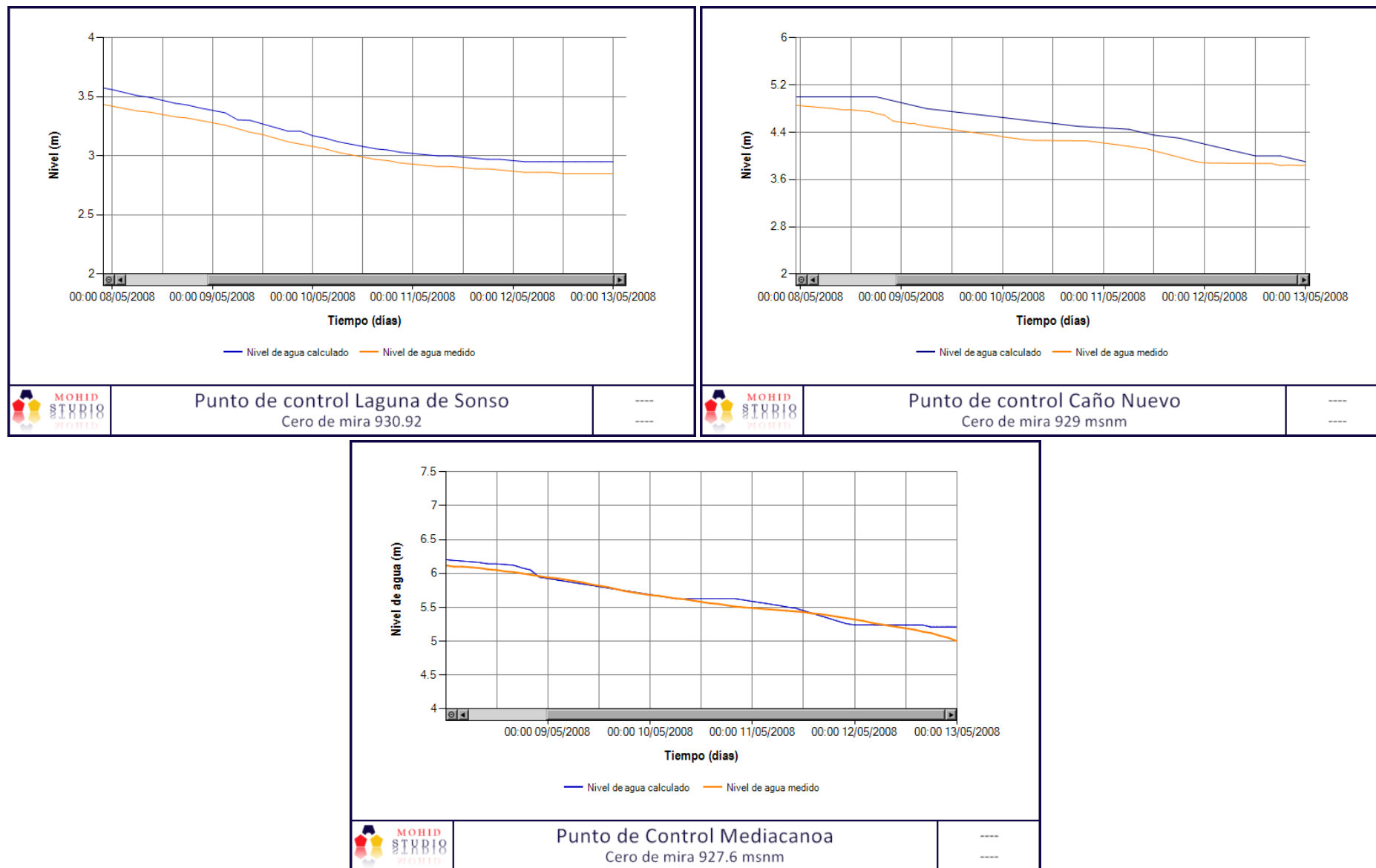


Figura 33. Niveles de agua medidos y calculados por el modelo para calibración, en las estaciones Río Cauca-Mediacanoa, Caño Nuevo y Laguna de Sonso. Periodo de invierno 07-05-08 a 12-05-08

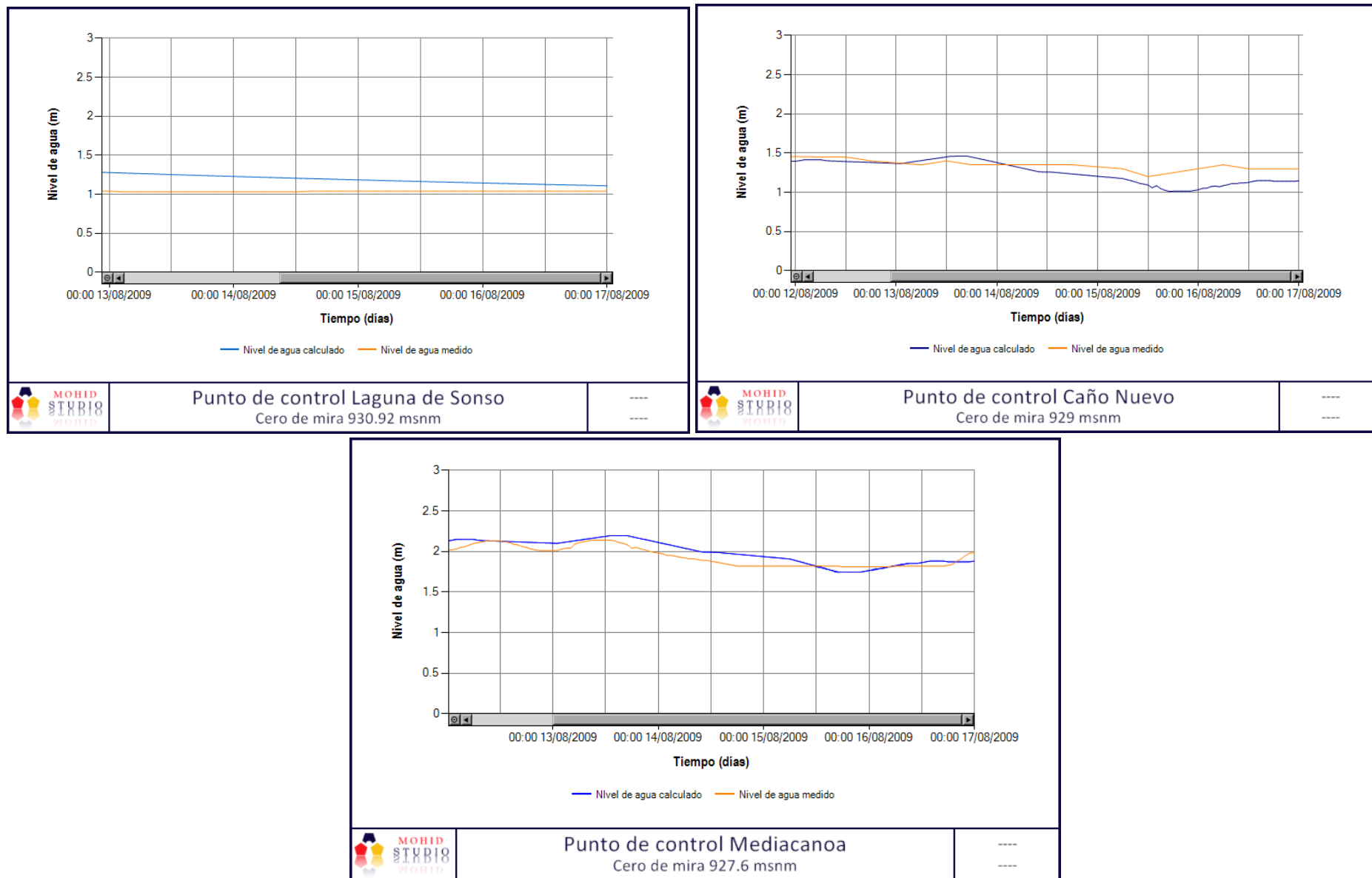


Figura 34. Niveles de agua medidos y calculados por el modelo para verificación, en las estaciones Río Cauca-Mediacaño, Caño Nuevo y Laguna de Sonso. Período de verano 11-08-09 a 16-08-09

7.3.8. Análisis de la hidrodinámica en la laguna

En las Figura 35 y 36 se presentan los patrones de flujo en la laguna de Sonso simulados para dos condiciones climáticas diferentes (invierno para calibración y verano para verificación). En estas se observan la magnitud y dirección de las velocidades en todo el sistema evaluado, para los instantes de tiempo en la hora 12:00 del 12-08-09 comprendido en el período de verano del 11-08-09 al 14-08-09 y en la hora 12:00 del 08-05-08 contenido en el período de invierno del 07-05-08 al 10-05-08.

Se puede deducir que el modelo logra representar de manera adecuada la condición natural de la interacción del flujo de agua río Cauca–laguna de Sonso, con un comportamiento coherente donde los sentidos del flujo se encuentran claramente definidos para ambos periodos, además de que la configuración batimétrica adoptada para el modelo en el canal Caño Nuevo permitió que se reflejaran de manera adecuada las líneas de corriente en el mismo.

El comportamiento de las corrientes en el periodo de verano evidencia magnitudes cercanas a cero para las zonas sur y centro de la laguna como era de esperarse, debido a su condición de cuerpo de agua léntico y el escaso flujo de agua aportado por las acequias que drenan en ella; mientras que en la zona norte, se presentan velocidades levemente superiores; este aumento puede estar asociado al gradiente hidráulico en sentido laguna – río Cauca, generado por la comunicación de estos cuerpos de agua por medio del canal Caño Nuevo. Las velocidades en el río Cauca presentaron valores en un rango de 0.3-0.6 m/s y en el canal Caño Nuevo de 0.1-0.3 m/s.

En el periodo de invierno se observa un incremento de las velocidades en todo el sistema, encontrando que las del río Cauca oscilan entre 0.6-0.8 m/s, las de Caño Nuevo entre 0.6-0.7. En la laguna de Sonso se puede apreciar que el área de la distribución de las velocidades es más amplia respecto al periodo de verano, acogiendo la zona centro de la misma; sin embargo, a pesar del aumento de velocidades en este período; en el sector sur de la laguna se sigue observando zonas muertas donde persisten velocidades casi nulas, favoreciendo las condiciones de los procesos sedimentológicos y la reducción de la capacidad reguladora de caudales de esta; por ello se cree conveniente la habilitación de una o más conexiones en la parte sur que permitan el ingreso parcial del caudal proveniente del río Cauca; además de considerar el incremento del número de salidas del flujo de agua en la parte norte para mejorar la circulación de las corrientes al interior de esta.

Todos los resultados anteriores ratifican el conocimiento cualitativo que se tiene del comportamiento hidrodinámico de la laguna; esto es, la existencia de extensas zonas (sin flujo) en los sectores sur y centro de la laguna y velocidades del agua bajas en el sector norte de la misma.

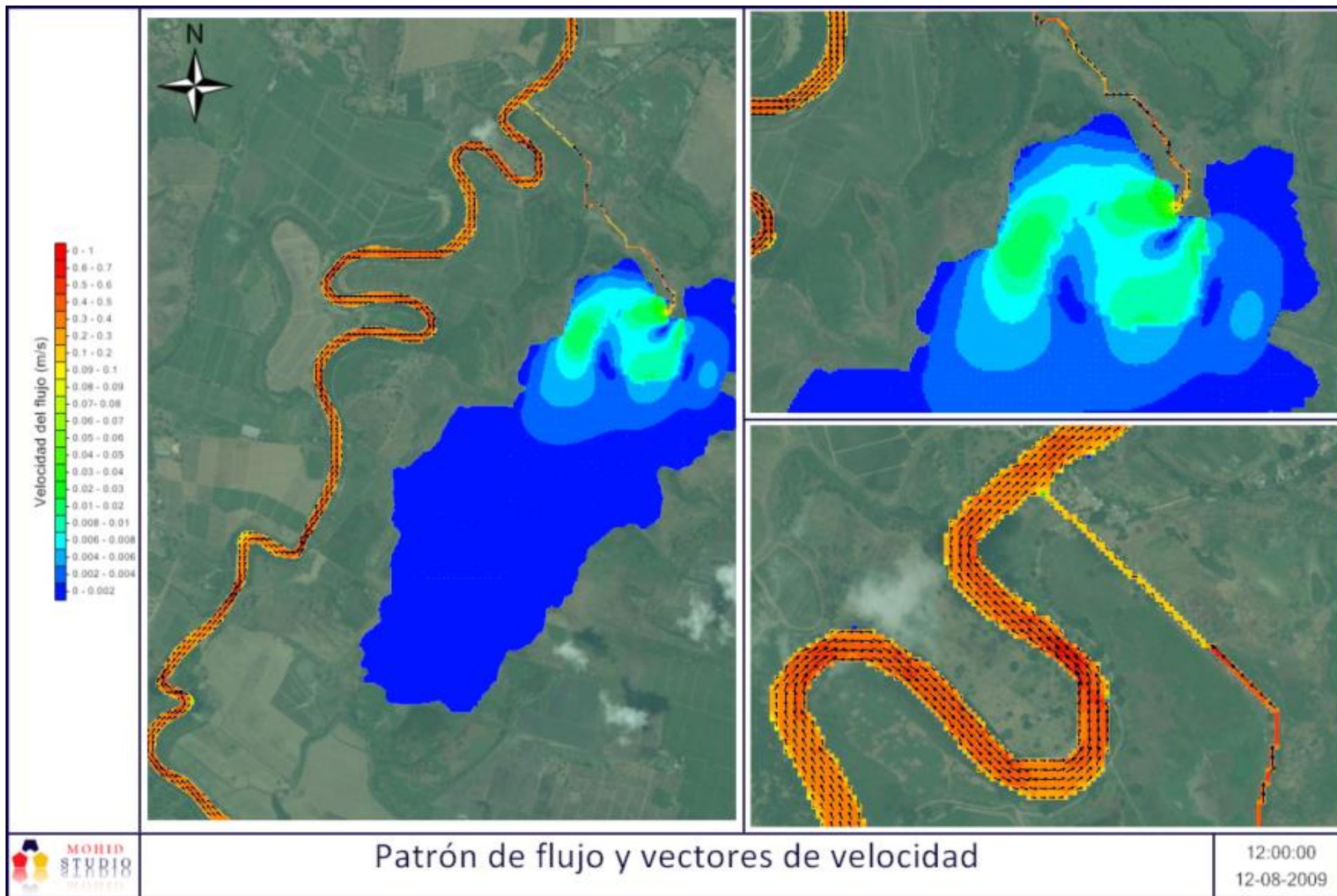


Figura 35. Patrón de flujo calculado en la laguna de Sonso para la condición de verano. Fecha: 12-08-09 Hora: 12:00

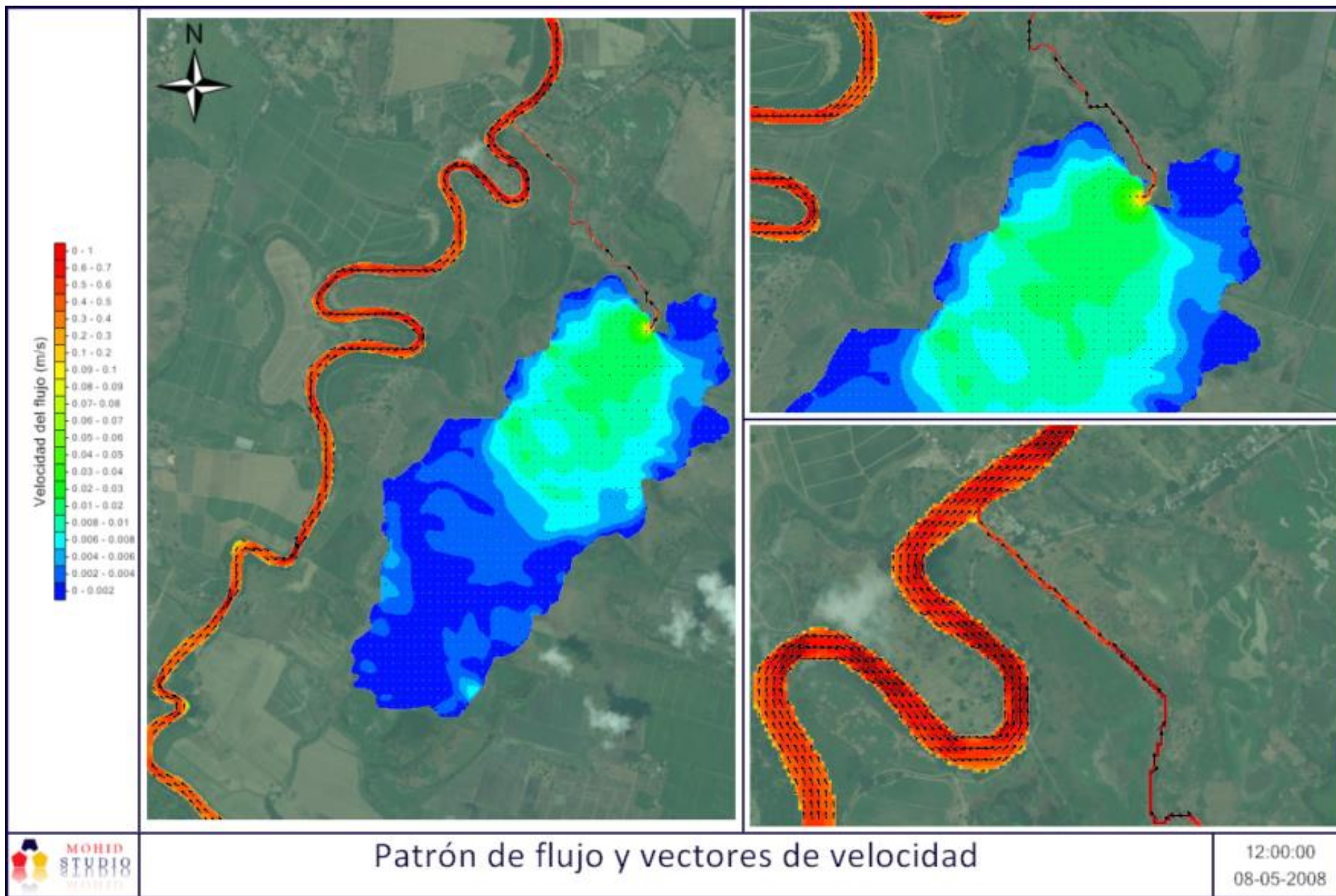


Figura 36. Patrón de flujo calculado en la laguna de Sonso para la condición de invierno. Fecha: 08-05-08 Hora: 12:00

7.4. Planteamiento y evaluación de alternativas para el mejoramiento de la hidrodinámica en la laguna de Sonso

Con el fin de mejorar el comportamiento hidrodinámico de la laguna de Sonso en el presente estudio se plantearon y modelaron varias alternativas que contemplan diferentes opciones de comunicación o conexión entre el río Cauca y la laguna; dichas alternativas consideran la derivación parcial del caudal del río Cauca cerca a la parte sur de la laguna, por medio de canales prismáticos de sección constante y pendiente fija y la construcción de canales que permiten drenar hacia el río Cauca el flujo de agua proveniente de la parte norte de laguna. Todas las alternativas hacen alusión a conexiones con el río Cauca, ya que es la principal fuente superficial de alimentación de la laguna. Los diferentes esquemas de conexión río Cauca-laguna de Sonso propuestos hacen posible la circulación del agua en sentido sur - norte al interior de la laguna, lo cual elimina las zonas muertas o de flujo nulo existentes actualmente en los sectores sur y centro de la misma. Esto es posible debido a que la mayor parte del tiempo los niveles de agua en el río Cauca (en proximidades al sector sur de la laguna) son superiores a los niveles de agua en la laguna, tal como puede apreciarse en la Figura 37.

Los niveles de agua en el río Cauca (sección K211+156) se obtuvieron a partir de los niveles de agua registrados en la estación río Cauca-Mediacanoa y considerando un gradiente hidráulico medio en el tramo igual a 2.50×10^{-4} m/m.

7.4.1. Planteamiento de alternativas en el sistema río Cauca – laguna de Sonso

En la Tabla 11 se describen los escenarios o alternativas propuestas en el presente estudio; la alternativa actual hace referencia a la condición de conexión actual del sistema, conformada únicamente por la conexión en la parte norte de la laguna de Sonso con el río Cauca a través del canal Caño Nuevo.

Tabla 11. Descripción de alternativas de conexión en el sistema río Cauca – laguna de Sonso

Alternativas	Canales de entrada en la zona sur		Canales de salida en la zona norte		Caño Nuevo
	Cantidad	Ancho (m)	Cantidad	Ancho (m)	Ancho (m)
Actual	-	-	-	-	10
1A	1	10	-	-	10
1B	1	20	-	-	10
2A	2	10	-	-	10
2B	2	20	-	-	10
3A	1	10	1	10	10
3B	1	20	1	20	10
4A	2	10	2	10	10
4B	2	20	2	20	20

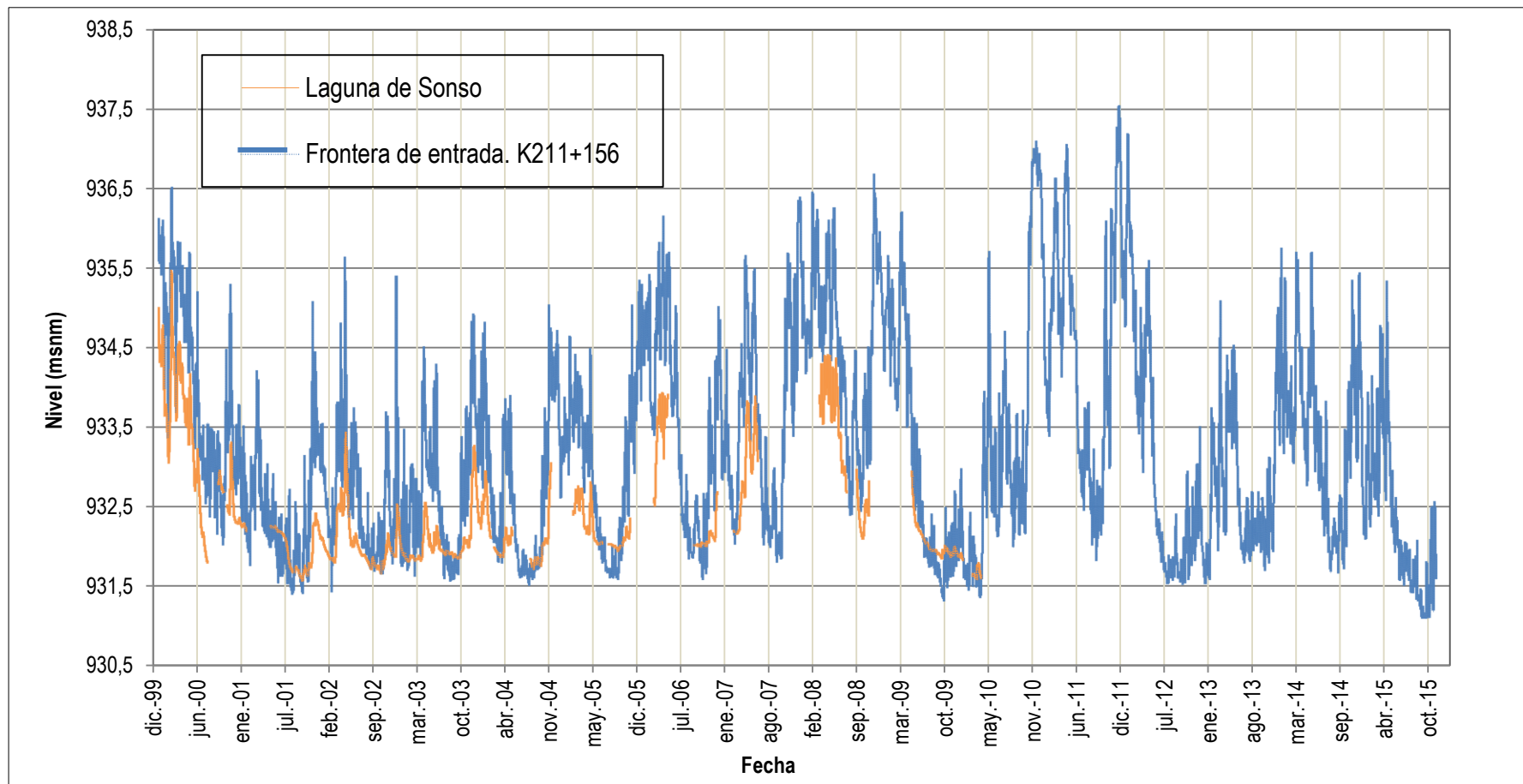


Figura 37. Niveles de agua medios diarios en la estación Laguna de Sonso y en la abscisa K211+156 del río Cauca en la frontera de entrada
Periodo 1999-2015

7.4.2. Sitios de captación

A partir de las características hidráulicas y morfológicas del río Cauca en el sector de Mediacanoa descritas en la sección 7.2.3, se procedió a determinar los sitios de captación o conexión en la parte sur del río Cauca en esta zona. Es importante resaltar que la selección del sitio preciso para la captación superficial debe considerar estudios detallados de geomorfología, geotecnia, sedimentología y patrón de flujo, entre otros; así como el diseño de la estructura, disponibilidad de los materiales de construcción y viabilidad social, económica, ambiental y técnica. Todos estos estudios están por fuera del alcance de la presente investigación y, por lo tanto, la localización de la estructura de captación en el río Cauca aquí propuesta solo debe considerarse como el punto de partida para la elaboración de dichos estudios.

En las Figuras 38 y 39 se presentan las secciones transversales del río Cauca en las abscisas K213+112 y K215+580, respectivamente, seleccionadas para ubicar las estructuras de captación. En la Figura 40 se representa la localización de los sitios de captación en la parte sur de la laguna y los sitios de conexión en la parte norte, aguas abajo del puente de Mediacanoa (abscisas K224+190 y K224+323). La selección de estos sitios ubicados sobre la parte final de las curvas en la margen externa del cauce del río, es basada en la reducción del ingreso de sedimentos gruesos comparado con los tramos rectos en los cuales se puede captar hasta el 100 % de estos, lo que repercute en la acumulación de sedimento en la laguna y por ende la pérdida de capacidad de almacenamiento. El fenómeno de erosión en la parte cóncava de las curvas puede prevenirse con la construcción de obras de protección de las márgenes del río u otras obras civiles que disminuyan el efecto generado por la dinámica natural del río y por el efecto de este tipo de intervenciones (Vide, 2007).

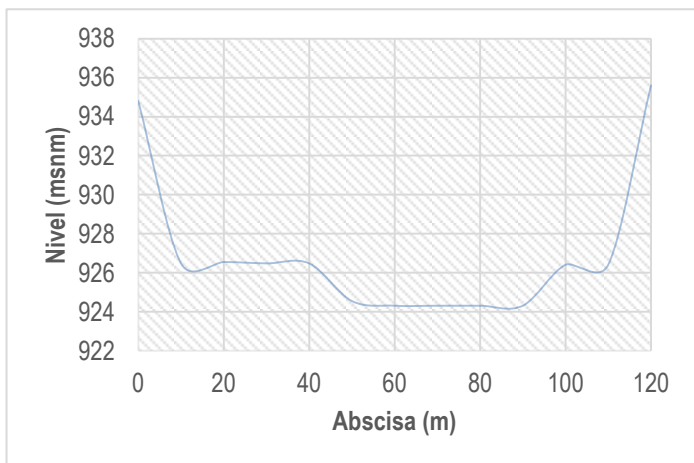


Figura 38. Secciones transversales en el sitio de Captación 1. K213+112

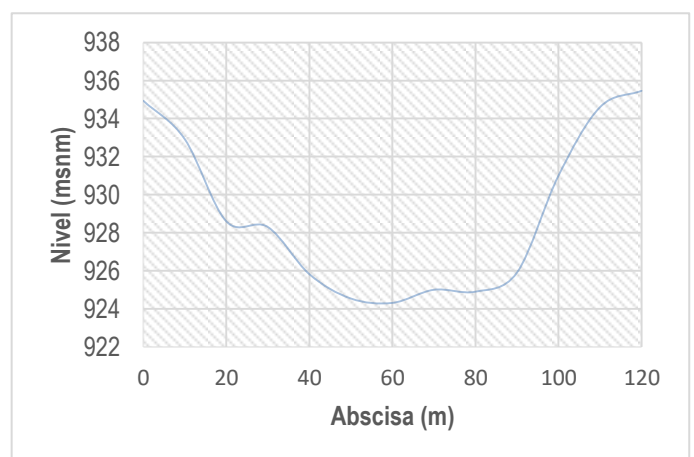


Figura 39. Secciones transversales en el sitio de Captación 2. K215+580

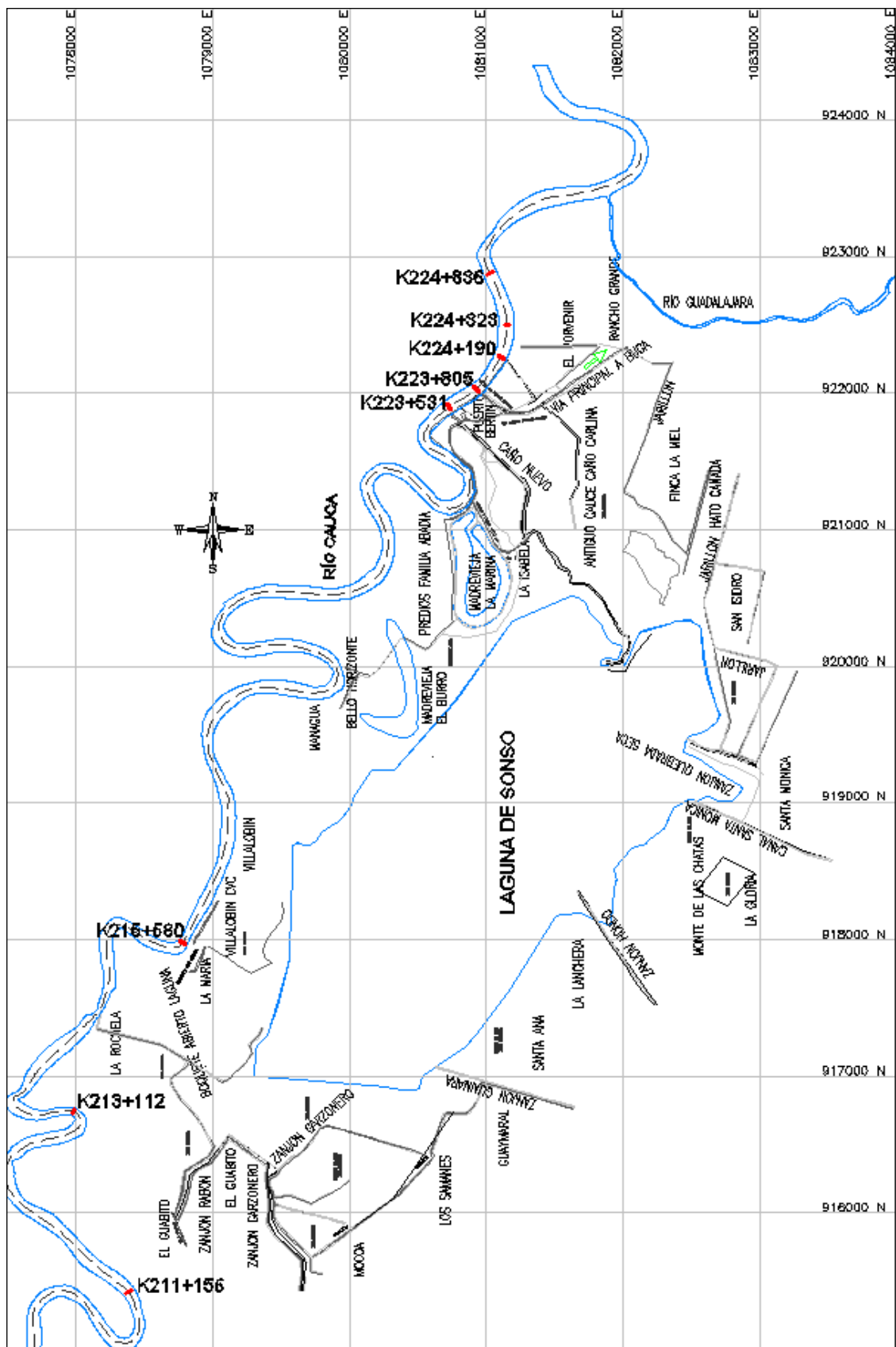


Figura 40. Localización de los sitios de conexión entre la laguna de Sonso y el río Cauca

7.4.1. Periodo de simulación para la evaluación de las alternativas de conexión del sistema río Cauca – laguna de Sonso

Se adoptó como periodo de simulación el comprendido entre el 12 y el 15 de septiembre de 2008, el cual corresponde a un periodo hidrológico que representa los valores aproximados al del nivel de agua igualado o excedido el 50 % del tiempo en el río Cauca. En la Figura 41 se muestran los puntos de control utilizados para la evaluación de las alternativas de conexión.

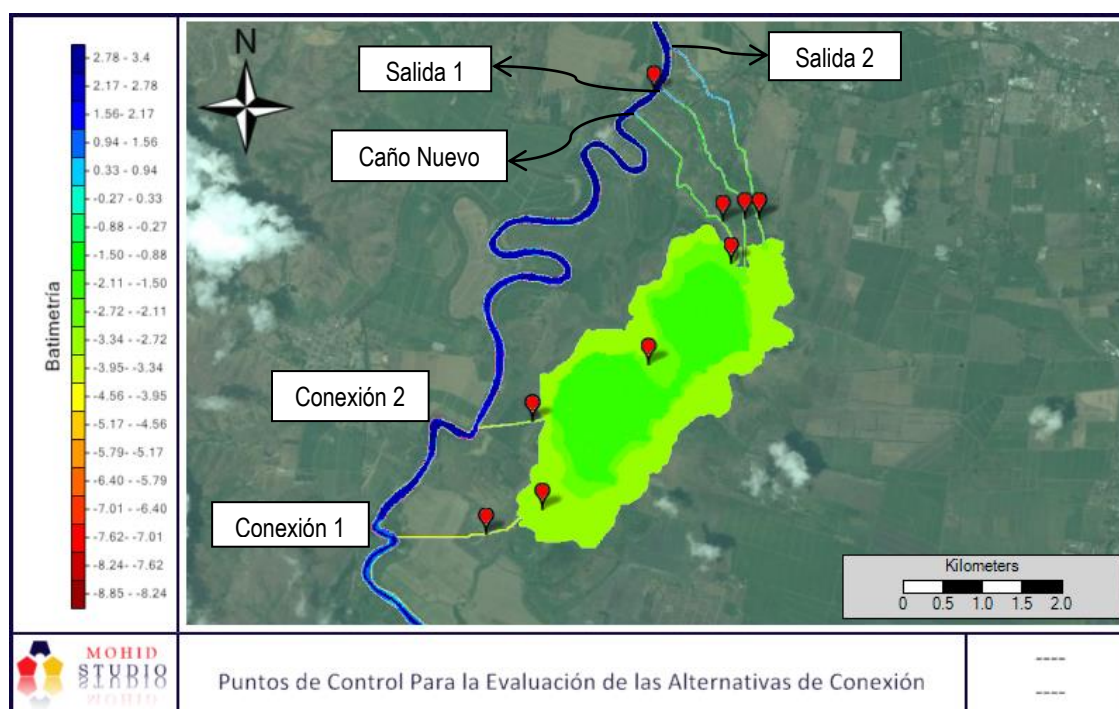


Figura 41. Localización de puntos de control utilizados en la modelación de alternativas de conexión río Cauca – laguna de Sonso

7.4.2. Condiciones hidráulicas en los sitios de captación

A partir de los niveles de agua registrados en la estación río Cauca-Mediacanoa y el gradiente hidráulico presentado en el sector de Mediacanoa, se obtuvieron los niveles de agua correspondientes a los sitios de captación; posteriormente se construyeron las curvas de duración de niveles en donde se determinaron los niveles de agua para 25 %, 50 % y el 75 % del tiempo en ser igualados o excedidos (ver Tabla 12), así mismo se definieron para la laguna de Sonso de la curva de duración de niveles presentada en la sección 7.2.4.4.

Tabla 12. Niveles de agua igualados o excedidos el 25 %, 50% y 75 % del tiempo para la estación hidrométrica Laguna de Sonso y las captaciones o conexiones 1 y 2

Estación hidrométrica y Captaciones	Nivel de Agua Igualado o Excedido (msnm)		
	El 25% del tiempo	El 50% del tiempo	El 75% del tiempo
Laguna de Sonso	932.19	931.71	931.58
Conexión 1	934.20	933.26	932.38
Conexión 2	933.78	932.60	931.88

En las Figuras 42 y 43 se presentan las curvas de duración de niveles de la laguna de Sonso y de los sitios de captación 1 y 2, de estas se puede inferir que los niveles de agua en los sitios de captación se encuentran por encima de los de la laguna de Sonso la mayor parte del tiempo en ambas captaciones garantizando un flujo continuo en sentido río Cauca–laguna de Sonso en el sector sur.

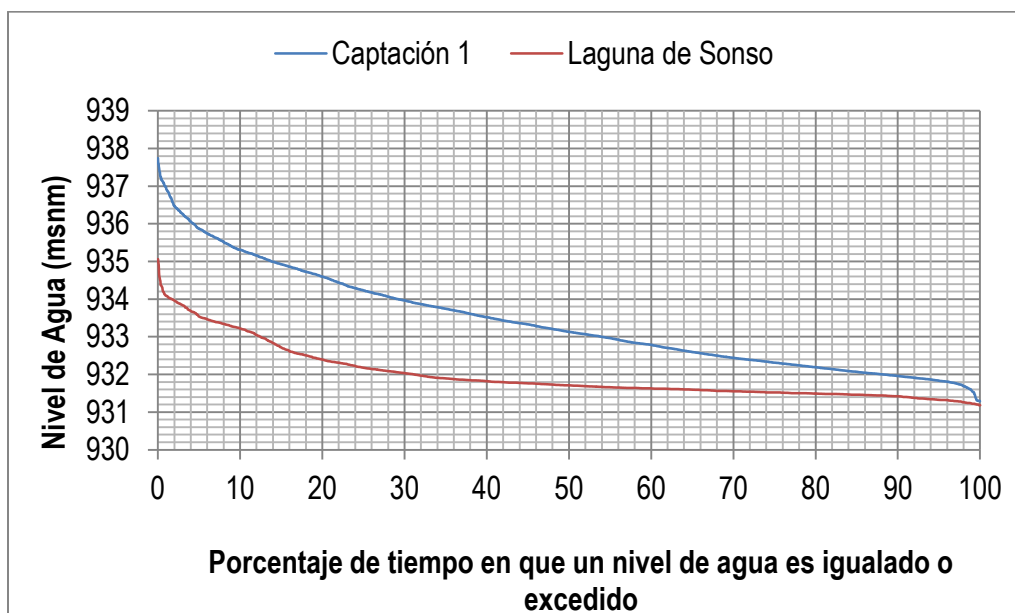


Figura 42. Curva de duración de niveles de agua de la laguna de Sonso y la abscisa K213+112 correspondiente a Captación 1

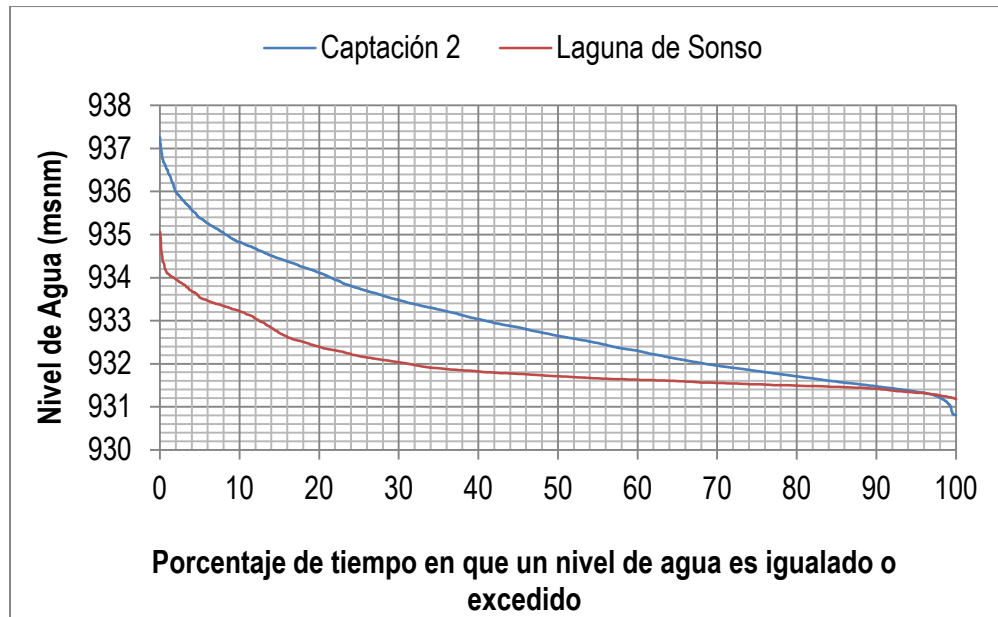


Figura 43. Curva de duración de niveles de agua de la laguna de Sonso y la abscisa K215+580 correspondiente a la Captación 2

Los puntos de entrega de los canales de captación se definieron con el fondo de la laguna, con cotas de terreno 930.80 msnm y 930.70 msnm para la captación 1 y 2, respectivamente, por su parte las cotas de fondo en la entrada se fijaron en 932.46 msnm y 932.00 msnm, por ende las pendientes corresponden a 0.11% y 0.15%. Se tuvo en cuenta la distancia desde el thalweg del río Cauca en la secciones de los sitios de captación respecto a las cotas de fondo de las captaciones con un valor aproximado de 8 m, valor adecuado para evitar el ingreso de la mayor parte de los sedimentos gruesos. En las Figuras 44 y 45 se puede observar los esquemas de las secciones transversales de las abscisas de cada captación mencionadas anteriormente con sus respectivos niveles de agua.

ABSCISA K213+112 CAPTACIÓN 1 RÍO CAUCA

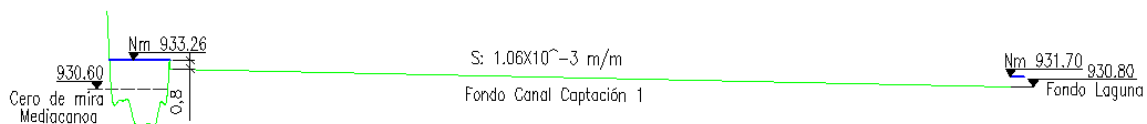


Figura 44. Esquema de la sección transversal para la captación 1. K213+112

ABSCISA K215+580 CAPTACIÓN 2 RÍO CAUCA

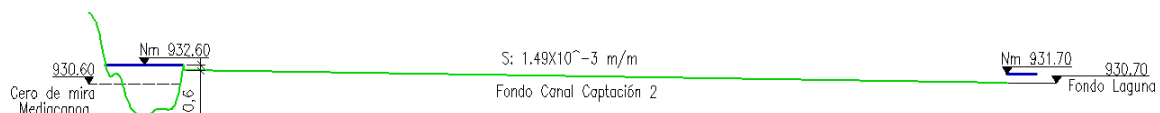


Figura 45. Esquema de la sección transversal para la captación 2. K215+580

7.4.3. Resultados de las alternativas de conexión del sistema río Cauca – laguna de Sonso

En esta sección se exponen los resultados de los patrones de flujo (magnitud y dirección de los vectores de velocidad del flujo) estimados por el modelo por cada una de las alternativas evaluadas (ver figura 46 a 54). En la Tabla 13 se presentan los valores de la velocidad media del flujo en cada uno de los puntos de control definidos en el ítem 7.4.3. Finalmente en las Figuras 55, 56 y 57 se muestran los resultados de las velocidades del flujo en los puntos de control (Sur, Centro y Norte de la laguna) obtenidas para las diferentes alternativas evaluadas.

Tabla 13. Valores promedios de velocidad del agua obtenidos en los puntos de control empleados en las diferentes alternativas de conexión

Alternativa	Velocidad del agua (m/s)								
	Canales de entrada en la zona sur		Sector Laguna			Caño Nuevo	Canales de salida en la zona norte		Mediacanoa
	Conexión1	Conexión2	Sur	Centro	Norte		Canal Salida1	Canal Salida2	
Actual	-	-	0.000	0.000	0.025	0.34	-	-	0.71
1A	0.71	-	0.058	0.003	0.072	0.53	-	-	0.71
1B	0.82	-	0.088	0.004	0.074	0.71	-	-	0.72
2A	0.90	0.85	0.128	0.052	0.092	0.78	-	-	0.82
2B	1.00	0.9	0.178	0.062	0.095	0.81	-	-	0.83
3A	0.72	-	0.068	0.003	0.158	0.47	0.47	-	0.71
3B	0.81	-	0.096	0.006	0.163	0.48	0.56	-	0.74
4A	0.91	0.86	0.139	0.1	0.170	0.53	0.51	0.52	0.82
4B	1.00	0.93	0.19	0.18	0.185	0.66	0.64	0.65	0.84

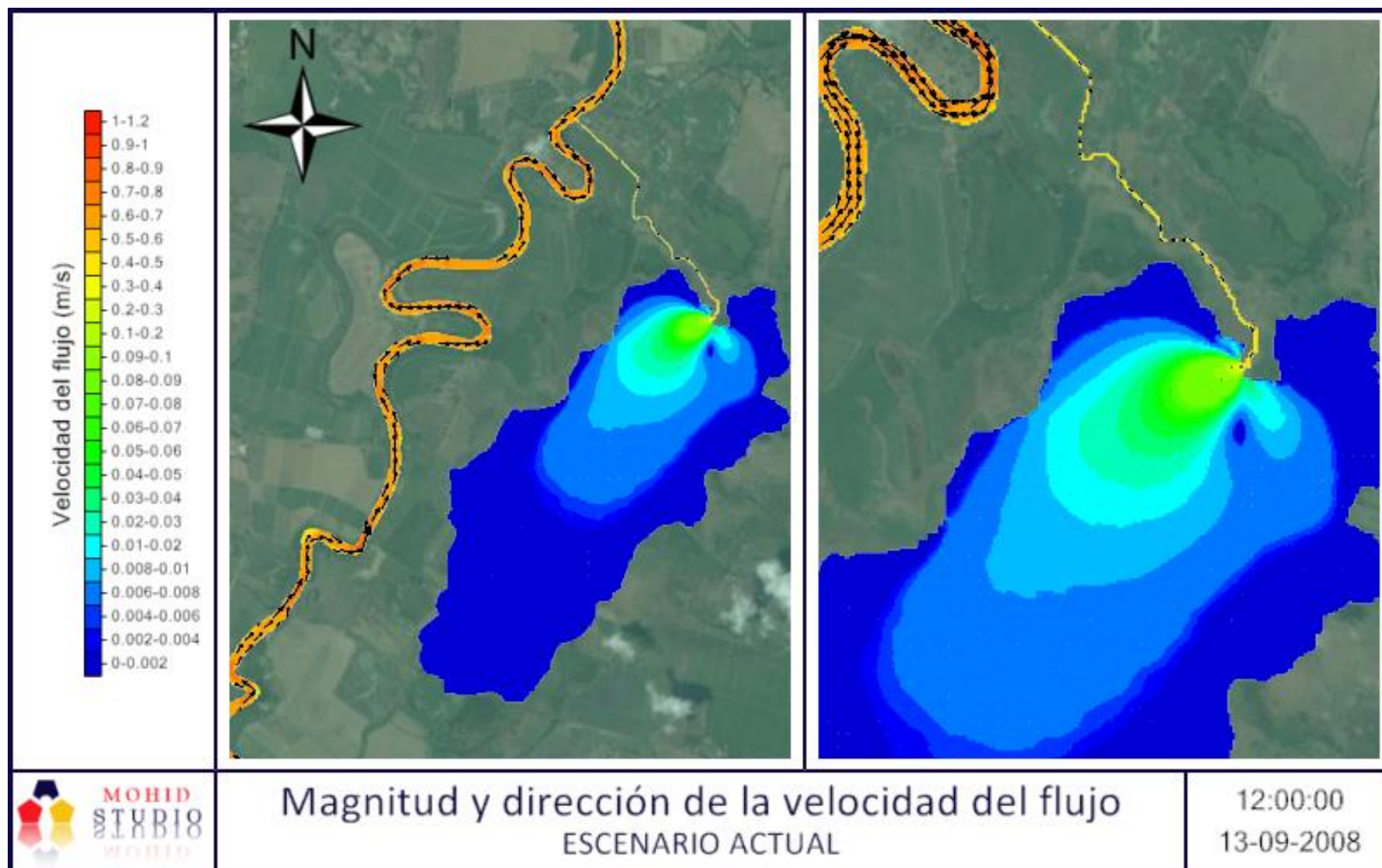


Figura 46. Patrón de flujo calculado en la laguna de Sonso para la condición actual. Fecha: 13-09-08 Hora: 12:00

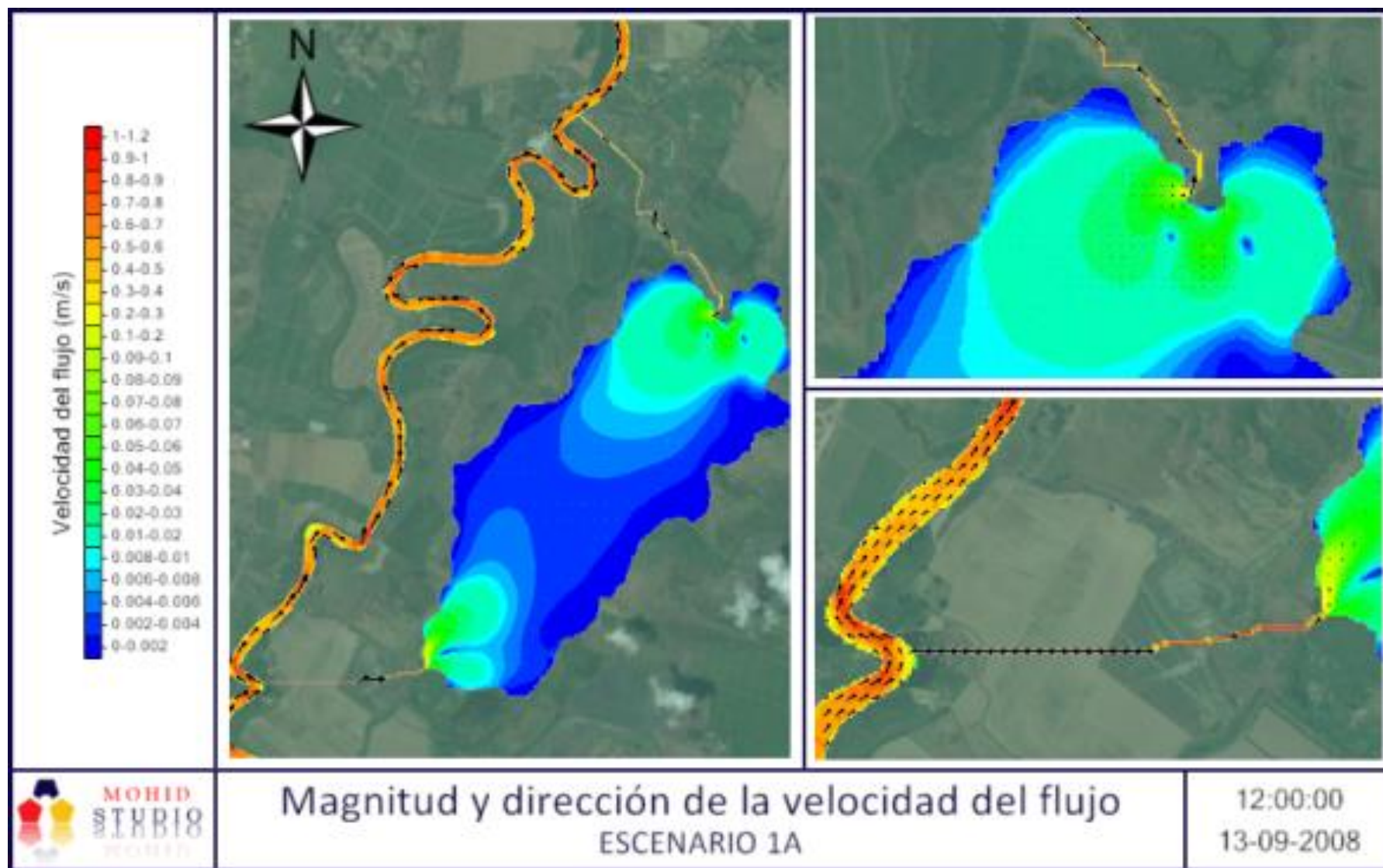


Figura 47. Patrón de flujo calculado en la laguna de Sonso para la alternativa 1A. Fecha: 13-09-08 Hora: 12:00

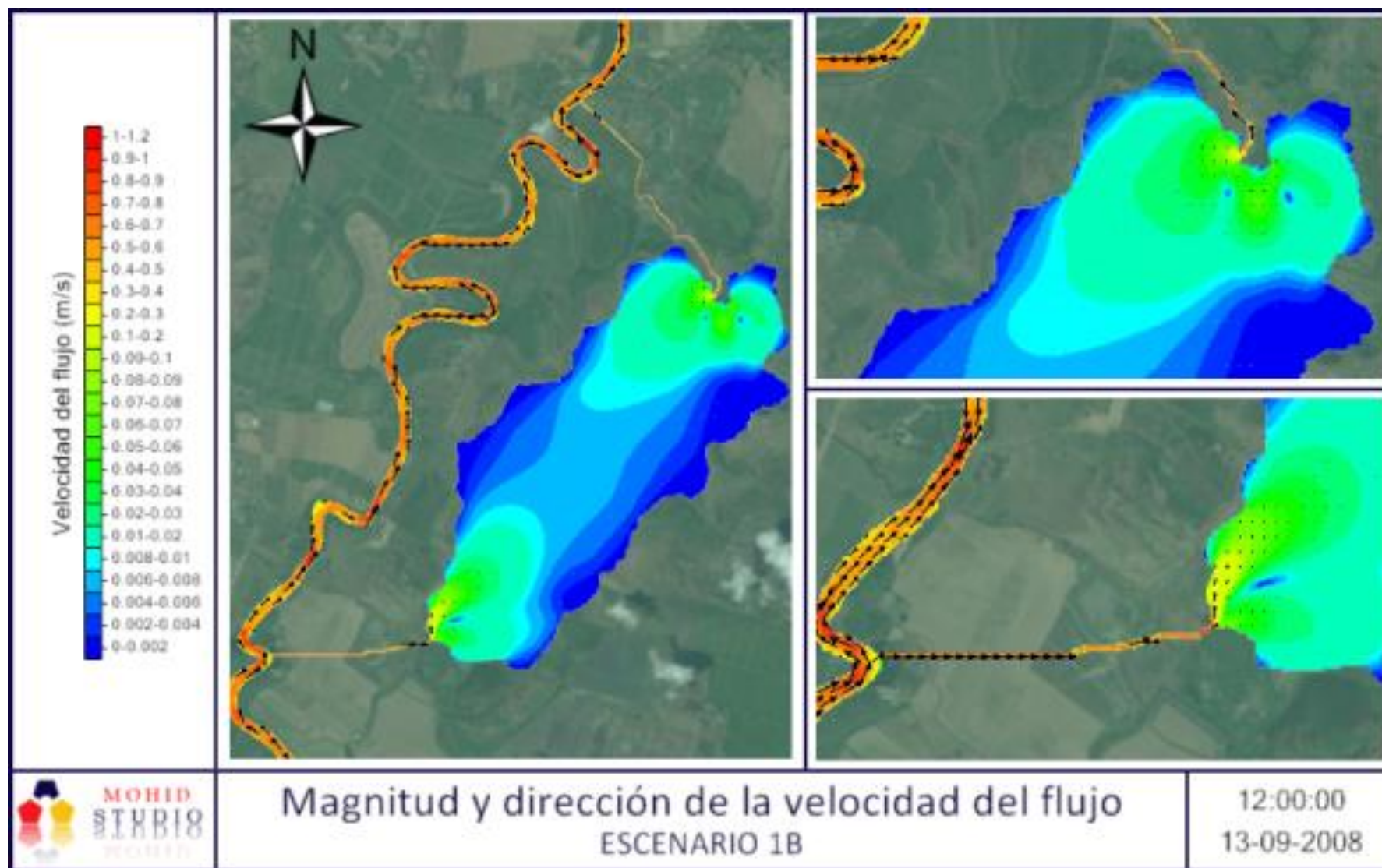


Figura 48. Patrón de flujo calculado en la laguna de Sonso para la alternativa 1B. Fecha: 13-09-08 Hora: 12:00

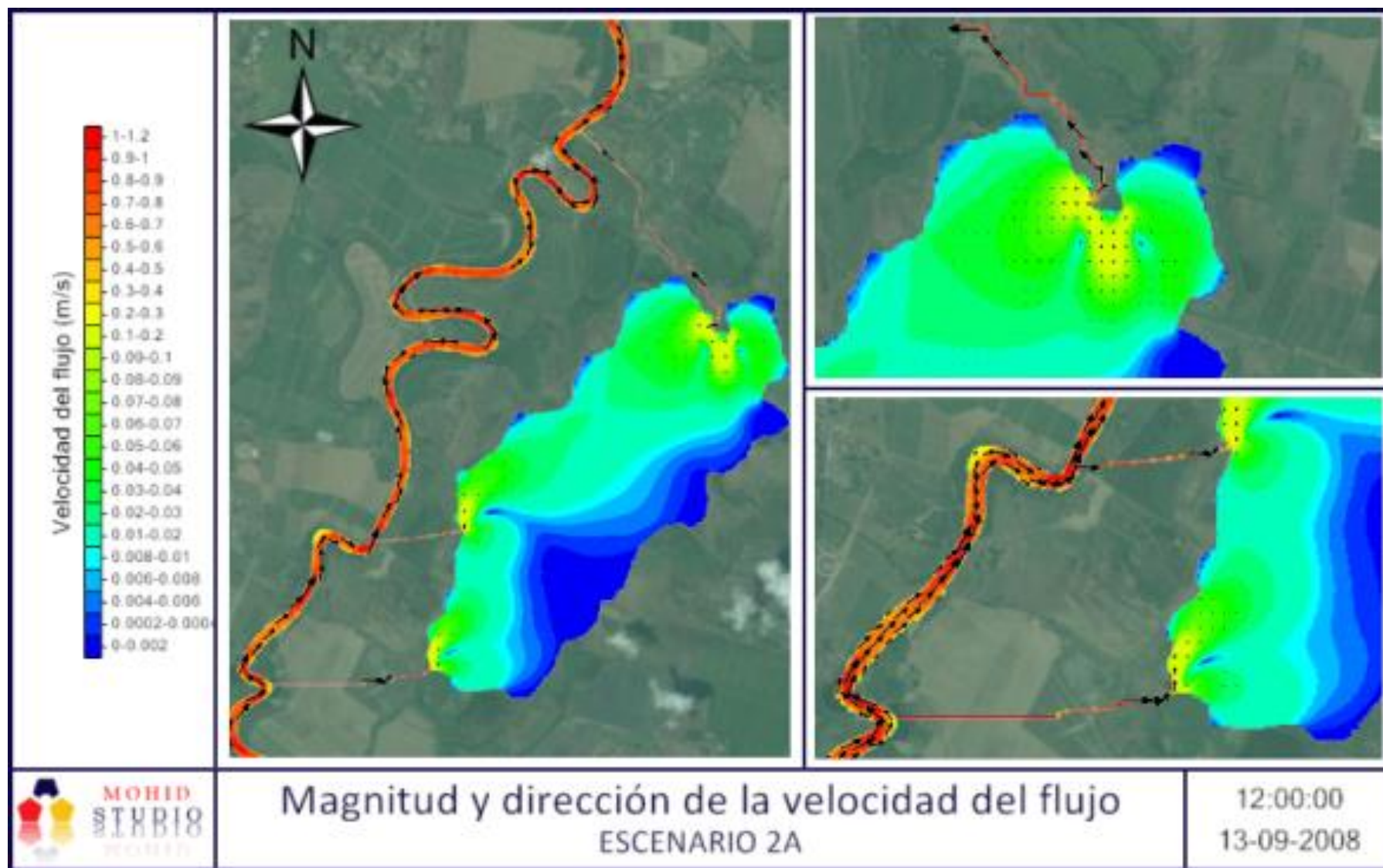


Figura 49. Patrón de flujo calculado en la laguna de Sonso para la alternativa 2A. Fecha: 13-09-08 Hora: 12:00

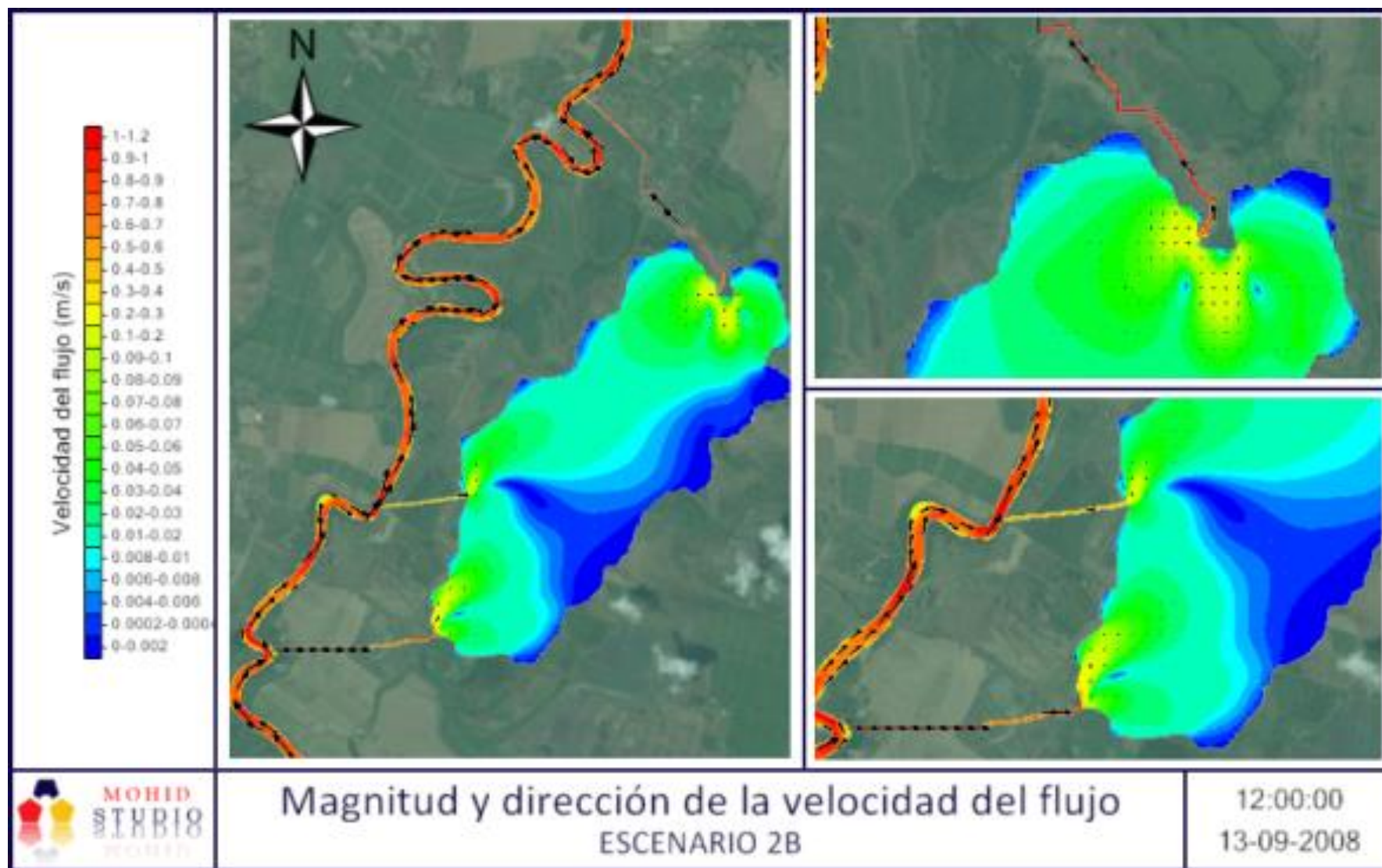


Figura 50. Patrón de flujo calculado en la laguna de Sonso para la alternativa 2B. Fecha: 13-09-08 Hora: 12:00

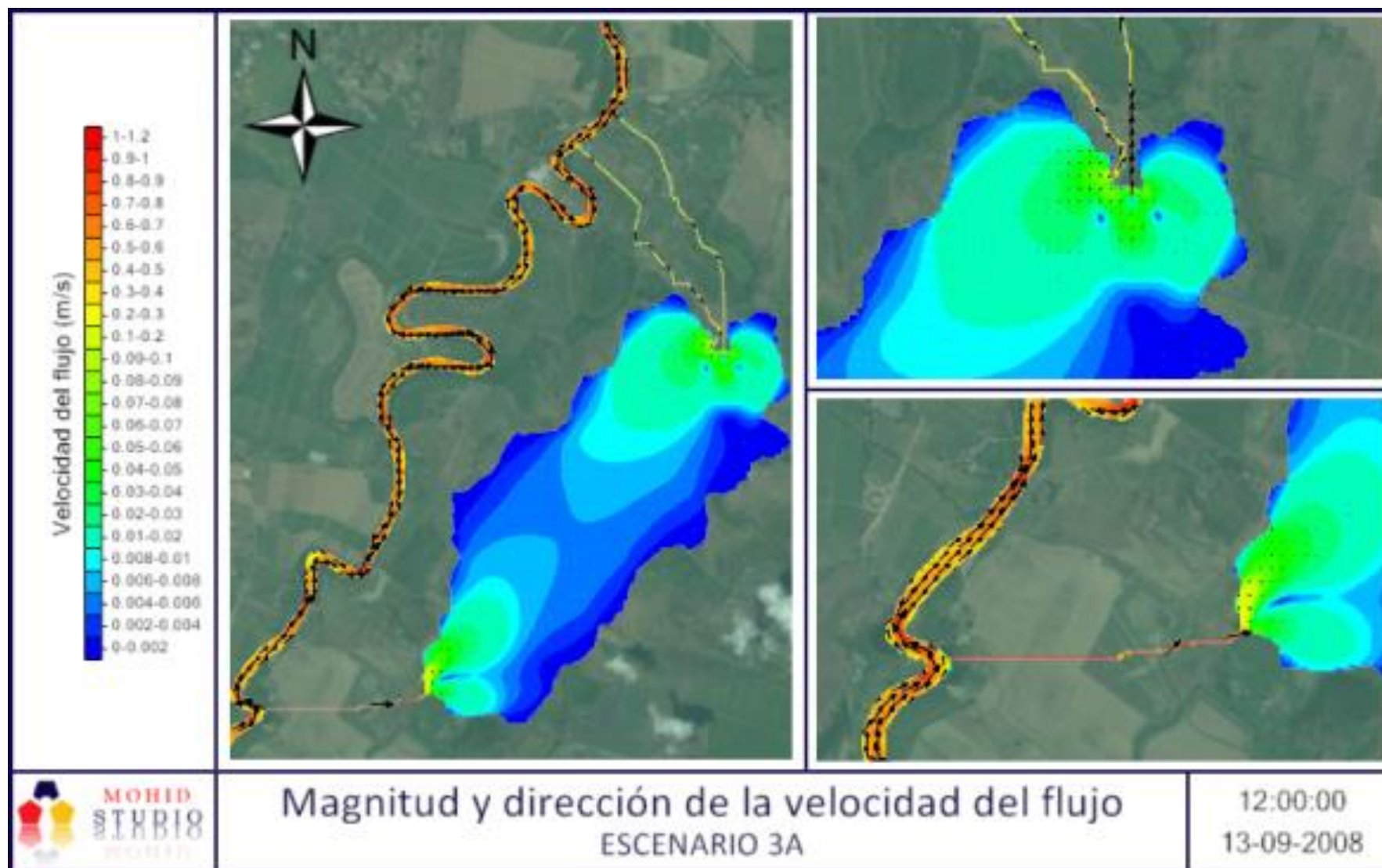


Figura 51. Patrón de flujo calculado en la laguna de Sonso para la alternativa 3A. Fecha: 13-09-08 Hora: 12:00

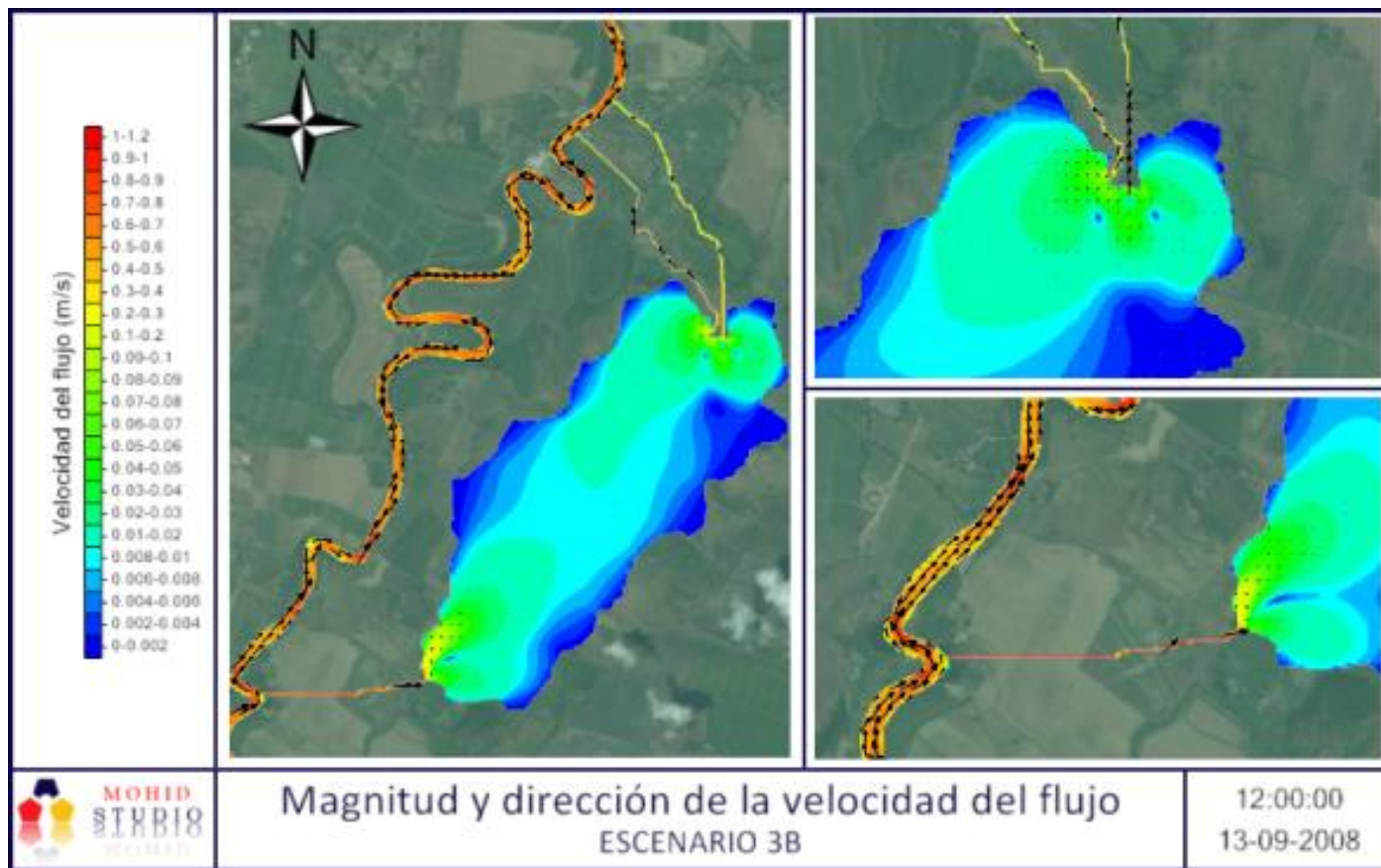


Figura 52. Patrón de flujo calculado en la laguna de Sonso para la alternativa 3B. Fecha: 13-09-08 Hora: 12:00

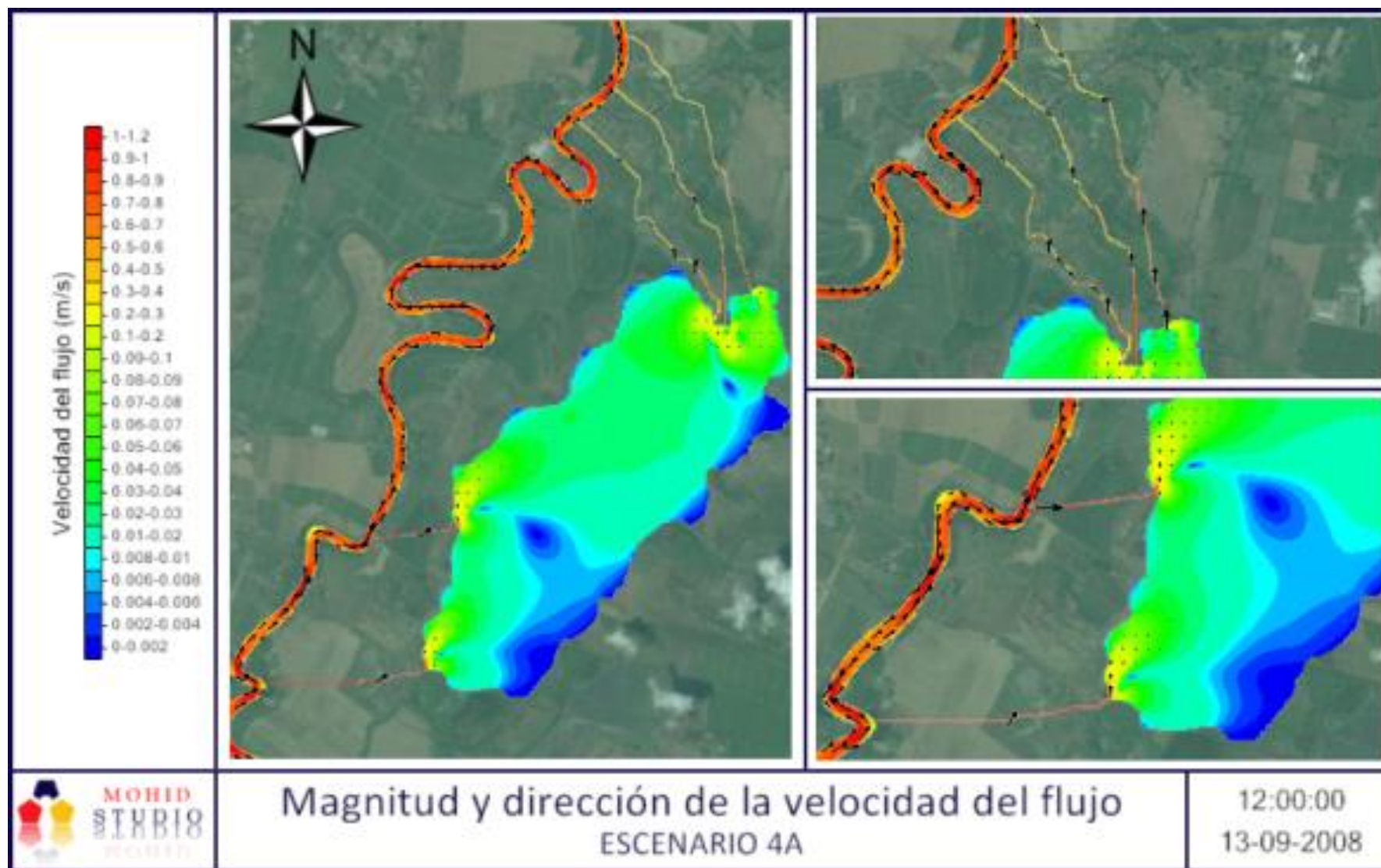


Figura 53. Patrón de flujo calculado en la laguna de Sonso para la alternativa 4A. Fecha: 13-09-08 Hora: 12:00

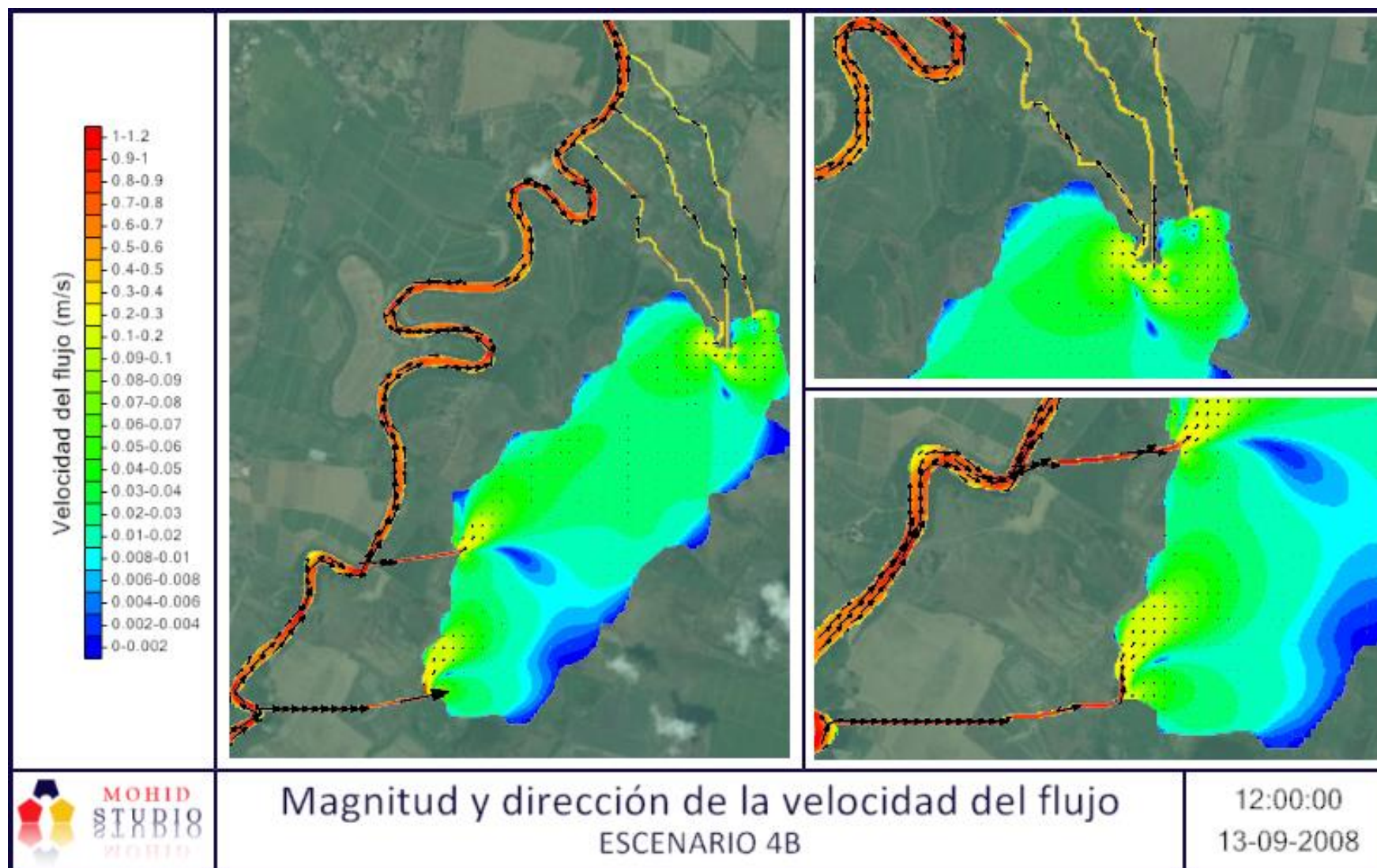


Figura 54. Patrón de flujo calculado en la laguna de Sonso para la alternativa 4B. Fecha: 13-09-08 Hora: 12:00

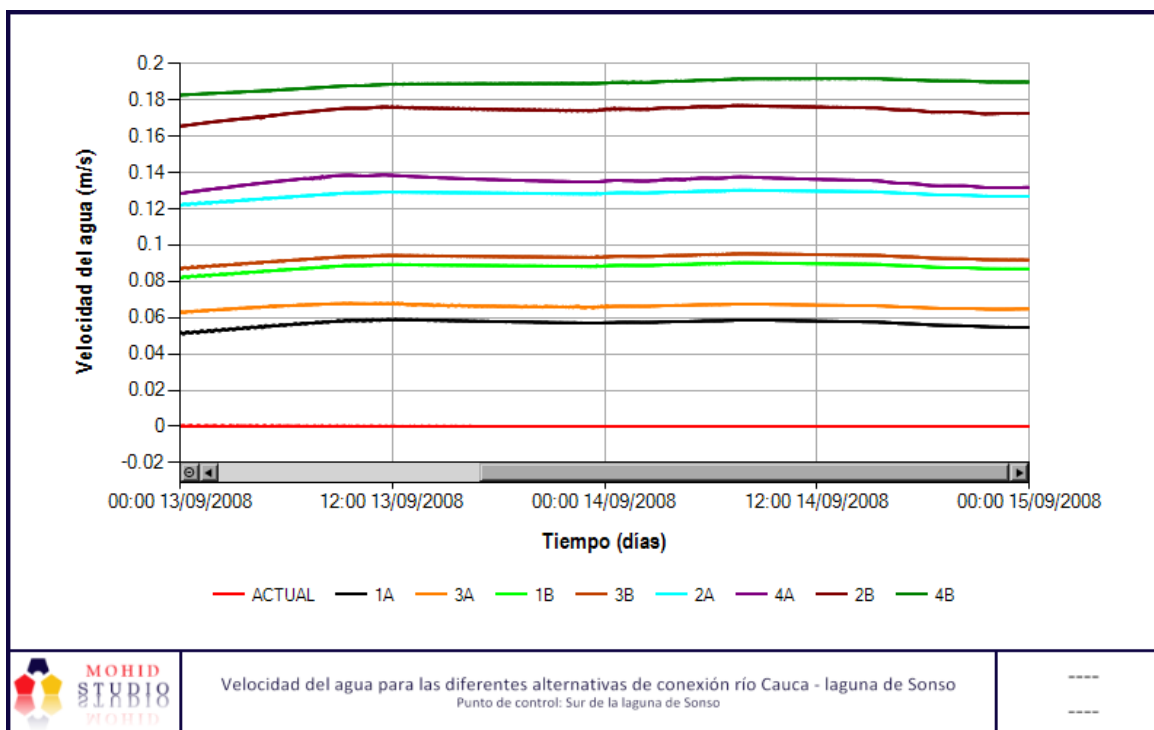


Figura 55. Velocidad del agua para las diferentes alternativas de conexión en el punto de control sur de la laguna de Sonso para los días 13 y 14 de septiembre de 2008

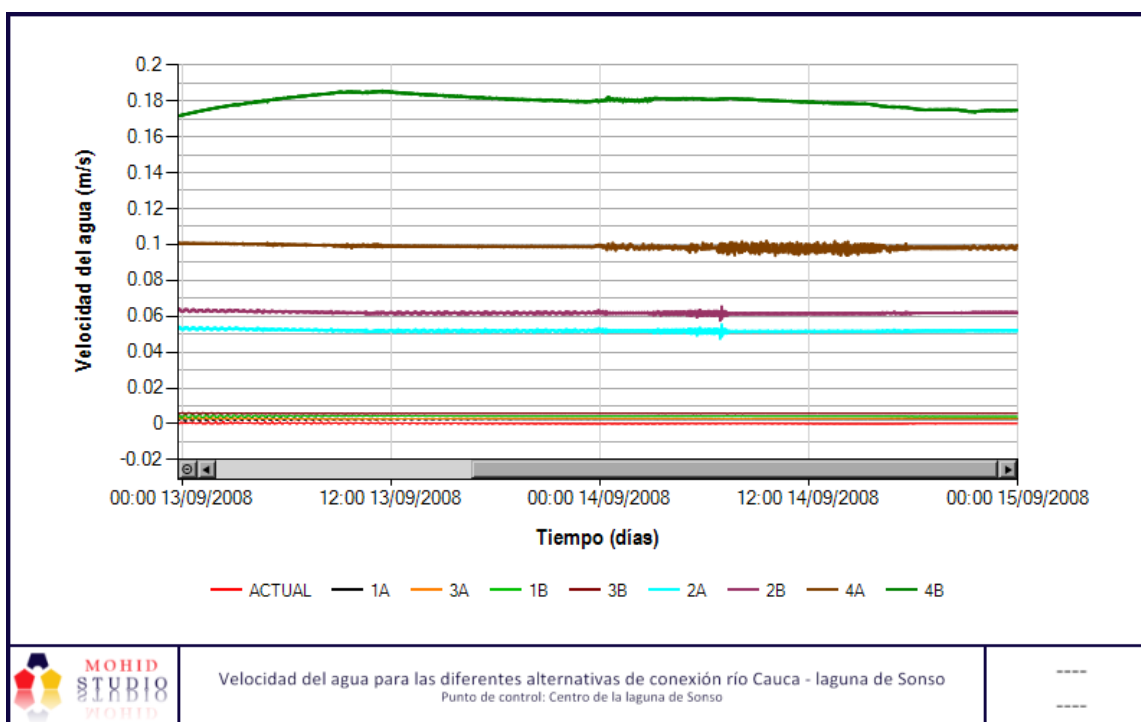


Figura 56. Velocidad del agua para las diferentes alternativas de conexión en el punto de control centro de la laguna de Sonso para los días 13 y 14 de septiembre de 2008

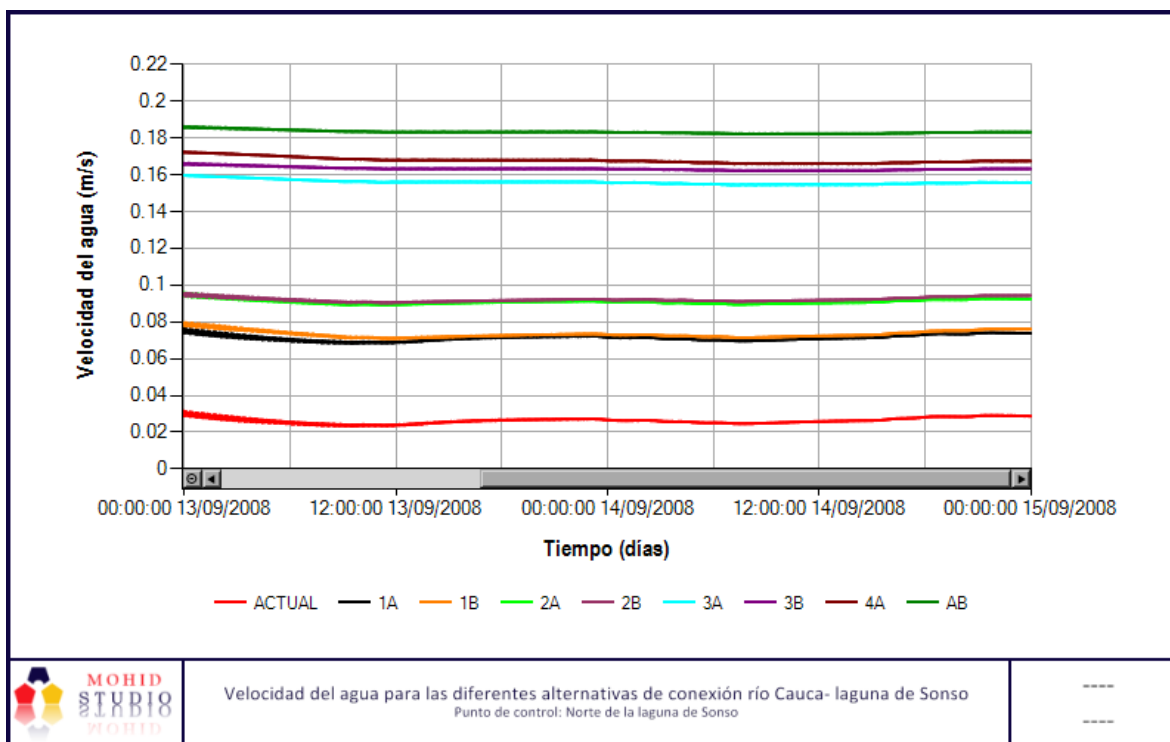


Figura 57. Velocidad del agua para las diferentes alternativas de conexión en el punto de control norte de la laguna de Sonso para los días 13 y 14 de septiembre de 2008

7.4.4. Análisis de resultados

El análisis de los resultados obtenidos para las diferentes alternativas de conexión río Cauca-laguna de Sonso planteadas y simuladas permite afirmar que en todas ellas se genera siempre una circulación de las corrientes al interior de la laguna en el sentido sur-norte, reduciendo significativamente la extensión de las zonas muertas (flujo nulo) existentes en la condición actual y ayudando a su oxigenación por medio de los recambios de agua. Sin embargo, es preciso indicar que las velocidades medias del flujo en la laguna (promedio en la vertical) presentan valores entre bajos y muy bajos, donde las menores velocidades se registran en la zona central y las mayores velocidades en la zona norte de la laguna.

La reducción de las áreas de las zonas muertas implica al mismo tiempo una disminución en las tasas de sedimentación, especialmente de los sedimentos más finos (arcillas y limos) con lo cual se incrementa el tiempo de colmatación de la laguna; no obstante, estimar las tasas de transporte de sedimentos y los volúmenes de sedimentación al interior de la laguna requieren estudios específicos, en los que se incluyan un programa riguroso de mediciones de campo y la modelación matemática hidrodinámica y sedimentológica con dichos propósitos.

Se observa que el número de conexiones río Cauca-laguna de Sonso tiene una influencia significativa en la hidrodinámica lagunar; a mayor número de canales mejor distribución de las

corrientes al interior de la laguna; sin embargo, se siguen contemplando algunas zonas muertas para las conexiones evaluadas en este estudio. Las alternativas 1 y 2 (que solo consideran canales de entrada al sur de la laguna) presentan zonas muertas en el perímetro lagunar a diferencia de las alternativas 3 y 4 (que consideran canales de entrada al sur de la laguna y canales de salida al norte de la misma) en las que predominan extensiones de zonas muertas en la parte suroriental de la laguna y en parte del costado oriental de ésta.

El análisis comparativo de los resultados obtenidos en las simulaciones de las distintas alternativas de conexión río Cauca-laguna de Sonso, tanto al sur como al norte de la misma, muestra que las mayores velocidades de las corrientes al interior de la laguna se alcanzan cuando se construyan dos canales de entrada al sur de la laguna y dos canales de salida al norte de la misma (es decir, las alternativas 4A y 4B); de igual forma se observa que las velocidades más altas se lograran cuando los canales de conexión río-laguna (tanto al sur como al norte) son más amplios (alternativa 4B, canales de 20 m de ancho).

En contraste con lo anterior, las menores velocidades del flujo al interior de la laguna se obtienen cuando se considera únicamente un canal de conexión río-laguna de 10 m de ancho, localizado al sur de la misma.

A continuación se presenta el análisis comparativo realizado de acuerdo con los resultados obtenidos en las simulaciones de las diferentes alternativas propuestas:

Comparación de las alternativas que incluyen y que excluyen canales de salida en el sector norte de la laguna

De acuerdo con los resultados obtenidos en la modelación matemática se observa consistentemente que al incluir canales de drenaje o salida al río Cauca en la parte norte de la laguna se generan corrientes con velocidades ligeramente superiores al interior de la misma (sectores sur, centro y norte) respecto a las alternativas que no contemplan tales canales.

Comparación de las alternativas que incluyen canales de salida al norte de la laguna

Según los resultados alcanzados en la simulación numérica de las alternativas de conexión que incluyen uno o dos canales de salida al norte de la laguna, cuando se consideran dos canales se obtienen velocidades de flujo ligeramente superiores en toda la superficie lagunar. Por otra parte, las mayores velocidades del flujo se obtienen cuando los canales de drenaje o salida son más anchos (20 m).

Comparación de las alternativas que sólo consideran canales de conexión al sur de la laguna

Las diferentes simulaciones realizadas muestran que se obtienen velocidades del agua levemente superiores cuando se construyen dos canales de conexión al sur de la laguna en lugar de un solo

canal. Igualmente se encontró que al incrementar el ancho de los canales de entrada al sur de la laguna se obtienen mayores velocidades del flujo en la misma.

8. CONCLUSIONES

En la presente investigación se evaluaron diferentes alternativas de conexión del sistema río Cauca-laguna de Sonso con el fin de mejorar la circulación de las corrientes al interior de la laguna. Para ello inicialmente se realizó la caracterización hidráulica e hidrológica de este sistema; posteriormente se calibró el modelo hidrodinámico MOHID para un periodo de invierno y se verificó para un periodo de verano. Finalmente se plantearon, simularon y analizaron diferentes alternativas de conexión río Cauca-laguna de Sonso a través de canales ubicados en los sectores sur y norte de la misma. A continuación se presentan las conclusiones más destacadas de este estudio:

Caracterización hidrológica e hidráulica la laguna de Sonso

La laguna de Sonso se ha venido deteriorando paulatinamente debido a las intervenciones que han alterado su comportamiento hidráulico natural, principalmente las afectaciones antropogénicas para la adecuación de tierras con fines de uso agrícola y ganadero, generando un impacto negativo en el ecosistema lagunar.

De acuerdo con la caracterización fisiográfica de la zona de estudio, el lecho de la laguna está constituido principalmente de limos finos, los cuales provienen de la carga de lavado en el río Cauca. Debido al fuerte deterioro de la cuenca del río Cauca, causado por la deforestación, los cambios en los usos del suelo, la minería, la ganadería extensiva, etc., la erosión en la cuenca ha aumentado, lo cual se traduce en un incremento en la carga de lavado transportada por el río Cauca. En consecuencia, y teniendo en cuenta la pobre circulación de las corrientes al interior de la laguna (principalmente en la zonas sur y centro de la misma), la colmatación de la misma se ha venido agudizando en los últimos años.

Debido a que la mayor parte del tiempo el nivel de agua en el río Cauca en el sitio de conexión actual con la laguna (confluencia del canal Caño Nuevo) es superado por el nivel de agua en la laguna de Sonso, la dirección del flujo predominante se presenta en sentido laguna- río Cauca; por consiguiente, el río Cauca abastece a la laguna solamente durante las crecientes, es decir, durante periodos relativamente cortos.

Debido a que la única conexión actual entre la laguna y el río Cauca es a través del canal Caño Nuevo, localizado sobre la parte norte de la laguna, la circulación de las corrientes en las zonas sur y centro de la laguna es prácticamente nula.

Los niveles de agua en el río Cauca en el sector próximo a la parte sur de la laguna superan la mayor parte del tiempo los niveles de agua en la misma. Esta situación resulta muy conveniente, por cuanto este gradiente o desnivel se puede aprovechar para conectar el río a la laguna en su parte sur y permitir el ingreso de agua desde el río, garantizando una circulación casi permanente en el sentido sur-norte.

Implementación de un modelo matemático hidrodinámico del sistema río Cauca-laguna de Sonso

Se implementó el modelo matemático hidrodinámico bidimensional MOHID, en el cual se logró representar de manera adecuada el comportamiento hidrodinámico del sistema río Cauca-laguna de Sonso. Se simuló un periodo de invierno para el proceso de calibración del modelo y uno de verano para la verificación del mismo, obteniéndose resultados bastante aceptables, con diferencias de unos pocos centímetros entre los niveles de agua calculados por el modelo y los niveles medidos en campo.

Se encontró apropiado representar el sistema río Cauca-laguna de Sonso por medio de una malla uniforme con un tamaño de celda de 10 m de lado; de igual forma se estableció un intervalo de tiempo computacional de 2.5 s, con lo cual se garantizó la estabilidad numérica del modelo.

La variación de los parámetros físicos y numéricos (rugosidad y viscosidad turbulenta) evaluados en el análisis de sensibilidad no mostró cambios significativos, tanto en la profundidad del agua como en la velocidad del flujo; no obstante, la variación de la viscosidad permitió establecer un valor adecuado para disminuir la inestabilidad presentada por el modelo en el periodo de adaptación.

La modelación de la condición actual de la laguna, la cual considera únicamente la conexión entre el río Cauca y la laguna de Sonso a través del canal Caño Nuevo, permitió corroborar su condición hidrodinámica crítica, presentando un patrón de flujo nulo en las zonas sur y centro de la laguna.

Planteamiento de alternativas para el mejoramiento de la hidrodinámica en la laguna de Sonso

Con el fin de mejorar el patrón de circulación de las corrientes al interior de la laguna de Sonso se plantearon y evaluaron, mediante la modelación matemática, ocho alternativas estructurales, en las cuales se consideraron distintos esquemas de conexión río-laguna, considerando uno y dos canales de entrada al sur de la laguna (canales de 10 m y 20 m de ancho) y uno y dos canales de salida al norte de ésta (también canales con anchos de 10 m y 20 m).

Análisis de las alternativas estructurales simuladas

Se puede inferir que las ocho alternativas evaluadas en este estudio, las cuales consideraron alguna conexión, presentaron una mejor condición hidrodinámica en cuanto al aumento de las velocidades

del flujo en sentido sur–norte y la reducción significativa de la extensión de las zonas muertas (flujo nulo), ayudando así a la oxigenación por medio de los recambios de agua respecto a la condición actual que solo cuenta con el canal de comunicación Caño Nuevo.

Se observó que a mayor número de canales mejor es la distribución de las corrientes al interior de la laguna; sin embargo, se siguieron presentando algunas zonas muertas para las conexiones evaluadas en este estudio. Las alternativas 1 y 2 (que solo consideraron canales de entrada al sur de la laguna) presentaron zonas muertas en el perímetro lagunar a diferencia de las alternativas 3 y 4 (que consideraron canales de entrada al sur de la laguna y canales de salida al norte de la misma) en las que predominaron extensiones de zonas muertas en la parte suroriental y en parte del costado oriental de la misma.

De acuerdo con los productos obtenidos se puede deducir que las velocidades de agua más altas se lograron cuando se implementaron dos canales al sur y dos de salida al norte de la laguna (es decir las alternativas 4A y 4B); de igual forma cuando estos canales de conexión se hicieron más amplios (alternativa 4B, canales de 20 m de ancho); a diferencia de las alternativas que consideraron un solo canal de conexión de 10 m de ancho al sur de la misma en donde se presentaron las menores velocidades del flujo (alternativas 1A y 3A).

Las diferentes simulaciones realizadas reflejaron velocidades del agua levemente superiores cuando se construyen dos canales de conexión al sur de la laguna en lugar de un solo canal. Igualmente se encontró que al incrementar el ancho de los canales de entrada al sur de la laguna se obtienen mayores velocidades del flujo en la misma.

Se encontró que las alternativas de conexión que incluyeron uno o dos canales de salida al norte de la laguna, obtenían velocidades de flujo ligeramente superiores en toda la superficie lagunar. Por otra parte, las mayores velocidades del flujo se lograron cuando los canales de drenaje o salida eran más anchos (20 m).

Se contempló en gran parte de los resultados alcanzados, que al incluir canales de drenaje al río Cauca en la parte norte de la laguna se generaron corrientes con velocidades ligeramente superiores al interior de la misma (sectores sur, centro y norte) respecto a las alternativas que no incluyeron tales canales.

Se encontró la alternativa 4B como la mejor condición hidrodinámica debido a que alcanzó los valores más altos de velocidades del flujo, además mostró la mejor distribución de las corrientes y la menor extensión de zonas muertas.

De acuerdo con los resultados evaluados de las diferentes alternativas respecto al mejoramiento de las condiciones hidrodinámicas al interior de la laguna, se puede decir que es necesario aumentar el número de conexiones en la parte norte de esta, ya que no es suficiente con la implementación de uno o más canales en la zona sur de la misma, debido a que persisten zonas muertas.

9. RECOMENDACIONES

Elaborar campañas donde se intensifiquen, optimicen y actualicen las mediciones de campo que permitan obtener información más precisa, continua y confiable, como la instalación de estaciones de monitoreo hidroclimatológico y sedimentológico en la laguna y sus tributarios.

Se requiere efectuar estudios de hidrología e hidrogeología, donde se determine con mayor precisión la interacción o intercambio que existe entre la laguna y el acuífero.

Ejecutar investigaciones para establecer un enfoque sistémico entre los componentes bióticos de este ecosistema lagunar y las intervenciones antrópicas actuales, además de las que se puedan presentar, para analizar su viabilidad.

Teniendo en cuenta el proceso de colmatación que viene experimentando la laguna de Sonso se recomienda realizar un estudio de impacto ambiental para establecer la viabilidad del dragado de los sedimentos en la laguna; a todo ello con el fin de recuperar su capacidad de almacenamiento y la regulación de caudales durante las crecientes en el río Cauca

Se deben adelantar estudios técnicos detallados (geomorfológico, geotécnico, hidrodinámico y sedimentológico) en los tramos del río Cauca aledaños a la laguna con el fin de determinar los sitios más apropiados para localizar las conexiones río-laguna (tanto para las estructuras de captación como para las estructuras de descarga o salida).

Se requiere realizar el diseño de estructuras sedimentadoras después de las estructuras de captación con el fin de minimizar el ingreso de sedimentos a la laguna.

Se recomienda en próximos estudios plantear, modelar y evaluar otras configuraciones o esquemas de conexión del sistema río Cauca-laguna de Sonso, en las cuales se consideren canales de conexión de mayor y menor amplitud a las contempladas en el presente estudio, así como sitios de conexión diferentes. Lo anterior con el fin de disminuir la extensión de las zonas muertas en la laguna.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Ayora, C; Prieto, M; y Minister, E. (2004). *Los sistemas terrestres y sus implicaciones medioambientales*. Madrid, España: Secretaría General Técnica (s.f.).
- Brito, M., Para, J., Aleman Romero, I., & Arias, R. (2011). Papel de la modelación matemática en la formación de los ingenieros. *ISSN 1815-5944*, 129-139.
- Alvarez, L., Cuadrado, D., & Perillo, G. (2011). Application of the Lagrangian tracers model in Anegada Bay, Argentina. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 7.
- ASOCARS-UNIVALLE. (2013). *PROPUESTA Y MODELACIÓN HIDRÁULICA DE ESCENARIOS PARA LA GESTIÓN DE INUNDACIONES EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CAUCA*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Barrero, A., & Pérez, M. (2005). *Fundamentos y Aplicaciones de la Mecánica de Fluidos*. Madrid, España: McGRAW-HILL.
- Barreto, I., Ezzatti, P., & Fossati, M. (2009). *Estudio inicial del modelo MOHID*. Montevideo Uruguay: Instituto de Computación – Facultad de Ingeniería Universidad de la República.
- Bifani, P. (1999). *Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible 4 ed.* Madrid: Instituto de Estudios Políticos Para América Latina y África.
- Bifani, P. (1999). *Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible 4 ed.* Madrid: Instituto de Estudios Políticos Para América Latina y África.
- Bocanegra, R citado por Ayala. (2008). Caracterización y modelación hidrodinámica de la laguna de sonso. Santiago de Cali, Valle, Colombia: Universidad del Valle.
- Bocanegra, Ricardo. (2008). Diseño hidráulico de las estructuras de drenaje necesarias para el mejoramiento del comportamiento hidrodinámico de la Laguna de Sonso en su zona norte. Santiago de Cali, Valle, Colombia: Universidad del Valle.
- Braunschweig, F., Fernandes, L., & Neves, R. (3 de Julio de 2007). *The object-oriented design of the integrated water modelling system MOHID*. Lisboa Portugal: Technical University of Lisbon.
- C.V.C. (2007). *PLAN DE MANEJO AMBIENTAL INTEGRAL HUMEDAL LAGUNA DE SONSO MUNICIPIO DE GUADALAJARA DE BUGA*. Santiago de Cali.
- Camarena Gallardo, P. (2012). La Matemática en el Contexto de la Ciencia y de la Modelación. *Cuadernos de Investigación y Formación en Educación Matemática*, 12.
- Cervantes, M. (2007). *Conceptos fundamentales sobre ecosistemas acuáticos y su estado en México, perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. México, DF.: Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Chapra, S. (1997). *Surface Water-Quality Modelling*. New York: The McGraw-Hill Companies. .

- Chow, V., & Conti, M. (1994). *Hidraulica de Canales Abiertos*. Santafé de Bogota, Colombia: McGraw-Hill Interamericana.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrologia Aplicada*. Bogotá D.C.: McGraw Hill.
- Convención Ramsar. (1971). Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional especialmente como. Ramsar Iran.
- Culebro Juárez, M., Gómez Herrera , W., & Torrez Sánchez , S. (2006). *Software Libre VS Software Propietario Ventajas y Desventajas* . México: Creative Commons .
- CVC. (2007). *PLAN DE MANEJO AMBIENTAL INTEGRAL HUMEDAL LAGUNA DE SONSO MUNICIPIO DE GUADALAJARA DE BUGA*. Santiago de Cali.
- CVC. (27 de Marzo de 2012). Obtenido de PESCADORES DE LA LAGUNA DE SONSO CAPACITADOS SOBRE ESPECIES INVASORAS: <http://cvcambiental.blogspot.com/2012/03/pescadores-de-la-laguna-de-sonso.html>
- CVC. (2013). *Proyecto de Modelacion del Rio Cauca*. Cali: Universidad del Valle.
- CVC. (20 de Noviembre de 2014). *Caracterización del Río Cauca, Tramo Salvajina- La Virginia; Capitulo 7*. Obtenido de <http://www.cvc.gov.co/cvc/Mosaic/descargarf1.html>
- CVC-Asoyotoco. (2007). *PLAN DE MANEJO AMBIENTAL INTEGRAL HUMEDAL LAGUNA DE SONSO MUNICIPIO DE GUADALAJARA DE BUGA*. Santiago de Cali.
- CVC-FUNDACIÓN SAMARENA. (2010). *Evaluacion de la Dinamica de las Aguas Subterraneeas en la Laguna de Sonso*. Cali-Valle del Cauca: Convenio 172-08.
- CVC-Univalle. (2004). *Calibración y Aplicaciones del Modelo de Calidad del Agua del Río Cauca, PROYECTO DE MODELACIÓN DEL RÍO CAUCA- PMC FASE II*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- CVC-Universidad del Valle. (2001). *Caracterización del río Cauca Tramo Salvajina- La Virginia* . Cali: Proyecto de Modelación del Río Cauca. PMC Fase I.
- De las Salas, G. (1987). *SUELOS Y ECOSISTEMAS FORESTALES*. San Jose, Costa Rica: Porvenir, S.A.
- Deltares. (2011). *Simulation of multi-dimensional hydrodynamic* . Delft3D-FLOW.User Manual.
- DHI. (2012). *Danish Hydraulic Institute MIKE 3 Flow Model FM - Hidrodynamic module*.
- Duguan. (1992). P.J. (ed) *UICN, Union Mundial Para la Naturaleza ;Conservación de Humedales, Un análisis de temas de actualidad y acciones necesarias*. Gland Suiza.
- EMGESA. (2006). *Definición y valorización técnica de alternativas de sectorización, operación y manejo y modelación hidrodinámica y de calidad del agua del embalse del Muña*. Bogotá: Empresa de Acueducto Y Alcantarillado de Bogotá; Universidad de los Andes.
- Espectador, E. (2 de Febrero de 2013). Humedales, Patrimonio que no se puede perder.

- Giménez, R. (2005). *Frío Industrial, Mantenimiento y Servicios a la Producción*. España: Marcombo S.A.
- Giménez, R. (2005). *Frío Industrial, Mantenimiento y Servicios a la Producción Capítulo 4*. España: Marcombo S.A.
- González, E. P. (1999). Los Humedales Españoles. 7.
- González Bemáldez y Montes (1989), citado por Garcial L, 1997. (s.f.). *Elementos de Medio Natural en la Provincia de Ciudad Real*. Ciudad Real : Universidad de Castilla.
- Hein, N., & Salett Biembengut, M. (2006). *MODELAJE MATEMÁTICO COMO MÉTODO DE INVESTIGACIÓN EN CLASES DE MATEMÁTICAS*. Blumenau Brasil: Universidade Regional de Blumenau.
- HIDROMECÁNICAS-INESCO-PLANES, U. T. (2001). *Estudio y Diseño de las Obras para el Control de Inundaciones en el Subproyecto Río sonso-Río Tuluá*. Cali-Valle del Cauca: Informe Geomorfologico.
- INGEOMINAS. (1985). *Geología Regional Area de Influencia Laguna de Sonso*. Cali.
- INH. (2010). *MODELOS MATEMÁTICOS HIDRODINÁMICOS DE CALIDAD DE AGUAS*. Santiago de Chile : Instituto Nacional de Hidráulica .
- Iriondo, J., Carignan , R., & Neiff, J. (1994). Large tropical south american wetland. *The ecology and Management of aquatic-terrestrial ecotones*, 156-165.
- Jimenez, A. A., & Berezowsky, M. (2004). *Modelación del flujo bidimensional horizontal con coordenadas curvilíneas generales*. Mexico D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, DF.
- Jimenez, A., Alemany, V., Alberola, M., & Solano, F. (2003). *Metodología para la calibracion de modelos de calidad de aguas*. Ingenieria del Agua.
- Jojoa, D. R. (2011). Estudio y Evaluacion de Alternativas para la Restauracion de la Hidrodinamica de la Laguna de Sonso. Santiago de Cali.
- Jordan de Urries, B. (22 de Febrero de 2013). *IBER. Potente software libre. Agua en 2D*. Recuperado el 2 de Febrero de 2015, de Blog de agua: <http://blogdelagua.com/inicio/internacional/iber-potente-software-libre-agua-en-2d-por-blanca-jordan-de-urries/>
- Kandus , P., & Quintana , R. (2008). *ECOSISTEMAS DE HUMEDAL Y UNA PERSPECTIVA HIDROGEOMÓRFICA COMO MARCO PARA LA VALORACIÓN ECOLÓGICA DE SUS BIENES Y SERVICIOS*. San Martin: Universidad Nacional de San Martín Grupo de Investigaciones en Ecología de Humedales (GIEH).
- Machado, H., & Campos, M. (2008). Reflexiones acerca de los ecosistemas agrícolas y la necesidad de su conservación. *Scielo_ Cuba*, 4.

- MADS. (2002). *Política Nacional para Humedales Interiores de Colombia*. Santa Fe de Bogotá: Ministerio de Ambiente, Ahora Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Maestre, A. (1995). Balance Hídrico de Ciénagas: Modelación Matemática e Implementación con un Sistema de Información Geográfica . *Tesis Maestría Ingeniería Civil* , Santafé de Bogotá D.C.
- MARETEC. (20 de NOVIEMBRE de 2014). *Marine Environment & Technology Center*. Obtenido de <http://www.maretec.org/#!contact-us>
- Martínez y Posso. (2004). Balance Hídrico del Humedal Laguna de Sonso y Caracterización de sus procesos Hidrodinámicos a través de la simulación numérica. *Trabajo de Grado*. Cali , Valle, Colombia: Universidad del Valle .
- Martins et al, F. (2000). *3D Modelling of the sado estuary using a new generic vertical discretization approach*. Lisboa Portugal : Universidad Técnica de Lisboa, HIDROMOD.
- Mellor , G., & Blumberg, A. (1987). *A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model* . Washington DC.: American Geophysical Union .
- MOHID. (20 de Noviembre de 2014). *Water Modelling System* . Obtenido de http://www.mohid.com/what_is_mohid.htm
- Molano. (1954). *Limnología Colombiana: Lagos,Lagunas,Represas, Ríos y Quebradas de Colombia*. División de Recursos Naturales.
- Molano Bravo, A. (s.f.). *Historia de la agonía de un Humedal vital en el Valle*.
- Molano Joaquin 1954 citado por Vallejo Joel. (2008). *Limnología Colombiana: Lagos,Lagunas,Represas, Ríos y Quebradas de Colombia*. División de Recursos Naturales.
- Molano,1954; citado por Vallejo A, 2008. (s.f.). *Limnología Colombiana: Lagos,Lagunas,Represas, Ríos y Quebradas de Colombia*. División de Recursos Naturales.
- Montiel, 2002; citado por Vallejo. (2008). Humedal Laguna de Sonso: Su Problemática Ambiental, Causas, Efectos y Proyectos Para su Recuperación. *CORPOMAG*, 44.
- Neves , R., Braunschweig, F., & Leitao, P. (2006). *Numerical Models as Decision Support Tools in Coastal Areas*. Lisboa Portugal: Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon.
- Núñez, J. (2001). *Manejo y Conservación de Suelos*. San Jose, Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.
- Olivares , V. (2009). Gestión Sostenible de Humedales . *SciELO_Chile*, 103-104.
- País, E. (9 de Abril de 2008). *La Laguna de Sonso "Pesca" Nuevo Problema*.
- Patiño, A. (1970). Una Batalla Ecológica: El rescate de la Laguna de Sonso. *Revista de Biología* , Universidad del Valle .

- Patiño, A. (1970). Una Batalla Ecológica: el rescate de la laguna de Sonso. *Revista de Biología, Universidad del Valle*.
- Pérez Rincón, M. (Agosto-Diciembre de 2015). *Campus Virtual Universidad del Valle*. Recuperado el 18 de Enero de 2016, de <https://campusvirtual.univalle.edu.co/moodle/course/view.php?id=18922§ion=3>
- Pérez, T. (12 de Mayo de 2012). *Modelo Hidrodinámico de la Inundabilidad en Zonas Rurales y Urbanas*. Recuperado el 4 de Febrero de 2015, de <http://ciep.ing.uaslp.mx/hidrosistemas/docs/TRIPTICO%20SOBEK%20V8.pdf>
- Petroni, R. (2005). *Hidráulica Marítima y de Estuarios*. Buenos Aires, Argentina: DUNKEN.
- Ramírez, C. (2016). *Modelación de Flujo Libre*. Cali, Colombia: Notas de Clase.
- Ramírez, 1995; citado por CVC. (2007). *ESTUDIO HIDRÁULICO Y DE SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE SONSO*.
- Rodríguez, D. M., & Jojoa, J. I. (2011). Estudio y evaluación de alternativas para la restauración de la hidrodinámica de la laguna de sonso. *Tesis*. Santiago de Cali, Valle, Colombia: Universidad del Valle.
- Sánchez, O. (2003). *Conservación de Ecosistemas Templados de Montaña en México*. México, D. F.: INE.
- Secretaría de la Convención de Ramsar. (2013). *Manual de la Convención, Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971)*. Obtenido de 6ª edición: <http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/manual6-2013-sp.pdf>
- Shames, I. (2001). *Mecánica de Fluidos*. Bogotá, D. C.: Mc Graw Hill.
- Simons, B., & Senturk, F. (1983). *Tecnología del Transporte de Sedimentos*.
- Tchobanoglous et al, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Colombia: Mc Graw Hill.
- ten Brink, P., Russi, D., Farmer, A., & Badura, T. (2013). *La Economía de los Ecosistemas y la Biodiversidad relativa al agua y los humedales*. Cambridge, Reino Unido.
- Tobasura, I. (2006). La Laguna de Sonso - Valle del Cauca, Colombia: Más de tres décadas de lucha ambiental. Un caso de historia ambiental. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 26.
- Toro, J. (2005). *Dinámica de Fluidos con introducción a la teoría de la turbulencia*. Bogotá D.C.: Ediciones Uniandes.
- Universidad del Cauca. (S.F). *Univirtual*. Recuperado el 18 de Marzo de 2016, de <http://univirtual.unicauca.edu.co/>
- Valdes et al, T. (2005). *Ecología y Medio Ambiente*. Ciudad de México.

- Valdes et al., T. (2005). *Ecología y Medio Ambiente*. Ciudad de México.
- Valdes, T., Meave, J., Lilo, J., & Santana, Z. (2005). *Ecología y Medio Ambiente*. Ciudad de México: PEARSON EDUCACIÓN, Área de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México .
- Vallejo , J. A. (2008). Modelación Hidrodinámica y Sedimentológica Laguna de Sonso. *Tesis*. Santiago de Cali, Valle, Colombia : Universidad del Valle.
- Van Den Berg, J., & Van Gelder, A. (2002). *The importance of breaching as a mechanism of subaqueous slope failure in fine sand. sedimentology*.
- Van Rijn, L. (1993). *Principios de Transporte de Sedimentos en Ríos, Estuarios y Mares Costeros*. New Netherlands: Aqua Publications.
- Vélez, C. A. (2006). Integrated Water Quality and Ecosystem Modelling a Case Study for Sonso Lagoon, Colombia. Master of Science Thesis WSE-HI 06-17. UNESCO-IHE Institute for Water Education. Delft, Países Bajos.
- Vélez, Carlos Augusto, 2006 citado por Rodriguez y Jojoa. (2011). Integrated Water Quality and Ecosystem Modelling a Case Study for Sonso Lagoon, Colombia. Master of Science Thesis WSE-HI 06-17. UNESCO-IHE Institute for Water Education. Delft, Países Bajos.
- Vide, J. (2007). *Ingeniería de Ríos*. Barcelona, España: Universidad Politecnica de Catalunya.