

**Universidad de Los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental**

**Proyecto de grado Ingeniería Ambiental
Modelación del sistema simplificado río San Jorge - ciénaga de Ayapel**

**Por: Laura Patricia Torres Rojas
Asesor: Luis Alejandro Camacho Botero, I.C., M.Sc., Ph.D.**

Bogotá D.C, Diciembre de 2015

Tabla de contenido

1. Introducción	7
1.1. Alcance y justificación	7
1.2. Aspectos generales	8
1.3. Objetivos	10
1.3.1. General	10
1.3.2. Específicos	10
1.4. Metodología	11
1.5. Resultados principales	13
1.5. Resumen de contenido	14
2. Marco Teórico	15
2.1. Región de La Mojana	15
2.1.1. Localización y características físicas	15
2.1.2. Componentes del sistema de humedales	17
2.1.3. Dinámica y funcionamiento anual del sistema de humedales	20
2.1.4. Ecosistemas estratégicos	24
2.1.5. Procesos hidrológicos principales	26
2.2. Modelo MDLC- QUASAR EXTENDIDO	27
2.2.1. Modelo de transporte de zona muerta agregada (ADZ)	27
2.2.2. Modelo multilíneal discreto de retraso – cascada (MDLC)	29
2.2.3. Modelo integrado de transporte MDLC-ADZ	30
2.2.3. Modelo integrado de transporte MDLC-ADZ-QUASAR de calidad del agua	31
3. Metodología empleada	34
3.1. Recolección de información hidrometeorológica	34
3.2. Método de llenado de datos faltantes	35
3.2.1. Precipitación	35
3.2.2. Temperatura, humedad relativa y evaporación	36
3.2.3. Nivel	36
3.2.4. Caudal	36
3.3. Análisis de calidad, consistencia y validez de información	37
3.3.1. Precipitación	37
3.3.2. Temperatura	40
3.3.3. Humedad relativa	41
3.3.4. Evaporación	42
3.3.5. Nivel	43
3.3.6. Caudal	47
3.4. Construcción de modelo simplificado río San Jorge – ciénaga de Ayapel	51
3.4.1. Modelación caños de salida río Cauca	52
3.4.2. Modelación serie de escorrentía: cuenca ciénaga	60
3.4.3. Construcción modelo río San Jorge – ciénaga de Ayapel	68
3.4.4. Calibración parámetros caño simplificado de conexión	75
4. Resultados y discusión	76
4.1. Resultados modelo caños de salida río Cauca	76
4.2. Resultados modelo lluvia-escorrentía cuenca ciénaga	88
4.3. Resultados proceso de calibración de parámetros caño simplificado de conexión	90
4.3.1. Variación de parámetros	90
4.3.2. Variación de métodos de integración y tolerancias	91
5. Conclusiones y recomendaciones	97
5.1. Conclusiones	97
5.2. Recomendaciones	98
6. Referencias Bibliográficas	99

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1.....	27
Ecuación 2.....	28
Ecuación 3.....	28
Ecuación 4.....	28
Ecuación 5.....	28
Ecuación 6.....	29
Ecuación 7.....	29
Ecuación 8.....	29
Ecuación 9.....	29
Ecuación 10.....	30
Ecuación 11.....	30
Ecuación 12.....	30
Ecuación 13.....	31
Ecuación 14.....	31
Ecuación 15.....	31
Ecuación 16.....	31
Ecuación 17.....	32
Ecuación 18.....	33
Ecuación 19.....	33
Ecuación 20.....	33
Ecuación 21.....	33
Ecuación 22.....	33
Ecuación 23.....	35
Ecuación 24.....	62

Índice de Figuras

Figura 1. Región de La Mojana	9
Figura 2. Leyenda, mapa fisiografía, región de La Mojana	15
Figura 3. Mapa fisiografía región de La Mojana	16
Figura 4. Sistemas cenagosos principales, región de La Mojana	18
Figura 5. Representación gráfica de los parámetros tiempo de viaje (t) y tiempo de retraso adectivo (τ).....	27
Figura 6. Esquema sistema simplificado río San Jorge – ciénaga de Ayapel – río Cauca	51
Figura 7. Esquema general del modelo caños de salida río Cauca	53
Figura 8. Esquema general bloque de ingreso de datos	54
Figura 9. Esquema general bloque de canal común.....	54
Figura 10. Esquema general bloque de canal antes de desborde.....	58
Figura 11. Esquema general bloque de desborde.....	58
Figura 12. Esquema general bloque de balance.....	59
Figura 13. Esquema general bloque de generación de variable tiempo	59
Figura 14. Parámetros de simulación, modelo caños desborde río Cauca	59
Figura 15. Esquema general modelo cuenca ciénaga HEC-HMS.....	60
Figura 16. Características definidas a sub-cuenca modelada.....	61
Figura 17. Intercepción definida HEC-HMS	61
Figura 18. Pérdidas definidas HEC-HMS	62
Figura 19. Transformación definida, HEC-HMS	62
Figura 20. Rango de elevaciones cuencas aportantes a ciénaga de Ayapel.....	63
Figura 21. Flujos base mensuales definidos, HEC-HMS	64
Figura 22. Menú modelo meteorológico definido, HEC-HMS	64
Figura 23. Modelo meteorológico definido, HEC-HMS	65
Figura 24. Parámetros de solarígrafo definidos, HEC-HMS	65
Figura 25. Pesos de precipitación definidos, HEC-HMS	65
Figura 26. Coeficiente de sequedad de Priestley-Taylor definido, HEC-HMS	65
Figura 27. Variables atmosféricas definidas, HEC-HMS.....	65
Figura 28. Especificaciones de control definidas, HEC-HMS.....	66
Figura 29. Serie de temperatura introducida al modelo, HEC-HMS	66
Figura 30. Serie de radiación solar introducida al modelo, HEC-HMS	68
Figura 31. Esquema general modelo simplificado río San Jorge – ciénaga de Ayapel	69
Figura 32. Bloque de ingreso de datos río San Jorge, modelo río-ciénaga	71
Figura 33. Bloque canal antes de ciénaga, modelo río-ciénaga	71
Figura 34. Bloque canal después de ciénaga, modelo río-ciénaga	71
Figura 35. Bloque balance, modelo río-ciénaga	72
Figura 36. Bloque Ayapel, modelo río-ciénaga	72
Figura 37. Parámetros bloque Bal2	73
Figura 38. Resultados corrida HEC-HMS cuenca ciénaga.....	89

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Curva de calibración estación Marralu	37
Gráfica 2. Curva de masa, precipitación, estación Ayapel.....	37
Gráfica 3. Curva de masa, precipitación, estación Cecilia	38
Gráfica 4. Curva de masa, precipitación, estación La Ilusión	38
Gráfica 5. Box plot precipitación anual, estación La Ilusión	39
Gráfica 6. Box plot precipitación anual, estación Cecilia.....	39
Gráfica 7. Box plot precipitación anual, estación Ayapel	39
Gráfica 8. Box plot precipitaciones mensuales, estación La Ilusión	40
Gráfica 9. Box plot precipitaciones mensuales, estación Cecilia	40
Gráfica 10. Box plot precipitaciones mensuales, estación Ayapel	40
Gráfica 11. Box plot temperatura anual, estación Ayapel.....	41
Gráfica 12. Box plot temperatura mensual, estación Ayapel.....	41
Gráfica 13. Box plot humedad relativa anual, estación Ayapel	42
Gráfica 14. Box plot humedad relativa mensual, estación Ayapel	42
Gráfica 15. Box plot evaporación anual, estación Ayapel.....	42
Gráfica 16. Box plot evaporación mensual, estación Ayapel	43
Gráfica 17. Curva de masa, niveles, estación Beirut.....	43
Gráfica 18. Curva de masa, niveles, estación La Coquera.....	43
Gráfica 19. Curva de masa, niveles, estación Las Flores.....	44
Gráfica 20. Curva de masa, niveles, estación Marralu	44
Gráfica 21. Box plot nivel anual, estación Beirut.....	45
Gráfica 22. Box plot nivel anual, estación La Coquera.....	45
Gráfica 23. Box plot nivel anual, estación Las Flores.....	45
Gráfica 24. Box plot nivel anual, estación Marralu	46
Gráfica 25. Box plot nivel mensual, estación Beirut.....	46
Gráfica 26. Box plot nivel mensual, estación La Coquera	46
Gráfica 27. Box plot nivel mensual, estación Las Flores	47
Gráfica 28. Box plot nivel mensual, estación Marralu	47
Gráfica 29. Curva de masa, caudal, estación La Coquera	47
Gráfica 30. Curva de masa, caudal, estación Las Flores	48
Gráfica 31. Curva de masa, caudal, estación Marralu.....	48
Gráfica 32. Box plot caudal anual, estación Marralu	49
Gráfica 33. Box plot caudal anual, estación Las Flores.....	49
Gráfica 34. Box plot caudal anual, estación La Coquera.....	49
Gráfica 35. Box plot caudal mensual, estación Marralu	50
Gráfica 36. Box plot caudal mensual, estación Las Flores	50
Gráfica 37. Box plot caudal mensual, estación La Coquera	50
Gráfica 38. Regresión de velocidad, caño Barro.....	56
Gráfica 39. Regresión de profundidad, caño Barro	56
Gráfica 40. Regresión de velocidad, caño Muñoz	56
Gráfica 41. Regresión de profundidad, caño Muñoz	57
Gráfica 42. Serie de precipitación empleada en modelo HEC-HMS.....	67
Gráfica 43. Serie de precipitación, modelo simplificado río San Jorge-ciénaga de Ayapel	69
Gráfica 44. Serie de evaporación, modelo simplificado río San Jorge-ciénaga de Ayapel.....	70
Gráfica 45. Serie de esorrentía diaria de entrada modelo río-ciénaga	70
Gráfica 46. Serie de caudales río Cauca, antes de salida de caño Barro	77
Gráfica 47. Serie de caudales río Cauca, después de salida de caño Barro	77
Gráfica 48. Serie de caudales río Cauca, antes de salida de caño Pescado	77
Gráfica 49. Serie de caudales río Cauca, después de salida de caño Pescado	78
Gráfica 50. Serie de caudales río Cauca, antes de salida de caño Muñoz	78
Gráfica 51. Serie de caudales río Cauca, después de salida de caño Muñoz.....	78

Gráfica 52. Serie de niveles río Cauca, antes de salida de caño Barro	79
Gráfica 53. Serie de niveles río Cauca, después de salida de caño Barro	79
Gráfica 54. Serie de niveles río Cauca, antes de salida de caño Pescado	79
Gráfica 55. Serie de niveles río Cauca, después de salida de caño Pescado	80
Gráfica 56. Serie de niveles río Cauca, antes de salida de caño Muñoz	80
Gráfica 57. Serie de niveles río Cauca, después de salida de caño Muñoz.....	80
Gráfica 58. Serie de SST río Cauca, antes de salida de caño Barro	81
Gráfica 59. Serie de SST río Cauca, después de salida de caño Barro	81
Gráfica 60. Serie de SST río Cauca, antes de salida de caño Pescado	81
Gráfica 61. Serie de SST río Cauca, después de salida de caño Pescado	82
Gráfica 62. Serie de SST río Cauca, antes de salida de caño Muñoz	82
Gráfica 63. Serie de SST río Cauca, después de salida de caño Muñoz.....	82
Gráfica 64. Serie de caudales caño Barro, después de salida de río Cauca	83
Gráfica 65. Serie de niveles caño Barro, después de salida de río Cauca	83
Gráfica 66. Serie de caudales caño Barro, antes de encuentro con caño Pescado	83
Gráfica 67. Serie de niveles caño Barro, antes de encuentro con caño Pescado	84
Gráfica 68. Serie de caudales caño Barro, antes de entrada a ciénaga de Ayapel	84
Gráfica 69. Serie de niveles caño Barro, antes de entrada a ciénaga de Ayapel	84
Gráfica 70. Serie de caudales caño Pescado, después de salida de río Cauca	85
Gráfica 71. Serie de niveles caño Pescado, después de salida de río Cauca	85
Gráfica 72. Serie de caudales caño Pescado, antes de encuentro con caño Barro	85
Gráfica 73. Serie de niveles caño Pescado, antes de encuentro con caño Barro	86
Gráfica 74. Serie de caudales caño Muñoz, después de salida de río Cauca.....	86
Gráfica 75. Serie de niveles caño Muñoz, después de salida de río Cauca.....	86
Gráfica 76. Serie de caudales caño Muñoz, antes de entrada a ciénaga de Ayapel.....	87
Gráfica 77. Serie de niveles caño Muñoz, antes de entrada a ciénaga de Ayapel.....	87
Gráfica 78. Análisis escala temporal, resultados modelo caños	88
Gráfica 79. Serie de escorrentía cuenca ciénaga obtenida	89
Gráfica 80. Niveles registrados estación Beirut, ciénaga de Ayapel.....	90
Gráfica 81. Comparación niveles modelados y observados, después de calibración, Ayapel ...	93
Gráfica 82. Área superficial modelada ciénaga de Ayapel	93
Gráfica 83. Volumen de almacenamiento modelado ciénaga de Ayapel	93
Gráfica 84. Concentración SST modelada ciénaga de Ayapel	94
Gráfica 85. Caudal de salida, ciénaga de Ayapel a río San Jorge, caño simplificado de conexión	94
Gráfica 86. Caudal río San Jorge, aguas abajo ciénaga de Ayapel.....	94
Gráfica 87. Concentración SST río San Jorge, aguas abajo ciénaga de Ayapel.....	95
Gráfica 88. Análisis escala temporal, resultados modelo ciénaga	95

Índice de Tablas

Tabla 1. Determinantes de calidad del agua modelados	32
Tabla 2. Estaciones hidro-meteorológicas IDEAM	34
Tabla 3. Longitud del registro de valores totales diarios de precipitación estaciones pluviométricas	34
Tabla 4. Longitud del registro de valores totales diarios de precipitación estaciones climatológicas ordinarias	34
Tabla 5. Longitud del registro de valores medios diarios de temperatura estaciones climatológicas ordinarias	34
Tabla 6. Longitud del registro de valores medios diarios de evaporación estaciones climatológicas ordinarias	35
Tabla 7. Longitud del registro de valores medios diarios de humedad relativa estaciones climatológicas ordinarias	35
Tabla 8. Longitud del registro de valores medios diarios de caudal estaciones limnimétricas y limnigráficas	35
Tabla 9. Longitud del registro de valores medios diarios de nivel estaciones limnimétricas y limnigráficas	35
Tabla 10. Coeficientes de profundidad y velocidad y profundidad de desborde, río Cauca	55
Tabla 11. Valores empleados regresiones caño Barro	55
Tabla 12. Valores empleados regresiones caño Muñoz.....	56
Tabla 13. Cálculo de tiempo de concentración cuenca	63
Tabla 14. Áreas ocupadas por cada estación dentro de cuenca	67
Tabla 15. Parámetros bloques de canal modelo río-ciénaga	72
Tabla 16. Coeficientes de área y volumen ciénaga de Ayapel	74
Tabla 17. Medidas de tendencia central, serie de esorrentía cuenca ciénaga.....	89
Tabla 18. Coeficiente de Nash-Sutcliffe para variación de W	90
Tabla 19. Coeficiente de Nash-Sutcliffe para variación de P_{ci}	91
Tabla 20. Coeficiente de Nash-Sutcliffe para variación de $Cota_{ci}$	91
Tabla 21. Coeficiente de Nash-Sutcliffe para variación de H_0	91
Tabla 22. Coeficientes de Nash-Sutcliffe para variación de método de solución y tolerancia...	92
Tabla 23. Medidas de tendencia central, serie ventanas temporales, modelo ciénaga	95

1. Introducción

1.1. Alcance y justificación

En el año 2011, la Universidad Nacional de Colombia y el Departamento Nacional de Planeación (DNP) celebraron el convenio interadministrativo UN-DNP No. 336/2011 con el fin de realizar estudios, análisis y recomendaciones para el ordenamiento ambiental y el desarrollo territorial de la región de La Mojana. Este convenio tenía como objeto particular, el planteamiento de estrategias a corto plazo y recomendaciones en obras de infraestructura para la región. Uno de los principales productos obtenidos, en el desarrollo del convenio, fue la implementación de una herramienta matemática integrada de cantidad y calidad del agua del sistema hídrico de la región. Dentro de esta implementación, se utilizó información hidráulica primaria, levantada en el estudio, además de alguna información secundaria disponible. Igualmente, se realizó el proceso de calibración de la herramienta de forma satisfactoria (Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación, 2012). Hasta el punto desarrollado para ese proyecto, la herramienta permitía calcular:

- Caudales y niveles en ríos Cauca, San Jorge, Magdalena (Brazo de Loba), los principales caños interiores del delta hídrico interior, caños de interconexión entre ciénagas; además, de niveles de agua en las ciénagas bajo diferentes condiciones hidrológicas e hidrogramas de entrada.
- Cargas de sedimentos en suspensión a la entrada del sistema de La Mojana permitiendo estimar sedimentación en ríos, caños y ciénagas bajo diferentes escenarios.
- Calidad bacteriológica, biológica y físico- química del agua e índice de estado limnológico en ríos, caños principales y ciénagas.

Sin embargo, después del desarrollo de esta herramienta, se han realizado esfuerzos importantes de medición de niveles, tanto en los ríos Cauca y San Jorge como en los caños de interconexión y ciénagas y, adicionalmente, se cuenta con nueva información hidrometeorológica registrada en la zona. De esta forma, el objeto del proyecto de grado es incluir la nueva información disponible dentro de la modelación previamente realizada. Específicamente, se pretende realizar la modelación de la ciénaga de Ayapel en su relación con el río San Jorge. Lo anterior, llevaría a contar con un modelo más completo de este sistema, dado que, entre otra información, sería posible incluir datos de la ola invernal que se presentó en Colombia entre 2010 y 2011 y que generó, entre otros efectos, la rotura de 214 metros de terraplén.

1.2. Aspectos generales

La Mojana es una subregión de la Costa Caribe colombiana, que se caracteriza, entre otros aspectos, por ser una zona de humedales productivos que fisiográficamente pertenece a la depresión Momposina (Aguilera Díaz, 2004) (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003). La región cumple funciones reguladoras de los caudales de los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge, amortiguando inundaciones al distribuir las cabezas de agua, originadas por lluvias en las partes altas de la región Andina y facilitando la decantación y acumulación de sedimentos transportados por los ríos (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

La Región de La Mojana ha sido objeto variedad de estudios y proyectos, entre los cuales Aguilera (2004) destaca:

- Estudios de la Misión Colombo-Holandesa (1977): Se recomendó la construcción de carreteras, así como, la limpieza, adecuación e interconexión de sistemas de canales para comunicar la zona y solucionar la navegabilidad de sus caños y ríos. Estas obras quedaron inconclusas o no se han realizado.
- Proyectos del Plan Mojana adelantados por Corpoica en convenio con el INAT (1998): Caracterización biofísica y adaptabilidad de la producción agropecuaria sostenible en los ecosistemas de la región.
- Programa de Desarrollo sostenible de región de La Mojana (PDMS), dirigido por el Departamento de Planeación Nacional (DNP) con el apoyo y cooperación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2003): Marco de referencia para el ordenamiento ambiental y manejo de recursos naturales, administración de tierra, fortalecimiento institucional y desarrollo agropecuario.

La degradación ambiental y el uso inadecuado de recursos en la región de La Mojana requieren ordenamiento ambiental y manejo cuidadoso de recursos naturales, con el fin de garantizar equilibrio entre las funciones naturales y productivas. Lo anterior, implica un manejo sostenible de bosques, humedales y otros ecosistemas presentes en la zona; así como la conservación y uso racional de la biodiversidad asociada con los mismos, la concertación con comunidades, la investigación y la validación de alternativas productivas y de gestión del recurso hídrico. De esta forma, sería posible orientar el desarrollo regional de forma armónica con la base natural de recursos con la que se cuenta (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

Por otro lado, dentro de los esfuerzos más actuales, que se han realizado con el fin de caracterizar la región de la Mojana se encuentra el convenio interadministrativo UN-DNP No. 336/2011 cuyas principales actividades y resultados se describieron en la sección Alcance y Justificación. Vale la pena mencionar que el principal producto del convenio, antes mencionado, es la herramienta computacional integrada de calidad y

cantidad de agua para la región (Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación, 2012).

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, puede considerarse que un modelo matemático, hidráulico y de calidad del agua, de un cuerpo de agua, que se encuentre, adecuadamente calibrado con datos de campo, es útil para el análisis, planteamiento y diseño de obras hidráulicas. Igualmente, este tipo de herramienta permite evaluar las condiciones actuales del sistema modelado sometido a diferentes escenarios hidrológicos y simular los efectos que tienen, en cantidad y calidad del agua, los cambios de flujo en las fronteras del sistema o la introducción de estructuras hidráulicas. Finalmente, este tipo de modelo permite evaluar los efectos de alternativas de manejo hidráulico, sedimentológico y de saneamiento hídrico en la zona de estudio (Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación, 2012).

En este documento, se pretende presentar la modelación específica del sistema río San Jorge – Ciénaga de Ayapel, basado en la herramienta integrada de cantidad y calidad aplicada por la Universidad Nacional de Colombia y desarrollada por el profesor Luis Alejandro Camacho Botero (Camacho L. , 1997) (Camacho & Lees, 2000). Lo anterior, teniendo en cuenta que desde la finalización del Convenio, se han realizado esfuerzos importantes de medición de niveles, tanto en los ríos Cauca y San Jorge como en los caños de interconexión y ciénagas y, adicionalmente, se cuenta con nueva información hidro-meteorológica registrada en la zona.



Figura 1. Región de La Mojana
Fuente: DNP & FAO, 2003

1.3. Objetivos

1.3.1. General

- Realizar la modelación simplificada del sistema río San Jorge – ciénaga de Ayapel, para incluir información hidrometeorológica y de niveles reciente.

1.3.2. Específicos

- Recopilar información reciente del sistema de La Mojana; en especial, niveles de ciénagas y caños y registros de precipitación, temperatura, humedad relativa y evaporación de los últimos años.
- Realizar la modelación del sistema simplificado río San Jorge – Ciénaga de Ayapel.
- Introducir información encontrada en el modelo desarrollado.
- Correr el modelo desarrollado para las series históricas registradas y evaluar su capacidad predictiva de niveles en la ciénaga de interés.
- Concluir sobre las mejores alternativas de gestión para la zona de acuerdo con los resultados obtenidos.

1.4. Metodología

La metodología empleada en el desarrollo del presente documento puede ser dividida en 4 partes principales:

1. Recolección de información hidro-meteorológica.
2. Llenado de datos faltantes.
3. Análisis de calidad, consistencia y validez de información.
4. Construcción de modelo simplificado río San Jorge – Ciénaga de Ayapel.

Las 3 primeras partes corresponden al procedimiento llevado a cabo para la selección de estaciones hidro meteorológicas, útiles en la modelación a realizar; así, como el tratamiento que se debió dar a las series de variables meteorológicas e hidrológicas registradas en las mismas. El proceso detallado, que se llevó a cabo en estas etapas, puede ser consultado en la sección ‘Metodología empleada’ pero, en términos generales, consistió en el completado de datos faltantes (específico para cada variable) y la realización de pruebas para evaluar la calidad, consistencia y validez de la información. Esta última parte se realizó mediante el empleo de curvas de masa y diagramas de box-wisker a nivel global y mensual.

Respecto a la última parte (Construcción de modelo simplificado río San Jorge-Ciénaga de Ayapel), esta fue realizada en 4 etapas y consistió en la modelación aproximada del sistema río Cauca-ciénaga de Ayapel-río San Jorge en el periodo 1980-2013. A continuación se presenta una breve descripción de las etapas desarrolladas:

1. **Modelación caños de salida río Cauca:** Se trató de la modelación (mediante la utilización del entorno gráfico de Matlab, Simulink,) de la salida de caños que nacen desde el río Cauca y desembocan en la ciénaga de Ayapel. En esta parte, se emplearon los bloques desarrollados por Camacho (1997) y Camacho *et al* (2000), que fueron utilizados en la modelación del Canal del Dique, realizada por la Universidad Nacional de Colombia (Universidad Nacional de Colombia & CORMAGDALENA, 2007). Las series de caudales y concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST) fueron definidas de acuerdo a la información obtenida del IDEAM. Los coeficientes de velocidad y profundidad de los diferentes tramos del río Cauca, así como la profundidad de desborde de cada uno, se tomaron de la modelación hidráulica que la Universidad Nacional (2012) realizó del mismo. Los parámetros antes mencionados, en el caso de los caños, fueron definidos mediante el empleo de regresiones, a partir de datos de aforos.
2. **Modelación serie de escorrentía, cuenca ciénaga:** Se utilizó el software HEC-HMS (U.S Army Corps of Engineers, 2015) para definir las series de escorrentía, a nivel diario, que generó la cuenca aferente a la ciénaga de Ayapel, en el periodo de modelación. El modelo realizado requirió la inclusión de series de precipitación, temperatura y radiación; así, como la determinación de parámetros de la cuenca como área y tiempo de concentración. El modelo realizado se basó en el utilizado por la Universidad Nacional, en la modelación del Canal del Dique, de la ciénaga de Aguas Claras.

3. **Construcción modelo río San Jorge-ciénaga de Ayapel:** Esta etapa también fue realizada en Simulink y consistió en la utilización de los bloques, desarrollados por Camacho (1997) y Camacho *et al* (2000) y empleados por la Universidad Nacional en la modelación del Canal del Dique, para la construcción del modelo que representa la interacción de la ciénaga de Ayapel con el río San Jorge, a través de un único caño simplificado de conexión. Las características de la ciénaga (coeficientes de curvas cota-área-volumen) así como las series de caudal y concentraciones de sólidos suspendidos totales, fueron definidas de acuerdo a lo establecido por la Universidad Nacional (2012), para la región de la Mojana y a la información obtenida del IDEAM.
4. **Calibración de parámetros caño simplificado de conexión:** El proceso de calibración que se llevó a cabo consistió en la modificación de cuatro parámetros principales del modelo:
1. Diferencia de altura fondo ciénaga ($Cota_{ci}$)
 2. P ciénaga (P_{ci})
 3. Ancho del canal (W)
 4. Nivel inicial en la ciénaga (H_0)

Los parámetros se modificaron de forma independiente y se evaluó, en cada cambio realizado, el coeficiente de Nash-Sutcliffe de los valores de nivel en la ciénaga modelados respecto a los registrados en la estación limnimétrica Beirut. La evaluación del coeficiente de Nash-Sutcliffe se realizó mediante la utilización de la función 'efficien.m' (Camacho, 1998) mientras que la interpolación se llevó a cabo utilizando la función 'interp1.m'. Finalmente, con los valores óptimos de los parámetros, se evaluaron diferentes combinaciones de metodologías de solución y tolerancias de tal manera que se obtuviera la mejor combinación posible entre resolución temporal y medida de bondad de ajuste.

1.5. Resultados principales

Los principales resultados que se obtuvieron después de la aplicación de la metodología, antes explicada, consistieron en lo siguiente:

- Series de caudales, niveles y concentraciones de sólidos suspendidos totales en diferentes tramos de caños Barro, Pescado y Muñoz, en el periodo de modelación (1980-2013).
- Series de caudales, niveles, caudales de desborde o laterales y concentraciones de sólidos suspendidos totales en diferentes tramos del río Cauca; desde la estación La Coquera (antes de la entrada del río Nechí) hasta antes de la salida del caño San Matías (después de la entrada del río Nechí), en el periodo de modelación (1980-2013).
- Serie de escorrentía, a nivel diario, generada por la cuenca que drena directamente a la ciénaga de Ayapel; durante el periodo de modelación (1980-2013).
- Modelo simplificado del sistema río San Jorge-ciénaga de Ayapel calibrado. Lo anterior implica, que se obtuvo un conjunto de parámetros de modelo río-ciénaga que aseguran mejor ajuste a datos históricos de nivel en la ciénaga de Ayapel.
- Metodología de solución de ecuaciones diferenciales y tolerancia asociada, que aseguran la mejor combinación posible entre resolución temporal de resultados y medida de bondad de ajuste, en modelo río-ciénaga.
- Serie de niveles modelados en la ciénaga de Ayapel durante el período de estudio (1980-2013).
- Serie de áreas superficiales modeladas en la ciénaga de Ayapel durante el período de estudio (1980-2013).
- Serie de volúmenes de almacenamiento modelados en la ciénaga de Ayapel durante el período de estudio (1980-2013).
- Serie de concentraciones de sólidos suspendidos totales modeladas en la ciénaga de Ayapel durante el período de estudio (1980-2013).
- Serie de caudales de salida de la ciénaga de Ayapel hacia el río San Jorge durante el periodo de estudio (1980-2013).
- Series de caudales, niveles, caudales de desborde o laterales y concentraciones de sólidos suspendidos totales en diferentes tramos del río San Jorge; desde la estación Marralu hasta 1 kilómetro después de la ciénaga de Ayapel, en el periodo de modelación (1980-2013).

1.5. Resumen de contenido

En esta sección se hará una breve descripción del contenido, que se podrá encontrar, en las siguientes secciones del presente documento. En primer lugar, se presenta el Marco Teórico que guía el desarrollo del trabajo. Este Marco Teórico se dividió en dos secciones principales; primero, se describe la región de La Mojana y, posteriormente, se realiza una breve explicación del modelo MDLC-QUASAR Extendido (Camacho & Lees, 2000) (Camacho L. , 1997).

En segundo lugar, se presenta la metodología llevada a cabo en el desarrollo del trabajo. Dentro de esta metodología se incluyen las cuatro etapas que se utilizaron para construcción del modelo simplificado río San Jorge-ciénaga de Ayapel. Las anteriores etapas son: Recolección de información hidro-meteorológica, llenado de datos faltantes, análisis de calidad, consistencia y validez de información y construcción de modelo simplificado río San Jorge – Ciénaga de Ayapel.

Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos después de la aplicación de la metodología antes mencionada; así como una breve discusión de los mismos. Dentro de los principales resultados se encuentran: Series de caudales, niveles y concentraciones de sólidos suspendidos totales en diferentes tramos de caños Barro, Pescado y Muñoz; series de caudales, niveles, caudales de desborde o laterales y concentraciones de sólidos suspendidos totales en diferentes tramos del río Cauca; modelo simplificado del sistema río San Jorge-ciénaga de Ayapel calibrado; serie de niveles modelados en la ciénaga; serie de áreas superficiales modeladas en la ciénaga; serie de volúmenes de almacenamiento modelados en la ciénaga; serie de concentraciones de sólidos suspendidos totales modeladas en la ciénaga; serie de caudales de salida de ciénaga hacia río San Jorge; series de caudales, niveles, caudales de desborde o laterales y concentraciones de sólidos suspendidos totales en diferentes tramos del río San Jorge. Vale la pena mencionar que todas las series obtenidas corresponden al periodo de modelación 1980-2013 y, en promedio, se encuentran en una resolución diaria.

Finalmente, se tienen las principales conclusiones y recomendaciones que pudieron ser extraídas después del desarrollo de la metodología y al analizar los resultados obtenidos.

2. Marco Teórico

2.1. Región de La Mojana

2.1.1. Localización y características físicas

La zona de la Mojana se ubica en la región Caribe de Colombia y está delimitada, geográficamente, por el río Cauca al oriente, el río San Jorge y la ciénaga de Ayapel al occidente, el brazo de Loba (río Magdalena) al nororiente y la Serranía de Ayapel al sur. La zona abarca municipios en los departamentos de Antioquia (Nechí), Bolívar (Magangué, San Jacinto del Cauca y Achí), Córdoba (Ayapel) y Sucre (Guaranda, Majagual, Sucre, Caimito, San Marcos y San Benito Abad) Ocupando un área de, aproximadamente, 476,000 hectáreas. Es parte de lo que se denomina la Depresión Momposina, una amplia área que por recibir escorrentía de los valles interandinos, se comporta como delta aluvial interior de tierra baja e inundable, en variada intensidad, durante ciertas épocas del año (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003)

Respecto a la geología de la zona, el área de estudio se caracteriza por la presencia de grandes estructuras rocosas elevadas que confinan las zonas bajas. La topografía es baja, con una cota máxima, localizada en el sur, de aproximadamente 36msnm y una cota mínima, hacia el norte, de cerca de 16msnm. Las cotas anteriores, forman una pendiente imperceptible en una distancia de cerca de 115 kilómetros. En general, los suelos de la región de La Mojana y de la parte baja del río San Jorge, están compuestos por arenas profundas alternadas por lentes de arcilla y limos que afloran a la superficie (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

En las siguientes Figuras, se presenta el mapa de fisiografía de la zona, definido por la Corporación para el Desarrollo Sostenible de La Mojana y el San Jorge (CORPOMOJANA). En primer lugar, se presenta la leyenda del mapa que se muestra en la siguiente Figura:



Figura 2. Leyenda, mapa fisiografía, región de La Mojana

Fuente: CORPOMOJANA (s.f.)

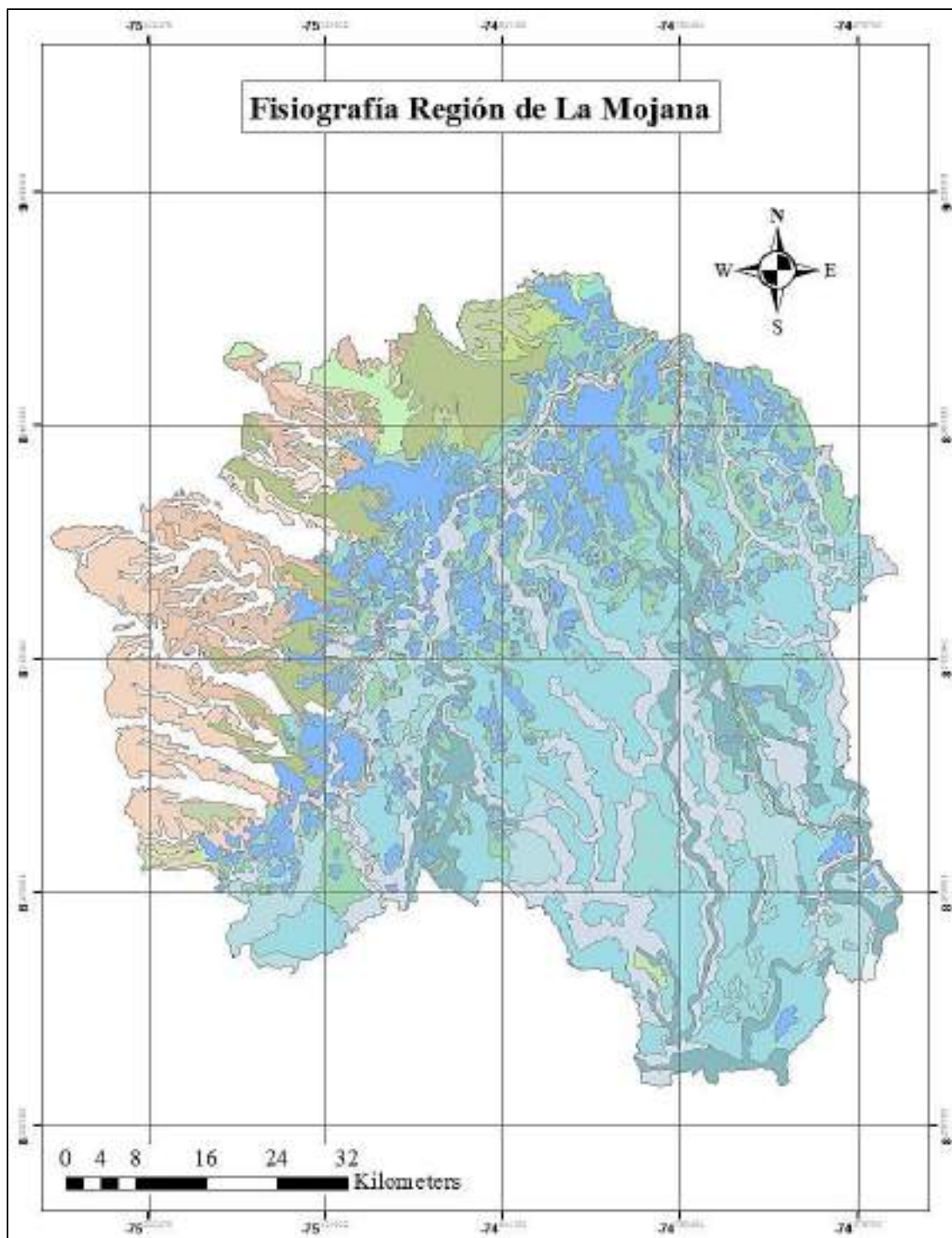


Figura 3. Mapa fisiografía región de La Mojana
Fuente: CORPOMOJANA (s.f.)

Vale la pena mencionar que el área presentada en la Figura anterior corresponde a aquella que se ubica en la jurisdicción del departamento de Sucre dado que CORPOMOJANA sólo se ocupa de esta zona de la región.

En cuanto al clima de la región, se tiene un clima tropical cálido y húmedo con temperaturas, prácticamente constantes, cercanas a 28°C. El régimen anual de precipitación es mono modal con una temporada seca entre diciembre y abril y meses

más lluviosos entre agosto y octubre. La variabilidad climática de la zona es uno de los principales factores de riesgo para la producción agropecuaria (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

Los ríos fluyen dentro de una zona plana, inundable, que incluye gran cantidad de ciénagas, brazos, caños (Mojana, Pancegüita, Viloría, Rabón, Matías y Carate) y arroyos que cambian de curso y dirección de acuerdo con las condiciones de las diferentes épocas del año y de las variaciones de nivel en los principales ríos. El río Cauca desemboca directamente en el Magdalena sobre el Brazo de Loba y el río San Jorge también lo hace, más abajo, a través de una serie de ciénagas. Una de las principales características de la región es que existen numerosas ciénagas y caños que se conectan entre sí y con los ríos San Jorge y Cauca (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

La zona puede ser dividida en dos grandes unidades estructurales y funcionales homogéneas: área inundada (que incluye ciénagas, lagunas, ríos y caños) y áreas emergidas (el resto del área). La primera unidad (inundada) conforma un complejo sistema de humedales y corresponde las áreas que se encuentran, permanentemente, bajo el agua o en las cuales las especies vegetales han desarrollado adaptaciones, o estructuras, que les permiten desarrollar su ciclo de vida, por periodos más o menos prolongados, en condiciones hídricas o suelos anóxicos. La segunda unidad (emergida), corresponde a áreas que tienen suelos cuya saturación de agua y concentración de oxígeno no son limitantes, en años ‘normales’, para el desarrollo de vegetación de tierra firme o emergente. En general, se tiene que esta segunda unidad está formada por bosques húmedos tropicales que, con el desarrollo de la región, han sido transformados a uso agropecuario de cultivos semestrales, rastrojos y praderas (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

2.1.2. Componentes del sistema de humedales

Ecológicamente, es posible dividir la región de la Mojana en dos grandes zonas, como se mencionó anteriormente. La primera zona (inundada) se ubica al norte y se caracteriza, entre otras cosas, por permanecer anegada durante más de seis meses al año y estar formada por cubetas (entiéndase ciénagas) y playones. Por otro lado, la segunda zona (emergida) se ubica en la parte sur y se caracteriza por presentar temporalidades de inundaciones menores a seis meses incluyendo zonas libres de inundación como diques, coluviones, vegas altas y terrazas que cubren, aproximadamente, 10.3% del área de estudio. La conexión entre estas zonas se hace a través de los caños Pancegüita, Mojana, San Matías, Rabón, Viloría y otros menores (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

Específicamente, el sistema de humedales se puede dividir en dos subcomponentes: aguas quietas o léntico (incluye ciénagas o cubetas y playones) y

aguas en movimiento o lótico (que incluye ríos y caños principales). Adicionalmente, dentro del sistema, se incluyen, además, diferentes tipos de coberturas vegetales tal como bosques inundados (llamados zapales localmente) y vegetación acuática propia de cubetas y playones (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003). A continuación, se describen de forma detallada los componentes léntico y lótico del sistema de humedales:

2.1.2.1. Ecosistema léntico (aguas quietas o estacionales)

Cubetas o ciénagas

Las cubetas de la zona fueron formadas por el paso de antiguos cauces del río Magdalena. Se trata de depresiones poco profundas que alcanzan, en los períodos de mayores inundaciones, hasta seis o siete metros de profundidad y que, en su gran mayoría, se ubican en la zona norte de la región (en la confluencia de los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge) formando, principalmente, seis complejos cenagosos que se pueden identificar en la siguiente Figura (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003):



Figura 4. Sistemas cenagosos principales, región de La Mojana
Fuente: Autor

En el margen derecho del río San Jorge, ciénagas conectadas a: Ciénaga Grande; ciénagas entre La Solera y caño Guartinaja y ciénagas entre el caño Misaló y el caño Trementina. En el margen izquierdo del Brazo de Loba: Complejo cenagoso de Orejero y complejo cenagoso asociado al caño Mangué. De igual forma, en la parte sur, se encuentra la ciénaga de Ayapel. Igualmente, es posible notar en la Figura que, adyacentes al área de estudio, hay otros complejos cenagosos (tanto a la derecha del Brazo de Loba como a la izquierda del río San Jorge) que, aunque no se consideren dentro de la región de La Mojana, sí se deben tener en cuenta en la realización de propuestas de manejo dado que son parte integral del sistema cenagoso global

(Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

2.1.2.1. Ecosistema lótico (cauces)

En la zona, es posible identificar cinco caños principales: Pancegüita, Mojana, San Matías, Viloría y Rabón. Igualmente, es posible identificar numerosos caños menores que forman una intrincada red durante las épocas de aguas altas y conectan a los ríos principales con las ciénagas. Durante la época de transición de aguas altas a bajas, algunos de los caños se secan generando desconexiones entre los ríos y las ciénagas (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003). A continuación, se describen las características hidrográficas de los principales cauces que conforman el sistema: río Magdalena, río Cauca y río San Jorge.

2.1.2.1.1. Río Magdalena

Hidrográficamente, la Depresión Momposina se ubica dentro del Valle Inferior del Magdalena (VIM). El río, dentro del área de estudio, se encuentra abierto en dos brazos principales: el brazo de Mompós y el brazo de Loba. La bifurcación, ocurre en el municipio del Banco, aproximadamente 150 kilómetros aguas arriba de Magangué y la unión de los mismos, aguas abajo en la boca del sector de Tacaloa. Van-Strahlen, citado en Castañeda (2001), señala que la unión de estos brazos conforma la mayor isla fluvial del mundo (Ministerio de Medio Ambiente, CSB, CORPOMOJANA, CORANTIOQUIA, CORPMAG, CVS, 2002).

El brazo de Loba, conduce un caudal volumétrico de 5,410 m³/s y es considerado la principal arteria de irrigación de esta sección del Magdalena. Por otro lado, el brazo Mompós, conduce un caudal más bajo debido, principalmente, a la modificación hecha a su curso, en 1836 por los pobladores, como solución a los problemas de sequías que se presentaban en las regiones del bajo Cauca y San Jorge (Ministerio de Medio Ambiente, CSB, CORPOMOJANA, CORANTIOQUIA, CORPMAG, CVS, 2002).

El brazo Mompós se considera como un sistema de navegación menor y permanente mientras, que el brazo de Loba, se caracteriza con carácter de navegación menor y mayor y permanente siendo, este último, el principal canal hidráulico de la isla de Mompós, el receptor principal de las aguas del bajo Cauca y San Jorge y el responsable del mantenimiento de la dinámica hídrica en la isla de Mompós. Los principales caños que irrigan a esta última son el Chicagua y el Violo (Ministerio de Medio Ambiente, CSB, CORPOMOJANA, CORANTIOQUIA, CORPMAG, CVS, 2002).

2.1.2.1.2. Río Cauca

El sistema fluvial del río Cauca tiene 187 kilómetros y su llanura, o planicie de inundación, se extiende desde Puerto Valdivia hasta su desembocadura en el brazo de Loba, en el departamento de Bolívar. Los principales afluentes del río son: río Pescado, quebrada Valdivia, río Rayo, río Tarazá, río Man, río Caceres y río Nechí. Se presentan

numerosos procesos de degradación en la cuenca causados, principalmente, por la producción minera que aporta 100,000 metros cúbicos de sedimentos al año. Estos sedimentos, son transportados por el río hasta, finalmente, depositarse en las áreas bajas del departamento de Bolívar a la altura del brazo de Loba. Este último se considera el principal receptor de los sedimentos del sistema Cauca - San Jorge (Ministerio de Medio Ambiente, CSB, CORPOMOJANA, CORANTIOQUIA, CORPMAG, CVS, 2002).

2.1.2.1.3. Río San Jorge

El río San Jorge nace en el nudo de Paramillo y atraviesa los departamentos de Antioquia, Córdoba, Sucre y Bolívar para, finalmente, confluir con el río Magdalena en el brazo de Loba, departamento de Bolívar. El área de su cuenca es de, aproximadamente, 9,901 kilómetros cuadrados y su sistema hidrológico se estructura en dos partes principales: un plano inundable y una cuenca aportante. El primero (plano inundable) se compone por caños y ciénagas mientras que la segunda (cuenca aportante) está formado por el cauce principal y numerosos ríos secundarios y quebradas (Ministerio de Medio Ambiente, CSB, CORPOMOJANA, CORANTIOQUIA, CORPMAG, CVS, 2002).

El río San Jorge tiene una longitud cercana a los 368 kilómetros y su sistema se encuentra integrado por más de 155 cuerpos de agua, ciénagas y complejos. En general, el sistema cuenta con más de 34 caños dentro de los cuales se encuentran (Ministerio de Medio Ambiente, CSB, CORPOMOJANA, CORANTIOQUIA, CORPMAG, CVS, 2002) (Ministerio de Medio Ambiente & Corporación para el Desarrollo Sostenible de La Mojana y el San Jorge, 2002):

- Margen izquierda: Caños Carate, Santiago y Mabobo.
- Margen derecha: Caños Los Ángeles, San Matías, Misalo, Viloría y Rabón.

2.1.3. Dinámica y funcionamiento anual del sistema de humedales

La dinámica hidrológica de la región, se encuentra definida por el régimen anual de lluvias de la cuenca, que determina el nivel de las aguas de los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge. Se presentan variaciones en el tamaño y forma de las ciénagas así como en la dirección y curso de los caños y arroyos, a lo largo del año. Castañeda (2001) calculó una reducción del 80% del área inundada, respecto a la época de aguas altas, en épocas de aguas bajas. Igualmente, vale la pena mencionar que, la intensidad de las crecidas en los ríos varía entre un año y otro y, además, se encuentra relacionada con las tendencias climáticas globales a largo plazo y con la presencia de fenómenos climáticos como El Niño y La Niña (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

A continuación se describen, de forma detallada, las dos condiciones hidrológicas que se presentan en la región: época de aguas altas y época de aguas bajas. Igualmente, se presenta una descripción del ciclo migratorio de los peces en la zona.

2.1.3.1. Época de aguas altas

Esta época se inicia con un incremento en los caudales de los ríos Magdalena y Cauca, con el posterior desborde de este último en su planicie de inundación, que se presenta un mes después del inicio del periodo de lluvias en la cuenca. Este periodo resulta muy importante para el sistema cenagoso caracterizándose por la formación de un amplio espejo de agua que comunica e interrelaciona las ciénagas y caños entre sí. Igualmente, durante la época de inundación, el sistema recibe grandes cantidades de nutrientes aportados por los ríos, el ecosistema terrestre circundante y la vegetación arbórea inundada (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

Por otro lado, a la región entran las aguas cargadas de nutrientes y sedimentos de los ríos Magdalena y Cauca, después de que se realiza el lavado de los suelos más fértiles del país y de las actividades domésticas, agropecuarias e industriales asentadas en la cuenca. Igualmente, el río San Jorge, durante la parte inicial de esta época, entrega sus aguas con altas concentraciones de sólidos suspendidos a la ciénaga de San Marcos (88 mg/L). La anterior concentración contrasta con la que se presenta en lugares, dentro de la ciénaga, con menor influencia del río, donde se presentan valores cercanos a 6 mg/L (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

La concentración de sólidos disueltos (que mide iones solubles en agua como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , H^+ , CO_3^{2-} , CO_3^{2-}) y que puede expresarse en términos de conductividad eléctrica (capacidad del agua para transferir corriente eléctrica) tiende a ser homogénea en el sistema durante el periodo de aguas altas. De acuerdo con lo anterior, se encuentran pocas diferencias entre los valores de este determinante en caños y ciénagas. Mendoza y Suárez (2000) reportan que los valores oscilan entre 79 y 90.1 microsiemens por centímetro ($\mu S/cm$) en el río San Jorge, entre 72.6 $\mu S/cm$ y 97.7 $\mu S/cm$ en los caños Carate y Mosquito y entre 59.8 $\mu S/cm$ y 83.8 $\mu S/cm$ para la ciénagas Caimanera, Guayabal, Palomar, Carbonero y San Benito Abad (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

Respecto a la transparencia del agua de las ciénagas de La Mojana, al igual que las de la mayoría de las ciénagas del bajo Magdalena, se tienen bajos valores variando entre 0 y 70 centímetros. Lo anterior, se debe a la alta influencia de aguas de corrientes, que hace que a las cubetas ingresen cantidades considerables de materiales particulados que absorben y dispersan la luz. Específicamente, en el caso de las ciénagas de San Marcos y San Benito, la profundidad de penetración de la luz varía entre 22 y 60 centímetros (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

La inundación de buena parte del ecosistema terrestre circundante (playones y zapales) hace que al sistema ingresen cantidades importantes de nutrientes, provenientes de la descomposición de la vegetación terrestre desarrollada durante la temporada de

aguas bajas y de nutrientes orgánicos de tipo alóctono que transportan los ríos (Mojica, Rodríguez, & Galvis, Estudio ecológico de una laguna de desborde del río Metica, 1989). La vegetación de los playones, al permanecer cubierta por el agua, se descompone con rapidez y libera los nutrientes atrapados en ella; de esta forma, se espera que durante esta época, las concentraciones de nitratos y fosfatos, principalmente, sean altas. Específicamente, en el caso de las ciénagas de San Marcos y San Benito Abad, se encuentran concentraciones entre 0.1mg/L y 1.3mg/L de NO_3 y entre 0mg/L y 0.1mg/L de PO_4 . Los anteriores rangos, resultan altos respecto a lo que se reporta, en otras épocas para la cuenca (Mendoza & Suárez, 2000) (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

La descomposición de materia orgánica genera, de forma simultánea, la liberación de ácido sulfhídrico por procesos de descomposición bacteriana. Este proceso hace que se presente aguas de color negro con olores fuertes llamadas “aguas prietas” o “aguas hediondas. De acuerdo con Galvis *et al* (1997), estas aguas presentan rangos de pH entre 4 y 6 y conductividades entre 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$; valores propios de aguas ricas en nutrientes. Ciénagas cercanas a la zona de estudio, como la ciénaga de La Caimanera, se caracterizan por sus aguas prietas, presentando alta descomposición de materia orgánica durante la época de aguas altas (Demanda química de oxígeno o DQO cercana a 111mg/L) (Mendoza & Suárez, 2000) y siendo consideradas, por los pescadores de la zona, como lugares de buena pesca. Otras ciénagas, dentro de la zona de estudio, que presentan características similares son la ciénaga Grande, ciénaga Las Yeguas, ciénaga Palomar, ciénaga Pajalal, ciénaga Los Palitos, ciénaga Caracolí, ciénaga El Coco y ciénaga El Uvero (Ministerio de Medio Ambiente & Corporación para el Desarrollo Sostenible de la Mojana y el San Jorge, 2000) (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

Finalmente, el aumento en las concentraciones de nutrientes en el agua, hace que se den las condiciones adecuadas para la proliferación de comunidades de algas y plantas acuáticas, como el buchón (*Eichhornia crassipes*), lo que aumenta la productividad biológica del sistema. En general, podría afirmarse que los detritos, bentos, material alóctono y fauna asociada a las macrófitas se constituyen como la base de la cadena trófica del plano inundable de la región (Mojica, Rodríguez, & Galvis, Estudio ecológico de una laguna de desborde del río Metica, 1989) (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

2.1.3.2. Época de aguas bajas

El mínimo nivel de caudal de los ríos, o estiaje, se presenta después de uno o dos meses del inicio del periodo de sequía en la cuenca. En este tiempo, el ambiente terrestre se expande y el acuático se reduce, generando aislamiento de las ciénagas más pequeñas por la desaparición de algunos caños menores. En esta época, la vegetación acuática y fauna asociada, que se desarrollaron en las partes menos profundas de las cubetas y los

playones, sufren de desecación y pasan a convertirse en abono que, combinados con los sedimentos que deposita el río, será utilizado por la vegetación terrestre, que se empieza a desarrollar (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

Por otro lado, en los playones, y partes de los zapales que no se encuentran inundados, las plantas sufren un proceso de pérdida de sus hojas que acelera la descomposición aeróbica de la materia orgánica, debido a las condiciones ambientales de alta temperatura y humedad local. Los procesos, antes descritos, hacen que se liberen al medio elementos nutritivos que alimentaran al sistema al subir el nivel de las aguas y produciendo un ciclo que evita la pérdida de nutrientes (Moreno, 1994) (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

2.1.3.3. Ciclo migratorio de los peces

Durante la época de aguas bajas algunas especies migratorias, como el bocachico y el bagre, realizan viajes a lo largo de la cuenca en búsqueda de condiciones ambientales más favorables. Lo anterior, se debe que los espejos de agua se reducen significativamente y se generan condiciones de confinamiento; igualmente, las altas temperaturas ambientales generan calentamiento del agua y disminución en las concentraciones de oxígeno disuelto en la misma. Sometidos a estas situaciones, algunas especies de peces inician su recorrido hacia las partes más altas de la cuenca (en un fenómeno que es conocido como subienda) en búsqueda de condiciones más favorables: mayor concentración de oxígeno disuelto y menor turbidez (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

En el resto de la temporada seca, las especies tienden a permanecer en el río, cerca de la desembocadura de los caños, donde la mayoría de ellas tienden a iniciar el proceso de maduración gonadal. Welcomme indica que para la mayoría de especies, en la cuenca del Magdalena, la reproducción tiende a coincidir con las fases tempranas de inundación, en los meses de transición entre la época seca y el periodo lluvioso (Welcomme, 1992); sin embargo, otras especies extienden sus ciclos de reproducción durante todo el año (Mojica, Rodríguez, & Galvis, 1989). Particularmente, el bocachico desova en el cauce principal y la corriente se encarga de transportar los huevos fecundados hacia las ciénagas (Galvis, Mojica, & Camargo, 1997) (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

Al iniciar la época de aguas altas, las condiciones ambientales de los ríos se tornan adversas: aumenta el caudal, incrementa la turbidez y se disminuye la productividad primaria por perifiton tornando difícil la consecución de alimento. De acuerdo con lo anterior, los peces inician su migración hacia aguas abajo (en lo que se conoce como el fenómeno de bajanza) y los huevos fecundados, alevinos y juveniles son arrastrados, por la corriente, hacia las ciénagas donde encuentran condiciones

favorables para su desarrollo. Cuando estos últimos (alevinos y juveniles), junto con los adultos, llegan a las ciénagas encuentran lugares adecuados para alimentarse y refugiarse. Estos lugares son proporcionados por plantas acuáticas, tanto flotantes como sumergidas y enraizadas, que albergan algas, zooplancton y otros invertebrados acuáticos (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003). Galvis, Mojica y Camargo (1997) reportan que estos sitios son aprovechados, además, por numerosas especies de peces de talla pequeña.

2.1.4. Ecosistemas estratégicos

A continuación se describen los ecosistemas que, debido a su funcionalidad ambiental pueden ser considerados indispensables en el bienestar y desarrollo de la región de La Mojana. De forma específica, se describirán: Cubetas, playones, caños y zapales (o bosque inundado).

2.1.4.1. Cubetas

Las cubetas o ciénagas cumplen funciones ambientales muy importantes tales como (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003):

- Retención de grandes cantidades de agua.
- Regulación de caudales de ríos.
- Maximización de procesos de decantación y deposición de materiales.
- Sustento de actividades biológicas que ayudan al mejoramiento de la calidad del agua de partes altas de la cuenca y de comunidades aledañas (asentamientos humanos adyacentes vierten directamente su agua residual a estas estructuras).

Igualmente, estas estructuras contribuyen a la re-oxigenación de las aguas debido al contacto con el aire a lo largo de grandes extensiones, a la acción de los vientos, que favorecen la mezcla de capas superficiales y profundas y a la acción de vegetación acuática como el buchón (*Eichhornia crassipes*), que retiene nutrientes y sustancias tóxicas (como metales pesados) y sedimentos. Finalmente, en estos sistemas se albergan gran cantidad de especies de flora y fauna que consiguen refugio, alimento y protección (en el caso de especies migratorias de peces y aves) (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

2.1.4.2. Playones

Estos ecosistemas resultan importantes por su papel en el mantenimiento de hábitats para la fauna silvestre y, particularmente, para los peces siendo importantes en términos de producción pesquera. De acuerdo con lo anterior, se ha realizado estimaciones de la influencia de la inundación en la productividad pesquera de la zona. De acuerdo con Mojica y Galvis (1998), se han estimado productividades de 37.5 kilogramos por hectárea y año en todo el plano inundable del río; así, tan sólo en la zona inundable de La Mojana (191,191 hectáreas), se estaría en la capacidad de producir

7,357.16 toneladas al año si las condiciones del ecosistema no se perturbaran y se realizara un manejo sostenible del recurso (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

Si se considera el comportamiento histórico del recurso en la Depresión Momposina, teniendo en cuenta la movilización pesquera de los principales centros de acopio: Ayapel, San Marcos, Magangué y Cauca, para el periodo comprendido entre 1990 y 2001 se tiene: la producción pesquera se mantuvo entre las 2,240 y 6,552 toneladas, con un máximo de 10,729 toneladas posterior a la gran inundación ocurrida entre 1998 y 1999, por el desbordamiento de los ríos Cauca y San Jorge. Lo anterior, muestra que cuando ocurren inundaciones, las áreas de cría y levante de alevinos se incrementan y, por esta razón, al año siguiente de la misma, la producción pesquera tiende a aumentar (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

2.1.4.3. Ecosistemas lóticos (ríos y caños)

En términos ecológicos, los ríos y caños son muy importantes dado que constituyen el principal camino, tanto para el agua como para los organismos acuáticos, como peces, cuyas migraciones se realizan durante las fases iniciales de las crecidas y durante las fases finales del descenso de caudal. De esta forma, esas estructuras pueden considerarse como corredores biológicos que unen los componentes del sistema entre sí y con el exterior (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

2.1.4.4. Bosques inundados o zapales

Este ecosistema se considera estratégico dado que, dentro del sistema, actúa como retenedor de sedimentos (provenientes de los ríos San Jorge y Cauca) y productor y exportador de materia orgánica hacia los sistemas acuáticos vecinos. Los zapales son, además, importantes escalones en la cadena trófica, dado que brindan el soporte para muchos organismos, que son importantes en la dieta de los peces, y al mismo tiempo, cumplen funciones de refugio, sombra y alimento para estos últimos (Welcomme, 1992). Por otro lado, estos ecosistemas ofrecen refugio a la mayoría de especies de fauna silvestre de la zona como anfibios (sapos y ranas), reptiles (cocodrilos, iguanas, tortugas y algunas especies de serpientes), aves y mamíferos, como el jaguar (*Panthera onca*) (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

Respecto a esta última especie, en 1994 se calculó que la región de La Mojana, su población era cercana a 154 individuos, sin considerar los transeúntes. Al tener en cuenta estos últimos, el número ascendería a 230 ó 300 individuos, es decir, que en la zona de estudio, la densidad de reproductores para ese año era de 1 en 3,900 hectáreas o de 1 en 39 kilómetros cuadrados (Zuloaga, 1995) (Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003).

2.1.5. Procesos hidrológicos principales

De acuerdo con Franco (2011), en la región de la Mojana se pueden identificar los siguientes procesos hidrológicos:

1. El río Magdalena impone el control hidráulico del sistema aguas abajo. Esto ocasiona:
 - Restricción de las descargas del río San Jorge y del sistema de ciénagas.
 - Reflujo hacia aguas arriba en el río San Jorge.
 - Almacenamiento de excesos del caudal, por varios meses y desagüe de los mismos lentamente.
 - Amortiguación de crecientes.
 - Pérdida del curso del río San Jorge en medio de ciénagas de gran extensión.
2. El cauce del río Cauca está más elevado que el del río San Jorge lo que causa:
 - Desbordamiento del río Cauca hacia la región de La Mojana (máximas crecientes históricas).
 - Conformación de un delta aluvial interno (caños Mojana, Pancegúita y Rabón).
 - Aumento de caudales.
 - Flujo de agua subterránea del río Cauca hacia el San Jorge, aumentando el caudal base de algunos caños (caño Mojana).
3. Varios arroyos confluyen por el margen izquierdo del río San Jorge aportando caudal base, flujo de escorrentía, sedimentos e, incluso, aguas residuales.
4. Comunicación entre los cuerpos de agua superficiales y el sistema de aguas subterráneas.
5. Nivel freático alto, con gran cantidad de aljibes y pozos de poca profundidad.
6. Cauces superficiales con alto aporte de caudal de aguas subterráneas, por ejemplo, el caño Mojana que recibe aportes de caudal de la cuenca del río Cauca.
7. Se generan procesos de evapotranspiración considerables por la presencia de espejos de agua amplios, almacenados durante varios meses y por acción de la cobertura vegetal.
8. Dadas las variaciones, a nivel espacial, de la precipitación y las condiciones particulares de la región, es necesario considerar los siguientes fenómenos:
 - Intercepción de la precipitación por la vegetación (bosques naturales y cultivos).
 - Encharcamiento rápido por baja pendiente del terreno y alta humedad.
 - Presencia de precipitación directa sobre cuerpos de agua.
9. Pérdida constante de capacidad de almacenamiento de cuerpos de agua por baja pendiente de los cauces, almacenamiento de excesos de caudal en las ciénagas y, con este último, retención de sedimentos.
10. Interrelación continua entre cuerpos de agua superficiales (ríos, caños y ciénagas).

2.2. Modelo MDLC- QUASAR EXTENDIDO

El modelo MDLC-QUASAR EXTENDIDO (Lees, Camacho, & Whitehead, 1998) integra el modelo ADZ (transporte de solutos) (Beer & Young, 1983) (Young & Wallis, 1993), el modelo MDLC (modelo hidrológico de flujo no permanente) (Camacho & Lees, Multilinear discrete lag-cascade model for channel routing, 1999) y el modelo QUASAR (calidad del agua en ríos) (Whitehead, Williams, & Lewis, 1997) (Camacho L. , 1997) (Lees, Camacho, & Whitehead, 1998). A continuación, se presenta una descripción detallada de cada uno de los modelos individuales integrados y, finalmente, una explicación del funcionamiento del modelo total.

2.2.1. Modelo de transporte de zona muerta agregada (ADZ)

El modelo de transporte de solutos ADZ (Aggregated Dead Zone) (Beer & Young, 1983) (Young & Wallis, 1993) se representa mediante una ecuación diferencial ordinaria con parámetros temporales que tienen claro significado físico. En el modelo, un tramo de río se considera un sistema *incompletamente mezclado* en el cual el contaminante disuelto sufre los procesos de advección pura y dispersión longitudinal. El primero de estos fenómenos (advección pura), se representa mediante un parámetro temporal explícito del frente de concentración, denominado *retraso advectivo* (τ_s). El segundo fenómeno (dispersión longitudinal), se modela de forma agregada en la zona de mezcla activa y se caracteriza por medio del parámetro *tiempo de residencia ADZ agregado* (T_r). El *tiempo medio de viaje* del contaminante disuelto, o soluto, en el tramo ($\bar{t}_s$) se define por medio de los dos parámetros antes explicados (Camacho & Lees, 2000) (Camacho L. , 1997) (Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación, 2012). La siguiente Figura muestra dos de los tres parámetros para el soluto en un tramo único ADZ:

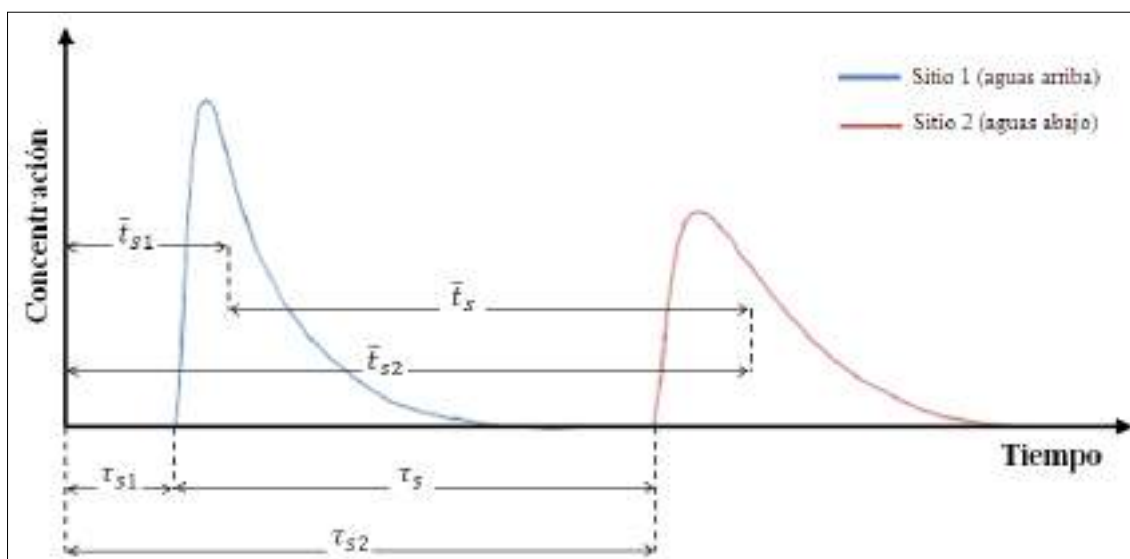


Figura 5. Representación gráfica de los parámetros tiempo de viaje ($\bar{t}$) y tiempo de retraso advectivo (τ)

Fuente: Autor

Al relacionar los parámetros anteriores por medio de una ecuación se tiene:

$$\bar{t}_s = T_r + \tau_s \quad \text{Ecuación 1}$$

Para condiciones de flujo permanente y sistema imperfectamente mezclado, el modelo ADZ de un único tramo se encuentra dado por la siguiente ecuación (Lees, Camacho, & Chapra, 2000) (Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación, 2012):

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{1}{\bar{t}_s - \tau_s} (S_u(t - \tau_s) - S(t)) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde $S(t)$ representa la concentración del soluto en el punto aguas abajo del tramo estudiado y S_u es la concentración, conocida, a la entrada o punto aguas arriba del mismo. Dado que la longitud del tramo estudiado (L) resulta conocida, es posible transformar los parámetros temporales en velocidades características del transporte de solutos en el mismo. De esta forma se tiene que, la velocidad promedio o velocidad a la cual se mueve el centroide de la distribución del soluto, puede expresarse como:

$$u_s = \frac{L}{\bar{t}_s} \quad \text{Ecuación 3}$$

Igualmente, la velocidad máxima o velocidad más rápida a la cual se mueve el frente de concentración de la distribución de soluto sería:

$$u_{s \text{ Máx}} = \frac{L}{\tau_s} \quad \text{Ecuación 4}$$

Lo anterior, permite inferir que la representación exitosa de los procesos de transporte que presenta el modelo ADZ se encuentra, probablemente, relacionada con la inclusión del efecto de una distribución de velocidad no uniforme en la sección transversal (Camacho & Lees, 2000) (Camacho L. , 1997) (Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación, 2012). Lees *et al* (2000) relacionaron los parámetros del modelo ADZ con los del modelo TS al comparar los momentos temporales de las distribuciones. Los resultados, es decir, las relaciones encontradas, permiten demostrar que en ríos sujetos a procesos de mezcla en zonas muertas, o de almacenamiento temporal, la velocidad media del flujo es mayor que la velocidad efectiva de transporte del soluto (u_s); siendo esta última representada por:

$$u_s = \frac{u}{1 + \beta} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde u representa la velocidad media del flujo y β un coeficiente de retraso del soluto. En general, este último se encuentra dado por el cociente entre el área transversal de la zona de almacenamiento temporal (A_s) y la del canal principal (A) (Camacho & Lees, 2000) (Camacho L. , 1997) (Lees, Camacho, & Chapra, 2000) (Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación, 2012).

Por otro lado, se ha encontrado que la manera más adecuada para describir fenómenos de transporte en tramos largos de ríos, o en sitios donde los datos de frontera aguas arriba están dados por un pulso instantáneo de concentración, es mediante serie de

modelos ADZ de primer orden en serie (Camacho & Lees, 2000) (Camacho L. , 1997) (Lees, Camacho, & Whitehead, 1998) (Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación, 2012). De esta forma, el tiempo de viaje total de viaje a lo largo de n_s tramos iguales, de primer orden, puede estimarse mediante el método de momentos temporales, como:

$$\bar{t}_s = n_s T_r + \tau_s \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde τ_s representa el tiempo total de retraso en el tramo que corresponde a la suma de los tiempos de retraso individuales de los n_s elementos ADZ acoplados.

2.2.2. Modelo multilineal discreto de retraso – cascada (MDLC)

El modelo MDLC (Camacho & Lees, 1999) para el tránsito de crecientes se caracteriza por parámetros temporales equivalentes a los del modelo ADZ. Conceptualmente, el modelo se basa en un elemento de canal lineal discreto que se acopla con una serie de n embalses en serie. El elemento de canal se caracteriza por medio de un parámetro de retraso de frente de onda (τ_s) y cuya función, o efecto, es trasladar la hidrógrafa transitada sin atenuarla. Por otro lado, cada embalse de la serie se representa por un coeficiente de almacenamiento (K) cuyo efecto es la atenuación de la hidrógrafa de entrada, de forma análoga al parámetro de tiempo de residencia en el modelo ADZ (Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación, 2012).

La ecuación que define el primer momento temporal alrededor del origen y que determina el tiempo de viaje medio de la onda de creciente es (Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación, 2012):

$$\bar{t}_{fl} = nK + \tau_{fl} \quad \text{Ecuación 7}$$

Las expresiones que relacionan a los parámetros n , K y τ_{fl} con características del canal para un caudal de referencia (Q_0) son (Camacho & Lees, 1999) (Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación, 2012):

$$K = \frac{3}{2m} (1 + (m-1)F_0^2) \left(\frac{y_0}{S_0 L} \right) \left(\frac{L}{mu_0} \right) \quad \text{Ecuación 8}$$

$$n = \frac{\frac{4m}{9} (1 - (m-1)^2 F_0^2)}{(1 + (m-1)F_0^2)^2 \left(\frac{y_0}{S_0 L} \right)} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\tau = \left(\frac{L}{mu_0} \right) \left(1 - \frac{\frac{2}{3}(1 - (m - 1)^2 F_0^2)}{(1 + (m - 1)F_0^2)} \right) \quad \text{Ecuación 10}$$

En las ecuaciones anteriores, F_0 representa el número de Froude; y_0 la profundidad uniforme para un caudal de referencia Q_0 ; S_0 la pendiente longitudinal del canal, L la distancia longitudinal a la cual la hidrógrafa es transitada. Por otro lado, m puede ser estimada a partir de la siguiente ecuación (Camacho & Lees, 1999) (Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación, 2012):

$$m = \frac{c_0}{u_0} = \frac{\left(\frac{dQ}{dA} \Big|_{A=A_0} \right)}{\left(\frac{Q_0}{A_0} \right)} \quad \text{Ecuación 11}$$

En donde c_0 representa la velocidad de la onda cinemática y u_0 la velocidad media de flujo al caudal de referencia.

Las anteriores relaciones, son válidas para cualquier forma de sección transversal y cualquier fórmula de fricción empleada (Manning o Chezy). Igualmente, se ha demostrado que el movimiento promedio de una onda de flujo linealizada en un canal general uniforme, de cualquier sección transversal y fórmula de fricción, está dada de forma exacta por la aproximación de la onda cinemática (Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación, 2012):

$$\overline{t_{fl}} = \frac{L}{c_0} = \frac{L}{mu_0} \quad \text{Ecuación 12}$$

2.2.3. Modelo integrado de transporte MDLC-ADZ

De acuerdo con lo descrito anteriormente, los dos modelos tienen una estructura conceptual similar y utilizan relaciones paramétricas análogas para describir procesos de flujo y transporte de solutos. La propagación promedio de la onda de flujo ocurre a la velocidad cinemática más rápida (c) que se relaciona, mediante la Ecuación 11, con la velocidad media de flujo (u). Por otro lado, el transporte del soluto ocurre a una velocidad efectiva más lenta (u_s) que puede relacionarse, mediante la Ecuación 5, con la velocidad media de flujo (u). Finalmente, las diferentes velocidades de propagación se relacionan con los parámetros temporales de los modelos ADZ y MDLC mediante las Ecuaciones 3, 4 y 12 (Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación, 2012).

La metodología de estimación de parámetros de transporte del modelo ADZ se describe a continuación (Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación, 2012):

1. Determinar parámetros de flujo K , n y τ_{fl} para un caudal de referencia, Q_0 (Camacho & Lees, 1999).

2. Calcular el parámetro que define el tiempo de viaje del soluto en el modelo ADZ, $\bar{t}_s$. Calcular la velocidad media de flujo (u) mediante ecuaciones 7, 11 y 12. Sustituir expresión resultante en Ecuación 5 obteniendo la velocidad media del soluto (u_s). Por último, al reemplazar la velocidad media del soluto en la Ecuación 3 se obtiene el tiempo total de viaje del soluto en el tramo, así:

$$\bar{t}_s = m(nK + \tau_{fl})(1 + \beta) \quad \text{Ecuación 13}$$

3. Cálculo del tiempo de retraso advectivo del frente de concentración, τ_s , (parámetro del modelo ADZ). Se asume que la relación entre la velocidad media y la velocidad máxima del flujo se mantienen para las velocidades correspondientes al soluto:

$$\frac{u}{u_{fl \text{ Máx}}} = \frac{u_s}{u_{s \text{ Máx}}} = \frac{\tau_{fl}}{\bar{t}_s} = \frac{\tau_s}{\bar{t}_s} \quad \text{Ecuación 14}$$

Al utilizar la Ecuación 7, es posible derivar la expresión que sigue para el parámetro retraso advectivo:

$$\tau_s = m\tau_{fl}(1 + \beta) \quad \text{Ecuación 15}$$

4. Cálculo del tiempo de residencia en la zona de mezcla activa, Tr (parámetro del modelo ADZ). En este caso, se propuso la utilización de la misma estructura en serie empleada para el modelo de flujo. De acuerdo con lo anterior, se asume el mismo número de embalses n (siendo $n_s=n$) y la ecuación queda como:

$$T_r = \frac{(\bar{t}_s - \tau_s)}{n_s} \quad \text{Ecuación 16}$$

5. El modelo integrado se simula utilizando un método computacional que se basa en un operador multilineal discreto de convolución (Camacho & Lees, 2000) (Camacho & Lees, Multilinear discrete lag-cascade model for channel routing, 1999).

2.2.3. Modelo integrado de transporte MDLC-ADZ-QUASAR de calidad del agua

La base del modelo integrado de cantidad y calidad del agua es el modelo Quality Simulation Along River Systems (QUASAR) (Camacho & Lees, 2000) (Camacho L. , 1997) (Whitehead, Williams, & Lewis, 1997) (Lees, Camacho, & Whitehead, 1998). El anterior modelo, ha sido extendido para modelar determinantes bacteriológicos, físico-químicos y biológicos, adicionales a los contenidos en el modelo original. Para cada sub tramo de canal, se realiza un balance masa de cada determinante de calidad del agua. De esta forma, se utiliza una representación de reactores incompletamente mezclados para modelar los procesos de transporte, advección, dispersión y los procesos físicos, químicos y biológicos, de transformación de cada determinante. Finalmente, se tiene un modelo que integra 15 ecuaciones diferenciales

acopladas para cada tramo de canal. En la siguiente tabla se presentan los determinantes de calidad del agua y procesos que se modelaron (Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación, 2012).

Tabla 1. Determinantes de calidad del agua modelados

Determinante de calidad del agua	Símbolo	Tipo de determinante	Procesos y/o ecuaciones modeladas
Caudal	Q	No aplica	Continuidad, moméntum
Nivel	y, h	No aplica	Continuidad, moméntum
Caudal lateral	Q_L	No aplica	Desborde vertedero lateral
Sólidos suspendidos totales	SST	Físico-químico	Sedimentación
Conductividad	$Cons$	Físico-químico	Determinante conservativo
Temperatura	Te	Físico-químico	Determinante conservativo
Nitrógeno amoniacal	NA	Físico-químico	Nitrificación
Nitratos	NI	Físico-químico	Nitrificación, denitrificación, crecimiento fitoplancton en ciénagas
Demanda biológica oxígeno	DBO	Físico-químico	Oxidación, respiración y muerte fitoplancton
Oxígeno disuelto	OD	Físico-químico	Re aireación, oxidación materia orgánica, nitrificación, demanda béntica fotosíntesis y respiración (dos últimos en ciénagas)
Oxígeno de saturación	Cs	No aplica	Condiciones de saturación
Clorofila-a	Cla	Biológico	Crecimiento, respiración y muerte, pastoreo zooplancton (en ciénagas)
Fósforo soluble reactivo	PSR	Físico-químico	Hidrólisis, Crecimiento de fitoplancton (en ciénagas)
Fósforo particulado	PP	Físico-químico	Sedimentación, hidrólisis
Coliformes totales	CT	Bacteriológico	Decaimiento de primer orden

Fuente: U. Nacional & DNP (2012)

A continuación, se describen las ecuaciones gobernantes, constantes estequiométricas y parámetros de calibración de algunos de los determinantes considerados en el modelo original desarrollado por Camacho (1997) y Camacho *et al* (2000). Vale la pena mencionar que no se detallan la totalidad de parámetros dado que, el modelo a realizar, incluirá únicamente los parámetros de caudales, niveles y concentración de sólidos suspendidos totales. De esta forma se tiene:

2.2.3.1. Sólidos suspendidos

La ecuación de balance de sólidos suspendidos totales es:

$$\frac{dSST_s(t)}{dt} = \frac{1}{\bar{t}_s - \tau_s} \left[e^{\frac{-v_{ss}}{y(t)} \cdot \tau_s} \cdot SST_{in}(t - \tau_s) - SST_s(t) \right] - \frac{v_{ss}}{t(t)} \cdot SST_s(t) \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde SST representa la concentración de sólidos suspendidos totales, en miligramos por litro (los subíndices s e in indican entrada y salida, respectivamente); v_{ss} , la velocidad de sedimentación promedio del tramo considerado (en metros por segundo) y y , la profundidad promedio del flujo en el canal (en metros).

2.2.3.2. Determinante conservativo

La ecuación de balance empleada para este determinante es:

$$\frac{dCon_s(t)}{dt} = \frac{1}{\bar{t}_s - \tau_s} [Con_{in}(t - \tau_s) - Con_s(t)] \quad \text{Ecuación 18}$$

En la ecuación anterior, *Con* representa la concentración de cualquier determinante conservativo (los subíndices *in* y *s* mantienen el significado explicado en sólidos suspendidos). La conductividad, salinidad y temperatura, se modelaron de forma aproximada como determinantes de este tipo que, únicamente, son afectados por dilución de fuentes y pérdidas de caudal.

2.2.3.3. Nitrógeno amoniacal

La ecuación de balance de este determinante es:

$$\frac{dna_s(t)}{dt} = \frac{1}{\bar{t}_s - \tau_s} [e^{-k'_1 \tau_s} \cdot na_{in}(t - \tau_s) - na_s(t)] - k'_1 \cdot na_s(t) \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde *na* representa la concentración de nitrógeno amoniacal (en miligramos por litro), k'_1 es la constante de nitrificación de nitrógeno amoniacal corregida por temperatura mediante la siguiente ecuación, en donde k_1 es la constante de nitrificación de nitrógeno amoniacal a 20°C y T_2 la temperatura (en grados centígrados) a la cual se requiere la tasa:

$$k'_1 = k_1 \cdot 10^{0.0293(T_2 - 20)} \quad \text{Ecuación 20}$$

2.2.3.4. Nitratos

La ecuación de balance definida para este determinante es:

$$\frac{dni_s(t)}{dt} = \frac{1}{\bar{t}_s - \tau_s} [e^{-k'_2 \tau_s} \cdot ni_{in}(t - \tau_s) - ni_s(t)] + k'_1 \cdot na_s(t) - k'_2 \cdot ni_s(t) \quad \text{Ecuación 21}$$

En la ecuación anterior, *ni* representa la concentración de nitrato (en miligramos por litro), k'_1 es la constante de nitrificación de nitrógeno amoniacal corregida por temperatura mediante la Ecuación 20, *na* la concentración de nitrógeno amoniacal y k'_2 la constante de denitrificación corregida por temperatura mediante una ecuación análoga a la Ecuación 20:

$$k'_2 = 1.0698 \cdot k_2 \cdot 10^{0.0293(T_2 - 20)} \quad \text{Ecuación 22}$$

3. Metodología empleada

La metodología empleada para el desarrollo del presente proyecto puede ser dividida en cuatro partes principales:

5. Recolección de información hidro-meteorológica.
6. Llenado de datos faltantes.
7. Análisis de calidad, consistencia y validez de información.
8. Construcción de modelo simplificado río San Jorge – Ciénaga de Ayapel.

A continuación se explica, de forma detallada, cada una de las fases enumeradas anteriormente.

3.1. Recolección de información hidrometeorológica

Esta parte se llevó a cabo identificando, en primer lugar, las estaciones hidro-meteorológicas cuya información era necesaria para el desarrollo de la modelación. De esta forma, de acuerdo con información del IDEAM, pudo establecerse la presencia de 2 estaciones pluviométricas, 1 estación climatológica ordinaria, 2 estaciones limnigráficas y 1 estación limnimétrica. El nombre y ubicación de estas estaciones se presenta a continuación:

Tabla 2. Estaciones hidro-meteorológicas IDEAM

Tipo de estación	Nombre	Latitud				Longitud				Corriente
		°	'	''	Dirección	°	'	''	Dirección	
Pluviométrica	<i>La Ilusión</i>	8	1	31.8	N	75	5	23.1	W	Cauca
	<i>Cecilia</i>	8	27	41	N	75	2	3	W	Ciénaga de Ayapel
Climatológica ordinaria	<i>Ayapel</i>	8	17	42.7	N	75	9	52.2	W	Ciénaga de Ayapel
Limnigráfica	<i>La Coquera</i>	7	57	44	N	75	11	45	W	Cauca
	<i>Las Flores</i>	8	6	8.6	N	74	45	24.3	W	Cauca
Limnimétrica	<i>Beirut</i>	8	18	7.9	N	75	8	7.5	W	Ciénaga de Ayapel

Fuente: IDEAM (s.f.)

Contando con la información primaria de estas estaciones, se procedió a solicitar al IDEAM la información hidro-meteorológica, requerida para la realización de los análisis. Las series obtenidas, para todas las estaciones, presentan resolución temporal diaria y los parámetros que contienen dependen de su tipo. A continuación se presentan los parámetros medidos en las series para cada estación así como el intervalo de tiempo solicitado para cada uno:

Tabla 3. Longitud del registro de valores totales diarios de precipitación estaciones pluviométricas

Estaciones pluviométricas	Intervalo de registros para valores totales diarios de precipitación
<i>La Ilusión</i>	1 Enero 2011 – 31 Mayo 2015
<i>Cecilia</i>	1 Enero 2011 – 31 Diciembre 2014

Fuente: Autor

Tabla 4. Longitud del registro de valores totales diarios de precipitación estaciones climatológicas ordinarias

Estaciones climatológicas ordinarias	Intervalo de registros para valores totales diarios de precipitación
<i>Ayapel</i>	1 Enero 2011 – 31 Mayo 2015

Fuente: Autor

Tabla 5. Longitud del registro de valores medios diarios de temperatura estaciones climatológicas ordinarias

Estaciones climatológicas ordinarias	Intervalo de registros para valores medios diarios de temperatura
<i>Ayapel</i>	1 Enero 2011 – 31 Mayo 2015

Fuente: Autor

Tabla 6. Longitud del registro de valores medios diarios de evaporación estaciones climatológicas ordinarias

Estaciones climatológicas ordinarias	Intervalo de registros para valores medios diarios de evaporación
Ayapel	1 Enero 2011 – 31 Mayo 2015

Fuente: Autor

Tabla 7. Longitud del registro de valores medios diarios de humedad relativa estaciones climatológicas ordinarias

Estaciones climatológicas ordinarias	Intervalo de registros para valores medios diarios de humedad relativa
Ayapel	1 Enero 2011 – 31 Mayo 2015

Fuente: Autor

Tabla 8. Longitud del registro de valores medios diarios de caudal estaciones limnimétricas y limnigráficas

Estaciones limnimétricas/limnigráficas	Intervalo de registros para valores medios diarios de caudal
La Coquera	1 Enero 2011 – 17 Agosto 2015
Las Flores	1 Enero 2011 – 31 Diciembre 2013

Fuente: Autor

Tabla 9. Longitud del registro de valores medios diarios de nivel estaciones limnimétricas y limnigráficas

Estaciones limnimétricas/limnigráficas	Intervalo de registros para valores medios diarios de nivel
La Coquera	1 Enero 2011 – 17 Agosto 2015
Las Flores	1 Enero 2011 – 31 Diciembre 2013
Beirut	1 Enero 2011 – 31 Diciembre 2013

Fuente: Autor

En este punto, vale la pena mencionar que la modelación se llevó a cabo utilizando 33 años de registro (de 1980 a 2013). Los datos del 2010 hacía atrás no tuvieron que ser solicitados al IDEAM dado que se contaba con las series originales completas, de caudales y niveles, para las estaciones de interés, producto de la modelación previa realizada por la Universidad Nacional y el Departamento Nacional de Planeación (2012). Las series de precipitación, evaporación y temperatura sí fueron solicitadas y el procedimiento de llenado de datos y análisis de consistencia, homogeneidad y calidad se presenta a continuación.

3.2. Método de llenado de datos faltantes

La metodología utilizada, para el llenado de datos faltantes correspondió a la empleada en la modelación original de la Universidad Nacional y el Departamento Nacional de Planeación (2012).

3.2.1. Precipitación

En general, las series históricas de precipitación contienen información fragmentada y esta es la razón por la cual es necesario completar los datos faltantes. En las series diarias de precipitación los registros faltantes se completaron utilizando el método del inverso de la distancia, considerando los registros de las ocho estaciones vecinas más cercanas a la estación con el dato faltante, esto como criterio de ponderación. Este método está dado por la siguiente ecuación:

$$P_x = \frac{\sum P_i \cdot \left(\frac{1}{r_i^2}\right)}{\sum \frac{1}{r_i^2}} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde, P_x es la precipitación calculada en la estación con el dato faltante, P_i es la precipitación registrada en las estaciones vecinas más cercanas el mismo día, r_i es la distancia ponderada entre la estación con el dato faltante y las estaciones vecinas con registros el día considerado.

3.2.2. Temperatura, humedad relativa y evaporación

El procedimiento a emplear se seleccionó con base en la cantidad de datos consecutivos faltantes, así:

- Para un valor faltante, este se llenó utilizando el promedio de los datos anterior y posterior.
- Para menos de cinco datos faltantes consecutivos en la serie investigada, se utilizó el promedio móvil para una ventana de 7 días (período semanal).
- Para períodos con datos faltantes de más de 15 días, se emplearon regresiones lineales múltiples considerando datos encontrados en otras estaciones climatológicas ordinarias de la región. Las estaciones utilizadas consisten en las reportadas en la modelación realizada por la Universidad Nacional y el Departamento Nacional de Planeación (2012) y son:
 - o Apartamento Rafael Barvo (25025080).
 - o Colomboy (25025170).
 - o Hacienda Cuba (25025160).
 - o Majagual (25025240).
 - o Pinillos (25025210).
 - o Planeta Rica (25025190).
 - o San Benito Abad (25025180).

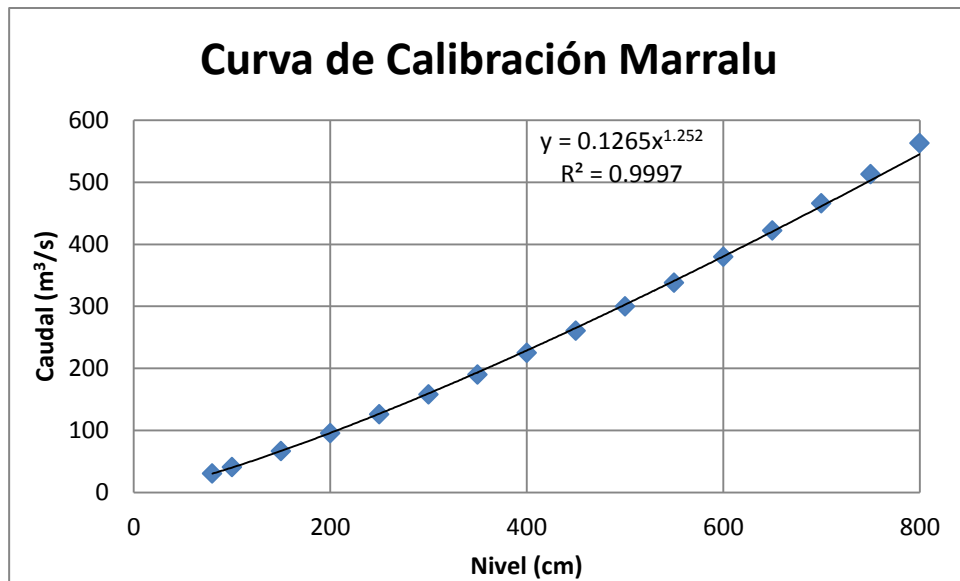
3.2.3. Nivel

El procedimiento empleado se seleccionó con base en la cantidad de datos consecutivos faltantes, así:

- Para un valor faltante, este se llenó utilizando el promedio de los datos anterior y posterior.
- Para menos de cinco datos faltantes consecutivos en la serie investigada, se utilizó el promedio móvil para una ventana de 7 días (período semanal).
- Para períodos con datos faltantes mayores a 5 días, los registros fueron complementados a través de correlaciones de niveles entre estaciones hidrométricas vecinas (estaciones aguas abajo y aguas arriba), que se ajustaron utilizando regresiones de tipo multilínea.

3.2.4. Caudal

En este caso, el llenado de datos faltantes se llevó a cabo utilizando las curvas de calibración reportadas por el IDEAM para cada una de las estaciones requeridas. Vale la pena que este procedimiento, únicamente, debió ser llevado a cabo en la estación Marralu dado que las series de caudales, en las demás estaciones, se encontraban completas. La curva de calibración empleada en la estación requerida fue la más reciente reportada por el IDEAM y se presenta a continuación:

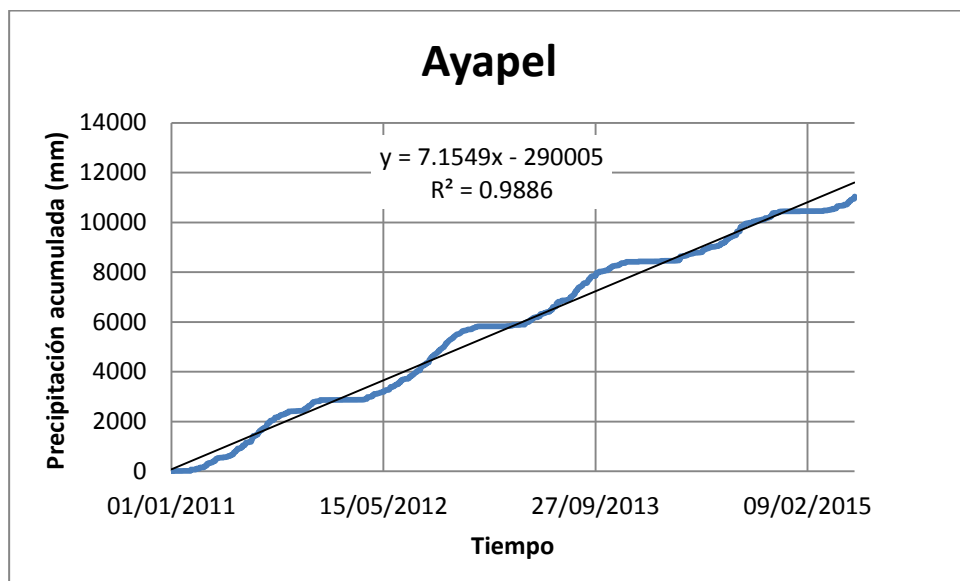


Gráfica 1. Curva de calibración estación Marralu

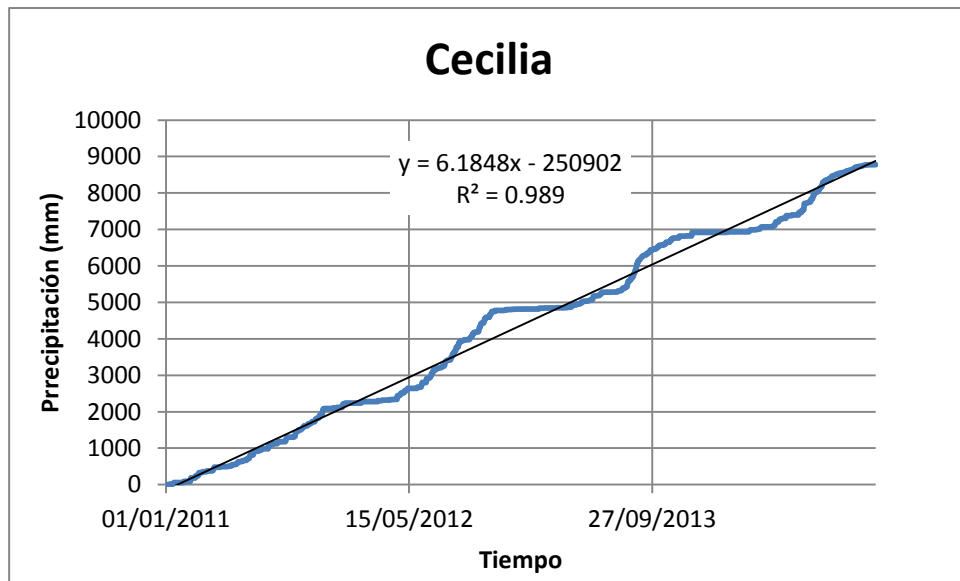
3.3. Análisis de calidad, consistencia y validez de información

3.3.1. Precipitación

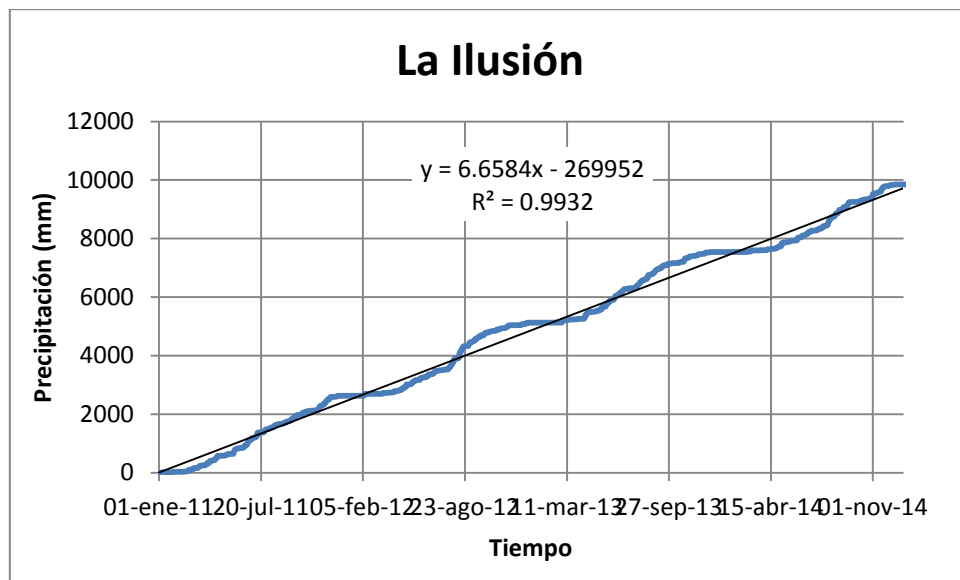
Se realizó la evaluación de la consistencia de los registros de precipitación, utilizando las curvas de masa para cada una de las estaciones analizadas. Las curvas de masa obtenidas para las estaciones analizadas se presentan a continuación:



Gráfica 2. Curva de masa, precipitación, estación Ayapel



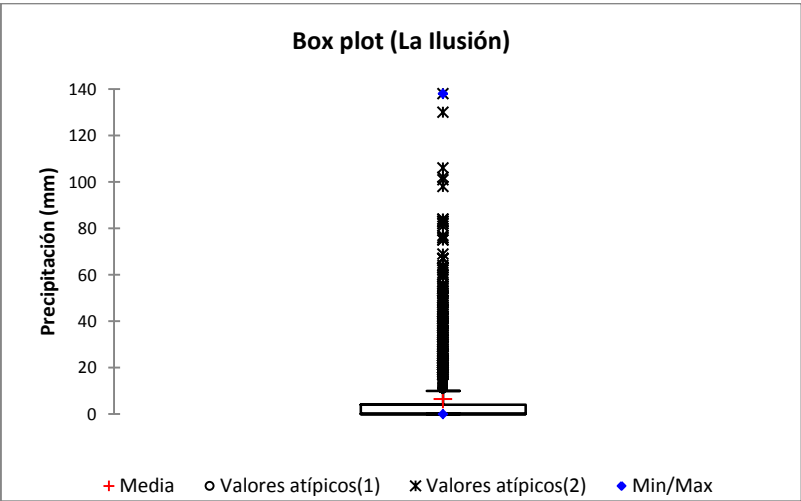
Gráfica 3. Curva de masa, precipitación, estación Cecilia



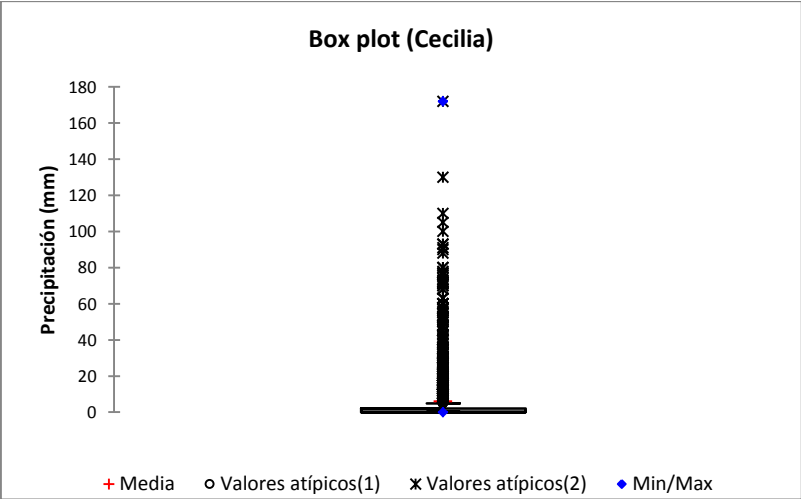
Gráfica 4. Curva de masa, precipitación, estación La Ilusión

Como puede notarse en las anteriores gráficas, las curvas de masa de precipitación, para todas las estaciones analizadas, presentan un comportamiento lineal (coeficientes de determinación superiores a 0.98, en todos los casos), lo que indica consistencia y homogeneidad en los registros analizados. Igualmente, se realizó un análisis gráfico de las series de precipitación a nivel anual y mensual utilizando diagramas de caja y patillas (Box plot), en donde se sintetizan las características de las series temporales y se identifican varios datos que podrían considerarse anómalos (aquellos que se encuentran por fuera de las patillas del diagrama). Estos datos fueron analizados de forma individual y de acuerdo con la tendencia de los valores anteriores y siguientes, se determinó si considerar el registro anómalo o no. En caso de identificar el valor como atípico, este fue removido de la serie y corregido utilizando las técnicas de

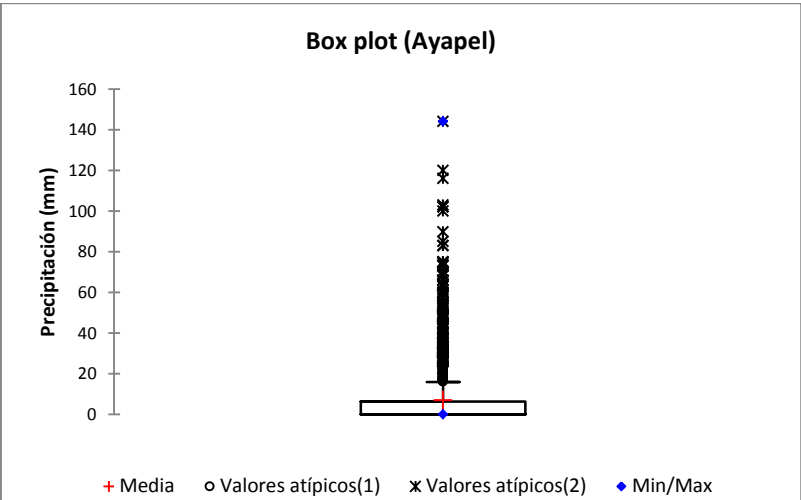
llenado de datos faltantes, antes explicadas. Los diagramas a nivel anual y mensual, para las estaciones evaluadas, se presentan a continuación:



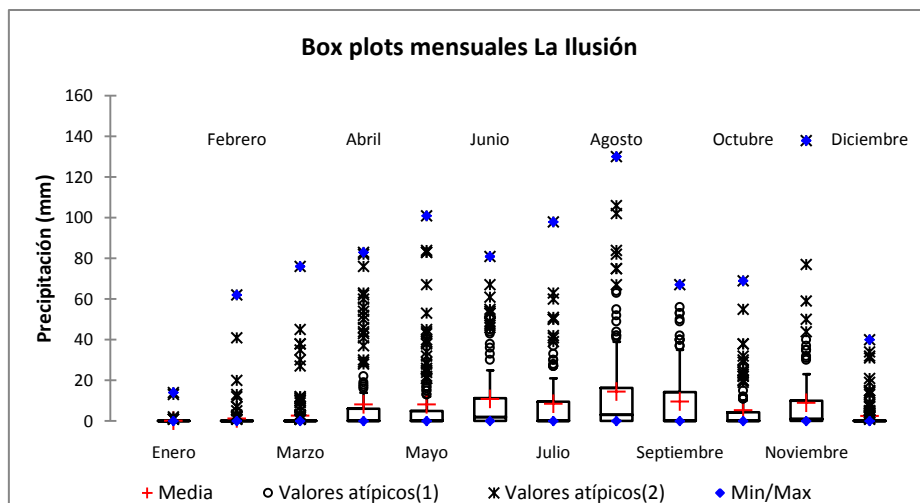
Gráfica 5. Box plot precipitación anual, estación La Ilusión



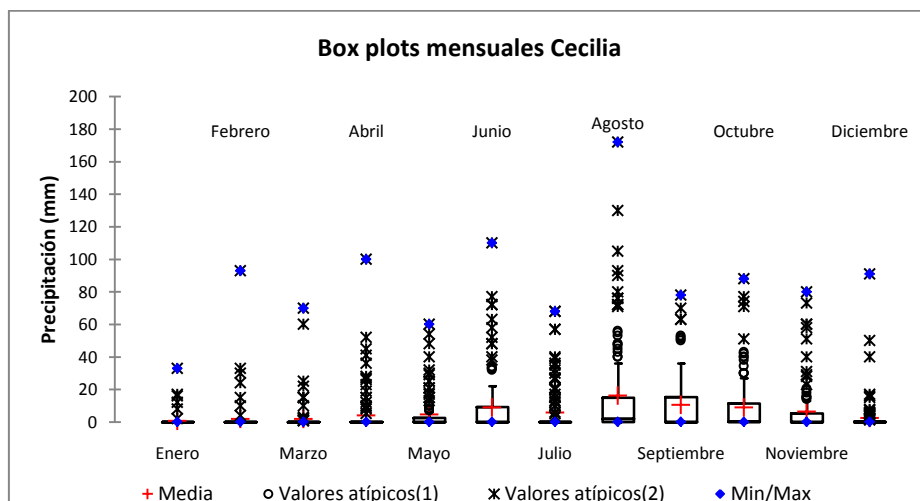
Gráfica 6. Box plot precipitación anual, estación Cecilia



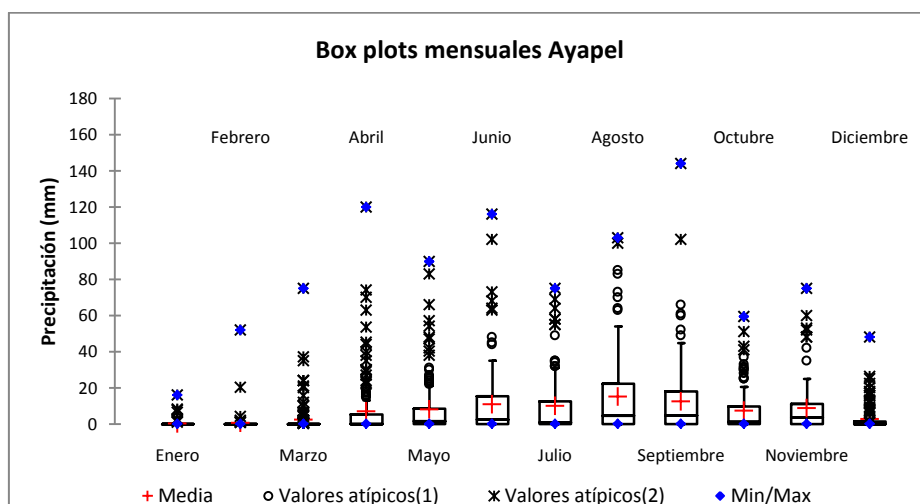
Gráfica 7. Box plot precipitación anual, estación Ayapel



Gráfica 8. Box plot precipitaciones mensuales, estación La Ilusión



Gráfica 9. Box plot precipitaciones mensuales, estación Cecilia

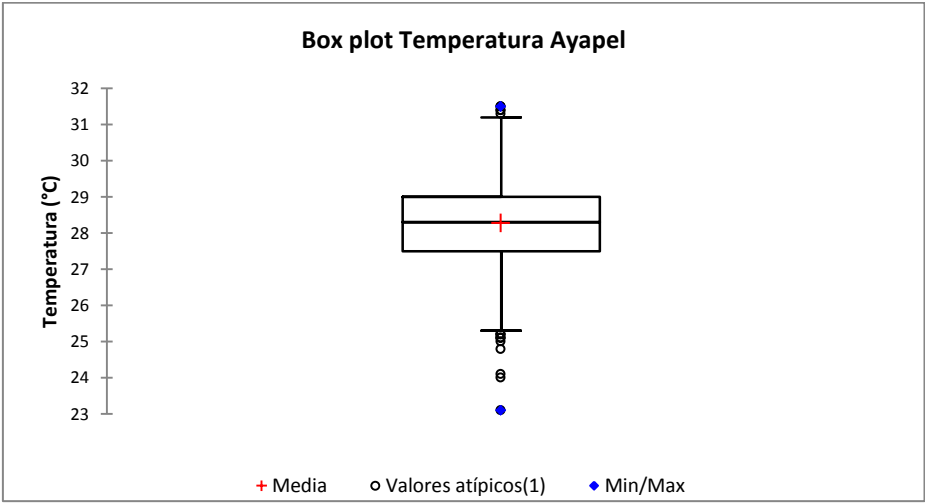


Gráfica 10. Box plot precipitaciones mensuales, estación Ayapel

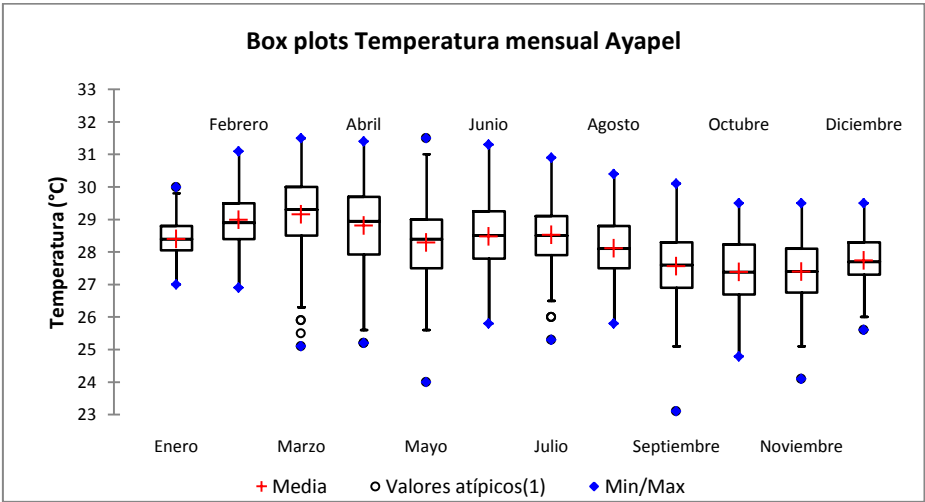
3.3.2. Temperatura

Se verificó la consistencia de los registros de temperatura utilizando diagramas de cajas y patillas a nivel anual y mensual, tal como se explicó en la sección de

precipitación. En caso de identificar datos anómalos, procedió a su remoción y se utilizó el proceso de llenado de datos faltantes para completarlos. Los diagramas obtenidos para la estación de Ayapel fueron:



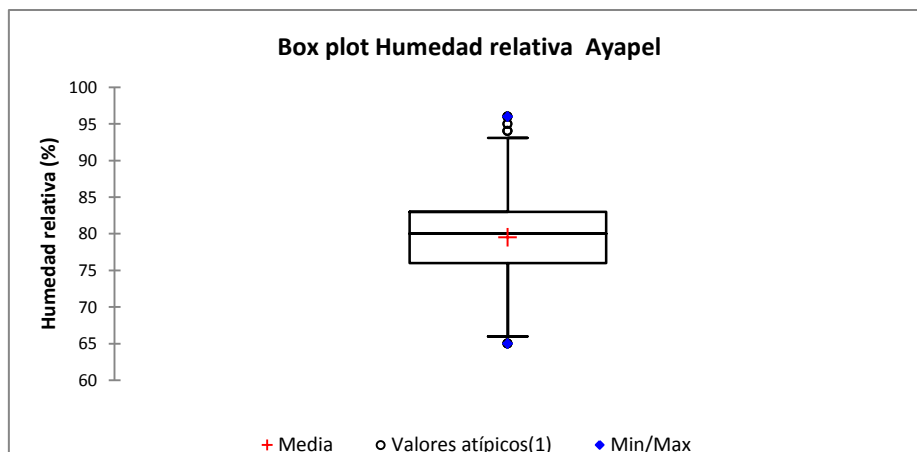
Gráfica 11. Box plot temperatura anual, estación Ayapel



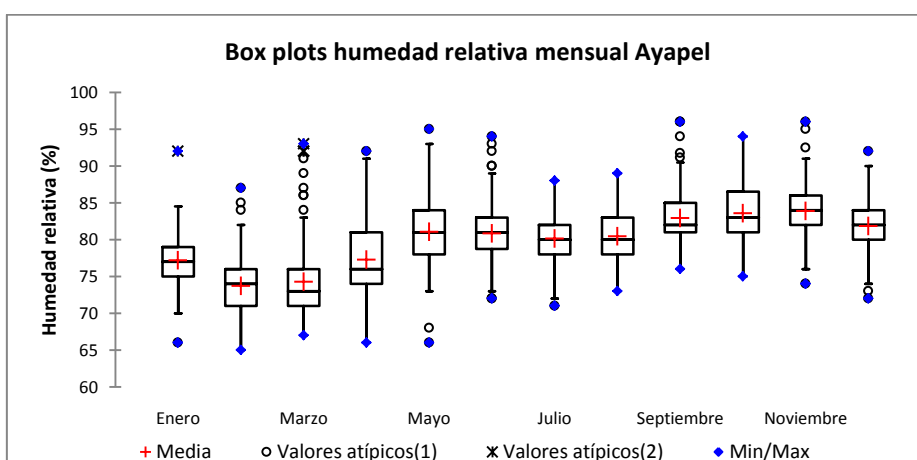
Gráfica 12. Box plot temperatura mensual, estación Ayapel

3.3.3. Humedad relativa

Se verificó la consistencia de los registros de humedad relativa utilizando diagramas de cajas y patillas a nivel anual y mensual, tal como se explicó en la sección de precipitación. En caso de identificar datos anómalos, procedió a su remoción y se utilizó el proceso de llenado de datos faltantes para completarlos. Los diagramas obtenidos para la estación de Ayapel fueron:



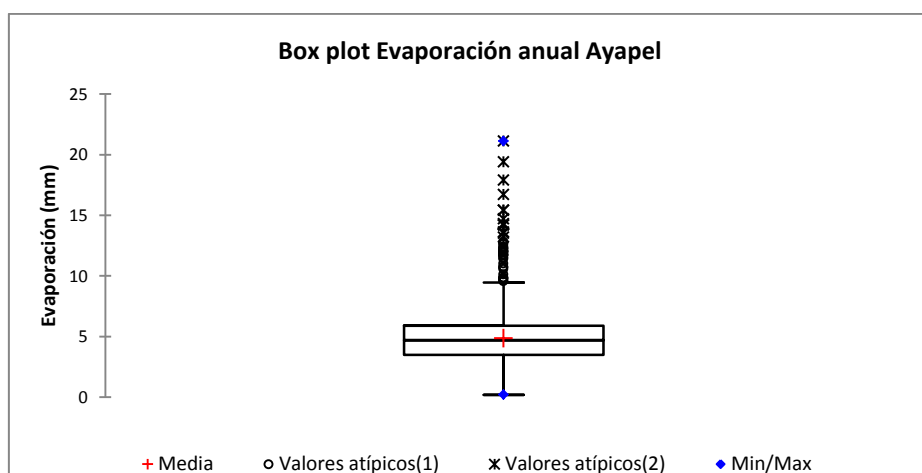
Gráfica 13. Box plot humedad relativa anual, estación Ayapel



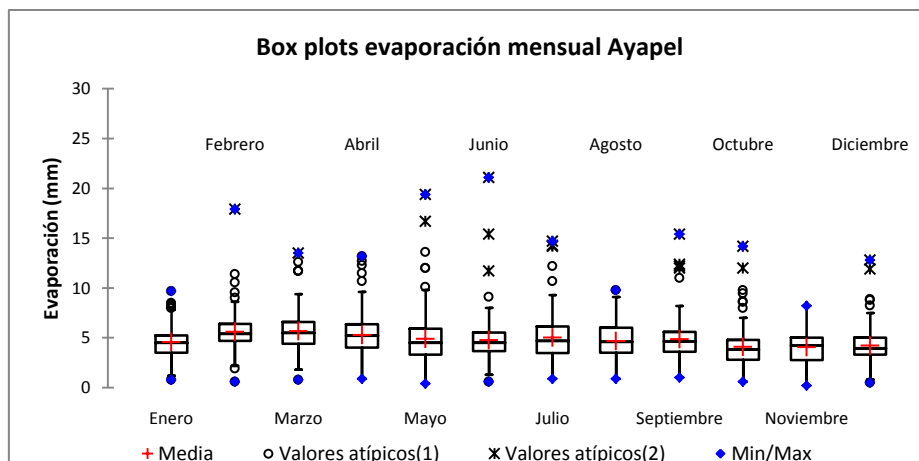
Gráfica 14. Box plot humedad relativa mensual, estación Ayapel

3.3.4. Evaporación

Se verificó la consistencia de los registros de evaporación utilizando diagramas de cajas y patillas a nivel anual y mensual, tal como se explicó en la sección de precipitación. En caso de identificar datos anómalos, procedió a su remoción y se utilizó el proceso de llenado de datos faltantes para completarlos. Los diagramas obtenidos para la estación de Ayapel fueron:



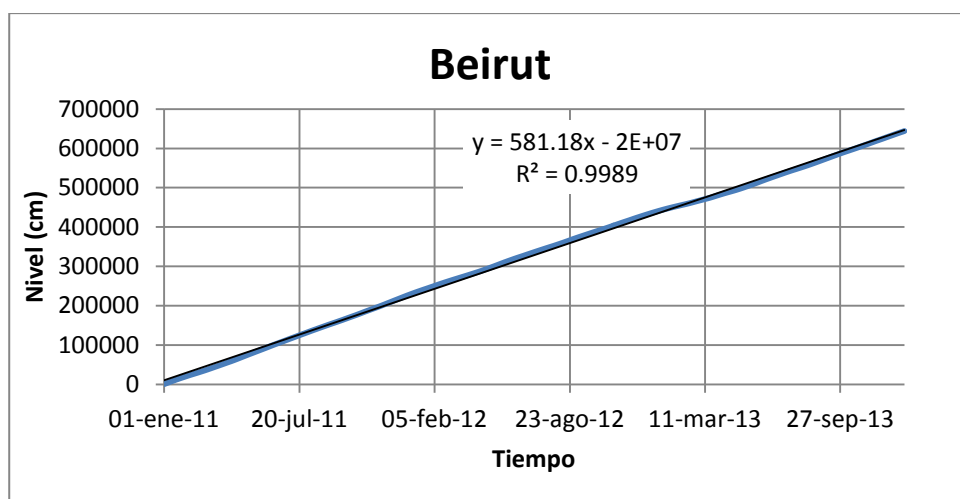
Gráfica 15. Box plot evaporación anual, estación Ayapel



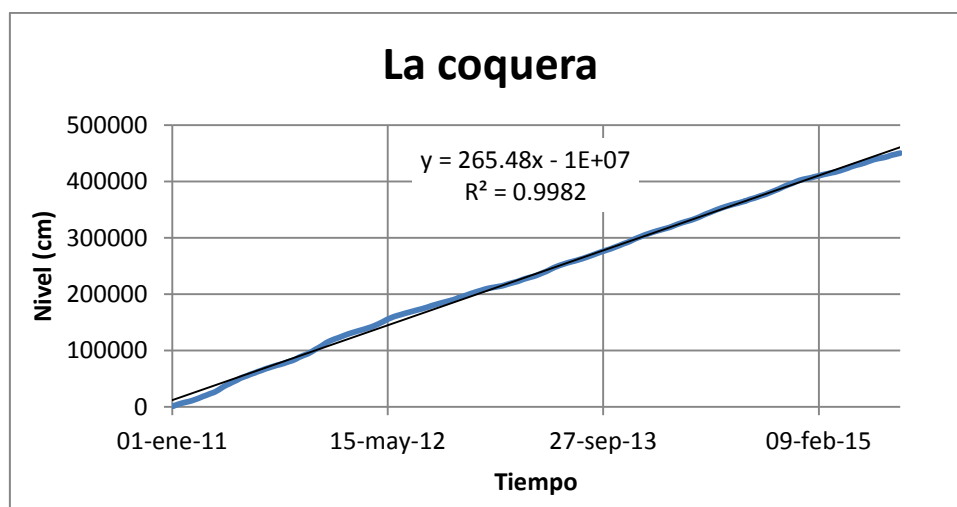
Gráfica 16. Box plot evaporación mensual, estación Ayapel

3.3.5. Nivel

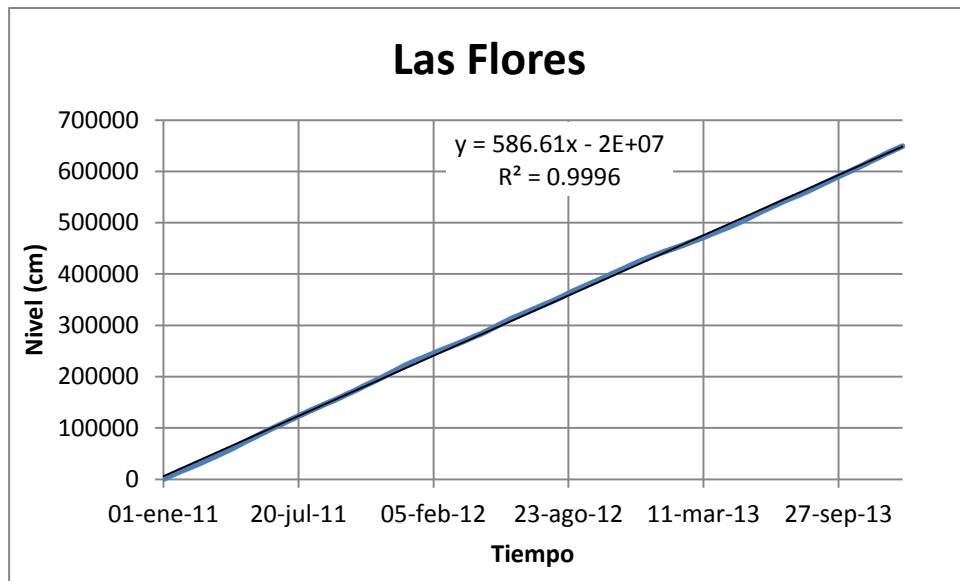
Se realizó la evaluación de consistencia de los registros de nivel, utilizando las curvas de masa para cada una de las estaciones analizadas. Las curvas de masa obtenidas para las estaciones analizadas se presentan a continuación:



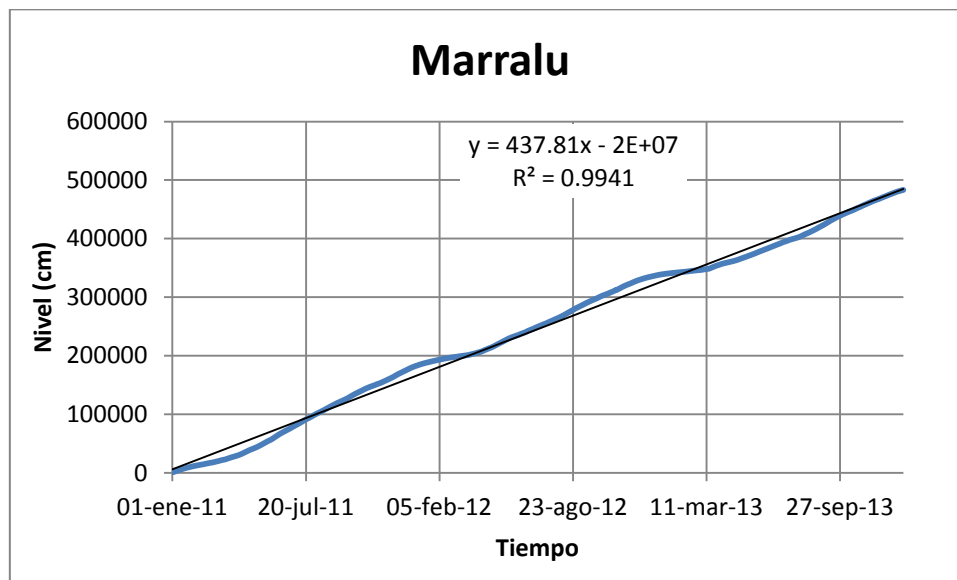
Gráfica 17. Curva de masa, niveles, estación Beirut



Gráfica 18. Curva de masa, niveles, estación La Coquera

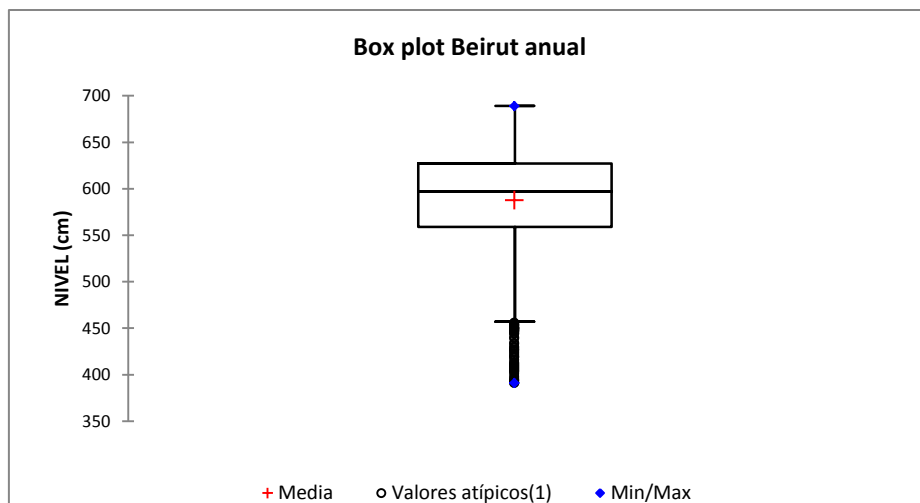


Gráfica 19. Curva de masa, niveles, estación Las Flores

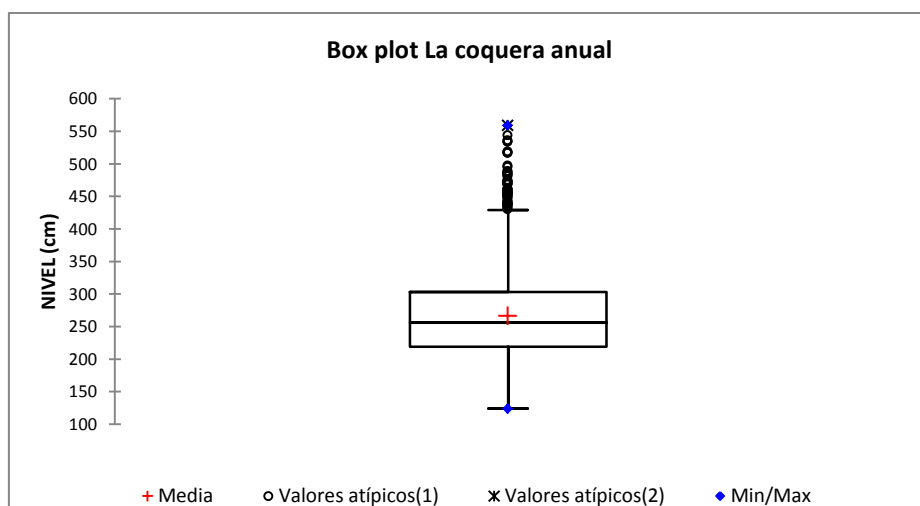


Gráfica 20. Curva de masa, niveles, estación Marralu

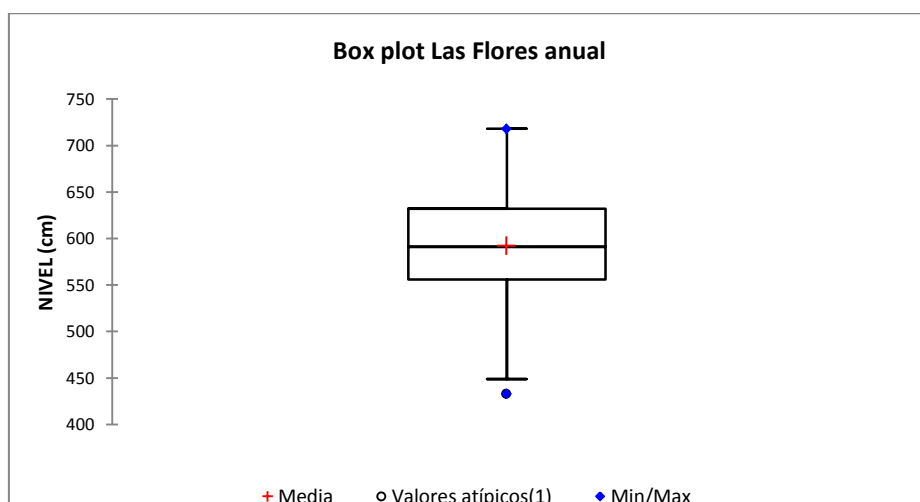
Como puede notarse en las anteriores gráficas, las curvas de masa de nivel, para todas las estaciones analizadas, presentan un comportamiento lineal (coeficientes de determinación superiores a 0.99, en todos los casos), lo que indica consistencia y homogeneidad en los registros analizados. Igualmente, se realizó un análisis gráfico de las series de nivel en escala anual y mensual utilizando diagramas de caja y patillas (Box plot), en donde se sintetizan las características de las series temporales y se identifican varios datos que podrían considerarse anómalos (aquellos que se encuentran por fuera de las patillas del diagrama). Estos datos fueron analizados de forma individual y de acuerdo con la tendencia de los valores anteriores y siguientes, se determinó si considerar el registro anómalo o no. En caso de identificar el valor como atípico, este fue removido de la serie y corregido utilizando las técnicas de llenado de datos faltantes, antes explicadas. Los diagramas a nivel anual y mensual, para las estaciones evaluadas, se presentan a continuación:



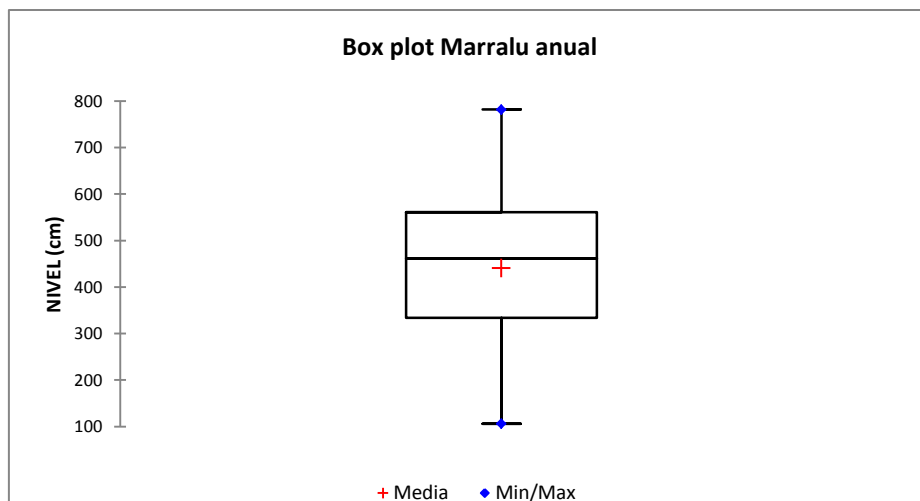
Gráfica 21. Box plot nivel anual, estación Beirut



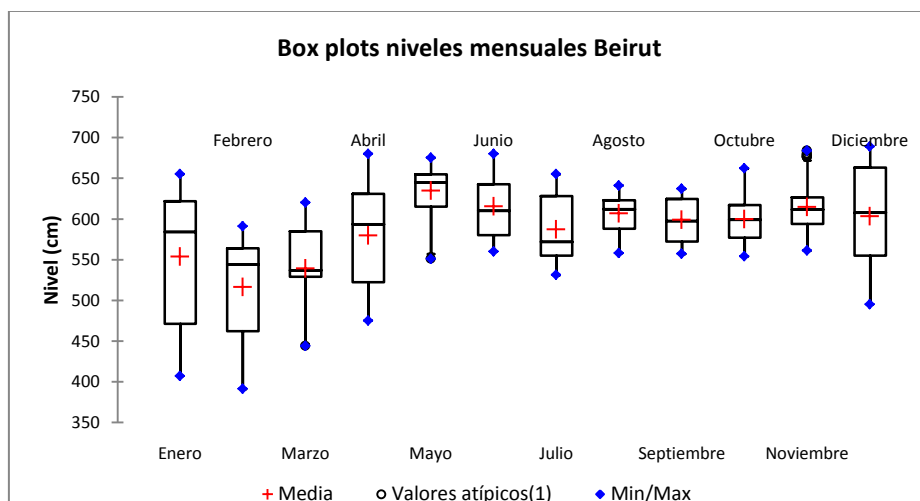
Gráfica 22. Box plot nivel anual, estación La Coquera



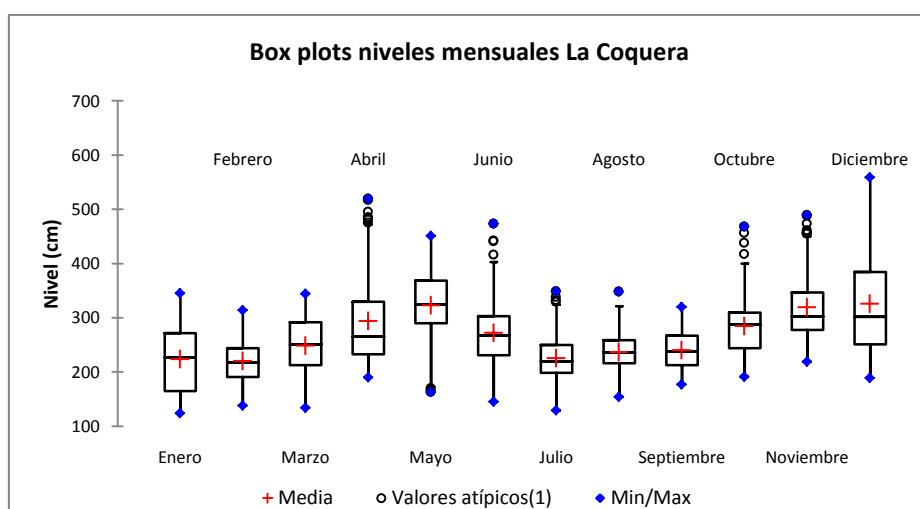
Gráfica 23. Box plot nivel anual, estación Las Flores



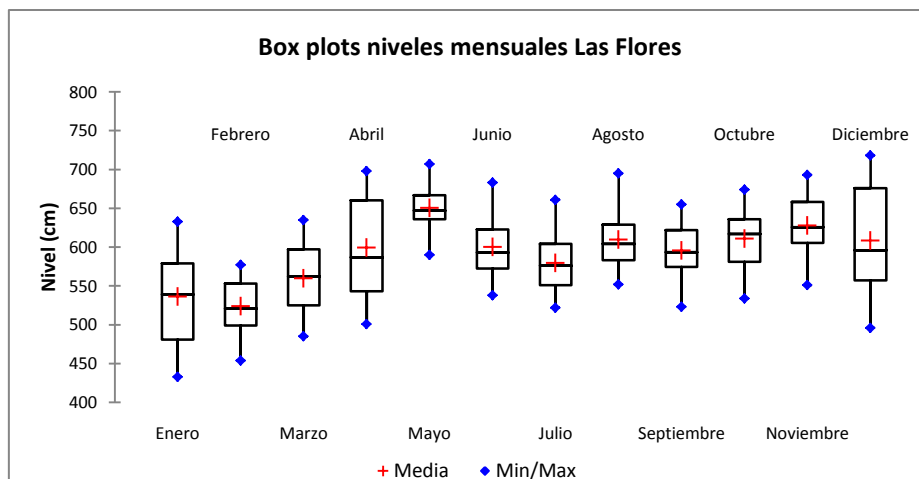
Gráfica 24. Box plot nivel anual, estación Marralu



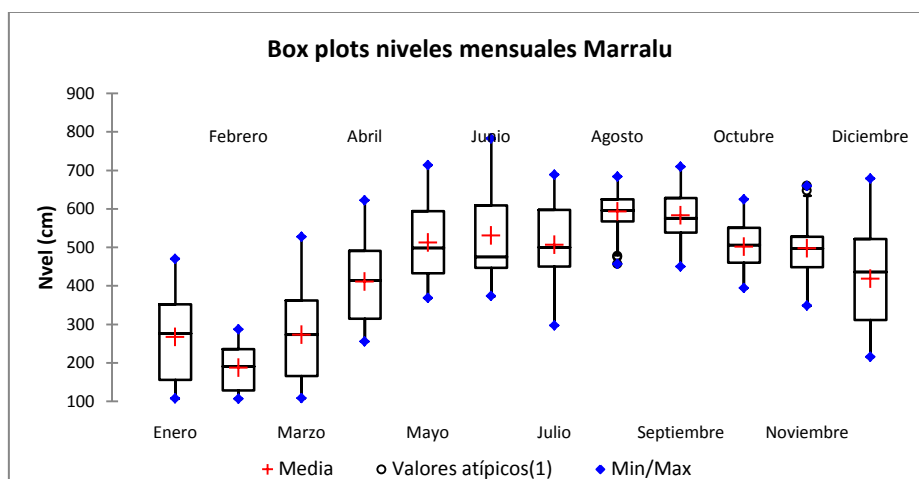
Gráfica 25. Box plot nivel mensual, estación Beirut



Gráfica 26. Box plot nivel mensual, estación La Coquera



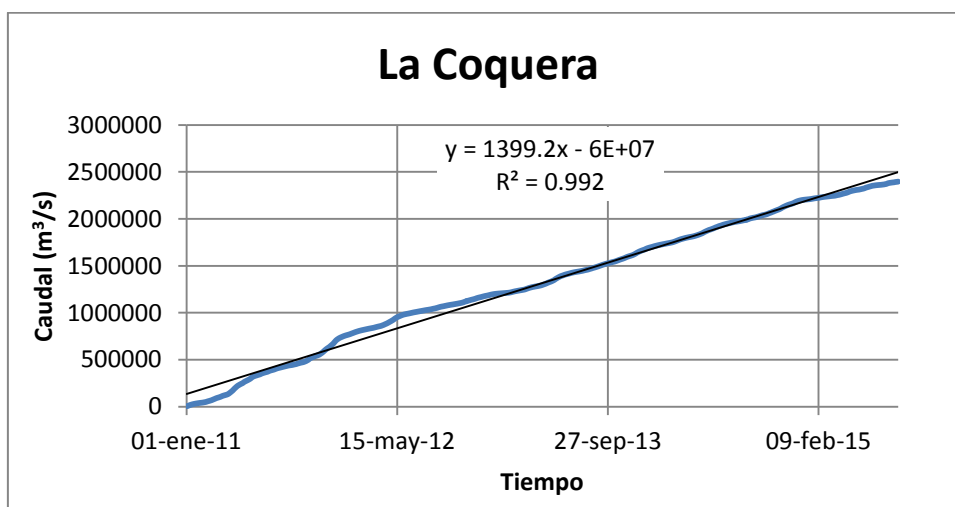
Gráfica 27. Box plot nivel mensual, estación Las Flores



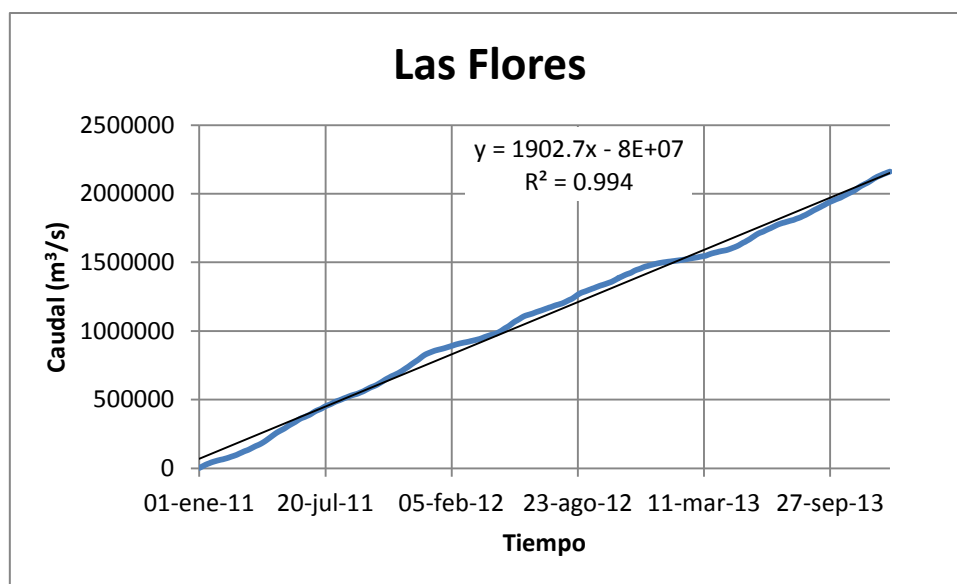
Gráfica 28. Box plot nivel mensual, estación Marralu

3.3.6. Caudal

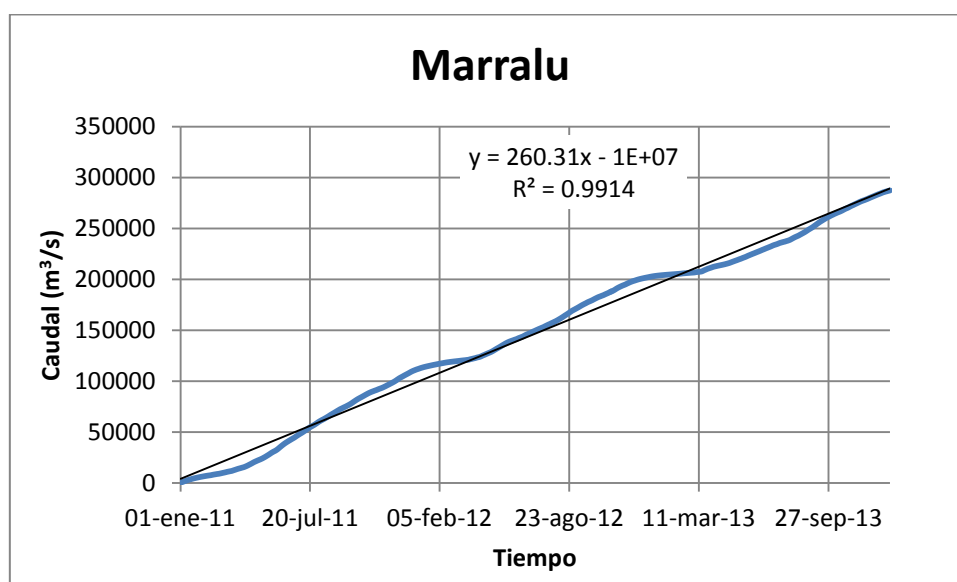
Se realizó la evaluación de consistencia de los registros de caudal, utilizando las curvas de masa para cada una de las estaciones analizadas. Las curvas de masa obtenidas para las estaciones analizadas se presentan a continuación:



Gráfica 29. Curva de masa, caudal, estación La Coquera

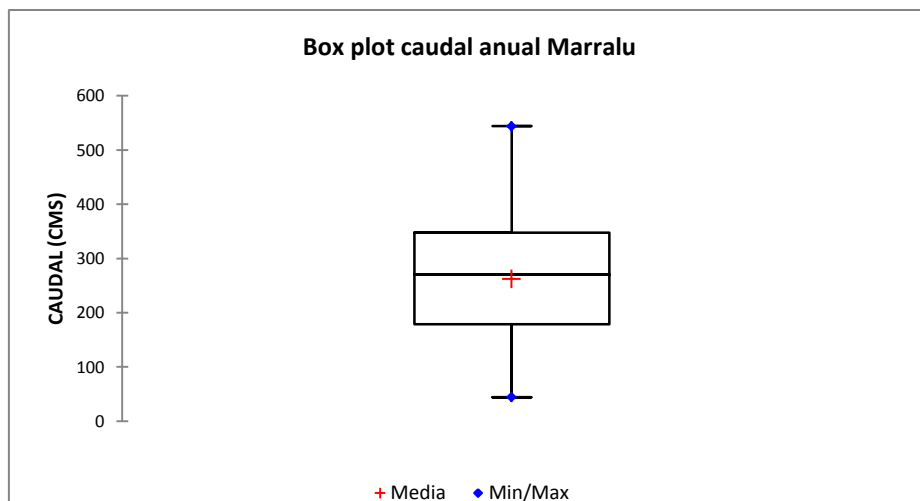


Gráfica 30. Curva de masa, caudal, estación Las Flores

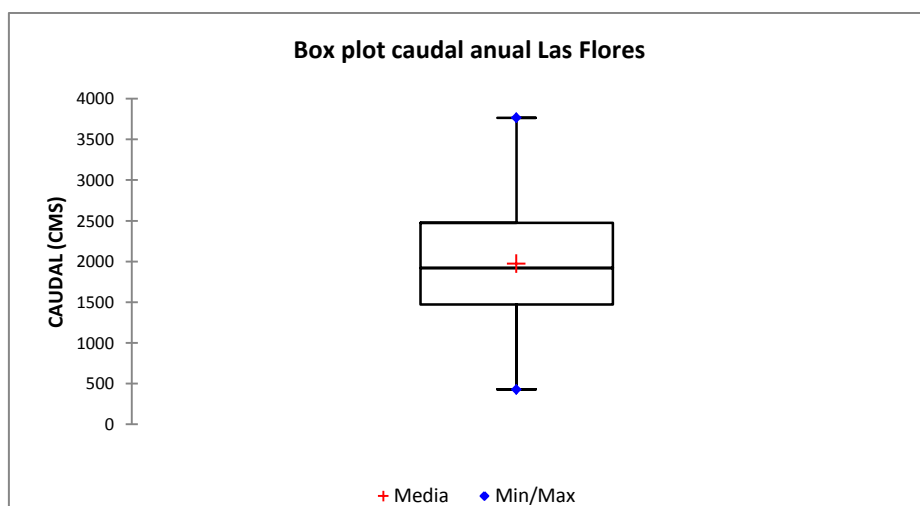


Gráfica 31. Curva de masa, caudal, estación Marralu

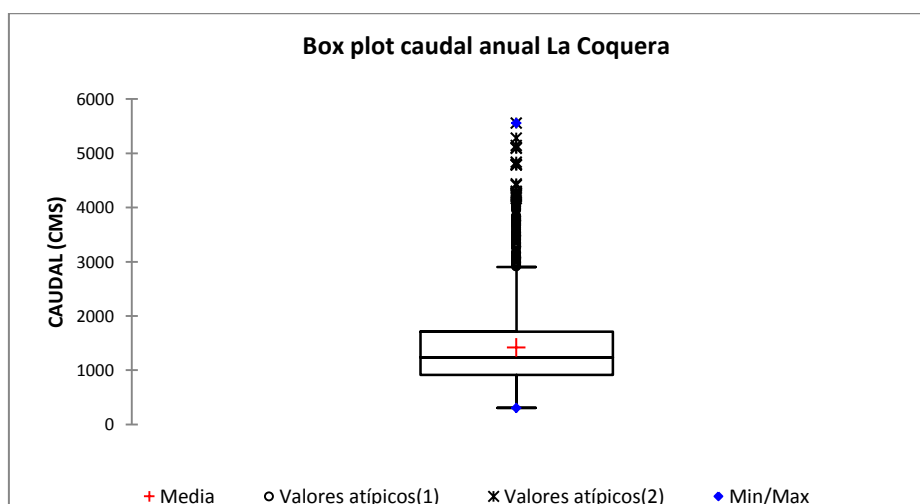
Como puede notarse en las anteriores gráficas, las curvas de masa de caudal, para todas las estaciones analizadas, presentan un comportamiento lineal (coeficientes de determinación superiores a 0.99, en todos los casos), lo que indica consistencia y homogeneidad en los registros analizados. Igualmente, se realizó un análisis gráfico de las series de nivel en escala anual y mensual utilizando diagramas de caja y patillas (Box plot), en donde se sintetizan las características de las series temporales y se identifican varios datos que podrían considerarse anómalos (aquellos que se encuentran por fuera de las patillas del diagrama). Estos datos fueron analizados de forma individual y de acuerdo con la tendencia de los valores anteriores y siguientes, se determinó si considerar el registro anómalo o no. En caso de identificar el valor como atípico, este fue removido de la serie y corregido utilizando las técnicas de llenado de datos faltantes, antes explicadas. Los diagramas a nivel anual y mensual, para las estaciones evaluadas, se presentan a continuación:



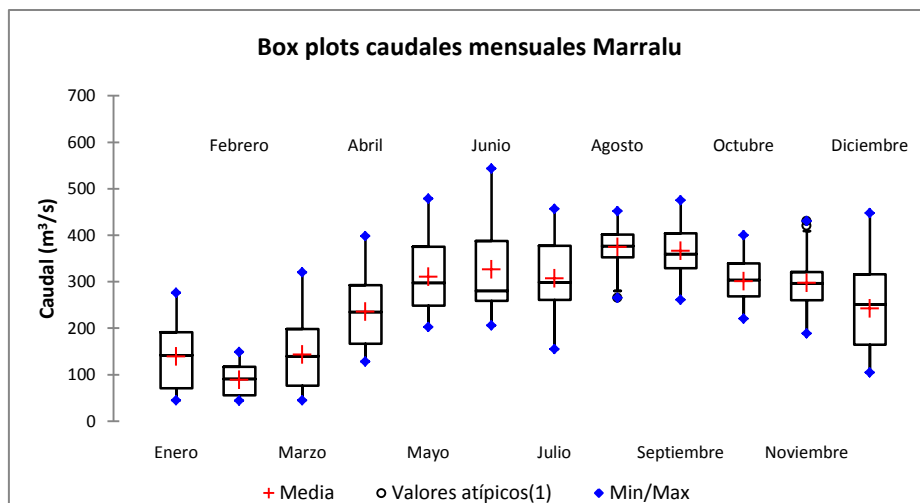
Gráfica 32. Box plot caudal anual, estación Marralu



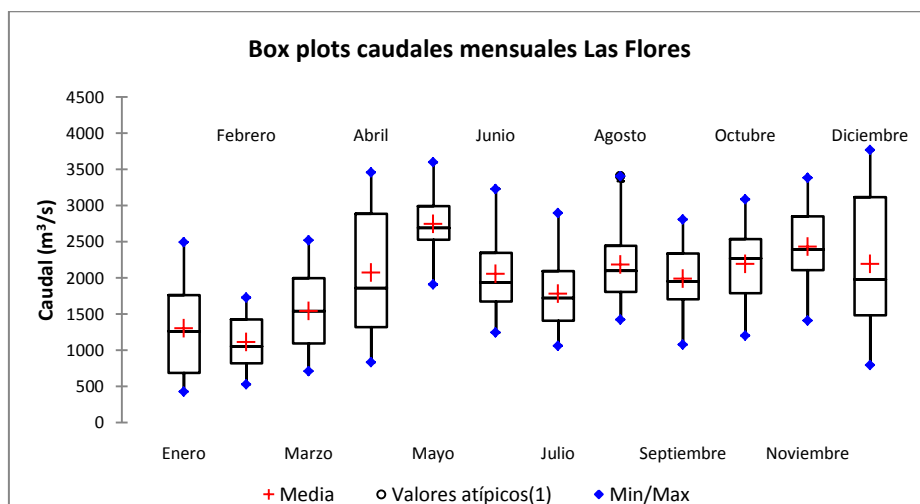
Gráfica 33. Box plot caudal anual, estación Las Flores



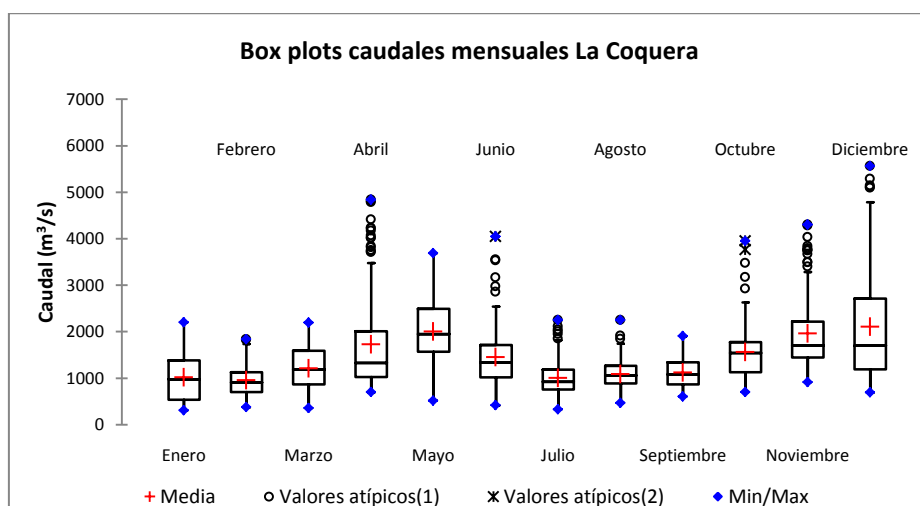
Gráfica 34. Box plot caudal anual, estación La Coquera



Gráfica 35. Box plot caudal mensual, estación Marralu



Gráfica 36. Box plot caudal mensual, estación Las Flores



Gráfica 37. Box plot caudal mensual, estación La Coquera

Después de realizar los procedimientos de completado de datos faltantes y análisis de consistencia, se obtuvieron las series de niveles, caudales, precipitación,

temperatura, evaporación y humedad relativa empleadas en el desarrollo del modelo simplificado río San Jorge - ciénaga de Ayapel. Dichas series pueden ser consultadas en la parte inicial de la sección ‘Resultados y Discusión’ del presente documento y consisten en registros de todos los parámetros entre los años 1980 y 2013.

3.4. Construcción de modelo simplificado río San Jorge – ciénaga de Ayapel

La modelación del sistema río San Jorge – ciénaga de Ayapel se realizó en cuatro etapas principales:

1. Modelación caños de salida río Cauca.
2. Modelación de series de escorrentía de entrada provenientes de cuenca de drenaje de la ciénaga.
3. Construcción del modelo río San Jorge – ciénaga de Ayapel.
4. Calibración de parámetros de caño simplificado de interconexión entre el río San Jorge y la ciénaga de Ayapel.

Las cuatro etapas mencionadas se definieron después de establecer la simplificación del sistema a modelar, tal como se muestra en la siguiente Figura:



Figura 6. Esquema sistema simplificado río San Jorge – ciénaga de Ayapel – río Cauca
Fuente: Autor

Como se puede notar, la ciénaga de Ayapel recibe entradas (flechas verdes en el esquema anterior) en forma de escorrentía y precipitación. Respecto a la primera (escorrentía) esta se encuentra conformada por el caudal que entra a la ciénaga a partir del escurrimiento de agua de la cuenca aferente y los caudales de entrada de los caños Muñoz y Barro, incluyendo este último el caudal del caño Pescado, que parten del río Cauca. Por otro lado, las salidas del sistema (flechas rojas) corresponden a la evaporación del espejo de agua (importante dada la extensión de la ciénaga) y un caño de conexión directa con el río San Jorge.

En este punto, vale la pena mencionar que el sistema real cuenta con dos caños de salida: el caño Viloría y el caño Grande. Este último (Grande) genera conexión directa con el río San Jorge mientras que el Viloría tiene una mayor extensión, recibe las aguas del caño Caimán y desemboca en el caño Rabón (Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación, 2012). A pesar de lo anterior, el sistema se representará únicamente con un caño que conecta la ciénaga con el río; haciendo la suposición de que la dinámica temporal de niveles de la ciénaga se ve únicamente influenciada por los niveles en el río San Jorge y Cauca, así como por las variables meteorológicas (precipitación y evaporación).

A continuación, se presenta la descripción detallada de cada una de las etapas definidas para esta parte de la metodología.

3.4.1. Modelación caños de salida río Cauca

Como es posible observar en la Figura 6, la ciénaga de Ayapel recibe aportes de caudal de tres caños que parten del río Cauca: caño Barro, caño Pescado y caño Muñoz. De acuerdo con lo anterior, es necesario establecer las series de caudales que entran a la ciénaga en el tiempo de la estudio. Con este fin, se decidió realizar la modelación del río Cauca en los tramos en los cuales se presentan las salidas de los tres caños a considerar. Los caudales asignados a cada caño correspondieron al desborde del río Cauca en 500 metros anteriores al punto de salida.

Los valores iniciales para el modelo correspondieron a las series de caudales registrados en dos estaciones sobre el río Cauca durante el período de estudio (1980-2013): La Coquera y Las Flores. Se requirió la inclusión de dos estaciones, dado que la salida del caño Barro se presenta antes de que el río Cauca reciba las aguas del río Nechí (caudales en La Coquera) mientras que las de los caños Pescado y Muñoz ocurren posteriormente (caudales en Las Flores). El modelo se realizó en la herramienta Simulink de Matlab y se basó en los bloques originales, desarrollados por Camacho (1997) y Camacho *et al* (2000), y utilizados en la modelación del Canal del Dique realizada por la Universidad Nacional (Universidad Nacional de Colombia & CORMAGDALENA, 2007). Un esquema general del modelo construido puede ser consultado en la siguiente Figura:

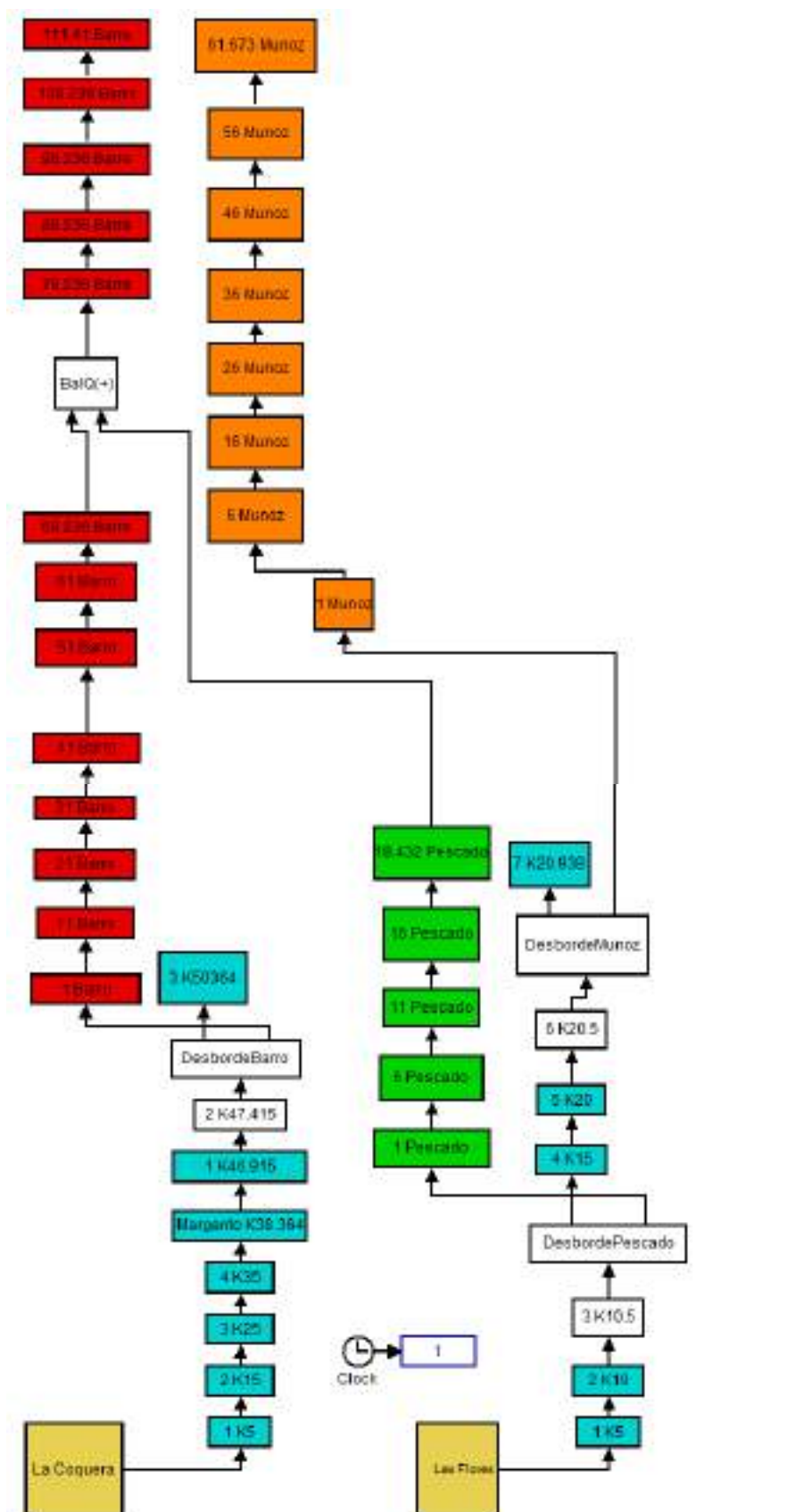


Figura 7. Esquema general del modelo caños de salida río Cauca
Fuente: Autor

correspondientes a cada tramo del canal así como la cota de desborde (tanto por la derecha como por la izquierda) para el canal original. De esta forma, para cada uno de los bloques se asignaron los siguientes valores:

Tabla 10. Coeficientes de profundidad y velocidad y profundidad de desborde, río Cauca

Estación de partida	Número de bloque	Nombre bloque	Longitud del tramo (m)	$v = aQ^b$		$H = cQ^d$		Profundidad de desborde (m)
				a	b	c	d	
La Coquera	1	1 K5	5000	0.1267	0.3318	0.1249	0.5046	6.96
	2	2 K15	10000	0.0783	0.4045	0.1526	0.4904	7.60
	3	3 K25	10000	0.0829	0.3984	0.2484	0.4344	8.24
	4	4 K35	10000	0.0331	0.5274	0.4439	0.3679	6.00
	5	Margento K38.364	3364	0.0209	0.5888	0.7485	0.3021	9.14
	6	1 K46.915	8851	0.0176	0.5698	0.9103	0.2589	8.16
	7	2 K47.415	500	0.0166	0.5760	1.0730	0.2333	8.04
	8	3 K50.364	2949	0.0166	0.5760	1.2228	0.2061	7.67
Las Flores	9	1 K5	5000	1.4351	0.0552	0.1192	0.5327	10.70
	10	2 K10	10000	0.0206	0.4994	2.1341	0.2324	13.74
	11	3 K10.5	500	0.0213	0.4959	2.2262	0.2244	13.60
	12	4 K15	4500	0.0241	0.4812	2.0939	0.2271	13.04
	13	5 K20	5000	0.0401	0.4078	1.9379	0.2297	12.34
	14	6 K20.5	500	0.0279	0.4643	1.8766	0.2327	12.20
	15	7 K20.938	438	0.0279	0.4643	1.8766	0.2327	12.20

Fuente: Autor

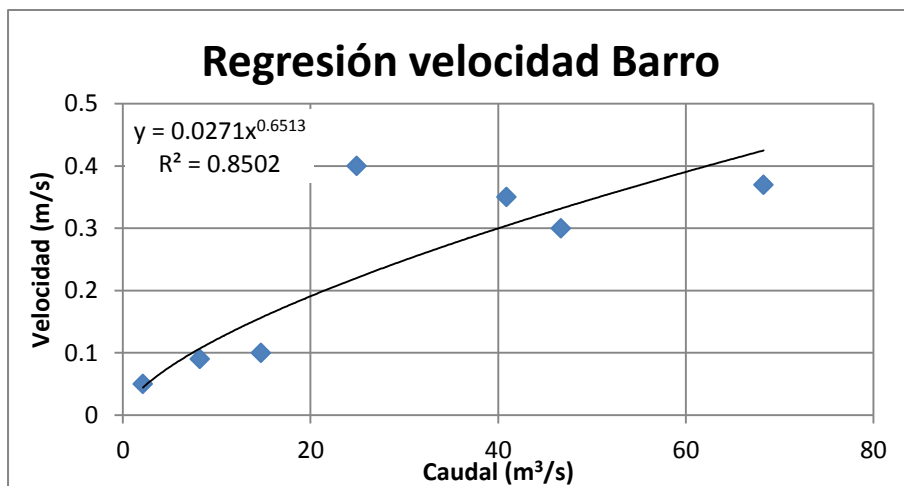
Las profundidades de desborde fueron definidas como la diferencia entre la cota de desborde, reportada en los estudios iniciales de la Universidad Nacional, y la cota de fondo definida, para cada abscisa, en la modelación original realizada en el software HEC-RAS. Igualmente, sólo se consideró desborde por el margen izquierdo del canal, dado que hacía este lado se presentan las salidas de los caños de interés.

Respecto a los caños Muñoz y Barro, se utilizaron valores de velocidad, caudal y profundidad tomados de aforos realizados, tanto por la Universidad Nacional (2012) como por la Universidad de Antioquia (2007), que se relacionaron por medio de regresiones potenciales para obtener los coeficientes. A continuación se presentan los valores empleados y los coeficientes obtenidos mediante este procedimiento:

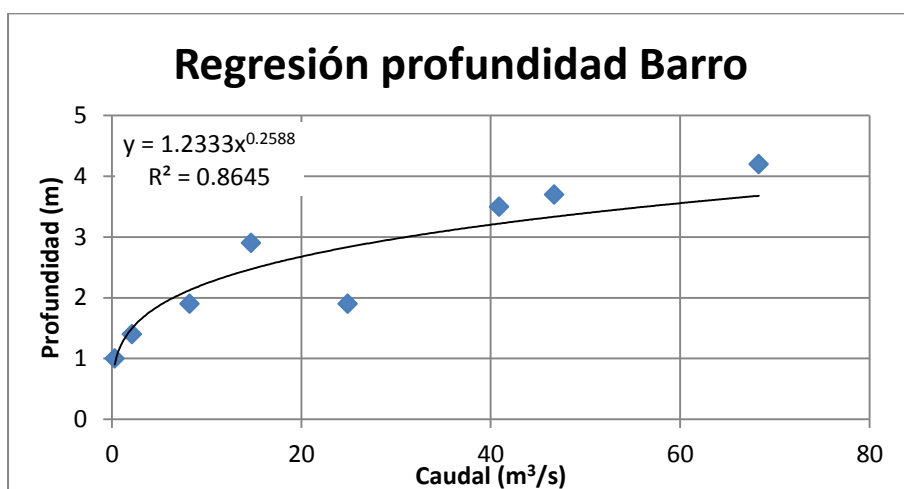
Tabla 11. Valores empleados regresiones caño Barro

Q (m ³ /s)	H (m)	v (m/s)
68.3	4.2	0.37
8.2	1.9	0.09
2.13	1.4	0.05
40.9	3.5	0.35
0.3	1	0.05
24.9	1.9	0.4
14.7	2.9	0.1
46.7	3.7	0.3

Fuente: Autor



Gráfica 38. Regresión de velocidad, caño Barro

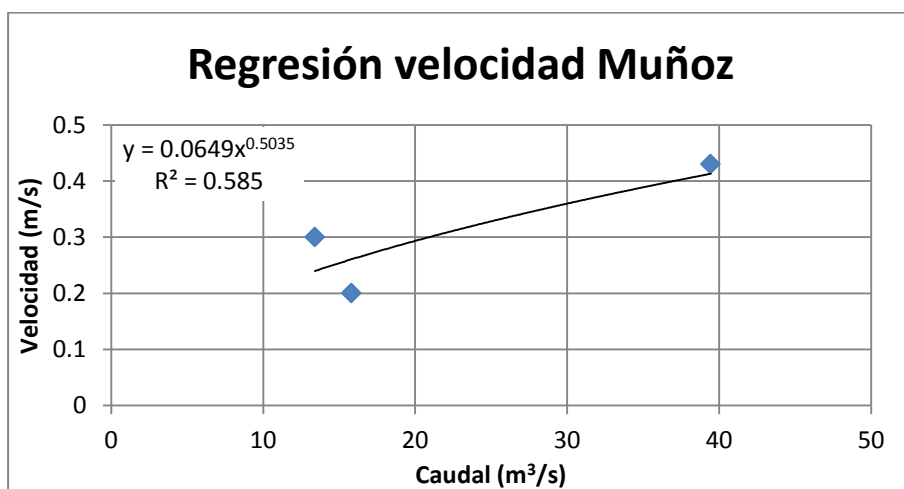


Gráfica 39. Regresión de profundidad, caño Barro

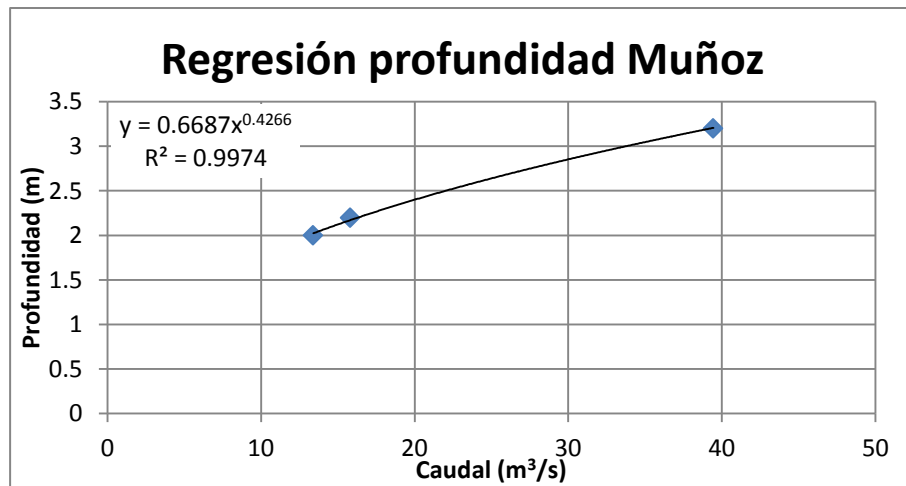
Tabla 12. Valores empleados regresiones caño Muñoz

Q (m³/s)	H (m)	v (m/s)
13.4	2	0.3
15.8	2.2	0.2
39.45	3.2	0.43

Fuente: Autor



Gráfica 40. Regresión de velocidad, caño Muñoz



Gráfica 41. Regresión de profundidad, caño Muñoz

Las profundidades de desborde de estos caños fueron definidas de formas diferentes: En el caso del caño Muñoz, la Universidad Nacional (2012) calculó la capacidad máxima del canal como 5.77 metros por lo que este valor se consideró como la profundidad de desborde. Para el caño Barro no se contaba con el valor de profundidad máximo por lo que se optó por considerarlo como el máximo de las profundidades medidas en aforos; es decir, 4.2 metros.

Respecto al caño Pescado, dado que no se contaba con aforos realizados, se decidió utilizar los coeficientes obtenidos para el caño Barro, así como la profundidad de desborde del mismo. Respecto a las velocidades de sedimentación, al no contar con datos específicos para las corrientes analizadas, se mantuvieron los valores utilizados en la modelación del Canal del Dique (15 m/s para todos los bloques en todas las corrientes). De igual forma, los coeficientes de descarga de los diferentes tramos, fueron definidos igual a los del canal del dique (0.0001 para todos los bloques de canal comunes).

Finalmente, las condiciones iniciales, tanto de caudal como de concentración de sólidos suspendidos totales, fueron definidas de la siguiente manera:

- Para el río Cauca, se tomó el primer valor de las series de caudales y sólidos suspendidos totales, dependiendo de la estación base correspondiente a cada bloque.
- Para el caño Barro, el caudal inicial se tomó como 30 m³/s y la concentración de sólidos suspendidos como el primer registro en la serie de concentraciones en la estación La Coquera.
- Para el caño Pescado, el caudal inicial se tomó como 30 m³/s y la concentración de sólidos suspendidos como el primer registro en la serie de concentraciones en la estación Las Flores.
- Para el caño Muñoz, el caudal inicial se tomó como 20 m³/s y la concentración de sólidos suspendidos como el primer registro en la serie de concentraciones en la estación Las Flores.

5. **Bloque de balance:** Corresponde al bloque blanco llamado ‘BalQ(+)’ en el esquema general. En este bloque se realiza el balance de caudal y sólidos suspendidos de las dos corrientes que se unen: el caño Pescado y el caño Barro. Al abrir este bloque se observa los siguiente:

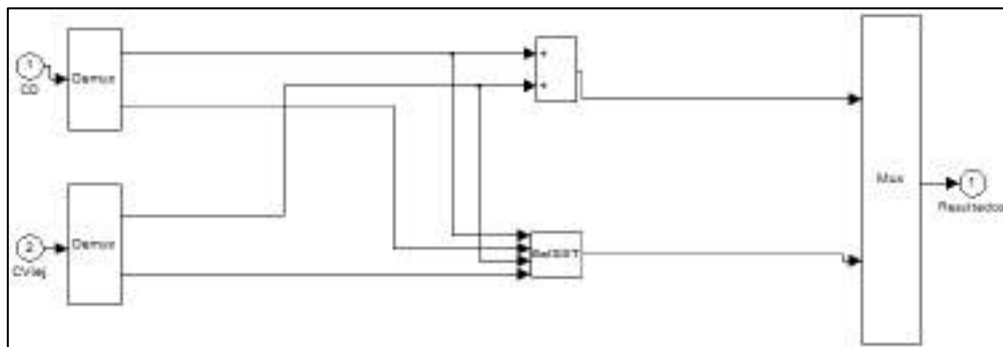


Figura 12. Esquema general bloque de balance
Fuente: Autor

Igualmente, en el esquema general, puede observarse un bloque que genera una variable de tiempo en el ‘Workspace’ de Matlab. Este bloque resulta útil dado que el modelo realiza la integración de las ecuaciones variando el paso temporal y, en caso de no utilizarlo, sería imposible saber a qué momento en el tiempo corresponde cada uno de los valores generados. La forma general del anterior bloque se presenta en la siguiente Figura:

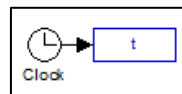


Figura 13. Esquema general bloque de generación de variable tiempo
Fuente: Autor

Finalmente, se definieron los parámetros de simulación del modelo tal como se muestra en Figura que sigue:

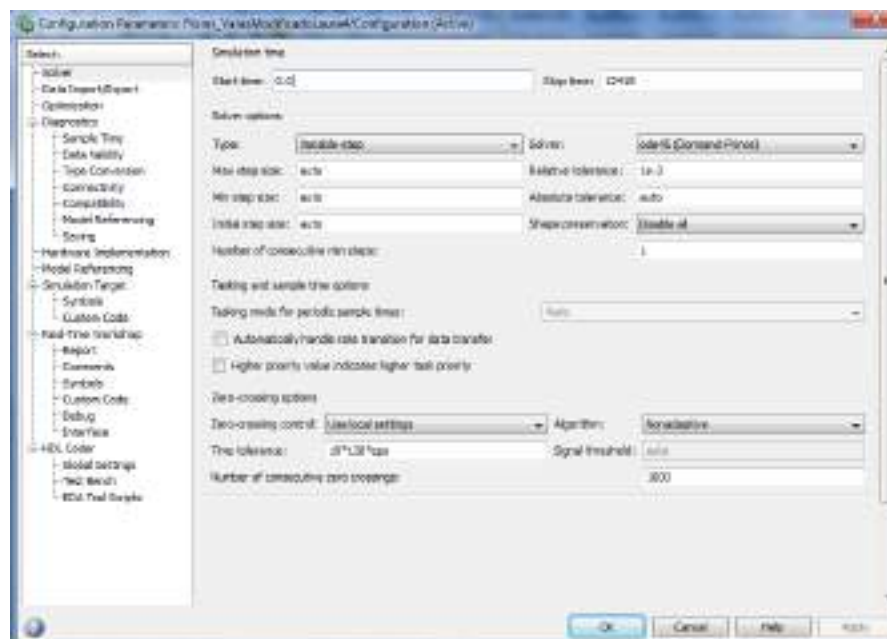


Figura 14. Parámetros de simulación, modelo caños desborde río Cauca
Fuente: Autor

Respecto a la anterior Figura, es posible decir que el tiempo de simulación se definió de 0 a 12,418 dado que entre el 1 de Enero de 1980 y el 31 de Diciembre de 2013, se tienen 12,419 días.

El modelo fue corrido con las series históricas de las estaciones La Coquera y Las Flores y se obtuvieron series de caudales, niveles, concentraciones de sólidos suspendidos totales y caudales de desborde para cada una de las corrientes modeladas. Los principales resultados de la aplicación de esta parte de la metodología pueden ser consultados en la sección ‘Resultados y Discusión’.

3.4.2. Modelación serie de escorrentía: cuenca ciénaga

La modelación de la cuenca que drena directamente hacia la ciénaga de Ayapel se llevó a cabo utilizando el modelo lluvia-escorrentía HEC-HMS, del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (US Army Corps of Engineers, 2015). El modelo realizado se basó en el desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia (2007) para la ciénaga de Aguas Claras, asociada al sistema del Canal del Dique. Cada uno de los pasos seguidos, en la construcción del modelo de la cuenca de estudio, se describen a continuación:

1. **Generalidades cuenca:** En primer lugar, se presenta una Figura de la visión general del sistema modelado en el programa:

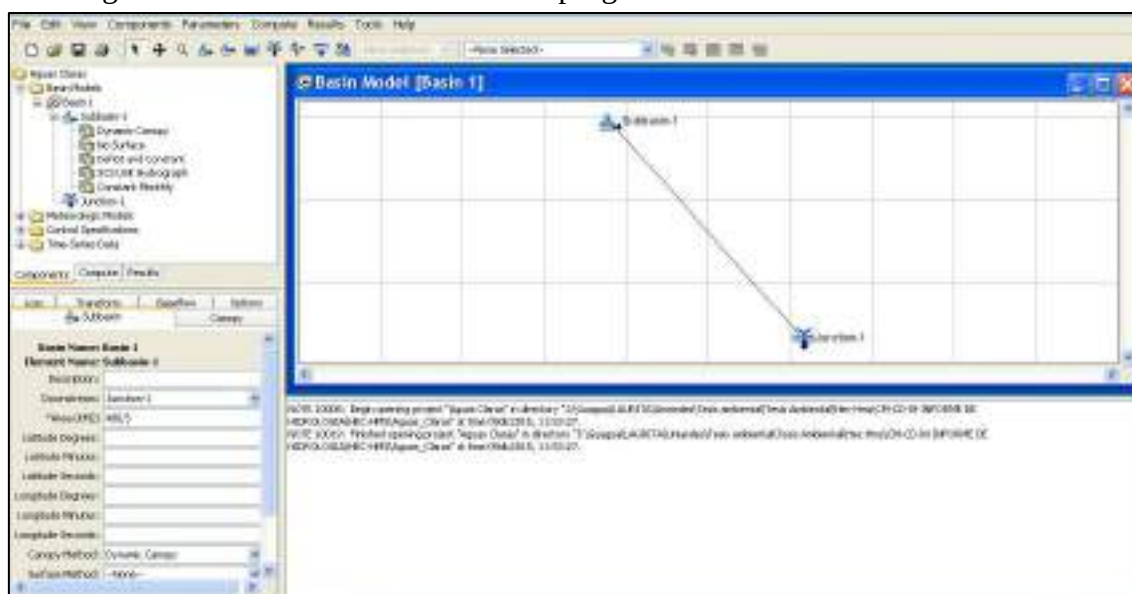


Figura 15. Esquema general modelo cuenca ciénaga HEC-HMS
Fuente: Autor

Es posible notar, que la cuenca está conformada por una sub-cuenca que drena por un único tramo de canal a un punto específico. Esta simplificación fue realizada teniendo en cuenta que, según lo definido por la Universidad Nacional (2012), las cuencas aportantes a la ciénaga de Ayapel son las cuencas de los caños Muñoz y Barro (procedimiento para hallar series de caudales explicado en pasos anteriores) y la cuenca de la ciénaga. Las características generales aplicadas a la sub-cuenca definida, pueden ser apreciadas con mayor claridad en la siguiente Figura:

Loss	Transform	Baseflow	Options
Subbasin			
Canopy			
Downstream:	Junction-1		
*Area (KM2)	480,5		
Latitude Degrees:			
Latitude Minutes:			
Latitude Seconds:			
Longitude Degrees:			
Longitude Minutes:			
Longitude Seconds:			
Canopy Method:	Dynamic Canopy		
Surface Method:	--None--		
Loss Method:	Deficit and Constant		
Transform Method:	SCS Unit Hydrograph		
Baseflow Method:	Constant Monthly		

Figura 16. Características definidas a sub-cuenca modelada
Fuente: Autor

Como puede observarse, se tiene un área de la cuenca de 480.5 km²; valor que fue tomado de lo definido por la Universidad Nacional de Colombia en la modelación original del año 2012. Igualmente, se definió interceptación dinámica, método de pérdidas de déficit constante, método de transformación de hidrógrafa unitaria del Soil Conservation Service y un flujo base constante mensual. Respecto a la interceptación 'Canopy' se definió lo siguiente:

Loss	Transform	Baseflow	Options
Subbasin			
Canopy			
Basin Name: Basin 1			
Element Name: Subbasin-1			
*Initial Storage (%)	0,0		
Storage Method:	Fixed		
*Max Storage (MM)	0,0		
Crop Method:	Time-Series Gage		
Crop Gage:	Crop		
Uptake Method:	--None--		

Figura 17. Interceptación definida HEC-HMS
Fuente: Autor

En este caso, los valores de los parámetros 'Almacenamiento Inicial' y 'Máximo Almacenamiento' no fueron alterados respecto a los definidos para la ciénaga de Aguas Claras. Lo anterior, dado que no fue posible hallar información de la zona para reemplazarlos. Ahora, respecto a las pérdidas del sistema se tuvo:

Element Name: Subbasin-1	
*Initial Deficit (MM)	50
*Maximum Deficit (MM)	100
*Constant Rate (MM/HR)	2,1
*Impervious (%)	0,0

Figura 18. Pérdidas definidas HEC-HMS
Fuente: Autor

Al igual que en el caso de la interceptación, los valores de los coeficientes relacionados con pérdidas tuvieron que ser mantenidos iguales por falta de información. En este punto, vale la pena mencionar que los parámetros ‘Déficit Inicial’, ‘Déficit Máximo’ y ‘Tasa constante’ pueden ser calibrados por el modelo si se cuenta con una serie de caudales a la salida de la cuenca de estudio; sin embargo, como ya se mencionó, la información con la que se contaba no era suficiente para realizar este proceso. Igualmente, se asumió que toda la superficie de la cuenca es permeable por lo que el porcentaje de impermeabilidad se definió como 0%. Respecto al proceso de transformación lluvia-escorrentía se tiene:

Basin Name: Basin 1 Element Name: Subbasin-1	
Graph Type:	Standard (PRF 484)
*Lag Time (MIN)	4207,37

Figura 19. Transformación definida, HEC-HMS
Fuente: Autor

Como es posible notar, se asignó un valor de 4,207.37 minutos como tiempo de concentración de la cuenca analizada. Este valor fue hallado al emplear el método de Kirpich que indica:

$$t = 0.02L^{0.77}S^{-0.385} \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde t es el tiempo de concentración en minutos, L la longitud mayor de desfogue de la cuenca en metros y S la pendiente promedio de la cuenca. Los parámetros anteriores fueron calculados de acuerdo con el plano de altimetría construido por la Universidad de Antioquia (2007):

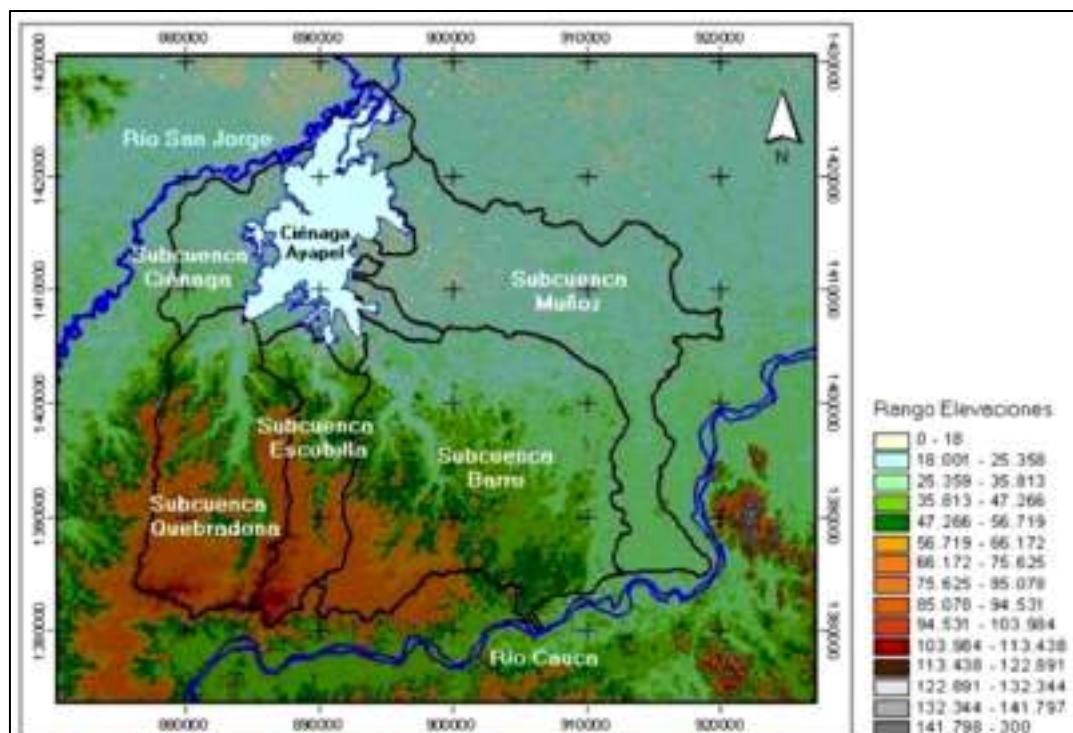


Figura 20. Rango de elevaciones cuencas aportantes a ciénaga de Ayapel

Fuente: (Universidad de Antioquia & Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge (CVS), 2007)

En este punto, vale la pena mencionar que la delimitación de las cuencas realizada por la Universidad de Antioquia difiere a la desarrollada por la Universidad Nacional. Como puede observarse en la Figura anterior, la Universidad de Antioquia define 5 cuencas aportantes a la ciénaga mientras que la Universidad Nacional únicamente define 3. Esta diferencia se debe, principalmente, a que la Universidad de Antioquia separa en 3 ciénagas diferentes la cuenca de la ciénaga: sub-cuenca Escobilla, sub-cuenca Quebradona y sub-cuenca Ciénaga. Sin embargo, después de analizar las áreas comprendidas por cada sub-cuenca en cada documento, fue posible llegar a la conclusión de que las tres sub-cuencas definidas por la Universidad de Antioquia corresponden a la cuenca Ciénaga definida por la Universidad Nacional.

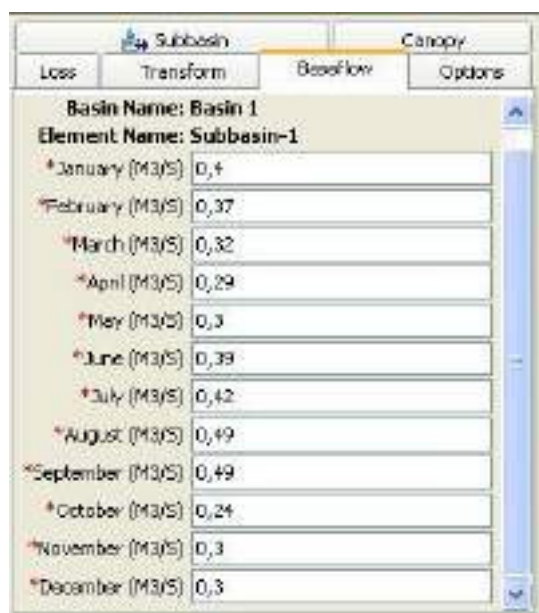
Teniendo en cuenta lo anterior y respecto Figura antes presentada, se realizaron los siguientes cálculos para definir el tiempo de concentración de cuenca Ciénaga:

Tabla 13. Cálculo de tiempo de concentración cuenca

	Intervalo	
	Límite superior	Límite inferior
Elevación mayor cuenca (msnm)	66.1720	75.6250
Elevación menor cuenca (msnm)	25.3590	35.8130
Longitud promedio (m)	30,000	30,000
Pendiente (m/m)	0.001360	0.001327
Pendiente promedio (m/m)	0.0013438	
Longitud mayor de desfogue (m)	300,000	
t (min)	4207.3704	
t (horas)	70.1228	

Fuente: Autor

Finalmente, el flujo base de la sub-cuenca se definió como un valor constante en cada mes, tal como se muestra en la siguiente Figura:



Month	Baseflow (m³/s)
*January (M3/S)	0,4
*February (M3/S)	0,37
*March (M3/S)	0,32
*April (M3/S)	0,29
*May (M3/S)	0,3
*June (M3/S)	0,39
*July (M3/S)	0,42
*August (M3/S)	0,49
*September (M3/S)	0,49
*October (M3/S)	0,24
*November (M3/S)	0,3
*December (M3/S)	0,3

Figura 21. Flujos base mensuales definidos, HEC-HMS
Fuente: Autor

Los valores definidos corresponden a los empleados para la ciénaga Aguas Claras. Nuevamente, estos valores debieron ser mantenidos dado que el proceso de calibración no pudo ser llevado a cabo por falta de series de caudales de salida, tal como ocurrió con los parámetros de pérdidas.

- Modelo meteorológico:** Los parámetros definidos para el modelo meteorológico de la cuenca modelada, se mantuvieron iguales a los definidos para el modelo de la ciénaga Aguas Claras. A continuación se presentan las principales características definidas para esta parte.

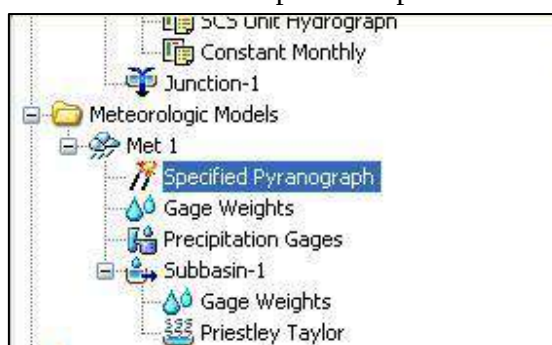


Figura 22. Menú modelo meteorológico definido, HEC-HMS
Fuente: Autor

Meteorology Model Basins Options

Met Name: Met 1

Description:

Shortwave: Specified Pyranograph

Longwave: --None--

Precipitation: Gage Weights

Evapotranspiration: Priestley Taylor

Snowmelt: --None--

Unit System: Metric

Replace Missing: Set To Default

Figura 23. Modelo meteorológico definido, HEC-HMS
Fuente: Autor

Specified Pyranograph

Met Name: Met 1

Subbasin Name	Gage
Subbasin-1	Radiacion

Figura 24. Parámetros de solarígrafo definidos, HEC-HMS
Fuente: Autor

Weights

Element Name: Subbasin-1

Gage Name	Depth Weight	Time Weight
Precipitation	1	1

Figura 25. Pesos de precipitación definidos, HEC-HMS
Fuente: Autor

Priestley Taylor

Met Name: Met 1
Element Name: Subbasin-1

*Dryness Coefficient: 1.19

Figura 26. Coeficiente de sequedad de Priestley-Taylor definido, HEC-HMS
Fuente: Autor

Atmospheric Variables

Met Name: Met 1
Element Name: Subbasin-1

*Air Temperature: Temperatura

Windspeed: --None--

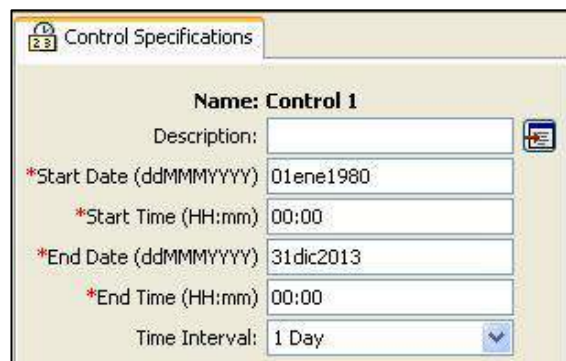
Air Pressure: --None--

Water Vapor Method: Relative Humidity

Relative Humidity: --None--

Figura 27. Variables atmosféricas definidas, HEC-HMS
Fuente: Autor

3. **Especificaciones de control:** En esta parte se definió, únicamente, el intervalo de duración de la simulación y la resolución temporal de los resultados del modelo. En la siguiente Figura se presentan cómo se definieron los anteriores parámetros:



Field	Value
Name	Control 1
Description	
*Start Date (ddMMYYYY)	01ene1980
*Start Time (HH:mm)	00:00
*End Date (ddMMYYYY)	31dic2013
*End Time (HH:mm)	00:00
Time Interval	1 Day

Figura 28. Especificaciones de control definidas, HEC-HMS
Fuente: Autor

4. **Series de datos:** De acuerdo con lo definido anteriormente, el modelo requirió de la introducción de series de precipitación, temperatura y radiación. La serie de temperatura fue tomada de la estación climatológica Ayapel. La serie introducida en el modelo se presenta a continuación:

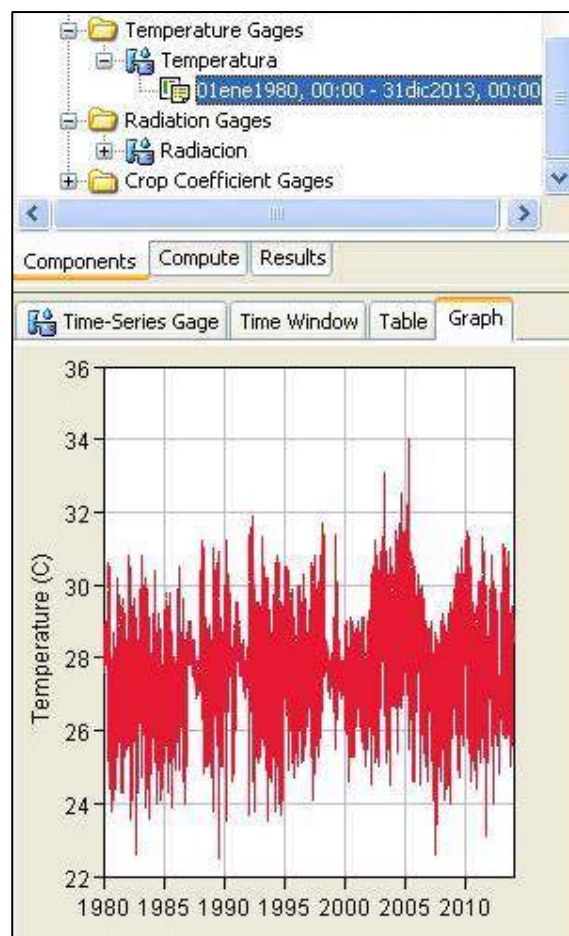


Figura 29. Serie de temperatura introducida al modelo, HEC-HMS
Fuente: Autor

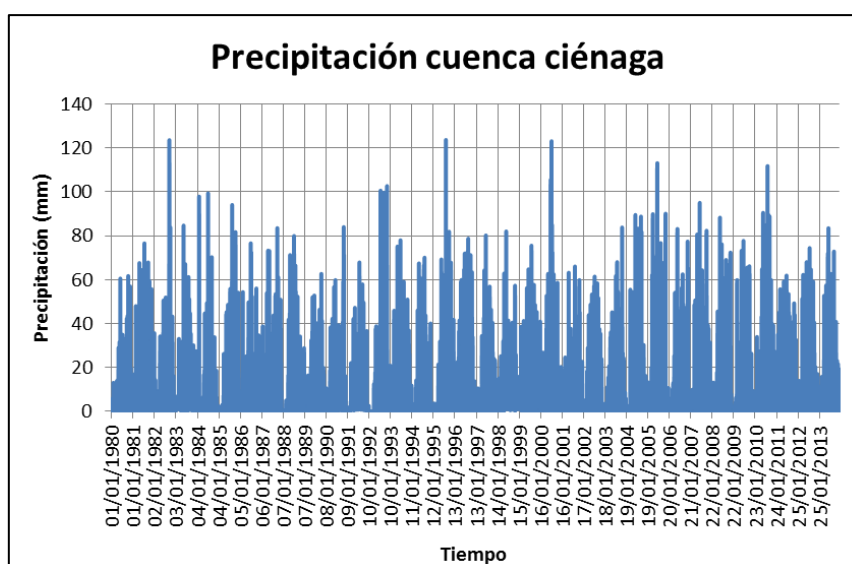
En cuanto a la serie de precipitación, se utilizaron los registros de precipitación de las estaciones Cecilia, Ayapel, La Ilusión y Caucasia promediados respecto al área que sus respectivos polígonos de Thiessen ocupan en la cuenca. Las áreas de la cuenca, ocupadas por cada uno de estos polígonos, fueron definidas por la Universidad Nacional (2012) y se presentan a continuación:

Tabla 14. Áreas ocupadas por cada estación dentro de cuenca

Sub-cuenca	Área sub-cuenca (km ²)	Estación	Área Thiessen (km ²)
Ciénaga de Ayapel	480.5	Ayapel	275.2
		Caucasia	65.2
		La Ilusión	50.5
		Cecilia	89.5

Fuente: (Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación, 2012)

Vale la pena mencionar que la estación Caucasia cuenta, únicamente, con registros hasta el año 2004 por lo que, desde Abril de ese año, fue necesario redefinir los pesos para considerar sólo las otras tres estaciones que sí contaban con datos. La serie de precipitación obtenida e introducida al modelo, se presenta a continuación:



Gráfica 42. Serie de precipitación empleada en modelo HEC-HMS

Por otro lado, la serie de radiación empleada en el modelo, debió ser construida a partir de la empleada en el caso de la cuenca de la ciénaga de Aguas Claras. Lo anterior, debió hacerse debido a que, cerca de la zona de estudio, no se cuenta con estaciones radiométricas. La serie construida consistió en la repetición de series mensuales de radiación de 4 años (período de modelación en la ciénaga Aguas Claras) durante el período de modelación requerido. A continuación, se presenta la serie de radiación resultante introducida al modelo:

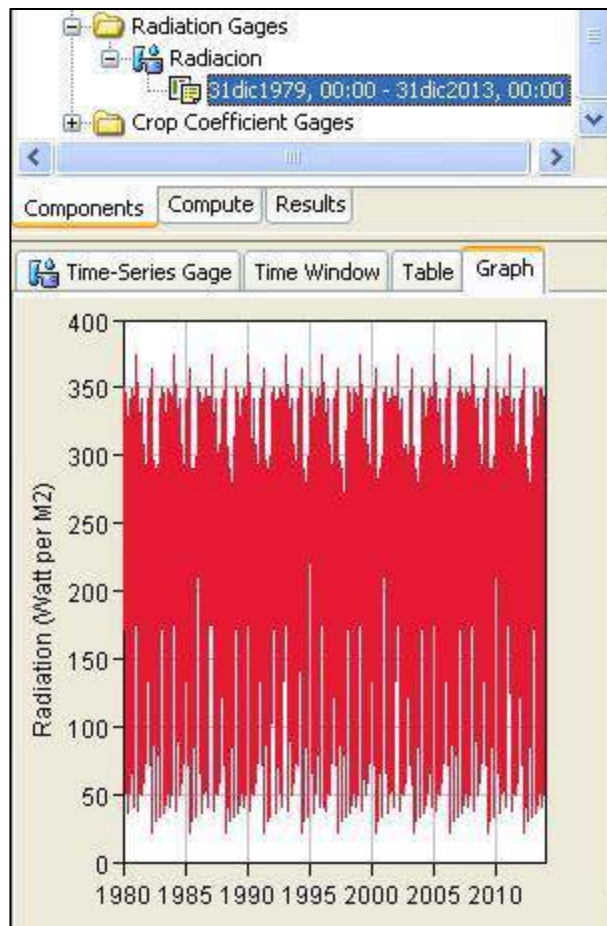


Figura 30. Serie de radiación solar introducida al modelo, HEC-HMS
Fuente: Autor

Finalmente, fue necesario definir una serie de coeficientes de cultivo que, al igual que en la modelación de la ciénaga Aguas Claras, fue tomado como 1 para todo el periodo de modelación.

3.4.3. Construcción modelo río San Jorge – ciénaga de Ayapel

La construcción del modelo río San Jorge – ciénaga de Ayapel se llevó a cabo utilizando los bloques, desarrollados por Camacho (1997) y Camacho *et al* (2000), y utilizados por la Universidad Nacional en la modelación del Canal del Dique. En términos generales, se emplearon 6 tipos de bloques principales:

1. Bloque ingreso datos río San Jorge
2. Bloques de ingreso datos series precipitación, evaporación y escorrentía
3. Bloque de canal antes de ciénaga
4. Bloque de canal después de ciénaga
5. Bloque de balance
6. Bloque de ciénaga

Un esquema general del modelo construido se presenta a continuación:

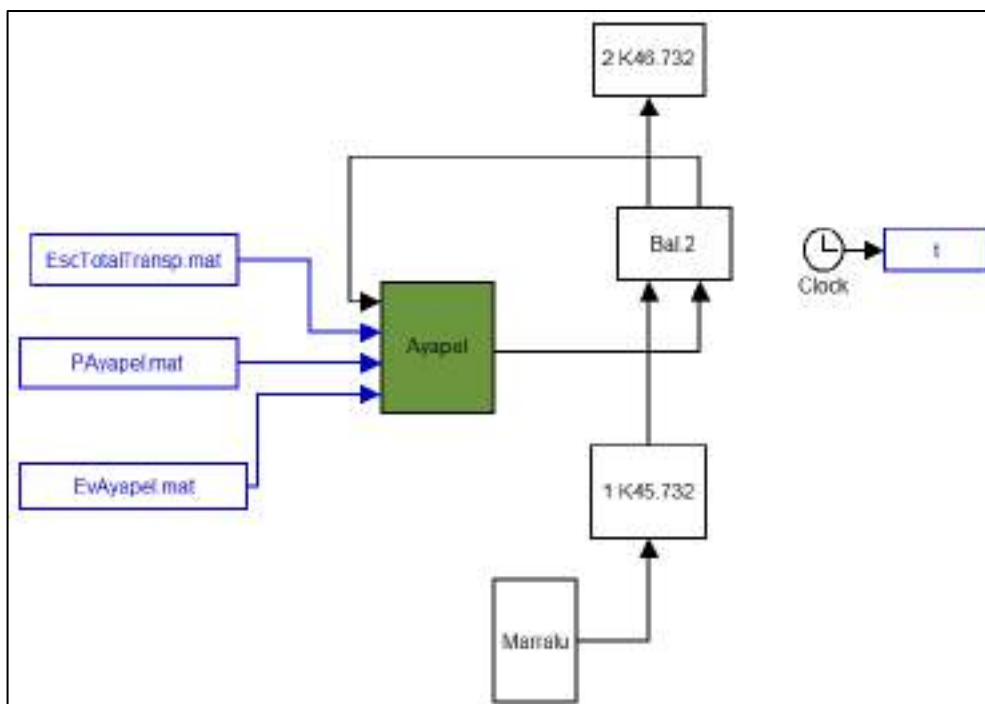
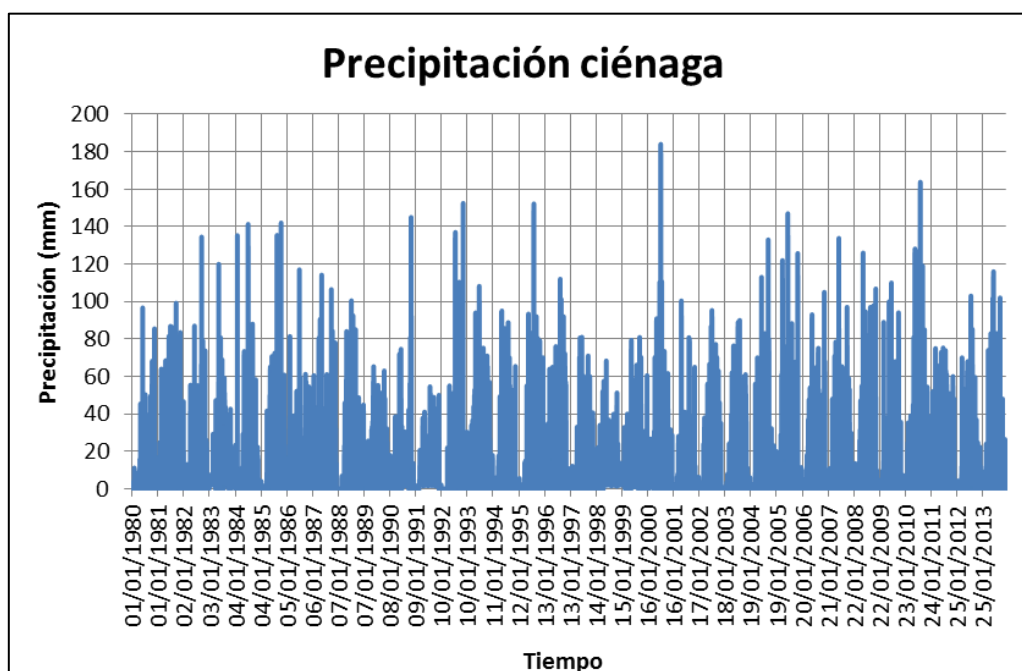
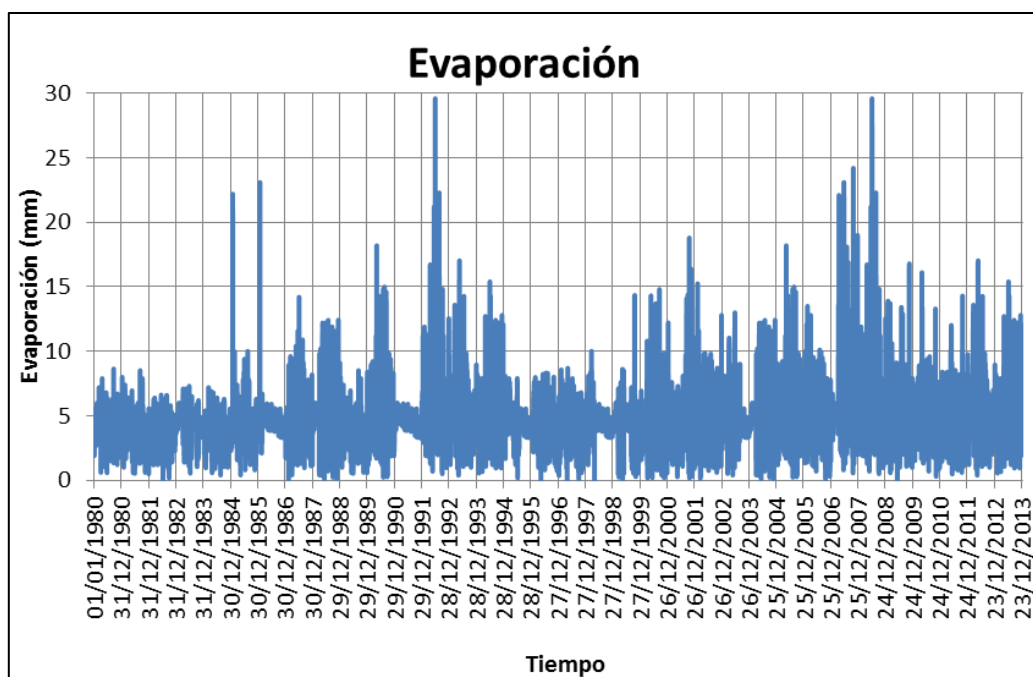


Figura 31. Esquema general modelo simplificado río San Jorge – ciénaga de Ayapel
Fuente: Autor

Como es posible observar en la Figura anterior, las principales entradas al bloque ciénaga consisten en series de escorrentía, precipitación y evaporación (llamados ‘Bloques de ingreso datos series precipitación, evaporación y escorrentía’ en la descripción general de bloques). Las series de precipitación y evaporación fueron tomadas como las series registradas para la estación Ayapel, dado que es la que se encuentra más cerca de la zona de estudio y, se asume, permite representar correctamente la dinámica de estas variables. Las series empleadas se presentan a continuación:

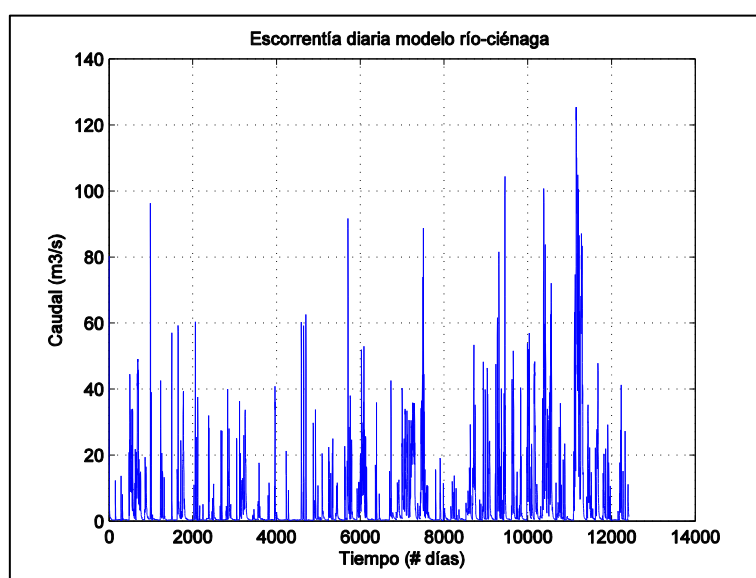


Gráfica 43. Serie de precipitación, modelo simplificado río San Jorge-ciénaga de Ayapel



Gráfica 44. Serie de evaporación, modelo simplificado río San Jorge-ciénaga de Ayapel

En cuanto a la serie de escorrentía, se tiene que es necesario sumar los aportes diarios generados por la entrada de los caños Barro y Muñoz con los obtenidos en la cuenca aferente a la ciénaga. Con este objetivo, se realizó la interpolación de los resultados del modelo de caños de salida del río Cauca para obtener caudales diarios y, posteriormente, estos se sumaron con la serie de escorrentía resultante de la modelación con HEC-HMS. La serie de escorrentía resultante de la realización de este proceso es la que se introduce en el modelo río-ciénaga (Bloque ‘EscTotalTransp.mat en esquema general) y luce como:



Gráfica 45. Serie de escorrentía diaria de entrada modelo río-ciénaga

Ahora, respecto al bloque de ingreso de datos del río San Jorge, se tiene que este es el llamado ‘Marralu’ del esquema general. Al abrir este bloque se tiene lo siguiente:

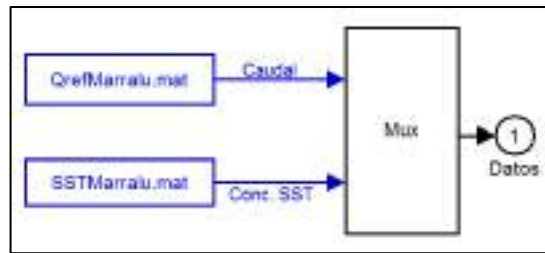


Figura 32. Bloque de ingreso de datos río San Jorge, modelo río-ciénaga
Fuente: Autor

Puede observarse que, de forma análoga al modelo de caños de salida del río Cauca explicado antes, en este bloque se introducen las series de caudales y concentraciones de sólidos suspendidos totales correspondientes a la estación Marralu.

Por otro lado, los bloques de canal antes y después de la ciénaga resultan prácticamente iguales con la excepción, de que el primero requiere que sus resultados pasen al siguiente bloque, mientras que el segundo no. Lo anterior puede ser observado, con mayor claridad en los siguientes esquemas:

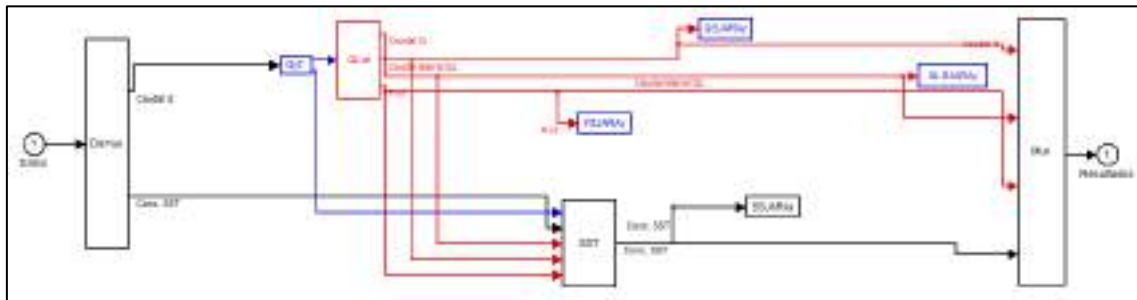


Figura 33. Bloque canal antes de ciénaga, modelo río-ciénaga
Fuente: Autor

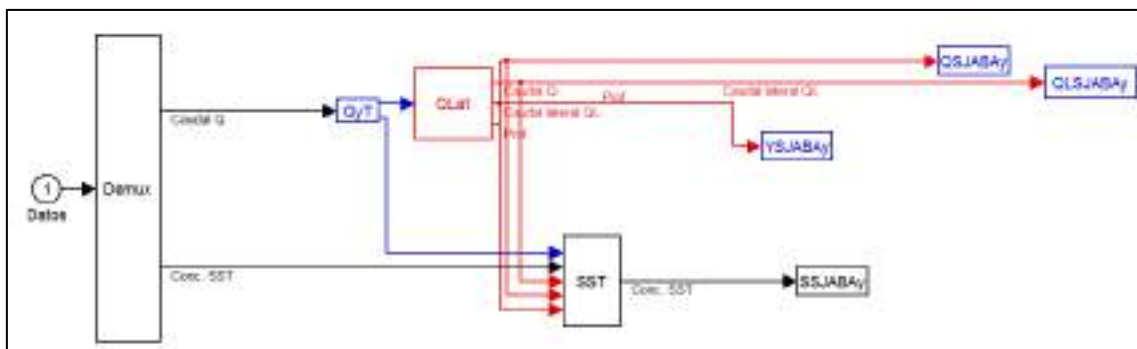


Figura 34. Bloque canal después de ciénaga, modelo río-ciénaga
Fuente: Autor

En este punto, es importante mencionar que, al igual que en el modelo de caños de salida del río Cauca, los bloques de canal requieren que se definan los coeficientes de velocidad y profundidad correspondientes, así como condiciones iniciales de caudal y sólidos suspendidos totales y parámetros como longitud del tramo, coeficiente de descarga, profundidad de desborde, delta de tiempo y velocidad de sedimentación. Dado que la modelación original realizada por la Universidad Nacional (2012), no incluyó la modelación hidráulica del río San Jorge, fue necesario mantener los coeficientes de

velocidad y profundidad, así como el coeficiente de descarga, profundidad de desborde y velocidad de sedimentación empleados en el canal del Dique, específicamente, los establecidos para los bloques antes y después de la ciénaga de Jobo. Los parámetros que debieron ser mantenidos se presentan a continuación:

Tabla 15. Parámetros bloques de canal modelo río-ciénaga

	1 K45.732	2 K46.732
a	0.0120	0.0371
b	0.5861	0.4872
c	4.6546	0.7369
d	0.1750	0.3594
Coeficiente de descarga	0.0050	0.0001
Profundidad de desborde (m)	15.53	9.70
Velocidad de sedimentación(m/s)	15	8

Fuente: Autor

En cuanto a las condiciones iniciales de caudal y sólidos suspendidos totales, se definieron como el primer registro de las series de caudales y sólidos suspendidos en la estación Marralu. Las longitudes se definieron, en el caso del bloque antes de la ciénaga de Ayapel, como la distancia entre la estación Marralu y la ciénaga (45.7320 kilómetros). En el caso del bloque después de la ciénaga, se tomó una distancia de 1 kilómetro aguas abajo de la misma. El delta de tiempo para los dos bloques se definió como 1 día.

Ahora, los bloques de balance y ciénaga están relacionados entre sí, dado que los resultados de cada uno son entradas necesarias para el otro. De esta forma, al abrir estos bloques se tiene:

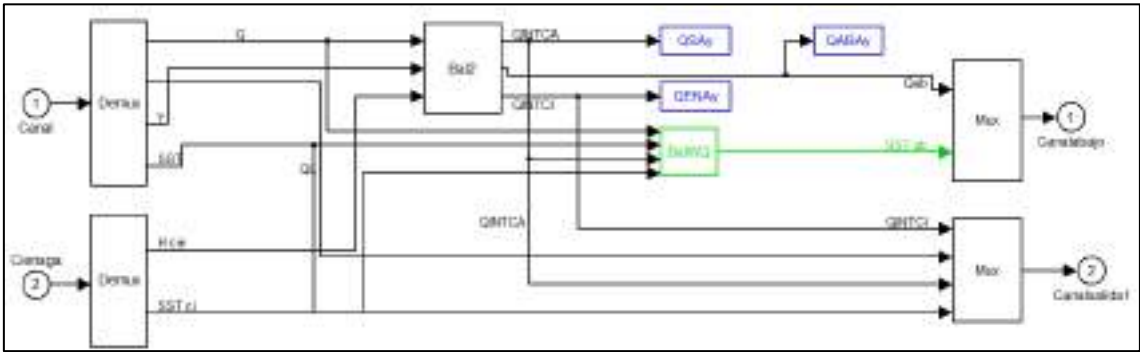


Figura 35. Bloque balance, modelo río-ciénaga
Fuente: Autor

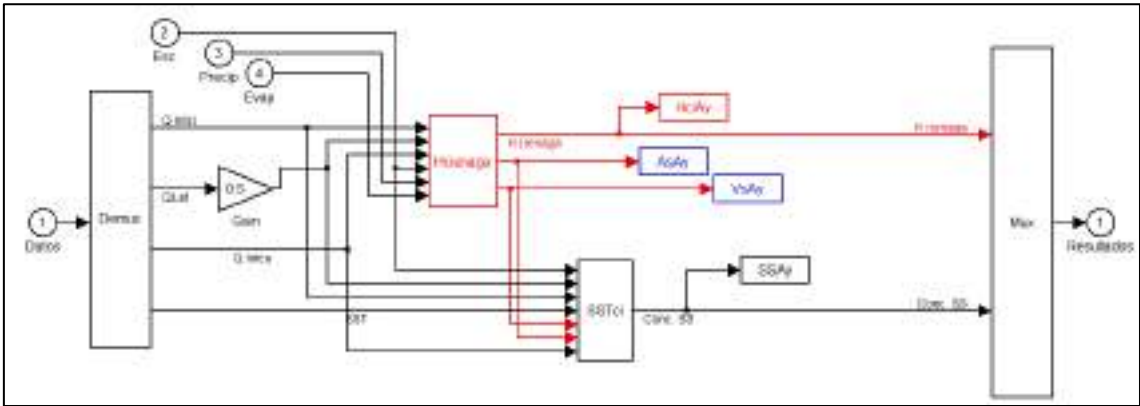


Figura 36. Bloque Ayapel, modelo río-ciénaga
Fuente: Autor

En primer lugar, puede observarse que las salidas del bloque de balance corresponden a:

- Caudal de salida de ciénaga (Q_{SAy})
- Caudal de entrada a la ciénaga (Q_{ENAy})
- Caudal en canal aguas abajo de ciénaga (Q_{ABAy})

Igualmente, el bloque requiere entradas de caudal, profundidad y concentración de sólidos suspendidos totales del río y profundidad de la ciénaga y concentración de sólidos suspendidos en la misma. Adicionalmente, se deben definir los siguientes parámetros en el bloque Bal2

- Diferencia de altura fondo ciénaga ($Cota_{ci}$)
- P ciénaga (P_{ci})
- Ancho del canal (W)

En el siguiente esquema puede apreciarse con mayor claridad a qué valores corresponden los dos primeros parámetros mencionados:

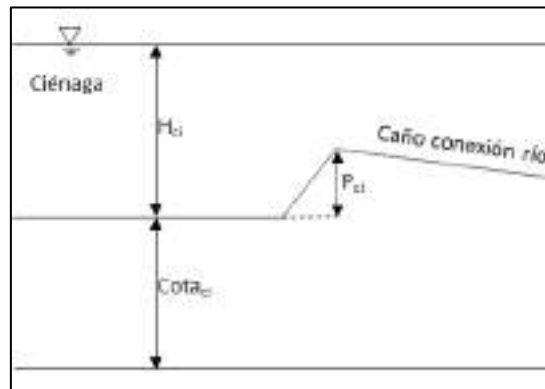


Figura 37. Parámetros bloque Bal2
Fuente: Autor

En cuanto al parámetro ancho del canal, este corresponde al ancho del caño de conexión entre el río San Jorge y la ciénaga de Ayapel. Los valores definidos para estos parámetros fueron, inicialmente, 7 metros para la $Cota_{ci}$, 1.5 metros para P_{ci} y 39.1 metros para W . Estos valores fueron asignados preliminarmente pero, posteriormente, fueron modificados mediante un proceso de calibración simple, para obtener aquellos valores que maximizaran la medida de bondad de ajuste de los resultados respecto a los valores de niveles registrados en la ciénaga (estación Beirut).

Por otro lado, las salidas del bloque Ayapel (bloque ciénaga) corresponden a:

- Serie de profundidades ciénaga (H_{Ay})
- Serie de áreas superficiales ciénaga (As_{Ay})
- Serie de volúmenes ciénaga (Vs_{Ay})
- Serie de concentraciones de sólidos suspendidos totales ciénaga (SS_{Ay})

Este bloque requiere, adicionalmente, series de entrada de precipitación, evaporación, escurrentía, caudales de entrada a la ciénaga, caudales laterales de tramo

de río anterior a ciénaga, caudales de salida de la ciénaga y concentraciones de sólidos suspendidos totales de tramo de río anterior a ciénaga. También, es necesario definir los siguientes parámetros en el bloque Hciénaga:

- Coeficiente c
- Coeficiente d
- Coeficiente e
- Coeficiente f
- Delta de tiempo
- H inicial (H_0)

Los primeros 4 valores corresponden a los coeficientes particulares de la ciénaga que permiten relacionar la profundidad de la ciénaga con su área superficial ($A_s = c H^d$) y con su volumen de almacenamiento ($V_s = e H^f$). Estos valores fueron estimados, para la ciénaga de Ayapel, por la Universidad Nacional en el proyecto del año 2012 y se presentan a continuación:

Tabla 16. Coeficientes de área y volumen ciénaga de Ayapel

Coeficiente	Valor
c	2.00E+07
d	0.2789
e	810844
f	4.6503

Fuente: (Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación, 2012)

Al igual que en etapas anteriores, el delta de tiempo se definió como 1 día mientras que el H inicial (profundidad inicial dentro de la ciénaga) se aproximó, inicialmente, como el primer valor de nivel registrado en la estación limnimétrica Beirut en la ciénaga de Ayapel. Este último parámetro fue, posteriormente, modificado mediante un proceso de calibración simple para obtener aquel valor que maximizara la medida de bondad de ajuste, de los resultados respecto a los valores de niveles registrados en la ciénaga (estación Beirut).

Por otro lado, el bloque SSTci requiere que se ingresen valores de velocidad de sedimentación (en unidades de metro por día), concentración de sólidos suspendidos totales (en unidades de miligramos por litro) y concentración inicial de sólidos suspendidos totales en la ciénaga (en unidades de miligramos por litro). A los anteriores parámetros, se les asignaron los siguientes valores, respectivamente: 50m/d, 5mg/L y 1mg/L (valores utilizados en la modelación de la ciénaga de Jobo en el Canal del Dique, por carecerse de información específica).

Finalmente, en los parámetros de la simulación, se definió un tiempo desde 0 hasta 12,418 (correspondiente al número de días entre el 1 de Enero de 1980 y el 31 de Diciembre de 2013), con tipo de solución de paso variable y metodología de solución de Dorman-Prince (ODE45). Los métodos de integración y tolerancia de los mismos fueron evaluados en la etapa de calibración con el fin de encontrar la combinación que generara una resolución temporal adecuada y un coeficiente de Nash-Sutcliffe aceptable.

3.4.4. Calibración parámetros caño simplificado de conexión

El proceso de calibración que se llevó a cabo, consistió en la modificación de cuatro parámetros principales del modelo, tal como se mencionó en la sección anterior:

5. Diferencia de altura fondo ciénaga ($Cota_{ci}$)
6. P ciénaga (P_{ci})
7. Ancho del canal (W)
8. Nivel inicial en la ciénaga (H_0)

Los parámetros se modificaron de forma independiente y se evaluó, en cada cambio realizado, el coeficiente de Nash-Sutcliffe de los valores de nivel en la ciénaga modelados respecto a los registrados en la estación limnimétrica Beirut. Dado que los deltas de tiempo de los resultados obtenidos con el modelo varían (dado que se optó por utilizar una metodología de solución de paso variable) fue necesario interpolar los niveles registrados en la estación Beirut de tal manera que coincidieran con los resultados del modelo. La evaluación del coeficiente de Nash-Sutcliffe se realizó mediante la utilización de la función 'efficien.m' (Camacho, 1998) mientras que la interpolación se llevó a cabo utilizando la función 'interp1.m'.

Finalmente, con los valores óptimos de los parámetros, se evaluaron diferentes combinaciones de metodologías de integración y tolerancias de tal manera que se obtuviera la mejor combinación posible entre resolución temporal y medida de bondad de ajuste.

4. Resultados y discusión

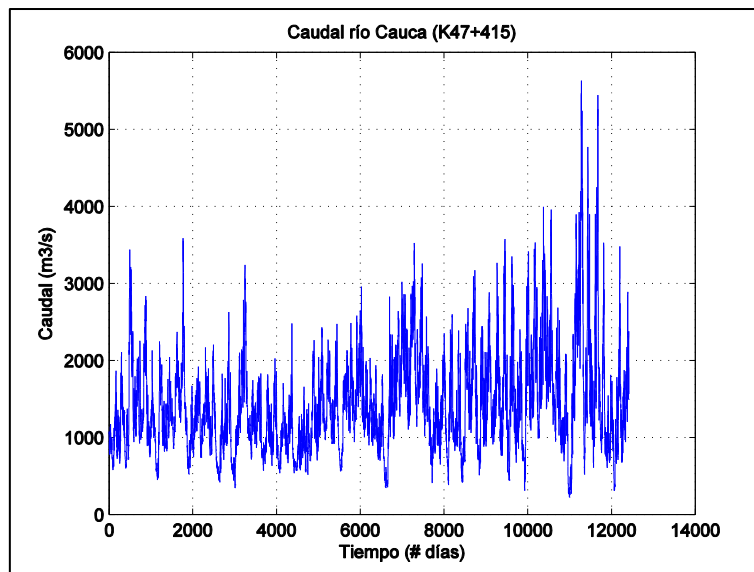
A continuación se presentan los resultados obtenidos después de llevar a cabo la metodología propuesta anteriormente; igualmente, se presenta una breve discusión de los mismos.

4.1. Resultados modelo caños de salida río Cauca

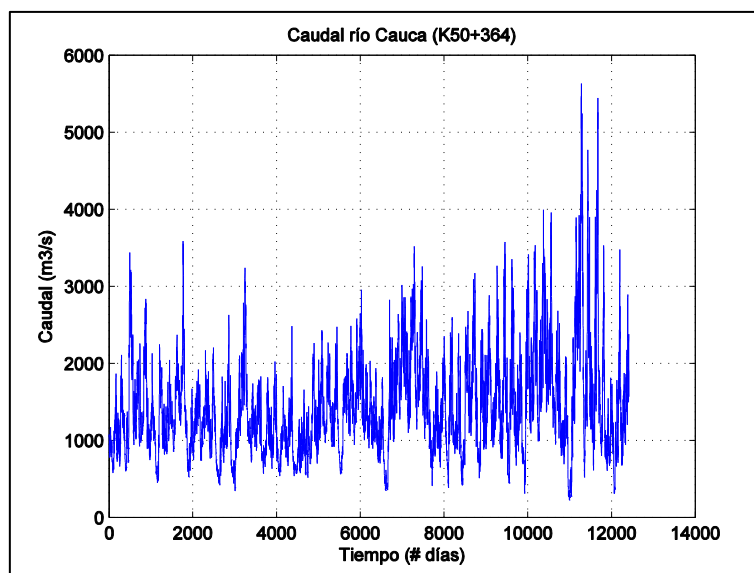
Como se mencionó en la sección ‘Metodología Empleada’, los principales resultados de esta parte, son series de caudales, niveles, caudales de desborde y concentraciones de sólidos suspendidos totales para cada uno de los tramos de las corrientes modeladas. Con el fin de presentar, únicamente, los resultados más importantes de esta parte, se optó por incluir los siguientes resultados, para tramos particulares, en cada una de las corrientes de estudio:

- Río Cauca: Se presentan series de caudales, niveles y concentración de sólidos suspendidos totales en tramo anterior y posterior a salida de caños Barro, Pescado y Muñoz.
- Caño Barro: Se presentan series de caudales y niveles en primer tramo después de salida del río Cauca, en tramo inmediatamente anterior a la unión con caño Pescado y en último tramo antes de entrada a ciénaga de Ayapel.
- Caño Pescado: Se presentan series de caudales y niveles en primer tramo después de salida del río Cauca y en tramo inmediatamente anterior a la unión con caño Barro.
- Caño Muñoz: Se presentan series de caudales y niveles en primer tramo después de salida del río Cauca y en último tramo antes de entrada a ciénaga de Ayapel.

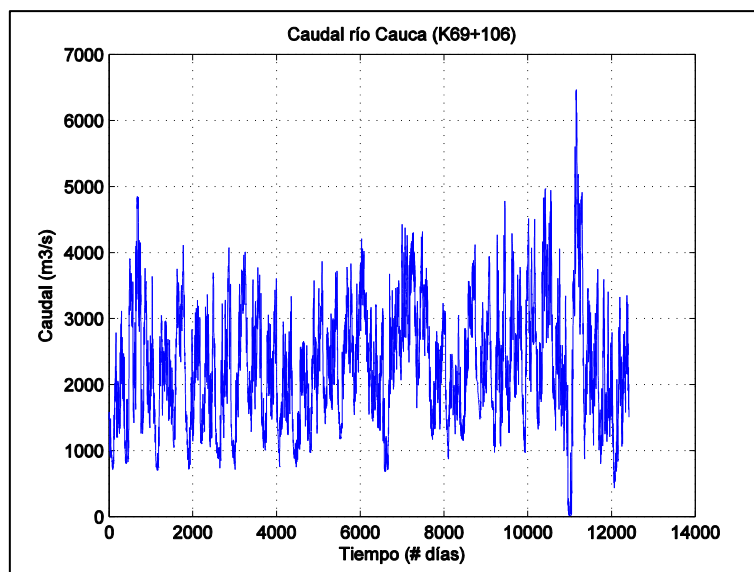
Respecto a lo antes mencionado, resulta necesario aclarar dos puntos importantes. En primer lugar, no se presentan series de sólidos suspendidos totales en los caños dado que, en etapas posteriores de la metodología, las series de caudales son sumadas y se trabaja con una concentración de sólidos suspendidos promedio (tal como se indicó en la sección ‘Metodología Empleada’). En segundo lugar, en las gráficas que se presentarán a continuación, el eje ‘Tiempo’ se expresará en número de días; es decir, la fecha ‘Enero 1 de 1980’ será el día número 0 y la fecha ‘31 de Diciembre de 2013’ el día número 12,418. Teniendo lo anterior claro, los resultados obtenidos fueron:



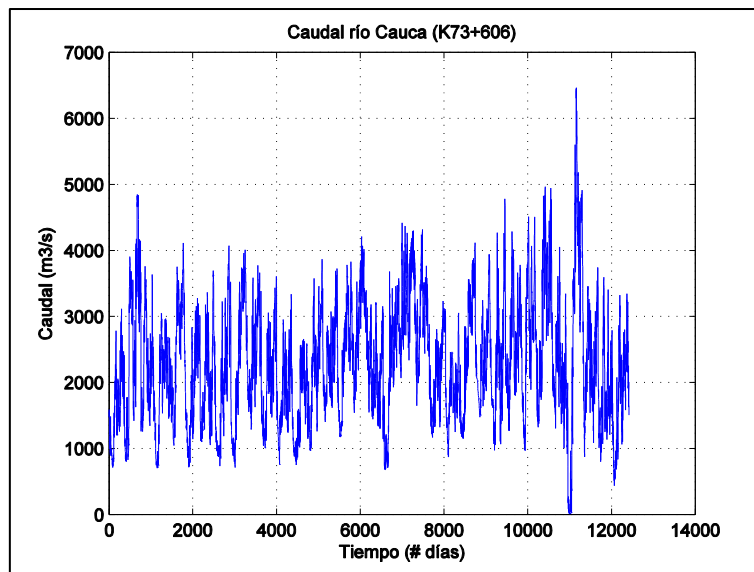
Gráfica 46. Serie de caudales río Cauca, antes de salida de caño Barro



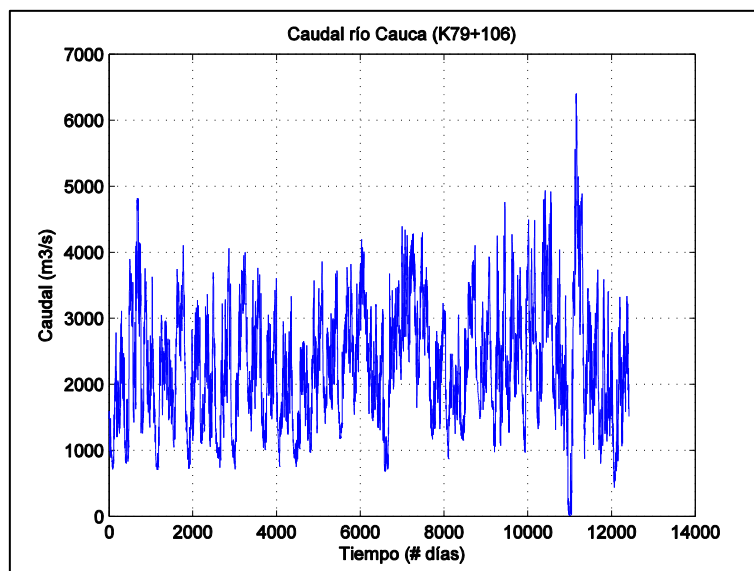
Gráfica 47. Serie de caudales río Cauca, después de salida de caño Barro



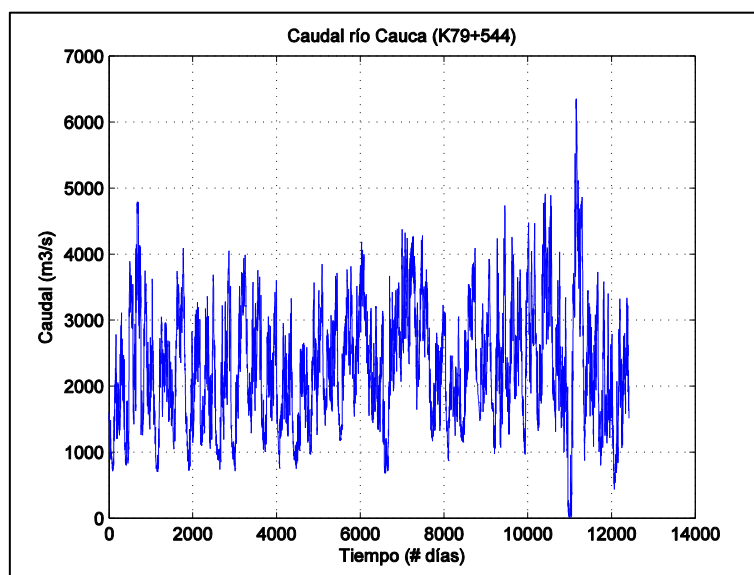
Gráfica 48. Serie de caudales río Cauca, antes de salida de caño Pescado



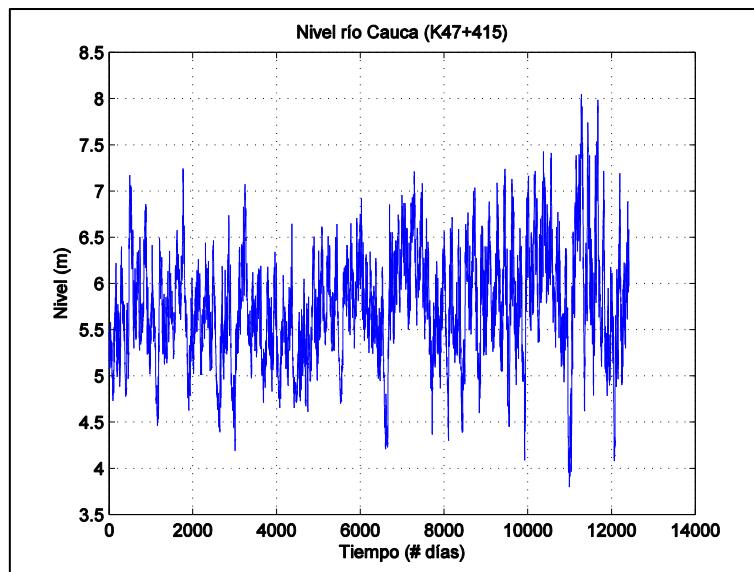
Gráfica 49. Serie de caudales río Cauca, después de salida de caño Pescado



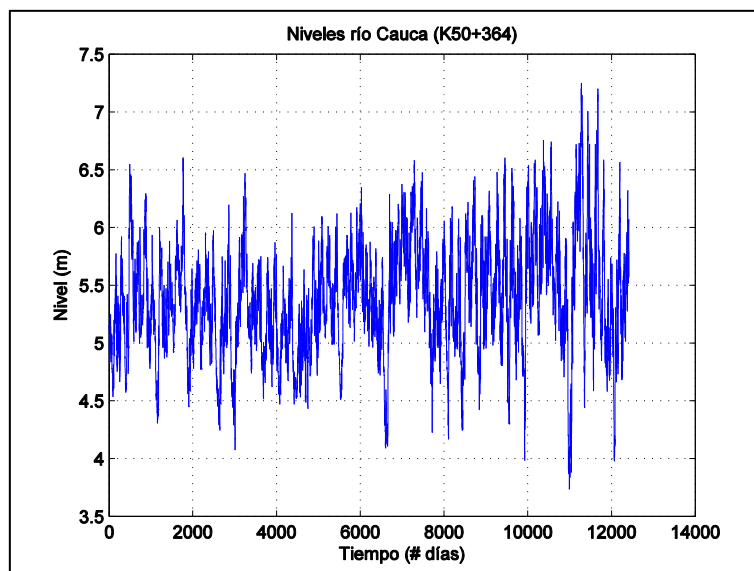
Gráfica 50. Serie de caudales río Cauca, antes de salida de caño Muñoz



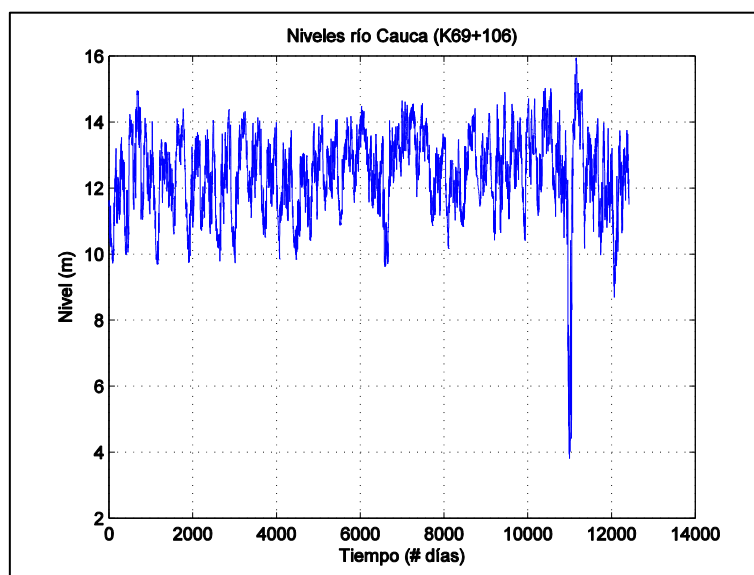
Gráfica 51. Serie de caudales río Cauca, después de salida de caño Muñoz



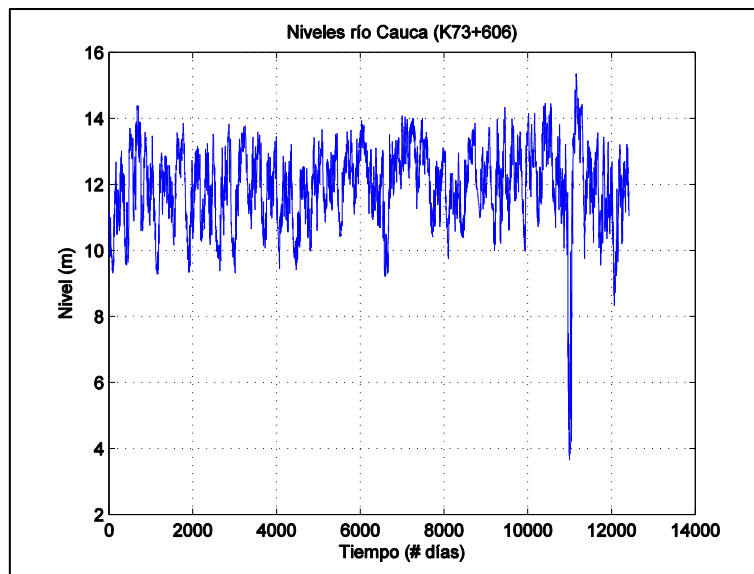
Gráfica 52. Serie de niveles río Cauca, antes de salida de caño Barro



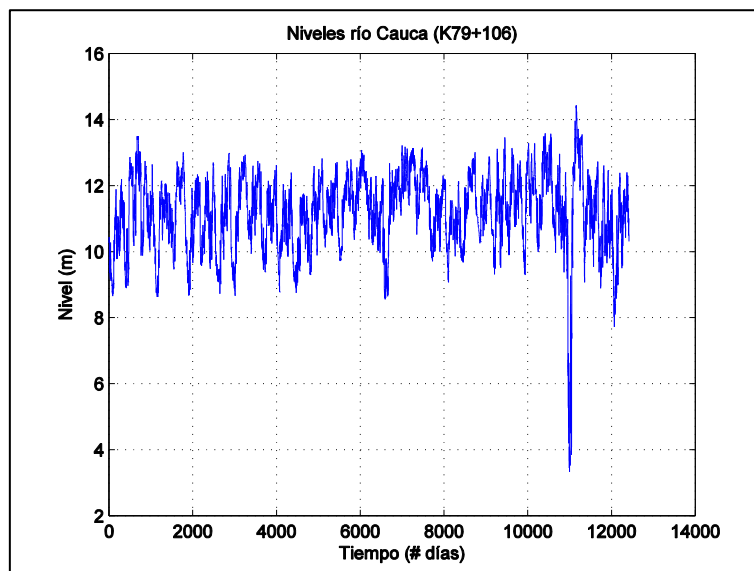
Gráfica 53. Serie de niveles río Cauca, después de salida de caño Barro



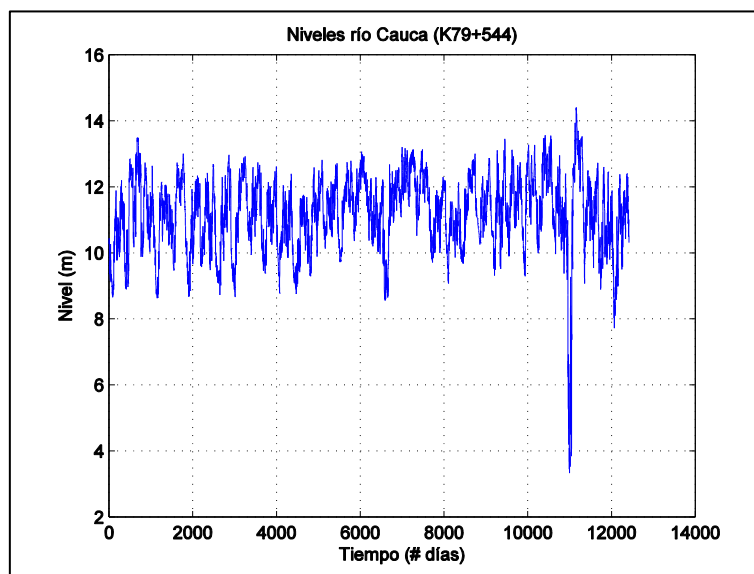
Gráfica 54. Serie de niveles río Cauca, antes de salida de caño Pescado



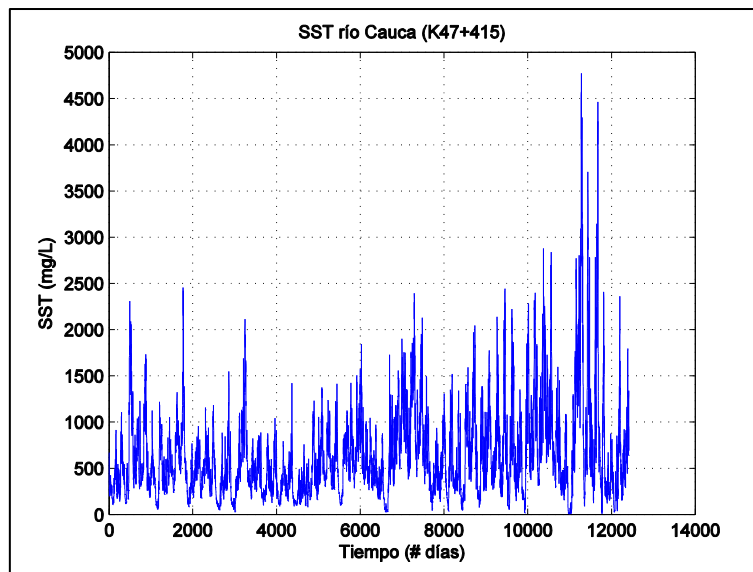
Gráfica 55. Serie de niveles río Cauca, después de salida de caño Pescado



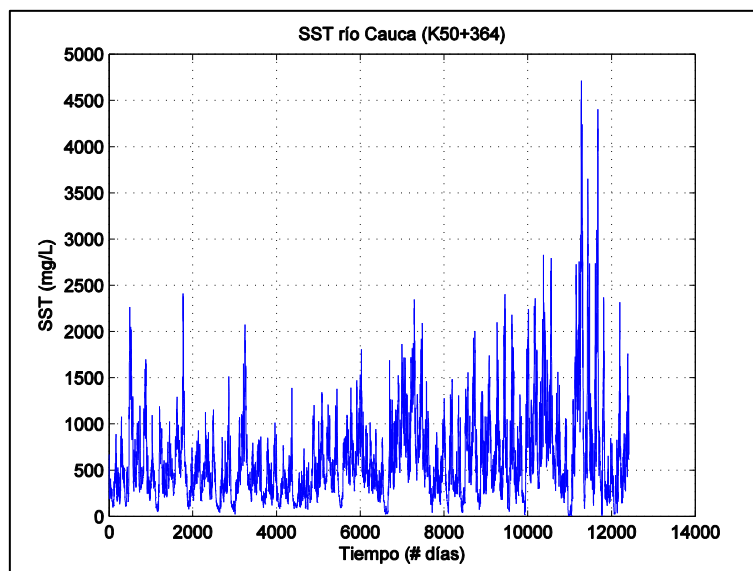
Gráfica 56. Serie de niveles río Cauca, antes de salida de caño Muñoz



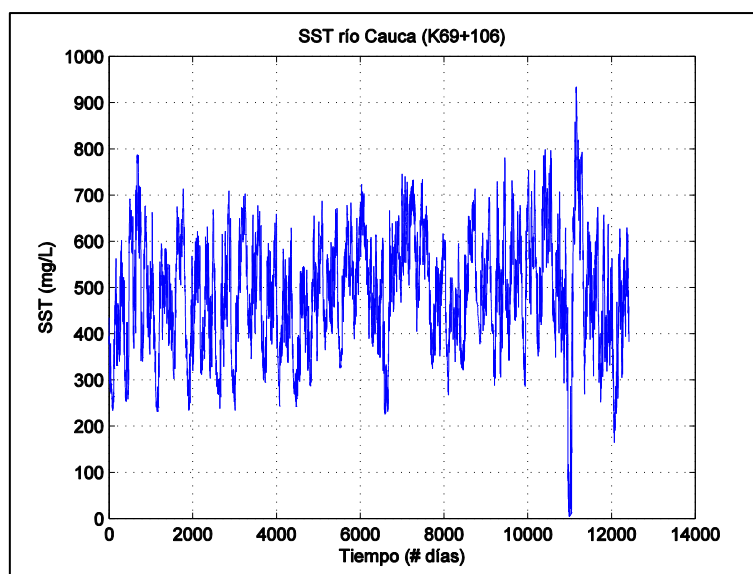
Gráfica 57. Serie de niveles río Cauca, después de salida de caño Muñoz



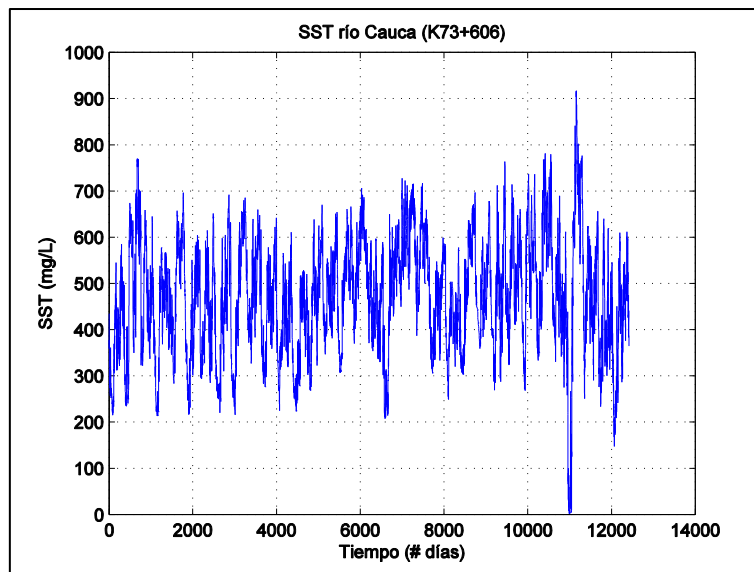
Gráfica 58. Serie de SST río Cauca, antes de salida de caño Barro



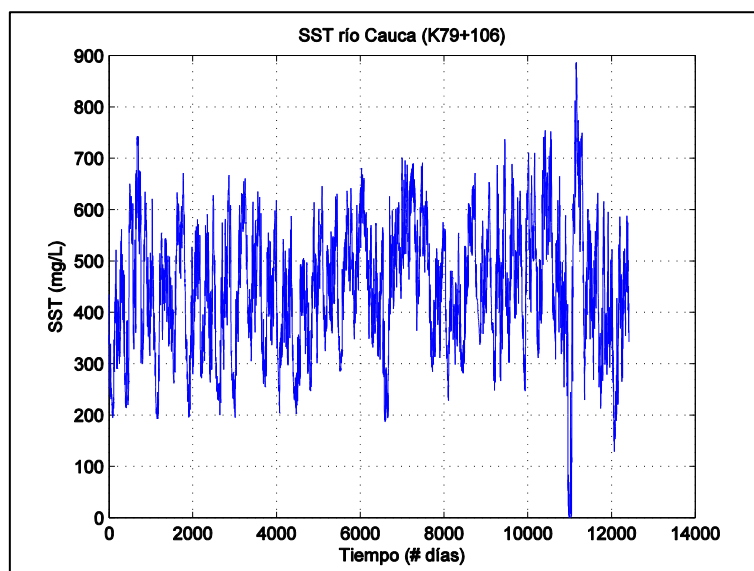
Gráfica 59. Serie de SST río Cauca, después de salida de caño Barro



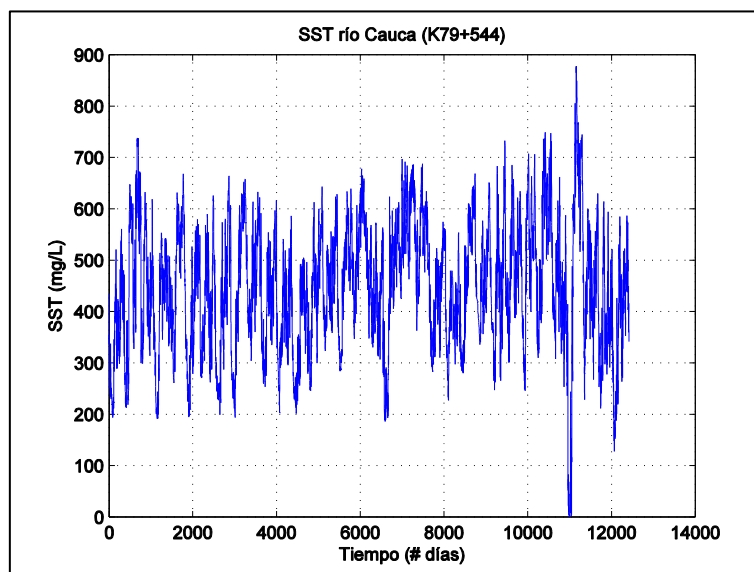
Gráfica 60. Serie de SST río Cauca, antes de salida de caño Pescado



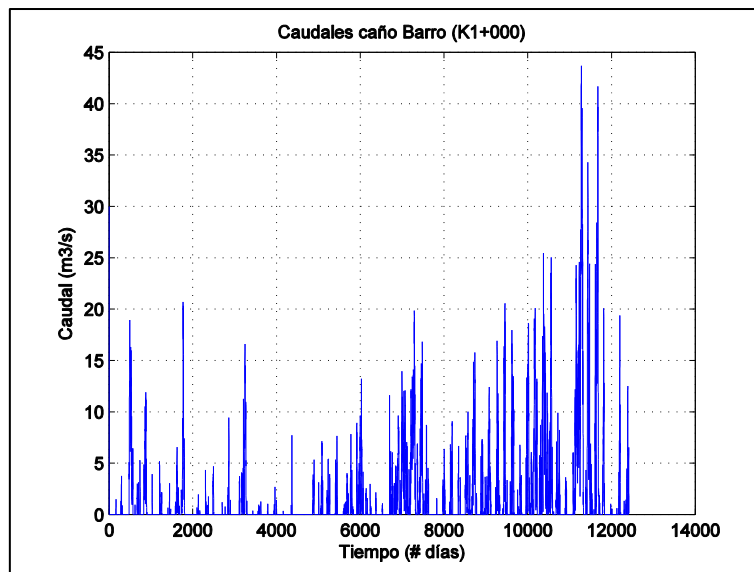
Gráfica 61. Serie de SST río Cauca, después de salida de caño Pescado



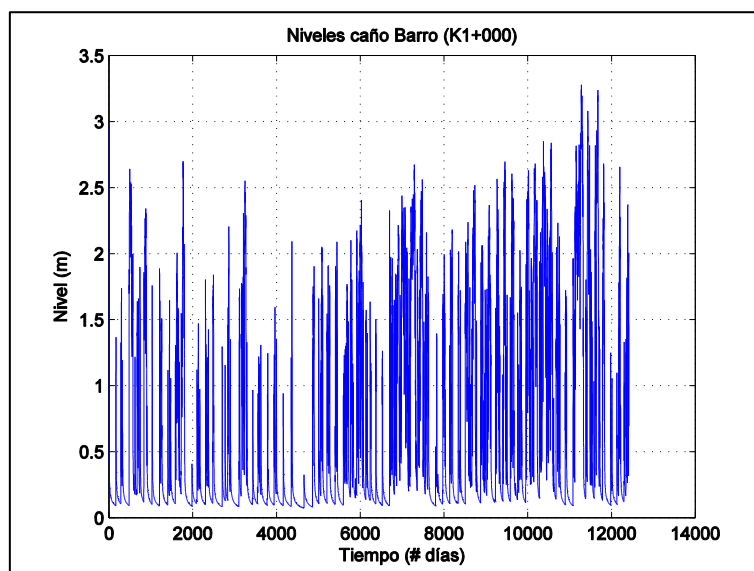
Gráfica 62. Serie de SST río Cauca, antes de salida de caño Muñoz



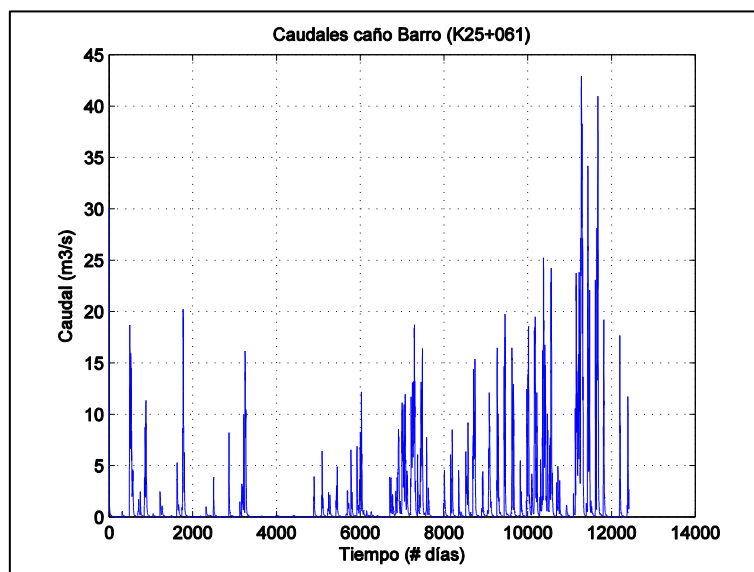
Gráfica 63. Serie de SST río Cauca, después de salida de caño Muñoz



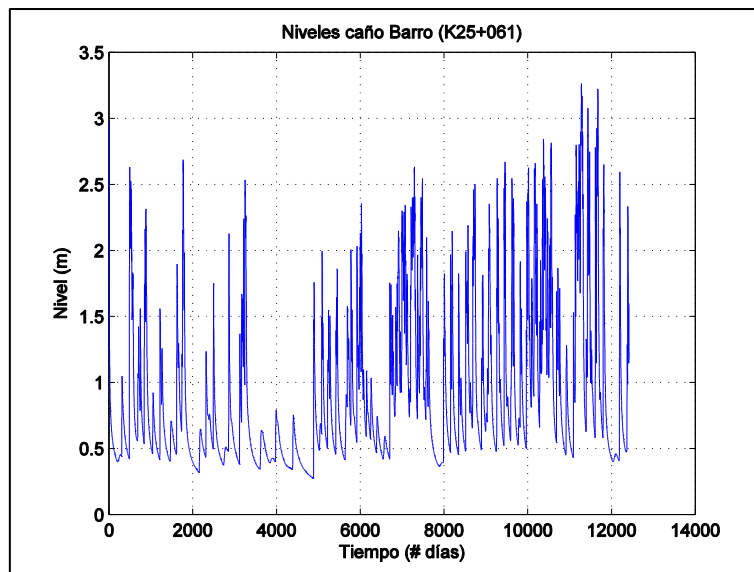
Gráfica 64. Serie de caudales caño Barro, después de salida de río Cauca



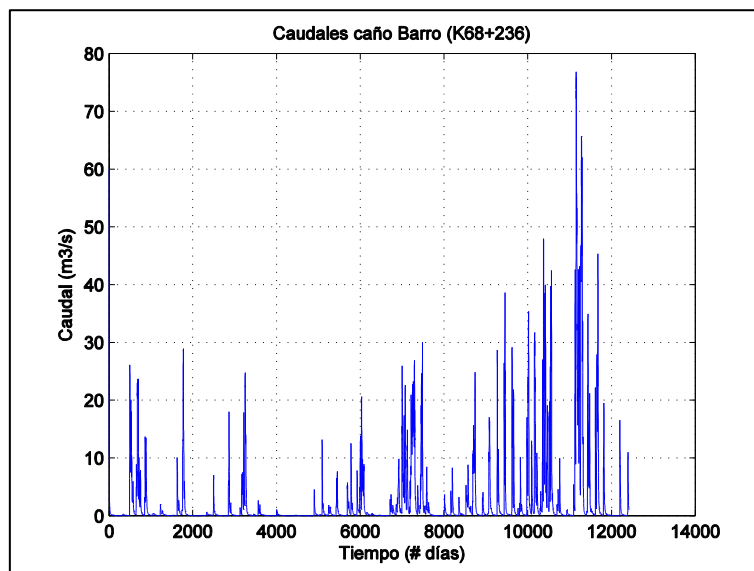
Gráfica 65. Serie de niveles caño Barro, después de salida de río Cauca



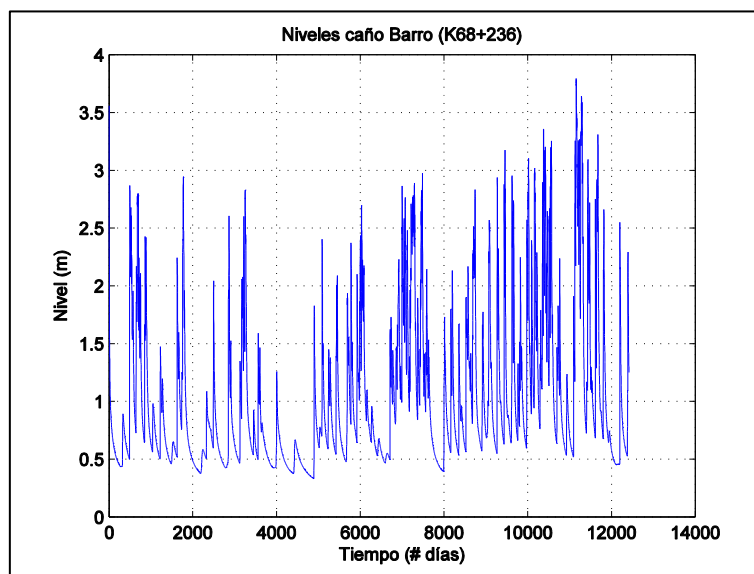
Gráfica 66. Serie de caudales caño Barro, antes de encuentro con caño Pescado



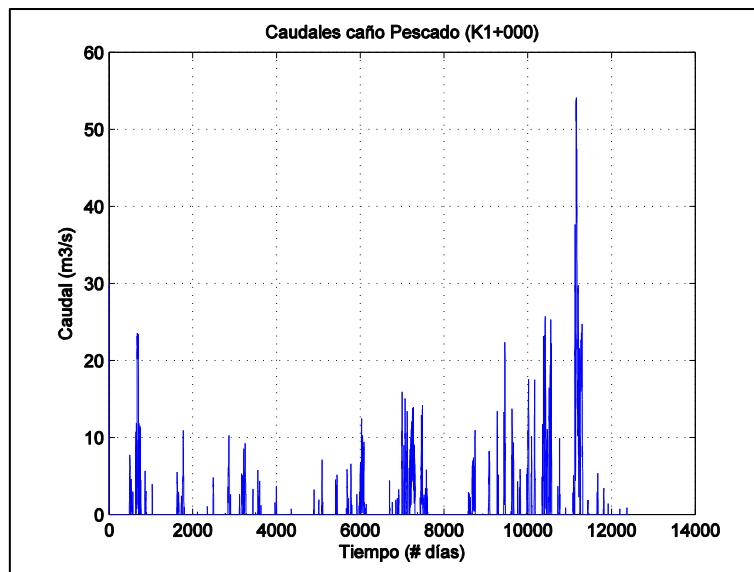
Gráfica 67. Serie de niveles caño Barro, antes de encuentro con caño Pescado



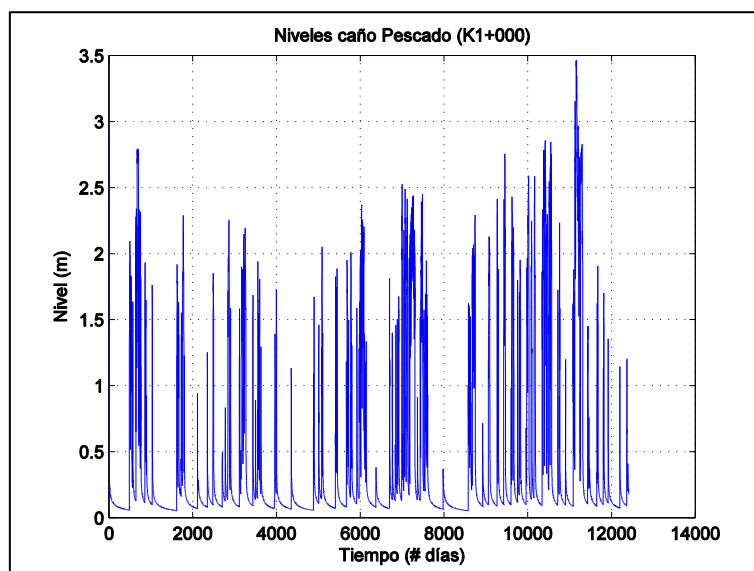
Gráfica 68. Serie de caudales caño Barro, antes de entrada a ciénaga de Ayapel



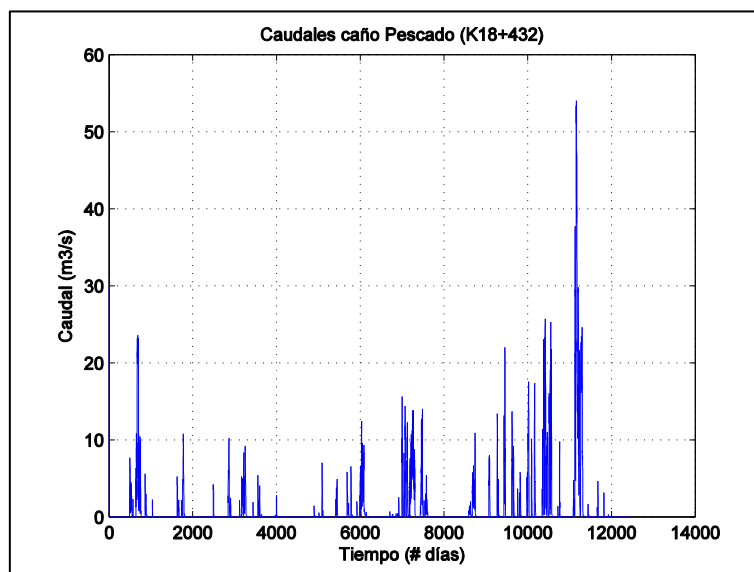
Gráfica 69. Serie de niveles caño Barro, antes de entrada a ciénaga de Ayapel



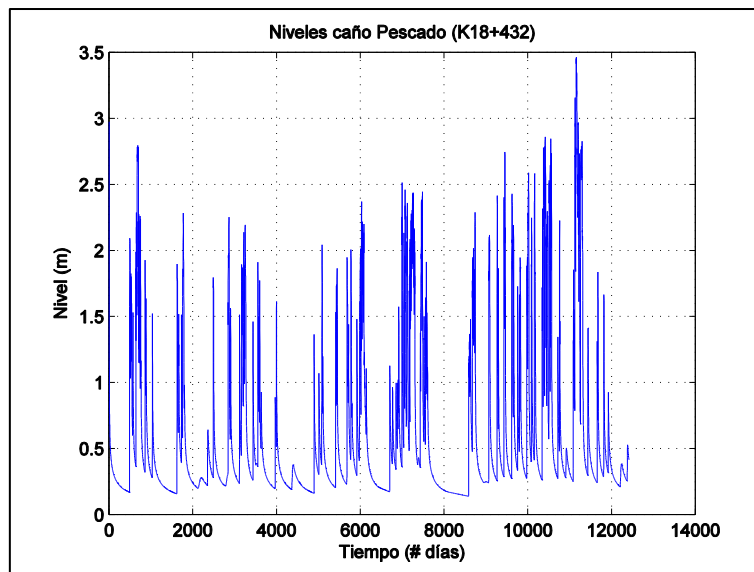
Gráfica 70. Serie de caudales caño Pescado, después de salida de río Cauca



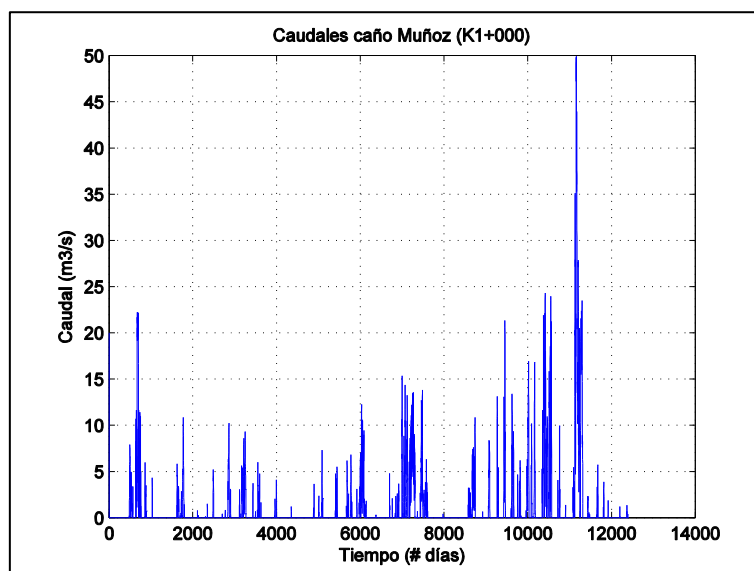
Gráfica 71. Serie de niveles caño Pescado, después de salida de río Cauca



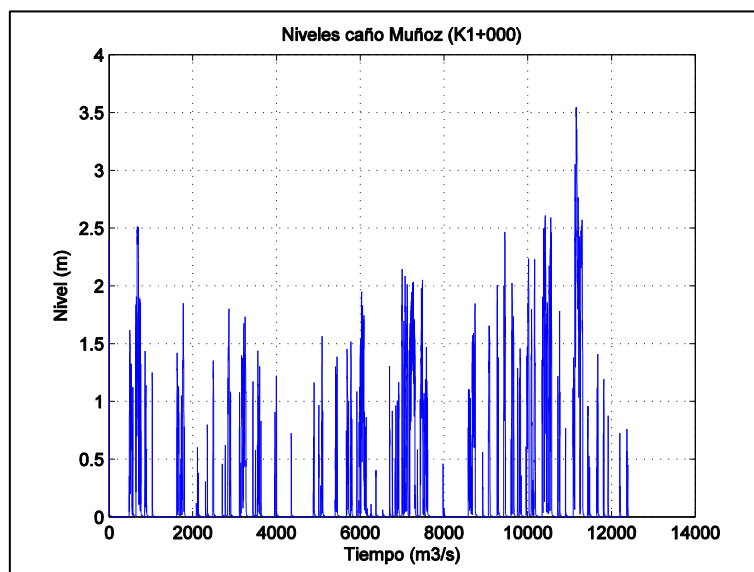
Gráfica 72. Serie de caudales caño Pescado, antes de encuentro con caño Barro



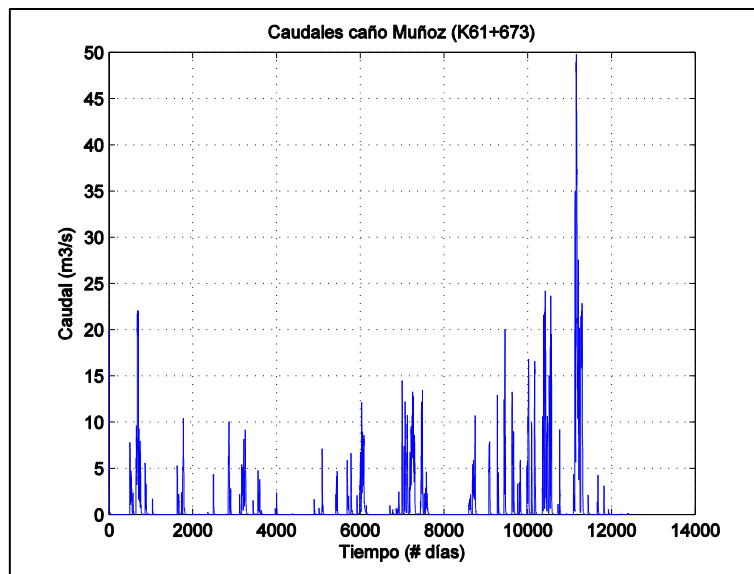
Gráfica 73. Serie de niveles caño Pescado, antes de encuentro con caño Barro



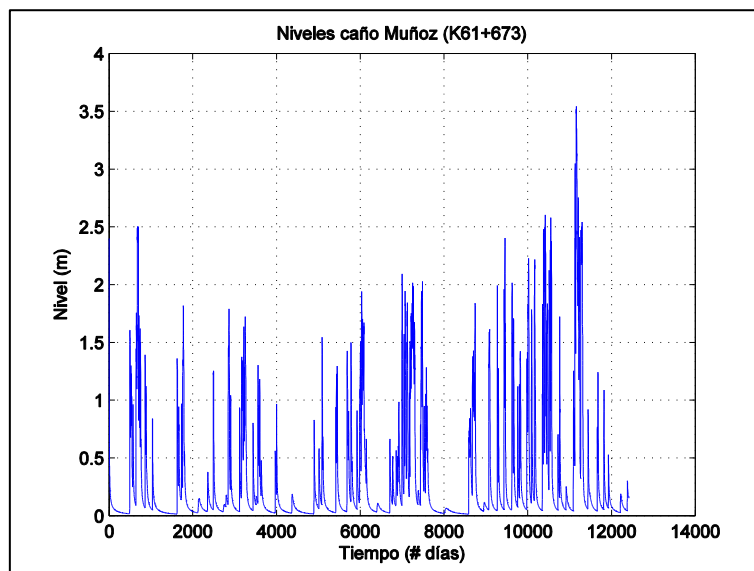
Gráfica 74. Serie de caudales caño Muñoz, después de salida de río Cauca



Gráfica 75. Serie de niveles caño Muñoz, después de salida de río Cauca



Gráfica 76. Serie de caudales caño Muñoz, antes de entrada a ciénaga de Ayapel



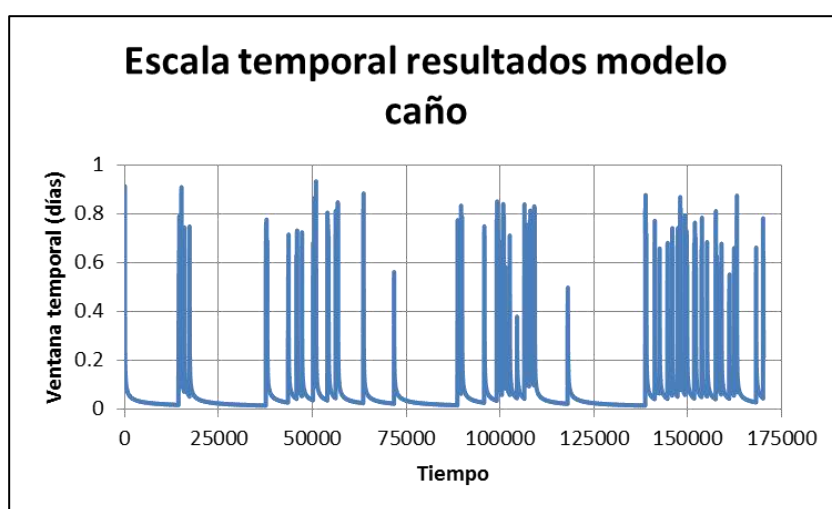
Gráfica 77. Serie de niveles caño Muñoz, antes de entrada a ciénaga de Ayapel

Los resultados anteriores permiten notar varias cosas:

1. La ola invernal del año 2010-2011 puede verse reflejada en incrementos sustanciales en los caudales y niveles modelados en todas las corrientes estudiadas. De igual manera, la concentración de sólidos suspendidos presentó aumentos en este periodo.
2. La concentración de sólidos suspendidos totales, para el río Cauca, tiende a disminuir a medida que se avanza aguas abajo. Este hecho se debe, principalmente, a los procesos de sedimentación que se generan en cada tramo. Resultaría recomendable, para modelaciones futuras, incluir dentro del modelo el material en suspensión que se añade a la carga original del río por erosión y re-suspensión.
3. Los niveles de los caños Muñoz, Barro y Pescado se encuentran dentro de lo esperado siendo, en todos los casos, mayores que 0 metros y menores que 5 metros.

4. Puede observarse que el cambio en los coeficientes de profundidad en cada tramo del río Cauca genera cambios significativos en los valores de niveles asociados con el mismo caudal. Lo anterior resulta importante en la representación más certera de la dinámica espacial del río y resultaría importante contar con este tipo de representación para los caños estudiados. Igualmente, se requeriría definir las características particulares de cada tramo de caño y no generalizar en la definición de sus coeficientes.

Por otro lado, se decidió analizar la serie de ventanas temporales en las cuales se generaron los caudales, niveles y concentraciones en el modelo. Lo anterior, se realizó dado que, como se explicó antes en ‘Metodología Empleada’, se utilizó un método de solución de paso variable y resulta importante saber cada cuánto tiempo el modelo genera resultados. Con este fin, se tomó la serie de tiempos de salida y se halló la diferencia entre tiempos consecutivos. Estas diferencias se graficaron respecto al número de tiempos y se obtuvo:



Gráfica 78. Análisis escala temporal, resultados modelo caños

Como se puede observar en la gráfica anterior, el modelo genera resultados en una escala temporal menor a un día. Este hecho resulta beneficioso para etapas posteriores de la modelación, dado que no se incurrirá en errores muy grandes, por la interpolación de resultados en espacios de tiempo muy largos (dado que se requiere una resolución temporal de un día).

4.2. Resultados modelo lluvia-escorrentía cuenca ciénaga

Como se mencionó anteriormente, el principal resultado de la aplicación de esta parte, corresponde a la serie de escorrentía generada por la cuenca que drena directamente a la ciénaga de Ayapel. Según lo explicado antes, se utilizó el programa HEC-HMS para obtener la serie. Después de correr el modelo (cuya construcción se explicó en ‘Metodología Empleada’) se obtuvo lo siguiente:

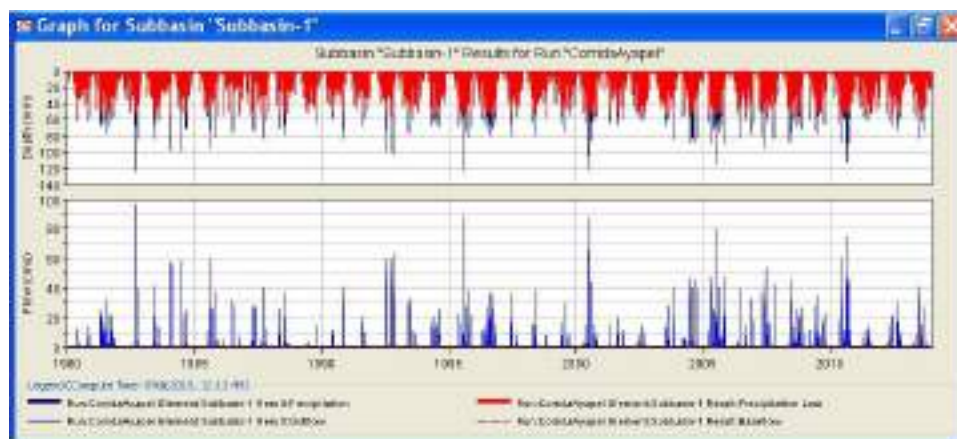
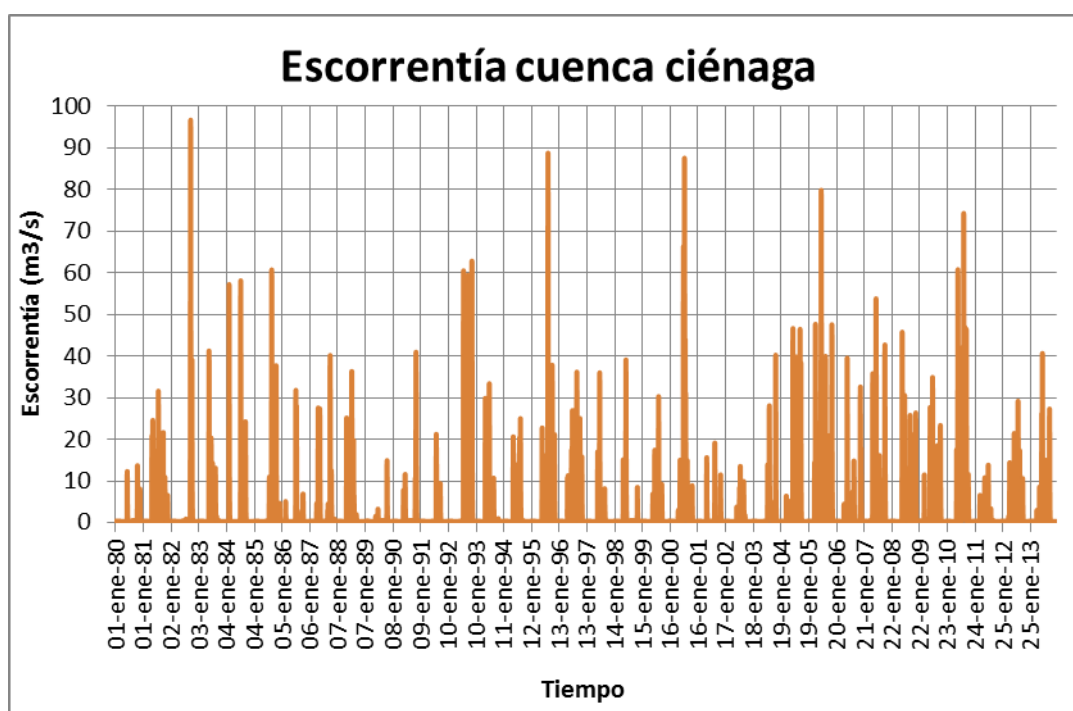


Figura 38. Resultados corrida HEC-HMS cuenca ciénaga

Fuente: Autor

Al graficar la escorrentía total obtenida contra el tiempo se tienen los siguientes valores diarios de escorrentía:



Gráfica 79. Serie de escorrentía cuenca ciénaga obtenida

Respecto a los resultados anteriores, es posible notar que la generación de escorrentía dentro de la cuenca es un proceso altamente variable en el tiempo. La variabilidad antes mencionada puede ser identificada de forma más clara con las medidas de tendencia central de la serie obtenida:

Tabla 17. Medidas de tendencia central, serie de escorrentía cuenca ciénaga

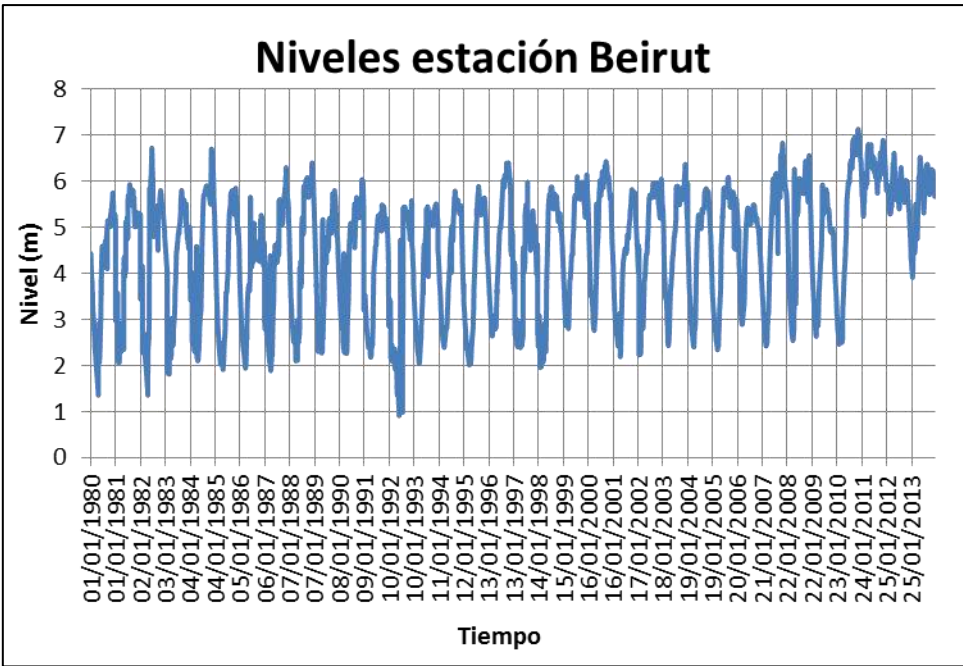
Parámetro	Valor
Promedio (m^3/s)	2.0144
Mínimo (m^3/s)	0.2
Máximo (m^3/s)	96.2
Desviación estándar (m^3/s)	6.2958

4.3. Resultados proceso de calibración de parámetros caño simplificado de conexión

Tal como se explicó en la sección ‘Metodología Empleada’ cada uno de los parámetros a calibrar se modificó de forma independiente hasta lograr el mejor ajuste posible. Igualmente, se evaluaron los diferentes métodos de integración y tolerancias respectivas para mejorar el ajuste y la resolución temporal. Los resultados obtenidos en la aplicación de las dos etapas mencionadas se presentan a continuación:

4.3.1. Variación de parámetros

El nivel de ajuste alcanzado en esta etapa se midió de acuerdo a la serie de niveles registrados en la estación limnimétrica Beirut. Los niveles registrados se presentan en la siguiente Gráfica:



Gráfica 80. Niveles registrados estación Beirut, ciénaga de Ayapel

Por otro lado, para la realización de esta etapa, se utilizó el método de integración de Dormand-Prince (ODE45) con una tolerancia de 1×10^{-6} . A continuación se presenta el valor dado a cada uno de los parámetros y las medidas de bondad de ajuste obtenidas:

Tabla 18. Coeficiente de Nash-Sutcliffe para variación de W

Parámetros				Coeficiente de Nash-Sutcliffe
W (m)	Cota _{ci} (m)	P _{ci} (m)	H ₀ (m)	
39.1	7	1.5	4.43	0.3447
20	7	1.5	4.43	0.4200
10	7	1.5	4.43	0.4628
5	7	1.5	4.43	0.3205
7	7	1.5	4.43	0.4294
9	7	1.5	4.43	0.4598
15	7	1.5	4.43	0.4481

Fuente: Autor

Tabla 19. Coeficiente de Nash-Sutcliffe para variación de P_{ci}

Parámetros				Coeficiente de Nash-Sutcliffe
P_{ci} (m)	$Cota_{ci}$ (m)	W (m)	H_0 (m)	
1	7	10	4.43	0.4326
1.3	7	10	4.43	0.4206
1.7	7	10	4.43	0.4597
2	7	10	4.43	0.4497
2.3	7	10	4.43	0.4635
2.5	7	10	4.43	0.4637
3	7	10	4.43	0.3638

*Fuente: Autor***Tabla 20.** Coeficiente de Nash-Sutcliffe para variación de $Cota_{ci}$

Parámetros				Coeficiente de Nash-Sutcliffe
$Cota_{ci}$ (m)	P_{ci} (m)	W (m)	H_0 (m)	
6.5	2.5	10	4.43	0.0893
7.5	2.5	10	4.43	0.5395
8	2.5	10	4.43	0.4942
7.4	2.5	10	4.43	0.5506

*Fuente: Autor***Tabla 21.** Coeficiente de Nash-Sutcliffe para variación de H_0

Parámetros				Coeficiente de Nash-Sutcliffe
H_0 (m)	$Cota_{ci}$ (m)	P_{ci} (m)	W (m)	
5	7.4	2.5	10	0.5380
3.5	7.4	2.5	10	0.5376
4	7.4	2.5	10	0.5400
4.1	7.4	2.5	10	0.5381

Fuente: Autor

4.3.2. Variación de métodos de integración y tolerancias

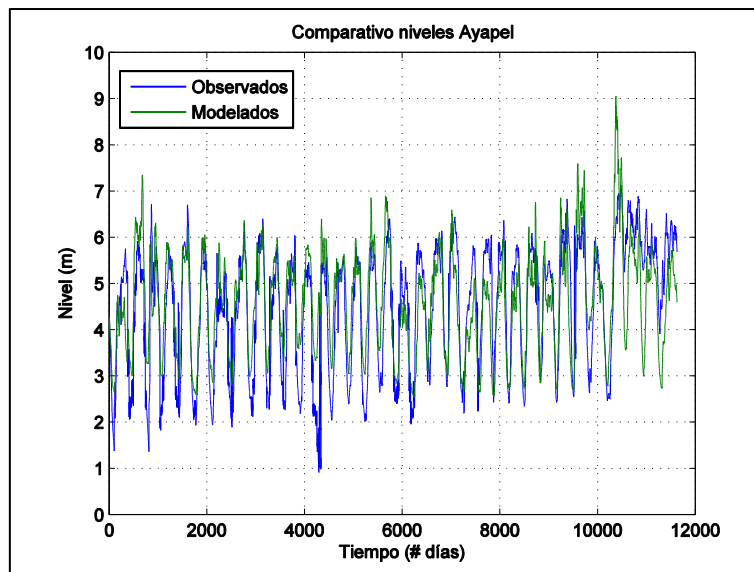
En esta etapa, manteniendo los parámetros hallados anteriormente, se evaluaron los siete métodos de solución que ofrece Simulink cuando se utiliza paso variable. Igualmente, para cada método, se analizaron diferentes tolerancias para asegurar que la combinación elegida, generara resultados con una resolución temporal adecuada. En la siguiente Tabla, es posible observar los diferentes métodos evaluados, las tolerancias analizadas, el coeficiente de Nash-Sutcliffe obtenido y el número de tiempos generados por la modelación. Así:

Tabla 22. Coeficientes de Nash-Sutcliffe para variación de método de solución y tolerancia

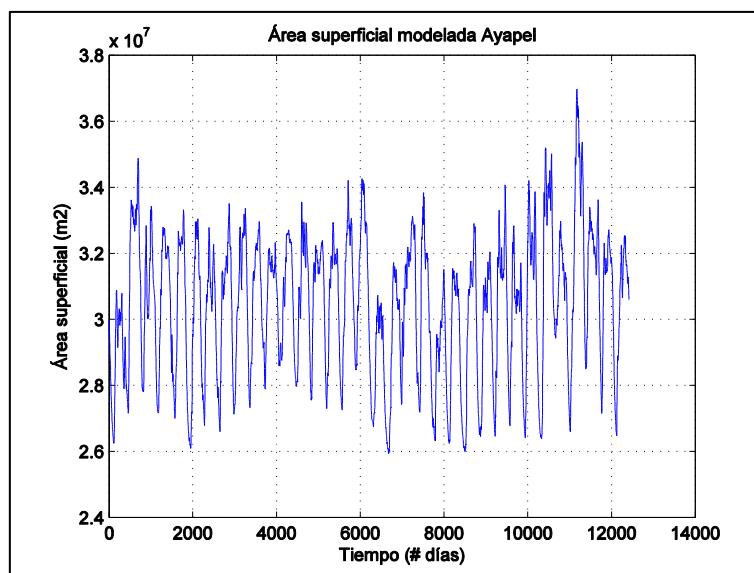
Método	Tolerancia	Coeficiente de Nash-Sutcliffe	# Tiempos generados
ODE 45	1.00E-06	0.5400	3414
	1.00E-07	0.5460	3769
	1.00E-08	0.5539	4698
	1.00E-09	0.5560	6609
	1.00E-10	0.5561	9847
	1.00E-11	0.5566	14977
	1.00E-12	0.5566	23037
	1.00E-13	0.5565	35962
ODE 23	1.00E-06	0.5387	4428
	1.00E-07	0.5572	5030
	1.00E-08	0.5690	7871
	1.00E-09	0.5697	15778
	1.00E-10	0.5698	33108
	1.00E-11	0.5700	70421
	1.00E-12	0.5701	150808
	1.00E-13	0.5738	300000
ODE 113	1.00E-06	0.5368	7276
	1.00E-07	0.5454	7932
	1.00E-08	0.5518	9311
	1.00E-09	0.5552	11276
	1.00E-10	0.5576	13696
	1.00E-11	0.5685	16461
	1.00E-12	0.5562	19371
ODE 15s	1.00E-06	0.5753	2466
	1.00E-07	0.5732	3898
	1.00E-08	0.5751	5855
	1.00E-09	0.5757	8403
	1.00E-10	0.5753	11628
	1.00E-11	0.5745	15818
	1.00E-12	0.5741	21372
ODE 23s	1.00E-06	0.5755	2308
	1.00E-07	0.5747	5173
	1.00E-08	0.5706	11890
	1.00E-09	0.5668	26769
	1.00E-10	0.5655	58668
	1.00E-11	0.5651	127118
ODE 23t	1.00E-06	0.5717	3162
	1.00E-07	0.5713	6695
	1.00E-08	0.5709	14261
	1.00E-09	0.5707	30423
	1.00E-10	0.5704	65013
	1.00E-11	0.5705	139316
ODE 23tb	1.00E-06	0.5724	2531
	1.00E-07	0.5711	5334
	1.00E-08	0.5702	11305
	1.00E-09	0.5696	24031
	1.00E-10	0.5702	51175
	1.00E-11	0.5707	109587

Fuente: Autor

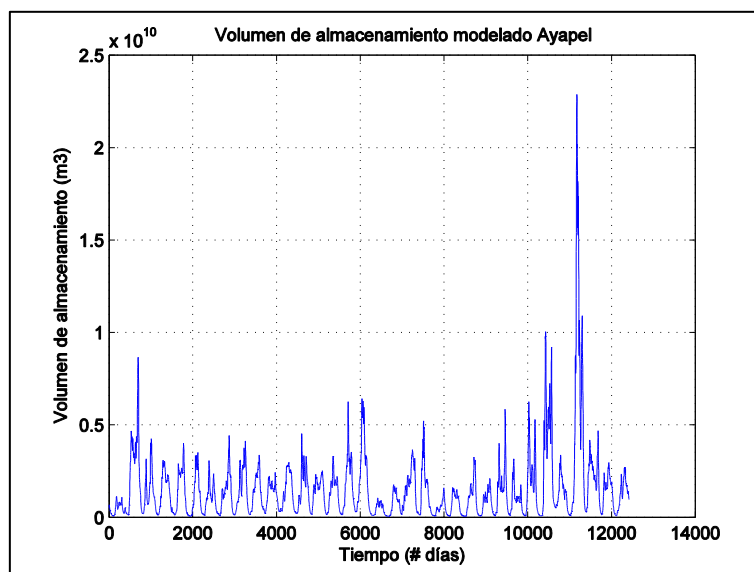
Resaltados en azul se presentan aquellos métodos y tolerancias que llevaron a los mejores cinco coeficientes de Nash-Sutcliffe. Dado que, además del nivel de ajuste obtenido, se está evaluando la resolución temporal de los resultados (número de tiempos cercano a 12,419 para una resolución temporal de un día), se consideró que el método que mejor cumplía los dos criterios es ODE 15s con tolerancia de 1×10^{-10} . Los resultados que se obtienen al correr el modelo con este método se presentan a continuación:



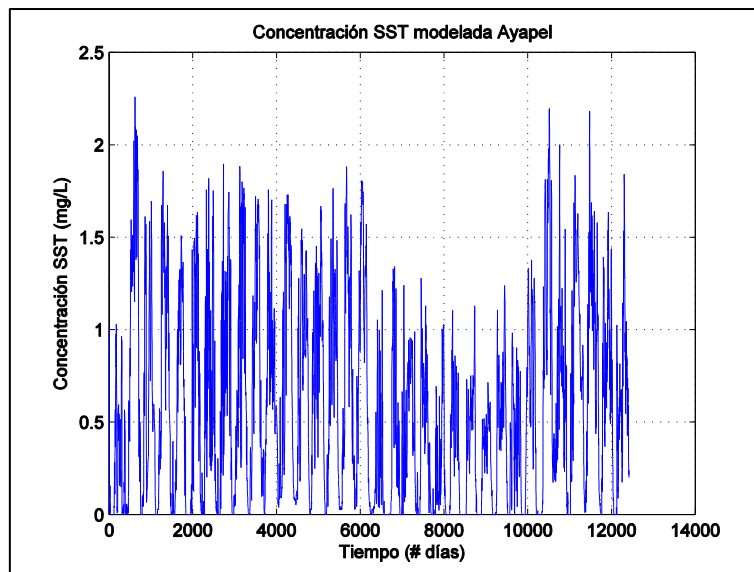
Gráfica 81. Comparación niveles modelados y observados, después de calibración, Ayapel



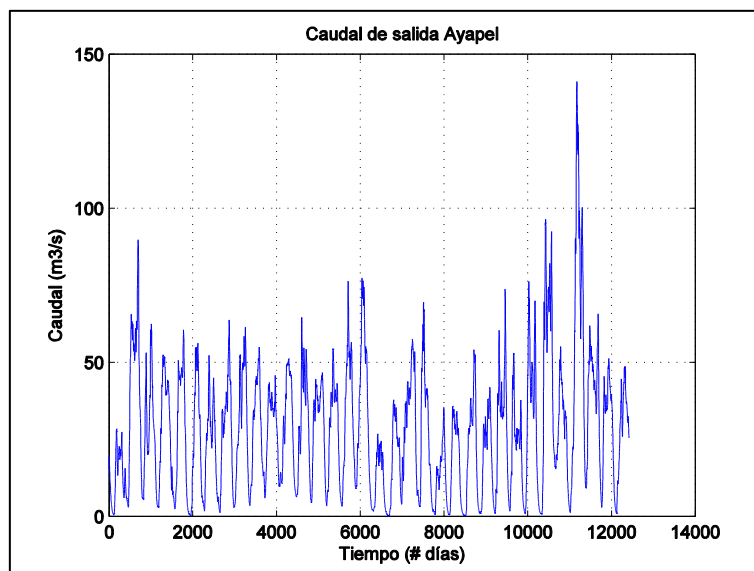
Gráfica 82. Área superficial modelada ciénaga de Ayapel



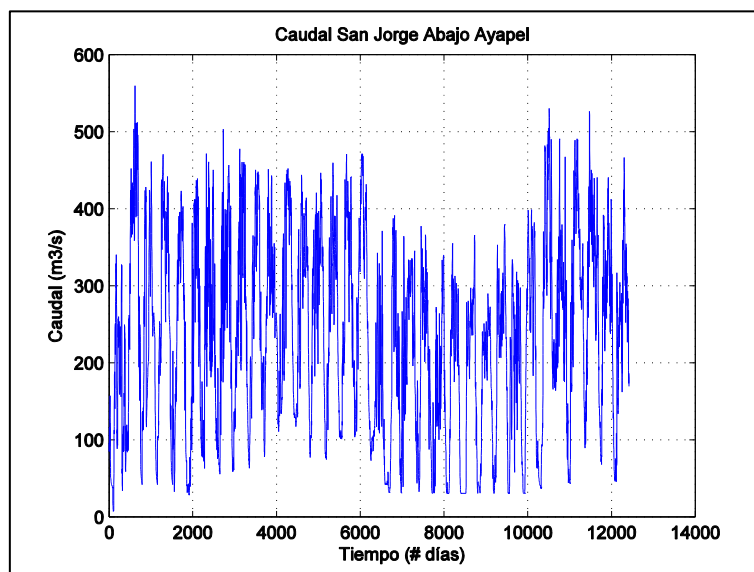
Gráfica 83. Volumen de almacenamiento modelado ciénaga de Ayapel



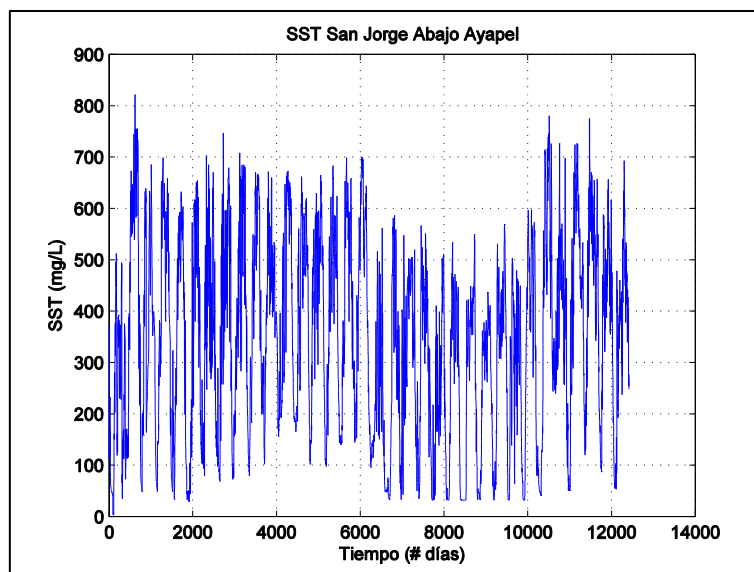
Gráfica 84. Concentración SST modelada ciénaga de Ayapel



Gráfica 85. Caudal de salida, ciénaga de Ayapel a río San Jorge, caño simplificado de conexión

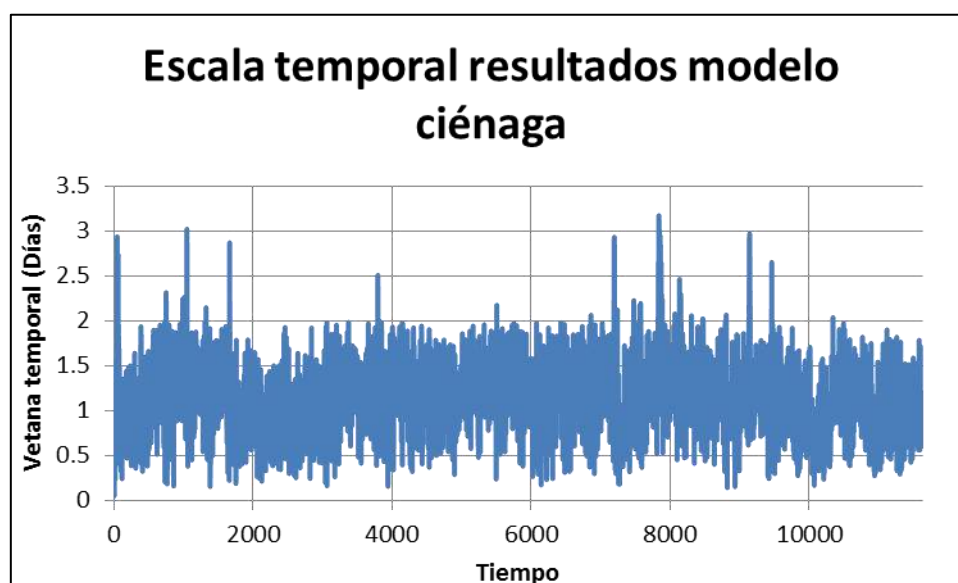


Gráfica 86. Caudal río San Jorge, aguas abajo ciénaga de Ayapel



Gráfica 87. Concentración SST río San Jorge, aguas abajo ciénaga de Ayapel

Adicionalmente a los resultados presentados, se realizó un análisis de la resolución temporal de los resultados obtenidos con el modelo, de forma análoga a lo realizado en el modelo de caños de salida del río Cauca. De esta forma se obtuvo:



Gráfica 88. Análisis escala temporal, resultados modelo ciénaga

De la serie de ventanas temporales que se obtuvo, se extrajeron algunas medidas de tendencia central que permiten caracterizar de mejor manera los espacios temporales que se obtuvieron:

Tabla 23. Medidas de tendencia central, serie ventanas temporales, modelo ciénaga

Parámetro	Valor
Promedio (días)	1.0680
Mínimo (días)	0.0572
Máximo (días)	3.1550
Desviación (días)	0.2921

Respecto a los resultados antes presentados, es posible decir:

1. Gráficamente, se puede notar que la serie de niveles en la ciénaga, obtenida mediante la aplicación del modelo calibrado, representa de forma aproximada el comportamiento real del cuerpo de agua; sin embargo, el modelo no genera de forma precisa los mínimos de nivel que se presentan. Los máximos de nivel son determinados de forma más certera, aunque el modelo tiende a sobreestimarlos; en especial, en el caso de la ola invernal de 2010-2011, en la que se puede ver un nivel modelado máximo mucho mayor al que realmente se presentó. Se recomendaría realizar modificaciones al modelo, en especial en la interacción de la ciénaga con el río San Jorge dado que, como se mencionó en secciones anteriores, la salida de la ciénaga no es únicamente por un caño hacia el río (como se modeló) sino por medio de dos, haciendo el sistema más complejo.
2. La variación del área superficial y volumen de almacenamiento modelados, se encuentran dentro de los rangos esperados. Adicionalmente, los resultados de estos parámetros en el tiempo son consistentes con la serie de niveles que se obtuvo. Para modelaciones futuras se recomendaría actualizar los coeficientes de las curvas cota-área-volumen dado que, en los últimos años, pudieron haberse presentado modificaciones en la ciénaga que llevan a cambios en el comportamiento de la misma.
3. La serie de concentraciones de sólidos suspendidos totales presenta variaciones que son consistentes con las variaciones de niveles que se obtuvieron. Igualmente, la medición de este determinante de calidad del agua, de forma continua en la ciénaga, permitiría que se llevara a cabo un proceso de calibración de los parámetros ‘velocidad de sedimentación’ y ‘concentración inicial’.
4. Los caudales de salida de la ciénaga, obtenidos mediante la aplicación del modelo, se encuentran dentro de lo esperado siendo, en todos los casos, superiores a cero. Lo anterior implica que, en general, la ciénaga realiza aportes netos de caudal al río San Jorge y no al contrario. Sin embargo, dado que el flujo que se presenta entre la ciénaga y el río está definido por los niveles, de los dos cuerpos de agua, y que no se cuenta con los coeficientes de velocidad y profundidad correspondientes al río San Jorge, los caudales de salida obtenidos pueden no ser correctos.
5. La variación que se presenta entre los caudales aguas arriba y aguas abajo de la ciénaga de Ayapel, en el río San Jorge, no es tan evidente dado que el orden de magnitud de los caudales que mueve el río es superior al de los caudales que salen de la ciénaga. En el caso de la concentración de sólidos suspendidos totales, se presenta la misma situación.
6. No se presentan niveles obtenidos en el río San Jorge ya que, como se mencionó antes, los coeficientes de profundidad y velocidad no pudieron ser modificados por lo que, no se espera que las profundidades obtenidas sean confiables. Resultaría recomendable realizar la modelación hidráulica del río San Jorge, para ejercicios futuros, con el objeto de representar de forma más adecuada el comportamiento del sistema.
7. La resolución temporal de los resultados obtenidos es, en promedio de 1 día con máximo de 3.2 y mínimo de 0.06 días. Lo anterior, permite considerar que el modelo genera resultados cuyo nivel de predicción, en términos de tiempo, es aceptable (en promedio se podría contar con resultados diarios de niveles y caudales).

5. Conclusiones y recomendaciones

A continuación se presentan las principales conclusiones que pudieron extraerse después de la realización de este trabajo. Igualmente, se presentan recomendaciones para el perfeccionamiento del presente o realización de trabajos futuros en el tema.

5.1. Conclusiones

- La ola invernal del año 2010-2011 puede verse reflejada en incrementos sustanciales en los caudales y niveles modelados en todas las corrientes estudiadas. De igual manera, la concentración de sólidos suspendidos de todos los cuerpos de agua analizados presentó aumentos en este periodo.
- La concentración de sólidos suspendidos totales, para el río Cauca, tiende a disminuir a medida que se avanza aguas abajo. Este hecho se debe, principalmente, a los procesos de sedimentación que se generan en cada tramo.
- Los niveles de los caños Muñoz, Barro y Pescado se encuentran dentro de lo esperado siendo, en todos los casos, mayores que 0 metros y menores que 5 metros.
- Puede observarse que el cambio en los coeficientes de profundidad en cada tramo del río Cauca genera cambios significativos en los valores de niveles asociados con el mismo caudal. Lo anterior resulta importante en la representación más certera de la dinámica espacial del río y resultaría importante contar con este tipo de representación para los caños estudiados.
- El modelo de caños de salida del río Cauca genera resultados en una escala temporal menor a un día. Este hecho resultó beneficioso para etapas posteriores de la modelación, dado que no se incurrió en errores muy grandes, por la interpolación de resultados en espacios de tiempo muy largos (dado que se requería una resolución temporal de un día).
- La serie de niveles en la ciénaga, obtenida mediante la aplicación del modelo calibrado río ciénaga, representa de forma aproximada el comportamiento real del cuerpo de agua; sin embargo, el modelo no genera de forma precisa los mínimos de nivel que se presentan. Los máximos de nivel son determinados de forma más certera, aunque el modelo tiende a sobreestimarlos; en especial, en el caso de la ola invernal de 2010-2011, en la que se puede ver un nivel modelado máximo mucho mayor al que realmente se presentó.
- La variación del área superficial y volumen de almacenamiento modelados en la ciénaga de Ayapel, se encuentran dentro de los rangos esperados. Adicionalmente, los resultados de estos parámetros en el tiempo son consistentes con la serie de niveles que se obtuvo.
- La serie de concentraciones de sólidos suspendidos totales, dentro de la ciénaga de Ayapel, presenta variaciones que son consistentes con las variaciones de niveles que se obtuvieron después de modelar.
- Los caudales de salida de la ciénaga, obtenidos mediante la aplicación del modelo río-ciénaga, se encuentran dentro de lo esperado siendo, en todos los casos, superiores a cero. Lo anterior implica que, en general, la ciénaga realiza aportes netos de caudal al río San Jorge y no al contrario. Sin embargo, dado que el flujo que se presenta entre la ciénaga y el río está definido por los niveles, de los dos cuerpos de agua, y que no se cuenta con los coeficientes de velocidad y

profundidad correspondientes al río San Jorge, los caudales de salida obtenidos pueden no ser correctos.

- La variación que se presenta entre los caudales aguas arriba y aguas abajo de la ciénaga de Ayapel, en el río San Jorge, no es tan evidente dado que el orden de magnitud de los caudales que mueve el río es superior al de los caudales que salen de la ciénaga. En el caso de la concentración de sólidos suspendidos totales, se presenta la misma situación.
- La resolución temporal, de los resultados obtenidos en el modelo río-ciénaga, es en promedio de 1 día con máximo de 3.2 y mínimo de 0.06 días. Lo anterior, permite considerar que el modelo genera resultados cuyo nivel de predicción, en términos de tiempo, es aceptable (en promedio se podría contar con resultados diarios de niveles y caudales).
- Dado el nivel de ajuste logrado después del proceso de calibración, podría afirmarse que el nivel del río San Jorge juega un papel muy importante en la dinámica de niveles de la ciénaga de Ayapel.; sin embargo, no es posible atribuir el comportamiento en este último cuerpo de agua únicamente al río. La inclusión posterior del caño Viloría al modelo realizado podría lograr que se llegara a ajustes más adecuados.

5.2. Recomendaciones

- Resultaría recomendable, para modelaciones futuras, incluir dentro de los modelos realizados (tanto el de caños de salida del río Cauca como el del río San Jorge-ciénaga de Ayapel) el material en suspensión que se añade a la carga original de los ríos por erosión y re-suspensión.
- Se requeriría definir las características particulares de cada tramo de los caños modelados (coeficientes de velocidad y profundidad) y no generalizar en la definición de sus coeficientes, para modelaciones futuras.
- Resultaría recomendable, contar con características particulares de la cuenca aportante a la ciénaga de Ayapel. Lo anterior permitiría, entre otras cosas, realizar un proceso de calibración de los parámetros del modelo en HEC-HMS como el caudal base o la tasa de infiltración.
- Se recomendaría realizar modificaciones al modelo, en especial en la interacción de la ciénaga con el río San Jorge dado que, como se mencionó en secciones anteriores, la salida de la ciénaga no es únicamente por un caño hacia el río (como se modeló) sino por medio de dos, haciendo el sistema más complejo.
- Para modelaciones futuras se recomendaría actualizar los coeficientes de las curvas cota-área-volumen, en el modelo río-ciénaga, dado que en los últimos años pudieron haberse presentado modificaciones en la ciénaga, que llevan a cambios en el comportamiento de la misma.
- Resultaría recomendable realizar la modelación hidráulica del río San Jorge, para ejercicios futuros, con el objeto de representar de forma más adecuada el comportamiento del sistema. En especial, sería deseable contar con coeficientes de velocidad y profundidad para cada tramo del río y, de esta forma, representar de mejor manera el comportamiento del sistema.
- La medición de la concentración de sólidos suspendidos totales, de forma continua en la ciénaga, permitiría que se llevara a cabo un proceso de calibración de los parámetros ‘velocidad de sedimentación’ y ‘concentración inicial’ en el modelo río-ciénaga.

6. Referencias Bibliográficas

- Aguilera Díaz, M. M. (2004). La Mojana: riqueza natural y potencial económico. En B. d. República, *Documentos de Trabajo sobre Economía Regional*. Cartagena de Indias: Centro Regional del Estudios Económicos, Banco de la República.
- Beer, T., & Young, P. (1983). Longitudinal dispersion in natural streams. (ASCE, Ed.) *Journal of Environment Engeeniring*(5), 1049-1067.
- Camacho, L. (1997). Extension of the QUASAR water quality model to incorporate dead-zone mixing concepts. *MSc. Disertation*.
- Camacho, L., & Lees, M. (1999). Multilinear discrete lag-cascade model for channel routing. *Journal of Hydrology*, 226(1), 30-47.
- Camacho, L., & Lees, M. J. (2000). Modelación del transporte de solutos en ríos bajo condiciones de flujo no permanente: un modelo conceptual integrado. *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina*.
- Castañeda, D. J. (2001). *Una visión ambiental de los ecosistemas acuáticos lénticos en la Depresión Momposina - Cuenca baja del Río Magdalena. Estudio colateral de las macrofitas acuáticas*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Derecho. Facultad de Ciencias Económicas. Area de Gestión Ambiental; IDEA.
- Castañeda, J. (2001). *Una Visión ambiental de los ecosistemas acuáticos lénticos en la Depresión Momposina – Cuenca baja del río Magdalena. Estudio colateral de las macrófitas acuáticas. Tesis de Maestría*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- CORPOMOJANA. (s.f.). Mapa CORPOMOJANA. Recuperado el 20 de Septiembre de 2015, de <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=9fcb8c4b0fd946f397ed6e44a19387f4>
- Departamento Nacional de Planeación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2003). *Programa de Desarrollo Sostenible de la Región de La Mojana*. Bogotá: DNP.
- Franco Rojas, A. (2011). *Diseño e implementación de un modelo conceptual para la gestión integral del agua y los usos del suelo en la región de La Mojana. Tesis Magíster en Recursos Hidráulicos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Galvis, G., Mojica, J., & Camargo, M. (1997). *Peces del Catatumbo*. Bogotá: D'Vinni.
- Lees, M., Camacho, L., & Chapra, S. (2000). On the relationship of transient - storage and aggregated dead zone models of longitudinal solute transport in streams. *Water Resources Managment*, 36(1), 213-224.

- Lees, M., Camacho, L., & Whitehead, P. (1998). Extension of the QUASAR river water quality model to incorporate dead-zone mixing. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2(2-3), 353-365.
- Mendoza, S., & Suárez, C. (2000). *Caracterización de algunos cuerpos de agua lénticos de la cuenca Magdalena-Cauca con énfasis en las macrófitas acuáticas*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Ministerio de Medio Ambiente & Corporación para el Desarrollo Sostenible de la Mojana y el San Jorge. (2000). *Plan de Manejo Ambiental de los humedales asociados al Bajo Río San Jorge*. Sincelejo: CORPOMOJANA.
- Ministerio de Medio Ambiente & Corporación para el Desarrollo Sostenible de La Mojana y el San Jorge. (2002). *Plan de manejo ambiental de los humedales asociados al Bajo río San Jorge en los municipios de Caimito, San Benito Abad y San Marcos, Sucre*. CORPOMOJANA.
- Ministerio de Medio Ambiente, CSB, CORPOMOJANA, CORANTIOQUIA, CORPMAG, CVS. (2002). *Plan de manejo integral de los humedales, subregión de la Depresión Momposina y Cuenca del Río Sinú*. Magangué: Ministerio de Medio Ambiente.
- Mojica, J., & Galvis, G. (1998). *Intrepretación y análisis de la información ictiológica y pesquera en el área de influencia del proyecto hidroeléctrico sobre el río Sogamoso*. Bogotá: Isagen S.A.
- Mojica, J., Rodríguez, F., & Galvis, G. (1989). *Estudio ecológico de una laguna de desborde del río Metica*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia & Fondo FEN Colombia.
- Moreno, L. (1994). *Producción de material vegetal del cinturón litoral de bosque y su aporte al complejo de ciénagas de Chucurí. Tesis biología*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- U.S Army Corps of Engineers. (2015). *HEC-HMS*. Davis: U.S. Army Corps of Engineers.
- Universidad de Antioquia & Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge (CVS). (2007). *Plan de Manejo Ambiental del Complejo de Humedales de Ayapel*. Medellín: CVS.
- Universidad Nacional de Colombia & CORMAGDALENA. (2007). *Convenio Interadministrativo No 1-037-2005: Estudios e investigaciones de las obras de restauración ambiental y de navegación del Canal de Dique*. Bogotá: CORMAGDALENA.
- Universidad Nacional de Colombia & Departamento Nacional de Planeación. (2012). *Estudios, análisis y recomendaciones para el ordenamiento ambiental y el desarrollo territorial de La Mojana*.

- Welcomme, R. (1992). River fisheries. En FAO, *Documento técnico de pesca* 262. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Whitehead, P., Williams, R., & Lewis, D. (1997). Quality simulation along river systems (QUASAR): Model theory and development. *Science of The Total Environment*, 194–195, 447-456.
- Young, P., & Wallis, S. (1993). Solute Transport and Dispersion in Channels. En K. Beven, & M. Kirby (Edits.), *Channel Network Hydrology* (págs. 129-174). Chichester: Wiley.
- Zuloaga, L. (1995). *Densidad de población, hábitos alimenticios y anotaciones sobre el hábitat del jaguar (Panthera onca L.) en la depresión inundable del bajo San Jorge, Colombia. Tesis biología*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.