FORMULACIÓN

POMCA

RÍO LUISA Y OTROS DIRECTOS AL MAGDALENA

Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica

HIDROLOGÍA

FASE DE DIAGNÓSTICO

POMCA-RLOD (CÓDIGO 2118)

Corporación de Cuencas del Tolima
CORCUENCAS
NIT. 800.246.198 – 8
Calle 10 N° 3 – 76 Of. 303
Edf. Cámara de Comercio de Ibagué
Tel. (8) 2635780 – 2612412

Título del Documento: TOMO No 3.7.
HIDROLOGÍA

Código del Documento: 2118RLOD - VO -3.7. - V05

REGISTRO DE APROBACIÓN:

Elaboró:	Avaló:	Aprobó:
Corporación de Cuencas del Tolima CORCUENCAS	**Corporación Autónoma Regional del Tolima CORTOLIMA**	**Consorcio POMCAS 2014**

Este reporte ha sido preparado por la Corporación Autónoma Regional del Tolima – CORTOLIMA, con un conocimiento razonable, con el cuidado y la diligencia, siguiendo los lineamientos establecidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS en la Guía POMCAS 2014 y bajo la interventoría del Consorcio POMCAS 2014.

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 10

2 METODOLOGÍA, DESCRIPCIÓN Y EVALUACIÓN DE LA RED DE ESTACIONES HIDROLÓGICAS EN LA CUENCA 11

2.1 ESTACIONES MEDIDORAS DE PRECIPITACIÓN 11
2.2 ESTACIONES MEDIDORAS DE CAUDAL 13

3 TRATAMIENTO DE DATOS HIDROLÓGICOS 15

3.1 CALCULO DE DATOS FALTANTE 15
3.2 POLÍGONOS DE THIESSEN 15
3.3 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN 16
3.4 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA TEMPERATURA 27

4 INVENTARIO DE INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS 34

4.1 CONCESIONES REGISTRADAS ANTE CORTOLIMA 34
4.2 ACUEDUCTOS 34
4.2.1 ACUEDUCTO DEL MUNICIPIO DE ROVIRA 34
4.2.2 ACUEDUCTO DEL MUNICIPIO DE VALLE DE SAN JUAN 35
4.2.3 ACUEDUCTO DEL MUNICIPIO DE SAN LUIS 36
4.2.4 ACUEDUCTO DEL MUNICIPIO DEL GUAMO 36
4.2.5 ACUEDUCTO DEL MUNICIPIO DEL ESPINAL 36
4.2.6 BOCATOMA ENERLIM 37
4.3 TRANSVASES 37
4.3.1 TRASVASE USOCOELLO 38
4.3.2 CONCESIONES USOGUAMO 40
4.3.3 CANAL TORRES 40

5 ANÁLISIS DE SISTEMAS LENTICOS 44

6 DINÁMICA DE CICLO DE SEDIMENTOS 46

7 CARACTERIZACION DE LAS UNIDADES HIDROGRAFICAS 48

7.1 UNIDAD HIDROGRÁFICA DIRECTOS AL MAGDALENA QUEBRADA PALITO Y OTROS 48
7.2 UNIDAD HIDROGRÁFICA QUEBRADA ENEAL 49
7.3 UNIDAD HIDROGRÁFICA DIRECTOS AL MAGDALENA QUEBRADA AGUA SUCIA Y OTROS 49
7.4 UNIDAD HIDROGRÁFICA DIRECTOS AL MAGDALENA QUEBRADA GUAYABAL Y OTROS 50
7.5 UNIDAD HIDROGRÁFICA DIRECTOS AL MAGDALENA QUEBRADA SANTANA Y OTROS 50
7.6 UNIDAD HIDROGRÁFICA DIRECTOS AL RÍO LUISA QUEBRADA GUADUAS 51
7.7 UNIDAD HIDROGRÁFICA RÍO LUISA PARTE BAJA 51
7.8 UNIDAD HIDROGRÁFICA RÍO LUISA PARTE ALTA 52

7.9 UNIDAD HIDROGRÁFICA DIRECTOS AL RÍO LUISA QUEBRADA SERREZUELA .. 52
8 ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL 53
8.1 CONCEPTOS CLAVES EN LA EVALUACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL 54
8.2 CICLO HIDROLÓGICO 56
8.3 ESCORRENTÍA SUPERFICIAL 56
8.4 MODELO HIDROLÓGICO DE TANQUES AGREGADO 56
8.4.1 DESCRIPCIÓN CONCEPTUAL DEL MODELO DE TANQUES 57
8.4.2 METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DEL MODELO 63
8.4.3 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS 66
8.4.4 RESULTADOS DEL MODELO 69
8.5 RENDIMIENTO HÍDRICO 73
8.6 CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES 77
8.7 CAUDAL AMBIENTAL 77
9 ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS Y MÍNIMOS 79
9.1 CAUDALES MÁXIMOS 79
9.1.1 HOYAS HIDROGRÁFICAS MAYORES A 2.5 KM^2 79
9.1.2 CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL 92
9.1.3 ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS 93
9.2 CAUDALES MÍNIMOS 96
10 BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL 100
10.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS NORMALES O MEDIAS 101
10.2 CONDICIONES CLIMÁTICAS SECAS 103
11 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA 105
11.1 USUARIOS CONCESIONADOS CORTOLIMA – SIRH 105
11.2 USUARIOS INFORMALES 112
12 INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD HIDRICA 116
12.1 INDICADORES DE RÉGIMEN NATURAL 116
12.1.1 ÍNDICE DE RETENCIÓN Y REGULACIÓN HÍDRICA 116
12.2 INDICADORES DE RÉGIMEN ANTRÓPICO 117
12.2.1 ÍNDICE DE USO DEL AGUA 117
12.2.2 ÍNDICE DE VULNERABILIDAD 125
12.3 RESULTADOS DE LOS INDICADORES PARA LA CUENCA DEL RÍO LUISA Y DIRECTOS AL MAGDALENA 127
12.3.1 ÍNDICES DE SOSTENIBILIDAD 127
12.3.2 ÍNDICES DE SOSTENIBILIDAD HÍDRICA CONDICIONES CLIMÁTICAS SECAS 129
13 NECESIDADES DE INFORMACIÓN Y CONOCIMIENTO 132
14 BIBLIOGRAFÍA 133

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones climatológicas e hidrológicas seleccionadas en la cuenca del río Luisa y otros directos al Magdalena 13
Tabla 2. Caracterización y localización geográfica de la red hidrométrica en la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena 14
Tabla 3. Áreas de influencia de las estaciones mediante el método de polígonos de Thiessen 18
Tabla 4. Valores de precipitación media mensual (mm), periodo 1986-2014, para las estaciones con influencia sobre la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena 19
Tabla 5. Precipitación media mensual (mm) y total (mm), en el periodo 1986-2014, para las 9 unidades hidrológicas que conforman la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena 26
Tabla 6. Ecuaciones mensuales de relación entre temperatura y altura sobre el nivel del mar para la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena 27
Tabla 7. Valores de temperatura media mensual (°C), periodo 1986-2014, para la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena 29
Tabla 8. Canales que trasvasan en la cuenca del río Luisa y otros directos al Magdalena 38
Tabla 9. Sistemas lenticos de la cuenca de río Luisa y otros directos al Magdalena..... 44
Tabla 10. Capacidad de transporte de sedimentos en la desembocadura del río Magdalena 46
Tabla 11. Carga de lavado, de lecho y total del río Luisa y otros directos al Magdalena.. 47
Tabla 12. Localización geográfica y características morfológicas de la unidad hidrográfica directos al Magdalena quebrada Palito y otros..... 48
Tabla 13. Localización geográfica y características morfológicas de la unidad hidrográfica quebrada Eneal 49
Tabla 14. Localización geográfica y características morfológicas de la unidad hidrográfica directos al Magdalena quebrada Agua Sucia y otros 49
Tabla 15. Localización geográfica y características morfológicas de la unidad hidrográfica directos al Magdalena quebrada Guayabal..... 50
Tabla 16. Localización geográfica y características morfológicas de la unidad hidrográfica directos al Magdalena quebrada Santana..... 50
Tabla 17. Localización geográfica y características morfológicas de la unidad hidrográfica directos al río Luisa quebrada Guaduas..... 51
Tabla 18. Localización geográfica y características morfológicas de la unidad hidrográfica río Luisa parte baja 51
Tabla 19. Localización geográfica y características morfológicas de la unidad hidrográfica río Luisa parte alta 52
Tabla 20. Localización geográfica y características morfológicas de la unidad hidrográfica directos al río Luisa quebrada Serrezuela..... 52
Tabla 21. Intervalos de variación de los parámetros del modelo hidrológico..... 62
Tabla 22. Intervalos de valoración del rendimiento del modelo a partir del número de Nash 64
Tabla 23. Parámetros de calibración estación la nueva 65
Tabla 24. Parámetros de evaluación y rendimiento del modelo (calibración)..... 65
Tabla 25. Parámetros de evaluación y rendimiento del modelo (validación) 67
Tabla 26. Parámetros de evaluación y rendimiento del modelo (validación total)..... 69
Tabla 27. Caudales medios cuenca rio Luisa – medio modelación hidrológica 70
Tabla 28. Caudales medios cuencas directos al Magdalena - modelación hidrológica..... 70

Tabla 29. Caudales medios mensuales de la cuenca río Luisa y directos al Magdalena – mediante modelación hidrológica 71
Tabla 30. Rendimientos hídricos para las unidades hidrográficas de la cuenca del río Luisa y directos al Magdalena 73
Tabla 31. Características geométricas e hidrográficas cuencas seleccionadas 79
Tabla 32. Tiempos de concentración seleccionados 85
Tabla 33. Factor espacial de reducción 86
Tabla 34. Tiempo de desfase 88
Tabla 35. Caudales máximos instantáneos 92
Tabla 36. Caudales máximos anuales históricos para la estación limnigráfica Pavo Real 93
Tabla 37. Frecuencia de caudales máximos instantáneos anuales para la estación limnigráfica Pavo Real 95
Tabla 38. Caudales mínimos anuales históricos para la estación limnigráfica Pavo Real 96
Tabla 39. Caudales mínimos anuales históricos para la estación limnigráfica Pavo Real 98
Tabla 40. Caudales mínimos instantáneos 99
Tabla 41. Balance hídrico superficial anual para las unidades hidrográficas del río Luisa y otros directos al Magdalena 101
Tabla 42. Balance hídrico superficial mensual para las unidades hidrográficas de los ríos Luisa y otros directos al Magdalena 101
Tabla 43. Balance hídrico superficial anual para la unidad hidrográfica río Luisa y otros directos al Magdalena en condiciones climáticas secas 103
Tabla 44. Balance hídrico superficial anual para la unidad hidrográfica río Luisa y otros directos al Magdalena en condiciones climáticas secas 103
Tabla 45. Caudal concesionado por tipo de uso de agua para la subzona hidrográfica del río Luisa y otros directos al Magdalena. 106
Tabla 46. Caudal concesionado por usuario y tipo de uso de agua 106
Tabla 47. Caudal concesionado para los niveles subsiguientes de la subzona hidrográfica del río Luisa y otros directos al Magdalena 112
Tabla 48. Caudal concesionado para cada unidad hidrológica que conforma la subzona hidrográfica del río Luisa y otros directos al Magdalena 113
Tabla 49. Demanda total para cada unidad hidrológica que conforma la subzona hidrográfica del río Luisa 113
Tabla 50. Demanda total para cada unidad hidrológica que conforma los directos al Magdalena de la subzona hidrográfica del río Luisa y otros directos al Magdalena 114
Tabla 51. Índice de retención y regulación hídrica 117
Tabla 52. Categoría índice de uso del agua. -IUA- 121
Tabla 53. Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico 125
Tabla 54. Índices de sostenibilidad hídrica – río Luisa parte alta 127
Tabla 55. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al río Luisa parte baja - Q. Guaduas 127
Tabla 56. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al río Luisa parte baja - Q Guaduas con trasvases 127
Tabla 57. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al río Luisa parte baja - Q Serrezuela 127
Tabla 58. Índices de sostenibilidad hídrica - directos al río Luisa parte baja - Q Serrezuela con trasvases 128
Tabla 59. índices de sostenibilidad hídrica – río Luisa parte baja 128
Tabla 60. Índices de sostenibilidad hídrica - río Luisa parte baja con trasvases 128
Tabla 61. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al Magdalena - Q Palito y otros ... 128
Tabla 62. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al Magdalena - Q Santana y otros128

Tabla 63. Índices de sostenibilidad hídrica - directos al Magdalena - Q Santana y otros con trasvases 128
Tabla 64. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al Magdalena - Q Agua Sucia y otros 129
Tabla 65. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al Magdalena - Q Guayabal y otros 129
Tabla 66. Índices de sostenibilidad hídrica - directos al Magdalena - Q Guayabal y otros con trasvases 129
Tabla 67. Índices de sostenibilidad hídrica – quebrada Eneal 129
Tabla 68. Índices de sostenibilidad hídrica - quebrada Eneal con trasvases 129
Tabla 69. Índices de sostenibilidad hídrica – río Luisa parte alta 129
Tabla 70. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al río Luisa parte baja - Q Guaduas 130
Tabla 71. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al río Luisa parte baja - Q Serrezuela 130
Tabla 72. Índices de sostenibilidad hídrica – río Luisa parte baja 130
Tabla 73. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al Magdalena - Q Palito y otros 130
Tabla 74. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al Magdalena - Q Santana y otros 130
Tabla 75. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al Magdalena - Q Agua Sucia y otros 131
Tabla 76. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al Magdalena - Q Guayabal y otros 131
Tabla 77. Índices de sostenibilidad hídrica – quebrada Eneal 131

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Red hidrográfica y climatológica de la cuenca hidrográfica del río Luisa y otros directos al Magdalena 12
Figura 2. Poligonos de Thiessen para la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena 17
Figura 3. Precipitación media anual de la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena 20
Figura 4. Precipitación media mensual para el primer semestre del año de la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena 21
Figura 5. Precipitación media mensual para el segundo semestre del año de la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena 22
Figura 6. Ciclo anual de la precipitación media mensual (mm), periodo 1986-2014, para 15 estaciones de medición de lluvia, en la cuenca del rìo Luisa y directos al Magdalena: (A) Riomanso; (B) Guamo; (C) Carmen De Apicala; (D) Apto Santiago Vila; (E) Buenos Aires; (F) El Palmar; (G) Valle De San Juan ; (H) Suarez; (I) Hda Maporita; (J) Las Dos Aguas; (K) Chicoral; (L) La Resaca; (M) Palogrande; (N) Rovira; (Ñ) Hda La Lorena 23
Figura 7. Variabilidad anual de la precipitación (mm), en el periodo 1986-2014, para las estaciones con influencia en la cuenca del Rìo Luisa y direectos al Magdalena 24
Figura 8. Variabilidad interanual de la precipitación (mm), en el periodo 1986-2014, para las estaciones con influencia en la cuenca del rìo Luisa y directos al Magdalena 25
Figura 9. Relación temperatura (°C) y altura sobre el nivel del mar 27
Figura 10. Temperatura media anual de la cuenca hidrografica del rìo Luisa y directos al Magdalena 30

Figura 11. Temperatura media mensual para el primer semestre del año de la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena 31
Figura 12. Temperatura media mensual para el segundo semestre del año de la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena 32
Figura 13. Variabilidad anual de la temperatura (°C), en el periodo 1986-2015, para las estaciones con influencia en la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena 33
Figura 14. Bocatoma del acueducto del municipio de Rovira 35
Figura 15. Bocatoma del acueducto del municipio De Valle De San Juan 35
Figura 16. Bocatoma de acueducto municipal de San Luis 36
Figura 17. Bocatoma hidroeléctrica Enerlim 37
Figura 18. Bocatoma usocoello sobre el río Coello 39
Figura 19. Bocatoma usocoello sobre el rio Cucuana 39
Figura 20. Bocatoma de usoguamo sobre el río Luisa 40
Figura 21. Bocatoma de canal Torres 41
Figura 22. Predio La Esperanza. municipio de Guamo 41
Figura 23. Predio Los Chorros. municipio de Guamo 42
Figura 24. Trasvases sobre el río Luisa y directos al Magdalena 43
Figura 25. Sistemas lenticos cuenca del río Luisa y otros directos al Magdalena 45
Figura 26. Carga de lavado – sedimentos en suspensión 46
Figura 27. Carga del lecho – sedimentos de fondo 47
Figura 28. Flujo oferta hídrica superficial 54
Figura 29. Conceptualización vertical del modelo hidrológico de tanques agregado 58
Figura 30. Serie de caudales simulados durante el periodo de calibración para la estación hidrológica La Nueva (1986 – 2004) 65
Figura 31. Curva de duración de caudales – periodo de calibración del río Luisa y directos al Magdalena, estación Cucunuba (1986 -2004) 66
Figura 32. Serie de caudales simulados durante el periodo de validación para la estación hidrológica Cucunuba (2005 – 2014) 67
Figura 33. Curva de duración de caudales – periodo de validación del río Luisa, estación Cucunuba (2005 -2014) 68
Figura 34. Serie de caudales simulados durante el periodo de validación total para la estación hidrológica Cucunuba (1986 – 2014) 68
Figura 35. Curva de duración de caudales – periodo de validación del rio Luisa, estación Cucunuba (1986 -2014) 68
Figura 36. Caudales multianuales de la cuenca del río Luisa y otros directos al Magdalena 72
Figura 37. Rendimiento anual cuenca del río Luisa y directos al Magdalena 74
Figura 38. Rendimiento primer semestre cuenca del río Luisa y directos al Magdalena .. 75
Figura 39. Rendimiento segundo semestre cuenca del río Luisa y directos al Magdalena 76
Figura 40. Río Luisa – estación limnigráfica Pavo Real. Frecuencia de caudales máximos anuales 95
Figura 41. Río Luisa – estación limnigráfica Pavo Real. - Frecuencia de caudales mínimos anuales 98
Figura 42. Escorrentía media anual – condicion climatica normal cuenca río Luisa y otros directos al Magdalena 102
Figura 43. Escorrentía media anual – condicion climatica seca cuenca río Luisa y otros directos al Magdalena 104
Figura 44. Demanda y usuarios consesionados en la subzona hidrografica del río Luisa y otros directos al Magdalena 115

Figura 45. Mapa índice de retención y regulación hídrica – año normal cuenca río Luisa y directos al Magdalena..... 118
Figura 46. Mapa índice de retención y regulación hídrica – año normal con trasvases cuenca río Luisa y directos al Magdalena 119
Figura 47. Mapa índice de retención y regulación hídrica – año seco cuenca río Luisa y directos al Magdalena..... 120
Figura 48. Índice de uso del agua – año normal cuenca río Luisa y directos al Magdalena 122
Figura 49. Índice de uso del agua – año normal con trasvases cuenca río Luisa y directos al Magdalena 123
Figura 50. Índice de uso del agua – año seco cuenca río Luisa y directos al Magdalena 124
Figura 51. Índice de vulnerabilidad – cuenca río Luisa y directos al Magdalena 126

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Listado de concesiones - Digital
Anexo 2. Curvas de duración - Digital
Anexo 3. Caudales máximos y mínimos - Digital
Anexo 4. Mapas - Digital

1 INTRODUCCIÓN

El componente hidrológico es una de las principales bases en la ordenación del territorio, ya que el recurso hídrico es el aspecto determinante en el desarrollo de las actividades socioeconómicas y en las diversas dinámicas naturales, así como en el equilibrio de los diversos sistemas inmersos en un territorio dado.

En el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Luisa y Otros Directos al Magdalena, se busca analizar los componentes de forma, cantidad, disponibilidad, oferta y demás aspectos básicos del recurso hídrico, así como la caracterización de la red de drenaje presente en la cuenca y las condiciones climáticas de la misma. Para esto, el POMCA analiza los cuatro componentes principales en el estudio hidrológico de un territorio, los cuales son: la morfometría, climatología, hidrografía e hidrología.

Con el propósito de poder desarrollar estos componentes, fue necesario recurrir a la información que surge de las mediciones de las estaciones hidrometeorológicas disponibles en el área de la cuenca y aledañas, en este caso, estaciones bajo el manejo del IDEAM, que registran la información que será sometida a análisis y depuración para realizar los estudios requeridos.

2 METODOLOGÍA, DESCRIPCIÓN Y EVALUACIÓN DE LA RED DE ESTACIONES HIDROLÓGICAS EN LA CUENCA

La metodología utilizada para realizar la elaboración, el desarrollo y la presentación de las actividades mencionadas anteriormente, sigue las directrices y pautas contenidas en el Plan de Trabajo presentado ante la Corporación.

Para el desarrollo de los trabajos se están siguiendo las siguientes guías técnicas:

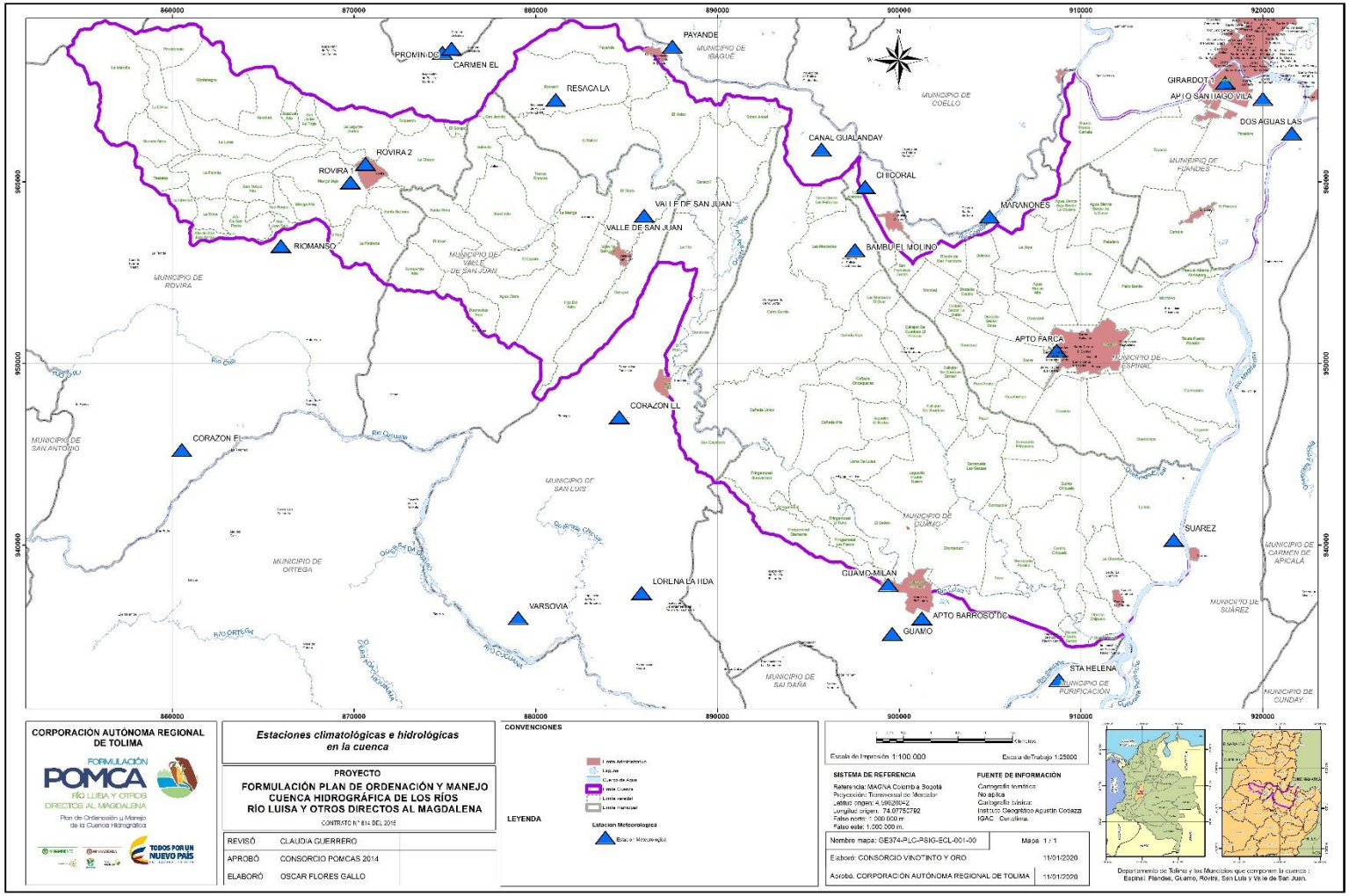
- Guía de prácticas Hidrológicas, Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones, OMM-No 168, 1994.
- Resolución 337 de 1978. Jerarquía de Cuencas Hidrográficas. Zonificación y codificación de Cuencas Hidrográficas del IDEAM, 2014.

Para el presente estudio, fueron analizadas las estaciones climatológicas, pluviométricas e hidrométricas disponibles en la zona de la cuenca del río Luisa y áreas aledañas. Estas estaciones se encuentran ubicadas en el departamento de Tolima. A su vez, se tuvo en cuenta la información secundaria revisada y evaluada durante la fase de Aprestamiento.

2.1 ESTACIONES MEDIDORAS DE PRECIPITACIÓN

La red que cubre la cuenca del río Luisa y Directos al Magdalena es considerada como una “red regional”, pues su objetivo es obtener la información necesaria para administrar el recurso hídrico y caracterizar sus condiciones climáticas. Sin embargo, se puede considerar que el IDEAM es el único operador que tiene a su cargo las actividades de operación, mantenimiento y proceso de la información. En la Figura 1 se muestra “El mapa de la red hidrográfica y climatológica de la cuenca del rio Luisa y Directos al Magdalena, donde aparecen 17 estaciones, entre hidrológicas y climatológicas, ubicadas dentro de la cuenca hidrográfica objeto de estudio. De estas estaciones se seleccionaron las que tuvieran un record histórico de más de 20 años de información.

Figura 1. Red hidrográfica y climatológica de la cuenca hidrográfica del río Luisa y otros directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019
Ver digital L:\Luisa_Directos_Magdalena\5. DOCUMENTOS CARTOGRAFICOS\6_Otros_Insumos\3_Mxd_Auxiliares\Clima\GE374-PLC-PSIG-ECL-001-00

Tabla 1. Estaciones climatológicas e hidrológicas seleccionadas en la cuenca del río Luisa y otros directos al Magdalena

Código	Nombre	Elevación	Categoría	Municipio	Corriente	Latitud	Longitud
22075030	Riomanso	2053	CO	Rovira	Manso	4,206	-75,415
21185030	Guamo	324	CP	Guamo	Luisa	4,008	-74,981
21190290	Carmen De Apicala	321	PM	Carmen De Apicala	Sumapaz	4,160	-74,713
21185040	Apto Santiago Vila	305	CO	Flandes	Magdalena	4,275	-74,798
21210200	Buenos Aires	728	PM	Ibagué	Coello	4,335	-75,073
21210220	El Palmar	2363	PG	Ibagué	Combeima	4,358	-75,325
21185080	Valle De San Juan	650	CO	Valle De San Juan	Luisa	4,191	-75,112
21180120	Lorena La Hda	384	PM	San Luis	Cucuana	4,029	-75,105
21180160	Suarez	319	PM	Guamo	Cucuana	4,055	-74,840
21170030	Maporita La Dc Hda	311	PM	Suarez	Magdalena	3,947	-74,85
21170020	Dos Aguas Las	273	PM	Suarez	Magdalena	4,258	-74,783
21215080	Chicoral	432	CO	Espinal	Coello	4,231	-74,995
21210190	Resaca La	1180	PG	San Luis	Luisa	4,274	-75,148
21210170	Palogrande Hda	2212	PM	Ibagué	Cocora	4,351	-75,401
21180040	Rovira 2	940	PM	Rovira	Luisa	4,242	-75,242

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

2.2 ESTACIONES MEDIDORAS DE CAUDAL

Para el análisis hidrológico de la cuenca, se seleccionaron 2 estaciones limnigráficas, que registran de manera continua los niveles del cauce. Por medio de la información de caudales a escala diaria, se estimaron los caudales característicos de la cuenca. En la Tabla 2 se presenta las características de las estaciones en la zona.

Tabla 2. Caracterización y localización geográfica de la red hidrométrica en la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena

Código	TE	Nombre De Estación	Corriente	DPTO	Parámetros Medidos	Municipio	Coordenadas		Información Disponible En	Estado
							Latitud (N)	Longitud (W)		
21187030	LG	CUCUNUBÁ	LUISA	TOLIMA	20, 21, 22	VALLE DE SAN JUAN	4.232	75.126	IDEAM	ACT
21187020	LG	PAVO REAL	LUISA	TOLIMA	20, 21, 22	VALLE DE SAN JUAN	4.223	75.198	IDEAM	ACT

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM 2015

3 TRATAMIENTO DE DATOS HIDROLÓGICOS

Se realizó inicialmente una revisión documental de las series meteorológicas e hidrológicas de las estaciones que operan el IDEAM y CORTOLIMA, ubicadas dentro del departamento del Tolima. Se seleccionaron 15 estaciones pluviométricas y climatológicas.

En la revisión de las series históricas de datos se encontraron estaciones con datos diarios faltantes de precipitación, es decir series incompletas. Por tanto, el proceso a seguir fue el de realizar correlaciones múltiples con el fin de hallar analogías entre pares de estaciones con las cuales se pudieran completar, entre sí, los datos faltantes. El periodo considerado, para la homogeneización de las series, fue el periodo comprendido entre 1986 y 2014. En cuanto a la red de estaciones hidrométricas, son muy pocas las que se encuentran instaladas en esta cuenca, por tanto, se optó por generar las series de caudales diarios a través del modelo hidrológico de Tanques Agregado.

3.1 CALCULO DE DATOS FALTANTE

Para el cálculo y generación de los datos faltantes de precipitación, se utilizó la metodología de razones promedio; esta metodología es recomendada por la UNESCO en 1982 para cuencas montañosas en su “Guía Metodológica para la Elaboración de Balances Hídricos en América del Sur”. A partir de este concepto se calculan los datos faltantes utilizando la siguiente formula:

$$Px = \frac{Px*}{N}\left\{\frac{PA}{PA*} + \frac{PB}{PB*} \dots\dots + \frac{PN}{PN*}\right. \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde; PA*, PB*, PN* y PX* son el promedio de las precipitaciones anuales registradas en un período común para las N estaciones y PA, PB…PN es la precipitación en las N estaciones durante el período que falta en X.

3.2 POLÍGONOS DE THIESSEN

Los polígonos de Thiessen son uno de los métodos de interpolación más simples, basado en la distancia euclidiana, siendo especialmente apropiada cuando los datos son cualitativos; se crean al unir los puntos entre sí, trazando las mediatrices de los segmentos de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control, de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante a los puntos vecinos y designando su área de influencia.

Para poder aplicar este método es necesario conocer la localización de las estaciones dentro de la zona de estudio, ya que para su aplicación se requiere determinar la zona de influencia de cada una de ellas.

En síntesis, el método de basa en asignar cada punto de la cuenca a la estación más próxima; se deben unir las estaciones de dos en dos y dibujar las mediatrices de estos segmentos, asignando a cada estación su área.

Este proceso es facilitado por el uso del programa ArcGIS 10.5 ya que este realiza los polígonos por medio de sus propios comandos. En la Figura 2 se puede observar el mapa

de las áreas de influencia de las estaciones en la cuenca del río Luisa y Directos al Magdalena.

En la Tabla 3 se pueden observar los porcentajes de las áreas de influencia obtenidos, mediante el método de polígonos de Thiessen de las estaciones localizadas en la cuenca del río Luisa y Directos al Magdalena.

3.3 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

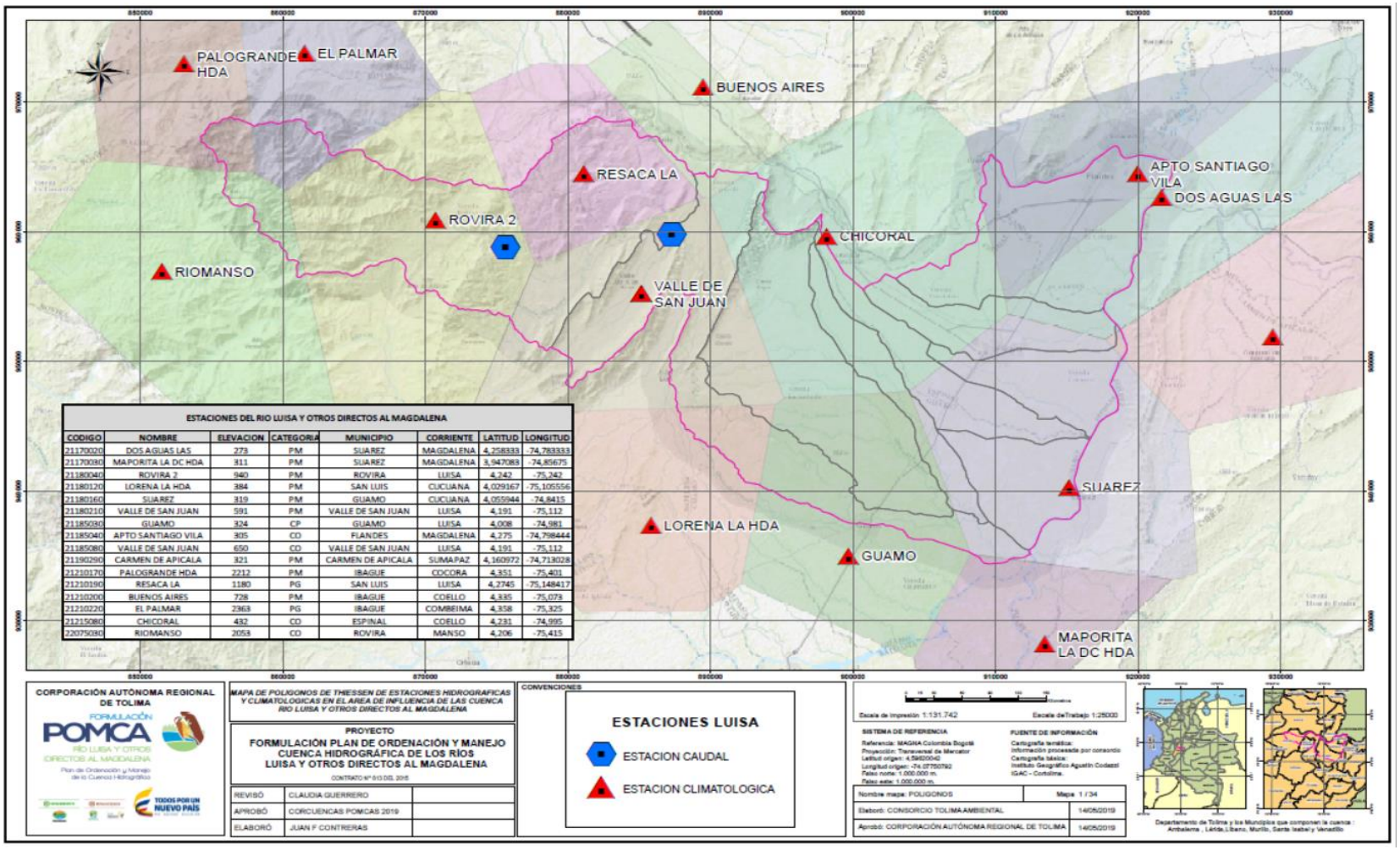
La determinación de la precipitación promedio de la cuenca hidrográfica del río Luisa y Directos al Magdalena se realizó a partir de los registros históricos de una serie de datos de 30 años provenientes de las estaciones climatológicas con influencia en la cuenca; el procedimiento anterior es de suma importancia en la cuantificación de la disponibilidad hídrica de la cuenca.

El comportamiento temporal de la precipitación en la cuenca se realizó a partir del análisis de los registros diarios multianuales históricos de las estaciones referenciadas en la Tabla 4, para el periodo 1986-2014, operadas por el IDEAM; la cuenca hidrográfica presenta una precipitación media anual de 1.580,26 mm, donde las lluvias se distribuyen a lo largo del año, presentando dos épocas de mayor precipitación; la primera corresponde a los meses de marzo, abril y mayo; y la segunda en los meses de septiembre, octubre y noviembre, de igual manera presenta dos épocas de verano, la primera corresponde a los meses de diciembre, enero y febrero, la segunda a los meses de junio, julio y agosto.

La Figura 3 presenta la distribución espacial de la precipitación media anual en el periodo comprendido entre 1986 - 2014, para la cuenca hidrográfica del río Luisa y Directos al magdalena; se destaca la existencia de una variabilidad en el comportamiento de la lluvia, con valores de precipitación que oscilan entre los 1.918,09 mm, en la zona nororiental de la cuenca, en la parte alta de las cuencas las quebradas Santa Rosa y la Honda, y los 1.184 mm al año, en la desembocadura del río Luisa sobre el río Magdalena.

La Figura 6, se presenta el comportamiento general del ciclo anual de la precipitación, para las 15 estaciones de medición de lluvia que influyen sobre la cuenca hidrográfica del río Luisa y Directos al Magdalena, con resolución mensual (máximo, mínimo y medio), disponibles en la zona de estudio; la distribución de la precipitación en la cuenca registra periodos de lluvia que comienzan a aumentar en el mes de marzo hasta alcanzar los máximos valores entre los meses de abril y mayo; a partir de mayo comienza de nuevo a descender hasta los meses de julio – agosto donde se presentan los menores valores de precipitación en el año coincidiendo con el periodo de menores lluvias de la zona. A partir de septiembre la precipitación inicia su ascenso hasta alcanzar su valor máximo entre los meses de octubre - noviembre, donde se aprecian los mayores valores de lluvia en toda la cuenca y durante todo el año, mostrando un comportamiento bimodal bien marcado.

Figura 2. Poligonos de Thiessen para la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

La información de la tabla de estaciones del río Luisa y Otros directos al Magdalena, se presenta en la tabla 3.

Tabla 3. Áreas de influencia de las estaciones mediante el método de polígonos de Thiessen

CÓDIGO	NOMBRE	ELEVACIÓN	MUNICIPIO	KM	% ÁREA
22075030	RIOMANSO	2053	ROVIRA	17,8217	1,6477
21185030	GUAMO	324	GUAMO	114,235	10,5622
21190290	CARMEN DE APICALA	321	CARMEN DE APICALA	1,6649	0,1539
21185040	APTO SANTIAGO VILA	305	FLANDES	71,4889	6,6098
21210200	BUENOS AIRES	728	IBAGUE	6,8212	0,6306
21210220	EL PALMAR	2363	IBAGUE	22,0612	2,0397
21185080	VALLE DE SAN JUAN	650	VALLE DE SAN JUAN	165,9487	15,3436
21180120	LORENA LA HDA	384	SAN LUIS	24,2708	2,2440
21180160	SUAREZ	319	GUAMO	179,7621	16,6208
21170030	MAPORITA LA DC HDA	311	SUAREZ	0,8648	0,0799
21170020	DOS AGUAS LAS	273	SUAREZ	53,7465	4,9694
21215080	CHICORAL	432	ESPINAL	185,6076	17,1612
21210190	RESACA LA	1180	SAN LUIS	87,1438	8,0573
21210170	PALOGRANDE HDA	2212	IBAGUE	11,5333	1,0663
21180040	ROVIRA 2	940	ROVIRA	138,5769	12,8128

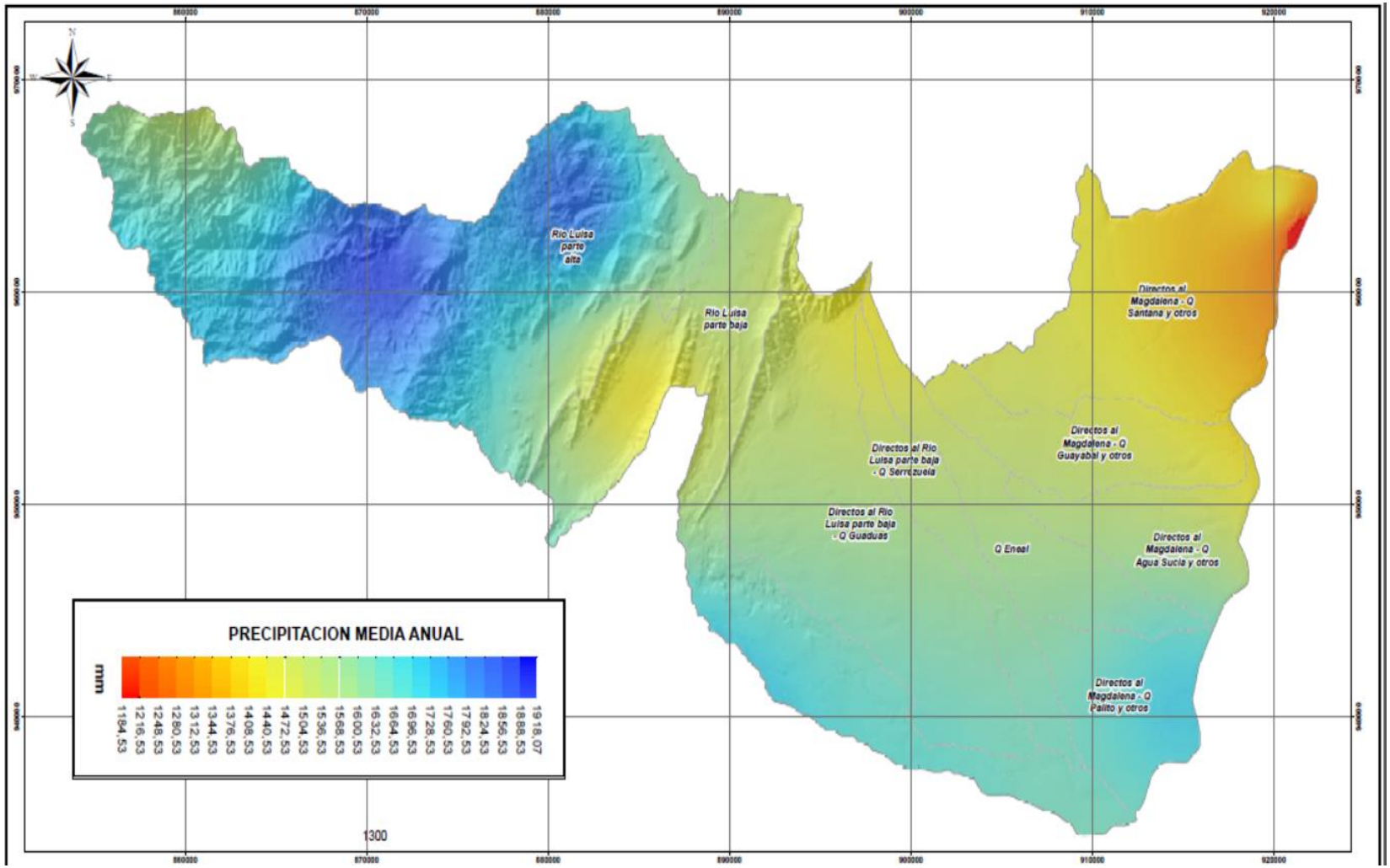
Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 4. Valores de precipitación media mensual (mm), periodo 1986-2014, para las estaciones con influencia sobre la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena

Estaciones	Código	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOVI	DIC	Anual
Las Dos Aguas	21170020	57,59	82,04	120,18	185,89	142,80	71,29	38,31	41,45	117,06	147,73	100,56	82,18	1187,09
Dc Hd Maporita	21170030	99,25	114,66	155,11	205,96	191,69	105,74	52,62	53,05	119,50	216,95	175,44	128,32	1618,31
Carmen de Apicala	21190290	56,15	80,56	126,63	182,37	144,57	62,99	36,68	42,22	111,11	154,60	104,40	82,25	1184,52
Hda Lorena	21180120	120,72	125,14	186,50	262,15	221,63	109,70	55,24	55,11	132,78	233,22	237,90	177,99	1918,09
Suarez	21180160	96,74	93,26	149,33	287,77	223,32	87,62	51,64	55,56	116,97	210,41	210,81	133,54	1716,98
Guamo	21185030	101,45	109,81	144,20	235,62	209,83	104,35	64,65	57,87	130,91	203,71	186,52	125,77	1674,69
Apto Santiago Vila	21185040	85,19	92,48	114,22	212,89	178,65	83,27	50,98	45,96	117,44	162,75	164,02	118,73	1426,58
Chicoral	21215080	62,63	88,46	146,07	231,88	182,28	92,02	61,56	51,66	117,41	169,18	132,13	90,87	1426,14
La Resaca	21210190	92,75	121,78	151,88	290,97	221,39	115,14	78,15	71,71	145,83	223,56	185,29	131,12	1829,59
Buenos Aires	21210200	66,01	80,75	132,18	242,75	198,91	103,93	65,81	59,74	142,25	193,22	136,69	84,65	1506,90
Valle de San Juan	21185080	81,00	87,79	142,89	242,66	200,07	92,82	55,54	56,90	115,45	189,70	157,70	102,81	1525,33
El Palmar	21210220	47,92	62,75	99,35	151,00	160,57	133,04	100,87	108,60	136,94	138,38	111,60	64,26	1315,27
Rovira 2	21180040	108,34	120,72	176,99	239,03	223,08	124,35	74,18	80,86	163,52	223,82	217,68	129,16	1881,73
Riomanso	22075030	99,62	124,47	170,10	218,55	203,74	147,39	120,49	104,88	160,05	188,61	183,65	128,94	1850,48
Hda Palogrande	21210170	70,21	94,22	153,03	210,66	201,83	136,93	113,83	109,78	144,95	169,93	148,20	88,62	1642,20

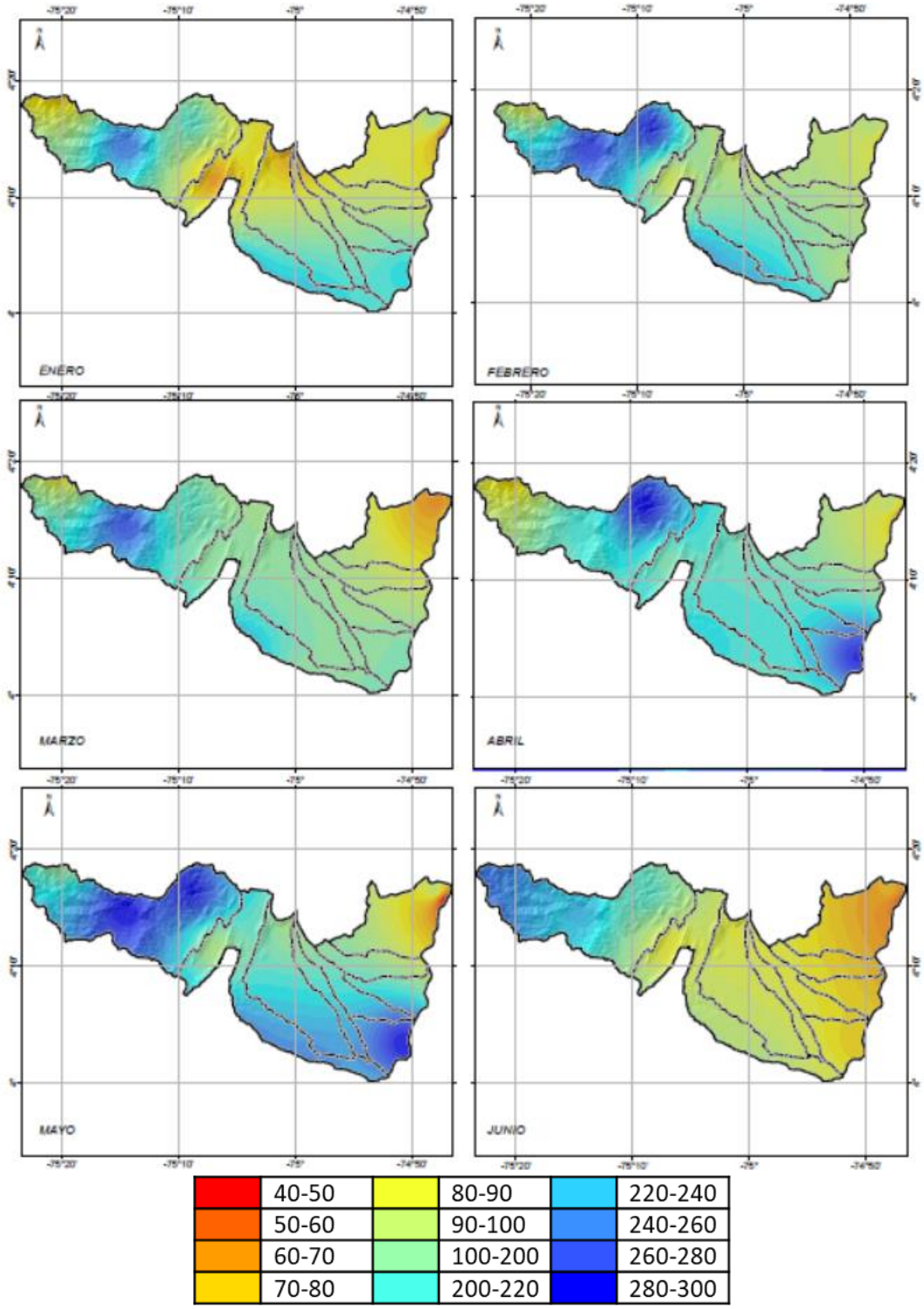
Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Figura 3. Precipitación media anual de la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena



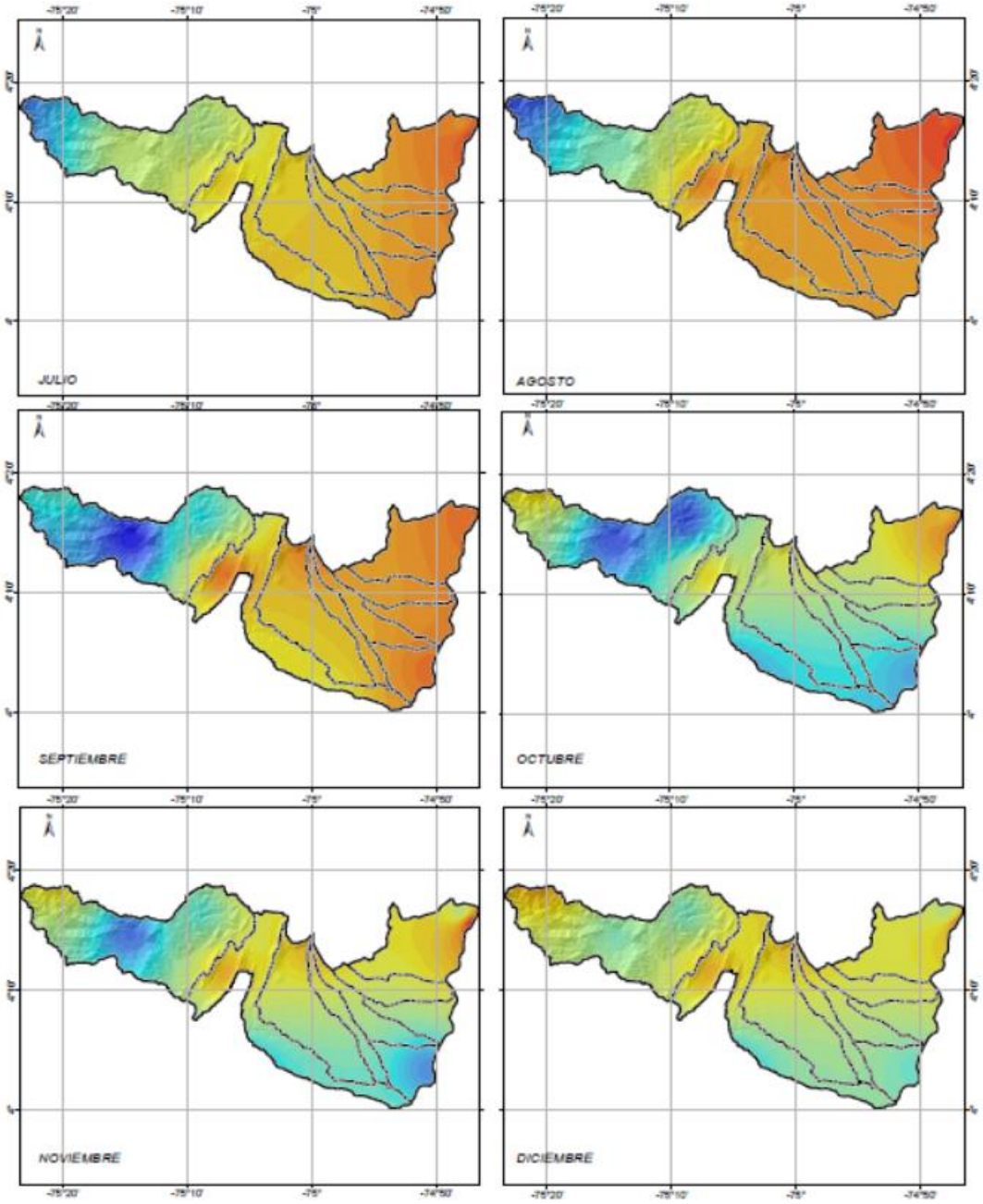
Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Figura 4. Precipitación media mensual para el primer semestre del año de la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Figura 5. Precipitación media mensual para el segundo semestre del año de la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena



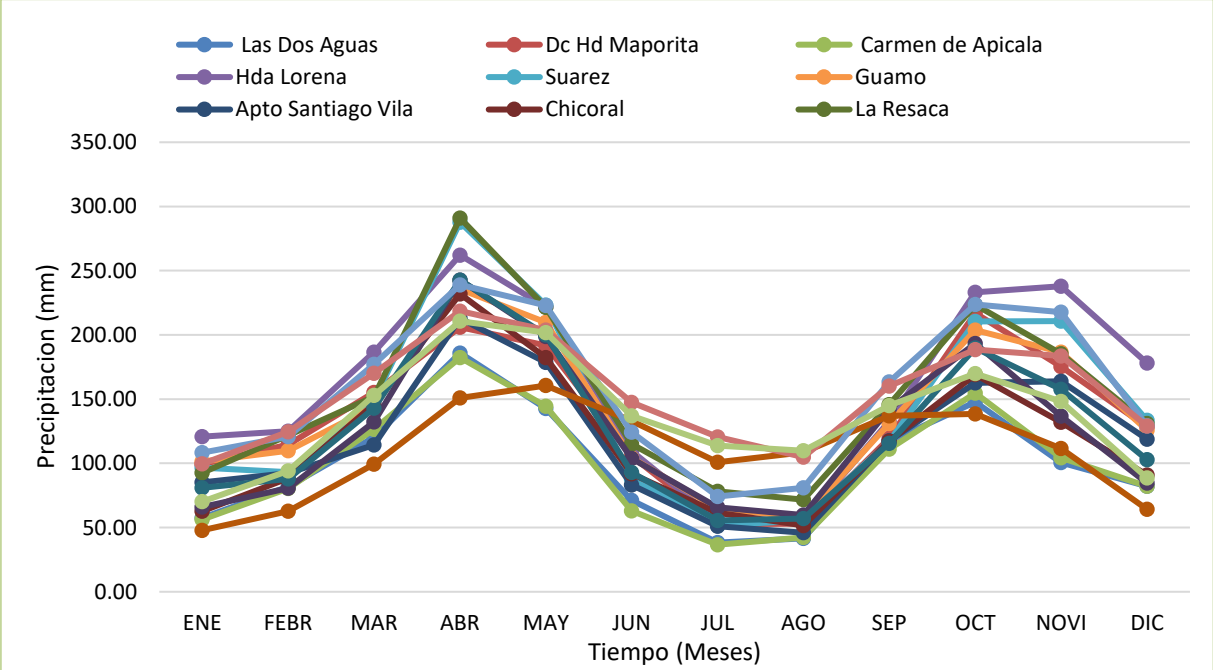
Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Figura 6. Ciclo anual de la precipitación media mensual (mm), periodo 1986-2014, para 15 estaciones de medición de lluvia, en la cuenca del rìo Luisa y directos al Magdalena: (A) Riomanso; (B) Guamo; (c) Carmen de Apicala; (D) Apto Santiago Vila; (E) Buenos Aires; (F) El Palmar; (G) Valle de San Juan ; (H) Suarez; (I) Hda Maporita; (J) Las Dos Aguas; (k) Chicoral; (L) La Resaca; (M) Palogrande; (N) Rovira; (Ñ) Hda La Lorena

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

La Figura 7, muestra la variabilidad anual de la precipitación para las estaciones con influencia en la cuenca del río Luisa y Directos al Magdalena, para el periodo 1986-2014; además de la alta variabilidad anual de la precipitación, se distingue claramente, un comportamiento bimodal de la precipitación media a lo largo del año, en todas las estaciones analizadas, en donde se muestra la ocurrencia de dos periodos de bajas precipitaciones (Periodo seco) y dos periodos de húmedos (de altas precipitaciones). Los periodos de bajas precipitaciones (llamados periodos secos), ocurre entre los meses de diciembre - febrero y entre los meses de junio-agosto; los periodos lluviosos (máximas precipitaciones), ocurre entre los meses de marzo a mayo, con un pico en el mes de abril, la segunda temporada de lluvias, se presenta entre los meses de septiembre y noviembre, con un pico máximo en el mes de octubre.

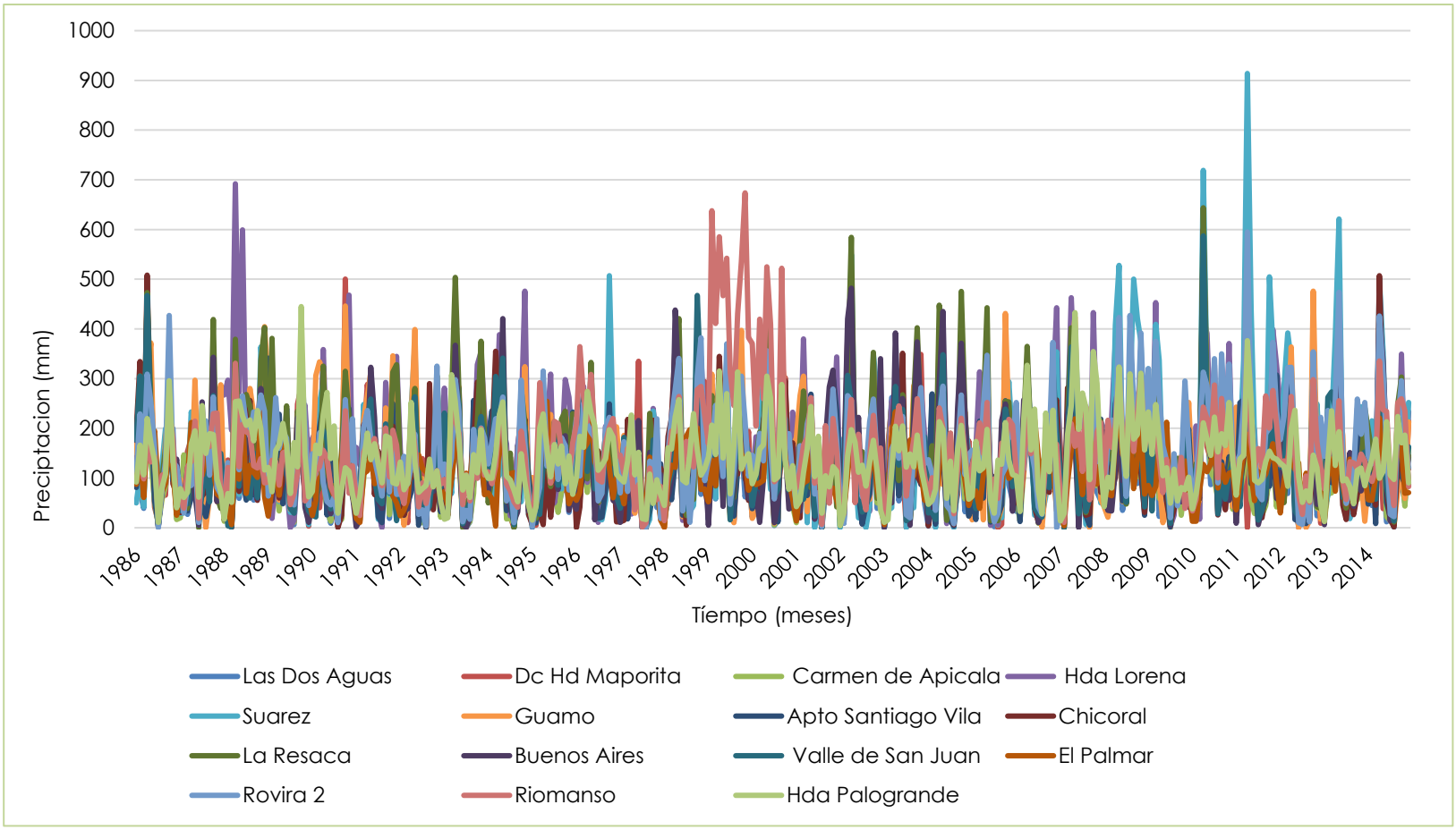
Figura 7. Variabilidad anual de la precipitación (mm), en el periodo 1986-2014, para las estaciones con influencia en la cuenca del rìo Luisa y directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

En cuanto a la variación interanual de la precipitación para el periodo1985-2015 la variabilidad temporal de los datos presenta una correspondencia en años secos y húmedos de la cuenca hidrográfica; finalmente, los valores de precipitación mensual para las 11 unidades hidrológicas que conforman la cuenca hidrográfica del rìo Luisa y Directos al Magdalena son presentados en la Tabla 5.

Figura 8. Variabilidad interanual de la precipitación (mm), en el periodo 1986-2014, para las estaciones con influencia en la cuenca del rìo Luisa y directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 5. Precipitación media mensual (mm) y total (mm), en el periodo 1986-2014, para las 9 unidades hidrológicas que conforman la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena

Unidad Hidrográfica	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Rio Luisa parte alta	81,40	102,23	148,50	220,35	206,48	134,48	97,10	97,79	149,46	184,88	166,49	105,90	1695,06
Directos al Magdalena - Q Palito y otros	96,03	95,55	151,43	286,05	221,08	89,19	53,86	56,77	110,98	216,93	207,99	136,78	1722,63
Directos al Rio Luisa parte baja - Q Guaduas	83,70	100,93	147,75	232,17	201,01	101,19	64,06	56,83	122,07	188,18	161,00	113,84	1572,72
Directos al Rio Luisa parte baja - Q Serrezuela	79,46	96,68	149,62	245,45	200,63	95,96	61,36	55,13	117,32	187,51	163,14	113,66	1565,93
Rio Luisa parte baja	90,72	100,45	151,01	241,12	209,57	102,01	60,49	57,97	120,76	199,27	176,42	123,91	1633,69
Directos al Magdalena - Q Santana y otros	72,91	91,99	123,12	208,03	168,54	85,19	51,31	45,59	115,86	159,29	135,60	107,47	1364,88
Directos al Magdalena - Q Agua Sucia y otros	93,75	95,18	150,63	281,04	217,75	88,90	53,85	56,25	111,26	213,35	202,31	133,89	1698,14
Directos al Magdalena - Q Guayabal y otros	72,98	92,22	143,52	236,98	188,48	89,40	55,33	51,65	114,99	178,60	149,64	107,33	1481,12
Q Eneal	82,35	94,29	150,67	260,76	206,37	92,33	58,02	55,09	113,54	195,04	175,78	119,53	1603,77

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

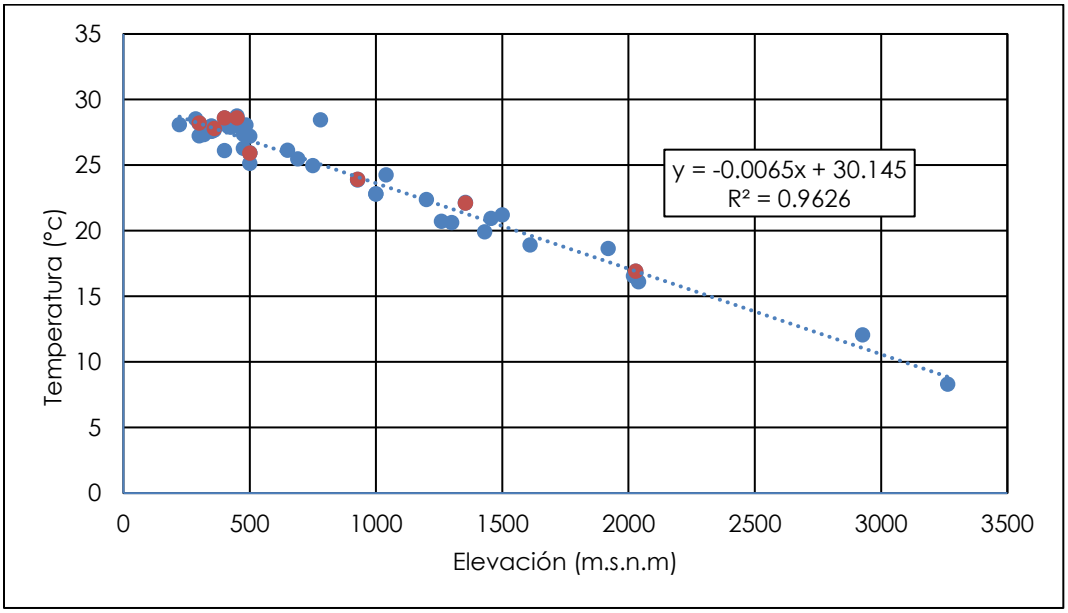
3.4 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA TEMPERATURA

El análisis del comportamiento temporal y espacial de la temperatura media y máxima, se realizó a partir de la información disponible y registrada en las estaciones climatológicas localizadas en la cuenca y en su área de influencia. Debido a la falta de estaciones climatológicas y de registros de temperatura en el área de estudio, el análisis del comportamiento temporal y espacial de las temperaturas se realizó a partir de la relación existente entre la altura y la temperatura.

El comportamiento de la temperatura a lo largo de la cuenca está determinada por la relación existente entre la temperatura y la altura sobre el nivel del mar, en donde la temperatura disminuye en la medida que aumenta la altura en una relación de 0,65 °C por cada 100 metros de altura; el denominado gradiente de temperatura estimado a partir de ecuaciones que relacionan la altitud con la temperatura anual (Figura 9), toma como referencia los registros de las estaciones climatológicas de la cuenca, obteniéndose para la cuenca hidrográfica del río Luisa y Directos al Magdalena en una correlación de 0,96, ajustado a la siguiente ecuación:

$$y = -0{,}0065x + 30{,}145$$

Figura 9. Relación temperatura (°C) y altura sobre el nivel del mar



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Así mismo, para cada mes se determinó la relación de temperatura vs altura sobre el nivel del mar como se observa en la Tabla 6.

Tabla 6. Ecuaciones mensuales de relación entre temperatura y altura sobre el nivel del mar para la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
y = -0,0067x + 30,335	y = -0,0066x + 30,376	y = -0,0065x + 30,28	y = -0,0062x + 29,733	y = -0,0062x + 29,872	y = -0,0064x + 30,296
R^2 = 0,9598	R^2 = 0,9596	R^2 = 0,959	R^2 = 0,9657	R^2 = 0,9711	R^2 = 0,9612
JUL	**AGO**	**SEP**	**OCT**	**NOV**	**DIC**
y = -0,0069x + 31,241	y = -0,0072x + 31,896	y = -0,007x + 31,42	y = -0,0065x + 30,028	y = -0,0063x + 29,467	y = -0,0064x + 29,814
R^2 = 0,9604	R^2 = 0,9623	R^2 = 0,9641	R^2 = 0,9707	R^2 = 0,9715	R^2 = 0,9641

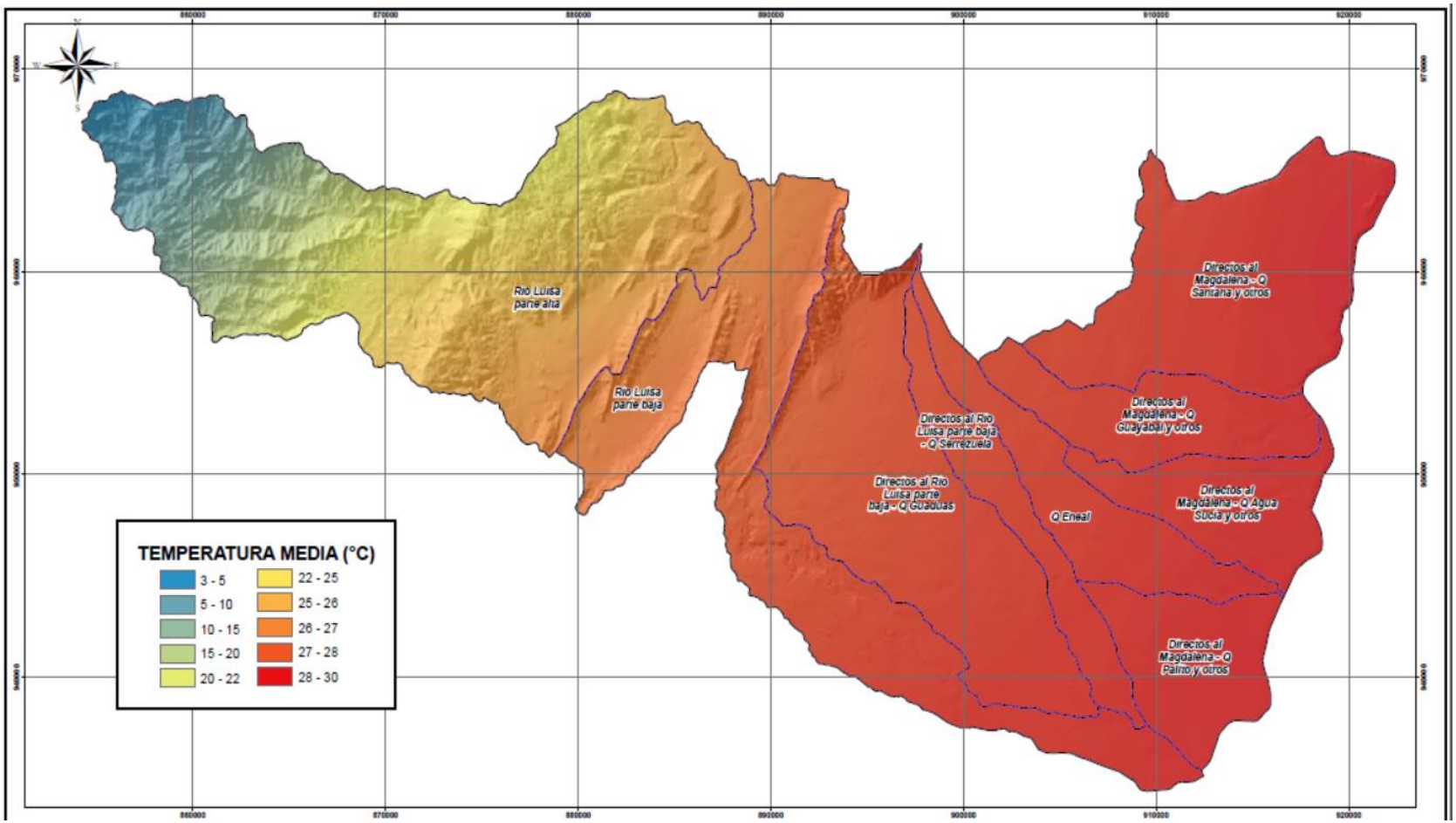
Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 7. Valores de temperatura media mensual (°C), periodo 1986-2014, para la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena

ESTACIONES	CODIGO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Las Dos Aguas	21170020	28,48	28,57	28,51	28,04	28,18	28,55	29,36	29,93	29,51	28,25	27,75	28,07	28,60
Dc Hd Maporita	21170030	28,22	28,32	28,26	27,80	27,94	28,31	29,10	29,66	29,24	28,01	27,51	27,82	28,35
Rovira 2	21180040	23,94	24,17	24,17	23,91	24,04	24,28	24,76	25,13	24,84	23,92	23,55	23,80	24,21
Hda Lorena	21180120	27,72	27,84	27,78	27,35	27,49	27,84	28,59	29,13	28,73	27,53	27,05	27,36	27,87
Suarez	21180160	28,30	28,40	28,33	27,87	28,01	28,38	29,17	29,74	29,32	28,08	27,58	27,89	28,42
Guamo	21185030	28,13	28,24	28,17	27,72	27,86	28,22	29,01	29,56	29,15	27,92	27,43	27,74	28,26
Apto Santiago Vila	21185040	28,26	28,36	28,30	27,84	27,98	28,34	29,14	29,70	29,29	28,05	27,55	27,86	28,39
Valle de San Juan	21185080	25,92	26,09	26,06	25,70	25,84	26,14	26,76	27,22	26,87	25,80	25,37	25,65	26,12
Carmen de Apicala	21190290	28,15	28,26	28,19	27,74	27,88	28,24	29,03	29,58	29,17	27,94	27,44	27,76	28,28
Hda Palogrande	21210170	15,29	15,78	15,90	16,02	16,16	16,14	15,98	15,97	15,94	15,65	15,53	15,66	15,83
La Resaca	21210190	22,31	22,59	22,61	22,42	22,56	22,74	23,10	23,40	23,16	22,36	22,03	22,26	22,63
Buenos Aires	21210200	25,38	25,57	25,55	25,22	25,36	25,64	26,22	26,65	26,32	25,30	24,88	25,15	25,60
El Palmar	21210220	14,27	14,78	14,92	15,08	15,22	15,17	14,94	14,88	14,88	14,67	14,58	14,69	14,84
Chicoral	21215080	27,40	27,52	27,47	27,05	27,19	27,53	28,26	28,79	28,40	27,22	26,75	27,05	27,55
Riomanso	22075030	16,37	16,83	16,94	17,00	17,14	17,16	17,08	17,11	17,05	16,68	16,53	16,67	16,88

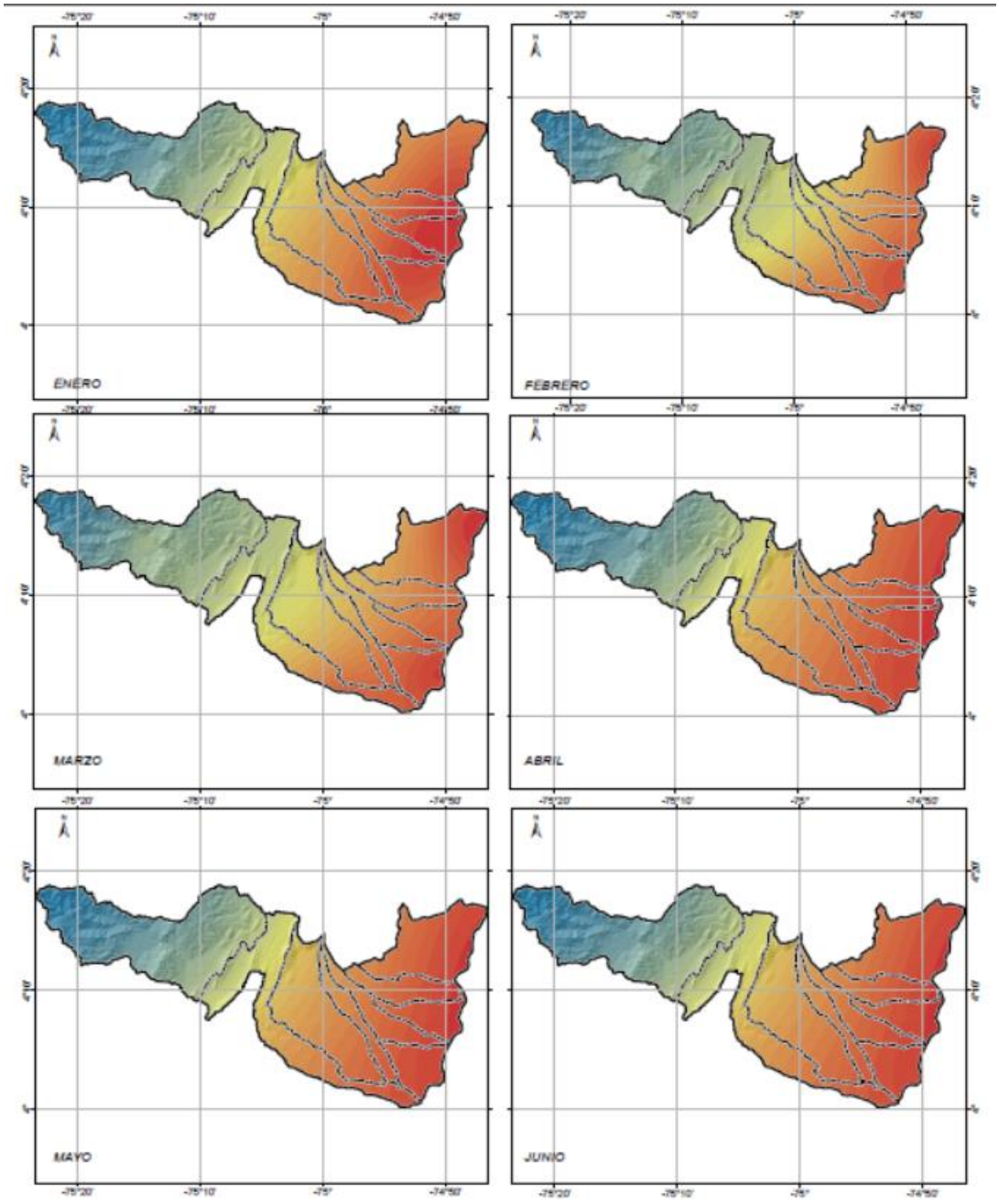
Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Figura 10. Temperatura media anual de la cuenca hidrografica del rìo Luisa y directos al Magdalena



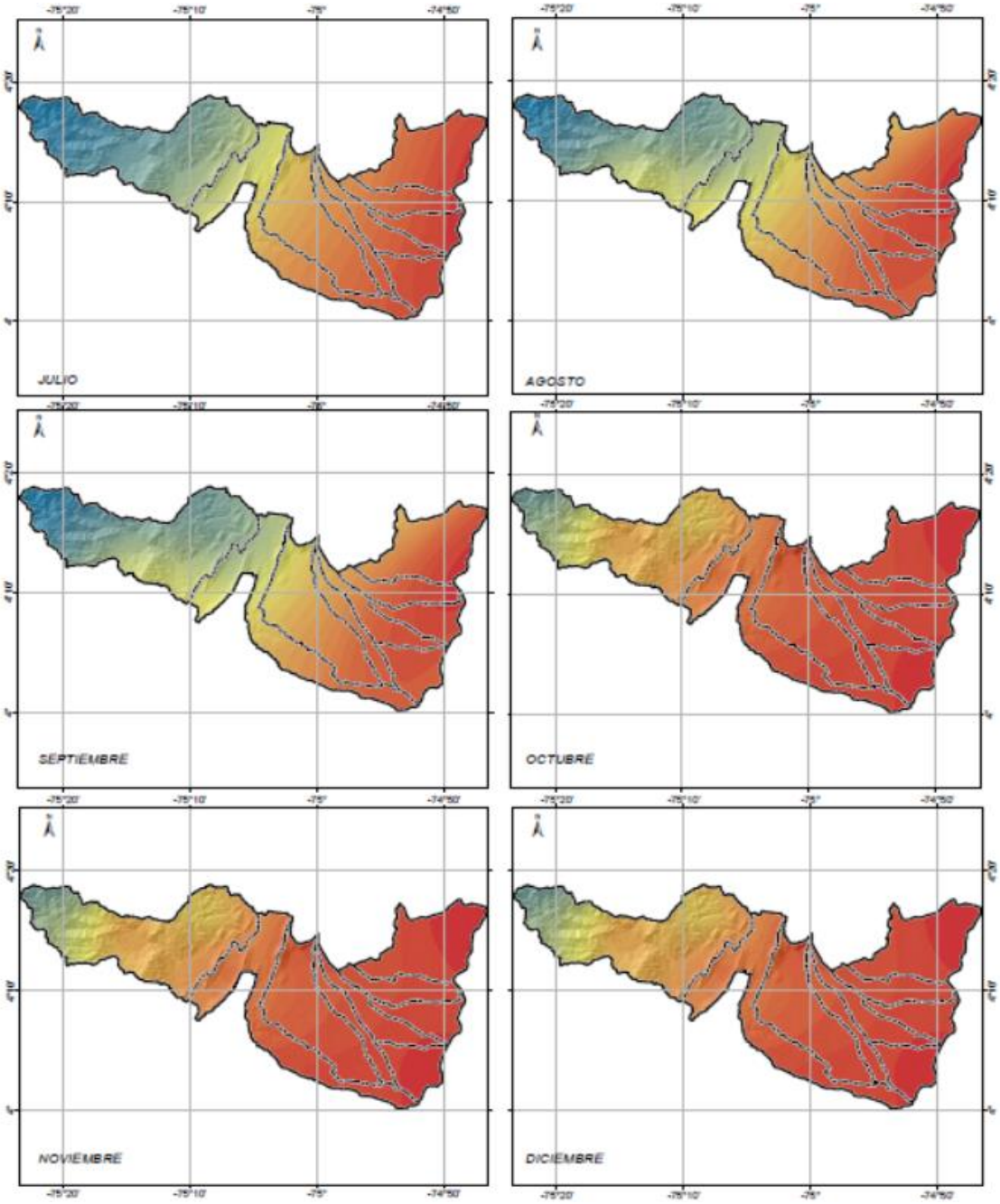
Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Figura 11. Temperatura media mensual para el primer semestre del año de la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

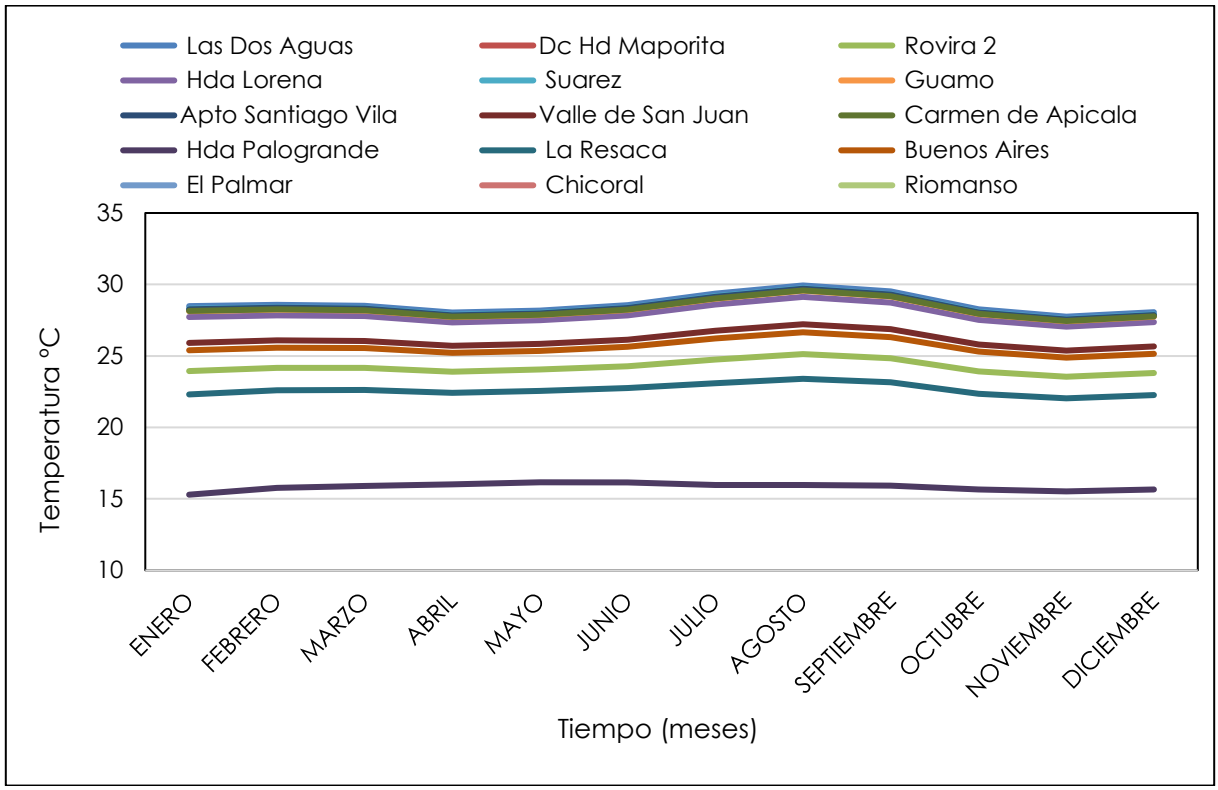
Figura 12. Temperatura media mensual para el segundo semestre del año de la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena



	3-8		17-19
	8-11		19-21
	11-13		21-24
	13-15		24-27
	15-17		27-30

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Figura 13. Variabilidad anual de la temperatura (°C), en el periodo 1986-2015, para las estaciones con influencia en la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

4 INVENTARIO DE INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS

4.1 CONCESIONES REGISTRADAS ANTE CORTOLIMA

Con base en información suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Tolima – CORTOLIMA, se identificaron las concesiones registradas en el maestro de aguas. Ver anexo 1 usuarios concesionados.

4.2 ACUEDUCTOS

Dentro de la cuenca hidrográfica se identificaron las diferentes infraestructuras de acueductos; a continuación, se presenta el inventario de las estructuras más representativas de la cuenca, es decir estructuras de gran captación en la zona de estudio. Cabe resaltar que se realizó una visita de campo a las siguientes estructuras mencionadas.

4.2.1 Acueducto del municipio de Rovira

Este servicio consiste en la captación, tratamiento, almacenamiento y distribución del agua potable para un territorio ya sea urbano o rural. De acuerdo al estudio realizado en el esquema de ordenamiento territorial del municipio de Rovira se estableció que en la zona rural existen 3.699 viviendas rurales, de las cuales 1.653 viviendas es decir el 44,69% cuentan actualmente con el servicio de agua a través de la operación de 53 acueductos rurales; por consiguiente 2.046 viviendas captan el agua de manera individual por medio de mangueras o agua lluvia, es decir, falta el equivalente a un 55,31% por cubrir el servicio de acueducto en términos generales respecto al ámbito rural. Estas circunstancias se deben en razón de varios factores, por un lado la dispersión natural de las viviendas y por el otro a la riqueza hídrica que tiene el municipio de Rovira, donde cada vivienda tiene a su disposición quebradas y riachuelos cercanos donde toman el servicio, lo cual lleva a reflexionar sobre la importancia de plantear y ejecutar una política agresiva en cuanto a manejo, conservación y preservación de las fuentes hídricas y nacimientos existentes que beneficien a la comunidad Rovirense, teniendo en cuenta la geografía montañosa del territorio rural, fenómenos climáticos y la acción antrópica.

La bocatoma del acueducto se encuentra en las coordenadas X: 867676m Y: 962703 m del Río Luisa en el cual se tiene una concesión de agua de 60 Lps, con un grado de afectación de 4,24 % con respecto al total del área de aportación del Río Luisa. En la Figura 14 se muestra las imágenes de dicha estructura.

Figura 14. Bocatoma del acueducto del municipio de Rovira

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, 2017

4.2.2 Acueducto del municipio de Valle De San Juan

El Servicio público domiciliario de acueducto, llamado también servicio público domiciliario de agua potable, es la distribución municipal de agua apta para el consumo humano, incluida su conexión y medición. En el Municipio, la tasa de cobertura en Acueducto en 2011 -2014 fue del 90%; la cobertura en alcantarillado en 2011 - 2014 se ubicó en 97%; la cobertura en aseo para los 4 años objeto de análisis, se instaló en 85%. La bocatoma del acueducto se encuentra en las coordenadas X: 881298m Y: 961428m. De la quebrada la Liga la cual tiene una concesión de agua de 20,5 Lps, con un grado de afectación de 0,95% con respecto al total del área de aportación del Río Luisa. En la Figura 15 se muestra las imágenes de dicha estructura.

Figura 15. Bocatoma del acueducto del municipio de Valle de San Juan

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, 2017

4.2.3 Acueducto del municipio de San Luis

El Servicio público domiciliario de acueducto, llamado también servicio público domiciliario de agua potable, es la distribución municipal de agua apta para el consumo humano, incluida su conexión y medición. En el Municipio, la tasa de cobertura en Acueducto en 2011 -2014 fue del 100%; la cobertura en Alcantarillado en 2011 - 2014 se ubicó en 100%; la cobertura en Aseo para los 4 años objeto de análisis, se instaló en 100%, para la cabecera municipal. La bocatoma del acueducto se encuentra en las coordenadas X: 885993 m Y: 962952 m de la quebrada el Cobre se tiene una concesión de agua de 49 Lps, con un grado de afectación de 5,68% con respecto al total del área de aportación del Río Luisa. En la Figura 16 se muestra las imágenes de dicha estructura.

Figura 16. Bocatoma de acueducto municipal de San Luis

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, 2017

4.2.4 Acueducto del municipio del Guamo

El Servicio público domiciliario de acueducto, llamado también servicio público domiciliario de agua potable, es la distribución municipal de agua apta para el consumo humano, incluida su conexión y medición. En el Municipio, la tasa de cobertura en Acueducto en 2012 fue del 84,1%, para el 2014 no aumento y se sitúo en el 84,1%; la cobertura en Alcantarillado en 2012 fue 82,4%, para 2014 no aumento y se ubicó en 82.4%; la cobertura en Aseo para los 4 años objeto de análisis, se instaló en 67,9%. La bocatoma del acueducto se encuentra en las coordenadas X: 900318m Y: 938047 m del Río Luisa se tiene una concesión de agua de 63,5 Lps, con un grado de afectación de 67,28 % con respecto al total del área de aportación del Río Luisa. Por otro lado, el municipio se abastece también del rio Cucuana con un caudal de 75,06 Lpd.

4.2.5 Acueducto del municipio del Espinal

El Servicio público domiciliario de acueducto, llamado también servicio público domiciliario de agua potable, es la distribución municipal de agua apta para el consumo humano, incluida su conexión y medición. En el Municipio del espinal, la tasa de cobertura en Acueducto en 2012 fue del 99%, para el 2014 no aumento y se sitúo en el 99%; la cobertura

en Alcantarillado en 2012 fue 99%, para 2014 no aumento y se ubicó en 99%; la cobertura en Aseo para los 4 años objeto de análisis, se instaló en 98%. El municipio del Espinal, para el acueducto del centro urbano se abastece del Río Coello, por medio de la concesión de USOCOELLO.

4.2.6 Bocatoma Enerlim

Para la hidroeléctrica ENERLIM ubicada en el municipio de Rovira, se tiene una concesión de agua de 2400 Lps, de los cuales se extraen directamente del río Luisa en las coordenadas X: 869592m Y: 961949m. En la Figura 17, se puede observar la estructura hidráulica.

Figura 17. Bocatoma hidroeléctrica ENERLIM.

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, 2017

4.3 TRANSVASES

La zona baja de la cuenca del Rio Luisa y las corrientes directas al rio Magdalena, por su alta demanda de agua para el sector agrícola y la baja oferta que tiene sus cuencas que nacen en la misma zona, ha hecho que se tenga que trasvasar agua de otras cuencas para satisfacer las necesidades de la región en donde se ubican los usuarios de los Distritos de Riego de USOCOELLO y USOGUAMO, distritos que tiene alrededor de 4000 usuarios. Los ríos Coello y Cucuana, son las fuentes hídricas a las cuales se les extraen alrededor de 20.000 L/s, para atender la demanda hídrica de la región.

Tabla 8. Canales que trasvasan en la cuenca del río Luisa y otros directos al Magdalena

Canal	Caudal Canal m³.seg	Unidad Hidrográfica	Usuarios	Caudal m³.seg
Canal Coello	9,80	Directos al Magdalena - Q Guayabal y otros	1	3,85
		Quebrada Eneal	4	5,95
Canal Cucuana	8,47	Directos al Río Luisa parte baja - Q Serrezuela	2	3,6
		Quebrada Eneal	1	3
		Río Luisa Parte Baja	1	1,87
Canal Espinal	4,15	Directos al Magdalena - Q Guayabal y otros	3	0,6
		Directos al Magdalena - Q Santana y otros	4	3,05
		Quebrada Eneal	2	0,5
Canal Jaramillo	4,00	Directos al Río Luisa parte baja - Q Serrezuela	5	4
Canal Palito	2,14	Quebrada Eneal	5	2,14
Canal Serrezuela	3,60	Quebrada Eneal	1	3,6
Canal Tolima	1,20	Directos al Magdalena - Q Guayabal y otros	1	0,3
		Quebrada Eneal	2	0,9
Canal Torres y Torres	0,67	Directos al Río Luisa Parte Baja - Q Guaduas	5	0,0835
		Directos al Río Luisa parte baja - Q Serrezuela	3	0,2805
		Quebrada Eneal	2	0,18782
		Río Luisa Parte Baja	5	0,118
Usoguamo	3,67	Río Luisa Parte Baja	1	3,67
Total Canales			**48**	**37,69982**

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

4.3.1 Trasvase USOCOELLO

Uno de los trasvases de mayor magnitud que se realiza para las cuencas con dirección al rio magdalena, es el que hace el distrito de riego de USOCOELLO, quien capta sus aguas en el Río Coello, en la bocatoma ubicada en el caserío de Gualanday del municipio de Coello, en las en las coordenadas X: 894393m Y: 965045m y una cantidad concesionada de 9640 Lps y permite irrigar gran parte de las áreas de cultivo de arroz ubicadas en el municipio de Espinal y parte de los municipios de guamo y Flandes. Además de estos usuarios, también sobre este sistema captan las aguas para uso humano del municipio de espinal y el corregimiento de Chícoral del mismo municipio, como también el generador energético Hidrotolima “La Ventana”.

Por otro lado, USOCOELLO capta agua de igual manera sobre el rio Cucuana hacia la cuenca del Río Luisa, desde la presa Korea en coordenadas X: 882711 Y: 933732m, con la cual se extraen 10910Lps de esta fuente hidrica, de este caudal total se debe tener en cuenta que USOCOELLO, hece una escargar al cauce del Rio luisa de 1870 Lps, caudal

concesionado por el Distrito de riego del guamo USOGUAMO. A continuación, en la Figura 19, se puede observar la bocatoma.

Figura 18. Bocatoma USOCOELLO sobre el río Coello

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, 2017

Figura 19. Bocatoma USOCOELLO sobre el rio Cucuana

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, 2017

4.3.2 Concesiones USOGUAMO

La concesión asignada para el distrito de riego de USOGUAMO, tomada directamente sobre el río Luisa en una cantidad de 3670 Lps, dicha concesión se extrae sobre la margen derecha del rio a la altura del municipio del Guamo, en las coordenadas X: 901212 m Y: 937747m; es de resaltar que, del caudal total concesionado, parte de este caudal es propio del rio Luisa 1800 Lps y el restante caudal 1870 Lps, es transvasado de la cuenca del Rio Cucunana. A continuación, en la Figura 20 se muestra la bocatoma. Además de lo anterior es importante mencionar que las aguas captadas en esta estructura son conducidas por un sistema de canales con dirección a las cuencas de los Ríos Magdalena y Cucuana, convirtiéndose esto en un nuevo trasvase.

Figura 20. Bocatoma de USOGUAMO sobre el río Luisa

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, 2017

4.3.3 Canal Torres

El canal torres cuenta con una concesión de agua de 670 Lps sobre el cauce del río Luisa, a la altura del municipio de San Luis, en las coordenadas X: 889218 Y: 953704m. largo de este canal se encuentran ubicados los usuarios beneficiaros de este canal, el cual parte en el municipio de san Luis y terminan en el municipio de Espinal, convirtiéndose este canal en un trasvase de aguas del Riog luisa a la Quebrada Serrezuela y otras quebradas que descargan en el rio magdalena. A continuación, se muestra la bocatoma de dicho canal.

Figura 21. Bocatoma de canal Torres

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, 2017

Sobre dicho canal, las dos más grandes tomas de agua se realizan sobre los predios la esperanza, ubicada en las coordenadas X: 900743m Y: 953181m sobre el municipio de Guamo con un caudal de 69.75 Lps. en la Figura 22 se presenta la compuerta de dicho predio.

Figura 22. Predio La Esperanza. municipio de Guamo

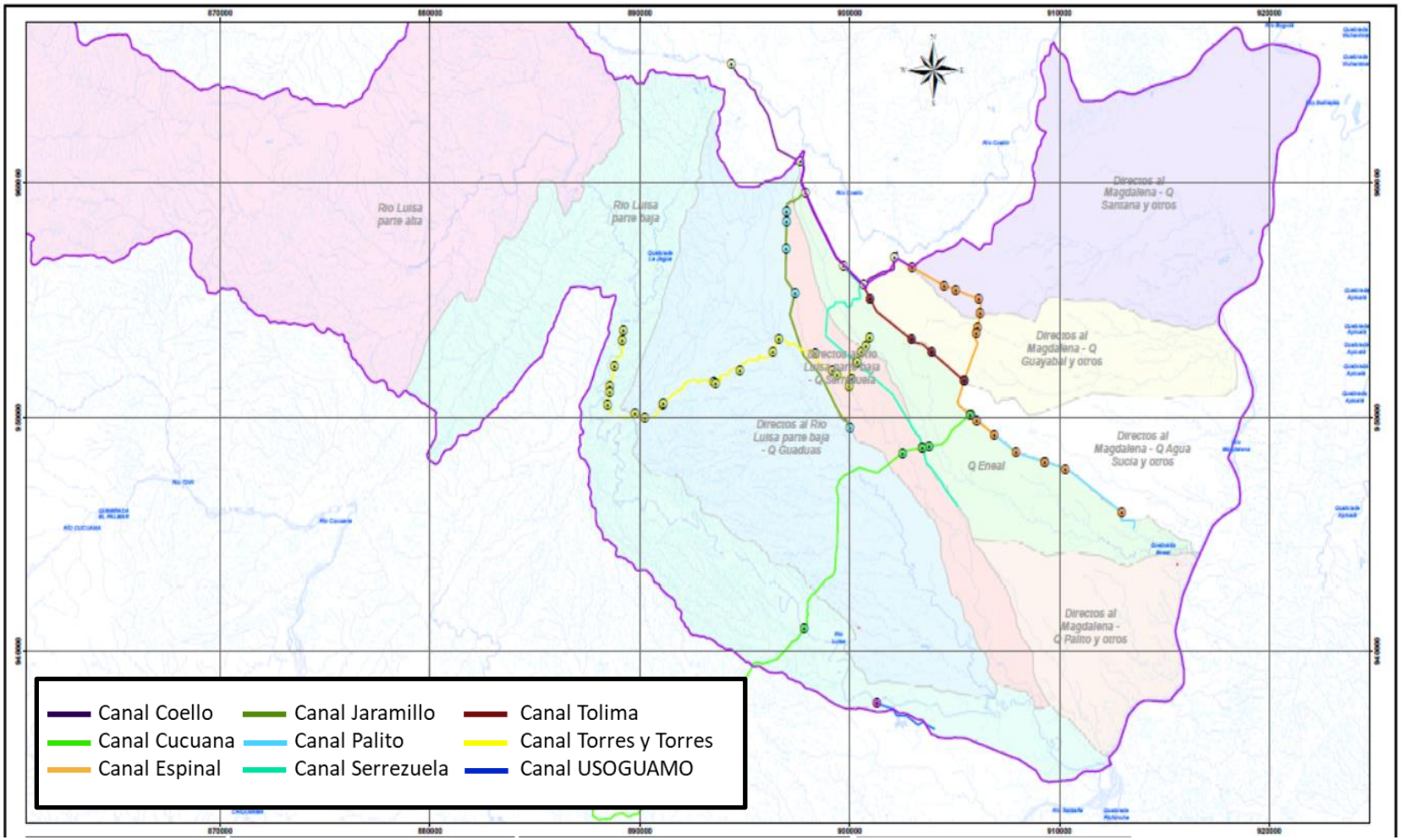
Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, 2017

Por otro lado, el predio es el de los Chorros, el cual tiene una concesión de 112.5 Lps y las coordenadas son X: 898354m Y: 952705m, se puede observar en la Figura 23.

Figura 23. Predio Los Chorros. municipio de Guamo

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, 2017

Figura 24. Trasvases Sobre el río Luisa y Directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

5 ANÁLISIS DE SISTEMAS LENTICOS

Verificando la información a escala 1:25000 de la zona de estudio y teniendo en cuenta que se establece un área mínima de visualización de 1,12 Ha para dicha escala, se evidencia que existen 6 sistemas lenticos que cumplen con lo anteriormente dicho, los cuales carecen de nombre, a los cuales se les denomino Sistema Lentico (SL) desde el SL-1 al SL-18, la ubicación de estos cuerpos se presenta en la Figura 25.

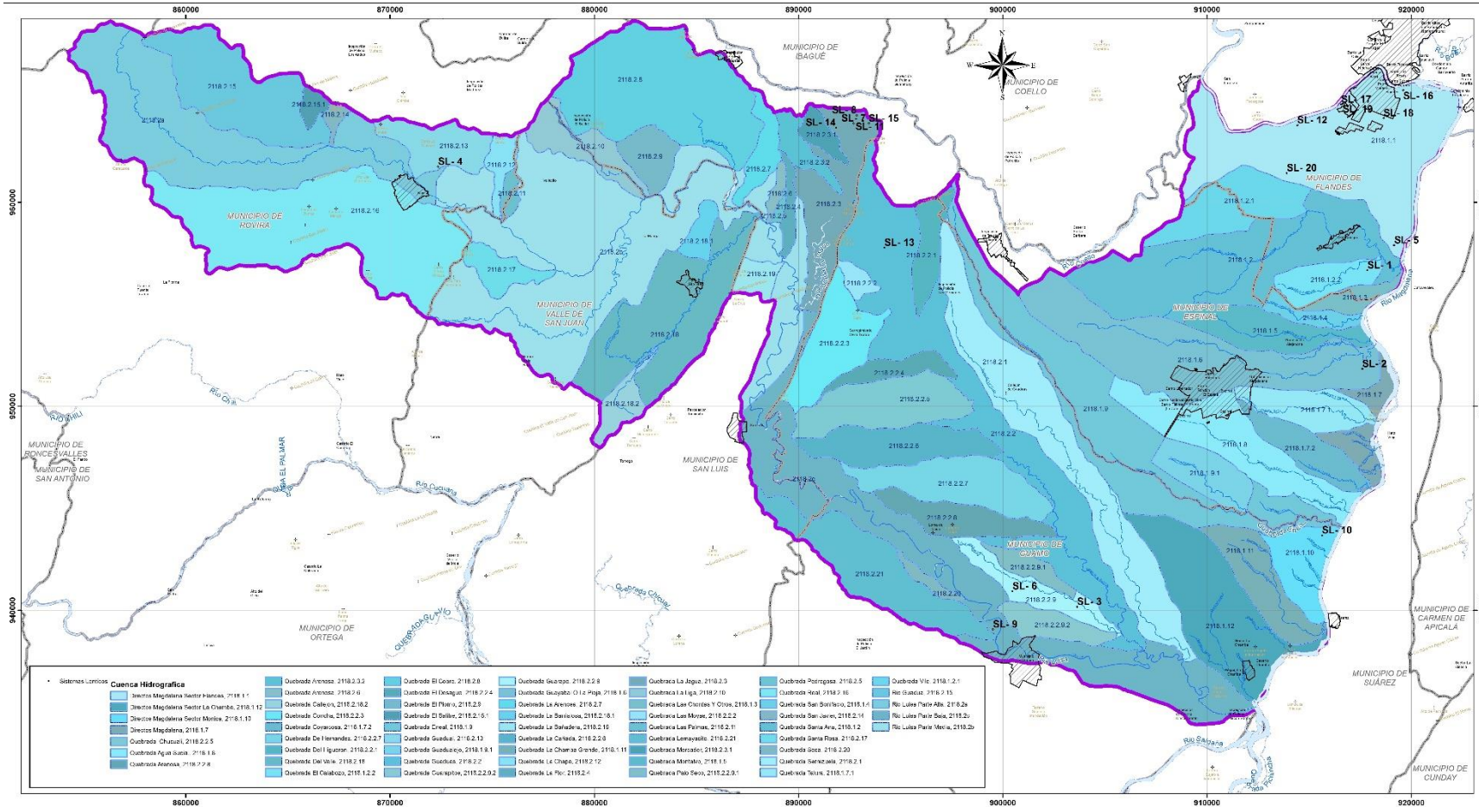
A continuación, en la Tabla 9 se presentan los sistemas lenticos con sus coordenadas y áreas respectivas.

Tabla 9. Sistemas lenticos de la cuenca de río Luisa y otros directos al Magdalena

Nombre	Área	Coordenada Este	Coordenada Norte
	m^2	m	m
Sistema Léntico 1	77620.89	917837.06	956664.53
Sistema Léntico 2	54536.13	905756.25	940534.94
Sistema Léntico 3	34630.83	903618.91	940165.71
Sistema Léntico 4	27768.21	872341.85	961749.66
Sistema Léntico 5	27380.77	919155.74	957896.54
Sistema Léntico 6	11753.62	892691.53	963868.80

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, 2017

Figura 25. Sistemas lenticos cuenca del río Luisa y otros directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, 2017

Ver digital L:\correcciónes\2. FASE DE DIAGNOSTICO\3.7 HIDROLOGIA\ANEXOS\Anexo 4. Mapas \GE374-SPC-PSIG-SLE-001-00

6 DINÁMICA DE CICLO DE SEDIMENTOS

Para el análisis dinámico del ciclo de sedimentos, al no existir información histórica en la zona de estudio, fue necesario acudir a estudios de sedimentos previamente realizados. De esta manera, el consultor decidió emplear el "Estudio de sedimento en la hoya del Magdalena Medio – Capacidad de transporte de los cauces" Volumen III, por Estudios y Asesorías ingenieros consultores Ltda. (1982).

Para la cuenca del río Luisa, al no encontrarse dentro del estudio, se decidió establecer una regresión lineal con las cuencas más cercanas; en donde se relaciona el área de las cuencas del río: Coello, Seco, Opia y Totare con los valores de carga de lavado (sedimentos en suspensión), carga de lecho (sedimentos de fondo) y carga total (sedimentos totales), como se puede observar en la tabla 10.

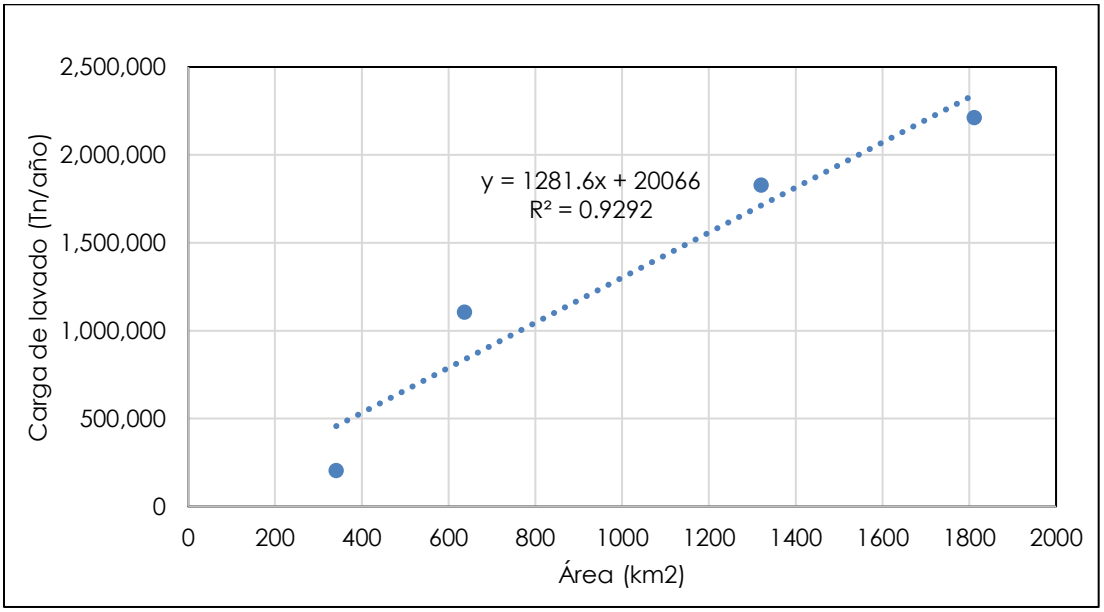
Tabla 10. Capacidad de transporte de sedimentos en la desembocadura del río Magdalena

Corriente	Área (Km^2)	Carga de lavado (Tn/año)	Carga de lecho (Tn/año)	Carga total (Tn/año)
Coello	1812	2,211,850	860,865	3,072,015
Seco	637	1,104,445	24,845	1,129,290
Opia	341	204,665	51,165	255,830
Totare	1321	1,828,065	696,885	2,524,950

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, 2017

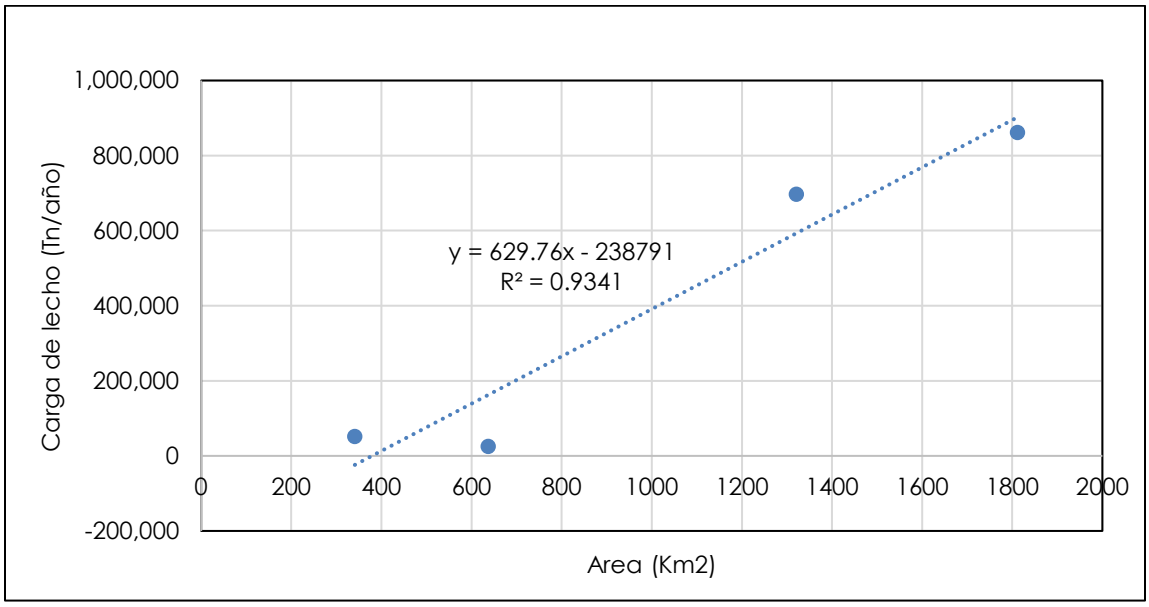
A continuación, se mostrarán las gráficas respectivas para los diferentes tipos de sedimentos con su respectiva regresión lineal.

Figura 26. Carga de lavado – sedimentos en suspensión



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, 2017

Figura 27. Carga del lecho – sedimentos de fondo



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, 2017

Como se puede observar, existe una buena correlación de datos, de manera que, con las ecuaciones de regresión lineal, teniendo en cuenta el área de la cuenca en estudio, se determina la carga total de sedimentos del río Luisa, a nivel anual.

De manera que reemplazando el valor del área en las ecuaciones se tiene el siguiente resultado:

Tabla 11. Carga de lavado, de lecho y total del río Luisa y otros directos al Magdalena

Corriente	Área (Km^2)	Carga de lavado (Tn/año)	Carga de lecho (Tn/año)	Carga total (Tn/año)
Luisa	1.081,57	1.406,206	442,339	1.848.544,64

Fuente**:** Formulación POMCA río Luisa y directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, 2017

Como se puede observar el valor de sedimentos se da únicamente a nivel anual dado que en el estudio empleado así lo dispone. Por otro lado, observando en histograma de caudales medios, se puede establecer que en la época de mayores caudales se va a registrar un transporte mayor de sedimentos, es decir los meses de: junio, octubre y diciembre.

7 CARACTERIZACION DE LAS UNIDADES HIDROGRAFICAS

El propósito de este capítulo es dar a conocer las características hidrológicas y morfológicas de las 9 unidades hidrográficas que integran la cuenca del río Luisa y Directos al Magdalena, como una línea base dentro del marco de la gestión integrada del recurso hídrico. La idea fue orientar la ordenación de las cuencas mediante la planificación del uso y manejo sostenible de los recursos naturales renovables, de tal manera mantener, en lo posible, un equilibrio entre el aprovechamiento social y económico y la oferta hídrica disponible de sus recursos hídricos.

La gestión dentro del ámbito de una cuenca se centra en captar, regular, controlar, aprovechar y tratar dicho recurso mediante obras hidráulicas, estas acciones conforman el manejo de cuencas, orientadas especialmente hacia la captación de agua para diferentes fines como el consumo humano y reducir los impactos que la escorrentía pudiera ocasionar en las zonas vulnerables debido a las pendientes y corrientes torrenciales.

El agua es un recurso natural del cual depende el desarrollo de la región, y es considerada como el elemento esencial en las políticas de planeación y manejo integral del agua, tal como se plantea en el Plan Nacional de Desarrollo. Para las 9 unidades hidrográficas de la cuenca del rio Luisa y Directos al Magdalena, se calcularon los balances hídricos para condiciones climáticas normales y secas teniendo en cuenta los principales factores morfométricos característicos de cada una de ellas, para que dentro de la normatividad, se sigan adelantado los procesos de planificación ambiental asociados al recurso hídrico y a sus características climáticas, como ejes estratégicos para orientar la gestión de las corporaciones a largo plazo.

7.1 UNIDAD HIDROGRÁFICA DIRECTOS AL MAGDALENA QUEBRADA PALITO Y OTROS

Localización: La unidad hidrográfica (1) Directos al Magdalena quebrada Palito y otros, se encuentra ubicada al Sureste de la cuenca del río Luisa, limita al oriente con el río Magdalena, al norte con la quebrada Eneal, al occidente con Directos al río Luisa quebrada Guaduas y al sur con la Parte Baja río Luisa. Así mismo, comprende parte del municipio de Guamo (55,1 Km^2). Los factores geográficos y morfológicos de la unidad hidrográfica se pueden observar en la Tabla 12.

Tabla 12. Localización geográfica y características morfológicas de la unidad hidrográfica directos al Magdalena quebrada Palito y otros

UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA DIRECTOS AL MAGDALENA QUEBRADA PALITO						
CORDENADAS	COTAS (m.s.n.m)		PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA (%)	LOGITUD DEL CAUCE (Km)	PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE (%)	ÁREA (Km^2)
	MÁXIMA	MÍNIMA				
LATITUD 4,21 LONGITUD -75,42	300	275	2,1	11,24	0,2	55,1

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

7.2 UNIDAD HIDROGRÁFICA QUEBRADA ENEAL

Localización: La unidad hidrográfica (2) quebrada Eneal comprende parte de los municipios de Guamo (16,80 Km^2) y Espinal (43,76 Km^2), esta unidad se encuentra ubicada al este de la cuenca del río Luisa y Directos al Magdalena, limita con las unidades hidrográficas: Directos al Magdalena quebrada Palito, Directos al Magdalena quebrada Agua Sucia y Directos al río Luisa quebrada Guaduas. Los factores geográficos y morfológicos de la unidad hidrográfica se pueden observar en la Tabla 13.

Tabla 13. Localización geográfica y características morfológicas de la unidad hidrográfica quebrada Eneal

UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA QUEBRADA ENEAL						
CORDENADAS	COTAS (m.s.n.m)		PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA (%)	LOGITUD DEL CAUCE (Km)	PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE (%)	ÁREA (Km^2)
	MÁXIMA	MÍNIMA				
LATITUD 4,28 LONGITUD -74,80	425	275	2,6	32,34	0,5	60

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

7.3 UNIDAD HIDROGRÁFICA DIRECTOS AL MAGDALENA QUEBRADA AGUA SUCIA Y OTROS

Localización: La unidad hidrográfica (3) Directos al Magdalena quebrada Agua Sucia y otros se encuentra al sureste de la cuenca del río Luisa y Directos al Magdalena, las circundan las unidades hidrográficas: río Magdalena, Directos al Magdalena quebrada Guayabal y quebrada Eneal. Esta unidad está conformada por el municipio de Espinal (51,9 Km^2). Los factores geográficos y morfológicos de la unidad hidrográfica se pueden observar en la Tabla 14.

Tabla 14. Localización geográfica y características morfológicas de la unidad hidrográfica directos al Magdalena quebrada Agua Sucia y otros

UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA DIRECTOS AL MAGDALENA QUEBRADA AGUA SUCIA						
CORDENADAS	COTAS (m.s.n.m)		PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA (%)	LOGITUD DEL CAUCE (Km)	PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE (%)	ÁREA (Km^2)
	MÁXIMA	MÍNIMA				
LATITUD 4,34 LONGITUD -75,07	325	275	4,1	14,52	0,3	52

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

7.4 UNIDAD HIDROGRÁFICA DIRECTOS AL MAGDALENA QUEBRADA GUAYABAL Y OTROS

Localización: La unidad hidrográfica (4) Directos al Magdalena quebrada Guayabal está localizada al noreste de la cuenca del Luisa y Directos al Magdalena. Limita al oriente con el río Magdalena, al norte con Directos al Magdalena quebrada Santana, al sur con Directos al Magdalena quebrada Agua Sucia y oeste con la quebrada Eneal. Por otro lado, se encuentra el municipio de Espinal (58 Km^2). Los factores geográficos y morfológicos de la unidad hidrográfica se pueden observar en la Tabla 15.

Tabla 15. Localización geográfica y características morfológicas de la unidad hidrográfica directos al Magdalena quebrada Guayabal

UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA DIRECTOS AL MAGDALENA QUEBRADA GUAYABAL						
CORDENADAS	COTAS (m.s.n.m)		PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA (%)	LOGITUD DEL CAUCE (Km)	PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE (%)	ÁREA (Km^2)
	MÁXIMA	MÍNIMA				
LATITUD 4,16 LONGITUD -74,71	375	275	2,9	19,23	0,5	57,8

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

7.5 UNIDAD HIDROGRÁFICA DIRECTOS AL MAGDALENA QUEBRADA SANTANA Y OTROS

Localización: la unidad hidrográfica (5) Directos al Magdalena quebrada Santana, comprende los municipios de Espinal (44,10 Km^2) y Flandes (94 Km^2). Limita al norte con la cuenca del río Coello, al sur con Directos al Magdalena quebrada Guayabal, al oriente con el río Magdalena y al occidente con el río Coello. Los factores geográficos y morfológicos de la unidad hidrográfica se pueden observar en la Tabla 16.

Tabla 16. Localización geográfica y características morfológicas de la unidad hidrográfica directos al Magdalena quebrada Santana

UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA DIRECTOS AL MAGDALENA QUEBRADA SANTANA						
CORDENADAS	COTAS (m.s.n.m)		PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA (%)	LOGITUD DEL CAUCE (Km)	PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE (%)	ÁREA (Km^2)
	MÁXIMA	MÍNIMA				
LATITUD 4,23 LONGITUD -74,99	350	275	3,3	20,13	0,4	137,6

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

7.6 UNIDAD HIDROGRÁFICA DIRECTOS AL RÍO LUISA QUEBRADA GUADUAS

Localización: La unidad hidrográfica (6) Directos al río Luisa quebrada Guaduas, se ubica en el área del municipio de Guamo (166 Km^2), San Luis (0,21 Km^2) y Espinal (0,75 Km^2), limita al norte con la cuenca del río Coello, al sur y al oeste con la unidad hidrográfica río Luisa parte Baja, y al oriente con Directos al río Luisa quebrada Serrezuela. Las características geográficas y morfologías de la cuenca se pueden observar en la Tabla 17.

Tabla 17. Localización geográfica y características morfológicas de la unidad hidrográfica directos al río Luisa quebrada Guaduas

UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA DIRECTOS AL RÍO LUISA QUEBRADA GUADUAS						
CORDENADAS	COTAS (m.s.n.m)		PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA (%)	LOGITUD DEL CAUCE (Km)	PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE (%)	ÁREA (Km^2)
	MÁXIMA	MÍNIMA				
LATITUD 4,35 LONGITUD -75,05	750	300	9,1	35,19	1,3	167

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

7.7 UNIDAD HIDROGRÁFICA RÍO LUISA PARTE BAJA

Localización: Para la unidad hidrográfica (7) río Luisa parte Baja, el principal eje fluvial lo constituye el río del mismo nombre y sus afluentes las quebradas Guaduas y Serrezuela. Se trata de una cuenca activa desde el punto de vista geomorfológico, dadas las condiciones topográficas y condiciones climáticas variables. La unidad hidrográfica está constituida por los municipios de Guamo (75 Km^2), Valle de San Juan (45 Km^2) y San Luis (66 Km^2). Los factores geográficos y morfológicos de la unidad hidrográfica se pueden observar en la Tabla 18.

Tabla 18. Localización geográfica y características morfológicas de la unidad hidrográfica río Luisa parte baja

UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA RÍO LUISA PARTE BAJA						
CORDENADAS	COTAS (m.s.n.m)		PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA (%)	LOGITUD DEL CAUCE (Km)	PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE (%)	ÁREA (Km^2)
	MÁXIMA	MÍNIMA				
LATITUD 4,01 LONGITUD -74,98	575	275	17,1	70,43	0,4	185,1

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

7.8 UNIDAD HIDROGRÁFICA RÍO LUISA PARTE ALTA

Localización: La unidad hidrográfica (8) río Luisa parte Alta, está ubicada en los municipios de Valle de San Juan (93 Km^2), San Luisa (66 Km^2) y Rovira (164 Km^2). Limita al norte con la cuenca del río Coello, al oriente con la parte Media del río Luisa y al sur con la cuenca del río Cucuana. Las características geográficas y morfologías de la cuenca se encuentran en la Tabla 19.

Tabla 19. Localización geográfica y características morfológicas de la unidad hidrográfica río Luisa parte alta

UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA RÍO LUISA PARTE ALTA						
CORDENADAS	COTAS (m.s.n.m)		PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA (%)	LOGITUD DEL CAUCE (Km)	PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE (%)	ÁREA (Km^2)
	MÁXIMA	MÍNIMA				
LATITUD 4,03 LONGITUD -75,11	2950	575	24,9	53,81	4,4	323

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

7.9 UNIDAD HIDROGRÁFICA DIRECTOS AL RÍO LUISA QUEBRADA SERREZUELA

Localización: La unidad hidrográfica (9) Directos al río luisa quebrada Serrezuela, se ubica en los municipios de Guamo (44,3 Km^2) y Espinal (0,03 Km^2). Limita al norte con la quebrada Eneal, al sur con las unidades hidrográfica Directos al río Luisa quebrada Guaduas y río Luisa parte Baja, al oriente quebrada Eneal y Directos al Magdalena quebrada Palito y al occidente con Directos al río Luisa quebrada Guaduas. Las características geográficas y morfológicas de la unidad hidrográfica son expuestas en la Tabla 20.

Tabla 20. Localización geográfica y características morfológicas de la unidad hidrográfica directos al río Luisa quebrada Serrezuela

UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA DIRECTOS AL RÍO LUISA QUEBRADA SERREZUELA						
CORDENADAS	COTAS (m.s.n.m)		PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA (%)	LOGITUD DEL CAUCE (Km)	PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE (%)	ÁREA (Km^2)
	MÁXIMA	MÍNIMA				
LATITUD 4,28 LONGITUD -75,15	400	300	1,3	31,85	0,3	44,4

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

8 ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL

La Evaluación Regional del Agua, recomienda la actualización permanente de información hidrológica y climatológica para el conocimiento sobre el estado (cantidad y calidad) y dinámica del agua en sus componentes de oferta natural y disponibilidad. Asimismo, estas evaluaciones permiten determinar un sistema de indicadores regionales de sostenibilidad hídrica, afín de tener un mejor conocimiento del estado, de las presiones y afectaciones del agua por actividades antrópicas o factores climáticos, (IDEAM 2013)(IDEAM, 2013).

La variación espacial y temporal de las variables básicas que representan las fases del ciclo hidrológico, muestran la interacción del agua con el medio natural y de los efectos antrópicos en que estos actúan directamente con otros elementos naturales como el suelo y la cobertura vegetal y los diferentes ecosistemas. Se puede decir, entonces, que la dinámica que se presenta en todos los procesos del ciclo hidrológico, es el modelo para entender las características de la oferta hídrica superficial en unidades hidrográficas a nivel regional.

Entre los procesos que se desarrollan para conocer la oferta hídrica superficial, está la ecuación del balance hídrico la cual permiten caracterizar las condiciones de sostenibilidad del recurso agua en los diferentes sistemas hidrológicos regionales, incluyendo la definición de las metodologías más adecuadas para construir y determinar los indicadores hídricos ambientales.

La ecuación siguiente muestra los diferentes componentes que hacen parte de la ecuación del balance hídrico (IDEAM, 2013) (IDEAM 2013):

$$P - Esc_{(superf)} - Esc_{(subte)} - ETR - H_{suelo} - H_{veg} \pm \Delta S \pm \Delta er = 0$$

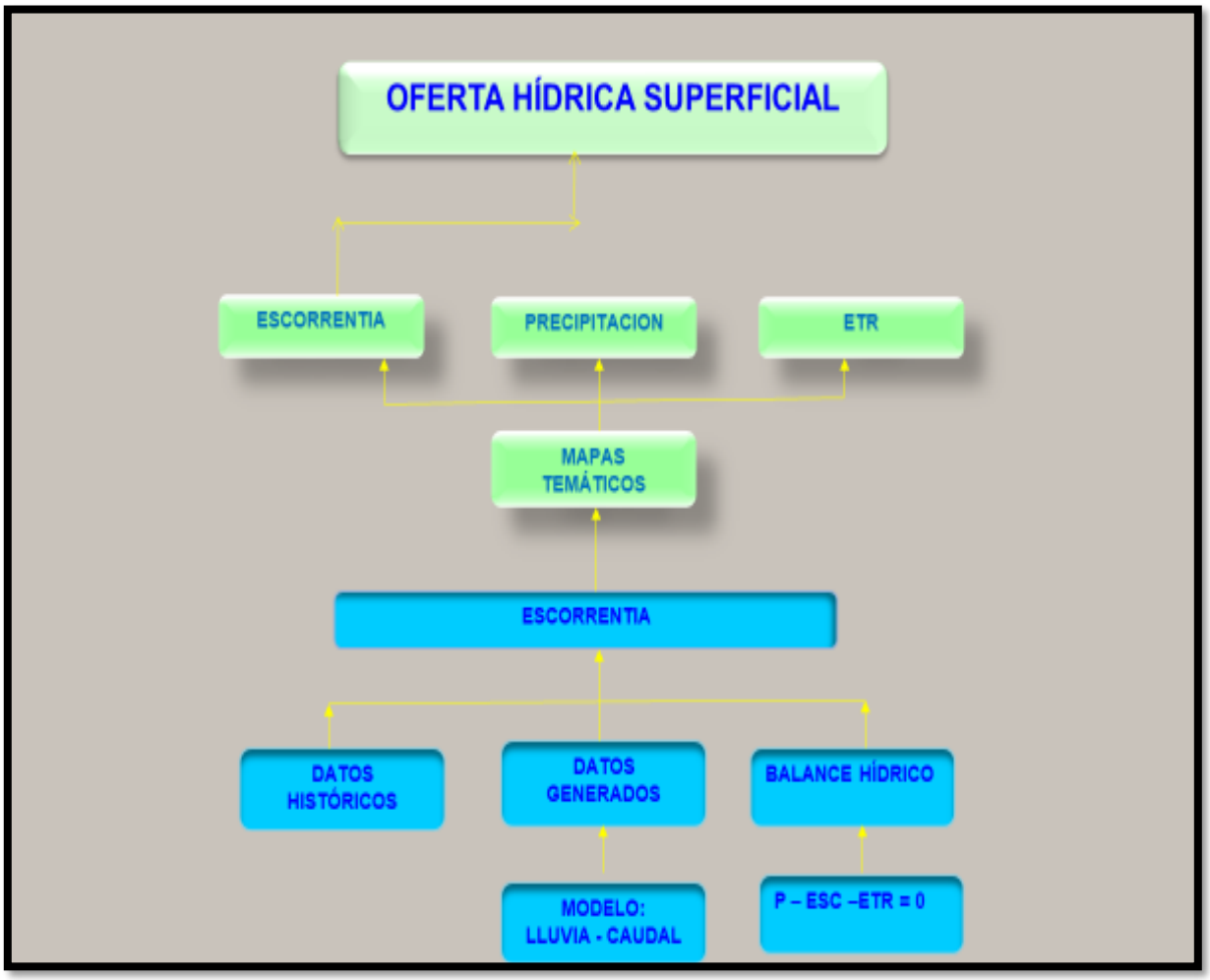
Dónde:

P	: Precipitación
Esc (superf)	: Escorrentía Superficial
Esc (subte)	: Escorrentía Subterránea
ETR	: Evapotranspiración Real
Hsuelo	: Variación de Humedad del Suelo
Hveg	: Variación de Humedad de la Vegetación
ΔS	: Almacenamiento
Δer	: Término Residual de Discrepancia

Para la aplicación del balance hídrico, en determinados procesos de cálculo, la ecuación anterior podrá simplificarse o hacerse más compleja dependiendo de los datos disponibles, de sus características hidrográficas e hidrológicas y de la fase del régimen hidrológico para el cual se calcula el balance hídrico. Por tanto, el balance hídrico, para cualquier zona o sub-zona hidrográfica, aparecerá representado por la ecuación a continuación se presenta el flujograma con los pasos a seguir para determinar la oferta hídrica superficial.

$$P - Esc\ (total) - ETR \pm \Delta S \pm \Delta er = 0$$

Figura 28. Flujo oferta hídrica superficial



Fuente: (Instituto de Hidrología, 2017)

8.1 CONCEPTOS CLAVES EN LA EVALUACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL

La oferta hídrica superficial no está disponible para ser aprovechada en su totalidad para satisfacer las necesidades socioeconómicas de la comunidad. Por esta razón es necesario definir algunos conceptos que garanticen la sostenibilidad del ecosistema y el uso del agua, considerando la distribución espacial y temporal de las variables asociadas a la oferta hídrica. A continuación, se precisan estos conceptos, tomados del ERA 2013 IDEAM, que serán de utilidad en este estudio (IDEAM 2013).

- ***Oferta hídrica total superficial****: OHTS*- El volumen de agua que escurre por la superficie e integra los sistemas de drenaje superficial. Es el agua que fluye por la superficie de suelo, que no se infiltra o se evapora y se concentra en los cauces de los ríos y/o en los cuerpos de agua lenticos.

- ***Oferta hídrica total disponible OHTD- (IDEAM, 2010):*** El volumen de agua promedio que resulta de sustraer a la oferta hídrica total superficial el volumen de agua que garantizaría el uso para el funcionamiento del ecosistema, de los sistemas fluviales y –en alguna medida- un caudal mínimo para usuarios que dependen de las fuentes hídricas asociadas a estos ecosistemas (caudal ambiental).

- ***Oferta hídrica regional disponible:*** *(OHRD)- Es la OHTD mas los volúmenes de agua de retorno asociados a diferentes usos, incluye la suma o resta de caudales de trasvase. Esta es la oferta que se utiliza en el cálculo del INDICE DE USO DEL AGUA (IUA)*

- ***Oferta hídrica regional aprovechable:*** *OHRA*- Es el volumen de agua que resulta de sustraer del volumen de agua promedio medido en la estación hidrométrica de referencia, representativa de la unidad de análisis considerada, el volumen de agua *correspondiente* al caudal ambiental.

- ***Año hidrológico medio***: Está definido por los caudales medios mensuales multianuales de la serie histórica de caudales

- ***Año hidrológico húmedo:*** Está definido por los caudales máximos medios mensuales multianuales de la serie de caudales medios mensuales

- ***Año hidrológico seco*****:** A partir de los valores característicos mínimos de las series de caudales mensuales multianuales; los cuales se identifican con el año típico seco.

- ***Caudal de retorno****:* El porcentaje del caudal extraído por los diferentes sectores usuarios que es devuelto a los cauces o cuerpo de agua en el período de tiempo considerado.

- ***Caudal ambiental:*** En el Decreto 3930 del 25 de octubre del 2010 se define como: “el volumen de agua necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los usuarios aguas abajo de la fuente de la cual dependen tales ecosistemas” ("Decreto 3930 ", 2010).

- ***Caudal de Demanda*****:** Dentro del análisis de un balance hídrico general de entradas y salidas de agua, tomando como entradas los aportes de los volúmenes de agua provenientes de los sistemas hídricos y como salidas los consumos de agua requeridos de los diferentes sectores de producción económica y de consumo humano. Por ello la demanda se define como la extracción hídrica del sistema natural destinada a suplir las necesidades o requerimiento de consumo humano, la producción sectorial y las demandas esenciales de los ecosistemas no antrópicos. *Estudio Nacional del Agua – ENA, IDEAM 2010.*

- ***Caudal de Retorno***: En el cálculo de la oferta hídrica doméstica es necesario tener presente el incremento de los caudales por un coeficiente de retorno, que puede ser un valor *promedio* comprendido entre 0.75 y 0.85, según el nivel de complejidad del sistema. Este caudal de retorno debe ser medido en campo y considerando aspectos importantes existentes del sistema de alcantarillado, tales como los pozos

sépticos (cuando estos existen no se realizan vertimientos a las fuentes) ó los puntos de vertimientos del sistema (que si obedecen a un programa de manejo, disposición y recolección de vertimientos).

- ***Caudal de Trasvase***: El trasvase lo define el ENA 2010, como el desvío de una corriente de agua propia de una cuenca hacia otra cuenca para cumplir un fin específico. El propósito de esta medida es garantizar un suministro continuo de agua a una región o un proyecto hidráulico de interés regional o nacional, sin perjudicar, *en* ningún caso, las comunidades asentadas en la cuenca aportante. Se debe tomar, igualmente, cuando hay seguridad de que la fuente aportante excede suficientemente los requerimientos de demanda hídrica dentro de su misma cuenca.

8.2 CICLO HIDROLÓGICO

Los investigadores siempre están de acuerdo en definir el ciclo hidrológico como un proceso continuo de la circulación del agua en sus diversos estados en la atmósfera terrestre. Sucede bajo la influencia de la radiación solar, la acción de la gravedad y la dinámica del intercambio de materia y energía entre la atmósfera, litosfera e hidrosfera y que conjuntamente con la biosfera forman el marco de referencia para el estudio del estado y comportamiento del agua. Todos estos movimientos y sus observaciones en la Hidrología los estudia y se conoce como el ciclo hidrológico, sin dejar de lado los aspectos de su composición química y física (IDEAM, 1998).

8.3 ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

La variabilidad espacial y temporal de los caudales o escorrentía, se encuentra estrechamente ligada a los diferentes sistemas climáticos que constituyen el régimen hidrológico de un área hidrográfica. (Chow, 1964).

Parte de la precipitación que fluye por la superficie del suelo hasta una corriente de agua se convierte en escorrentía superficial generando los caudales que transitan por un sitio determinado, constituyéndose en el modelo predominante del flujo de agua en periodos de tiempo, donde se analizan las épocas de inundaciones, de sequías y se caracterizan las condiciones naturales de los cuerpos de agua. (Chow, 1964).

En Colombia las cuencas hidrográficas presentan un régimen pluvial con algunas excepciones, constituido por pequeñas corrientes de agua que se alimentan de glaciares y nieves perpetuas que no alteran el régimen general. Sin embargo, el régimen de precipitaciones no es homogéneo en todo el país, siendo característico los sistemas monomodales y bimodales de acuerdo con los regímenes hidroclimáticos representativos en cada una de dichas regiones.

Para cuantificar la escorrentía de una región se propone analizarla desde el punto de vista de las condiciones climáticas de año normal y seco, para lo cual se cuenta con series de caudales medios mensuales multianuales, series de caudales mínimos multianuales y series de caudales máximos multianuales, que se recopilan en las estaciones hidrológicas.

8.4 MODELO HIDROLÓGICO DE TANQUES AGREGADO

Con el propósito de realizar una adecuada caracterización del régimen de caudales en la cuenca hidrográfica del río Luisa y directos al Magdalena, se hizo uso del Modelo

Hidrológico Conceptual Agregado adaptado del modelo TETIS presentado por Vélez (2001), Francés et al. (2002 y 2007), además presentado por Medici et al. (2008) como modelo LU3. Este modelo ha servido de base en la obtención de información, ya sea a través de la reconstrucción de series naturales de caudales, en el llenado de datos faltantes o en la simulación de series para pronóstico a nivel diario y mensual. Se han realizado aplicaciones en 48 cuencas hidrográficas con diferentes características morfológicas e hidroclimáticas, obteniendo resultados bastante satisfactorios (Vélez J.I., Restrepo-Tamayo C. y Correa P.L.; 2010).

Actualmente la evaluación de los recursos naturales, y en especial el recurso hídrico superficial, es necesaria para interpretar los procesos que modifican el ambiente; realizar una adecuada ordenación del territorio y establecer los usos del agua en función de las demandas que se requieren en las cuencas, es una tarea cada vez más perentoria, ya que cada vez las necesidades aumentan y la disponibilidad del recurso decrece. Para esto, es básico contar con información actualizada y cada vez más precisa sobre la distribución regional y local de la disponibilidad del agua y la distribución territorial de sus usos. Los modelos lluvia-escorrentía han sido aplicados en Colombia tanto en forma semidistribuida como agregada para reproducir series de caudales en cuencas de diversas áreas, permitiendo estimar a escala diaria y mensual la oferta hídrica de una fuente de agua.

El modelo hidrológico agregado de tanques, está basado en el modelo hidrológico conceptual orientado a la simulación de crecientes propuesto por Vélez (2001) y desarrollado, entre otros, por Francés et al. (2002, 2007). Este modelo se concentra en simular todas las componentes principales de la fase terrestre del ciclo hidrológico en una cuenca, utilizando discretizaciones espacio-temporales definidas. Una de estas componentes es la escorrentía superficial, que es la variable de interés para estos análisis.

8.4.1 Descripción conceptual del modelo de tanques

El modelo hidrológico agregado de lluvia-escorrentía, basado del modelo TETIS, adaptado por la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, parte de la primicia que la producción de escorrentía superficial se basa de un balance hídrico en la cuenca, asumiendo que el agua se distribuye en cuatro tanques o niveles de almacenamiento conectados entre sí, como puede observarse en la Figura 29.

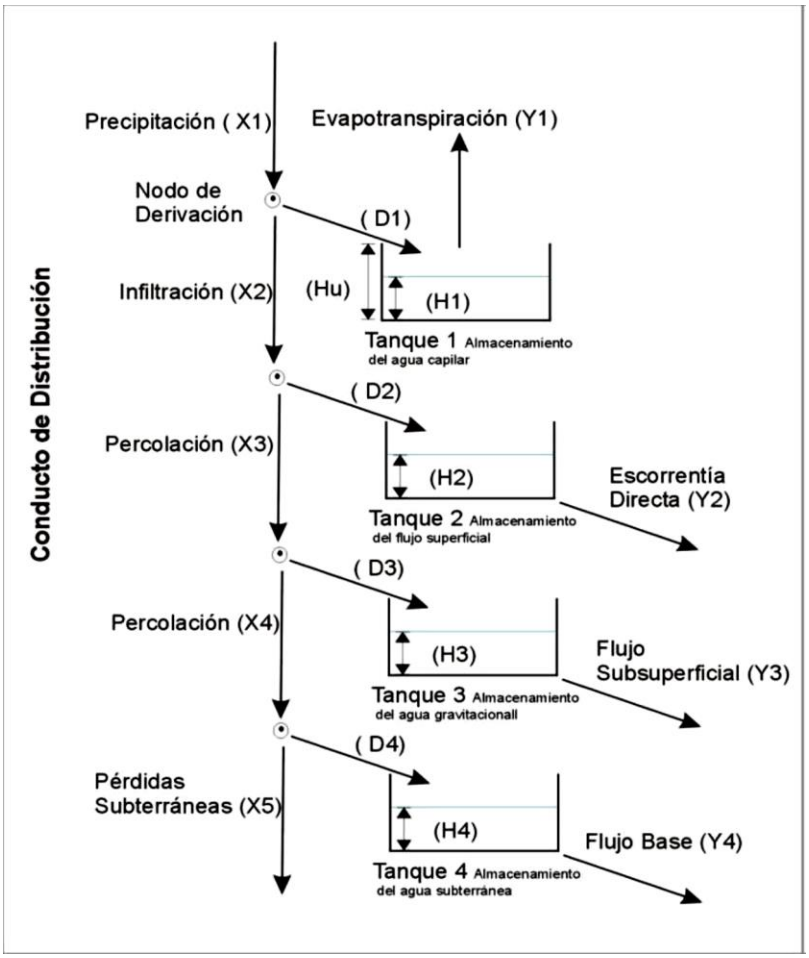
En cada intervalo de tiempo, la precipitación (X1), se distribuye a los distintos almacenamientos, donde en función del volumen almacenado en cada uno de ellos (Hi), se determina su contribución a la escorrentía (Yi). El modelo realiza el balance de agua en cada tanque y actualiza los volúmenes almacenados en cada uno.

De acuerdo con la configuración del modelo, la precipitación (X1) se estima según los registros diarios de las estaciones más cercanas, empleando un método de interpolación espacial.

La cantidad de agua que se deriva en cada nodo (Di) y la que continua hacia los niveles inferiores (Xi) por el conducto distribuidor depende de la cantidad de agua disponible, el estado del almacenamiento del tanque y de la capacidad del conducto distribuidor aguas abajo del nodo, la cual se puede relacionar con la conductividad hidráulica en el subsuelo.

La descarga (Yi) en cada uno de los tanques está en función del volumen almacenado y de las características de la cuenca que se pueden asociar con el tiempo de permanencia del agua en un elemento de almacenamiento temporal.

Figura 29. Conceptualización vertical del modelo hidrológico de tanques agregado



Fuente: Fuente Vélez - UNAL – 2010

8.4.1.1 Tanque 1 (T1): Tanque de almacenamiento capilar

Este tanque representa la intercepción de las plantas, la detención del agua en los charcos y el agua que se retiene en el suelo por las fuerzas capilares. De este tanque solo sale agua producto de la evapotranspiración y no contribuye a la escorrentía superficial.

El valor obtenido de lluvia entra a un conducto del que se deriva una cantidad D1 para el tanque T1. Se supone que este tanque tiene una capacidad máxima Hu, igual a la suma de la capacidad de almacenamiento de “agua útil” en el suelo y la capacidad de la cobertura de la superficie para almacenar agua. La capacidad de almacenamiento de “agua útil” está relacionada con la cantidad de agua que hay que agregar a una columna de suelo muy seco hasta alcanzar el mayor almacenamiento capilar posible, sin que el agua fluya por la acción de la gravedad. La capacidad de la cobertura de la superficie por lo general está relacionada con la cobertura vegetal.

La cantidad de agua que se deriva D1 y que entra al almacenamiento estático, corresponde de una forma muy elemental al mínimo entre el agua existente en el conducto distribuidor (X1), el que se requiere para llenar el tanque de almacenamiento capilar (Hu - H1), y el máximo (Hu) que puede ingresar al suelo durante un intervalo de tiempo.

Así, a menos que se llene el almacenamiento capilar, no se deja pasar nada a la escorrentía; e la realidad puede haber escorrentía sin que necesariamente se haya llenado el almacenamiento capilar en el suelo; Entonces se utiliza un coeficiente para lograr que la cantidad de agua que se deje pasar corresponda a una fracción de la lluvia que está relacionada con el estado del almacenamiento capilar tal que, cuando este almacenamiento esté muy lleno deje pasar mucho, y cuando está muy vacío deje pasar poco. En este caso D1 corresponde a:

Donde

$$D1 = Min(\varphi \, . \, X1, Hu - H1 \,)$$

$$\varphi = 1 - \left(\frac{H1}{Hu}\right)^{\alpha}$$

Este esquema ha sido utilizado por varios modelos conceptuales agregados; es el caso del modelo HBV (Bergström, 1995) en el que se pueden tomar valores entre 1 y 3, y es un parámetro que define el analista. Otro caso es el de los modelos GR-3J y GR-3H (Arnaud y Lavabre, 1996) y GR-4J (Perrin et al., 2003) en los que es igual a 2.

La evapotranspiración real Y1 depende de la cantidad de agua disponible en el tanque H1, así cuando hay déficit de agua en el suelo la evapotranspiración es menor que la evapotranspiración potencial ETP. Varios autores han utilizado una expresión en la que se obtiene un estimado de la evapotranspiración real a partir de la evapotranspiración potencial y de la relación entre la humedad del suelo y la capacidad de campo. En el modelo, la relación entre la humedad del suelo y la capacidad de campo equivale a la relación entre el agua que se encuentra en el almacenamiento estático y la capacidad máxima para ese almacenamiento, así:

$$Y_1 = ETP.\left(\frac{H_1}{Hu}\right)^{\beta}$$

En los modelos GR-2 y GR-3 del CEMAGREF (Michel, 1989) se utiliza una expresión muy similar a la anterior y el parámetro β tiene un valor de 0,5. Igualmente el modelo HBV (Bergström, 1995) utiliza una expresión equivalente cuando β =1. Singh y Dickinson (1975) obtienen buenos resultados con β =0,7.

Además, en el modelo se tiene en cuenta que el valor de la evapotranspiración real no puede ser mayor que el agua disponible para evaporación en este almacenamiento estático, así:

$$Y_1 = Min\left\{ETP.\left(\frac{H_1}{H_u}\right)^{\beta}, H_1\right\}$$

De acuerdo con la configuración del modelo, la evapotranspiración potencial ETP se calcula para cada paso de tiempo empleando algún método apropiado para las características de la cuenca analizada.

De acuerdo con lo propuesto en el modelo, el agua que no ingresa al almacenamiento estático T1, está disponible para la infiltración y para la escorrentía superficial directa, así:

$$X2 = X1 - D1$$

8.1.1.2 Tanque 2 (T2): Almacenamiento del flujo superficial

En este almacenamiento se representa el agua que fluye por la ladera o escorrentía directa; se supone que la capa superior del suelo tiene una conductividad hidráulica Ks representativa o característica y que se asocia al tipo de suelo y a su estructura, lo cual está relacionando la cobertura vegetal, el uso y el manejo del suelo.

Por lo tanto, la cantidad de agua que entra al almacenamiento T2, está relacionada con la capacidad del suelo para dejar pasar el agua a su interior Ks (una conductividad hidráulica de la capa superior del suelo asociada a la cobertura en condiciones de saturación) y con el flujo excedente del almacenamiento capilar X2 según la siguiente relación:

$$D2 = Max\{0, X2 - Kp$$

Para el flujo superficial en la cuenca, suponiendo velocidad constante y aplicando la ecuación de continuidad, la escorrentía directa se puede representar mediante un embalse lineal:

$$Y2 = \alpha 2 - H2$$

En donde el coeficiente de descarga α2 es función del tiempo de la residencia Tr2 del agua en la ladera.

$$\alpha 2 = \frac{1}{Tr_2}$$

El agua que no ingresa al almacenamiento estático T2, sigue su camino por la zona de la capa superior del suelo hacia la capa inferior.

$$X3 = X2 - D2$$

8.1.1.3 Tanque 3 (T3): Almacenamiento del flujo sub-superficial

Este almacenamiento representa el agua almacenada en la capa superior del suelo mientras fluye lentamente hacia la red de drenaje, se desarrolla inicialmente sobre una capa delgada que fluye lateralmente hacia abajo por el interior de esta capa hasta que sale a los elementos de la red de drenaje.

De acuerdo con lo propuesto en el modelo, durante el intervalo de tiempo, se tiene una cantidad de agua gravitacional X3 que se mueve verticalmente hacia el interior del suelo; de esta cantidad, una parte X4, podrá percolar o seguir hacia la zona inferior del suelo, mientras que el resto del agua se deriva al almacenamiento superior del suelo donde se convertirá en flujo subsuperficial.

Se supone igualmente que la capa inferior del suelo tiene una capacidad de percolación representativa que se asocia al tipo de subsuelo y su estructura, lo cual está estrechamente relacionado con las características geológicas (litológicas y estructurales) y geomorfológicas de las capas inferiores del suelo. En algunos casos la capacidad de percolación y su variabilidad espacial se pueden inferir por características del relieve, algunos rasgos morfológicos, el desarrollo de la vegetación, el uso y manejo del suelo y la producción de flujo base aguas abajo.

La cantidad de agua que ingresa al almacenamiento durante el intervalo de tiempo se puede asociar con el flujo excedente del almacenamiento del flujo superficial en ladera X3 y la conductividad hidráulica en la capa inferior del suelo (subsuelo) en condiciones de saturación que se conoce como capacidad de percolación Kp y que se expresa:

$$D3 = Max\{0, X3 - Kp\}$$

Para la producción de escorrentía subsuperficial en la ladera se hace una formulación análoga a la presentada en el almacenamiento T2 para obtener la siguiente relación lineal:

$$Y3 = \alpha 3 \,.\, \mathrm{H3}$$

En donde el coeficiente de descarga α3 es función del tiempo de la residencia Tr3 del agua en la capa superior del suelo.

$$\alpha 3 = \frac{1}{Tr_3}$$

8.1.1.4 Tanque 4 (T4): Almacenamiento del flujo subterráneo

Se representa por un tanque donde se considera el almacenamiento del agua gravitacional mientras fluye a través del interior del suelo hacia la red de drenaje, en lo que se podría considerar como el acuífero, y donde sale a formar el flujo base.

El volumen de agua que durante el intervalo de tiempo ingresa por percolación X4 tiene la posibilidad de que una cantidad de agua siga hacia las pérdidas subterráneas X5 y que el resto sea derivado hacia el almacenamiento subterráneo T4.

$$D4 = Max\{0, X4 - X5\}$$

Para la representación del flujo a través del almacenamiento subterráneo, se utiliza la ecuación de continuidad y una ecuación que relaciona la tasa de flujo que sale de este almacenamiento con la cantidad de agua almacenada:

$$Y4 = \alpha 4 \,.\, \mathrm{H4}$$

En donde el coeficiente de descarga α4 es función del tiempo de la residencia Tr4 del agua en la capa inferior del suelo o acuífero.

$$\alpha 4 = \frac{1}{Tr_4}$$

$$Q = (Y2 + Y3 + Y4).A$$

Donde A es el área de la cuenca.

La calidad de la información utilizada en el modelo hidrológico, tanto para la calibración de los parámetros del modelo, como para la generación de series, repercute directamente en resultados acertados del modelo en cuencas donde no se cuente con registros históricos de caudal, como lo fueron las unidades hidrológicas del río Luisa y directas al Magdalena. Entre las variables de entrada que el modelo requiere se encuentran: Área de la cuenca, temperatura promedio, la precipitación diaria y el caudal diario observado en una estación hidrológica en donde se requiera calibrar el modelo utilizado.

Para la calibración del modelo hidrológico es necesario contar con series de datos de caudal a nivel diario, la selección de las series de precipitación utilizadas se basa en la ubicación de las estaciones más próximas al sitio de interés. Tal y como está programado el modelo como mínimo se requiere una estación de precipitación y como máximo diez, aunque se podría simular con más estaciones si existe una buena información a escala diaria.

Tenido en cuenta que las estaciones de precipitación no poseen datos de temperatura, se procede a calcular estos datos a partir de las ecuaciones regionales de temperatura con el apoyo de las estaciones en donde si se cuenta con datos.

En cuanto a los parámetros a calibrar del modelo hidrológico, se tienen el almacenamiento capilar del suelo, la conductividad del suelo en su capa superficial e inferior; el tiempo medio de residencia del flujo superficial, subterráneo, el flujo base y otros parámetros que inciden en la calibración de la variable de evapotranspiración que posee el modelo de simulación hidrologica. Cada uno de estos parámetros tiene un intervalo de variación entre el valor máximo y mínimo sugerido, valores que se han encontrado en análisis antes realizados por parte de los investigadores que realizaron el presente modelo; éstos valores se muestran en la Tabla 21; para el análisis hidrológico de las cuencas del río Luisa y Directos al Magdalena, los parámetros simulados se encontraron entre los valores sugeridos.

Tabla 21. Intervalos de variación de los parámetros del modelo hidrológico

MODELO DE TANQUES AGREGADO		
Resolución Diaria		
Datos Generales		
Área de la Cuenca en Km2		
Parámetros Hidráulicos	**Mínimo Sugerido**	**Máximo Sugerido**
Almacenamiento Capilar	20	600
Conductividad Capa Sup (mm/día)	1	100
Conductividad Capa Inf (mm/día)	0,01	10
Perdidas Subterráneas (mm)	0	10
Tiempo Medio de Residencia Flujo Superficial (días)	1	10
Tiempo Medio de Residencia Flujo Sub-superficial (días)	1	10
Tiempo Medio de Residencia Flujo Base (días)	50	200
Condiciones Iniciales (mm)		
Almacenamiento Capilar	0	600
Almacenamiento Agua Superficial	0	10
Almacenamiento Gravitacional Z Sup	0	30
Almacenamiento Gravitacional Z Inf (acuífero)	0	2000
Otros Parámetros del Modelo		
Exponente Infiltración	2	2
Exponente Evaporación	0,6	0,6
Radiación Global Incidente Promedia (cal/cm2)/día	350	350

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Durante el proceso de simulación hidrológica se debe tener en cuenta la influencia de cada una de las estaciones de precipitación que se ubican al interior y exterior de la cuenca de análisis, como el valor de la precipitación media anual caída en la cuenca hidrográfica. Para

la presente simulación hidrológica, se realizaron interpolaciones espaciales de la información diaria de precipitación.

Con el propósito de darle una adecuada distribución de los datos de lluvia y temperatura media al interior de las cuencas de análisis, se procedió a darle un peso a cada una de las estaciones de precipitación de acuerdo al área que determino los polígonos de Thiessen.

8.4.2 Metodología de calibración del modelo

El modelo de simulación de hidrológica TETIS versión Agregada, utilizado para la presente simulación, requiere para su uso la entrada de los datos de precipitación, temperatura y caudal para cada intervalo de tiempo (diario) y de manera agregada espacialmente. Posteriormente al ingreso de los datos antes citados, se definen las condiciones iniciales de almacenamiento de los cuatro tanques que componen el modelo de simulación y posteriormente se determinan por ajuste los parámetros finales a usar dentro del proceso final de validación del modelo hidrológico.

Los parámetros sujetos a calibración del modelo son: la capacidad máxima de almacenamiento capilar (HU); los tiempos de residencia del agua en los elementos de almacenamiento Tr2, Tr3 y Tr4; las conductividades hidráulicas de cada capa del suelo (Ks y Kp) y las pérdidas subterráneas X5.

La calibración del modelo se realizó ajustando los parámetros citados anteriormente, buscando coherencia física en los valores utilizados, hasta conseguir un buen ajuste entre la serie de caudal observado y el simulado, además de la correspondencia entre los volúmenes de agua producidos por el modelo y los reales en la cuenca hidrográfica en análisis, analizando para ello la curva de duración de caudales. Este proceso de calibración subjetiva permite incorporar el conocimiento del experto que realiza el proceso de modelación, quien a su vez puede realizar un refinamiento en el proceso de calibración empleando optimizaciones matemáticas como lo presentan Medici et al. (2008) y Perrin et al. (2001), variando los parámetros entre valores esperados.

Es importante considerar que, en el proceso de calibración del modelo, que conceptualmente los tiempos de residencia del agua en los tres tanques que contribuyen a la escorrentía superficial, disminuyen del tanque T2 al T4; igualmente se supone que la capa de suelo que se encuentran a mayor profundidad posee una permeabilidad menor que la que tiene la capa existente en la parte superior.

Finalmente, una vez obtenido un grupo de los parámetros satisfactorios en el proceso de calibración, se procede a evaluar la bondad del ajuste entre la serie observada y la serie simulada, mediante el uso de los siguientes criterios matemáticos:
El error porcentual en el balance (BE), cuyo óptimo en es el 0%.

$$BE(\%) = \frac{\left|\tilde{Q}sim - \tilde{Q}obs\right|}{\tilde{Q}sim}.100$$

El coeficiente de eficiencia de Nash (E1), cuyo óptimo en es el 1% (Nash y Sutcliffe, 1970).

$$E1\ (\%) = \left(1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}(Qt,sim - Qt,obs)^2}{\sum_{t=1}^{T}(Qt,obs - \tilde{Q}t,obs)^2}\right).100$$

El coeficiente de eficiencia de Nash para la raíz cuadrada de los caudales (E2), cuyo óptimo es el 1% y minimiza el efecto negativo sobre el indicador de error tradicional dado por las grandes desviaciones que se presentan en los caudales pico (Chiew y McMahon, 1994).

$$E2\ (\%) = \left(1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}\left(\sqrt{Qt,sim} - \sqrt{Qt,obs}\right)^2}{\sum_{t=1}^{T}\left(\sqrt{Qt,obs} - \sqrt{\bar{Q}t,obs}\right)^2}\right).100$$

Donde, Qt obs, y Qt sim, son los caudales observados y simulados para el día t respectivamente, $\bar{Q}$obs y $\bar{Q}$sim son el caudal medio observado y simulado en el periodo de calibración respectivamente y T es el número total de días del periodo de calibración.

Tabla 22. Intervalos de valoración del rendimiento del modelo a partir del número de Nash

NASH	RSR	Interpretación del Modelo
0,75 < NASH < 1,0	0,00 < RSR < 0,50	Muy Bueno (MB)
0,65 < NASH < 0,75	0,50 < RSR < 0,60	Bueno (B)
0,50 < NASH < 0,65	0,60 < RSR < 0,70	satisfactorio (S)

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

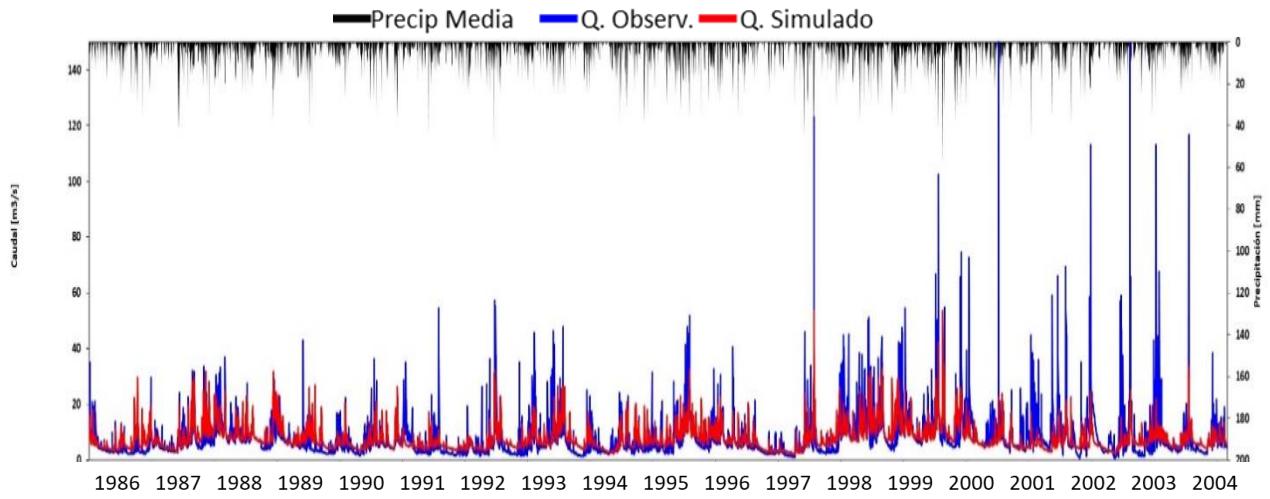
Para disminuir la influencia de las condiciones iniciales en la simulación, se utilizan valores promedios de almacenamiento en cada uno de los tanques en periodos climáticos similares a los que anteceden al inicio de la simulación, e igualmente se dejan periodos de "calentamiento" de duraciones iguales o mayores al tiempo de residencia del agua en el tanque T4, que oscilan entre 3 a 6 meses.

8.4.2.1 Calibración del modelo Hidrológico

Para la modelación hidrológica de la Cuenca del río Luisa y los directos al Magdalena, se utilizó la serie de datos a nivel diario de la estación Hidrológica Cucunuba con código 21187030 , ubicada sobre el cauce del rio luisa en el municipio de Valle de San Juan, aguas arriba de la captación de agua del puente que conecta al municipio de San Luis y el municipio de valle de San Juan; esta serie de datos está comprendida entre el 01/01/1986 y el 31/12/2014 para un total de 29 años de datos, la cual fue dividida en dos periodos de tiempo; la primera parte se ubica entre el 01/01/1986 y el 31/12/2004 (19 años), esta periodo de tiempo fue utilizado para adelantar la etapa de calibración, la segunda parte comprendido entre 01/01/2005 al 31/12/2014 (10 años), fue utilizado para la validación de los datos; además de lo anterior y con el propósito de observar el comportamiento de la serie de datos, se realizó la validación de la serie total de los datos existentes 01/01/1986 al 31/12/2014.

En las figuras 30 y 31, y la tabla 23, muestran la serie gráfica del fluviograma de caudales simulados en el proceso de calibración, como también curva de permanencia para la serie de datos utilizada y los parámetros hallados en este proceso.

Figura 30. Serie de caudales simulados durante el periodo de calibración para la estación hidrológica La Nueva (1986 – 2004)



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 23. Parámetros de calibración estación La Nueva

Datos Generales	
Área de la Cuenca en Km^2	323,00
Parámetros	**valores**
Almacenamiento Capilar	600
Conductividad Capa Sup (mm/día)	60
Conductividad Capa Inf (mm/día)	4
Perdidas Subterráneas (mm)	0
Tiempo Medio de Residencia Flujo Superficial (días)	4
Tiempo Medio de Residencia Flujo Sub-superficial (días)	3,5
Tiempo Medio de Residencia Flujo Base (días)	90
Otros Parámetros del Modelo	
Exponente Infiltración	1,8
Exponente Evaporación	0,4
Radiación Global Incidente Promedia (cal/cm^2)/dio	300

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

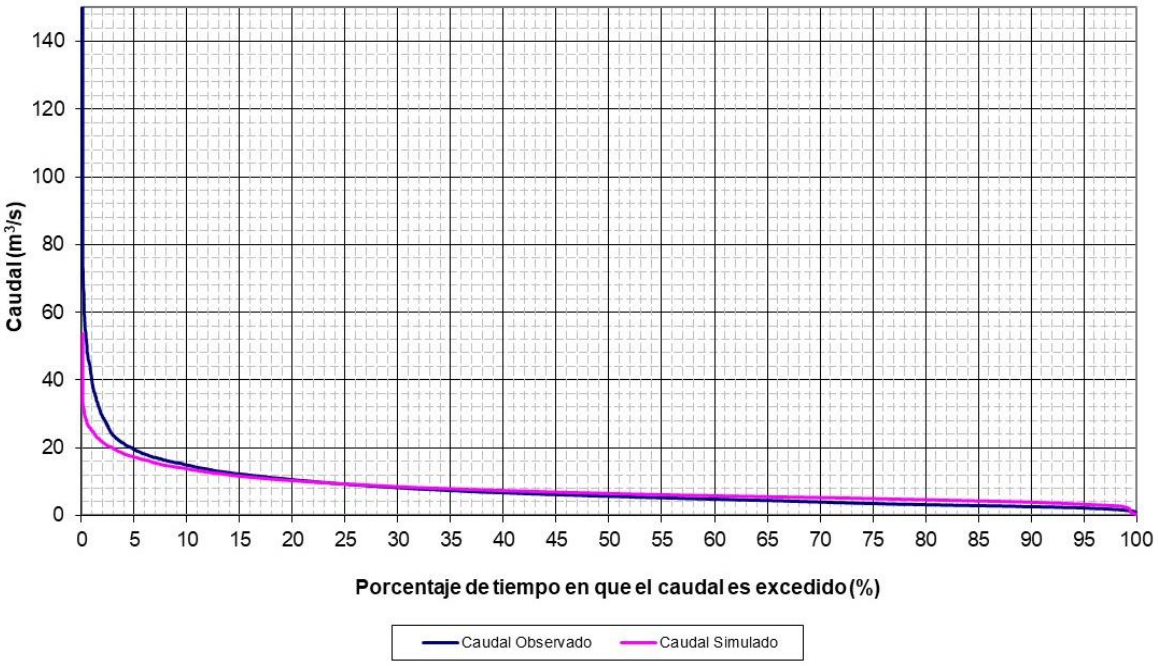
Tabla 24. Parámetros de evaluación y rendimiento del modelo (calibración)

Q Med Simulado	7.834	**Balance**	**E1 (NASH)**	**E2 (NASH)**
Q Med Real	7.797	0.48	0,757	0,99

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Los indicadores de error (de Balance, %RMSE, ENASH1 y ENASH2) muestran que el modelo de tanques reproduce muy bien las principales características de la serie de caudales medios diarios de la estación la Nueva, dentro de este proceso que los indicadores de error medio de balance *(BE*), el cual fue de 0,48%, y el uso de los criterios matemáticos del modelo *E1 = 0,757* y *E2 = 0,99,* corresponden a los números de NASH, determinan y según la tabla 24, que el modelo hidrológico presento un buen a un muy buen rendimiento respectivamente.

Figura 31. Curva de duración de caudales – periodo de calibración del río Luisa y directos al Magdalena, estación Cucunuba (1986 -2004)



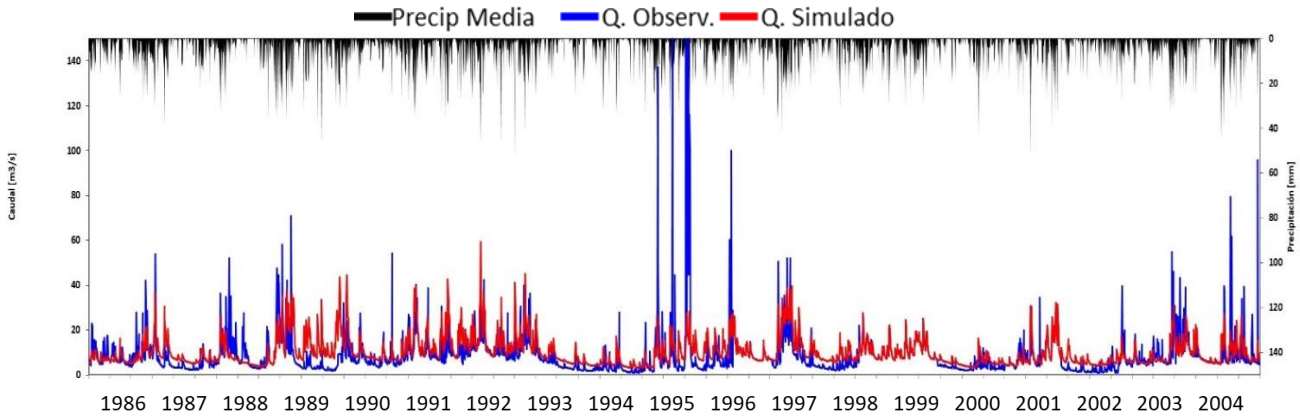
Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

8.4.3 Validación de los resultados

Una vez lograda una adecuada calibración de la serie de datos inicialmente usada para la modelación hidrológica de la Cuenca del rio Luisa parte alta y tal como se mencionó anteriormente, se evaluó nuevamente el ajuste del modelo para un nuevo periodo de tiempo, tanto para la serie de datos comprendida entre 01/01/2005 al 31/12/2014 (10 años), como par la serie total de datos 01/01/1986 al 31/12/2014 (29 años), sin que haya requiera ajustar los parámetros previamente calibrados, es decir, se valida el modelo (Refsgaard, 1997; Moriasi et al, 2007). Usando los datos de precipitación, temperatura y caudales de las estaciones ubicadas en el área de influencia de la cuenca objeto del proceso de calibración y validación; a partir de lo anterior, se procedió a validar los resultados, a lo anterior es importante resaltar de los procedimientos antes mencionados, que de la serie total datos de caudal utilizada para los procesos de calibración y validación existía un bajo porcentaje de datos faltantes, lo cual permitió un adecuado calculo los indicadores de validación; sin embargo, es necesario destacar que, el proceso de modelación está orientado hacia la representación adecuada de los caudales medios y mínimos de la

corriente, con el propósito de simular adecuadamente la oferta hídrica y los caudales ambientales.

Figura 32. Serie de Caudales simulados durante el periodo de validación para la estación hidrológica Cucunuba (2005 – 2014)



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

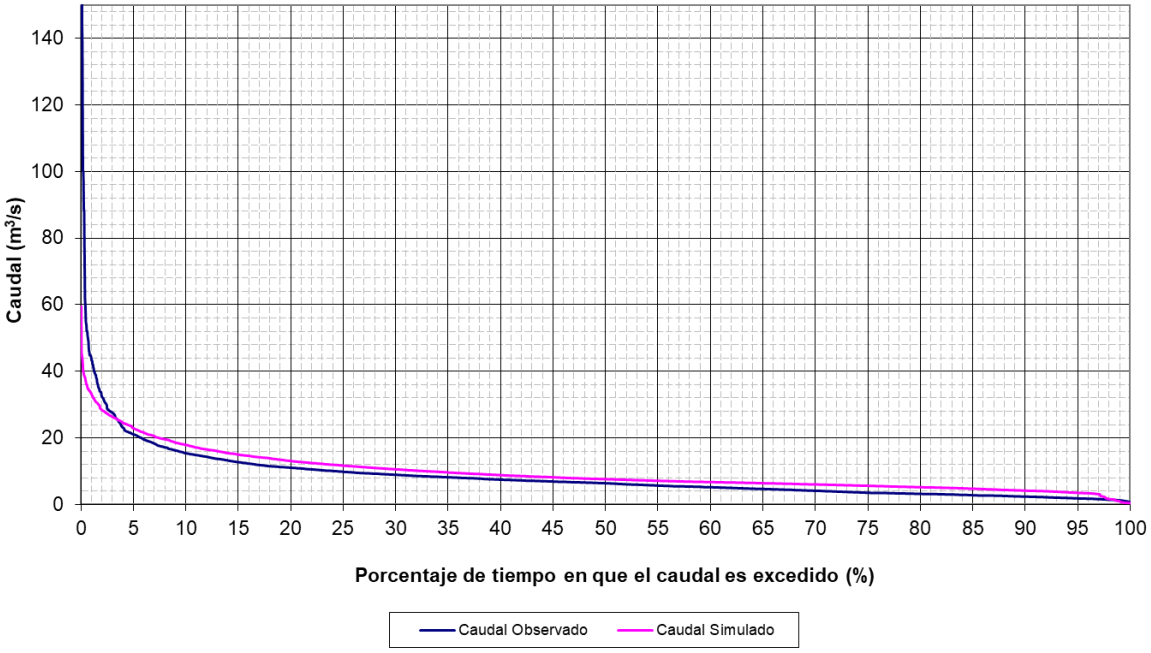
Tabla 25. Parámetros de evaluación y rendimiento del modelo (validación)

Q Med Simulado	9.639	**Balance**	**E1 (NASH)**	**E2 (NASH)**
Q Med Real	8,459	13,95	0,826	0,98

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Como primer indicador de validación se estimó el error medio de balance *(BE*), el cual fue del 13,09%, por lo que se puede afirmar que el modelo representa adecuadamente los caudales medios de la corriente. En la tabla 28 se presenta la comparación del caudal medio multianual para la cuenca del río Luisa con respecto a los datos observados Vs la serie de datos simulados; como segundo paso de evaluación de rendimiento del modelo se procedió a evaluar la bondad del ajuste entre la serie observada y la serie simulada, mediante el uso de los criterios matemáticos del modelo *E1 = 0,826* y *E2 = 0,98,* corresponden a los números de NASH, con estos valores se puede determinar y según la Tabla 25, presenta de un muy buen rendimiento del modelo respectivamente.

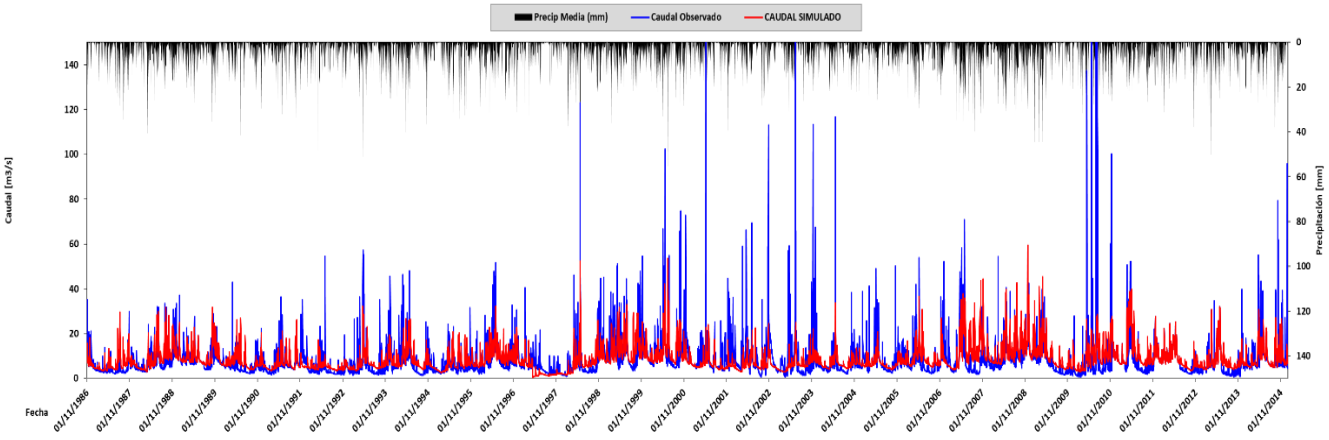
Figura 33. Curva de duración de caudales – periodo de validación del río Luisa, estación Cucunuba (2005 -2014)



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

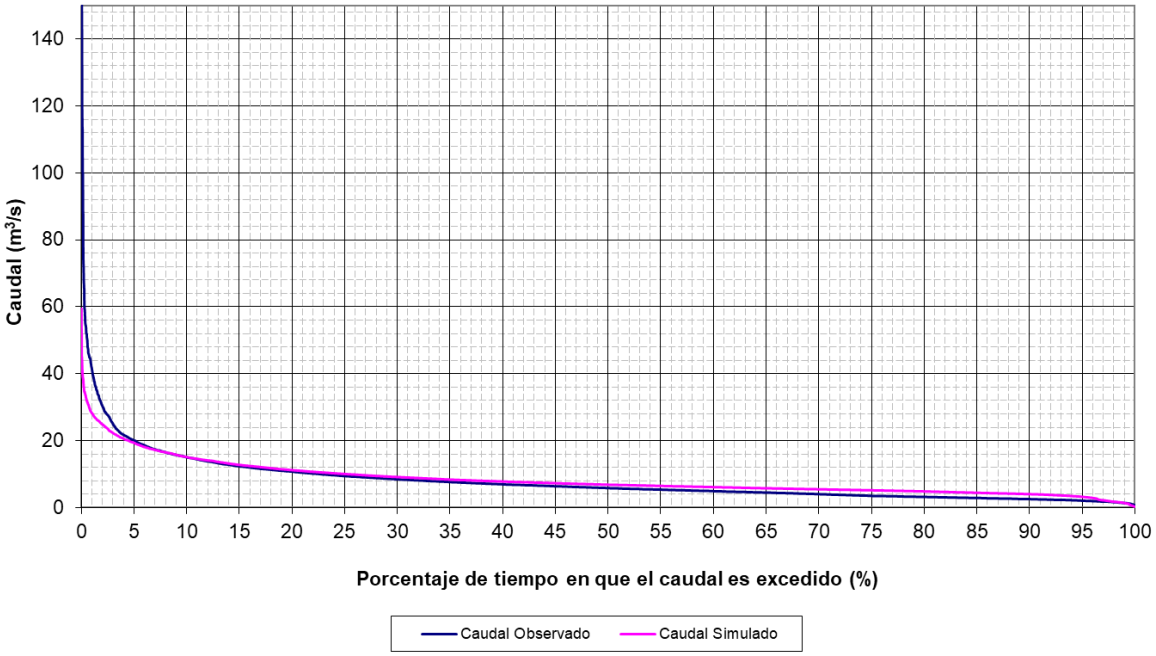
Por último y con el propósito de validar toda la serie da datos de caudal para la estación hidrológica La Nueva, se realizó la modelación total de los datos de caudal desde el 01/01/1986 al 31/12/2014, en la figura 34 se observa el fluviograma de caudales observados Vs caudales simulados para este proceso.

Figura 34. Serie de caudales simulados durante el periodo de validación total para la estación hidrológica Cucunuba (1986 – 2014)



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Figura 35. Curva de duración de caudales – periodo de validación del rio Luisa, estación Cucunuba (1986 -2014)



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 26. Parámetros de evaluación y rendimiento del modelo (validación total)

Q Med Simulado	7,834	BALANCE	E1 (NASH)	E2 (NASH)
Q Med Real	7,797	0,48	0,757	0,99

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Como se puede observar en las figuras 34 y 35, y la tabla 26 los valores de rendimiento, el modelo Hidrológico TETIS versión Agregada, presenta resultados satisfactorios, lo cual permite evidenciar que el mismo pudo recrear matemáticamente los procesos físicos que presentan al interior de la parte alta de la cuenca del rio Luisa.

8.4.4 Resultados del modelo

Partiendo de los procesos antes mencionados y como quiera que el área hidrológica del río Luisa y Directos al Magdalena presenta las mismas características físicas por su cercanía, nos permitimos calcular los caudales para las cuencas o unidades hidrológicas inicialmente establecidas; a continuación, se presentan los caudales medios calculados en este proceso.

Tabla 27. Caudales medios cuenca rio Luisa – medio modelación hidrológica

Caudales simulados Rio Luísa - Modelo hidrológico		
Unidad Hidrográfica	**Área**	**Q - Medio**
Rio Luisa parte alta	323,00	8,037971
Rio Luisa parte baja	185,10	4,593195
Directos al Rio Luisa parte baja - Q Guaduas	167,02	3,861117
Directos al Rio Luisa parte baja - Q Serrezuela	44,37	1,018976

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 28. Caudales medios cuencas directos al Magdalena - modelación hidrológica

Caudales simulados Directos al Magdalena Modelo Hidrológico		
Unidad Hidrográfica	**Área**	**Q - Medio**
Directos al Magdalena - Q Palito y otros	55,11	1,524328
Directos al Magdalena - Q Santana y otros	137,62	2,391985
Directos al Magdalena - Q Agua Sucia y otros	51,96	1,399308
Directos al Magdalena - Q Guayabal y otros	57,80	1,191138
Q Eneal	59,56	1,435936

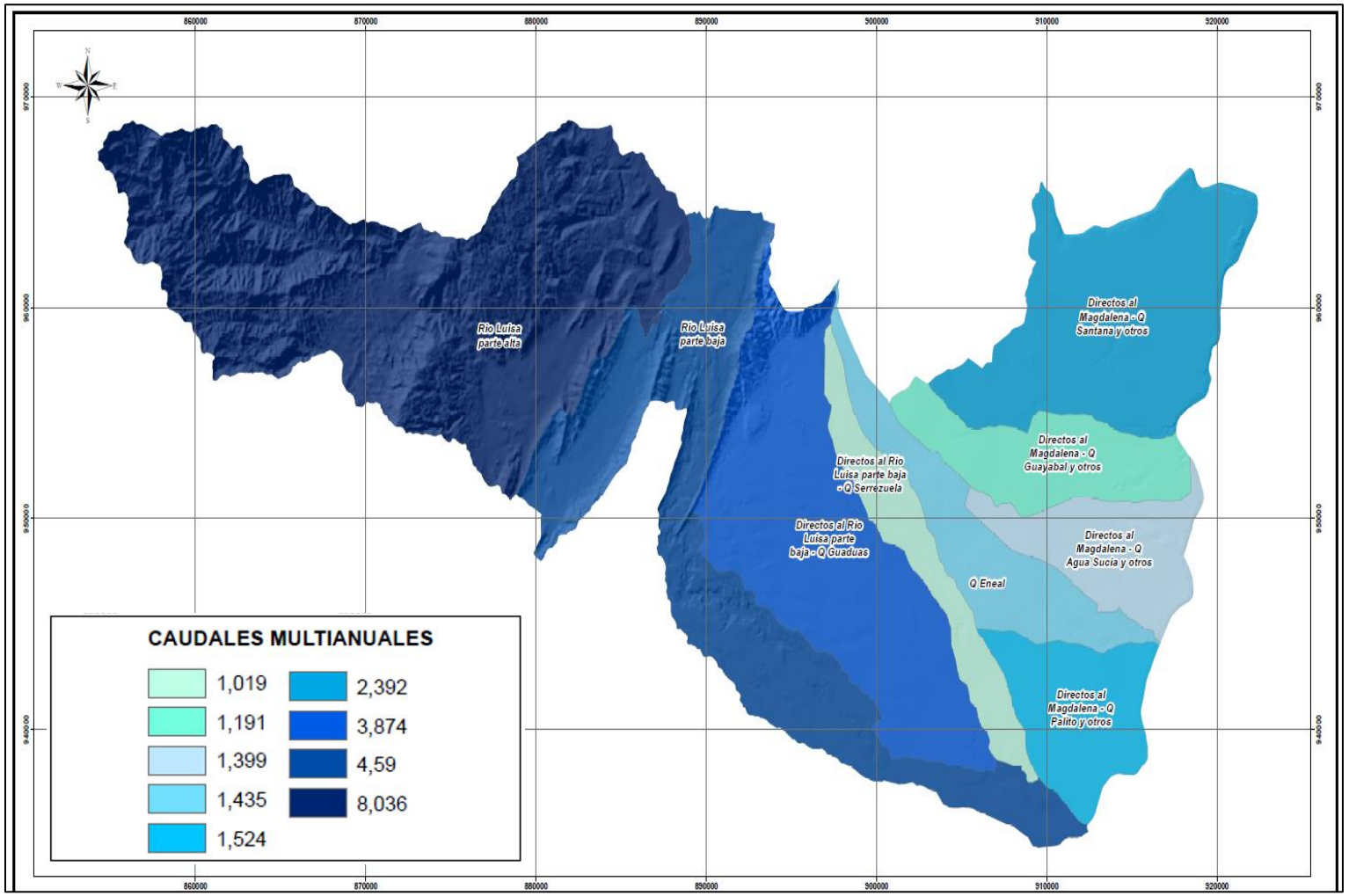
Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 29. Caudales medios mensuales de la cuenca río Luisa y directos al Magdalena – mediante modelación hidrológica

UNIDAD HIDROGRAFICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Rio Luisa parte alta	5,984	6,340	7,573	11,191	12,681	8,587	6,435	4,038	5,358	8,417	10,868	8,959
Directos al Magdalena - Q Palito y otros	1,094	1,031	1,360	2,929	2,857	1,366	0,809	0,634	0,840	1,633	2,153	1,578
Directos al Rio Luisa parte baja - Q Guaduas	2,772	2,860	3,598	6,034	6,753	4,364	2,915	2,272	2,708	3,890	4,678	3,541
Directos al Rio Luisa parte baja - Q Serrezuela	0,696	0,715	0,951	1,721	1,828	1,142	0,757	0,570	0,667	0,998	1,233	0,945
Rio Luisa parte baja	3,418	3,302	4,282	7,051	7,988	5,076	3,473	2,702	3,041	4,557	5,651	4,545
Directos al Magdalena - Q Santana y otros	1,824	1,838	2,171	3,804	3,997	2,770	1,848	1,385	1,720	2,235	2,714	2,396
Directos al Magdalena - Q Agua Sucia y otros	1,004	0,950	1,249	2,656	2,613	1,281	0,774	0,607	0,784	1,486	1,942	1,438
Directos al Magdalena - Q Guayabal y otros	0,824	0,826	1,109	2,019	2,143	1,342	0,890	0,676	0,793	1,171	1,377	1,115
Q Eneal	0,982	0,973	1,320	2,583	2,666	1,504	0,955	0,723	0,866	1,450	1,809	1,393

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Figura 36. Caudales multianuales de la cuenca del río Luisa y otros directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

8.5 RENDIMIENTO HÍDRICO

Aunque el rendimiento hídrico no es un componente directo de la expresión del balance hídrico, sí es un factor que depende de la escorrentía y del área aferente hasta el sitio de observación. El rendimiento se considera, entonces, como un elemento que contribuye fundamentalmente a estimar, a través de metodologías indirectas, el aporte de una cuenca, caso de las fuentes que abastecen los acueductos municipales, que generalmente carecen de estaciones hidrométricas, (Chow, 1964).

El rendimiento expresado en litros por segundo por km^2, ($l/s.km^2$) se origina de los caudales medios que la cuenca concentra en un determinado punto debido a la precipitación efectiva que fluye por su superficie y del aporte que entregan las aguas subterráneas, que sumados por unidad de tiempo (segundo) y distribuidos por unidad de área (km^2), determinan una tendencia de abundancia o escasez del recurso. El rendimiento hídrico es inversamente proporcional al área de la cuenca.

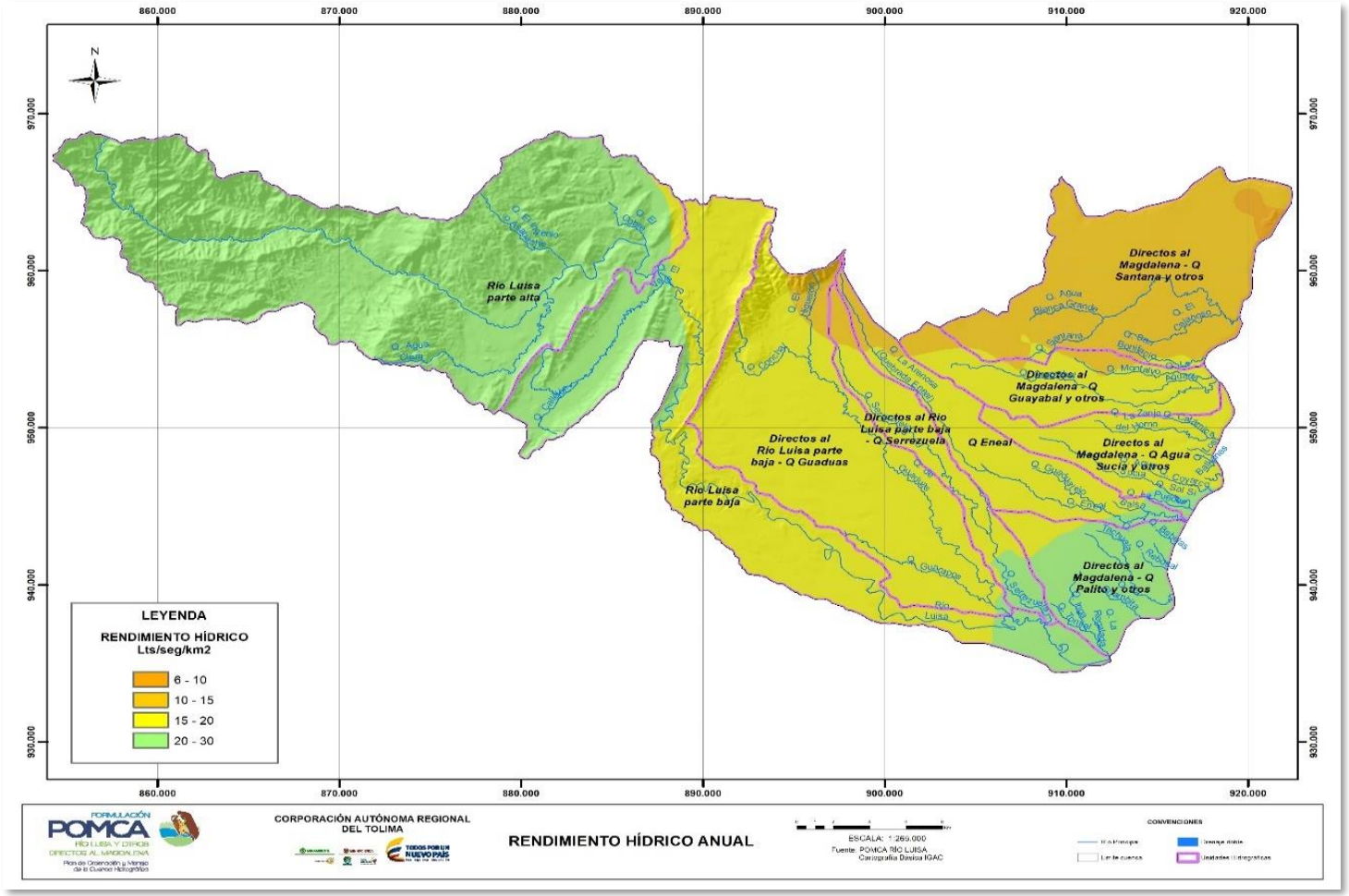
El rendimiento hídrico se calcula dividiendo el caudal medio estimado (l/s), en un lugar determinado por su área aferente (km^2). En la figura 37 a la figura 39 aparecen los mapas con los rendimientos anuales y mensuales.

Tabla 30. rendimientos hídricos para las unidades hidrográficas de la cuenca del río Luisa y directos al Magdalena

Unidades Hidrológicas	Caudal (l/s)	Área km2	Rendimiento (l/s*km2)	Volumen (m. m3)
Rio Luisa parte alta	8035,80	323,00	24,88	253.485
Directos al Magdalena - Q Palito y otros	1523,73	55,10	27,65	48.071
Directos al Rio Luisa parte baja - Q Guaduas	3873,57	167,00	23,20	121.764
Directos al Rio Luisa parte baja - Q Serrezuela	1018,62	44,40	22,94	32.134
Rio Luisa parte baja	4590,43	185,10	24,80	144.844
Directos al Magdalena - Q Santana y otros	2391,87	137,60	17,38	75.434
Directos al Magdalena - Q Agua Sucia y otros	1398,72	52,00	26,90	44.128
Directos al Magdalena - Q Guayabal y otros	1190,52	57,80	20,60	37.563
Q Eneal	1435,21	60,00	23,92	45.285

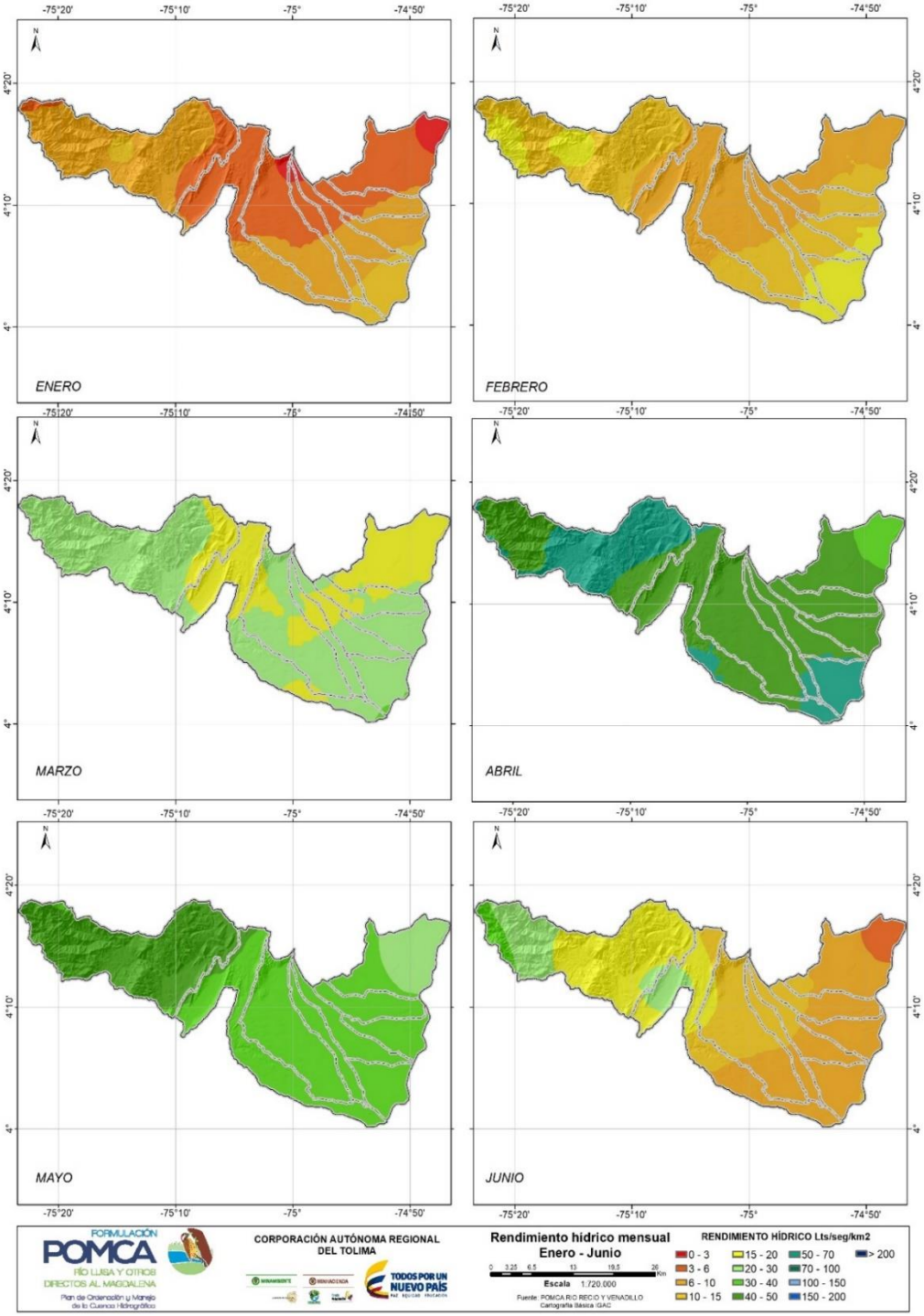
Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Figura 37. Rendimiento anual cuenca del río Luisa y directos al Magdalena



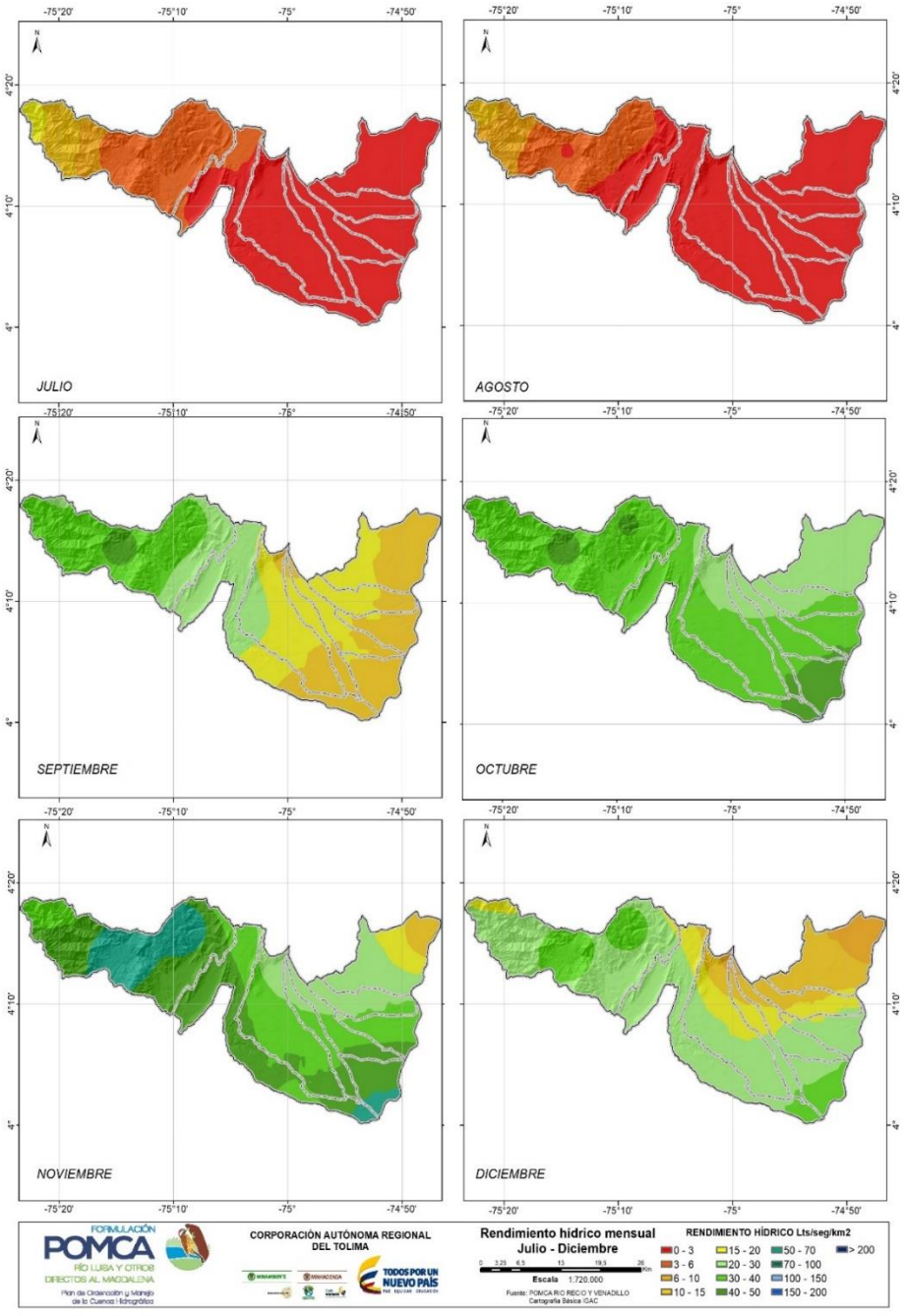
Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Figura 38. Rendimiento primer semestre cuenca del río Luisa y directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Figura 39. Rendimiento segundo semestre cuenca del río Luisa y directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

8.6 CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES

Con el fin de evaluar el potencial hídrico a nivel de cuencas pequeñas se construyen curvas típicas de caudales medios diarios, mensuales o anuales, donde se analizan las condiciones de disponibilidad del recurso hídrico que muestra, mediante, el Índice de Variabilidad (IV) y el de Capacidad de Retención y Regulación natural de las cuencas (IR), (Monsalve, 1999).

La caracterización de la curva de duración de caudales medios depende principalmente de la cobertura vegetal, de la pendiente del terreno y del tipo de suelos entre otros factores. La tendencia de la curva refleja las condiciones de regulación natural y la variabilidad del régimen de la corriente para el periodo estimado. Si se cuenta con una serie suficientemente amplia se puede considerar como una curva típica de frecuencias acumuladas, donde el eje de las ordenas representa el módulo de normalización (caudal Qi, dividido por el caudal promedio de la serie Qi/Qmed.) y en el eje de las abscisas el porcentaje (%) de tiempo (año, mes, día), (Monsalve, 1999).

De las características más relevantes que se originan de la curva de duración de caudales medios están: el Índice de Variabilidad (IV), que muestra la variación de los caudales promedios durante un año típico, el Índice de Retención y de Regulación Hídrica (IR), y la estimación del caudal ambiental, fundamental para mantener el ecosistema aguas abajo del sitio de captación.

En los estudios hidrológicos que se realizan para administrar el recurso hídrico en pequeñas cuencas, se hace necesario elaborar curvas de duración de caudales medios mensuales con los cuales se garantizaría el conocimiento de la disponibilidad de agua a través del año. Entre las aplicaciones que ofrece la curva de duración de caudales tienen notabilidad los siguientes campos:

- Estudios de suministro de agua potable
- Estudios de aprovechamiento de agua con fines de riego
- Estudios de aprovechamiento hidroeléctrico
- Análisis para el dimensionamiento de embalses
- Comparación de corrientes fluviales
- Control de contaminación de agua

(Anexo 2)

8.7 CAUDAL AMBIENTAL

A pesar de las múltiples metodologías propuestas para definir el caudal ambiental o ecológico, no hay un procedimiento ideal que lo identifique y resuelva los intereses en cada caso específico. Sin embargo, en el Estudio Nacional del Agua IDEAM 2010, se propuso una metodología que se aproxima en parte a los criterios y objetivos; pero por ser un estimativo general puede, en ciertas condiciones especiales, revaluarse a nivel regional o local para la gestión integrada del recurso hídrico (IDEAM, 2010).

El caudal ambiental se sustenta en la regulación establecida por el MAVDT a partir del Decreto 3930 del 25 de octubre de 2010, que lo define como “Volumen de agua necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los usuarios aguas abajo de la fuente de la cual dependen tales ecosistemas”. El criterio considerado en la determinación del caudal ambiental fue realizar en principio el análisis de las curvas de duración de caudales medios diarios y mensuales de las estaciones representativas en diferentes regímenes hidrológicos.

Para el desarrollo del presente capitulo se escogió la metodología denominada “Porcentaje de Descuento”; dicha metodología fue propuesta por el IDEAM donde adopta como caudal mínimo ecológico un valor aproximado del 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente en estudio (Resolución 865 de 2004, MAVDT).

En el Decreto 3930 del 25 de octubre del 2010 se define El *Caudal Ambiental* como: “el volumen de agua necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los usuarios aguas abajo de la fuente de la cual dependen tales ecosistemas” ("Decreto 3930 ", 2010).

Aún no existe un método que se haya aprobado consensualmente para determinar el caudal ambiental apropiado para cada caso específico, sí existen una serie de conceptos para tener en cuenta en la determinación el caudal ambiental de acuerdo con criterios y objetivos para su aplicación (IDEAM, 2010).

Hidrológico: Se fundamenta en el conocimiento de las series históricas de caudales en sitios de interés; las cuales dan la base para definir el comportamiento del régimen de la cuenca *Hidráulico*: Se considera desde el punto de vista de la conservación, comportamiento y dinámica del ecosistema fluvial a lo largo del río.

Biológico: Se refiere al hábitat (fauna y flora) se deben considerar los caudales necesarios para la supervivencia de las especies en desarrollo.

Aspectos integrales: identificación de caudales requeridos para las necesidades humanas (calidad del recurso, usos socioeconómicos, investigación, bienes y servicios, etc.)

Caudal Disponible (QD) El Caudal disponible resulta de sustraer del caudal total (QT) el caudal ambiental (Qamb). De esta manera mediante la sustracción de este caudal ambiental con los caudales totales del régimen natural, se definieron los caudales disponibles para ser utilizados en el índice de uso del agua (IUA) (IDEAM, 2013).

*Oferta hídrica total disponible OHTD-: Es e*l volumen de agua promedio que resulta de sustraer a la oferta hídrica total superficial el volumen de agua que garantizaría el uso para el funcionamiento del ecosistema, de los sistemas fluviales y –en alguna medida- un caudal mínimo para usuarios que depende de las fuentes hídricas asociadas a estos ecosistemas (caudal ambiental).

9 ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS Y MÍNIMOS

9.1 CAUDALES MÁXIMOS

Para realizar el cálculo de los caudales máximos de las hoyas hidrográficas que poseen áreas de drenaje mayores a 2.5 Km2, se utiliza la metodología del hidrograma unitario sintético del Soil Conservation Service del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, al cual se le aplica la lluvia efectiva de diseño. En este caso se han estudiado hoyas hidrográficas que tienen áreas mayores al valor previamente mencionado de 2.5 km².

9.1.1 Hoyas hidrográficas mayores a 2.5 km²

En primer término, estos cálculos se han concentrado en hoyas hidrográficas con áreas de drenaje mayores a 2.5 km², debido a que no se contó con datos históricos de caudales máximos instantáneos.

Para ello, se utilizó la metodología del hidrograma unitario sintético del Soil Conservation Service del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, al cual se le aplicó la lluvia efectiva de diseño. Tanto estos hidrogramas como los de creciente de escorrentía superficial para diferentes periodos de retorno fueron calculados con base en el programa de computador HEC – HMS.

En la Tabla 31 se presentan las características geométricas más importantes de estas cuencas hidrográficas seleccionadas, como son: área de drenaje, longitud del cauce principal y pendiente total del cauce. Los cálculos de estos parámetros se han basado en mediciones realizadas sobre el modelo digital de elevación de la zona de interés a través de la herramienta computacional ArcGis.

Tabla 31. Características geométricas e hidrográficas cuencas seleccionadas

Nombre	Área Cuenca (km²)	Área Cuenca (m²)	Longitud Del Cauce (m)	Longitud Del Cauce (km)	H (m)	Pendiente Del Cauce S (m/m)
Río Luisa	719.50	719500000	122580	122.58	3100.00	0.0067
Directos Magdalena Sector La Chamba	31.94	31940000	11030	11.03	42.00	0.0038
Quebrada La Chamba Grande	12.76	12763465	8929	8.93	50.00	0.0084
Directos Magdalena Sector Monica	10.40	10401189	4040	4.04	25.00	0.0062
Quebrada Eneal	59.56	59562844	32850	32.85	300.00	0.0036
Quebrada Agua Sucia	24.52	24521141	12517	12.52	68.00	0.0036
Quebrada Coyarcosa	9.41	9406465	5016	5.02	40.00	0.0047
Directos Magdalena	18.04	18035430	8930	8.93	25.00	0.0028
Quebrada Guayabal O La Pioja	45.08	45078102	19110	19.11	100.00	0.0038
Quebrada Montalvo	12.73	12725739	8941	8.94	50.00	0.0045
Quebrada San Bonifacio	3.91	3906797	6251	6.25	29.00	0.0048
Quebrada Las Chontas Y Otros	4.13	4126415	5526	5.53	25.00	0.0045
Quebrada Santa Ana	72.21	72214409	20191	20.19	100.00	0.0021
Directos Magdalena Sector Flandes	57.37	57368495	14461	14.46	100.00	0.0069
Estación Pavo Real	167.92	167920000	31392	31.39	2681.00	0.0430

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, 2017

9.1.1.1 Hietogramas de los aguaceros puntuales

Con base en las curvas intensidad – duración – frecuencia, presentadas en el Anexo No. 3, para cada una de las estaciones seleccionadas, se calcularon las curvas de masas de los aguaceros puntuales para duraciones entre 0 y 180 min y periodos de retorno entre 2 y 500 años, las cuales se presentan en el Anexo No. 3.

Posteriormente, con base en estas curvas de masas se calcularon los hietogramas de los aguaceros puntuales respectivos para las estaciones, los cuales se presentan en el Anexo No. 3.

Para dar una secuencia más crítica del aguacero, como es usual en este tipo de análisis, mediante el método del Bloque Alterno, los incrementos de lluvia de los hietogramas mencionados previamente fueron arreglados de la siguiente manera: el valor más bajo se colocó en el primer lugar, el segundo valor en orden creciente se colocó en último lugar, el tercer valor en tal orden se ubicó en segundo lugar, el cuarto valor se localizó en el penúltimo lugar, y así sucesivamente. El resultado de estos cálculos se presenta en el Anexo No. 3, y corresponde con los hietogramas de lluvia puntual de los aguaceros de diseño.

9.1.1.2 Hietogramas de los aguaceros espaciales

Los hietogramas de lluvia puntual fueron transformados a hietogramas de lluvia espacial, para tener en cuenta el hecho de la espacialidad de la hoya, y de que la precipitación promedio en un aguacero en una hoya es menor a medida que aumenta su área de drenaje.

El coeficiente de reducción de la lluvia por el tamaño del área de drenaje se ha calculado utilizando el procedimiento que se muestra a continuación, y con el fin de tener un valor más seguro y conservador en relación con este coeficiente, se ha definido su valor final igual al promedio de las ecuaciones que se muestran en este procedimiento.

- **Factor de Reducción de la Lluvia Puntual por Área de Drenaje:** En general, la precipitación para una duración determinada (o, en otras palabras, la intensidad promedio) decrece desde el centro de las tormentas, a medida que la distancia se incrementa a partir de este punto. La precipitación máxima es representativa del centro de las tormentas, por lo cual la precipitación promedio en la totalidad del área de drenaje deberá ser menor, dependiendo del tamaño y forma de la cuenca, de las tormentas históricas registradas, y de la localización del centro de precipitación máxima.

El cálculo de la reducción de la precipitación a medida que se incrementa el área de drenaje se hace por medio de curvas de profundidad – área – duración para duraciones determinadas de la precipitación. Para cada duración específica de la precipitación se analizan las tormentas que tengan cubrimiento grande sobre el área de drenaje en consideración, y que sean suficientemente intensas. Posteriormente, se dibujan las

isolíneas de precipitación de cada tormenta, y por medio de éstas se calculan las curvas de profundidad de precipitación - área de drenaje para cada duración.

La relación entre la profundidad de la precipitación, relacionada a diferentes áreas de drenaje, y la precipitación puntual, definida como el factor de reducción, se calcula posteriormente para modificar las curvas anteriores.

Finalmente, se calcula la envolvente de las curvas definidas en el paso anterior para cada duración, la cual define la curva representativa de la relación profundidad de precipitación - área de drenaje de la cuenca.

Para la definición de este parámetro se han estudiado tres autores distintos según la referencia bibliográfica Instituto Nacional de Vías, INVIAS, "Manual de Drenaje para Carreteras", Ministerio de Transporte, Subdirección de Apoyo Técnico, Bogotá D.C., 2009, que presenta ecuaciones en las cuales se relaciona básicamente el área de drenaje y el tiempo de concentración de la cuenca para definir un coeficiente de reducción de la lluvia puntual.

✓ **Fórmula de Fhrüling**

El coeficiente de reducción de la lluvia por el tamaño del área de drenaje se ha calculado, en primer término, de acuerdo con la ecuación de Fhrüling que expresa:

$$i_m = i_0 \, f(a)$$

O:

$$i_m = i_0 \, (1 - 0.0054 \, A^{0.25})$$

En donde:

i_m: Intensidad promedio de lluvia en la hoya hidrográfica, mm/h.

i_0: Intensidad de lluvia puntual medida en la estación registradora, mm/h.

$(1 - 0.0054 \, A^{0.25})$: Coeficiente de reducción de la lluvia, f(a), por el tamaño del área de drenaje A, estando esta última variable expresada en m².

✓ **Fórmula del Institution of Civil Engineers**

Esta metodología fue presentada para Inglaterra por el Institution of Civil Engineers, Proceedings, 2nd Part, "Flood Studies Report", Volume 65, Research and Theory, june 1978, que expresa:

$$i_m = i_0 \, f(a)$$

O:

$$i_m = i_0 \, (1 - 0.0268 \, tc^{-0.261} \, A^{0.387})$$

En donde:

i_m: Intensidad promedio de lluvia en la hoya hidrográfica, mm/h.

i_0: Intensidad de lluvia puntual medida en la estación registradora, mm/h.

$(1-0.0268\ tc^{-0.261}\ A^{0.387})$: coeficiente de reducción de la lluvia, f(a), por el tamaño del área de drenaje A, estando esta última variable expresada en m² y por el tiempo de concentración de la hoya tc, expresado en horas.

✓ **Fórmula de Norte América**

Esta metodología fue desarrollada con datos tomados en los Estados Unidos de forma experimental.

$$i_m = i_0\ f(a)$$

O:

$$i_m = i_0\ (1- 0.05\ tc^{0.361}\ A^{0.264})$$

En donde:

i_m: Intensidad promedio de lluvia en la hoya hidrográfica, mm/h.
i_0: Intensidad de lluvia puntual medida en la estación registradora, mm/h.

$(1-0.05\ tc^{0.361}A^{0.264})$: coeficiente de reducción de la lluvia, f(a), por el tamaño del área de drenaje A, estando esta última variable expresada en m² y por el tiempo de concentración de la hoya tc, expresado en horas.

Para el caso de la hoya hidrográfica menor a 2.5 km² se ha adoptado igual a la unidad, mientras que, para la cuenca mayor, se ha definido como representativo el valor obtenido mediante la media de las ecuaciones presentadas anteriormente.

- **Tiempo de Concentración:** Cuando se este procedimiento, se debe suponer que el caudal máximo ocasionado por una determinada intensidad del aguacero de diseño sobre un área de drenaje específica es producido por el referido aguacero, el cual se prolonga durante un período de tiempo igual al tiempo de concentración del flujo en el punto bajo consideración.

Técnicamente, se define este último como el tiempo de concentración, T_C, el cual es el tiempo requerido para que la escorrentía superficial llegue al punto bajo consideración desde la parte más apartada del área de drenaje.

De acuerdo con las referencias bibliográficas indicadas para el tiempo de concentración, Tc, se han analizado las siguientes fórmulas:

✓ **Fórmula de Kirpich**

$$Tc = 0.0078 L^{0.77} S^{-0.385}$$

En donde:

TC: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en min.
L: Longitud del cauce principal, en pies.
S: Pendiente total del cauce principal, igual a la caída total entre la longitud del cauce principal, en pie/pie.

✓ **Fórmula de Temez**

$$Tc = 0.3\left(\frac{L}{S^{0.25}}\right)^{0.75}$$

En donde:

TC: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en h.
L: Longitud del cauce principal, en km.
S: Pendiente total del cauce principal, igual a la caída total entre la longitud del cauce principal, en porcentaje.

✓ **Fórmula de Giandotti**

$$Tc = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{25.3\sqrt{LS}}$$

En donde:

TC: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en h.
A: Área de la cuenca, en km².
L: Longitud del cauce principal, en km.
S: Pendiente total del cauce principal, igual a la caída total entre la longitud del cauce principal, en m/m.

✓ **Fórmula de V.T. Chow**

$$Tc = 0.273\left(\frac{L}{S^{0.5}}\right)^{0.64}$$

En donde:

TC: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en h.
L: Longitud del cauce principal, en km.
S: Pendiente total del cauce principal, igual a la caída total entre la longitud del cauce principal, en m/m.

✓ **Fórmula del Cuerpo de Ingenieros**

$$Tc = 0.28\left(\frac{L}{S^{0.25}}\right)^{0.76}$$

En donde:

TC: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en h.
L: Longitud del cauce principal, en km.
S: Pendiente total del cauce principal, igual a la caída total entre la longitud del cauce principal, en m/m.

✓ **Fórmula de Williams**

$$Tc = 0.683\left(\frac{LA^{0.4}}{\sqrt{\frac{4A}{\pi}}\,S^{0.2}}\right)$$

En donde:

TC: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en h.
A: Área de la cuenca, en km².
L: Longitud del cauce principal, en km.
S: Pendiente total del cauce principal, igual a la caída total entre la longitud del cauce principal, en porcentaje.

✓ **Fórmula de Johnstone y Cross**

$$Tc = 2.6\left(\frac{L}{S^{0.5}}\right)^{0.5}$$

En donde:
TC: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en h.
L: Longitud del cauce principal, en km.
S: Pendiente total del cauce principal, igual a la caída total entre la longitud del cauce principal, en 1000m/m.

✓ **Fórmula de SCS-Ranser**

$$Tc = 0.947\left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$$

En donde:
TC: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en h.
L: Longitud del cauce principal, en km.
H: Diferencia de altura entre el punto más alto y el punto de salida de la cuenca, en m.

✓ **Fórmula de Ventura-Heras**

$$Tc = 0.3\left(\frac{L}{S^{0.25}}\right)^{0.75}$$

En donde:

TC: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en h.
L: Longitud del cauce principal, en km.
S: Pendiente total del cauce principal, igual a la caída total entre la longitud del cauce principal, en porcentaje.

✓ **Fórmula de Hathaway**

$$Tc = \left(\frac{36.36(Ln)^{0.467}}{S^{0.234}}\right)$$

En donde:

TC: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en min.
L: Longitud del cauce principal, en km.
S: Pendiente del cauce principal, igual a la caída total entre la longitud del cauce principal, en m/m.
n: Factor de rugosidad promedio de los suelos de la cuenca hidrográfica, valor adimensional.

El tiempo de concentración seleccionado corresponde a la mediana de los diez (10) valores previos calculados. Los resultados se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32. Tiempos de concentración seleccionados

Nombre	Tiempo De Concentración Seleccionado (min)
Río Luisa	916.05
Directos Magdalena Sector La Chamba	257.89
Quebrada La Chamba Grande	189.02
Directos Magdalena Sector Monica	105.06
Quebrada Eneal	531.62
Quebrada Agua Sucia	288.01
Quebrada Coyarcosa	133.56
Directos Magdalena	238.67
Quebrada Guayabal O La Pioja	392.68
Quebrada Montalvo	209.32
Quebrada San Bonifacio	157.75
Quebrada Las Chontas Y Otros	145.17
Quebrada Santa Ana	481.43
Directos Magdalena Sector Flandes	270.18
Estación Pavo Real	195.86

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

En la Tabla 33 se presenta el factor de reducción por lluvia espacial calculado de esta manera para las diferentes hoyas hidrográficas aferentes a la cuenca hidrográfica del río Luisa y otros Directos del Magdalena.

Tabla 33. Factor espacial de reducción

N	Nombre	Factor De Lluvia Espacial			
		FHRÜLING	ICEP	NORTEAMÉRICA	Factor De Lluvia Espacial Seleccionado
1	Río Luisa	0.12	0.83	0.24	0.40
2	Directos Magdalena Sector La Chamba	0.59	0.93	0.79	0.77
3	Quebrada La Chamba Grande	0.68	0.95	0.85	0.83
4	Directos Magdalena Sector Monica	0.69	0.94	0.89	0.84
5	Quebrada Eneal	0.53	0.93	0.68	0.71
6	Quebrada Agua Sucia	0.62	0.94	0.80	0.78
7	Quebrada Coyarcosa	0.70	0.95	0.88	0.84
8	Directos Magdalena	0.65	0.94	0.82	0.80
9	Quebrada Guayabal O La Pioja	0.56	0.93	0.73	0.74
10	Quebrada Montalvo	0.68	0.95	0.85	0.82
11	Quebrada San Bonifacio	0.76	0.96	0.90	0.87
12	Quebrada Las Chontas Y Otros	0.76	0.96	0.90	0.87
13	Quebrada Santa Ana	0.50	0.92	0.67	0.70
14	Directos Magdalena Sector Flandes	0.53	0.91	0.75	0.73
15	Estación Pavo Real	0.39	0.86	0.70	0.65

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

En el Anexo No. 3, se presentan los hietogramas de lluvia espacial para las hoyas hidrográficas consideradas para estos análisis.

9.1.1.3 Método del hidrograma unitario del Soil Conservation Service

El hidrograma unitario es un modelo lineal simple que puede usarse para deducir el hidrograma resultante de cualquier cantidad de exceso de lluvia, considerada como uniforme en el espacio y variable en el tiempo. Las siguientes suposiciones básicas son inherentes en este modelo:

- ✓ El exceso de precipitación tiene una intensidad constante dentro de la duración efectiva y las tormentas seleccionadas para el análisis deben ser de corta duración.
- ✓ El exceso de precipitación está uniformemente distribuido en toda el área de drenaje; si ésta es muy grande, debe dividirse en subcuencas analizando tormentas que cubran toda la subárea.
- ✓ El tiempo base de la duración de la escorrentía directa resultante de un exceso de lluvia de una duración dada es constante.
- ✓ Las ordenadas de todas las duraciones de escorrentía directa de una base de tiempo común son directamente proporcionales a la cantidad total de escorrentía directa representada por cada hidrograma.

Como tiempo de duración de la lluvia unitaria, se consideró menor o igual a la quinta parte del tiempo de concentración.

Para una cuenca dada el hidrograma resultante de un exceso de lluvia dado refleja las características no cambiantes de la cuenca. El hidrograma unitario se considera único para la cuenca dada, e invariable con respecto al tiempo, y es aplicable solamente cuando no se presenten cambios ni almacenamientos apreciables en la cuenca estudiada.

A pesar de que el modelo fue desarrollado originalmente en cuencas grandes, se ha encontrado que puede aplicarse a cuencas pequeñas desde menos de 2.5 hasta 250 km^2 aproximadamente.

Para hallar el caudal máximo originado por la escorrentía directa, se utilizó el hidrograma unitario curvilíneo, cuyo pico está definido la siguiente ecuación:

$$q_p = 0.208\ A\ E / T_p$$
$$T_p = (10/9)\ T_{lag}$$
$$T_{lag} = 0.6\ Tc$$

Siendo:

q_p: Caudal unitario máximo, en $(m^3/s)/mm$ de lluvia.
A: Área de la cuenca considerada, en km^2.
E: Precipitación efectiva unitaria, en mm.
T_p: Tiempo al pico del hidrograma, en horas, medido desde el comienzo.
T_{lag}: Tiempo de retardo en horas, medido entre los centros de gravedad del hietograma de lluvia espacial e hidrograma unitario.
Tc: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, h.
L: Longitud del cauce, en metros.
S: Pendiente de la ladera de la cuenca, en m/m.

Para seguir la metodología del Soil Conservation Service, se ha tomado el tiempo de concentración para las hoyas hidrográficas de acuerdo con la mediana de los diez (10) valores previos calculados. Los resultados se presentan en el Tabla 32.

El valor CN corresponde con el número de curva de la metodología del Soil Conservation Service. De acuerdo con las caracterizaciones de campo y la información secundaria, se ha seleccionado desde el punto de vista de la seguridad en relación con caudales

resultantes, un valor de CN que corresponde con áreas de pastos con CN de 79. Para bosques se ha adoptado un valor de CN 73, en condición hidrológica regular y para cultivos se ha adoptado un valor de CN igual a 85. El grupo de suelo hidrológico C (Moderadamente alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo; suelos de textura moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debida a sales o alkali, o suelos con nivel freáticos moderados. Estos duelos pueden ser pobremente drenados o bien a moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad (50 – 100 cm).

Para cada una de las hoyas estudiadas en el presente informe se han calculado sus respectivos valores de CN teniendo en cuenta los valores previamente mencionados.

Con base en este valor de CN calculado para cada una de las hoyas hidrográficas, la longitud del cauce principal y la pendiente de las cuencas, se ha calculado el tiempo de desfase t_{lag}, de las hoyas hidrográficas, el cual se presenta en la Tabla 34.

Tabla 34. Tiempo de desfase

Nombre	Tlag (min)
Río Luisa	549.63
Directos Magdalena Sector La Chamba	154.74
Quebrada La Chamba Grande	113.41
Directos Magdalena Sector Monica	63.03
Quebrada Eneal	318.97
Quebrada Agua Sucia	172.81
Quebrada Coyarcosa	80.14
Directos Magdalena	143.20
Quebrada Guayabal O La Pioja	235.61
Quebrada Montalvo	125.59
Quebrada San Bonifacio	94.65
Quebrada Las Chontas Y Otros	87.10
Quebrada Santa Ana	288.86
Directos Magdalena Sector Flandes	162.11
Estación Pavo Real	117.52

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, 2017

La distribución temporal del hietograma de lluvia efectiva que causa escorrentía superficial, y la magnitud de las abstracciones de una tormenta, se pueden obtener por el método del Soil Conservation Service, a partir de las siguientes relaciones empíricas:

$$Q = \frac{(P - 0.20S)^2}{P + 0.80S}$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10.0$$

Donde:

Q: Escorrentía total acumulada, pulgadas
P: Precipitación total del evento, pulgadas.
S: Infiltración potencial ó retención potencial máxima, pulgadas.

CN: Curva número.

9.1.1.4 Modelo hidrológico HEC-HMS

El cálculo del hidrograma total se realizó considerando el hidrograma unitario afectado por la escorrentía directa o precipitación efectiva en cada duración unitaria del hietograma, el cual se va desplazando tal duración. El hidrograma total resultante es la suma de las ordenadas de los diversos hidrogramas unitarios para cada valor constante de tiempo. Para el presente estudio no se adicionó el caudal base, dado que no se posee información para su obtención y que su porcentaje es mínimo en relación con el caudal pico. Para ello, se usó el modelo de computador HEC-HMS, considerando la referencia bibliográfica U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Generalized Computer Program, "HEC - HMS, Hydrologic Modelling Center", September 2008, Version: 3.3, Copyright 2008 Haestad Methods, Inc.

A continuación, se presenta una descripción teórica del modelo de computador HEC-HMS:

A) Descripción Modelo Hidrológico HEC-HMS: Para los trabajos particulares relacionados con estos estudios, se utilizó la versión más reciente de este modelo hidrológico HEC-HMS 4.0.

B) Filosofía del Modelo: El modelo computacional HEC-HMS ha sido diseñado para simular la escorrentía superficial en una corriente de agua en respuesta a un evento de precipitación como un sistema interconectado de componentes hidrológicas e hidráulicas. Cada componente se modela como un aspecto del proceso precipitación - escorrentía dentro de una porción de la hoya hidrográfica, comúnmente referida como una subhoya. Una componente puede representar una entidad de escorrentía superficial, un canal de una corriente, o un embalse. La representación de una componente requiere de un conjunto de parámetros que especifican las características particulares de tal componente y las relaciones matemáticas que describen los procesos físicos que ocurren y la involucran. El resultado del proceso de modelación es la determinación de los hidrogramas de creciente en puntos determinados de la hoya hidrográfica.

C) Componentes del Modelo: los componentes del modelo son los siguientes:

- Red de Canales: La hoya hidrográfica se subdivide en un sistema interconectado de canales utilizando mapas topográficos y cualquier otra información geográfica que describa las características existentes o proyectadas de la red de drenaje. En primer término, se delimita la hoya hidrográfica, la cual se subdivide posteriormente en un número determinado de subhoyas de acuerdo con sus propias características, determinando el ejercicio anterior el número y tipos de componentes de canales que se usan en el modelo y su interrelación entre ellas.

- Componente de Escorrentía Superficial del Terreno: La componente de escorrentía superficial del terreno de las subhoyas se utiliza para representar el movimiento del agua sobre la superficie del terreno y en los canales de las respectivas subhoyas. El dato de entrada a esta componente es el hietograma de precipitación total. La precipitación efectiva que produce escorrentía superficial se calcula substrayendo al valor de la precipitación total

la infiltración y las pérdidas por detención en el terreno con base en una función de la tasa de infiltración del agua en el suelo. Para los estimativos anteriores, se supone que la precipitación y la infiltración son uniformes sobre cada una de las subhoyas establecidas. Estas pérdidas debidas a la intercepción superficial del terreno, almacenamientos en depresiones e infiltración son denominadas en el modelo computacional HEC-HMS como las pérdidas de la precipitación, las cuales pueden ser estimadas a través de las siguientes metodologías: pérdida inicial y tasa de pérdida uniforme; tasa de pérdida exponencial; método de la curva número CN del Soil Conservation Service, SCS; tasa de pérdida de Holtan; y, función de infiltración de Green y Ampt.

Los excesos de lluvia efectiva son posteriormente transitados a través de las técnicas del hidrograma unitario o de la onda cinemática a la salida de la subhoya, estimándose el hidrograma de escorrentía respectivo. La técnica del hidrograma unitario produce un hidrograma de escorrentía en el punto más aguas abajo de la subhoya respectiva. Si la ubicación para el cálculo de escorrentía no es apropiada, puede ser necesario subdividir aún más la subhoya o utilizar el método de la onda cinemática para distribuir entradas de caudal localizadas en puntos específicos.

El modelo computacional HEC-HMS tiene en cuenta las siguientes metodologías de hidrogramas unitarios: Clark, Snyder y adimensional del SCS. Para las hoyas hidrográficas en consideración, también por su simplicidad y uso arraigado, se ha tenido en cuenta el método del hidrograma unitario adimensional del SCS, el cual se basa en las características del tiempo de desfase, el cual a su vez se basa en el tiempo de concentración, y en el área de drenaje de la subhoya considerada.

La transformación de la lluvia efectiva en escorrentía a través del método de la onda cinemática permite una distribución uniforme de la escorrentía superficial sobre el terreno a lo largo de la longitud del canal principal. Esta distribución uniforme de entradas de caudal localizadas es particularmente importante en hoyas hidrográficas en donde muchos canales laterales contribuyen al caudal a lo largo de la longitud del canal principal. La distribución uniforme de escorrentía desde una subhoya se puede obtener utilizando combinaciones de tres elementos conceptuales: áreas de flujo sobre el terreno, canales colectores y un canal principal. La técnica de tránsito de la onda cinemática puede ser utilizada para transitar la lluvia efectiva sobre las áreas de flujo sobre el terreno. Por otro lado, tanto las técnicas de la onda cinemática como la de Muskingum - Cunge pueden ser usadas para transitar crecientes laterales entrantes a un canal colector y aguas arriba de éste, y caudales laterales entrantes a través del canal principal. Sin embargo, las teorías de la onda cinemática y de Muskingum - Cunge para el análisis en los diferentes elementos de los canales no pueden ser entremezcladas.

En esta teoría, el elemento de flujo sobre el terreno es un canal rectangular ancho de base unitaria, en el cual el valor de la rugosidad de Manning ha sido reemplazado por un factor de rugosidad de flujo sobre el terreno. Cuando se aplica la teoría de la onda cinemática a un elemento de flujo sobre el terreno, el caudal lateral entrante es la precipitación efectiva, y la salida es un caudal por unidad de ancho. Un elemento de flujo sobre el terreno se describe por medio de cuatro parámetros: su longitud típica de flujo sobre el terreno, su pendiente y factor de rugosidad, y el porcentaje del área de la subhoya representados por estos elementos previos. Un área de flujo sobre el terreno es utilizada para modelar la

escorrentía proveniente de usos de tierra permeables y otra área es utilizada para modelar superficies impermeables. La creciente desde los elementos de flujo sobre el terreno viaja hasta la salida de la subhoya a través de uno o dos elementos de canales sucesivos. Un canal se define por su longitud, pendiente, rugosidad, forma, ancho o diámetro, y talud de la sección transversal. El último canal en una subhoya es llamado el canal principal, y cualquier canal intermedio entre los elementos de flujo sobre el terreno y el canal principal es llamado canal colector.

- Componente de Tránsito en Canales: Se utiliza una componente de tránsito del hidrograma de escorrentía en los canales para representar la transformación de la onda de creciente a lo largo de ellos. El dato de entrada a esta componente es un hidrograma de creciente en el punto más aguas arriba, resultante de contribuciones individuales o combinadas de escorrentía de las subhoyas y de su tránsito en canales o embalses. Si se utiliza el método de la onda cinemática, la escorrentía distribuida de los elementos de subhoyas localizadas dentro de la propia subhoya en consideración es también un dato de entrada, el cual se combina con el hidrograma de creciente más aguas arriba mencionado previamente, para ser transitados hasta el final del tramo de canal. El hidrograma es transitado hasta punto más aguas abajo del canal en estudio con base en las características geométricas y de rugosidad de éste.

El tránsito de crecientes es utilizado para simular el movimiento de la onda de creciente a través de tramos de canales y embalses. La mayoría de los métodos de tránsito de crecientes disponibles en el modelo computacional HEC-HMS están basados en la ecuación de continuidad y alguna otra relación entre el caudal y el almacenamiento o el nivel de agua. Los métodos que utiliza este modelo son: Muskingum, Muskingum - Cunge, onda cinemática, Puls modificado, de trabajo R y D, y tránsito de embalse nivel - almacenamiento. En todos estos métodos, el tránsito procede sobre la base de un tramo de canal independiente desde aguas arriba hacia aguas abajo; no se consideran efectos de remanso ni discontinuidades en la superficie del agua tales como resaltos hidráulicos u ondas de creciente de flujo rápidamente variado.

Los métodos de tránsito en embalses del modelo HEC-HMS son los que requieren datos que definen las características del almacenamiento de un tramo de tránsito o embalse. Estos métodos son: Puls modificado, de trabajo R y D, y tránsito de embalse de nivel - almacenamiento. También existen dos métodos de tránsito en HEC-HMS que están basados sobre las ordenadas del hidrograma de creciente desfasadas. Estos últimos métodos no tienen como punto de partida las características de almacenamiento del embalse, pero han sido utilizados en numerosos ríos con buenos resultados.

- Uso Combinado de las Componentes de Tránsito en Canales y Escorrentía Superficial de las Subhoyas: Se puede representar cualquier tipo de conexión de procesos de precipitación - escorrentía en las subhoyas y el tránsito en canales en la hoya hidrográfica en estudio a través de una combinación adecuada de las componentes de escorrentía superficial en las subhoyas y de tránsito en canales. La conexión de las componentes de la red de canales está implicada por el orden en el cual las componentes de los datos están arregladas. La simulación debe siempre comenzar en la parte más aguas arriba de la subhoya considerada en un ramal de la red de canales. La simulación procede hacia aguas abajo hasta que se alcanza la confluencia respectiva. Antes de simular los

procesos aguas abajo de una confluencia, todas las crecientes hasta tal confluencia deben ser calculadas y transitadas hasta ese punto.

- Componente de Tránsito en Embalses: La utilización de la componente de embalse es similar a la componente del tránsito en canales. La componente de embalse opera recibiendo una creciente aguas arriba de éste y transitando los caudales respectivos entrantes a través del embalse, utilizando métodos de tránsito en embalses. Las metodologías para el tránsito de crecientes en embalses con las cuales trabaja el modelo de computador HEC-HMS fueron explicadas con detalle en la respectiva metodología para el tránsito de crecientes en canales.

- Otras Componentes: *Aunque* no fueron utilizadas en la modelación hidrológica, se mencionan otras componentes del programa de computador HEC-HMS, con el fin de dar una completa descripción de sus capacidades.

✓ Componente de Desviación: La componente de desviación se utiliza para representar desviaciones o bifurcaciones en un canal, o cualquier otra transferencia de flujo de un punto a otro punto dentro o fuera de la hoya hidrográfica.

✓ Componente de Bombeo: La componente de bombeo puede ser utilizada para simular la acción de plantas de bombeo utilizadas para elevar la escorrentía desde áreas de pondajes bajas.

✓ Transformación de Hidrogramas: La opción de transformación de hidrogramas da capacidad para alterar los hidrogramas de creciente basados en el criterio definido por el usuario.

9.1.2 Caudales máximos instantáneos de escorrentía superficial

Mediante la aplicación del modelo de computador HEC-HMS, y con las características de la lluvia total espacial, de la curva CN, del área de drenaje y del tiempo de desfase para las hoyas hidrográficas (calculado con base en el tiempo de concentración por medio de la fórmula del SCS), se calcularon los caudales máximos instantáneos anuales de las crecientes producidas por las cuencas hidrográficas en estudio para periodos de retorno entre 2 y 500 años, y los valores se presentan en Tabla 35.

Tabla 35. Caudales máximos instantáneos

HOYA No.	Nombre	t_{lag} (Horas)	Caudal Máximo Instantáneo Anual (m^3/s)									
			T = 2 Años	T = 5 Años	T = 10 Años	T = 15 Años	T = 20 Años	T = 25 Años	T = 30 Años	T = 50 Años	T = 100 Años	T = 500 Años
1	Río Luisa	9.16	34.96	60.88	87.37	106.56	121.66	134.94	146.03	181.61	239.58	427.78
2	Directos Magdalena Sector La Chamba	2.58	33.47	47.49	60.77	69.70	76.72	82.48	87.44	102.49	126.17	197.73
3	Quebrada La Chamba Grande	1.89	27.53	36.93	45.60	51.36	55.76	59.38	62.46	71.83	86.25	128.77
4	Directos Magdalena Sector Monica	1.05	30.87	42.31	52.86	59.85	65.26	69.69	73.47	84.95	102.72	155.18
5	Quebrada Eneal	5.32	41.63	56.20	69.67	78.61	85.44	91.16	96.02	110.69	133.39	200.87
6	Quebrada Agua Sucia	2.88	35.45	47.37	58.36	65.63	71.25	75.83	79.73	91.61	109.90	163.94
7	Quebrada Coyarcosa	1.34	27.00	35.99	44.21	49.64	53.79	57.20	60.10	68.87	82.33	122.45
8	Directos Magdalena	2.39	27.85	37.61	46.67	52.70	57.37	61.20	64.48	74.37	89.67	135.12
9	Quebrada Guayabal O La Pioja	3.93	41.26	55.41	68.69	77.63	84.43	90.01	94.87	109.38	131.86	198.75
10	Quebrada Montalvo	2.09	21.97	29.55	36.51	41.15	44.69	47.63	50.12	57.68	69.44	104.19
11	Quebrada San Bonifacio	1.58	8.94	11.99	14.82	16.69	18.13	19.31	20.33	23.37	28.07	41.92

12	Quebrada Las Chontas Y Otros	1.45	7.59	10.61	13.42	15.31	16.78	17.99	19.02	22.17	27.10	42.00
13	Quebrada Santa Ana	4.81	45.72	62.51	78.08	88.53	96.66	103.21	108.92	126.21	152.96	232.92
14	Directos Magdalena Sector Flandes	2.70	56.07	78.08	98.69	112.54	123.28	132.22	139.88	163.13	199.32	308.21
15	Estación Pavo Real	1.96	149.73	212.32	271.77	311.94	343.01	368.49	390.68	458.30	563.76	881.51

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

El valor del caudal del Río Luisa en su desembocadura es menor que el valor de la estación limnigráfica Pavo Real, pero ella tendría en cuenta el transito la creciente en la zona plana de esta corriente aproximadamente 90 km aguas debajo de la estación limnigráfica Pavo Real y los posibles desbordes que se presenten en la referida zona plana.

9.1.3 Análisis de frecuencia de caudales máximos instantáneos

A la serie de caudales máximos instantáneos a nivel anual para la estación limnigráfica Pavo real ubicada sobre el Río Luisa, se le calcularon sus características estadísticas de media, desviación típica y coeficiente de asimetría las cuales se presentan en la Tabla 36.

Tabla 36. Caudales máximos anuales históricos para la estación limnigráfica Pavo Real

Año	Caudal (m³/s)
1959	94.98
1961	38.33
1962	218.00
1963	243.30
1964	44.00
1965	81.40
1966	67.20
1967	146.00
1968	44.73
1969	202.50
1970	146.00
1971	234.00
1972	287.30
1973	249.50
1974	286.20
1975	261.10
1976	212.00
1977	137.00
1978	212.00
1979	259.80
1980	137.00
1981	900.00
1982	217.40
1983	152.00
1984	203.00
1985	123.40
1986	179.00
1987	167.90
1988	135.00
1989	138.40
1990	95.50
1991	73.20

Año	Caudal (m³/s)
1992	66.00
1993	89.20
1994	78.80
1995	135.10
1996	118.00
1997	68.40
1998	166.60
1999	40.80
2000	522.20
2001	198.70
2002	221.70
2003	133.00
2004	133.00
2005	39.75
2006	75.89
2007	89.06
2008	95.26
2009	130.10
2010	72.01
2011	63.22
2012	38.57
2013	16.47
2014	16.77
2015	16.60
Número de Datos	56
Media	153.79
Desviación Típica	136.12
Coeficiente de Asimetría	3.39

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Posteriormente, los datos históricos de esta variable hidrológica aleatoria fueron ajustados a distribuciones probabilísticas conocidas, y se calcularon los valores de esta variable para diferentes periodos de retorno. Para ello, tales datos históricos se ajustaron a las distribuciones probabilísticas Normal, Gumbel, Pearson Tipo III, Log – Pearson Tipo III, Log – Normal y EV3, a través de métodos estadísticos convencionales.

Para los estudios estadísticos, se siguió la metodología de Chow, en la que expresa que los análisis de frecuencias de variables hidrológicas pueden llevarse a cabo a través de ecuaciones del tipo:

$$X_T = X + SK$$

En donde:
X_T: es la magnitud del evento que tiene un período de retorno T.
X: es el valor medio de la muestra.
S: es la desviación típica de la muestra.
K: es el factor de frecuencia, dependiente de la ley de probabilidades que se seleccione.

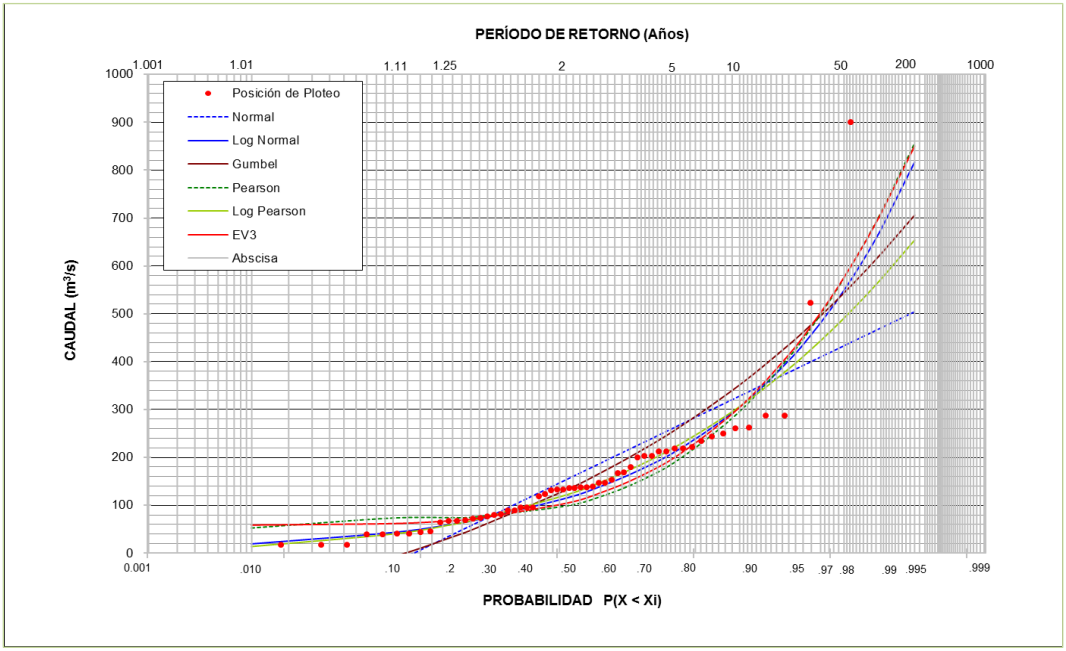
Los resultados de este ejercicio estadístico se presentan en la Tabla 37 y en la Figura 40. Adicionalmente, para cada distribución probabilística se aplicó la prueba de Chi – cuadrado, encontrándose que, para los datos, la distribución probabilística LOG-PEARSON es la que mejor se ajusta para las dos estaciones.

Tabla 37. Frecuencia de caudales máximos instantáneos anuales para la estación limnigráfica Pavo Real

Distribución Probabilística						
Período De Retorno	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG- PEARSON	LOG-NORMAL	EV3
(Años)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)
2	153.8	132.3	98.8	121.9	115.2	104.4
3	188.2	167.9	118.3	148.3	139.6	126.3
3	225.0	209.5	148.2	181.4	171.4	157.7
5	268.3	264.3	197.6	227.7	218.4	207.7
10	328.3	351.6	296.2	306.2	305.3	304.8
20	377.7	435.4	408.8	385.3	402.5	414.7
50	433.4	543.8	574.9	491.2	549.4	576.3
100	470.5	625.1	711.6	572.3	676.0	709.3
200	504.5	706.1	856.6	654.1	817.2	850.7
chi 2	267.8	417.3	638.8	90.1	326.7	492.3

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Figura 40. Río Luisa – estación limnigráfica Pavo Real. Frecuencia de caudales máximos anuales



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Una vez determinada la distribución que se ajusta para los caudales máximos anuales (Log-Pearson), se puede ver que la diferencia entre los valores calculados con el modelo HEC-HMS (Tabla 35. Caudales Máximos Instantáneos) y los calculados con esta distribución no son muy diferentes. Por lo tanto y de acuerdo a esto, se toman los valores calculados de caudales máximos para las hoyas hidrográficas estudiadas a partir del modelo HEC-HMS.

9.2 CAUDALES MÍNIMOS

Al igual que a la serie de caudales máximos instantáneos a nivel anual para la estación limnigráfica Pavo real ubicada sobre el Río Luisa, para los caudales mínimos históricos a nivel anual, se le calcularon sus características estadísticas de media, desviación típica y coeficiente de asimetría las cuales se presentan en la Tabla 38.

Tabla 38. Caudales mínimos anuales históricos para la estación limnigráfica Pavo Real

Año	Caudal (m^3/s)
1959	7.08
1961	1.08
1962	1.20
1963	1.20
1964	1.62
1965	1.76
1966	1.81
1967	2.08
1968	2.29
1969	2.41
1970	2.32
1971	2.40
1972	2.11
1973	1.70
1974	3.20
1975	3.20
1976	2.30
1977	1.76
1978	2.35
1979	2.00
1980	1.44
1981	1.20
1982	1.90
1983	2.26
1984	2.78
1985	1.95
1986	1.75
1987	0.99
1988	0.80
1989	2.80
1990	1.69
1991	1.40
1992	1.60
1993	1.20
1994	1.50
1995	1.20

Año	Caudal (m³/s)
1996	2.00
1997	1.68
1998	0.76
1999	2.69
2000	3.10
2001	3.05
2002	1.20
2003	2.20
2004	2.72
2005	2.02
2006	2.17
2007	2.45
2008	4.12
2009	1.68
2010	1.46
2011	1.75
2012	1.39
2013	2.30
2014	2.62
2015	1.91
Número de Datos	56
Media	2.06
Desviación Típica	0.96
Coeficiente de Asimetría	2.79

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Posteriormente, los datos históricos de esta variable hidrológica aleatoria fueron ajustados a distribuciones probabilísticas conocidas, y se calcularon los valores de esta variable para diferentes periodos de retorno. Para ello, tales datos históricos se ajustaron a las distribuciones probabilísticas Normal, Gumbel, Pearson Tipo III, Log – Pearson Tipo III, Log – Normal y EV3, a través de métodos estadísticos convencionales.

Para los estudios estadísticos, se siguió la metodología de Chow, en la que expresa que los análisis de frecuencias de variables hidrológicas pueden llevarse a cabo a través de ecuaciones del tipo:

$$X_T = X + SK$$

En donde:
X_T: es la magnitud del evento que tiene un período de retorno T.
X: es el valor medio de la muestra.
S: es la desviación típica de la muestra.
K: es el factor de frecuencia, dependiente de la ley de probabilidades que se seleccione.

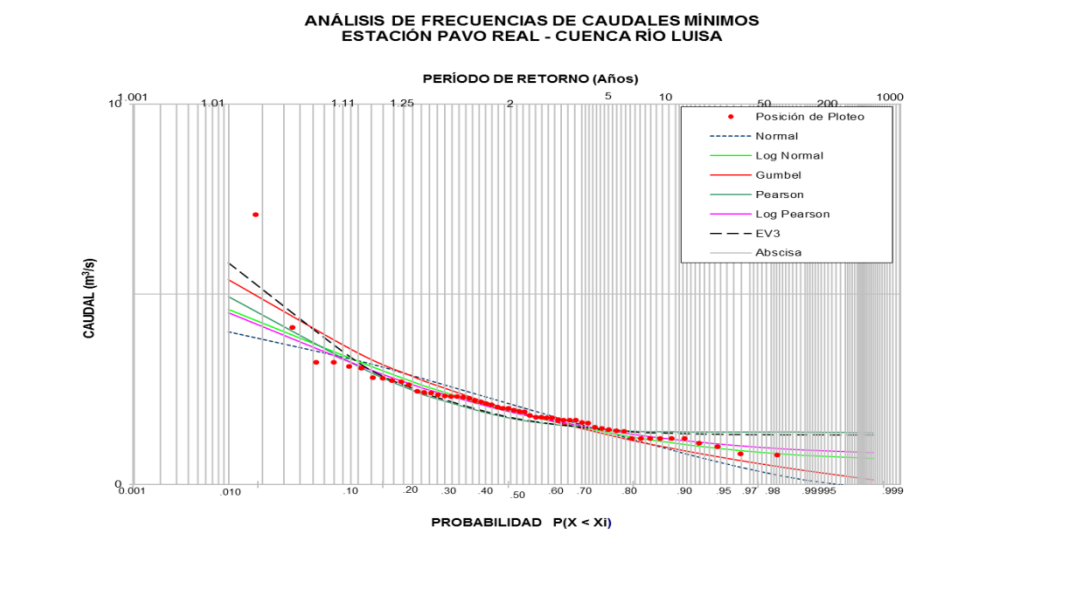
Los resultados de este ejercicio estadístico se presentan en la Tabla 39 y la Figura 41. Adicionalmente, para cada distribución probabilística se aplicó la prueba de Chi – cuadrado, encontrándose que, para los datos, la distribución probabilística EV3 es la que mejor se ajusta para las dos estaciones.

Tabla 39. Caudales mínimos anuales históricos para la estación limnigráfica Pavo Real

TR	Normal	Gumbel	Pearson	Log-Pearson	Log-Normal	EV3
Años	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s
2	2.06	1.91	1.71	1.87	1.87	1.73
5	1.27	1.22	1.42	1.37	1.30	1.41
10	0.88	0.93	1.38	1.18	1.08	1.34
15	0.69	0.80	1.38	1.10	0.99	1.33
20	0.58	0.72	1.38	1.06	0.94	1.32
25	0.49	0.66	1.38	1.03	0.91	1.31
30	0.43	0.61	1.38	1.01	0.88	1.31
50	0.28	0.50	1.38	0.96	0.82	1.31
100	0.12	0.36	1.38	0.90	0.76	1.30
500	-0.12	0.12	1.36	0.84	0.68	1.30
chi 2	5.49	2.49	3.05	2.25	2.18	2.11

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Figura 41. Río Luisa – estación limnigráfica Pavo Real - Frecuencia de caudales mínimos anuales



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Ahora para determinar los caudales mínimos en cada una de las hoyas hidrográficas aferentes a la zona de estudio se ha procedido aplicar la siguiente expresión matemática que relaciona los caudales registrados en la estación limnigráfica Pavo Real y las áreas de drenaje aferentes a dicha estación:

$$Q_{SP} = (A_{SP}/A_{Estación})\ Q_{Estación}$$

En donde:

Q_{SP}: Caudal Máximo Instantáneo en el sitio de proyecto, m³/s.
A_{SP}: Área de Drenaje Aferente hasta el sitio de proyecto, km².
$Q_{Estación}$: Caudal Mínimo Instantáneo en la estación limnigráfica Pavo Real, m³/s.
$A_{Estación}$: Área de Drenaje Aferente hasta la estación limnigráfica Pavo Real, km².

Finalmente aplicando el factor de trasposición de caudales a los obtenidos mediante el mejor ajuste probabilístico en la estación limnigráfica Pavo Real, en la Tabla 40 se resumen los resultados correspondientes para cada una de las hoyas hidrográficas seleccionadas en el presente estudio para períodos de retorno entre 2 y 500 años.

Tabla 40. Caudales mínimos instantáneos

Hoyas	Área	Caudales Mínimos Instantáneos Hoyas Luisa Y Otros Directos Al Magdalena (m³/s)									
	km²	TR 2	TR 5	TR 10	TR 15	TR 20	TR 25	TR 30	TR 50	TR 100	TR 500
Río Luisa	719.5	7.41	6.02	5.75	5.68	5.65	5.63	5.62	5.60	5.58	5.57
Directos Magdalena Sector La Chamba	31.94	0.33	0.27	0.26	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Quebrada La Chamba Grande	12.76	0.13	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Directos Magdalena Sector Monica	10.40	0.11	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Quebrada Eneal	59.56	0.61	0.50	0.48	0.47	0.47	0.47	0.46	0.46	0.46	0.46
Quebrada Agua Sucia	24.52	0.25	0.21	0.20	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
Quebrada Coyarcosa	9.41	0.10	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Directos Magdalena	18.04	0.19	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
Quebrada Guayabal O La Pioja	45.08	0.46	0.38	0.36	0.36	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Quebrada Montalvo	12.73	0.13	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Quebrada San Bonifacio	3.91	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Quebrada Las Chontas Y Otros	4.13	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Quebrada Santa Ana	72.21	0.74	0.60	0.58	0.57	0.57	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
Directos Magdalena Sector Flandes	57.37	0.59	0.48	0.46	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.44

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

10 BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL

La evaluación del balance hídrico está ligada a la cantidad y calidad de la información hidrológica y meteorológica disponible y en particular de la red de estaciones y número de años de sus registros

El balance hídrico tiene la característica de dar una visión general de la disponibilidad y comportamiento hídrico natural, tanto superficial como subterráneo, en áreas de interés particular a través de las diferentes fases del ciclo hidrológico donde se reflejan los componentes de la ecuación del balance hídrico (IDEAM, 2013).

La ecuación del balance hídrico se simplifica hasta incluir solamente la precipitación, la evapotranspiración real, la escorrentía y el término residual de discrepancia, por cuanto la variación de los almacenamientos de los cuerpos de agua y las salidas y entradas del agua subterránea se compensa durante el añ0. (IDEAM, 2010).

Ecuación:

$$Eesc.= P – ETR +/- \Delta er$$

Dónde:

Esc:	Escorrentía (mm).
P:	Precipitación (mm)
ETR:	Evapotranspiración Real (mm)
Δer:	Termino residual de discrepancia.

Metodología de cálculo: Con la finalidad de realizar el cálculo de los caudales medios, se utilizó el método del balance hidrológico de largo plazo; según GOTTA (2014), la validez de este método ha sido comprobada y verificada en numerosos estudios en Colombia como los presentados por UNALMED-UPME (2000), UNALMED-CTA (2001) y Álvarez-Villa (2007).

A través del balance hídrico de largo plazo, el cálculo del caudal medio, se realiza mediante el cálculo del área del tamaño de los píxeles, a través del modelo digital de elevaciones (MDE); por lo que para cada uno de los píxeles generados al interior de la cuenca, se estima la evapotranspiración y la precipitación, se desarrolla la ecuación del balance hídrico de largo plazo y el resultado de esta operación, se multiplica por el área del píxel, obteniéndose el volumen de agua (caudal), que cada uno de los píxeles aporta durante el periodo de tiempo de datos analizado. Para generar la oferta hídrica estimada para toda la cuenca, se realiza la sumatoria del volumen generado en cada uno de los pixeles que hacen parte de la cuenca y finalmente, este valor se convierte a unidades de oferta hídrica (m^3/s o l/s), para obtener el caudal medio de la cuenca o unidad hidrográfica considerada.

La ecuación para la realización del balance hídrico de largo plazo, se presenta a continuación:

$$Caudal\ Medio = \int_{Área} [P(x,y) - E(x,y)]dA$$

Dónde:
P: Es la precipitación
E: Es la evapotranspiración
A: es el área

Mediante la aplicación del sistema de información geográfica, se generaron las salidas cartográficas a nivel anual y mensual de la escorrentía. Ver Figura 42 y Figura 43.

10.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS NORMALES O MEDIAS

Tabla 41. Balance hídrico superficial anual para las unidades hidrográficas del río Luisa y otros directos al Magdalena

Unidad Hidrográfica	Balance Hídrico Anual (mm)
Rio Luisa parte alta	919,71
Directos al Magdalena - Q Palito y otros	995,34
Directos al Rio Luisa parte baja - Q Guaduas	818,20
Directos al Rio Luisa parte baja - Q Serrezuela	818,98
Rio Luisa parte baja	868,71
Directos al Magdalena - Q Santana y otros	649,03
Directos al Magdalena - Q Agua Sucia y otros	968,13
Directos al Magdalena - Q Guayabal y otros	749,38
Q Eneal	863,64

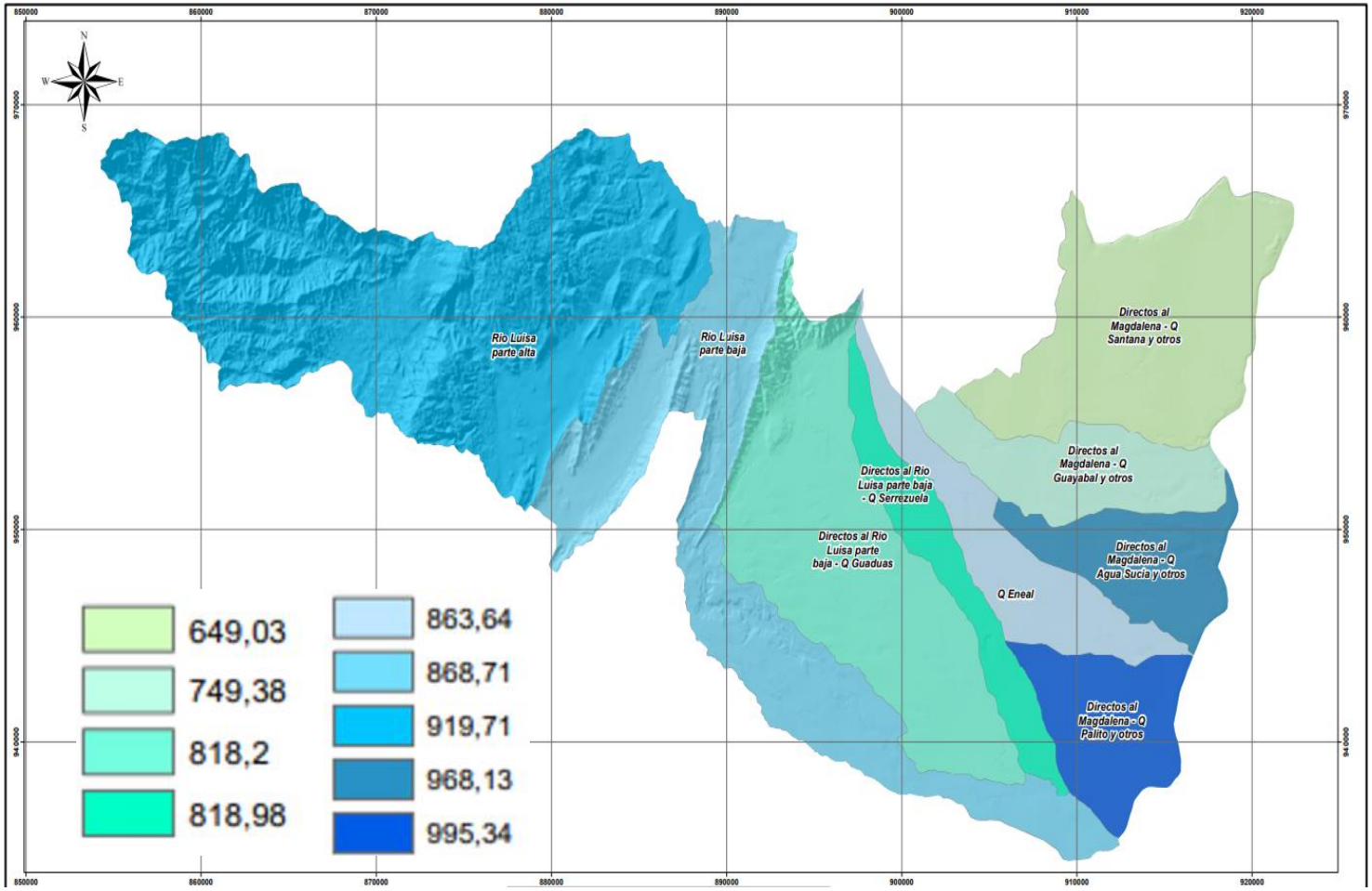
Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 42. Balance hídrico superficial mensual para las unidades hidrográficas del río Luisa y otros directos al Magdalena

Unidad Hidrográfica	ENE	FEB	MAR	ABRI	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Rio Luisa parte alta	29,70	46,48	79,14	146,47	131,55	70,28	40,58	41,51	81,47	112,13	96,70	43,71
Directos al Magdalena - Q Palito y otros	41,68	40,57	86,20	210,40	145,31	39,62	15,20	20,08	53,23	140,32	132,10	70,63
Directos al Rio Luisa parte baja - Q Guaduas	27,70	44,54	79,32	156,30	123,94	42,72	19,98	17,13	56,53	112,31	88,56	49,16
Directos al Rio Luisa parte baja - Q Serrezuela	25,61	40,35	81,10	169,44	123,62	40,04	18,43	16,56	53,10	111,74	90,16	48,83
Rio Luisa parte baja	33,17	43,16	81,29	164,06	132,24	44,37	17,12	16,78	54,97	122,05	102,40	57,11
Directos al Magdalena - Q Santana y otros	21,89	37,72	58,38	132,27	95,54	33,16	12,00	11,45	50,90	85,11	66,20	44,41
Directos al Magdalena - Q Agua Sucia y otros	39,46	39,73	84,85	205,16	141,93	38,86	14,87	19,52	52,53	136,74	126,64	67,83
Directos al Magdalena - Q Guayabal y otros	22,35	36,16	75,42	160,83	112,69	35,55	14,98	14,78	50,71	103,97	77,96	43,99
Q Eneal	28,95	38,52	82,77	184,57	129,89	39,05	16,49	16,97	50,89	119,14	101,76	54,64

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Figura 42. Escorrentía media anual – condicion climatica normal cuenca Luisa y otros directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

10.2 CONDICIONES CLIMÁTICAS SECAS

Tabla 43. Balance hídrico superficial anual para la unidad hidrográfica río Luisa y otros directos al Magdalena en condiciones climáticas secas

Unidad Hidrográfica	Balance Hídrico Anual (mm)
Rio Luisa parte alta	759,67
Directos al Magdalena - Q Palito y otros	698,37
Directos al Rio Luisa parte baja - Q Guaduas	611,85
Directos al Rio Luisa parte baja - Q Serrezuela	515,63
Rio Luisa parte baja	694,28
Directos al Magdalena - Q Santana y otros	420,17
Directos al Magdalena - Q Agua Sucia y otros	671,08
Directos al Magdalena - Q Guayabal y otros	422,50
Q Eneal	531,86

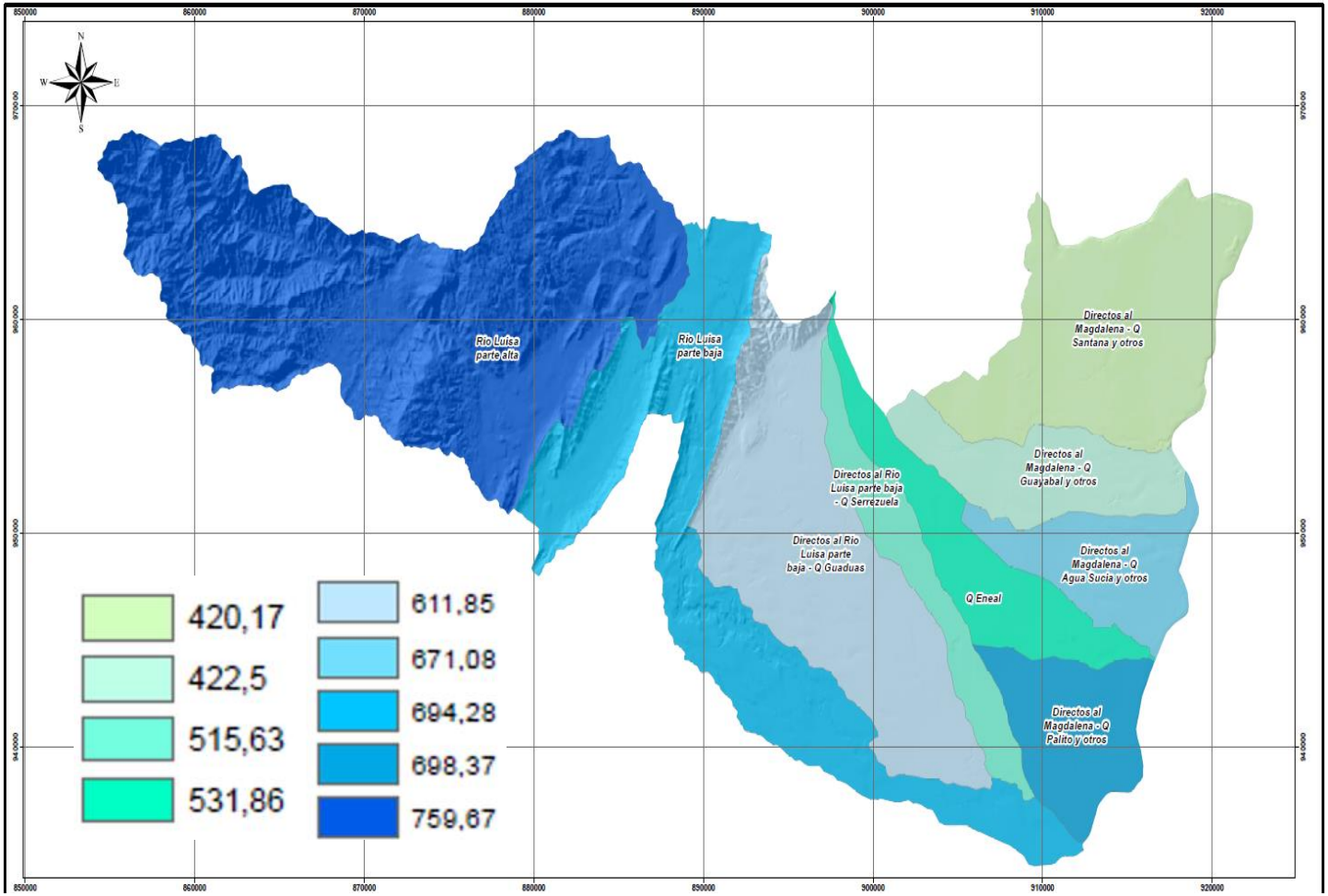
Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 44. Balance hídrico superficial anual para la unidad hidrográfica río Luisa y otros directos al Magdalena en condiciones climáticas secas

Unidad Hidrográfica	ENE	FEB	MAR	ABRI	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Rio Luisa parte alta	0,06	5,82	65,19	170,69	87,84	50,11	90,00	50,80	95,52	57,56	42,41	43,69
Directos al Magdalena - Q Palito y otros	0,08	15,54	37,13	60,89	106,73	17,33	60,08	79,33	19,93	55,82	95,40	150,12
Directos al Rio Luisa parte baja - Q Guaduas	4,85	4,48	4,51	29,72	76,79	54,93	49,23	40,45	63,48	124,82	58,52	100,08
Directos al Rio Luisa parte baja - Q Serrezuela	0,43	8,42	8,71	14,48	71,82	14,42	40,23	49,50	41,60	101,98	54,03	110,02
Rio Luisa parte baja	3,06	3,35	14,42	57,09	88,42	85,99	64,60	35,41	58,87	117,81	75,50	89,76
Directos al Magdalena - Q Santana y otros	0,27	4,18	4,79	38,62	16,39	14,35	24,46	51,12	30,24	110,91	20,84	103,99
Directos al Magdalena - Q Agua Sucia y otros	0,07	15,57	34,90	56,55	101,63	17,52	57,60	74,53	20,57	58,13	89,33	144,67
Directos al Magdalena - Q Guayabal y otros	0,01	13,69	9,05	16,31	53,22	14,51	35,60	36,82	27,80	84,34	36,09	95,07
Q Eneal	0,03	11,43	16,34	21,25	79,39	6,97	45,47	58,62	28,22	80,10	62,82	121,22

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Figura 43. Escorrentía media anual – condicion climatica seca cuenca Luisa y otros directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

11 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA

11.1 USUARIOS CONCESIONADOS CORTOLIMA – SIRH

La Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) establece los objetivos, estrategias, metas, indicadores y líneas de acción estratégica para el manejo del recurso hídrico en el país, de tal manera que se cuente con directrices unificadas para el manejo agua, que además de apuntar a resolver la actual problemática del recurso hídrico, permitan hacer uso eficiente del recurso y preservarlo como una riqueza natural para el bienestar de las generaciones futuras de Colombianos.

El análisis sobre la administración del recurso se circunscribe prioritariamente a la aplicación histórica de los Decretos 1541 de 1978 y 1594 de 1984 (compilados en el decreto 1076 de 2015) y demás normativa vinculada con las concesiones de agua, concluyéndose que existen dificultades para su aplicación relacionadas principalmente con falta de unidad de criterio por parte de las autoridades ambientales y falta de protocolos y guías para su implementación.

Uno de los objetivos de la PNGIRH es el de generar las condiciones para el fortalecimiento institucional en la gestión integral del recurso hídrico; para el logro de este objetivo se han diseñado tres estrategias: a) mejoramiento de la capacidad de gestión pública del recurso hídrico; b) formación, investigación y c) gestión de la información.

Las dos últimas estrategias se orientan a fomentar y desarrollar acciones de investigación y de manejo de la información relacionada con el recurso hídrico, por parte de entidades o personas públicas o privadas, de tal forma que aporten a la comprensión del estado y evolución del recurso hídrico en el país, como medio para lograr el buen manejo del recurso. Para tal fin se prevén las siguientes líneas de acción estratégicas:

- Formular e implementar el plan nacional de investigación y formación en la gestión integral del recurso hídrico.}
- Implementar el sistema de información del recurso hídrico (Decreto 1323 de 2007)

El Sistema de Información del Recurso Hídrico - SIRH, es hoy en día una herramienta disponible en la Corporación Autónoma Regional del Tolima - CORTOLIMA el cual ha sido diseñado para integrar y estandarizar el acopio, registro, manejo y consulta de datos, bases de datos, estadísticas, sistemas, modelos, información documental y bibliográfica, reglamentos y protocolos que facilitan la gestión integral del recurso hídrico y así facilitar el conocimiento y disponibilidad de la información disponible de demanda hídrica regional, correspondiente a concesiones de agua superficiales y subterráneas otorgadas por la corporación.

Así las cosas, CORTOLIMA cuenta con la información disponible de demanda hídrica de los usuarios concesionados de la cuenca del río Luisa, considerando que la georreferenciación de los usuarios se encuentra disponible para los mayores usuarios de la cuenca (Litrajes Mayores a 0,020 m^3/s)

De esta manera la mayor demanda hídrica presente en el nivel subsiguiente de estudio corresponde al uso de “Generación Electrica” con el usuario ENERLIM S.A E.S.P. que cuenta con 2,4 m^3.seg concesionados, seguido de USOGUAMO concesion de uso “Riego” con 1,8 m^3/s, como se observa a continuación:

Tabla 45. Caudal concesionado por tipo de uso de agua para la subzona hidrográfica del río Luisa y otros directos al Magdalena

Uso	Usuarios Concesionados	Caudal Concesionado Lts.seg
Generación Eléctrica	1	2400,0
Agrícola	108	2062,1
Riego	2	1800,0
Acueductos	27	208,5
Domestico	44	24,7
Consumo Humano	6	13,7
Pecuario	7	11,8
Minero	1	2,0
Recreativo	1	2,0

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 46. Caudal concesionado por usuario y tipo de uso de agua

Usuario Concesionado	Caudal Concesionado l/s	Uso
ENERLIM S.A E.S.P.	2400	GENERACION ELECTRICA
USOGUAMO	1800	RIEGO
TORRES FOKE	150	AGRICOLA
SOC.INV.ORJUELA LOS CHORROS S.C.LTD	112,5	AGRICOLA
SIERRA FIGUEROA	76,33	AGRICOLA
MARIA YOLANDA VASQUEZ DE PAVA	69,75	AGRICOLA
E.S.P DEL GUAMO ESPAG	63,5	ACUEDUCTOS
SOCIEDAD SALGUERO GONZALEZ LTDA	60	AGRICOLA
SOC. LLANO GOMEZ Y CIA.LTDA.	60	AGRICOLA
MATILDE RAMIREZ DE GONZALEZ	60	AGRICOLA
RIVERA OSPINA JOSE MARIA Y ABRAHAM	52,5	AGRICOLA
FANNY TOVAR DE URUEÑA	49,5	AGRICOLA
LUIS AUGUSTO LASERNA	45,5	AGRICOLA
TRUJILLO TRUJILLO	45	AGRICOLA
CLARA INES RAMOS DE MUÑOZ	45	AGRICOLA
DUQUE DE RAMOS	45	AGRICOLA
MARIA CONSUELO AMAYA DE AGUIRRE	45	AGRICOLA
TRUJILLO SALAZAR	45	AGRICOLA
EMPRESA DE SERVICIOS PUBLICOS DOMICILIARIOS DE ROVIRA E.S.P.	43,18	ACUEDUCTOS
GOUFRAY DE SUAREZ	37,5	AGRICOLA
GUZMAN VILLANUEVA	36	AGRICOLA
RAMOS RAMIREZ	36	AGRICOLA

Usuario Concesionado	Caudal Concesionado l/s	Uso
RINCON GUTIERREZ GUINARD ALFONSO	35	AGRICOLA
GERMAN LASERNA TOVAR Y OTROS	34,5	AGRICOLA
MORALES OCAMPO	31,5	AGRICOLA
STELLA ROSERO DE LASERNA	30	AGRICOLA
GUTIERREZ MENESES	30	AGRICOLA
SOC. R.J. SERVI INGENIERIA LTDA.	27,5	AGRICOLA
RODRIQUEZ BARRIOS MARIO	27	AGRICOLA
RODRIQUEZ BARRIOS MARIO	27	AGRICOLA
ORJUELA HUELGOS	27	AGRICOLA
SOC. BEMANA ANDINA Y CIA S.C.A.	25	AGRICOLA
SAGAR Y ASOCIADOS S.A. EN C.S.	25	AGRICOLA
CLARA INES RAMOS DUQUE	25	AGRICOLA
CARRETERO DE CASTRO	24	AGRICOLA
RODRIGUEZ VDA. DE FALLA AURA MARIA	24	AGRICOLA
OLIVAR DE PADILLA	24	AGRICOLA
HONORIO MANRIQUE ROJAS	24	AGRICOLA
RUBIANO DE LOPEZ MARTHA ELENA	21	AGRICOLA
ADMINISTRACION PUBLICA COOPERATIVA EMPRESA DE SERVICIOS PUBLICOS DEL	20,3	ACUEDUCTOS
LUIS EDGAR MURILLO OSPINA	20	AGRICOLA
SERRANO LOZANO BEATRIZ	20	AGRICOLA
DIONISIO FERNANDEZ	19,5	AGRICOLA
TOVAR MEJIA JESUS ANTONIO	19	AGRICOLA
RODRIGUEZ DE MANCHOLA JACOBA	18	AGRICOLA
RODRIGUEZ DE DIAZ	18	AGRICOLA
HONORIO MANRIQUE ROJAS	18	AGRICOLA
MUNICIPIO DEL GUAMO	17,6	ACUEDUCTOS
PELAEZ ARANGO	16,5	AGRICOLA
MUNICIPIO DE SAN LUIS	15,4	ACUEDUCTOS
MENDOZA	15	AGRICOLA
RODRIGUEZ SUAREZ	15	AGRICOLA
SOC. COMERCIAL AGROPECUARIA E INMB. RODRIGUEZ	15	AGRICOLA
CARRILLO	13,5	AGRICOLA
RODRIGUEZ VEGA	13,5	AGRICOLA
ARCINIEGAS BERNAL ASOCIADOS LTDA.	13,5	AGRICOLA
OLIVARES LIS LUIS EDUARDO	13	AGRICOLA
PORTELA HUMBERNEY Y CALDERON DE PORTELA CRISTINA	12,5	AGRICOLA
DUQUE DE RAMOS	12,5	AGRICOLA
RAMOS DE CALLE	12,5	AGRICOLA
RODRIGUEZ VDA. DE CONDE CONCEPCION	12	AGRICOLA

Usuario Concesionado	Caudal Concesionado l/s	Uso
MUNICIPIO DE SAN LUIS	12	ACUEDUCTOS
JARAMILLO BETANCOURT	12	AGRICOLA
PINSKI YANKELEVICH	10,5	AGRICOLA
TOVAR MEJIA JESUS ANTONIO	10	AGRICOLA
VICTOR DANILO OSPINA CLEVES	10	AGRICOLA
BARRAGAN DE GUTIERREZ	10	AGRICOLA
RODRIGUEZ SUAREZ	10	AGRICOLA
OMAR MONTOYA YEPES	9,25	AGRICOLA
BARRERO DE ARIAS CELMIRA	9	AGRICOLA
BONILLA CARDOZO	9	AGRICOLA
RICARDO FONNEGRA ROCHA	9	AGRICOLA
J.A.C. CERRO GORDO	8,07	ACUEDUCTOS
TORO CALDERON	8	AGRICOLA
FERNANDEZ BUELVAS SANTANDER JOSE	7,5	AGRICOLA
PRADA ROJAS Y OTRA	7,5	AGRICOLA
GERMAN LASERNA TOVAR Y OTROS	7,5	AGRICOLA
PORTELA HUMBERNEY Y CALDERON DE PORTELA CRISTINA	7,2	AGRICOLA
SOC.GUANAMU S.A.	7	AGRICOLA
VIANA ARRELLANO ISABEL CRISTINA	6,75	AGRICOLA
ASOCIACION DE FAMILIAS PARCELEROS FINCA LA PONDEROSA	6,055	DOMESTICO
LUIS ARTURO ESCOBAR BECERRA	6	AGRICOLA
CONDE RODRIGUEZ	5,25	AGRICOLA
LUGO SEGURA	5	DOMESTICO
ERNESTO GUTIERREZ ACHURY	5	AGRICOLA
ADMINISTRACION PUBLICA COOPERATIVA EMPRESA DE SERVICIOS PUBLICOS DEL	5	CONSUMO HUMANO
OYUELA HERNANDEZ	4,5	AGRICOLA
JOAQUIN MEJIA FIGUEREDO	4	AGRICOLA
SOC. PALMA PIMIENTO Y CIA S. EN C.	4	AGRICOLA
RODRIGUEZ BARRIOS	4	AGRICOLA
MARIA DE LOURDES	4	AGRICOLA
SANCHEZ GOMEZ MARTHA STELLA	4	PECUARIO
MARIA DE LOURDES	4	CONSUMO HUMANO
MARIA DE LOURDES	4	PECUARIO
BARRIOS ZARTA RAUL	4	AGRICOLA
ASOCIACION DE USUARIOS DEL ACUEDUCTO RURAL CUCAL ALTO	3,86	ACUEDUCTOS
VILLANUEVA HERNANDEZ	3,6	AGRICOLA
MUNICIPIO DE VALLE DE SAN JUAN	3,15	ACUEDUCTOS
MONTOYA GUTIERREZ HERNANDO	3,1	DOMESTICO

Usuario Concesionado	Caudal Concesionado l/s	Uso
RESTREPO VIVAS	3	AGRICOLA
PEDROZA ROMERO BEULFO	3	AGRICOLA
DIAZ DE JIMENEZ ROSALBINA	3	AGRICOLA
SOC. CONSTRUCTORA OSPINA LTDA.	3	AGRICOLA
GUTIERREZ DUQUE	3	CONSUMO HUMANO
GARCIA RAMOS GREGORIO	3	DOMESTICO
ENCARNACION DE MURILLO	2,5	AGRICOLA
JUNTA DE ACCION COMUNAL DE LA VEREDA LA TOMA	2,5	ACUEDUCTOS
ROJAS ROJAS	2,5	AGRICOLA
CARRILLO CASTRO	2	AGRICOLA
ZUÑIGA TRIANA NOHORA YULID Y OTROS	2	RECREATIVO
PRADA URUEÑA	2	AGRICOLA
ANGLOGOLD ASHANTI COLOMBIA S.A.	2	MINERO
JARAMILLO BETANCOURT	2	AGRICOLA
REYES BOCANEGRA	2	DOMESTICO
RODRIGUEZ RODRIGUEZ HUMBERTO	2	AGRICOLA
SOC. SANCHEZ ECHEVERRY Y CIA " SANECO S.C.A"	1,6	AGRICOLA
ASOC. USUAR ACUED VDA MARTINEZ SECTOR LA GAITANA MPIO ROVIRA TOL.	1,6	AGRICOLA
TERESA RENGIFO VDA. DE RENGIFO	1,5	AGRICOLA
CARMEN ARANDA VDA. DE ORTIZ	1,5	AGRICOLA
ASOUSUA-ACUED-RURAL VDA LA LIBERTAD	1,5	ACUEDUCTOS
JAVELA MURCIA	1,5	AGRICOLA
OVIEDO DE LARA	1,5	CONSUMO HUMANO
JAC. VDA. BUENAVISTA/CUNDAY	1,43	ACUEDUCTOS
ASOC. COMUN DE USUAR ACUED B/ALBANIA	1,4	ACUEDUCTOS
JAC.VDA.SAN ROQUE ALTO/ROVIRA	1,38	ACUEDUCTOS
JAC. VDA. CALICA/ROVIRA	1,36	ACUEDUCTOS
JUNTA ADMINISTRADORA DEL ACUEDUCTO	1,35	ACUEDUCTOS
ASOC. DE USUAR ACUED RURAL LA PALMITA/ROVIRA	1,3	ACUEDUCTOS
GRANJA EL RUBY S.A.S	1,268	PECUARIO
ASOUSUA-ACUED-RURAL VDA LA LIBERTAD	1,2	ACUEDUCTOS
ASOCIACION DE USUARIOS DEL ACUEDUCTO	1,15	ACUEDUCTOS
ASOCIACION DE USUARIOS DEL ACUEDUCTO RURAL LA DIVISA-LA LUISA	1,1	ACUEDUCTOS
ACADEMIA MARISCAL SUCRE	1,05	AGRICOLA
JAC. VDA. LA LAGUNA/ROVIRA	1,02	ACUEDUCTOS
J.A.C. VDA. BOQUERON DEL MUNICIPIO DE ROVIRA - TOLIMA	1	ACUEDUCTOS
JAC. VDA. SANTA ROSA/VALLE SAN JUAN	1	ACUEDUCTOS
JIMNEZ GUTIERREZ	1	AGRICOLA

Usuario Concesionado	Caudal Concesionado l/s	Uso
JUNTA DE ACCION COMUNAL	1	ACUEDUCTOS
GUZMAN MARIN DOMINGO	1	AGRICOLA
VALENCIA HEREDIA	1	PECUARIO
YAGUE LIZCANO MARCO TULIO	1	DOMESTICO
JAC. VDA. LAS MANGAS-SECTOR LA PRIMAVERA/ROVIRA	0,97	ACUEDUCTOS
ANGEL ALVAREZ GUILLERMO	0,628	PECUARIO
FERIA DE AGUDELO FANNY	0,55	AGRICOLA
SOCIEDAD TORRES Y TORRES	0,5	AGRICOLA
TORRES CARVAJAL GUILLERMO	0,5	PECUARIO
VILLARREAL MONTEALEGRE	0,46	DOMESTICO
QUIMBAYO RAMIREZ	0,45	DOMESTICO
FABIPOLLO S.A.S.	0,44	PECUARIO
TELLEZ RAMIREZ JORGE ELIECER	0,42	DOMESTICO
JUNTA ADMINISTRADORA DEL ACUEDUCTO VEREDA LA CHAPA	0,41	ACUEDUCTOS
PEÑA	0,4	AGRICOLA
MARIA IMELDA RUIZ DE FERIA	0,4	AGRICOLA
JAC. VDA. VALLECITO/VALLE DE SAN JUAN	0,4	ACUEDUCTOS
ZAMBRANO MARIN	0,31	DOMESTICO
ROMERO PAEZ	0,26	DOMESTICO
VILLAMIL ROZO	0,2	AGRICOLA
VILLANUEVA GUZMAN	0,2	DOMESTICO
JIMENEZ SALAZAR	0,2	AGRICOLA
REYES	0,2	AGRICOLA
RODRIGUEZ NAVARRO	0,2	DOMESTICO
PULECIO DE BRAUM	0,18	DOMESTICO
LUCIA PULECIO MELENDRO	0,18	DOMESTICO
ZAMBRANO MARIN	0,17	DOMESTICO
JOSE YESID VILLANUEVA ACOSTA	0,16	AGRICOLA
HORACIO RENE ZAMORA QUIMBAYO	0,15	DOMESTICO
ROJAS ORTIZ	0,15	CONSUMO HUMANO
REYES NEFTALI	0,146	AGRICOLA
MORA MOSCOSO	0,11	DOMESTICO
ALVAREZ LAVERDE	0,101	DOMESTICO
REYES NEFTALI	0,1	DOMESTICO
OSPINA GUTIERREZ	0,1	DOMESTICO
VILLEGAS GOMEZ	0,09	DOMESTICO
LARA GONZALEZ	0,073	DOMESTICO
CASTRO	0,07	DOMESTICO
CARLOS LIBARDO MEJIA RAMIREZ	0,07	DOMESTICO

Usuario Concesionado	Caudal Concesionado l/s	Uso
GUZMAN JIMENEZ JULIAN ANDRES	0,064	DOMESTICO
MAZ BARRETO	0,06	DOMESTICO
OSPINA RODRIGUEZ	0,06	DOMESTICO
SANDOVAL PARRA	0,06	DOMESTICO
JOSE RICARDO , FELIPE Y JUAN PABLO LASERNA LOW	0,06	DOMESTICO
FERNEY ROJAS CORTEZ Y JORGE HERNANDO ROBLES	0,06	DOMESTICO
VARON	0,053	DOMESTICO
VARON	0,05	DOMESTICO
SANCHEZ LARA	0,05	DOMESTICO
DAVID SUAREZ RAMIREZ	0,04	DOMESTICO
RUBIO QUIMBAYO PABLO EMILIO	0,035	RIEGO
CASTAÑO PUERTA MELBA	0,035	DOMESTICO
ROMERO BONILLA ALDUBAR	0,035	DOMESTICO
SANDOVAL SAAVEDRA	0,03	DOMESTICO
MAHECHA ARDILA	0,03	CONSUMO HUMANO
ORJUELA LOPEZ	0,03	DOMESTICO
RUIZ DIAZ MARIA TERESA	0,03	DOMESTICO
MURILLO DE NIETO BENEDICTA	0,03	DOMESTICO
VILLARREAL DE VASQUEZ	0,025	DOMESTICO
OSORIO ARIAS	0,02	DOMESTICO
JOSE ROSEMBER ROJAS CORTES	0,02	DOMESTICO

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

De esta manera para poder atribuir la demanda hídrica a las 9 unidades hidrográficas de estudio fue necesario:

1° Espacialización y asignación de la unidad hidrográfica correspondiente de 48 usuarios con información disponible de coordenadas, con concesiones mayor a >0,020 m^3/s, obtenida para el acopio de información del Sistema de Información del Recurso Hidrico – SIRH.

2° Se atribuyó por fuente abastecedora, y vereda insumo de la concesión, la unidad hidrográfica a la cual pertenece, con el fin de poder asignar el caudal concesionado a la demanda hídrica de cada unidad.

A continuación, las fuentes abastecedoras asignadas en la concesión de agua.

Tabla 47. Caudal concesionado para los niveles subsiguientes de la subzona hidrográfica del río Luisa y otros directos al Magdalena

Fuentes Subzona Hidrográfica	Usuarios	Caudal Concesionado l/s
Rio Luisa	142	6129,152
Quebrada Guaduas	13	251,800
Quebrada Concha	1	76,330
QuebradaChucuali	3	21,000
Quebrada La Jagua	6	10,228
Directos Magdalena Sector Flandes	1	9,000
Quebrada San Bonifacio	2	6,000
Quebrada Guarapo	1	5,000
Quebrada El Cobre	6	2,830
Quebrada Santa Ana	2	2,698
Quebrada Real	5	2,610
Quebrada Guayabal O La Pioja	1	2,500
Quebrada Arenosa	1	2,000
Quebrada Del Higueron	4	1,850
Quebrada Guarapitos	2	1,100
Directos Magdalena Sector La Chamba	1	0,550
Quebrada Montalvo	1	0,070
Quebrada Del Valle	1	0,040
Quebrada Las Palmas	1	0,035
Rio Guadua	1	0,035
Quebrada La Arenosa 2118.2	1	0,030
Quebrada La Chapa	1	0,020

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Basados en el listado anterior y en la georreferenciación disponible en el SIRH la presión de usuarios contemplada en la cuenca por Unidad Hidrográfica se identificaría como lo indica la tabla 48.

11.2 USUARIOS INFORMALES

La Corporación Autónoma Regional del Tolima – CORTOLIMA considero establecer la demanda de usuarios informales, teniendo presente que existe una reglamentación para el río Luisa y sus afluentes la cual se prorrogó bajo resolución 3928 del 13 de septiembre de 2011, que indica las limitaciones existentes sobre la cuenca, de esta manera se establecen los usuarios informales:

Al caudal total producto de la modelación hidrológica, se le realizó los respectivos descuentos por caudal ambiental y demanda de usuarios concesionados atribuyendo el restante a usuarios informales.

Tabla 48. Caudal concesionado para cada unidad hidrológica que conforma la subzona hidrográfica del río Luisa y otros directos al Magdalena

Unidades Hidrográficas	Cantidad	Caudal Concesionado m^3.seg
Río Luisa Parte Alta	85	2993,767
Río Luisa Parte Baja	37	2131,228
Directos al Río Luisa Parte Baja - Q Guaduas	44	705,25
Directos al Río Luisa parte baja - Q Serrezuela	19	515,5
Quebrada Eneal	1	150
Directos al Magdalena - Q Santana y otros	5	17,698
Directos al Magdalena - Q Guayabal y otros	2	2,57
Directos al Magdalena - Q Palito y otros	2	0,81
Directos al Magdalena - Q Agua Sucia y otros	0	0

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

No obstante, es clave resaltar que este proceso se consideró finalmente solamente para las unidades hidrográficas Directos al Magdalena - Q Palito y otros, y Directos al Magdalena - Q Agua Sucia y otros, ya que las condiciones reales que presentan en la demanda hídrica requiere incluso de los trasvases recibidos de los canales Palito y Serrezuela.

A su vez conociendo la demanda de usuarios que reciben el recurso hídrico de canales se puede concluir lo representado en las siguientes tablas:

Tabla 49. Demanda total para cada unidad hidrológica que conforma la subzona hidrográfica del río Luisa

RÍO LUISA				
Unidad Hidrografica	Demanda SIRH Concesionado	Demanda Usuarios Informales	Canales	DEMANDA TOTAL m^3.seg
Río Luisa Parte Alta	2,994			2,994
Directos al Río Luisa Parte Baja - Q Guaduas	0,705		0,084	0,789
Directos al Río Luisa parte baja - Q Serrezuela	0,516		7,881	8,396
Río Luisa Parte Baja	2,131		5,658	7,789
TOTALES				**19,968**

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

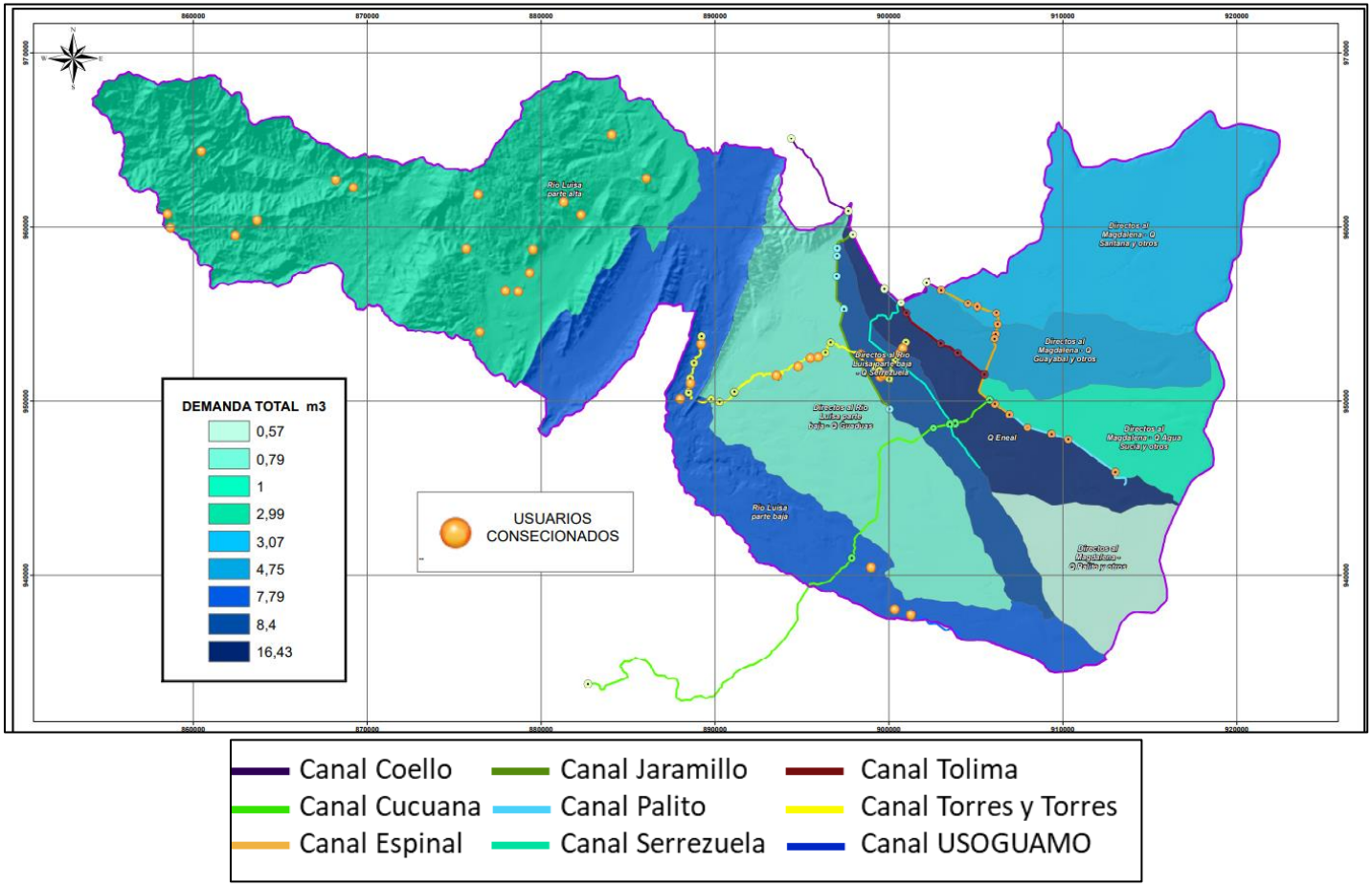
Tabla 50. Demanda total para cada unidad hidrológica que conforma los directos al Magdalena de la subzona hidrográfica del río Luisa y otros directos al Magdalena

DIRECTO AL MAGDALENA				
Unidad Hidrográfica	**Demanda SIRH Concesionado**	**Demanda Usuarios Informales**	**Canales**	**DEMANDA TOTAL m^3.seg**
Directos al Magdalena - Q Palito y otros	0,001	0,570		0,571
Directos al Magdalena - Q Santana y otros	0,018		3,050	3,068
Directos al Magdalena - Q Agua Sucia y otros	0,000	1,000		1,000
Directos al Magdalena - Q Guayabal y otros	0,003		4,750	4,753
Quebrada Eneal	0,150		16,278	16,428
TOTALES				**25,819**

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

En la Figura 44 se observa gráficamente la distribución espacial de usuarios con georreferenciación y la demanda hídrica real por unidad hidrográfica, evidenciando que la unidad hidrográfica de la Quebrada Eneal presenta la mayor demanda hídrica de la Subzona Hidrográfica, lo que implica la necesidad de trasvases para satisfacer las necesidades de la región.

Figura 44. Demanda y usuarios consesionados en la subzona hidrografica del río Luisa y otros directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

12 INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD HIDRICA

Para determinar los indicares hídricos se tuvo en cuenta los criterios establecidos en el Estudio Nacional del agua 2010 y en la Evaluación Regional del Agua ERA, 2013 elaborados por el IDEAM; factores éstos que ayudan a comprender el potencial hídrico de la región y dan pautas para estimar el recurso hídrico en cuencas de tercer orden, que conduzcan al ordenamiento y manejo del agua en las Corporaciones Autónomas Regionales (IDEAM, 2010).

El Indicador es un mecanismo muy importante que permite garantizar el conocimiento y comprensión de la dinámica de procesos básicos del recurso hídrico en las grandes y pequeñas cuencas en su medio natural y su relación con la demanda por el uso del agua de las actividades sociales y económicas (IDEAM, 2010).

Definición

Los indicadores hídricos son elementos que permiten simplificar, analizar, cuantificar y comunicar parámetros complejos, caso de la información hidrológica y climatológica, con el fin de que las personas que se encarguen de planificar y tomar decisiones, referentes al desarrollo y al medio ambiente lo realicen en convencimiento y conocimiento de las condiciones hidroclimáticas de la región (IDEAM, 2013).

Hay dos tipos de indicadores los de régimen natural y los que implican actividades humanas. Los de régimen natural corresponden al Índice de Aridez y al Índice de Retención y Regulación Hídrica y los que implican actividad humana son El Índice de Uso del Agua y el Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico.

12.1 INDICADORES DE RÉGIMEN NATURAL

12.1.1 Índice de retención y regulación hídrica

El Índice de Retención y Regulación Hídrica evalúa la retención de humedad tanto en el suelo como en la vegetación en una cuenca hidrológica teniendo en cuenta el complejo suelo – cobertura vegetal y explica tanto las condiciones de retención de humedad del suelo como la autorregulación del régimen hídrico de los sistemas hidrográficos (IDEAM, 2010).

Los componentes para evaluar la capacidad de retención de humedad en la cobertura vegetal y en el suelo no son fáciles de determinar. En el ENA 2010, después de muchos análisis y procesos, se determinó que el índice se estimaría con base en la curva de duración de caudales medios mensuales, ya que interpretan las características del régimen hidrológico y el comportamiento de retención de humedad de la cuenca. Entre estos factores los de mayor influencia son el relieve, el área de cuenca, la lluvia media anual y la altitud (IDEAM, 2010).

$$IR = \frac{AP}{AT}$$

Dónde:
IR: Índice de Retención y Regulación Hídrica
AP: Área o volumen bajo la línea del caudal medio.
AT: Área o volumen bajo la curva de duración de caudales.

Tabla 51. Índice de retención y regulación hídrica

RANGO	CATEGORIA	SIGNIFICADO
> 0.85	MUY ALTO	La cuenca tiene una retención de humedad muy alta
0.75 - 0.85	ALTO	La cuenca tiene una retención de humedad alta
0.65 - 0.75	MEDIA	La cuenca tiene una retención de humedad media
0.50 - 0.65	BAJO	La cuenca tiene una retención de humedad baja
< 0.50	MUY BAJO	La cuenca tiene una retención de humedad muy baja

Fuente: (IDEAM, 2010)

La figura 45 representa la variación del índice de retención y regulación hídrica en las unidades hidrográficas que integran la cuenca del río Luisa y Directos al Magdalena.

12.2 INDICADORES DE RÉGIMEN ANTRÓPICO

Estos indicadores implican actividades humanas que inciden directamente con el recurso hídrico que aportan las cuencas hidrográficas.

12.2.1 Índice de uso del agua

Es la necesidad para mantener un caudal mínimo para la regulación y preservación de los ecosistemas, garantizar el abastecimiento a los diferentes sectores económicos y prever las restricciones por alteraciones de la calidad del agua, por la que se creó el Índice de Uso del Agua (IDEAM, 2010).

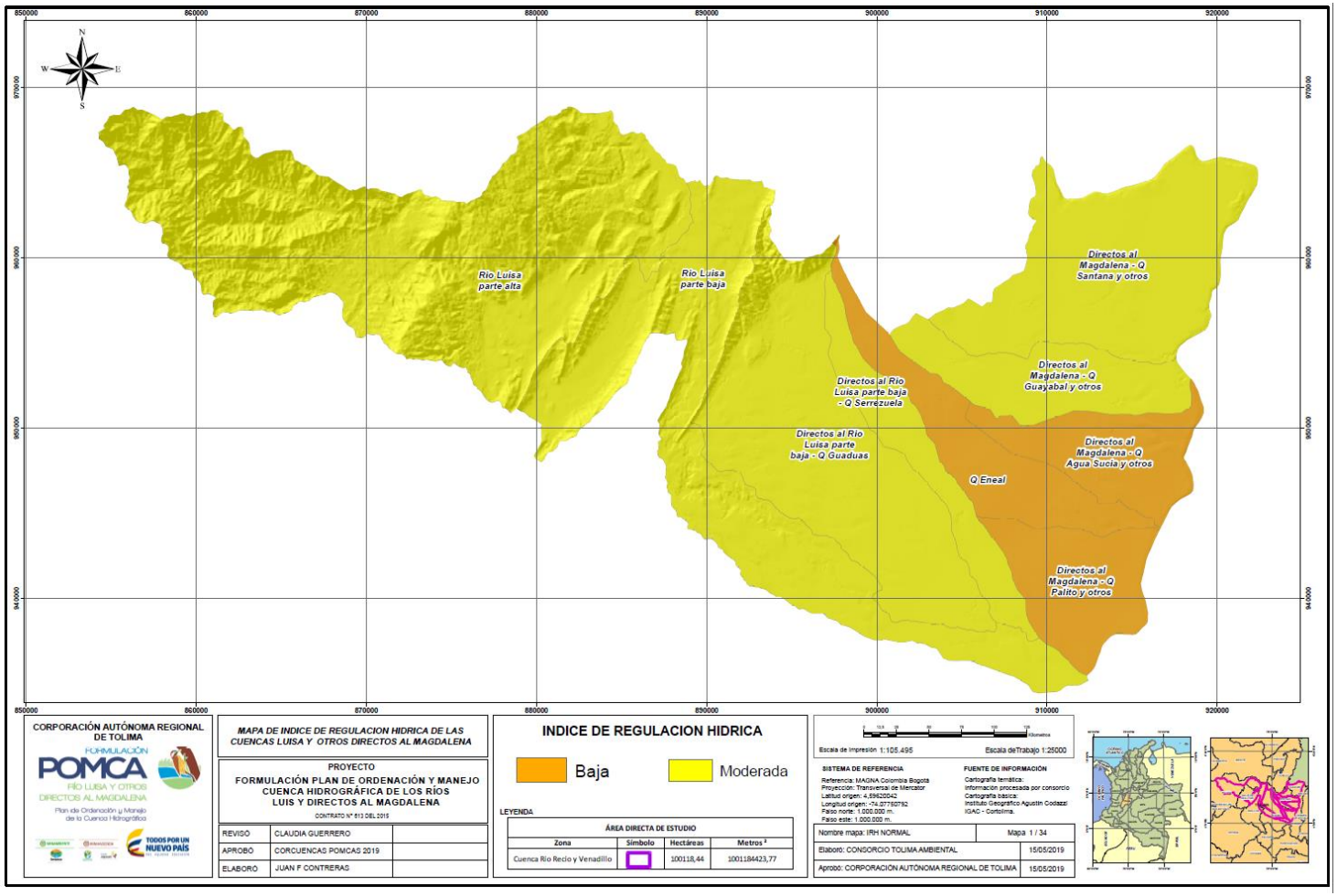
De acuerdo con las Naciones Unidas, cuando el índice del uso del agua, sobrepasa el 20% para un año hidrológico medio, deben iniciarse programas de ordenamiento y conservación de cuencas a fin de hacer sostenible el recurso hídrico y evitar situaciones que afecten el abastecimiento de agua a los diferentes sectores económicos y prevenir futuras crisis.

Definición: El índice de uso del agua está definido por la relación porcentual de la demanda de agua que ejercen en su conjunto las actividades económicas y sociales con relación a la oferta hídrica neta disponible (OHn) que está determinada por la oferta total natural menos la oferta hídrica ambiental (IDEAM, 2010). Siguiendo con la metodología del ERA - 2013- la ecuación está representada en seguida:

$$IUA = (\frac{DH}{OH_n}) * 100$$

Dónde:
IUA: Índice de uso del agua
DH: Demanda Hídrica
QHn: Oferta hídrica neta disponible

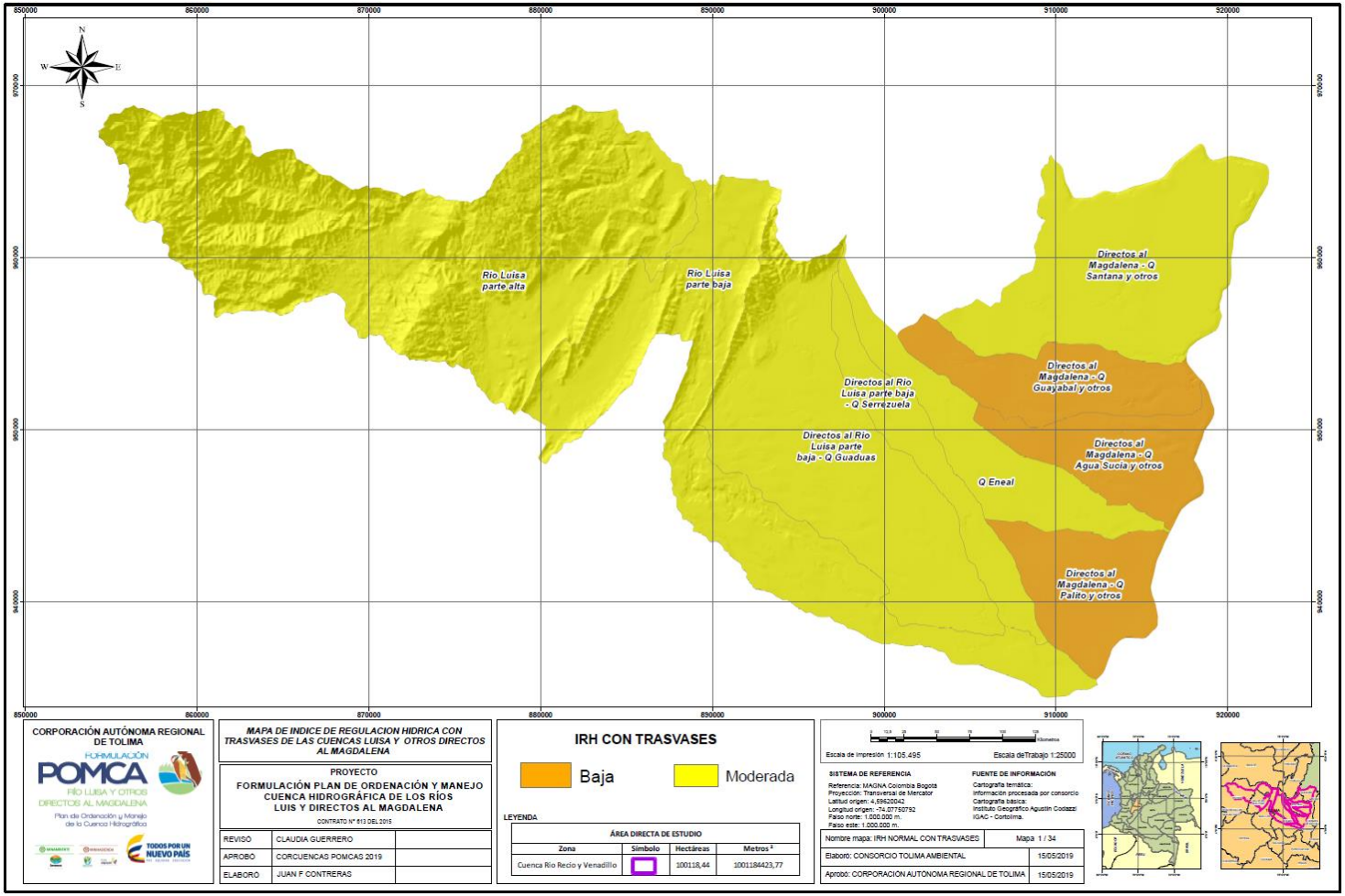
Figura 45. Mapa índice de retención y regulación hídrica – año normal cuenca río Luisa y directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

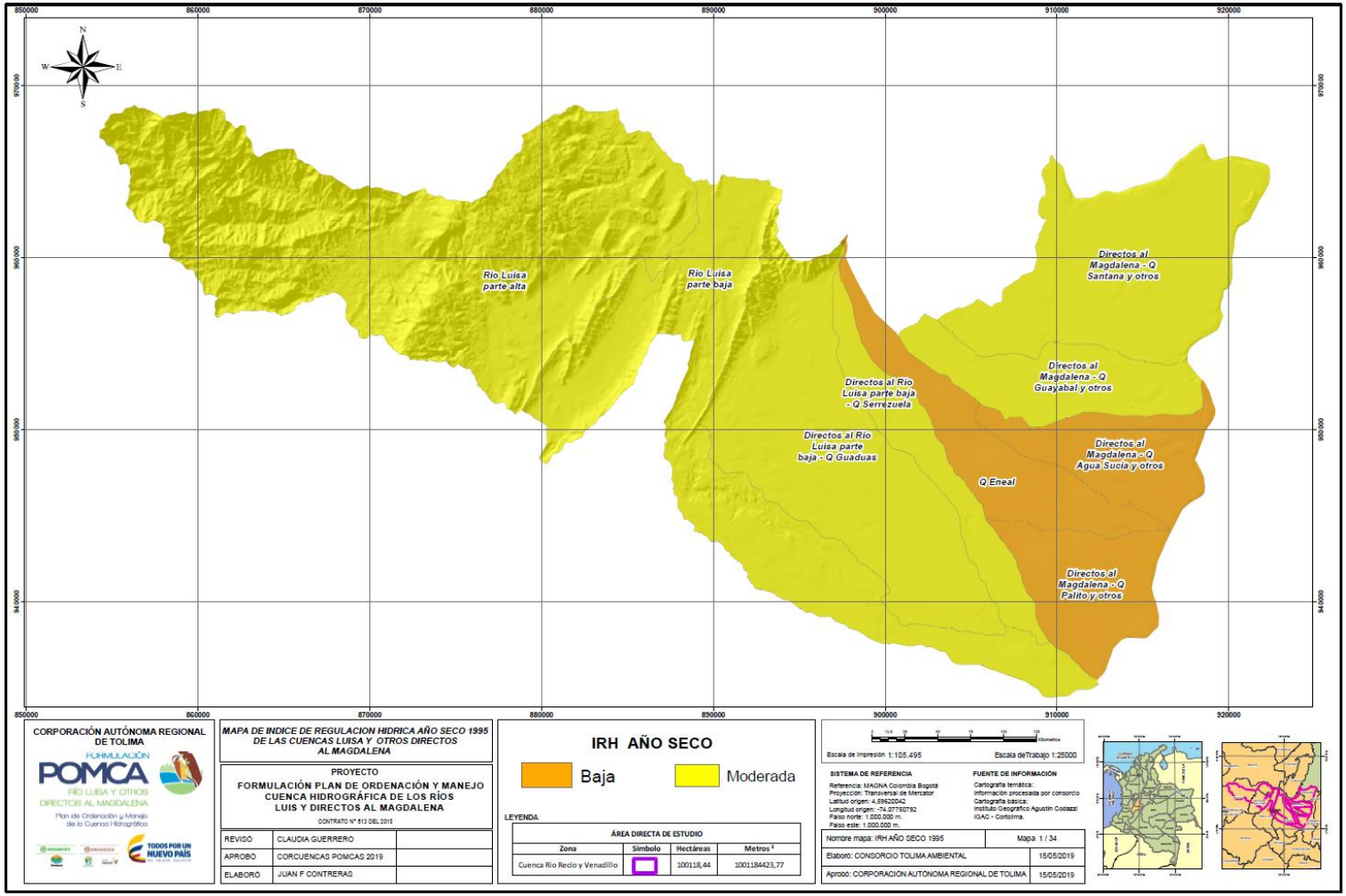
Ver digital L:\correcciónes\2. FASE DE DIAGNOSTICO\3.7 HIDROLOGIA\ANEXOS\Anexo 4. Mapas\09 IRH LODM

Figura 46. Mapa índice de retención y regulación hídrica – año normal con trasvases cuenca río Luisa y directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019
Ver digital L:\correcciónes\2. FASE DE DIAGNOSTICO\3.7 HIDROLOGIA\ANEXOS\Anexo 4. Mapas\09 IRH LODM Trasvases

Figura 47. Mapa índice de retención y regulación hídrica – año seco cuenca río Luisa y directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Ver digital L:\correcciónes\2. FASE DE DIAGNOSTICO\3.7 HIDROLOGIA\ANEXOS\Anexo 4. Mapas\09 IRH LODM año seco

En la Tabla 52 aparen las categorías del índice de uso del agua de acuerdo con la presión de la demanda con relación a la oferta hídrica disponible.

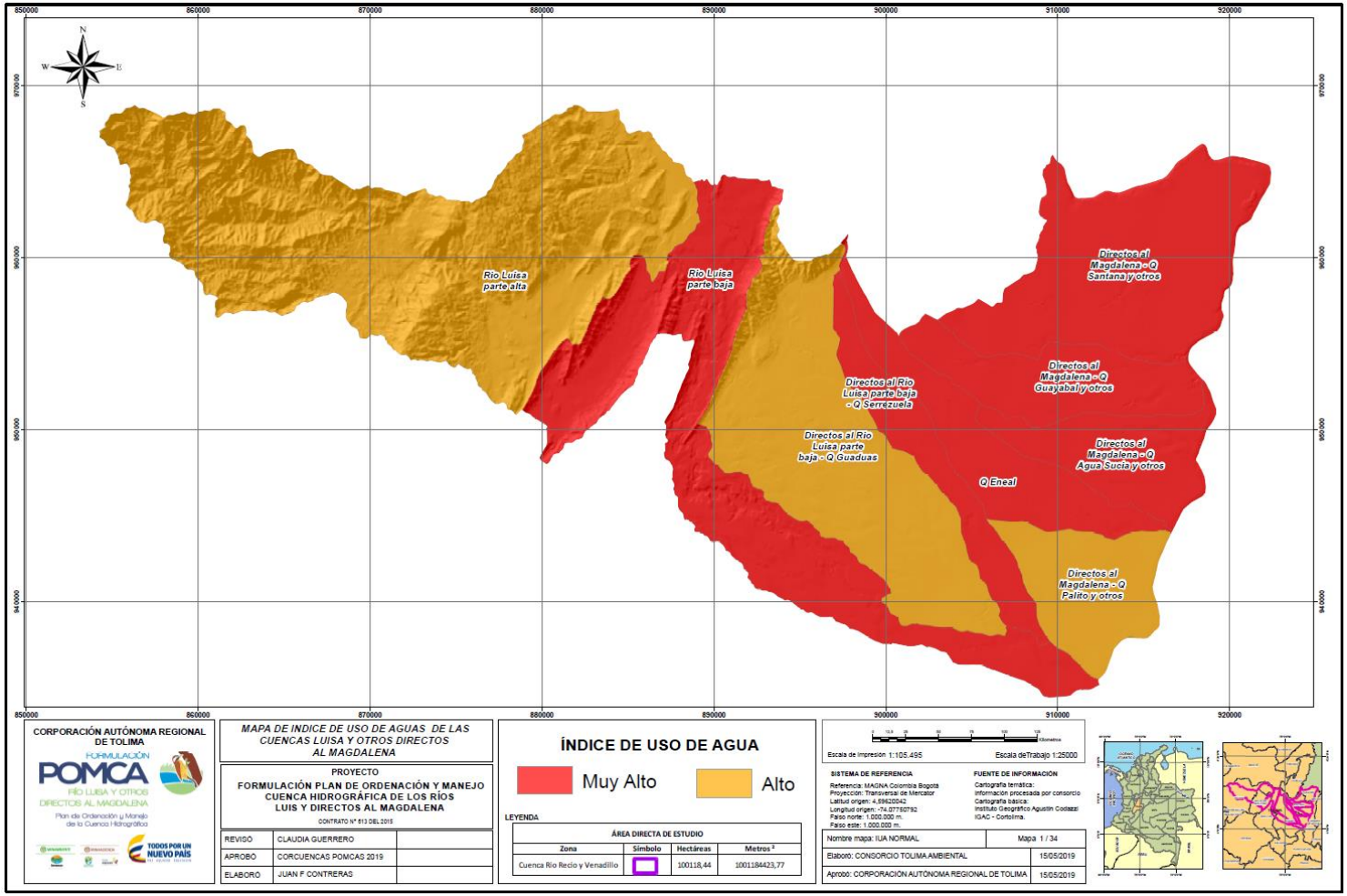
Tabla 52. Categoría índice de uso del agua. -IUA-

RANGO (DH/OD)*100	CATEGORIA IUA	SIGNIFICADO
> 0.50	MUY ALTO	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible
20.01 - 50	ALTO	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible
10.01 - 20	MODERADO	La presión de la demanda es moderada alta con respecto a la oferta disponible
1 - 10.0	BAJA	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
< 1	MUY BAJA	La presión de la demanda es muy baja con respecto a la oferta disponible

Fuente: (IDEAM, 2010)

En la figura 48 se puede observar la variación del índice del uso del agua en las unidades hidrográficas de la cuenca del río Luisa y Directos al Magdalena.

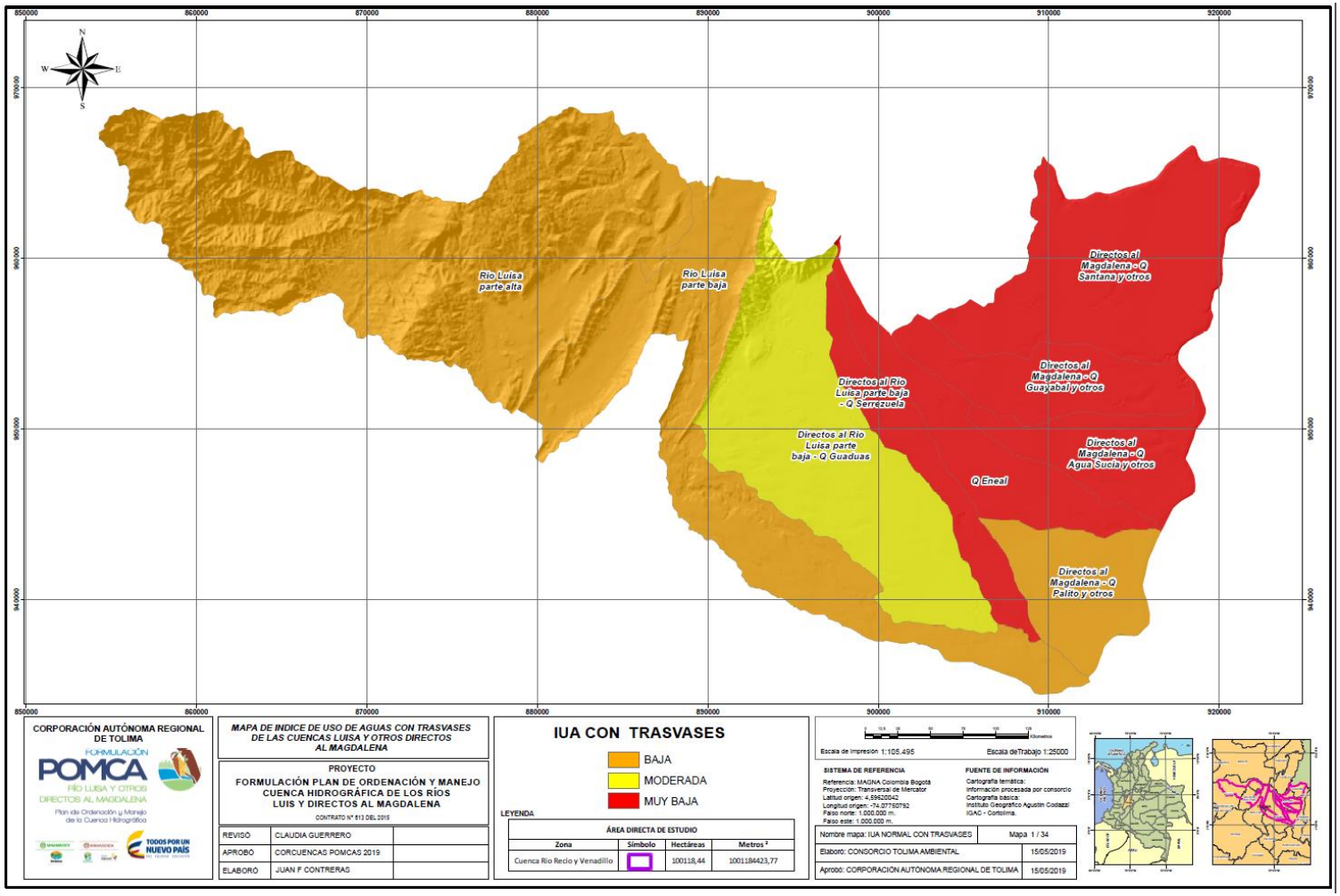
Figura 48. Índice de uso del agua – año normal cuenca río Luisa y directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

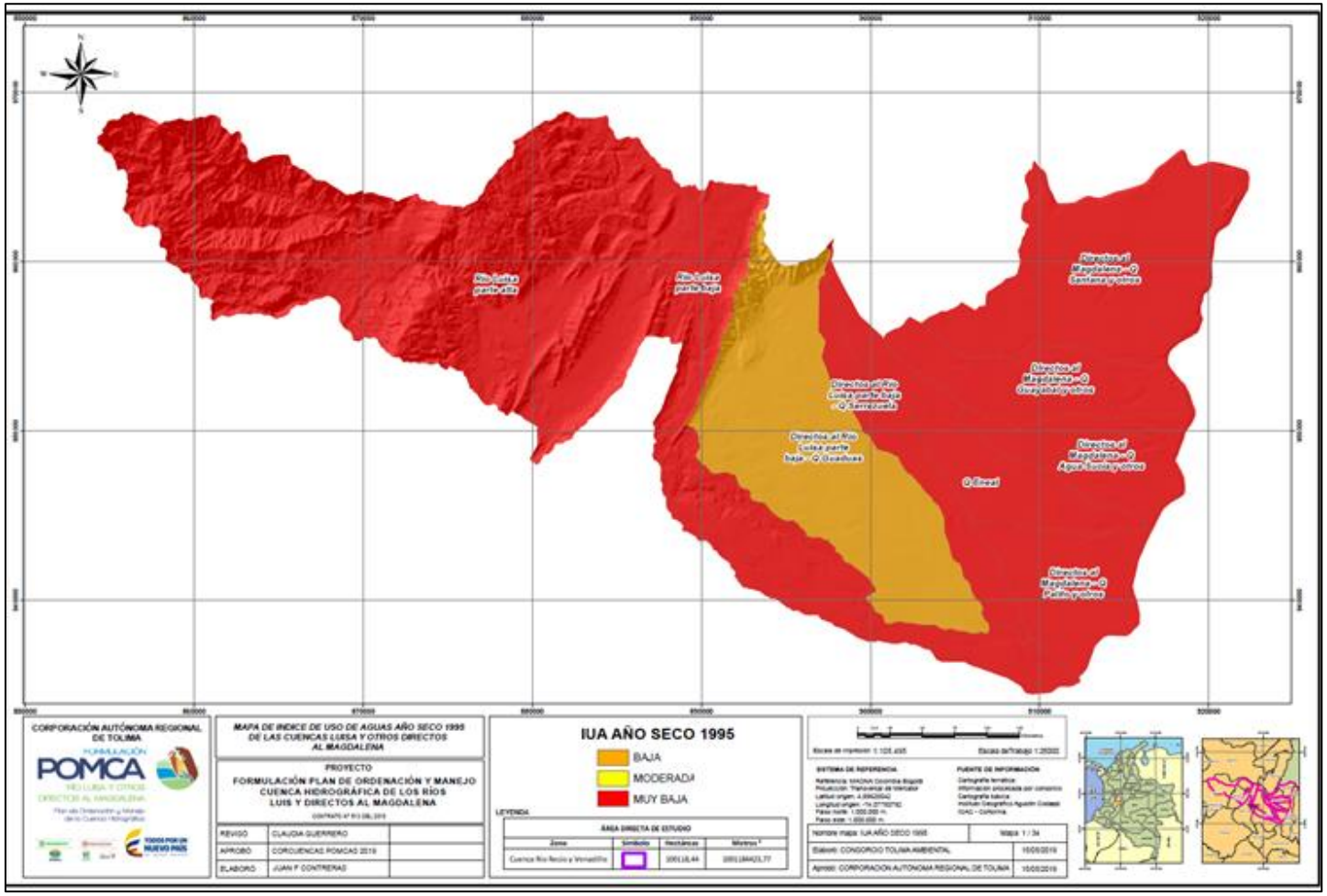
Ver digital L:\correcciónes\2. FASE DE DIAGNOSTICO\3.7 HIDROLOGIA\ANEXOS\Anexo 4. Mapas\ 08 IUA LODM.jpg

Figura 49. Índice de uso del agua – año normal con trasvases cuenca río Luisa y directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019
Ver digita L:\correcciónes\2. FASE DE DIAGNOSTICO\3.7 HIDROLOGIA\ANEXOS\Anexo 4. Mapas\08 IUA LODM Trasvases

Figura 50. Índice de uso del agua – año seco cuenca río Luisa y directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Ver digital L:\correcciónes\2. FASE DE DIAGNOSTICO\3.7 HIDROLOGIA\ANEXOS\Anexo 4. Mapas\08 IUA LODM año seco

12.2.2 Índice de vulnerabilidad

El Índice de Vulnerabilidad es también llamado como de "Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico" por cuanto el propósito es el de estimar o cualificar los riesgos de las diferentes actividades del desarrollo socioeconómico asociadas directamente con la vulnerabilidad de las fuentes de agua, (IDEAM, 2013).

Definición: Grado de fragilidad del sistema hídrico para mantener una oferta para el abastecimiento de agua, que ante amenazas, como periodos largos de estiaje o eventos como el Fenómeno Cálido del Pacífico (El Niño), podría generar riesgos de desabastecimiento (IDEAM, 2013). La Importancia de este indicador es dar una visión y una alerta sobre los sistemas hídricos para que estos mantengan condiciones de sostenibilidad del recurso hídrico, a fin de que en los municipios y cabeceras municipales no se presenten desabastecimientos y tener al mismo tiempo elementos para la planificación, ordenamiento y conservación del uso del agua. En la

Tabla **53** aparecen las categorías que clasifican la situación la fragilidad del recurso en una cuenca determinada.

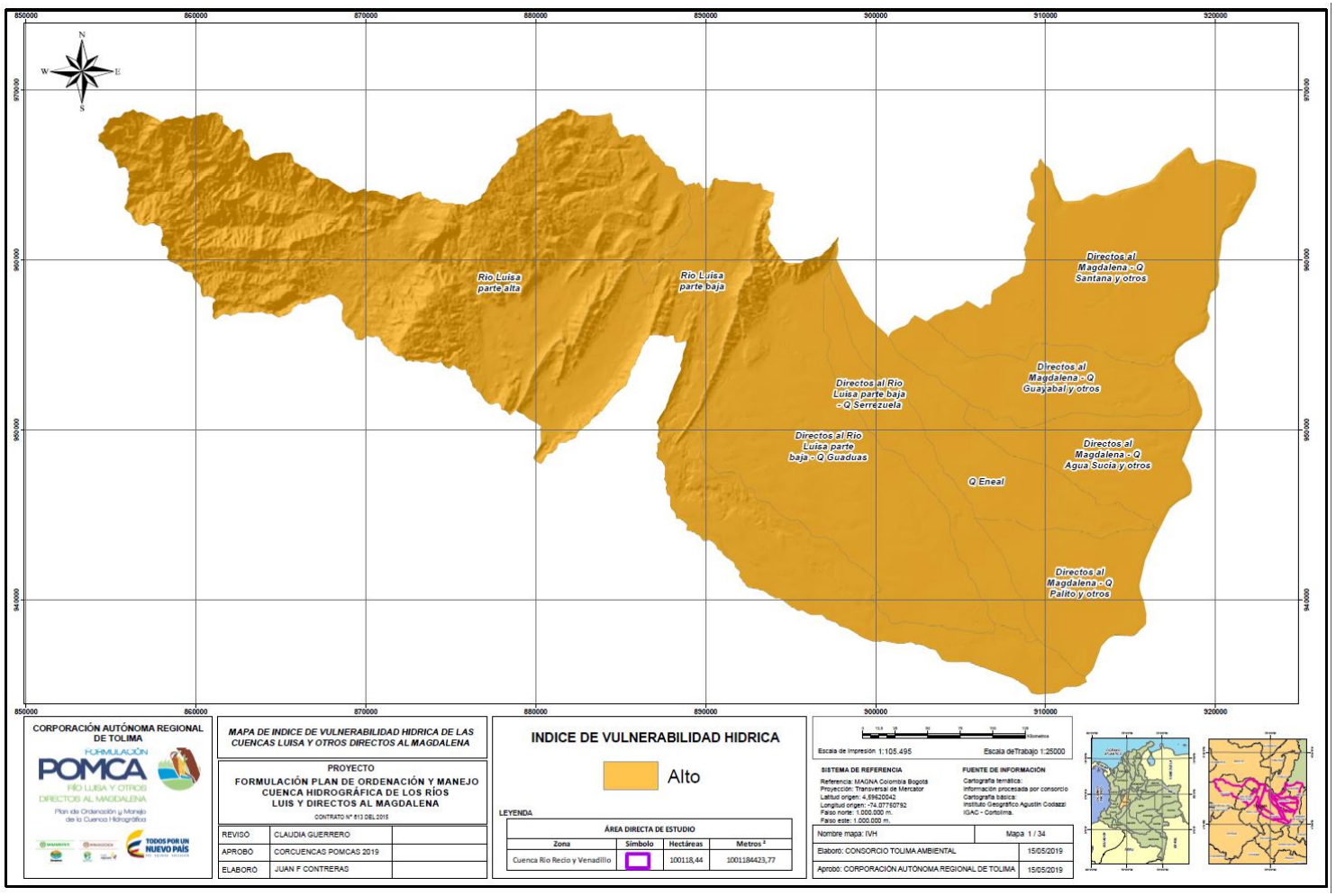
Tabla 53. Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico

ÍNDICE DE USO DE AGUA	ÍNDICE DE REGULACIÓN	CATEGORÍA VULNERABILIDAD
Muy Bajo	Alto	Muy Bajo
Muy Bajo	Moderado	Bajo
Muy Bajo	Bajo	Medio
Muy Bajo	Muy Bajo	Medio
Bajo	Alto	Bajo
Bajo	Moderado	Bajo
Bajo	Bajo	Medio
Bajo	Muy Bajo	Medio
Medio	Alto	Medio
Medio	Moderado	Medio
Medio	Bajo	Alto
Medio	Muy Bajo	Alto
Alto	Alto	Medio
Alto	Moderado	Alto
Alto	Bajo	Alto
Alto	Muy Bajo	Muy Alto
Muy Alto	Alto	Medio
Muy Alto	Moderado	Alto
Muy Alto	Bajo	Alto
Muy Alto	Muy Bajo	Muy Alto

Fuente: (IDEAM, 2010)

La Figura 51 muestra el mapa con el índice de vulnerabilidad para las 9 unidades hidrográficas de la cuenca del río Luisa y Directos al Magdalena

Figura 51. Índice de vulnerabilidad – cuenca río Luisa y directos al Magdalena



Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Ver digital L:\correcciónes\2. FASE DE DIAGNOSTICO\3.7 HIDROLOGIA\ANEXOS\Anexo 4. Mapas\07 IVH LODM

12.3 RESULTADOS DE LOS INDICADORES PARA LA CUENCA DEL RÍO LUISA Y DIRECTOS AL MAGDALENA

Teniendo en cuenta el marco conceptual y teórico anterior se determinaron los indicadores hidrológicos para las 9 unidades hidrográficas que integran la cuenca hidrográfica del río Luisa y Directos al Magdalena. Los resultados se pueden observar de la Tabla 54 a la Tabla 77.

12.3.1 Índices de sostenibilidad

Tabla 54. Índices de sostenibilidad hídrica – río Luisa parte alta

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	Demanda Usuarios Informales	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	IUA %	IRH%	I.V.
Río Luisa Parte Alta	2,994		2,994	8,038	2,009	6,028	3,035	49,660	67,354	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 55. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al río Luisa parte baja - Q Guaduas

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	CANALES	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	IUA %	IRH%	I.V.
Directos al Río Luisa Parte Baja - Q Guaduas	0,705	0,084	0,789	3,861	0,965	2,896	2,107	27,237	66,972	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 56. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al río Luisa parte baja - Q Guaduas con trasvases

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	Demanda Censo de Usuarios Informales	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	INGRESAN TRASVASES	IUA %	IRH%	I.V.
Directos al Río Luisa Parte Baja - Q Guaduas	0,705	0,084	0,789	3,861	0,965	6,896	6,107	4,0	11,438	66,972	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 57. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al río Luisa parte baja - Q Serrezuela

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	CANALES	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	IUA %	IRH%	I.V.
Directos al Río Luisa parte baja - Q Serrezuela	0,516	7,8805	8,396	1,019	0,255	0,764	-7,632	1098,619	65,801	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 58. Índices de sostenibilidad hídrica - directos al río Luisa parte baja - Q Serrezuela con trasvases

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	Demanda Censo de Usuarios Informales	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	INGRESAN TRASVASES	IUA %	IRH%	I.V.
Directos al Río Luisa parte baja - Q Serrezuela	0,516	7,8805	8,396	1,019	0,255	11,427	3,031	10,663	73,476	65,801	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 59. Índices de sostenibilidad hídrica – río Luisa parte baja

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	CANALES	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	IUA %	IRH%	I.V.
Río Luisa Parte Baja	2,131	5,658	7,789	4,593	1,148	3,445	-4,344	226,109	69,324	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 60. Índices de sostenibilidad hídrica - río Luisa parte baja con trasvases

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	CANALES	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	INGRESAN TRASVASES	IUA %	IRH%	I.V.
Río Luisa Parte Baja	2,131	5,658	7,789	4,593	1,148	18,695	26,155	15,250	41,665	69,324	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 61. Índices de sostenibilidad hídrica – Directos al Magdalena - Q Palito y otros

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	Demanda Usuarios Informales	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	IUA %	IRH%	I.V.
Directos al Magdalena - Q Palito y otros	0,001	0,570	0,571	1,524	0,381	1,143	0,572	49,929	53,784	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 62. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al magdalena - Q Santana y otros

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	CANALES	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	IUA %	IRH%	I.V.
Directos al Magdalena - Q Santana y otros	0,018	3,050	3,068	2,392	0,598	1,794	-1,274	170,998	68,894	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 63. Índices de sostenibilidad hídrica - directos al Magdalena - Q Santana y otros con trasvases

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	CANALES	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	INGRESAN TRASVASES	IUA %	IRH%	I.V.
Directos al Magdalena - Q Santana y otros	0,018	3,050	3,068	2,392	0,598	5,444	2,376	3,650	56,350	68,894	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 64. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al Magdalena - Q Agua Sucia y otros

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	Demanda Usuarios Informales	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	IUA %	IRH%	I.V.
Directos al Magdalena - Q Agua Sucia y otros		1,000	1,000	1,399	0,350	1,049	0,049	95,285	55,189	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 65. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al Magdalena - Q Guayabal y otros

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	CANALES	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	IUA %	IRH%	I.V.
Directos al Magdalena - Q Guayabal y otros	0,003	4,750	4,753	1,191	0,298	0,893	-3,859	531,992	66,673	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 66. Índices de sostenibilidad hídrica - directos al Magdalena - Q Guayabal y otros con trasvases

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	Demanda Censo de Usuarios Informales	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	INGRESAN TRASVASES	IUA %	IRH%	I.V.
Directos al Magdalena - Q Guayabal y otros	0,003	4,750	4,753	1,191	0,298	1,493	-3,259	0,600	318,248	66,673	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 67. Índices de sostenibilidad hídrica – quebrada Eneal

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	CANALES	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	IUA %	IRH%	I.V.
Quebrada Eneal	0,150	16,278	16,428	1,436	0,359	1,077	-15,351	1525,399	61,673	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 68. Índices de sostenibilidad hídrica - quebrada Eneal con trasvases

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	CANALES	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	INGRESAN TRASVASES	IUA %	IRH%	I.V.
Quebrada Eneal	0,150	16,278	16,428	1,436	0,359	16,505	0,077	15,428	99,534	61,673	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

12.3.2 Índices de sostenibilidad hídrica condiciones climáticas secas

Tabla 69. Índices de sostenibilidad hídrica – río Luisa parte alta

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	Demanda Usuarios Informales	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	IUA %	IRH%	I.V.
Río Luisa Parte Alta	2,994		2,994	5,299	1,325	3,974	0,981	75,326	67,354	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 70. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al río Luisa parte baja - Q Guaduas

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	CANALES	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	IUA %	IRH%	I.V.
Directos al Río Luisa Parte Baja - Q Guaduas	0,705	0,084	0,789	2,781	0,695	2,085	1,297	37,822	66,972	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 71. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al río Luisa parte baja - Q Serrezuela

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	CANALES	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	IUA %	IRH%	I.V.
Directos al Río Luisa parte baja - Q Serrezuela	0,516	7,8805	8,396	0,561	0,140	0,421	-7,975	1996,286	65,801	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 72. Índices de sostenibilidad hídrica – río Luisa parte baja

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	CANALES	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	IUA %	IRH%	I.V.
Río Luisa Parte Baja	2,131	5,658	7,789	3,613	0,903	2,710	-5,080	287,464	69,324	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 73. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al Magdalena - Q Palito y otros

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	Demanda Usuarios Informales	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	IUA %	IRH%	I.V.
Directos al Magdalena - Q Palito y otros	0,001	0,570	0,571	0,970	0,242	0,727	0,156	78,484	53,784	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 74. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al Magdalena - Q Santana y otros

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	CANALES	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	IUA %	IRH%	I.V.
Directos al Magdalena - Q Santana y otros	0,018	3,050	3,068	1,395	0,349	1,047	-2,021	293,137	68,894	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 75. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al Magdalena - Q Agua Sucia y otros

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	Demanda Usuarios Informales	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	IUA %	IRH%	I.V.
Directos al Magdalena - Q Agua Sucia y otros		1,000	1,000	0,875	0,219	0,657	-0,343	152,313	55,189	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 76. Índices de sostenibilidad hídrica – directos al Magdalena - Q Guayabal y otros

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	CANALES	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	IUA %	IRH%	I.V.
Directos al Magdalena - Q Guayabal y otros	0,003	4,750	4,753	0,578	0,144	0,433	-4,319	1097,263	66,673	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Tabla 77. Índices de sostenibilidad hídrica – quebrada Eneal

Unidad Hidrográfica	Demanda SIRH Concesionado	CANALES	DEMANDA TOTAL m3.seg	OFERTA TOTAL m3.seg	Q25	OFERTA DISPONIBLE	QUEDA	IUA %	IRH%	I.V.
Quebrada Eneal	0,150	16,278	16,428	0,753	0,188	0,565	-15,863	2909,303	61,673	Alto

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

13 NECESIDADES DE INFORMACIÓN Y CONOCIMIENTO

A diferencia de otras cuencas a nivel nacional, la cuenca del río Luisa y otros directos al Magdalena cuenta con una red consistente de estaciones operada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. La red pluviométrica es suficiente para el análisis requerido, sin embargo, las mediciones de caudal tienen bastantes deficiencias, ya que son muy pocas las estaciones que poseen información consistente en lo que respecta a series de tiempo suficientes para un análisis hidrológico.

Las formas de mejorar la calidad de los datos con el fin de obtener mejores análisis y resultados son:

- Ubicación o reubicación de las estaciones hidrométricas
- Cuidado y la seguridad de los emplazamientos de observación
- Inspección periódica de las estaciones

De acuerdo con lo anterior, se recomienda que se siga operando y se realicen mejoras en la red hidrométrica y pluviométrica por parte del IDEAM. Así mismo, es necesario que la información de coordenadas de estaciones que presentan inconsistencias respecto a la cartografía de mayor detalle que se está desarrollando en el país, sea actualizada en los catálogos de estaciones de la institución.

Por otra parte, de acuerdo con las visitas de campo se observa que la demanda calculada en el informe con base a la información oficial suministrada por la Corporación, no representa en su totalidad la realidad de la cuenca. Por lo tanto se recomienda que en el componente programático (fase de formulación) se proyecte un estudio más detallado de demanda hídrica en la zona de estudio.

14 BIBLIOGRAFÍA

CAR. (2017). *Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR.* Obtenido de https://www.car.gov.co/index.php?idcategoria=16615

Aguilera, E. (2010). *Análisis regional de crecidas máximas para Honduras.* Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala.

CAR. (2015). *Estudio para la determinación de módulos de consumo del recurso hídrico de las 10 cuencas de 2° orden y las ochenta y cuatro de 3 er orden Corporación Autónoma Regional De Cundinamarca CAR. .* Bogotá: CAR- SERAGROS.

CAR. (2015). *Estudio para la determinación de módulos de consumo del recurso hídrico de las 10 cuencas de 2° orden y las ochenta y cuatro de 3 er orden Corporación Autónoma Regional De Cundinamarca CAR. .* Bogotá: CAR-SERAGROS.

Chow, V. (1964). *Handbook of hydrology.* New York: McGraw-Hill.

Colombia, Parques Nacionales Naturales de. (s.f.). *Parques Nacionales Naturales de Colombia.* Obtenido de http://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/organizacion/mision-vision/

CONPES, C. N. (2010). *CONPES, Lineamientos para la consolidación del Sistema Nacional de Áreas protegidas.* Obtenido de http://cpps.dyndns.info/cpps-docs-web/planaccion/biblioteca/pordinario/Colombia/sinap.pdf

FAO. (2006). *Evaporación del Cultivo. .*: FAO.

Heras, R. (1983). *Recursos hidráulicos síntesis metodología y normas.* Madrid: Cooperativa de publicaciones del colegio ingenieros de caminos y canales.

IDEAM. (1998). *El medio ambiente en Colombia.* Bogotá: IDEAM.

IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua- ENA2010.* Bogotá: IDEAM.

IDEAM. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Reginal del Agua - ERA.* Bogotá: IDEAM, MinAmbiente, Prosperidad para todos.

IGAC. (2000). *Estudio general de Suelos del Departamento de Cundinamarca.* Bogotá: IGAC.

Instituto de Hidrología, M. y.-I. (2017). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM.* Obtenido de http://www.ideam.gov.co/web/entidad/acerca-entidad

MinAmbiente. (2014). *Guía Técnica para la formulación para los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas.* Bogotá: MinAmbiente.

Ministerio de Ambiente, V. y. (2010). *Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire.* Obtenido de http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/

Polit%C3%ACcas_de_la_Direcci%C3%B3n/Pol%C3%ADtica_de_Prevenci%C3%B3n_y_Control_de_la_Contaminaci%C3%B3n_del_Aire.pdf

Ministerio de ambiente, v. y. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.* Obtenido de http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Presentaci%C3%B3n_Pol%C3%ADtica_Nacional_-_Gesti%C3%B3n_/libro_pol_nal_rec_hidrico.pdf

Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la ingeniería 2da edición.* Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Naciones Unidas. (agosto de 2015). *17 objetivos para transformar nuestro mundo*. Recuperado el 19 de marzo de 2017, de Objetivos de desarrollo sostenible: http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/

OCDE. (20 de septiembre de 2013). *La OCDE establece una hoja de ruta para la adhesión de Colombia*. Recuperado el 19 de marzo de 2017, de Centro de México: http://www.oecd.org/centrodemexico/laocdeestableceunahojaderutaparalaadhesiondecolombia.htm

OMM. (1994). *Guía de prácticas hidrometeorológicas: Adquisición y proceso de datos análisis predicción y otras aplicaciones.* Ginebra: OMM.

Sachs, L. (1978). *Estadística Aplicada.* .: Labor S.A.

Sánchez, F. (2006). *Guía y protocolos del monitoreo y seguimiento del agua.* Bogotá: IDEAM.

Sostenible, M. d. (2012). *Política Nacional para la gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos.* Obtenido de http://www.minambiente.gov.co/index.php/bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistematicos/politica-nacional-de-biodiversidad#documentos

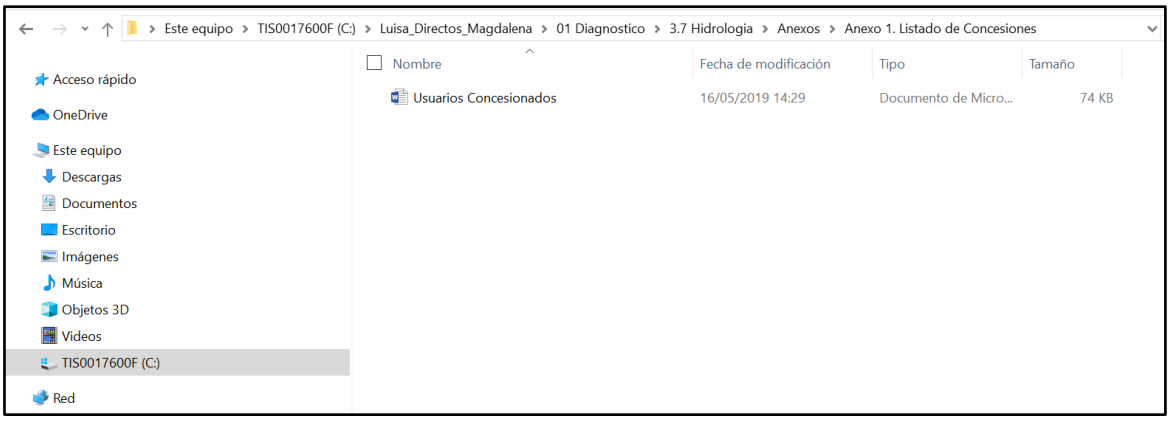
Territorial, M. d. (2010). *Política Nacional de producción y Consumo.* Obtenido de http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/154-plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-7#políticas

U.S.D.A. (1959). *Soil conservation service. Nacional Eng. Handbook.* USA: Section 16. Chapters 2, 6.

Vélez, J. I; Restrepo-Tamayo, C; Correa P. L. (2010). Aplicación de un Modelo Hidrológico Agregado en Colombia. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay.

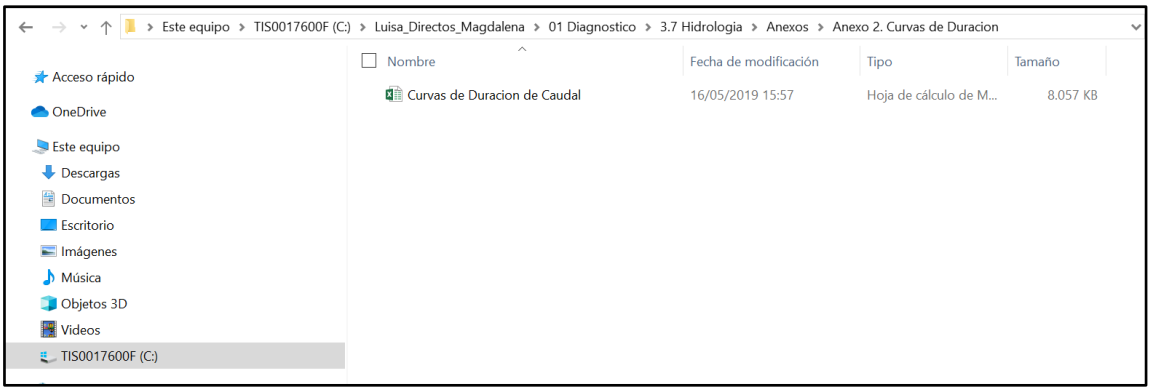
ANEXOS

ANEXO 1. LISTADO DE CONCESIONES



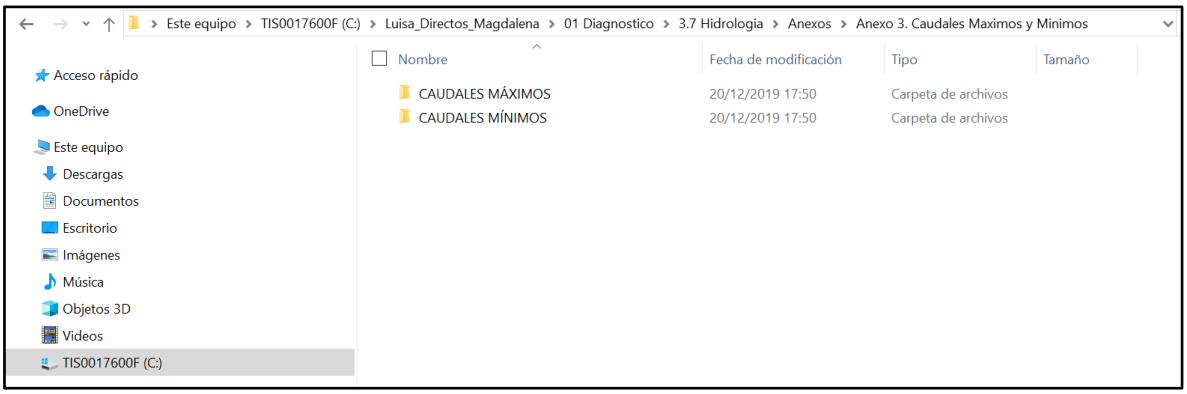
L:\Luisa_Directos_Magdalena\01 Diagnostico\3.7 Hidrologia\Anexos\Anexo 1. Listado de Concesiones

ANEXO 2. CURVAS DE DURACIÓN



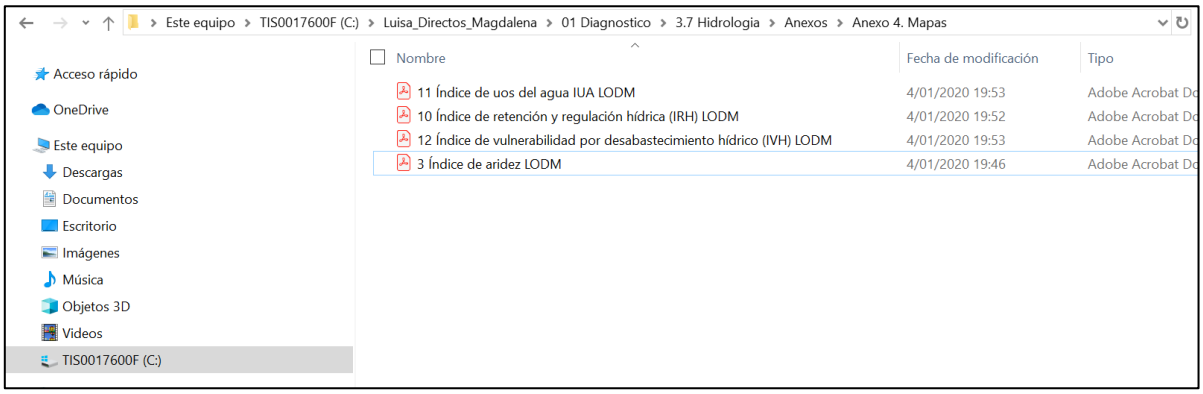
L:\Luisa_Directos_Magdalena\01 Diagnostico\3.7 Hidrologia\Anexos\Anexo 2. Curvas de Duracion

ANEXO 3. CAUDALES MÁXIMOS Y MÍNIMOS



L:\Luisa_Directos_Magdalena\01 Diagnostico\3.7 Hidrologia\Anexos\Anexo 3. Caudales Maximos y Minimos

ANEXO 4. MAPAS



L:\Luisa_Directos_Magdalena\01 Diagnostico\3.7 Hidrologia\Anexos\Anexo 4. Mapas