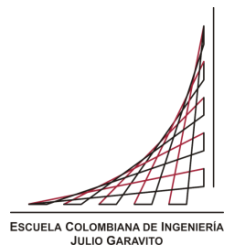


Maestría en Ingeniería Civil

**Regionalización de caudales máximos para cuenca hidrográfica
del río Suárez.**

Fabian Tobias Ortiz Cañón

Bogotá, D.C., 07 de junio de 2019



**Regionalización de caudales máximos para cuenca hidrográfica
del río Suárez.**

**Tesis para optar al título de magister en Ingeniería Civil con
énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente**

Ing. Germán Eduardo Acero Riveros

Director

Bogotá, D.C., 07 de junio de 2019

La tesis de maestría titulada “Regionalización de caudales máximos para cuenca hidrográfica del río Suárez”, presentada por Fabián Tobías Ortiz Cañón, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente.

Director de la tesis

Germán Eduardo Acero Riveros

Jurado 1

German Santos Granados

Jurado 2

Felipe Sierra Pongutá

Bogotá, D.C., 07 de junio de 2019

A mis padres Tobías Ortiz y Blanca Cañón por su apoyo Incondicional y a mis hijos Sara Sofía y Fabian Jerónimo por ser el principal motivo de felicidad en mi vida.

Agradecimientos al Biólogo Félix Márquez (CORPOBOYACA) y al ingeniero José Castillo Novoa (CAR) expertos en ordenación de cuencas hidrográficas por su excelente disposición y asesoría relacionada con las cuencas objeto del presente estudio.

Resumen

El proyecto denominado *Regionalización de caudales máximos para cuenca hidrográfica del río Suárez*, pretende establecer ecuaciones para estimar la media de los caudales máximos \bar{Q}_{Max} y su desviación estándar $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ con el fin de calcular el caudal máximo en cualquier sitio de interés dentro de la cuenca del río Suárez, así como generar mapas de rendimientos hídricos para caudales máximos para diferentes periodos de retorno.

La cuenca del río Suárez (subzona hidrográfica del río Suárez Código IDEAM 2401) se localiza en jurisdicción de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Santander y comprende un área de aproximadamente 786.131 ha donde se ubican 78 municipios, y de acuerdo a la zonificación hidrográfica del IDEAM está conformada dos niveles subsiguientes el Río Alto Suárez (Código IDEAM 2401-01) y Río Medio y Bajo Suárez (Código IDEAM 2401-02).

El desarrollo de este proyecto busca dar solución a la escasa información en lo referente a caudales máximos para la cuenca de estudio, requerida para la formulación de instrumentos de gestión del riesgo asociado a inundaciones a nivel municipal.

Metodológicamente el proyecto consta de 7 etapas, que comprenden la selección de las estaciones hidrológicas, el tratamiento estadístico de los registros de caudales máximos, la determinación de los parámetros morfométricos y variables climatológicas, la conformación de regiones homogéneas, la regionalización de caudales mediante el método de regresión, la estimación de cuantiles para diferentes periodos de retorno, la selección de la distribución de mejor ajuste y la generación de mapas de rendimientos hídricos.

En la primera etapa, se seleccionaron 30 estaciones hidrológicas de un total de 66 ubicadas en la cuenca que cumplieron con un porcentaje de completitud de los registros anuales superior al 70% durante el periodo de análisis comprendido desde 1991 hasta el 2015.

En la segunda etapa, se determinaron los parámetros morfométricos de la cuenca entre los cuales se encuentra el área, la pendiente media de la cuenca, el perímetro, el coeficiente de forma y la densidad de drenaje entre otros, así mismo a partir de la información temática de los Planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas – POMCAs - de los ríos Alto Suárez y Medio y Bajo Suárez, se determinó la precipitación total, precipitación máxima en 24 horas y la clasificación hidrológica de los suelos (número de curva CN) para las áreas de drenaje de las estaciones hidrológicas.

Posteriormente en la etapa 3, se definieron 2 propuestas de regiones, la primera agrupa las estaciones por localización de acuerdo a su ubicación en las subzonas hidrográficas (Región 1 cuenca Alta, Región 2 cuenca media y baja) y la segunda teniendo en cuenta el área (Región 1 áreas < 110 km² y región áreas > 110 km²), en ambos casos se conformaron dos regiones.

Una vez definida las regiones homogéneas, se realizó un proceso de regresión lineal, para determinar la relación del promedio del caudal máximo (\bar{Q}_{Max}) y la desviación estándar ($\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$) variables principales o explicadas) con los parámetros físicos y morfométricos (variables explicativas o independientes), con el fin de estimar los coeficientes de las ecuaciones para el cálculo del \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$.

En la quinta etapa, con la utilización del software L-RAP se estimaron los parámetros de las distribuciones mediante el método de los L Momentos a partir de los cuales se determinaron los caudales para 2.33, 5, 10, 50 y 100 años de periodos de retorno mediante las distribuciones Pareto Generalizada, Generalizada de Valor Extremo, Generalizada Normal, Pearson Tipo III, Generalizada Logística.

En la sexta etapa, mediante la prueba de bondad de ajuste Z^{DIST} (Si $Z^{DIST} < |1.64|$) y los diagramas de relación de momentos, se definió que la distribución Logística Generalizada – GLO es aquella que se ajusta a los registros de caudales máximos de las estaciones seleccionadas.

Por último, en la etapa 7 a partir de los caudales máximos para diferentes periodos de retorno estimados mediante la distribución seleccionada en la etapa anterior se elaboraron los mapas de rendimientos hídricos a través del método de interpolación IDW con el uso del software ArcGis 10.4

Índice general

Resumen.....	6
GLOSARIO.....	17
INTRODUCCIÓN	19
CAPÍTULO I. MARCO DE REFERENCIA.....	21
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
1.1.1. Descripción del problema	21
1.1.2. Formulación del problema	23
1.2. OBJETIVOS.....	24
1.2.1. Objetivos generales	24
1.1.1 Objetivos específicos	24
1.3. MARCO CONCEPTUAL.....	25
1.3.1. Gestión de riesgo en Colombia.....	25
1.3.2. Morfometría de una Cuenca:.....	27
1.3.3. Grupo hidrológico del Suelo - Número de Curva (CN):	29
1.3.4. Uso de herramientas estadísticas en hidrología.....	31
1.3.5. Funciones de distribución.....	32
1.3.6. L-Moments de las estaciones.....	45
1.3.7. L- Moments muestrales	46
1.3.8. Regionalización	48
1.3.9. Método de Regresión.....	49
1.4. ÁREA DE ESTUDIO	51

1.4.1.	Descripción hidrográfica	54
1.4.2.	Descripción climática	57
1.4.3.	Indicadores Hidrológicos	62
1.4.4.	Coberturas de la tierra	66
1.4.5.	Infraestructuras Hidráulicas – Embalses	68
1.4.6.	Sistema Hidráulico De Manejo Ambiental y de Control De Inundaciones Fúquene - Cucunubá	70
1.5.	ESTADO DEL ARTE. REGIONALIZACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS	72
CAPITULO II. METODOLOGÍA.....		75
METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE ECUACIONES.....		77
2.1.	ETAPA 1 - PREPARACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE LOS DATOS DE CAUDALES MÁXIMOS PARA LA CUENCA DEL RÍO SUÁREZ.	77
2.1.1.	Recopilación de la información	77
2.1.2.	Tratamiento de datos	77
2.2.	ETAPA 2 - DETERMINACIÓN DE VARIABLES MORFOMÉTRICAS Y FÍSICAS	78
2.2.1.	Estimación de variables climatológicas y físicas.....	78
2.3.	ETAPA 3: CONFORMACIÓN DE REGIONES HOMOGÉNEAS	80
2.4.	ETAPA 4: REGIONALIZACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS MEDIANTE EL MÉTODO DE REGRESIÓN	80
METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS RENDIMIENTOS HÍDRICOS		82
2.5.	ETAPA 5: DETERMINACIÓN DE CUANTILES	82
2.5.1	Calculo de los L-Moments de las estaciones	82

2.6.	ETAPA 6: SELECCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS	86
2.7.	ETAPA 7: GENERACIÓN DE LOS MAPAS	87
CAPITULO III. RESULTADOS Y ANÁLISIS		89
ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE REGIONALIZACIÓN		89
3.1.	ETAPA 1: PREPARACIÓN Y REVISIÓN DE LOS DATOS	89
3.1.1.	Recopilación de la información	89
3.1.2.	Tratamiento de datos	91
3.2.	ETAPA 2: DETERMINACIÓN DE VARIABLES MORFOMÉTRICAS Y FÍSICAS	95
3.3.	ETAPA 3: CONFORMACIÓN DE REGIONES HOMOGÉNEAS	98
3.4.	ETAPA 4: REGIONALIZACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS MEDIANTE EL MÉTODO DE REGRESIÓN	102
GENERACIÓN DE MAPAS RENDIMIENTOS HÍDRICOS		120
3.5.	ETAPA 5: DETERMINACIÓN DE CUANTILES	120
3.5.1.	Cálculo de los L-moments de las estaciones	120
3.6.	ETAPA 6: SELECCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS	121
3.6.1.	Cálculo de los cuantiles para diferentes periodos de retorno 122	
3.7.	ETAPA 7: MAPAS RENDIMIENTO HÍDRICO CAUDALES MÁXIMOS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNOS	124
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	135
6.	BIBLIOGRAFÍA	140

Índice de tablas

	pág.
Tabla 1. Municipios y departamentos que reportan afectaciones por el Fenómeno de La Niña 2010-2011.	22
Tabla 2. Métodos para el cálculo de parámetros morfométricos	27
Tabla 3. Descripción distribuciones de Frecuencia	43
Tabla 4. Relación de área y municipios pertenecientes a la cuenca del río Suárez	51
Tabla 5. Codificación IDEAM cuenca río Suárez	54
Tabla 6. Relación de Subcuencas Río Suárez	55
Tabla 7. Precipitación Media Anual	58
Tabla 8. Valores de Temperatura Promedio Anual por Subcuencas río Suárez	60
Tabla 9. Relación de embalses en la cuenca del río Suárez.	68
Tabla 10. Estaciones hidrológicas seleccionadas	89
Tabla 11. Estadísticos descriptivos en relación caudal máximo mensual multianual (absoluto)	92
Tabla 12. Parámetros morfométricos cuencas estaciones seleccionadas	96
Tabla 13. Parámetros climatológicos y físicos morfométricos cuencas estaciones seleccionadas	97
Tabla 14. Formación de regiones homogéneas - Criterio zonificación hidrográfica	99
Tabla 15. Formación de regiones homogéneas - Criterio Rangos de Área	101
Tabla 16. Estadísticos estimados de las regresiones seleccionadas para determinar los parámetros de las ecuaciones de Q_{Max}, y σQ_{Max} para las regiones de la Propuesta 1.	103

Tabla 17. Resultados Q_{Max} y σQ_{Max} propuesta 1.	107
Tabla 18. Estadísticos estimados de las regresiones seleccionadas para determinar los parámetros de las ecuaciones de Q_{Max}, y σQ_{Max} para las regiones de la Propuesta 2.	108
Tabla 19. Resultados Q_{Max} y σQ_{Max} propuesta 2.	112
Tabla 19. Caudal máximo estimado con Gumbel a partir de los parámetros Q_{Max} y σQ_{Max} de las series de datos de las estaciones.	113
Tabla 19. Caudal máximo estimado con Gumbel a partir de los parámetros Q_{Max} y σQ_{Max} estimados con las ecuaciones para las prouestas1 y 2.	114
Tabla 19. Porcentaje de variación del caudal máximo estimado con Gumbel a partir de los parámetros de las series Vs el caudal máximo estimado con Gumbel a partir de los parámetros calculados con las ecuaciones.	116
Tabla 19. Caudal máximo estimado mediante la ecuación de regionalización del Atlas Hidrológico de Colombia.	117
Tabla 19. Porcentaje de variación del caudal máximo estimado con Gumbel a partir de los parámetros calculados con las ecuaciones de la propuesta 1 vs el caudal máximo estimado mediante la ecuación de regionalización del Atlas Hidrológico de Colombia.	118
Tabla 20. Valores estimados de los L-Moments para las estaciones seleccionadas	120
Tabla 21. Resultados pruebas de bondad de ajuste Z^{DIST}	121
Tabla 22. Caudales máximos para cada estación para diferentes periodos de retorno	123
Tabla 23. Estaciones con variaciones significativas (> 100%).	126
Tabla 24. Comparación de Caudales m^3/s observados frente a los calculados mediante los mapas de rendimientos hídricos.	133

Listado de Ilustraciones

Ilustración 1. Localización geográfica cuenca río Suárez.....	54
Ilustración 2. Identificación subcuencas río Suárez.....	57
Ilustración 3. Precipitación total multianual cuenca río Suárez.	60
Ilustración 4. Isotermas cuenca río Suárez.	62
Ilustración 5. Índice de Aridez cuenca río Suárez.....	63
Ilustración 6. Índice de uso del agua (IUA) cuenca río Suárez.	64
Ilustración 7. Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) Cuenca del río Suárez.	66
Ilustración 8 – Coberturas del suelo cuenca río Suárez.....	67
Ilustración 9 – Identificación de embalses cuenca Alta río Suárez.....	69
Ilustración 10 – Identificación de embalses cuenca Media y Baja río Suárez.....	69
Ilustración 10 – Localización general del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y de Control De Inundaciones Fúquene - Cucunubá.....	71
Ilustración 11 – Estaciones hidrológicas seleccionadas	90
Ilustración 12 –Número de Curva CN cuenca del río Suárez	98
Ilustración 13 – Regiones homogéneas (Propuesta 1 – Criterio zonificación hidrográfica)	99
Ilustración 14 – Regiones homogéneas (Propuesta 2 – Criterio Tamaño de Áreas).....	102
Ilustración 15. Mapa rendimiento hídrico caudal máximo 2.33 años.	128
Ilustración 16. Mapa rendimiento hídrico caudal máximo 5 años.	129
Ilustración 17. Mapa rendimiento hídrico caudal máximo 10 años.	130
Ilustración 18. Mapa rendimiento hídrico caudal máximo 50 años.	131
Ilustración 19. Mapa rendimiento hídrico caudal máximo 100 años.	132

Listado de Figuras

Figura 1. Esquema Metodológico.....	76
Figura 2. Extracción de datos del raster de precipitación total para el área de drenaje de la estación Moniquirá.....	79
Figura 3 – Gráficas descriptivas estación Garavito Cod. 2401713. Se incluyen gráficas de probabilidad, diagrama L-momento-ratio, serie de tiempo e histogramas.....	93
Figura 4 – Gráfica de caja Estación Garavito Cod. 2401713	94
Figura 5 – Diagrama L-momento-ratio de L-asimetría vs. L-curtosis.....	122

Índice de anexos

Anexo 1. Información hidrológica IDEAM - CAR

Anexo 2. Pruebas de análisis Exploratorio de Datos.

Anexo 3. Cálculos variables físicas y morfométricos

Anexo 4. Regresiones XLSTAT

Anexo 5. Mapas de Rendimientos Hídricos

Glosario

Análisis de frecuencias: El análisis de frecuencia tiene por objeto analizar registros históricos de variables hidrológicas con el fin de estimar las probabilidades de que vuelvan a ocurrir. (Organización Meteorológica Mundial , 2011)

Cuenca hidrográfica: entiéndase por cuenca u hoya hidrográfica el área de aguas superficiales o subterráneas que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012)

Caudal máximo: Los caudales máximos son considerados como uno de los principales agentes geomorfológicos, los cuales forman los sistemas de drenaje y modelan la topografía. Particularmente en Colombia, no sólo su característica modeladora hace de estos eventos motivo de estudio y de implantación de nuevas metodologías para su estimación, sino también el enorme déficit en la cobertura de la red nacional de medición de caudales, presentándose zonas totalmente desprovistas de información (Mesa, Vélez, Giraldo, & Quevedo, 2003)

Periodo de retorno: Intervalo de tiempo promedio entre un evento hidrológico de una magnitud específica y un evento de magnitud igual o superior. (World Meteorological Organization, 2012)

Frecuencia: Corresponde a la repetición de eventos de características similares en intensidad y duración. (World Meteorological Organization, 2012)

Distribución de probabilidad: es una lista de las probabilidades de todos los resultados posibles donde se describe la probabilidad de que un evento ocurra, lo cual implica que se puede diseñar un escenario de acontecimientos futuros considerando las tendencias actuales de diversos fenómenos naturales. (Universidad Nacional Autónoma de México, 2012)

Regionalización: este procedimiento de análisis de datos hidrológicos el cual consiste básicamente en definir regiones estadísticamente homogéneas en una zona determinada con el fin de asociar estaciones a estas regiones y poder estimar las frecuencias sobre la base de los datos hidrológicos. En cada región los resultados de los análisis de frecuencia de las estaciones pueden ser promediados para representar la frecuencia característica de toda la región. (Chow V. , 1964)

Introducción

Las inundaciones son eventos normales que se presenta como resultado de las crecientes en los cuerpos de agua, originadas por lluvias intensas o continuas. Sin embargo, la acción antrópica en las cuencas influye en la ocurrencia de las inundaciones, ya sea por la intervención del cauce, modificación de las coberturas de la cuenca, entre otras (Universidad de los Andes – Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006). Así mismo la variabilidad climática modula la intensidad y frecuencia de fenómenos hidrológicos como las inundaciones situaciones generando impactos socioeconómicos considerables al país

El fenómeno de la niña del año 2010-2011 provocó las lluvias más intensas y abundantes nunca antes registradas en el país, principalmente en las regiones Caribe, Andina y Pacífica, a partir de lo cual se presentó la mayor tragedia que ha vivido Colombia, por el número de colombianos afectados y damnificados y por el valor de los daños sufridos, evidencia de la magnitud de este evento, es que producto de las continuas lluvias se inundaron 1.662.108 hectáreas adicionales al área que normalmente se inunda en el país, es decir, un 47% más de áreas inundadas en relación con el comportamiento habitual en temporada de lluvias. (Colombia Humanitaria, 2013).

Como parte de la respuesta y preparación de las distintas autoridades municipales se encuentran en el proceso actualización sus instrumentos de planificación territorial, los cuales permiten conocer las dinámicas ambientales y especialmente las hidrológicas del territorio con el fin de establecer medidas de control y prevención ante fenómenos de lluvias y aumento de caudales, sin embargo, la información hidrológica con la cual cuentan algunas regiones del país es limitada y sesgada por ello se deben recurrir a herramientas estadísticas de análisis de históricos de caudales.

Ante esta deficiencia de información hidrológica y por la necesidad de contar con información suficiente que sirva como insumo para elaborar los estudios generales de amenaza por inundación, se propone para la cuenca del río Suárez ecuaciones para la determinación de la media del caudal máximo (\bar{Q}_{Max}) y la desviación estándar ($\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$) para cualquier sitio de interés, a partir de la regionalización de caudales máximo mediante el método de regresión, así mismo como mapas de

rendimientos hídricos para diferentes periodos de retorno, brindando así un insumo para la estimaciones de caudales máximos.

Para los productos antes mencionados se aplicó una metodología que aborda 7 etapas que comprenden la selección de las estaciones hidrológicas, el tratamiento estadístico de los registros de caudales máximos, la determinación de los parámetros morfométricos y variables climatológicas, la conformación de regiones homogéneas, la regionalización de caudales mediante el método de regresión, la estimación de cuantiles para diferentes periodos de retorno, la selección de la distribución de mejor ajuste y la generación de mapas de rendimientos hídricos.

Como información de entrada se encuentran los registros de caudales máximos de las estaciones localizadas dentro de la cuenca del río Suárez de propiedad del IDEAM y de la CAR, así como la información climatológica y productos cartográficos temáticos de los Planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas – POMCAs - de los ríos Alto Suárez y Medio y Bajo Suárez.

Capítulo I. Marco de referencia

1.1 Planteamiento del problema

1.1.1. Descripción del problema

Las inundaciones son eventos naturales producidos por un exceso de agua, invadiendo áreas que en condiciones normales están secas, afectando áreas urbanizadas o no urbanizadas (IDIGER 2017). En la actualidad el aumento de la intensidad y frecuencia de las lluvias favorecidas por la variabilidad climática ha incrementado la probabilidad de esta amenaza.

El Fenómeno de La Niña 2010-2011 alteró el clima nacional, ocasionando las lluvias más intensas y abundantes nunca registradas en el país, en las regiones Caribe, Andina y Pacífica. Como consecuencia de ello, las partes baja y media de los ríos Cauca y Magdalena, así como algunos de sus afluentes, presentaron niveles nunca registrados en la historia de la hidrología colombiana.

Las inundaciones produjeron una considerable destrucción de inmuebles, se interrumpió la prestación de servicios públicos esenciales, se afectaron las vías de comunicación y se perjudicó gravemente la actividad económica y social en el territorio nacional.

Esta tragedia no fue solo el resultado de un volumen de lluvias muy alto, y de una duración prolongada, sino de la vulnerabilidad que demostró tener nuestro territorio, como resultado de la ausencia de una efectiva gestión del riesgo, lo que llevó a la población de áreas con riesgo de inundación, movimientos en masa y avenidas torrenciales a movilizarse de sus hogares.

De acuerdo con datos de Colombia Humanitaria y que son presentados en la Tabla 1, las precipitaciones provocaron inundaciones, deslizamientos de tierra, y otras emergencias menores en 28 departamentos (88% del total nacional) y 1.119 municipios (93% del total nacional) durante este periodo.

Tabla 1. Municipios y departamentos que reportan afectaciones por el Fenómeno de La Niña 2010-2011.

Región	Departamentos	Departamentos afectados	%	Número municipios	Municipios afectados	%
Caribe	8	7	88%	194	191	98%
Pacífica	4	4	100%	178	175	98%
Andina	10	10	100%	629	601	96%
Oriental	10	7	70%	118	74	63%
Total	32	28	88%	1.119	1.041	93

Fuente: (Colombia Humanitaria, 2013)

El desastre alcanzo tal repercusión, que el Estado colombiano mediante el Decreto 4580 de 2010 declaro el estado de emergencia, el cual constituyó un punto de inflexión que ocasionó una rápida respuesta interinstitucional en aras de ofrecer de manera oportuna y con el rigor técnico requerido, una estimación confiable de las afectaciones presentadas por las inundaciones. Así mismo se generaron lineamientos para la inclusión del riesgo en los diferentes instrumentos de planificación territorial y ambiental del territorio.

Mediante el Decreto 1807 de 2014 (compilado en el Decreto 1077 de 2015) incorpora la gestión del riesgo en los Planes de Ordenamiento Territorial (POT); con el fin de promover medidas para la sostenibilidad ambiental del territorio, por lo cual, sólo procederá a la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo del plan de ordenamiento o la expedición del nuevo cuando se garantice la delimitación y zonificación de las áreas de amenaza y con condiciones de riesgo.

En este orden de ideas los municipios se encuentran actualizando sus Planes de ordenamiento Territorial (POT, PBOT y/o EOT) conforme a los criterios técnicos definidos en las citadas normas. A raíz de estas nuevas responsabilidades, se visibilizan otros problemas que limitan el ejercicio de actualización de estos instrumentos, inicialmente la falta de información, en este caso hidrológica, dificulta en gran medida la estimación de caudales para la elaboración de estudios generales de amenaza por inundaciones.

En consecuencia, algunos municipios por sus escasos presupuestos o prioridades adelantan la revisión o formulación de sus instrumentos de planificación, incluyendo estudios, poco confiables a fin de ser sometidos a consideración por la Autoridad Ambiental correspondiente, las cuales por la relevancia socioeconómica de los estudios y con el ánimo de no incurrir en inconsistencias jurídicas se limitan a chequear que los estudios contengan los contenidos mínimos, sin precisar en la calidad de los mismos. Lo que puede ocasionar en el marco de la planificación territorial una inadecuada identificación y zonificación de las amenazas por efectos de inundación.

1.1.2. Formulación del problema

¿Cuáles son los caudales máximos de la cuenca del río Suárez a partir de los parámetros estadísticos de las series de caudales máximos estimados a mediante la regionalización por el método de regresión y mapas de rendimientos para diferentes periodos de retorno?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos generales

- Elaborar las ecuaciones de regionalización de caudales máximos para la cuenca hidrográfica del río Suárez.
- Elaborar mapas de rendimientos hídricos a partir de los caudales máximos para diferentes periodos de retorno.

1.1.1 Objetivos específicos

- Identificación y adquisición de los registros hidrológicos y meteorológicos de las estaciones localizadas en la cuenca del río Suárez.
- Delimitación de las áreas de drenaje de las cuencas de las estaciones hidrológicas y la determinación de los parámetros morfométricos.
- Determinación la precipitación total, la precipitación máxima en 24 horas y el tipo de suelo hidrológico (Número de Curva) para cada una de las áreas de drenaje de las estaciones de caudal seleccionadas a partir de la información climatológica y productos cartográficos temáticos de los Planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas – POMCAs - de los ríos Alto Suárez y Medio y Bajo Suárez
- Definición de las regiones homogéneas de acuerdo a criterios físicos de la cuenca
- Identificación de la relación estadística que mejor represente la media del caudal máximo (\bar{Q}_{Max}) y la desviación estándar ($\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$) con las variables morfométricos y climatológicas.
- Estimación de los caudales máximo para 2.33, 5, 10, 50 y 100 años de periodo de retorno mediante la distribución seleccionada de acuerdo a la mediana de bondad de ajuste Z^{Dist} .

1.3. Marco conceptual

1.3.1. Gestión de riesgo en Colombia

Según lo definido por la Ley 1523 del 24 de abril de 2012, la gestión del riesgo debe entenderse como un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la calidad de vida de las personas y el desarrollo sostenible. (Senado de la república de Colombia, 2012)

El proceso de gestión del riesgo es una responsabilidad de todas las autoridades y entidades estatales y de los habitantes del territorio colombiano, por lo tanto este es un proceso social e integral, entendiendo que la visión de integralidad significa un cambio de paradigma en el tratamiento de desastres, pasando de una concepción enfocada en llevar a cabo acciones de respuesta, a un desarrollo que propende por la implementación de distintos procesos (Sistema Nacional de gestión del riesgo de desastres, 2015), los cuales son mencionados a continuación:

- **Conocimiento del riesgo:** identificación de escenarios de riesgos, el análisis, evaluación, monitoreo y seguimiento del riesgo, y la comunicación para promover una mayor conciencia de este, que alimenta los procesos de reducción del riesgo y de manejo de desastres. (Sistema Nacional de gestión del riesgo de desastres, 2015)
- **Reducción del riesgo:** intervención dirigida a modificar o disminuir las condiciones de riesgo existentes, entiéndase: mitigación del riesgo y a evitar nuevos riesgos en el territorio. (Sistema Nacional de gestión del riesgo de desastres, 2015)
- **Manejo de desastres:** es la preparación para la respuesta a emergencias, la preparación para la recuperación posdesastre, la ejecución de dicha respuesta y la ejecución de la respectiva recuperación, entiéndase: rehabilitación y recuperación. (Sistema Nacional de gestión del riesgo de desastres, 2015)

1.3.1.1. Riesgos por inundaciones

A partir de lo definido por el (IDEAM, 2018) las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes que hacen parte de la dinámica de una corriente, en términos generales se producen a partir de lluvias persistentes que favorecen la saturación del suelo y la escorrentía, esto produce un aumento en los cauces superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando desbordamiento o dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación o áreas aledañas.

Los eventos de inundaciones son de especial importancia en un país como Colombia, ya que se localiza geográficamente dentro de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) la cual tiene directa influencia en el parámetro meteorológico de precipitación, uno de los principales factores asociados a las inundaciones, en adición, su localización hace que el país cuente con un amplio mosaico de climas, donde las regiones de la Amazonía, Orinoquía y en la mayor parte del Caribe presentan un régimen de lluvias monomodal, y una distribución bimodal en la región Andina con altas y frecuentes lluvias. Esta condición es fuertemente alterada por la presencia de los fenómenos El Niño y La Niña, los cuales afectan los regímenes de precipitaciones causando eventos de origen hidrometeorológico como inundaciones. (Banco Mundial, 2012)

En términos de riesgos, las inundaciones y avenidas torrenciales pueden generar altos impactos de orden económico y social en comunidades vulnerables, el grado de vulnerabilidad se ve aumentado debido a la intervención humana sobre el territorio y al consecuente deterioro ambiental. A pesar de los esfuerzos realizados para fortalecer los procesos de planificación y protección de los componentes ecológicos, el desarrollo de actividades económicas en el país ha generado que la intervención sobre el territorio haya estado acompañada de acciones como la desecación de humedales y ciénagas, la pérdida de bosques y cobertura vegetal, con las consecuencias que esto tiene en términos de erosión y aumento de escorrentías, afectando de manera importante las fuentes de agua y la estabilidad del terreno, lo que lo hace susceptible a deslizamientos, inundaciones y avenidas torrenciales en zonas que antes no lo eran. (Banco Mundial, 2012)

1.3.2. Morfometría de una Cuenca:

El análisis morfométrico de una cuenca consiste en el estudio cuantitativo sus particularidades físicas, dentro de las que se encuentra la velocidad con la que van a circular las aguas sobre la superficie y, por lo tanto, la rapidez de respuesta de la cuenca ante las precipitaciones. El comportamiento de la cuenca ante la presencia de lluvias excepcionales puede verse condicionado por sus características morfométricas, como son el tamaño, la forma y la pendiente, que resultan muy importantes en la respuesta del caudal recibido. (Yanina & Karen Espejo, 2016)

En la Tabla 2 se describen parte de los principales parámetros morfométricos que son más comúnmente usados en estudios hidrológicos y que se consideran relevantes en el presente estudio, de igual manera se detalla parte del método para calcularlos.

Tabla 2. Métodos para el cálculo de parámetros morfométricos

PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN												
Longitud Axial (L)	Es la medida del escurrimiento principal de la cuenca, medido desde la parte más alta hasta la salida.												
Área (A)	Es el tamaño de la superficie de cada cuenca en km ² . <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Clases de tamaños</th> </tr> <tr> <th>RANGOS DE ÁREAS</th> <th>CLASES DE TAMAÑO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>12.5-35</td> <td>Muy pequeña</td> </tr> <tr> <td>35.5-58</td> <td>Pequeña</td> </tr> <tr> <td>58.5-81</td> <td>Mediana</td> </tr> <tr> <td>81.5-103.5</td> <td>Grande</td> </tr> </tbody> </table>	Clases de tamaños		RANGOS DE ÁREAS	CLASES DE TAMAÑO	12.5-35	Muy pequeña	35.5-58	Pequeña	58.5-81	Mediana	81.5-103.5	Grande
Clases de tamaños													
RANGOS DE ÁREAS	CLASES DE TAMAÑO												
12.5-35	Muy pequeña												
35.5-58	Pequeña												
58.5-81	Mediana												
81.5-103.5	Grande												
Longitud de la totalidad de las corrientes	Número de segmentos marcados en el mapa digitalizado. Constituye una medida de la energía de la cuenca, de la capacidad de captación de agua y de la magnitud de la red fluvial. Un mayor número de escurrimientos proporciona un mejor drenaje de la cuenca y por tanto, favorece el escurrimiento.												
Coeficiente de Forma (Kf)	Este índice, propuesto por Gravelius, se estima a partir de la relación entre el ancho promedio del área de captación y la longitud de la cuenca, longitud que se mide desde la salida hasta el punto más alejado a ésta. De acuerdo al coeficiente de forma estimado, se puede clasificar la forma de la cuenca como se presenta en la siguiente tabla. <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Clases de valores de forma (kf)</th> </tr> <tr> <th>RANGOS DE KF</th> <th>CLASES DE FORMA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,01 – 0,18</td> <td>Muy poco achatada</td> </tr> <tr> <td>0,18 – 0,36</td> <td>Ligeramente achatada</td> </tr> <tr> <td>0,36 – 0,54</td> <td>Moderadamente achatada</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;"><i>Fuente. Maidment D.R. 1992. Handbook of Hydrology. McGraw Hill. New York</i></p>	Clases de valores de forma (kf)		RANGOS DE KF	CLASES DE FORMA	0,01 – 0,18	Muy poco achatada	0,18 – 0,36	Ligeramente achatada	0,36 – 0,54	Moderadamente achatada		
Clases de valores de forma (kf)													
RANGOS DE KF	CLASES DE FORMA												
0,01 – 0,18	Muy poco achatada												
0,18 – 0,36	Ligeramente achatada												
0,36 – 0,54	Moderadamente achatada												
Coeficiente de Compacidad (Kc)	Designado por Kc e igualmente propuesto por Gravelius, compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia, cuyo círculo inscrito tiene la misma área de la cuenca en estudio. Kc se define $Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$												

L. longitud de la cuenca.
A. área de la cuenca.

PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN								
	<p>como la razón entre el perímetro de la cuenca que es la misma longitud del parte aguas que la encierra y el perímetro de la circunferencia. De acuerdo al coeficiente de compacidad, se puede clasificar la forma de la cuenca como se presenta en la siguiente tabla.</p> <p style="text-align: center;">Clases de valores de forma (Kc)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>RANGOS DE Kc</th> <th>CLASES DE FORMA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$1 \leq Kc \leq 1,25$</td> <td>Redonda a Oval Redonda</td> </tr> <tr> <td>$1,25 \leq Kc \leq 1,50$</td> <td>Oval Redonda a Oval Oblonga</td> </tr> <tr> <td>$1,50 \leq Kc \leq 1,75$</td> <td>Oval Oblonga a Rectangular Oblonga</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;"><i>Fuente. Maidment D.R. 1992. Handbook of Hydrology. McGraw Hill. New York.</i></p>	RANGOS DE Kc	CLASES DE FORMA	$1 \leq Kc \leq 1,25$	Redonda a Oval Redonda	$1,25 \leq Kc \leq 1,50$	Oval Redonda a Oval Oblonga	$1,50 \leq Kc \leq 1,75$	Oval Oblonga a Rectangular Oblonga
RANGOS DE Kc	CLASES DE FORMA								
$1 \leq Kc \leq 1,25$	Redonda a Oval Redonda								
$1,25 \leq Kc \leq 1,50$	Oval Redonda a Oval Oblonga								
$1,50 \leq Kc \leq 1,75$	Oval Oblonga a Rectangular Oblonga								
<p>Índice de Alargamiento (Ia)</p>	<p>Este índice propuesto por Horton, relaciona la longitud máxima encontrada en la cuenca, medida en el sentido del río principal y el ancho máximo de ella medido perpendicularmente. De acuerdo al índice de alargamiento, se puede clasificar la cuenca como se presenta en la siguiente tabla.</p> <p style="text-align: center;">Clases de valores de alargamiento (I)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>RANGOS DE I</th> <th>CLASES DE ALARGAMIENTO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,0 – 1,4</td> <td>Poco alargada</td> </tr> <tr> <td>1,5 – 2,8</td> <td>Moderadamente alargada</td> </tr> <tr> <td>2,9 – 4,2</td> <td>Muy alargada</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;"><i>Fuente. Maidment D.R. 1992. Handbook of Hydrology. McGraw Hill. New York</i></p> <p style="text-align: right;">$Ia = \frac{Lm}{l}$</p>	RANGOS DE I	CLASES DE ALARGAMIENTO	0,0 – 1,4	Poco alargada	1,5 – 2,8	Moderadamente alargada	2,9 – 4,2	Muy alargada
RANGOS DE I	CLASES DE ALARGAMIENTO								
0,0 – 1,4	Poco alargada								
1,5 – 2,8	Moderadamente alargada								
2,9 – 4,2	Muy alargada								
<p>Sinuosidad (Sn)</p>	<p>Es la relación entre la longitud del cauce de una corriente y la longitud de su valle. Un valor de sinuosidad menor o igual a 1,25 indica una baja sinuosidad, y se define como una corriente con un alineamiento recto.</p> <p style="text-align: right;">$Sn = \frac{L}{Lt}$</p>								
<p>Densidad de Drenaje (Dd)</p>	<p>Este índice permite tener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. En general, una mayor densidad de escurrimientos indica mayor estructuración de la red fluvial, o bien que existe mayor potencial de erosión. Pero también, como indican Gregory and Walling (Op. Cit.), la densidad de drenaje provee una liga entre los atributos de forma de la cuenca y los procesos que operan a lo largo del curso de la corriente. Más precisamente, la densidad de drenaje refleja controles topográficos, litológicos, pedológicos y vegetaciones, además de incorporar la influencia del hombre.</p> <p style="text-align: right;">$Dd = \frac{L}{A}$</p>								
<p>Pendiente del Cauce Principal (S)</p>	<p>La pendiente del cauce se puede estimar por diferentes métodos, uno de ellos es el de los valores extremos, el cual consiste en determinar el desnivel H entre los puntos más elevado y más bajo del río en estudio y luego dividirlo entre la longitud del mismo cauce L</p> <p style="text-align: right;">$S = \frac{H}{L}$</p>								
<p>Tiempo de Concentración (Tc)</p>	<p>Se define como el tiempo que toma el agua desde los límites más extremos de la hoya hasta llegar a la Salida de la misma. En general, el tiempo de concentración se calcula por medio de ecuaciones empíricas, dentro de las cuales se cuentan las siguientes.</p>								

PARÁMETROS			DESCRIPCIÓN
Ecuación de Kirpich	T_c	$= 0.06628 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77}$	Tc. tiempo de concentración, en horas (h). L. longitud del cauce principal, en kilómetros (km). S. pendiente entre las elevaciones máxima y mínima (pendiente total) del cauce principal, en metros parámetro (m/m).
Ecuación de Tamez	T_c	$= 0.30 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$	Tc. tiempo de concentración, en horas (h). L. longitud del cauce principal, en kilómetros (km). S. pendiente total del cauce principal, en porcentaje (%).
Ecuación de SCS – Ranser	T_c	$= 0.947 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$	Tc. tiempo de concentración, en horas (h). L. longitud del cauce principal, en kilómetros (km). H. diferencia de cotas entre puntos extremos de la corriente principal, en metros (m).
Ecuación de V.T. Chow	T_c	$= 0.273 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.64}$	Tc. tiempo de concentración, en horas (h). L. longitud del cauce principal, en kilómetros (km). S. pendiente total del cauce principal, en Metro por metro (m/m).
Ecuación del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos	T_c	$= 0.28 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$	Tc. tiempo de concentración, en horas (h). L. longitud del cauce principal, en kilómetros (km). S. pendiente total del cauce principal, en metros por metro (m/m).

Fuente. Maidment D.R. 1992. Handbook of Hydrology. McGraw Hill. New York

1.3.3. Grupo hidrológico del Suelo - Número de Curva (CN):

Este Método empírico desarrollado por The Soil Conservation Service (SCS) busca establecer una relación cuantitativa de lluvia-escorrentía, a partir de la observación de la precipitación en distintos tipos de suelos con diferentes coberturas y diferentes condiciones de humedad y régimen de lluvias. A partir de estas observaciones se construyeron gráficos con los valores de la profundidad de precipitación (P) y la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa (Pe). (Segovia & Hang, 2010)

Para estandarizar estas observaciones y las curvas, se definió un número adimensional de curva CN ($0 \leq CN \leq 100$) donde para superficies de agua o superficies impermeables $CN=100$ y para superficies naturales $CN < 100$.

El Departamento Agrológico de Estados Unidos determinó cuatro grupos a partir de sus propiedades hidrológicas y de acuerdo a los cálculos de su potencial de escorrentía definido por el índice de infiltración; dicho índice varía cuando el suelo

no está protegido por vegetación, está completamente húmedo o recibe precipitaciones de tormentas de larga duración.

Los suelos hidrológicos se dividen en cuatro grupos (A, B, C y D) divididos de la siguiente manera (U.S Department of Agriculture, 2005):

- **Grupo A:** suelos que tienen un alto índice de infiltración (bajo potencial de escorrentía) cuando están completamente húmedos. Están formados principalmente por arenas profundas, bien drenadas o excesivamente drenadas, o arenas de textura gruesa. Estos suelos presentan una tasa elevada de transmisión de agua.
- **Grupo B:** suelos que tienen un índice de infiltración moderado cuando están completamente húmedos. Son principalmente suelos moderadamente profundos o profundos, moderadamente bien drenados o bien drenados con una textura de moderadamente fina a moderadamente gruesa. Estos suelos tienen una tasa moderada de transmisión de agua.
- **Grupo C:** suelos que tienen un índice de infiltración lento cuando están completamente húmedos. Son principalmente suelos con una capa que impide el movimiento descendente del agua o suelos de textura moderadamente fina o fina. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua lenta.
- **Grupo D:** suelos que tienen un índice de infiltración muy lento (alto potencial de escorrentía) cuando están completamente húmedos. Se trata fundamentalmente de arcillas con alta capacidad para expandirse y contraerse, suelos con un elevado nivel freático, suelos que presentan una capa de arcilla o claypan en la superficie o cerca de la superficie, y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua muy lenta.

1.3.4. Uso de herramientas estadísticas en hidrología

La hidrología es una ciencia que analiza la presencia y distribución espacial y temporal del agua en la Tierra, tanto por encima como por debajo de su superficie, analiza las distintas fases del ciclo hidrológico y el comportamiento de las variables que se involucran en este. Dentro de los procesos de análisis de información que se agrupan en esta ciencia se hace necesario la incorporación de herramientas estadísticas, a través de las cuales se busca conocer el comportamiento de la variable en periodos de tiempo y establecer probabilidades de ocurrencia. (Organización Meteorológica Mundial , 2011)

En términos generales en el campo de la hidrología se presentan los siguientes tres tipos de aplicaciones para el análisis estadístico de una variable:

- Diseño de estructuras hidráulicas, siendo necesaria la evaluación y cuantificación de los valores extremos (máximos y mínimos) de caudales u otras variables según el tipo de estructura diseñada. (Chereque, 1989)
- Satisfacción de demandas, siendo necesario evaluar y cuantificar los caudales disponibles en el punto de interés. (Chereque, 1989)
- Diseño y operación de embalses, siendo necesario evaluar y cuantificar la variación de caudales y flujos superficiales y subterráneos, con valores medios, máximos y mínimos (Chereque, 1989), así como el control de la esorrentía entre otros.
- Planificación territorial, conocer la oferta hídrica de una región es de importancia para los procesos de planificación y desarrollo territorial y ambiental de una región, toda vez el desarrollo de las actividades socioeconómicas dependen de este recurso garantizando su sostenibilidad.
- Gestión de riesgos naturales, aunque las inundaciones son procesos naturales, es fundamental conocer las posibles magnitudes de los caudales máximos para generar procesos de reducción y mitigación de la amenaza y la vulnerabilidad.

Dada una variable aleatoria de la cual se interesa conocer la ocurrencia en distintos condiciones o periodos de tiempo, se requiere de un modelo matemático o modelo probabilístico, a través del cual se conozcan características de la variable como la probabilidad de tener valores mayores o menores valores en determinadas condiciones.

1.3.4.1. Periodo de Retorno

El periodo de retorno de un evento extremo como lluvias, temperaturas extremas, caudales máximos, entre otras, se define como el lapso o número de años en que en promedio se cree que será igualado o excedido, es decir, es la frecuencia con la que se presenta un evento de magnitud determinada. (Melisa & Reason, 2007)

El grado de magnitud de un fenómeno extremo está relacionado de forma inversa con su frecuencia de ocurrencia, las precipitaciones muy intensas ocurren con una frecuencia menor que las moderadas o débiles. (Joel Gutiérrez Lozano, 2011)

La expresión más común para calcular los periodos de retorno se muestra a continuación:

$$T = \frac{1}{P}$$

Dónde:

T = Periodo de Retorno

P = Probabilidad de excedencia

1.3.5. Funciones de distribución

Las distribuciones de probabilidad se usan ampliamente en estudios hidrológicos, especialmente para analizar caudales máximos y mínimos o en general valores extremos del sistema. A pesar de los diversos estudios e investigaciones al respecto no existe un modelo que se ajuste a todos los análisis, por ello, se debe analizar cuál es el modelo que se ajusta mejor a las condiciones de los datos que son objeto de análisis.

La utilización de las distribuciones matemáticas presenta las siguientes ventajas en estudios hidrológicos:

- Representa una interpretación coherente de la distribución empírica. En consecuencia, los cuantiles y otros elementos estadísticos calculados mediante la distribución ajustada deberán ser más exactos que los calculados mediante una distribución empírica. (Organización Meteorológica Mundial , 2011)
- Permite representar los datos de manera más compacta y más fácilmente utilizable. (Organización Meteorológica Mundial , 2011)
- Ofrecerá probablemente una descripción más realista y verosimilitud de valores que puede adoptar la variable aleatoria. Así, por ejemplo, al utilizar la distribución empírica, se supone implícitamente que no puede haber valores superiores o inferiores a los valores máximo o mínimo de la muestra. En la mayoría de las situaciones, este supuesto es totalmente inaceptable. (Organización Meteorológica Mundial , 2011)

A continuación, se brinda una breve descripción de las funciones de distribución utilizadas en el presente estudio

*** Función de distribución Valor Extremo Generalizada - GEV**

La función de densidad de probabilidad para el Valor Extremo Generalizada (Hosking & Wallis, 1997) se puede definir mediante tres parámetros: ξ : Localización; α : Escala; k : Forma.

$$F(x) = \exp\{-\exp(-y)\}$$

Donde,

$$y = -k^{-1} \log\{1 - k(x - \xi)/\alpha\}$$

El rango x está definido como:

$$-\alpha < x \leq \xi + \frac{\alpha}{k} \quad k > 0$$

$$-\alpha < x \leq \alpha \quad k > 0$$

$$\xi + \frac{\alpha}{k} < x \leq \alpha \quad k < 0$$

Para la estimación de la función en cuantiles es:

$$x(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} \{1 - (-\log F)^k\}$$

A continuación, se muestra como calcular los L-Moments de la función GEV y están definidos $-1 < x < 1$ según J. Hosking & Wallis (1997):

$$l_1 = \xi + \alpha \{1 - \Gamma(1 + k)/k\}$$

$$l_2 = \alpha(1 - 2^{-k})\Gamma(1 + k)/k$$

$$\tau_3 = \frac{2(1 - 3^{-k})}{(1 - 2^{-k})} - 3$$

$$\tau_4 = \{5(1 - 4^{-k}) - 10(1 - 3^{-k}) + 6(1 - 2^{-k})\}/(1 - 2^{-k})$$

De acuerdo con J. Hosking y Wallis (1997) no es posible una solución explícita, pero ellos estimaron una aproximación que tiene una precisión de 9×10^{-4} para $-0,5 \leq \tau_3 \leq 0,5$.

$$\hat{k} \approx 7,8590c + c^2, \quad c = \frac{2}{3 + \tau_3} - \frac{\log 2}{\log 3}$$

y para el restante de los parámetros de la distribución son:

$$\alpha = \frac{l_2 \hat{k}}{(1 - 2^{-\hat{k}})\Gamma(1 + \hat{k})}$$

$$\xi = l_1 - \alpha\{1 - \Gamma(1 + \hat{k})\}/\hat{k}$$

$\Gamma()$: Denota la función gamma.

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt$$

*** Función de distribución Logística Generalizada – GLO**

La función de densidad de probabilidad para la Logística Generalizada (J. Hosking & Wallis, 1997) se puede definir mediante tres parámetros: ξ : Localización; α : Escala; \hat{k} : Forma

$$F(x) = \frac{1}{(1 + e^{-y})}$$

Donde

$$y = \begin{cases} -k^{-1} \log\{-1 - k(x - \xi)/\alpha\}, & \text{si } k \neq 0 \\ \frac{x - \xi}{\alpha}, & \text{si } k = 0 \end{cases}$$

Para la estimación de la función en cuantiles es:

$$x(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left(\frac{1 - F}{F} \right)^k \right\}$$

El rango de x está definido por las siguientes condiciones:

$$-\infty < x \leq \xi + \frac{\alpha}{k} \quad \text{si } k > 0$$

$$-\infty < x < \infty \quad \text{si } k = 0$$

$$\xi + \frac{\alpha}{k} \leq x < \infty \quad \text{si } k < 0$$

A continuación, se muestra como calcular los L-Moments de la función GLO y están definidos $-1 < x < 1$ según J. Hosking & Wallis (1997):

$$l_1 = \xi + \alpha \left(\frac{1}{k} - \frac{\pi}{\text{sen}(kx)} \right)$$

$$l_2 = \frac{\alpha k \pi}{\text{sen}(k\pi)}$$

$$\tau_3 = -k$$

$$\tau_4 = (1 + 5k^2)/6$$

Los demás parámetros de esta distribución están dados por J. Hosking & Wallis (1997):

$$\begin{aligned} \hat{k} &= -\tau_3 \\ \alpha &= \frac{l_2 \text{sen} \hat{k} \pi}{\hat{k} \pi} \\ \xi &= l_1 - \alpha \left(\frac{1}{\hat{k}} - \frac{\pi}{\text{sen} \hat{k} \pi} \right) \end{aligned}$$

*** Función de distribución Generalizada de Pareto - GPA**

Esta distribución está definida por tres parámetros igual que la distribución GPA y son los siguientes: ξ : Localización; α : Escala; k : Forma.

$$F(x) = 1 - e^{-y}$$

Donde:

$$y = -k^{-1} \log\{1 - k(x - \xi)/\alpha\}$$

Para la estimación de la función en cuantiles es:

$$x(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} \{1 - (1 - F)^k\}$$

El rango de x está definido por:

$$\begin{aligned} \xi \leq x \leq \xi + \frac{\alpha}{k} & \quad \text{si } k \geq 0 \\ \xi \leq x < \infty & \quad \text{si } k \leq 0 \end{aligned}$$

A continuación, se muestra como calcular los L-Moments de la función GPA y están definidos $-1 < x < 1$ según J. Hosking & Wallis (1997):

$$l_1 = \xi + \alpha/(1 + k)$$

$$l_2 = \frac{\alpha}{(1 + k)(2 + k)}$$

$$\tau_3 = \frac{(1 - k)}{(3 + k)}$$

$$\tau_4 = \frac{(1 - k)(2 - k)}{(3 + k)(4 + k)}$$

Los demás parámetros de esta distribución están dados por J. Hosking & Wallis (1997):

$$k = 1 - 3\tau_3/(1 + \tau_3)$$

$$\alpha = \frac{(1 + k)(2 + k)l_2}{k\pi}$$

$$\xi = l_1 - \alpha(2 + k)l_2$$

* **Función de distribución Normal Generalizada GNO**

Esta distribución está definida por tres parámetros igual que la distribución GNO y son los siguientes: ξ : Localización; α : Escala; k : Forma

$$F(x) = \Phi(y)$$

Dónde:

$$y = -k^{-1} \log\{1 - k(x - \xi)/\alpha\}$$

La distribución normal generalizada contiene como casos especiales la distribución lognormal habitual de tres parámetros, correspondientes a $k < 0$, que tenga una asimetría cota inferior y positivo finito; la distribución normal, correspondiente a $k = 0$, y la distribución lognormal inverso, correspondiente a $k > 0$, que tenga una asimetría atado y negativo superior finito. La distribución logarítmica normal de dos parámetros, con un límite inferior de cero y asimetría positiva, se obtiene cuando $k < 0$ y $\xi + \alpha k = 0$.

A continuación, se muestra cómo calcular los L-Moments de la función GNO y están definidos $-1 < x < 1$ según J. Hosking & Wallis (1997):

$$l_1 = \xi + \alpha \left(1 - e^{\frac{k^2}{2}} \right) / k$$

$$l_2 = \frac{\alpha e^{\frac{k^2}{2}}}{k} \left[1 - 2\phi \left(-\frac{k}{\sqrt{2}} \right) \right]$$

$$\tau_3 = -k \frac{A_0 + A_1 k^2 + A_2 k^4 + A_3 k^6}{1 + B_1 k^2 + B_2 k^4 + B_3 k^6}$$

$$\tau_4 = 1 - k^2 \frac{C_0 + C_1 k^2 + C_2 k^4 + C_3 k^6}{1 + D_1 k^2 + D_2 k^4 + D_3 k^6}$$

Los demás parámetros de esta distribución están dados por J. Hosking & Wallis (1997):

$$k = -\tau_3 \frac{E_0 + E_1 \tau_3^2 + E_2 \tau_3^4 + E_3 \tau_3^6}{1 + F_1 \tau_3^2 + F_2 \tau_3^4 + F_3 \tau_3^6}$$

$$\alpha = \frac{l_2 k e^{k^2/2}}{1 - 2\phi \left(-\frac{k}{\sqrt{2}} \right)}$$

$$\xi = l_1 - \alpha \left(1 - e^{k^2/2} \right)$$

* ***Función de distribución Pearson Tipo III - PE3***

La función de densidad de probabilidad para Pearson Tipo III (J. Hosking & Wallis, 1997) se puede definir mediante tres parámetros: ξ : Localización; α : Escala; k : Forma

$$F(x) = G\left(\alpha, \frac{x - \xi}{\beta}\right) / \Gamma(\alpha)$$

Dónde:

$$G(\alpha, x) = \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt$$

Para la estimación de la función en cuantiles es:

$$x(F) = \frac{(x - \xi)^{\alpha-1} e^{-(x-\xi)/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}$$

A continuación, se muestra como calcular los L-Moments de la función PEIII y están definidos $\xi < x < \infty$ según J. Hosking & Wallis (1997):

$$l_1 = \pi^{-1/2} \beta \Gamma(\alpha + 1/2) \Gamma(\alpha)$$

$$l_2 = \xi + \alpha \beta$$

$$\tau_3 = 6 \frac{1}{3} (\alpha, 2\alpha) - 3I_x(p, q)$$

$$Si \alpha \geq 1, \tau_4 = \frac{C_0 + C_1 \alpha^{-1} + C_2 \alpha^{-2} + C_3 \alpha^{-3}}{1 + D_1 \alpha^{-1} + D_2 \alpha^{-2}}$$

$$Si \alpha < 1, \tau_4 = \frac{1 + G_1 \alpha + G_2 \alpha^2 + G_3 \alpha^3}{1 + H_1 \alpha + H_2 \alpha^2 + H_3 \alpha^3}$$

Los demás parámetros de esta distribución están dados por J. Hosking & Wallis (1997):

Si $0 < \tau_3 \leq 1/3$

$$\alpha = \frac{1 + 0,2906 \cdot k}{k + 0,1882 \cdot k^2 + 0,04442 \cdot k^3}$$
$$k = 3 \cdot \pi \cdot \tau_3^2$$

Si $1/3 < \tau_3 \leq 1$

$$\alpha = \frac{0,36067 \cdot k - 0,59567 \cdot k^2 + 0,25361 \cdot k^3}{1 + 2,78861 \cdot k + 2,56096 \cdot k^2 - 0,77045 \cdot k^3}$$
$$k = 1 - |\tau_3|$$

Es posible, por ejemplo, que más de una distribución pueda ajustarse a una región homogénea. Al tener varias regiones homogéneas, sería ideal compartir entre ellas un mismo modelo probabilístico que facilite, por ejemplo, la generación posterior de los mapas de cuantiles o probabilidades.

Tabla 3. Descripción distribuciones de Frecuencia

Distribución	Función de Densidad de probabilidad	Función de distribución inversa	Intervalo	Parámetros
Valor Extremo Generalizada - GEV	$F(x) = \exp\{-\exp(-y)\}$ $y = -k^{-1} \log\{1 - k(x - \xi)/\alpha\}$	$x(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} \{1 - (-\log F)^k\}$	$-\infty < x \leq \xi + \frac{\alpha}{k} \quad k > 0$ $-\infty < x \leq \alpha \quad k > 0$ $\xi + \frac{\alpha}{k} < x \leq \alpha \quad k < 0$	$\xi = l_1 - \alpha\{1 - \Gamma(1 + k)\}/k$ $\alpha = \frac{l_2 k}{(1 - 2^{-k})\Gamma(1 + k)}$ $k \approx 7,8590c + c^2, \quad c = \frac{2}{3 + \tau_3} - \frac{\log 2}{\log 3}$
Logística Generalizada - GLO	$F(x) = \frac{1}{(1 + e^{-y})}$ $y = \begin{cases} -k^{-1} \log\{-1 - k(x - \xi)/\alpha\}, & \text{si } k \neq 0 \\ \frac{x - \xi}{\alpha}, & \text{si } k = 0 \end{cases}$	$x(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left(\frac{1 - F}{F} \right)^k \right\}$	$-\infty < x \leq \xi + \frac{\alpha}{k} \quad \text{si } k > 0$ $-\infty < x < \infty \quad \text{si } k = 0$ $\xi + \frac{\alpha}{k} \leq x < \infty \quad \text{si } k < 0$	$k = -\tau_3$ $\alpha = \frac{l_2 \text{sen} k \pi}{k \pi}$ $\xi = l_1 - \alpha \left(\frac{1}{k} - \frac{\pi}{\text{sen} k \pi} \right)$
Generalizada de Pareto - GPA	$F(x) = 1 - e^{-y}$ $y = -k^{-1} \log\{1 - k(x - \xi)/\alpha\}$	$x(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} \{1 - (1 - F)^k\}$	$\xi \leq x \leq \xi + \frac{\alpha}{k} \quad \text{si } k \geq 0$ $\xi \leq x < \infty \quad \text{si } k \leq 0$	$k = 1 - 3\tau_3/(1 + \tau_3)$ $\alpha = \frac{(1 + k)(2 + k)l_2}{k \pi}$ $\xi = l_1 - \alpha(2 + k)l_2$

Distribución	Función de Densidad de probabilidad	Función de distribución inversa	Intervalo	Parámetros
Normal Generalizada GNO	$F(x) = \Phi(y)$ $y = -k^{-1} \log\{1 - k(x - \xi)\}$		$k < 0$ y $\xi + \alpha k = 0$.	$k = -\tau_3 \frac{E_0 + E_1\tau_3^2 + E_2\tau_3^4 + E_3\tau_3^6}{1 + F_1\tau_3^2 + F_2\tau_3^4 + F_3\tau_3^6}$ $\alpha = \frac{l_2 k e^{k^2/2}}{1 - 2\Phi\left(-\frac{k}{\sqrt{2}}\right)}$ $\xi = l_1 - \alpha(1 - e^{k^2/2})$
Pearson Tipo III - PE3	$F(x) = G\left(\alpha, \frac{x - \xi}{\beta}\right) / \Gamma(\alpha)$ $G(\alpha, x) = \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt$	$x(F) = \frac{(x - \xi)^{\alpha-1} e^{-(x-\xi)/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}$		

Fuente: Adaptado (Organización Meteorológica Mundial , 2011)

1.3.6. L-Moments de las estaciones

Para la estimación de los parámetros de las distribuciones relacionadas, se utilizó el **método L-Moments** ya que es una gran herramienta para la regionalización de datos hidrológicos, permitiendo de esta manera obtener caudales en sitios de interés. Es un método fundamentado en la estadística y es considerado en la actualidad como el método más preciso, porque involucra no solo la supervisión de los datos, sino también la identificación de zonas homogéneas comprende además la selección de la distribución de frecuencia regional y la estimación de los caudales de diseños. (Ayros & Salazar, 2011).

Los L-Moments constituyen un sistema alternativo a los momentos convencionales, para describir las formas de las funciones de distribución (Hosking, 1990) y surgen de combinaciones lineales de los momentos ponderados probabilísticamente, introducidos por Greenwood et al. (1979).

A continuación, se muestran las estimaciones de los primeros cuatro momentos de probabilidad ponderada (PWMs) propuestos por Hosking & Wallis, 1997:

$$\beta_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X(j)$$
$$\beta_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N-1} \left[\frac{N-j}{N(N-1)} \right] X(j)$$
$$\beta_2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N-2} \left[\frac{(N-j)(N-j-1)}{N(N-1)(N-2)} \right] X(j)$$
$$\beta_3 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N-3} \left[\frac{(N-j)(N-j-1)(N-j-2)}{N(N-1)(N-2)(N-3)} \right] X(j)$$

Donde, (j) representa la serie máxima anual, con $X(1)$ siendo el valor más bajo y $X(N)$ el valor más alto, respectivamente.

La expresión general de los L-Moments desarrollada para los primeros cuatro términos son:

$$\begin{aligned}
 l_1 &= \beta_0 \\
 l_2 &= 2\beta_1 - \beta_0 \\
 l_3 &= 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \\
 l_4 &= 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0
 \end{aligned}$$

Diferentes procedimientos de análisis regionales de frecuencias se utilizan para ajustar una muestra de datos a un tipo de distribución, asociando la forma de la distribución a un número finito de parámetros.

Los L-Moments poseen diferentes ventajas sobre los momentos convencionales, ya que pueden caracterizar a una variedad más amplia de distribuciones y son más robustos frente a valores atípicos o anormales. Además, diferentes estudios que han comparado a los L-Moments con los momentos convencionales, han establecido que al utilizar los L-Moments se obtienen estimaciones más precisas, es decir, se obtienen estimaciones más cercanas a los valores observados (Hosking & Wallis, 1997).

1.3.7. L- Moments muestrales

Los L-Moments están definidos para distribuciones de probabilidad, pero en la práctica generalmente son estimados de una muestra de datos finita. El cálculo de los L-Moments se obtiene de una muestra de tamaño n ordenada en forma ascendente (Landwehr et al., 1979).

Un estimador de los momentos ponderados por probabilidad l_r es:

$$l_r = N^{-1} \binom{N-1}{r}^{-1} \sum_{j=r+1}^N \binom{j-1}{r} X_{j:n}$$

Esta expresión desarrollada para los primeros términos es:

$$l_1 = \binom{N}{1}^{-1} \sum_{i=1}^N X_{(i)}$$

$$l_2 = \frac{1}{2} \binom{N}{2}^{-1} \sum_{i=1}^N \left\{ \binom{i-1}{1} - \binom{N-i}{1} \right\} X_{(i)}$$

$$l_3 = \frac{1}{3} \binom{N}{3}^{-1} \sum_{i=1}^N \left\{ \binom{i-1}{2} - 2 \binom{i-1}{1} \binom{N-i}{1} + \binom{N-i}{2} \right\} X_{(i)}$$

$$l_4 = \frac{1}{4} \binom{N}{4}^{-1} \sum_{i=1}^N \left\{ \binom{i-1}{3} - 3 \binom{i-1}{2} \binom{N-i}{1} + 3 \binom{i-1}{1} \binom{N-i}{2} - \binom{N-i}{3} \right\} X_{(i)}$$

Donde:

l : PWM (Momentos ponderados por probabilidad) de orden r .

N : Número total de observaciones.

X : Elemento i -ésimo de la serie.

El primer L-Moments es el promedio o una medida de localización y puede tomar cualquier valor. **El segundo L- Moments** es una medida de dispersión de los datos respecto a la media y toma valores mayores o igual a cero (Coeficiente de variación L-CV).

Dividiendo los L-Moments de mayor orden por la medida de dispersión, se obtiene las siguientes razones:

$$\tau_r = \frac{l_r}{l_2}$$

Estas razones son valores adimensionales, independientes de las unidades de medida de los datos. τ_3 corresponde a la medida de la asimetría y τ_4 corresponde a la medida de la curtosis, denominados respectivamente L-Asimetría y L-Curtosis. El valor análogo del coeficiente de variación en los L Moments, denominado L-CV, está definido por la siguiente expresión:

Coeficiente de variación L-CV:

$$\tau = \frac{l_2}{l_1}$$

Coeficiente de Asimetría L-SK:

$$\tau_3 = \frac{l_3}{l_2}$$

Coeficiente de Curtosis L-CK:

$$\tau_4 = \frac{l_4}{l_2}$$

Los L-Moments se pueden interpretar directamente como medidas de escala y forma de una distribución de probabilidad. Así los L-Moments pueden ser utilizados para estimar parámetros para ajustar un tipo de distribución a una muestra (Jaiswal et al, 2003).

1.3.8. Regionalización

La estimación de probabilidad de la ocurrencia o frecuencia de eventos extremos (Caudales máximos o mínimos) es una extrapolación basada en la disponibilidad de los datos, a partir de esta premisa, con una mayor cantidad de información las estimaciones pueden ser más precisas.

El análisis regional se basa en el concepto de homogeneidad regional donde se parte que los caudales anuales máximos son similares en áreas de una región con características estadísticas y físicas similares y esta homogeneidad no depende del tamaño de la cuenca. Sin embargo, esta suposición no es estrictamente válida, por ello deben analizarse otros factores y verificar las características y homogeneidad ambiental y física de las áreas de estudio. (Cunnane, 1989).

La regionalización se aplica para áreas donde la información no está disponible y se deben usar datos regionales provenientes de un determinado número de estaciones en el área de estudio, otorgando así suficiente información para permitir una distribución de probabilidad que puede ser usada con bastante confiabilidad.

Este tipo de análisis representa la sustitución de espacio y tiempo donde datos desde diferentes áreas de una región pueden ser usadas para compensar registros

de datos cortos en un sitio único. La estimación regional puede obtenerse mediante los métodos de la crecida índice o de regresión.

1.3.9. Método de Regresión

Las técnicas de regresión permiten estimar la magnitud de una crecida que sobrevenga en promedio una vez cada (Tr) años, basándose en las características físicas y climatológicas de la cuenca. Las magnitudes de las crecidas correspondientes a distintos períodos de retorno en cada estación se estiman mediante una distribución preseleccionada obtenida de un análisis de frecuencia específico del emplazamiento. A su vez, las características de cada cuenca se obtienen de mapas topográficos o de datos climatológicos generalizados.

Los parámetros de las ecuaciones que relacionan QTR con las características pueden obtenerse mediante las técnicas de mínimos cuadrados ordinarios, de mínimos cuadrados ponderados o de mínimos cuadrados generalizados. Estos dos últimos métodos han sido utilizados para subsanar las deficiencias de que adolecen los supuestos en que se basa el método de los mínimos cuadrados ordinarios. (Guía de prácticas hidrológicas No. 168. OMM, 2008).

La relación crecida-frecuencia regional desarrollada por Benson (1962) para el nordeste de Estados Unidos es la siguiente:

$$QTR = A^b Z^c S^d P^e D^f M^g$$

Donde:

QTR= Caudal máximo anual en T años.

A= Área de drenaje.

Z= Pendiente del cauce principal.

S= Porcentaje de área de almacenamiento superficial más un 0,5 por ciento.

P= Intensidad de precipitación de lluvia en T años para una duración dada.

D= Número de grados promedio por debajo del punto de congelación en enero.

M= Factor orográfico.

a, b, c, d, e, f, g= coeficientes de regresión.

La finalidad es obtener variables independientes relacionadas físicamente con la variable dependiente. La transformación logarítmica de la ecuación anterior

proporciona un modelo aditivo lineal de los procedimientos de regresión. Es posible aplicar otros tipos de transformaciones a las variables dependientes e independientes, pero la transformación logarítmica sigue siendo la más habitual. (Organización Meteorológica Mundial , 2011).

Habrá que procurar que el número de variables independientes del modelo no sea excesivo. Las variables incluidas en el modelo de regresión deberán ser estadísticamente significantes, y su nivel de importancia, previamente seleccionado, deberá gozar de aceptación general (Draper y Smith, 1981).

Una de las ventajas de los modelos de estimación regional de regresión múltiple es la flexibilidad a la hora de escoger el tipo de distribución que representará los niveles de excedencia en cada emplazamiento.

1.4. Área de estudio

La cuenca del río Suárez se localiza entre los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Santander, alberga aproximadamente 78 municipios y tiene un área 7861 km²; nace a una altitud aproximada de 3.850 m.s.n.m. y desemboca en el río Sogamoso a una altitud de 350 m.s.n.m. (Corpoboyacá; CAR; CAS, 2018)

En la Tabla 4 se muestra la relación de área y municipios pertenecientes a la cuenca del río Suárez:

Tabla 4. Relación de área y municipios pertenecientes a la cuenca del río Suárez

Municipio	Departamento	Área total municipal (km ²)	Área municipal en la cuenca (km ²)	Porcentaje área del municipio en la cuenca (%)
Carmen de Carupa	Cundinamarca	289.0	216.9	75.1%
Cucunubá	Cundinamarca	110.5	98.2	88.9%
Fúquene	Cundinamarca	83.0	83.0	100.0%
Guachetá	Cundinamarca	171.9	171.9	100.0%
Lenguazaque	Cundinamarca	155.0	155.0	100.0%
Simijaca	Cundinamarca	90.3	90.3	100.0%
Suesca	Cundinamarca	177.5	60.3	34.0%
Susa	Cundinamarca	98.8	98.8	100.0%
Sutatausa	Cundinamarca	64.5	64.5	100.0%
Tausa	Cundinamarca	193.2	26.4	13.7%
Ubaté	Cundinamarca	101.3	101.9	100.6%
Villapinzón	Cundinamarca	225.5	25.6	11.3%
Caldas	Boyacá	82.9	82.8	100.0%
Chiquinquirá	Boyacá	168.4	136.9	81.3%
Ráquira	Boyacá	216.1	42.7	19.8%
Saboyá	Boyacá	243.7	225.0	92.3%
Samacá	Boyacá	173.5	0.4	0.2%
San Miguel de Sema	Boyacá	92.3	84.6	91.7%
Arcabuco	Boyacá	137.9	137.9	100.0%
Chíquiza	Boyacá	116.5	116.4	99.9%
Chitaraque	Boyacá	158.5	158.5	100.0%
Cómbita	Boyacá	145.2	53.0	36.5%
Cucaita	Boyacá	42.1	26.9	63.8%
Duitama	Boyacá	234.0	32.9	14.1%
Gachantiva	Boyacá	88.2	88.2	100.0%
Moniquirá	Boyacá	218.3	218.3	100.0%

Municipio	Departamento	Área total municipal (km ²)	Área municipal en la cuenca (km ²)	Porcentaje área del municipio en la cuenca (%)
Motavita	Boyacá	60.0	15.8	26.3%
Paipa	Boyacá	305.1	128.2	42.0%
Ráquira	Boyacá	220.8	176.3	79.8%
Saboyá	Boyacá	249.2	6.3	2.5%
Sáchica	Boyacá	63.9	63.9	100.0%
Samacá	Boyacá	167.6	123.4	73.7%
San José de Pare	Boyacá	74.4	74.4	100.0%
San Miguel de Sema	Boyacá	94.0	9.7	10.3%
Santa Sofía	Boyacá	77.5	77.5	100.0%
Santana	Boyacá	68.0	68.0	100.0%
Sora	Boyacá	47.8	36.6	76.5%
Sotaquirá	Boyacá	285.1	86.3	30.3%
Sutamarchán	Boyacá	103.3	103.2	100.0%
Tinjacá	Boyacá	79.2	77.5	97.9%
Togüí	Boyacá	101.4	101.4	100.0%
Villa de Leiva	Boyacá	126.6	126.6	100.0%
Aguada	Santander	75.2	70.9	94.2%
Albania	Santander	166.2	93.8	56.4%
Barbosa	Santander	46.7	46.7	100.0%
Barichara	Santander	137.3	130.6	95.1%
Bolívar	Santander	1010.1	70.4	7.0%
Cabrera	Santander	65.6	54.2	82.6%
Charalá	Santander	419.2	93.9	22.4%
Chima	Santander	173.2	171.9	99.2%
Chipata	Santander	95.0	94.7	99.7%
Confines	Santander	71.4	70.0	98.0%
Contratación	Santander	137.2	55.8	40.6%
El Guacamayo	Santander	93.0	51.5	55.4%
El Peñón	Santander	398.2	4.0	1.0%
Florian	Santander	176.6	4.9	2.8%
Galan	Santander	201.7	201.1	99.7%
Gambita	Santander	608.2	608.0	100.0%
Guadalupe	Santander	146.3	146.3	100.0%
Guapota	Santander	67.3	67.3	100.0%
Guavata	Santander	83.8	83.8	100.0%
Guepsa	Santander	30.2	30.2	100.0%
Hato	Santander	169.0	168.8	99.9%
Jesus María	Santander	89.6	59.8	66.7%
La paz	Santander	284.3	87.4	30.8%
Oiba	Santander	286.1	270.2	94.5%
Palmar	Santander	19.7	19.7	100.0%
Palmas del socorro	Santander	58.5	58.5	100.0%

Municipio	Departamento	Área total municipal (km ²)	Área municipal en la cuenca (km ²)	Porcentaje área del municipio en la cuenca (%)
Páramo	Santander	73.0	2.1	2.9%
Puente Nacional	Santander	251.7	251.6	100.0%
San Benito	Santander	59.1	59.1	100.0%
Simacota	Santander	904.7	173.0	19.1%
Socorro	Santander	127.8	94.0	73.5%
Suaita	Santander	285.2	285.2	100.0%
Sucre	Santander	522.5	71.0	13.6%
Vélez	Santander	447.7	89.4	20.0%
Villanueva	Santander	97.6	64.5	66.1%
Zapatoca	Santander	364.4	84.8	23.3%

Adaptado: (Corpoboyacá; CAR y Fondo de Adaptación, 2018) (Corpoboyacá; CAR; CAS, 2018)

El departamento que representa el mayor porcentaje de área de la cuenca es Santander con un 50,74% del total de la cuenca, el segundo departamento con mayor área en la cuenca es Boyacá con un porcentaje del 34,1% y el tercero el departamento de Cundinamarca con un 15,2%. (Corpoboyacá; CAR y Fondo de Adaptación, 2018)

En la Ilustración 1 se muestra la localización geográfica de la cuenca y los municipios pertenecientes a esta:

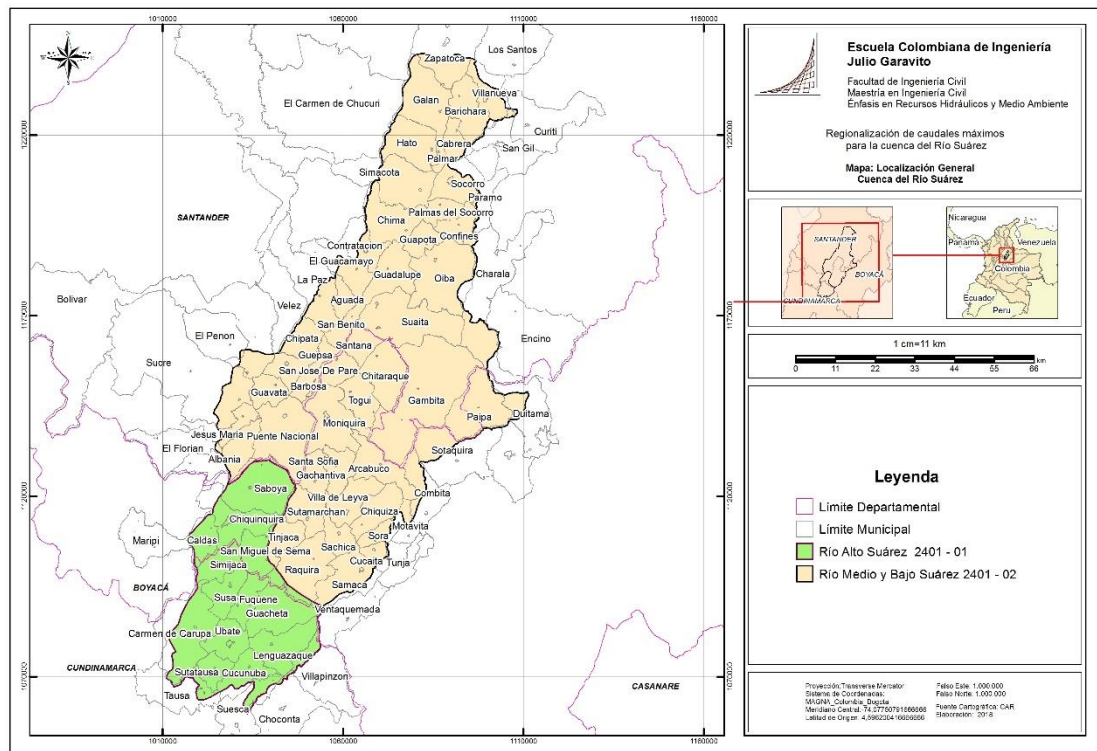


Ilustración 1. Localización geográfica cuenca río Suárez.
Fuente: (Corpoboyacá; CAR; CAS, 2018)

1.4.1. Descripción hidrográfica

A partir de la zonificación y codificación de cuencas hidrográficas del IDEAM, la cuenca de río Suárez se identifica como se muestra en la Tabla 5:

Tabla 5. Codificación IDEAM cuenca río Suárez

Código área hidrográfica	Nombre área hidrográfica	Código zona hidrográfica	Nombre zona hidrográfica	Código Sub-zona Hidrográfica	Nombre Sub-zona Hidrográfica	Código Nivel I - Unidades Hidrográficas	Nombre Nivel I - Unidades Hidrográficas
2	Magdalena Cauca	24	Sogamoso	2401	Río Suárez	1	Alto Suárez
						2	Medio y Bajo Suárez

Fuente: Adaptado (IDEAM, 2013)

Por otro lado, la cuenca se subdivide en 42 subcuencas las cuales se detallan a continuación con el respectivo porcentaje de área que representan:

Tabla 6. Relación de Subcuencas Río Suárez

Código subcuenca	Subcuenca	Área (Km²)	Porcentaje (%)
24010104	Laguna de Cucunubá	98.2	1,25
24010101	Laguna de Suesca	29.1	0,37
24010110	Río Alto Suárez	410.3	5,22
24010102	Río Alto Ubaté	224.3	2,85
24010106	Río Bajo Ubaté Fúquene	266.5	3,39
24010109	Río Chiquinquirá	129.8	1,65
24010105	Río Lenguazaque	289.0	3,67
24010108	Río Simijaca	148.0	1,88
24010107	Río Susa	61.6	0,78
24010103	Río Suta	111.6	1,42
24010209	Qda, El Ropero	309.0	3,93
24010215	Rio Ubazá	600.0	7,63
24010210	Rio Cuchinero	432.9	5,5
24010214	Rio Moniquirá	1192.9	15,16
24010216	Rio Lenguaruco	921.8	11,72
24010217	Rio Oibita	597.1	7,59
24010204	Qda, Cinco Mil	181.6	2,31
24010205	Qda, Guavina	113.8	1,45
24010206	Qda, Chimera	110.0	1,4
24010213	Qda, Agua Blanca	79.8	1,01
24010208	Qda, Alférez	57.5	0,73
24010203	Qda, Vigueche	94.6	1,2
24010220	Qda, Barichara	103.8	1,32
24010211	Dir, M Suárez R A Suárez-R, Cuchinero (md)	41.7	0,53
24010231	Dir, M Suárez R, Moniquirá-R Ubazá (mi)	2.4	0,03
24010232	Dir, M Suárez R Ubazá-R Lenguaruco (mi)	102.5	1,3
24010229	Dir, M Suárez R Cuchinero-Q el Ropero (md)	150.8	1,92
24010224	Dir, M Suárez Q Cinco Mil-R B Suárez (md)	4.8	0,06
24010225	Dir, M Suárez Q Guavina-Q Cinco Mil (md)	11.5	0,15
24010226	Dir, M Suárez Q Chimera-Q Guavina (md)	50.4	0,64
24010218	Dir, M Suárez R Obita-R B Suárez (mi)	225.2	2,86
24010228	Dir, M Suárez Q el Ropero-Q Alférez (md)	1.2	0,01
24010207	Dir, M Suárez Q Alférez-Q Chimera (md)	98.8	1,26
24010227	Dir, M Suárez R Lenguaruco-R Obita (mi)	141.7	1,8

Código subcuena	Subcuena	Área (Km²)	Porcentaje (%)
24010212	Dir, M Suárez R A Suárez-Q Agua Blanca (mi)	43.2	0,55
24010221	Dir, B Suárez Q Barichara-R Sogamoso (mi)	95.2	1,21
24010201	Dir, B Suárez Q Pao-R Sogamoso (md)	49.8	0,63
24010223	Dir, B Suárez R M Suárez-Q Vigueche (md)	97.6	1,24
24010219	Dir, B Suárez R M Suárez-Q Barichara (mi)	50.0	0,64
24010202	Qda, Pao	90.2	1,15
24010222	Dir, B Suárez Q Vigueche-Q Pao (md)	2.3	0,03
24010230	Dir, M Suárez Q Agua Blanca-R, Moniquirá (mi)	45.0	0,57
	Total	7863	100

Fuente: (Corpoboyacá; CAR y Fondo de Adaptación, 2018)

A partir de lo mostrado anteriormente se identifica que las subcuencas que registran las mayores áreas son los ríos Moniquirá, Lenguaruco, río Ubaza y río Oibita los cuales representan los siguientes porcentajes de área dentro de la cuenca 15.16%, 11.72%, 7.63% y 7.59% respectivamente. En la Ilustración 2 se muestran las subcuencas que componen la cuenca del río Suárez.

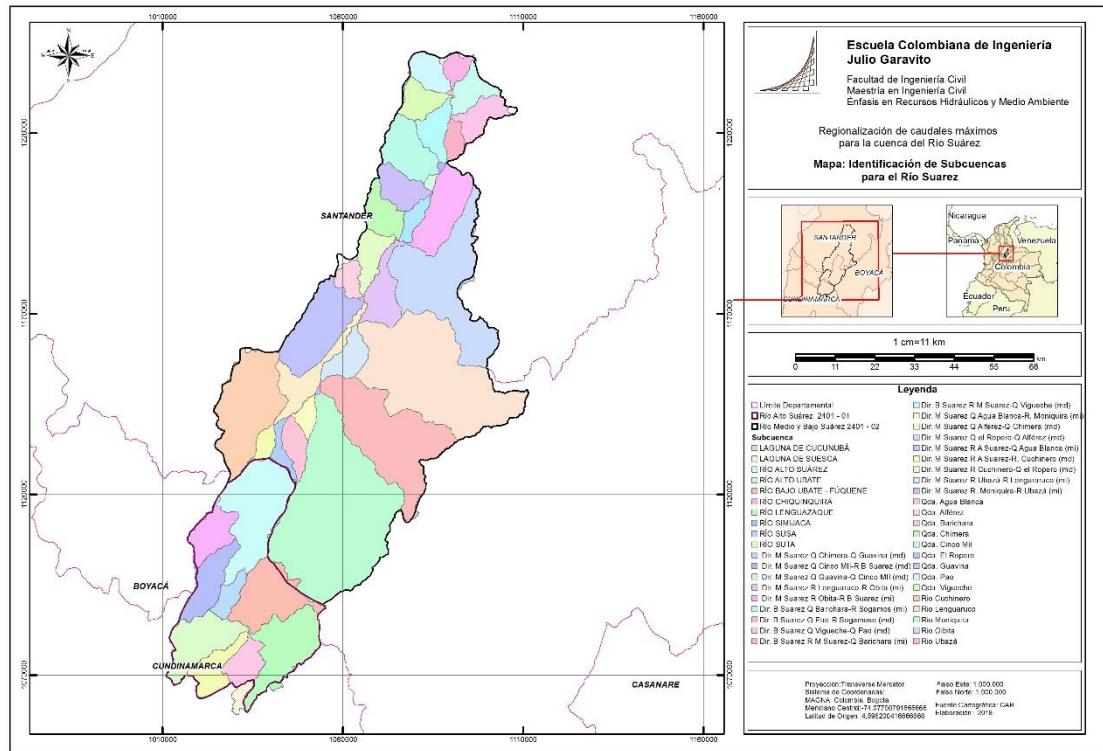


Ilustración 2. Identificación subcuenas río Suárez.
 Fuente: (Corpoboyacá; CAR y Fondo de Adaptación, 2018)

1.4.2. Descripción climática

El clima de la zona de estudio tiene una tendencia bimodal, con los máximos valores de precipitación reportados en los meses de mayo y octubre con valores superiores a los 100 mm/mes y que alcanzan los 500 mm/mes, los periodos de lluvias ocurren el primero en los meses de abril a mayo y el segundo en los meses de septiembre a noviembre, las demás variables climáticas presentan un régimen directamente proporcional o inversamente proporcional al régimen directo de precipitación (Corpoboyacá; CAR; CAS, 2018). En el presente numeral se realiza la descripción de las variables meteorológicas de precipitación media anual y temperatura media para la cuenca, para la caracterización de estas variables se parte de mediciones de las estaciones que están localizadas dentro de la cuenca hidrográfica y en su área de influencia.

1.4.2.1. Precipitación Media Anual

A continuación, se reportan los registros de precipitación media anual para cada una de las subcuencas del río Suárez:

Tabla 7. Precipitación Media Anual

Precipitación media Anual Subcuencas río Suárez	
Subcuenca Hidrográfica	Precipitación Anual (mm)
Dir. B Suárez Q Pao-R Sogamoso	1221,67
Qda. Pao	1503,98
Qda. Vigueche	1778,83
Qda. Cinco Mil	2467,09
Qda. Guavina	3059,3
Qda. Chimera	3624,72
Dir. M Suárez Q Alférez-Q Chimera	3817,55
Qda. Alférez	3417,79
Qda. El Ropero	2542,75
Río Cuchinero	2470,41
Dir. M Suárez R A Suárez-R. Cuchinero	2173,81
Dir. M Suárez R A Suárez-Q Agua Blanca	1934,77
Qda. Agua Blanca	1827,64
Río Moniquirá	1127,22
Río Ubazá	1896,21
Río Lenguaruco	2271,33
Río Oibita	2868,49
Dir. M Suárez R Obita-R B Suárez	2478,9
Dir. B Suárez R M Suárez-Q Barichara	1556,59
Qda. Barichara	1131,58
Dir. B Suárez Q Barichara-R Sogamoso	1151,81
Dir. B Suárez Q Vigueche-Q Pao	1348,14
Dir. B Suárez R M Suárez-Q Vigueche	1778,48
Dir. M Suárez Q Cinco Mil-R B Suárez	2098,03
Dir. M Suárez Q Guavina-Q Cinco Mil	2536,81
Dir. M Suárez Q Chimera-Q Guavina	3015,76
Dir. M Suárez R Lenguaruco-R Obita	3072,96
Dir. M Suárez Q el Ropero-Q Alférez	3016,04
Dir. M Suárez R Cuchinero-Q el Ropero	2104,73
Dir. M Suárez Q Agua Blanca-R. Moniquirá	1846,48
Dir. M Suárez R. Moniquirá-R Ubazá	1869,55

Dir. M Suárez R Ubazá-R Lenguraruco	2226,88
Alto Suárez	1217,09
Alto Ubaté	880,62
Chiquinquirá	862,07
Cucunubá	783,29
Lenguazaque	886,15
Simijaca	834,84
Suesca	806,74
Susa	845,91
Suta	762,28
Ubaté	845,18

Fuente: (Corpoboyacá; CAR y Fondo de Adaptación, 2018); (Corpoboyacá; CAR; CAS, 2018)

A partir de los valores reportados anteriormente se identifica que las subcuencas que registran menores valores de precipitación son las subcuencas pertenecientes a la cuenca alta del río Suárez: subcuenca Suta, Cucunubá, Suesca, Simijaca, Ubaté, Susa, Chiquinquirá, Alto de Ubaté y Lenguazaque las cuales reportan precipitaciones menores a 1000 mm por año. Por otro lado, las subcuencas que reportan los valores mayores de precipitación es la subcuenca Dir. M Suárez Q Alférez-Q Chimera (md) ubicada en la zona central de la cuenca, esta presenta la mayor precipitación con un valor de 3817.6 mm/año.

En la Ilustración 3 se muestra la espacialización de la precipitación total multianual de la cuenca del río Suárez:

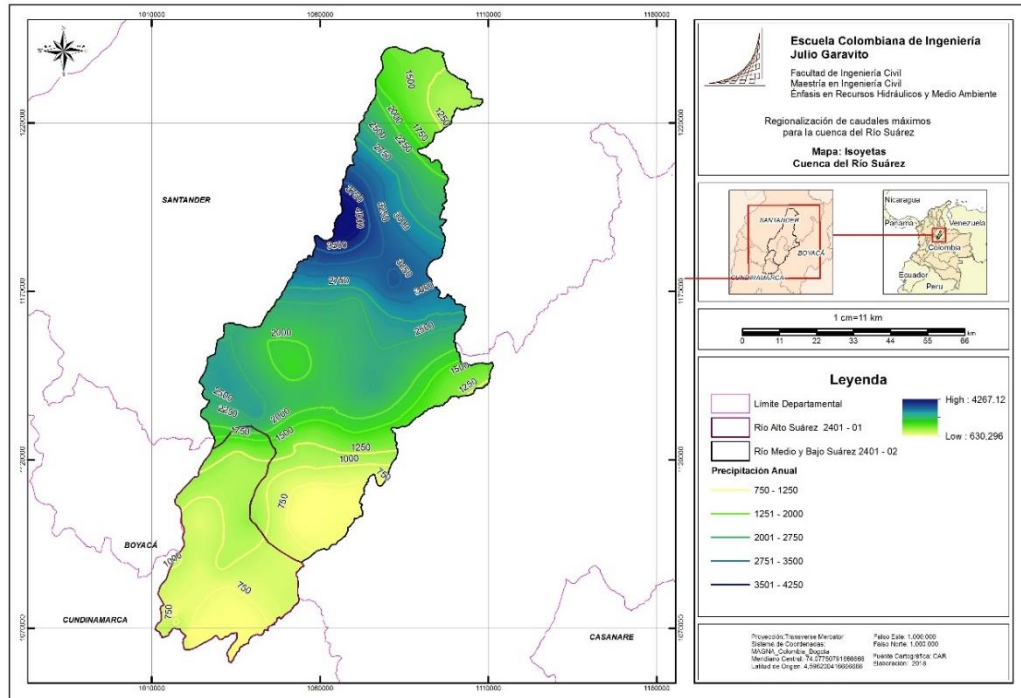


Ilustración 3. Precipitación total multianual cuenca río Suárez.
 Fuente: (Corpoboyacá; CAR; CAS, 2018)

1.4.2.2. Temperatura Promedio Anual

Los valores de temperatura promedio anual para las subcuencas del río Suárez se muestran en la Tabla 8:

Tabla 8. Valores de Temperatura Promedio Anual por Subcuencas río Suárez

Subcuenca Hidrográfica	Temperatura (°C)
Dir. B Suárez Q Pao-R Sogamoso	23,70
Qda. Pao	20,00
Qda. Vigueche	18,70
Qda. Cinco Mil	17,50
Qda. Guavina	18,30
Qda. Chimera	17,20

Subcuenca Hidrográfica	Temperatura (°C)
Dir. M Suárez Q Alférez-Q Chimera	19,80
Qda. Alférez	18,20
Qda. El Ropero	18,90
Río Cuchinero	16,30
Dir. M Suárez R A Suárez-R. Cuchinero	15,80
Dir. M Suárez R A Suárez-Q Agua Blanca	15,00
Qda. Agua Blanca	15,70
Río Moniquirá	14,10
Río Ubazá	13,90
Río Lenguaruco	16,40
Río Oibita	19,00
Dir. M Suárez R Obita-R B Suárez	21,70
Dir. B Suárez R M Suárez-Q Barichara	24,50
Qda. Barichara	21,00
Dir. B Suárez Q Barichara-R Sogamoso	23,40
Dir. B Suárez Q Vigueche-Q Pao	26,60
Dir. B Suárez R M Suárez-Q Vigueche	22,40
Dir. M Suárez Q Cinco MII-R B Suárez	24,80
Dir. M Suárez Q Guavina-Q Cinco Mil	24,00
Dir. M Suárez Q Chimera-Q Guavina	23,10
Dir. M Suárez R Lenguaruco-R Obita	21,00
Dir. M Suárez Q el Ropero-Q Alférez	22,80
Dir. M Suárez R Cuchinero-Q el Ropero	19,40
Dir. M Suárez Q Agua Blanca-R. Moniquirá	18,40
Dir. M Suárez R. Moniquirá-R Ubazá	20,10
Dir. M Suárez R Ubazá-R Lenguaruco	19,90
Alto Suárez	14,99
Alto Ubaté	12,30
Chiquinquirá	13,96
Cucunubá	12,30
Lenguazaque	12,62
Simijaca	13,78
Suesca	12,30
Susa	13,22
Suta	12,30
Ubaté	13,51

Fuente: (Corpoboyacá; CAR y Fondo de Adaptación, 2018); (Corpoboyacá; CAR; CAS, 2018)

Los valores de temperatura promedio para las subcuencas que conforman el río Suárez oscilan entre 12°C a 27°C, las áreas con las temperaturas menores se encuentran en la cuenca alta: Alto Ubaté, Cucunubá, Suesca, Suta y Lenguaque las cuales registran valores entre 12°C a 13°C, por otro lado, las unidades con mayores temperaturas son: Dir. M Suárez Q Guavina-Q Cinco Mil, Dir. B Suárez R M Suárez-Q Barichara, Dir. M Suárez Q Cinco Mil-R B Suárez y Dir. B Suárez Q Vigueche-Q Pao con valores de temperatura comprendidos entre 24°C a 27°C.

En la Ilustración 4 se muestra las isotermas de la cuenca:

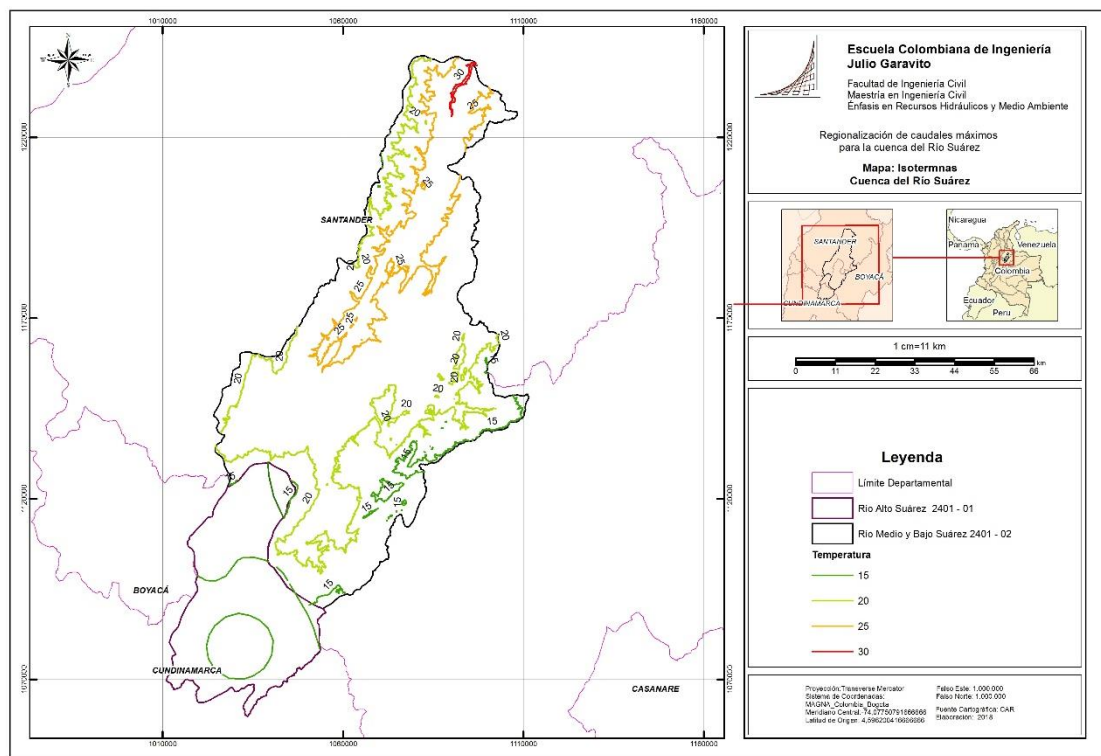


Ilustración 4. Isotermas cuenca río Suárez.
 Fuente: (Corpoboyacá; CAR; CAS, 2018)

1.4.3. Indicadores Hidrológicos

A continuación se presentan algunos de los indicadores hidrológicos estimados en los Planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas – POMCAs - de los ríos Alto Suárez y Medio y Bajo Suárez, entre los cuales se encuentran el índice de

aridez (IA), el índice de uso del agua (IUA) y el índice de retención y regulación hídrica (IRH), a partir de los cuales se puede determinar diferentes aspectos las condiciones actuales de la cuenca a nivel hidrológico.

1.4.3.1. Índice de Aridez (IA)

El índice de Aridez se define como una característica cualitativa del clima, que permite medir el grado de suficiencia o insuficiencia de la precipitación para el sostenimiento de los ecosistemas de una región, a través de este se identifican áreas deficitarias o de excedentes de agua, calculadas a partir del balance hídrico superficial. (IDEAM, 2010)

En la Ilustración 5 se muestra los valores de índice de aridez para la cuenca:

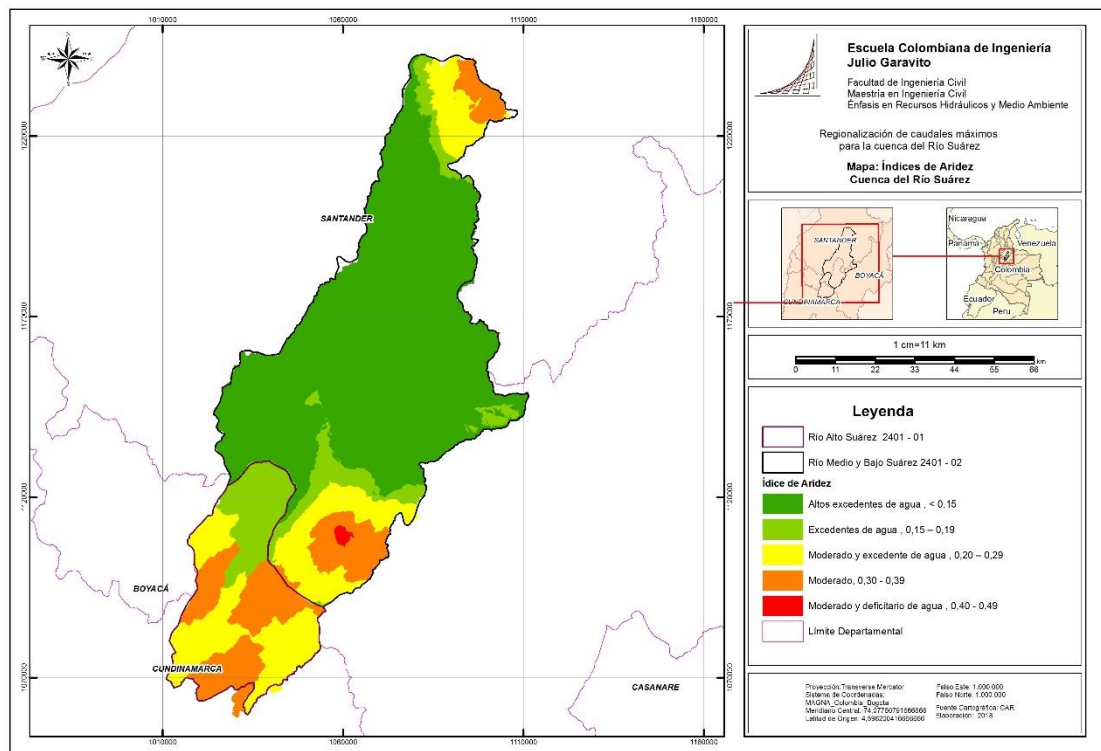


Ilustración 5. Índice de Aridez cuenca río Suárez.
 Fuente: (Corpoboyacá; CAR y Fondo de Adaptación, 2018)

De acuerdo al Índice de Aridez, podemos evidenciar que la cuenca Alta del río Suárez, presenta de moderado y excedentes de agua. Por otro lado la cuenca media y Baja presenta altos exentes de agua.

Lo anterior es coherente con el análisis con el comportamiento de la precipitación donde en la cuenca Baja de presenta una mayor cantidad de lluvias.

1.4.3.2. Índice de Uso del Agua (IUA)

El índice de uso del agua corresponde a la cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores o usuarios, en un período determinado (anual, mensual) y por unidad espacial de subzona hidrográfica y cuencas abastecedoras de acueductos en relación con la oferta hídrica superficial disponible para las mismas unidades de tiempo y espaciales. (IDEAM, 2010)

En la Ilustración 6 se muestra los valores de índice de uso del agua para la cuenca:

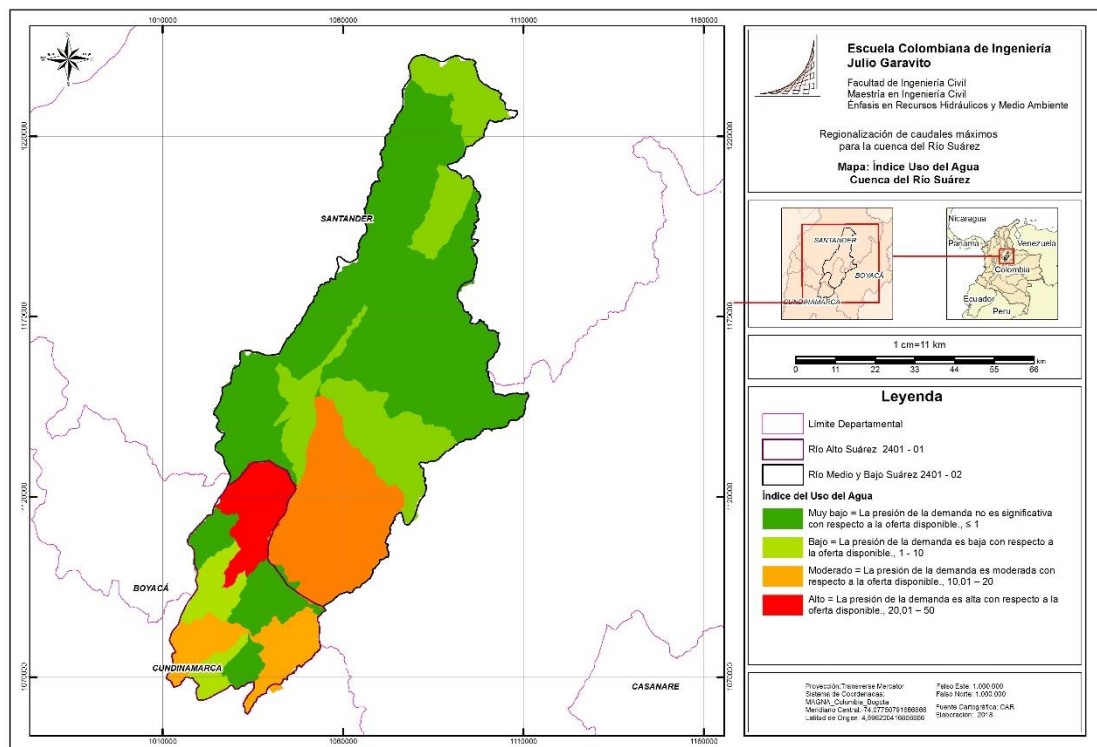


Ilustración 6. Índice de uso del agua (IUA) cuenca río Suárez.
 Fuente: (Corpoboyacá; CAR y Fondo de Adaptación, 2014)

De acuerdo a lo anterior, se evidencia que la cuenca Alta del río Suárez presenta un índice de uso del agua entre moderado y alto, indicando una presión hídrica considerable de parte de las actividades humanas, en especial del sector agropecuario.

Por el contrario, la cuenca Baja, presenta un IUA muy bajo, indicando que la oferta hídrica disponible es muy superior a la demanda.

1.4.3.3. Índice Retención y Regulación Hídrica (IRH)

El índice de regulación hídrica mide la capacidad de retención de humedad de las cuencas con base en la distribución de las series de frecuencias acumuladas de los caudales diarios. Este índice se mueve en el rango entre 0 y 1, siendo los valores más bajos los que se interpretan como de menor regulación.

En la Ilustración 7 se muestra los valores de índice de retención y regulación hídrico para la cuenca:

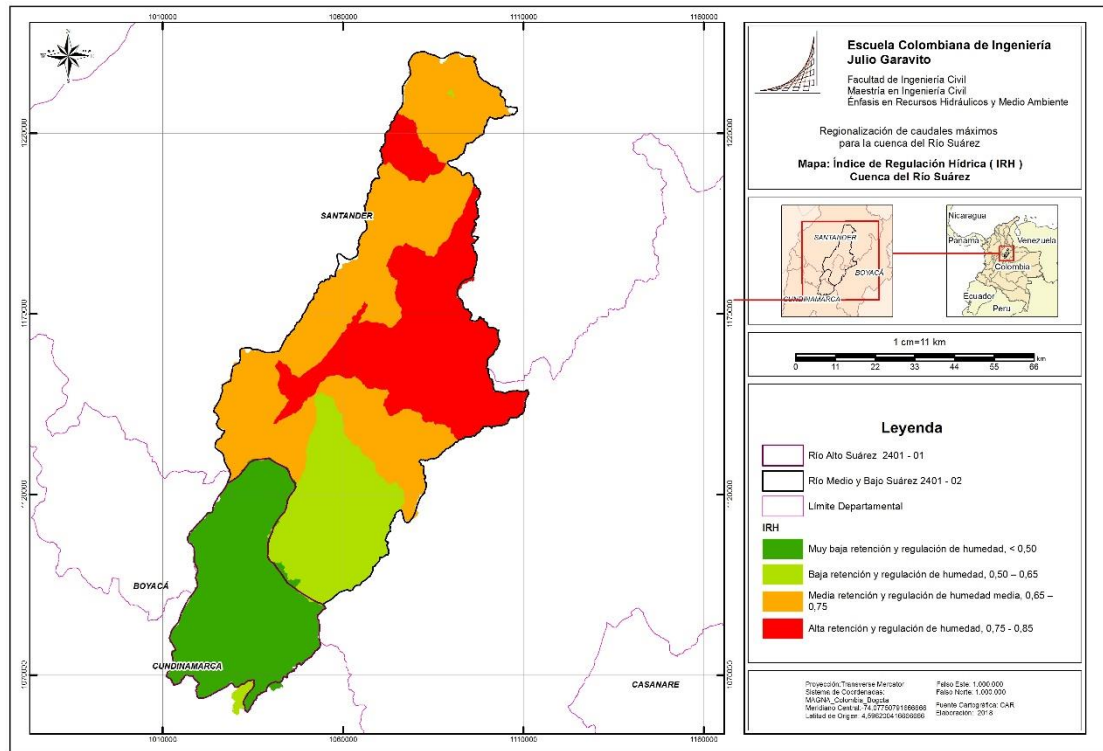


Ilustración 7. Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) Cuenca del río Suárez.
 Fuente: (Corpoboyacá; CAR y Fondo de Adaptación, 2014)

1.4.4. Coberturas de la tierra

A continuación, en la Ilustración 8 se muestra la espacialización de las coberturas definidas estimada y presentada en los Planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas – POMCAs - de los ríos Alto Suárez y Medio y Bajo. (Corpoboyacá; CAR y Fondo de Adaptación, 2014), a partir de la metodología oficial adoptada para Colombia, Corine Land Coverñ. IDEAM 2010.

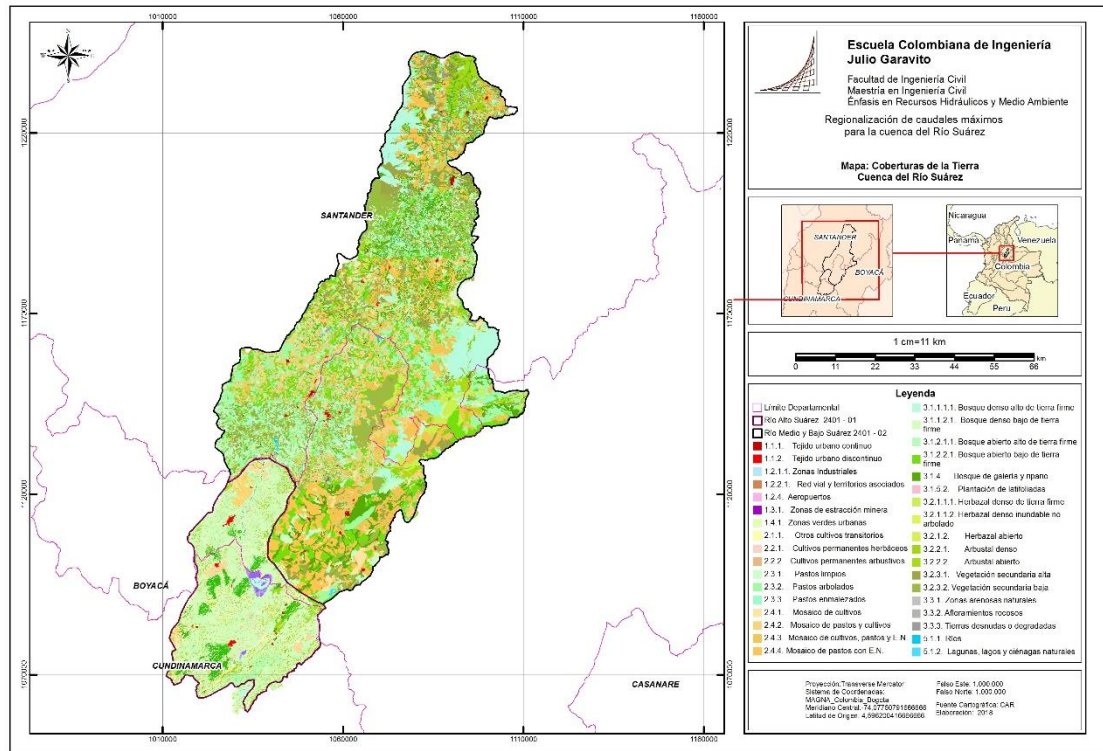


Ilustración 8 – Coberturas del suelo cuenca río Suárez

Fuente: (Corpoboyacá; CAR y Fondo de Adaptación, 2018); (Corpoboyacá; CAR; CAS, 2018)

De acuerdo a Corpoboyacá; CAR y Fondo de Adaptación, 2014, las principales coberturas del suelo en la cuenca del río Suárez, son los territorios Agrícolas 54.23% (426.640 Ha) dentro de la cual se encuentran principalmente coberturas de mosaicos de pastos, cultivos y espacios naturales los cuales representan un 19,8% (155.736 Ha), la cobertura de pastos 13,14% (103.361 Ha) y cobertura de pastos arbolados que representa un 8,98% (70.637 Ha).

Así mismo la segunda categoría más importante, son los bosques y áreas seminaturales que representa un 43.2% (339.859 Ha) del área total de la cuenca, dentro de esta categoría se encuentran principalmente coberturas de bosque abierto bajo la cual representa un 8.95% (70.376 Ha), cobertura de bosque de galería y ripario 6.34% (49.845 Ha) y vegetación secundaria alta la cual representa un 5.69% (44.730 Ha).

En términos generales el análisis de coberturas muestra un territorio intervenido por actividades antrópicas principalmente asociadas a la producción agropecuaria, a

pesar de esto se evidencia una importante área de áreas de bosques o áreas seminaturales.

1.4.5. Infraestructuras Hidráulicas – Embalses

A partir del inventario de infraestructuras hidráulicas descrito en los Planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas – POMCAs - de los ríos Alto Suárez y Medio y Bajo Suárez, se identifican un total de 5 embalses los cuales son relacionados en la Tabla 9:

Tabla 9. Relación de embalses en la cuenca del río Suárez.

ID	Microcuenca Hidrográfica	Área (Ha)	Volumen	Uso
Embalse el Hato	Río Alto Ubaté	85	Sin Inf.	Doméstico
Embalse de Gacheneca	Río Achica	178	6.9 (Mm ³)	Riego, silvicultura y Regulación Hídrica.
Represa El Común	Qda. Carrizal	5	Sin Inf.	Doméstico y regulación hídrica
La Honda	Qda. La Honda	8	Sin Inf.	Doméstico y regulación hídrica
Las Aguilitas	Fuera de la cuenca	Sin Inf.	150.000 (m ³)	Doméstico
El Batam	La Giteña	3	175.000 (m ³)	Doméstico

Fuente: (Corpoboyacá; CAR; CAS, 2018) (Corpoboyacá; CAR y Fondo de Adaptación, 2018)

En la Ilustración 9 e Ilustración 10 se muestra la localización de los embalses en la cuenca alta del río Suárez.

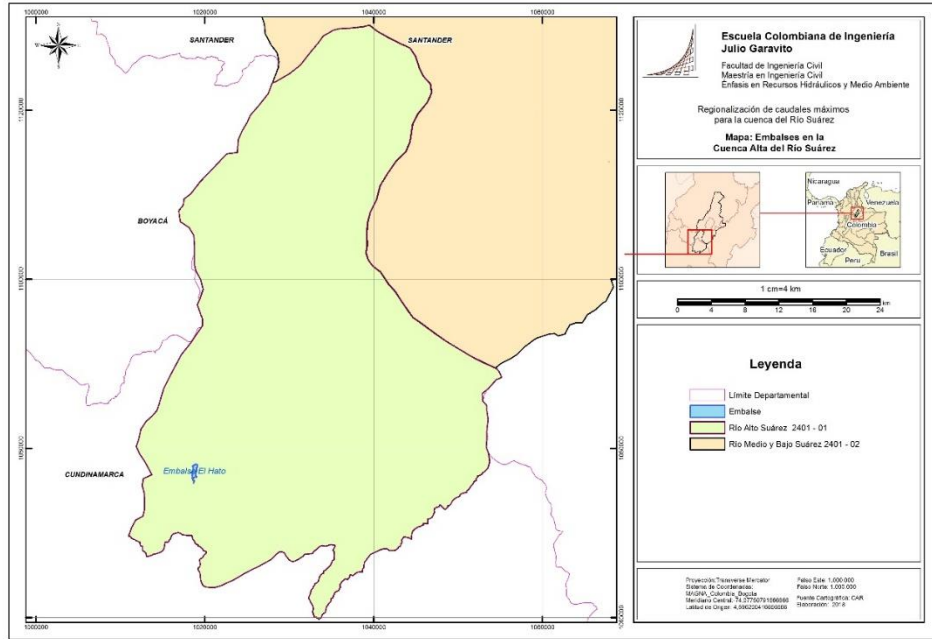


Ilustración 9 – Identificación de embalses cuenca Alta río Suárez
Fuente: (Corpoboyacá; CAR y Fondo de Adaptación, 2018)

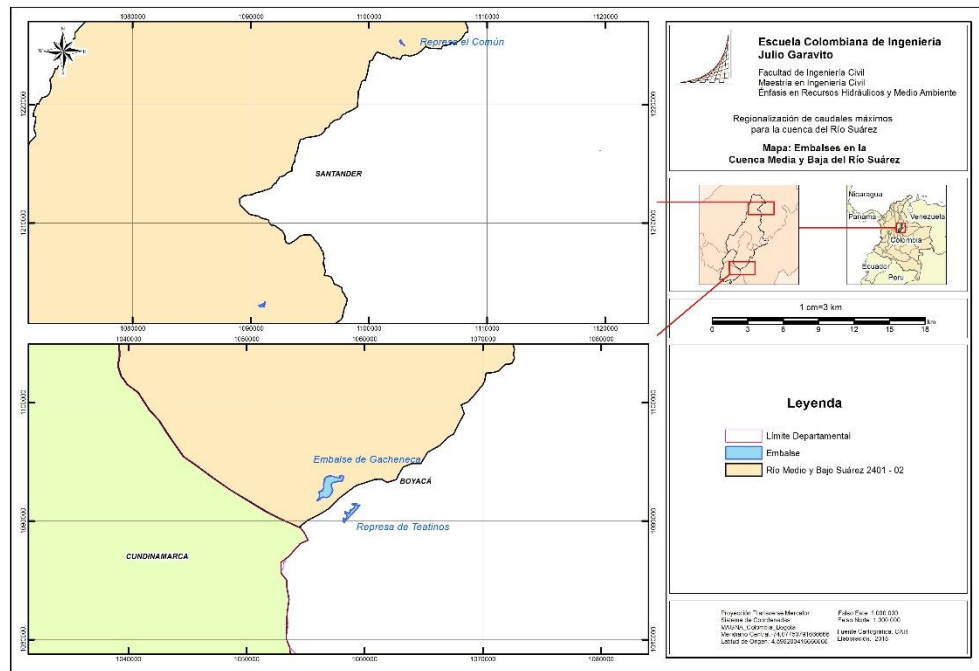


Ilustración 10 – Identificación de embalses cuenca Media y Baja río Suárez
(Corpoboyacá; CAR; CAS, 2018)

La operación de los embalses mencionados anteriormente puede influir en los valores de caudales reportados en la cuenca, ya que por ejemplo la apertura de compuertas y demás actividades propias de la operación pueden generar aumentos súbitos de caudal en periodos cortos de tiempo; por lo tanto, se debe considerar la presencia de estas estructuras hidráulicas dentro del análisis de caudales de la cuenca.

1.4.6. Sistema Hidráulico De Manejo Ambiental y de Control De Inundaciones Fúquene - Cucunubá

Mediante el Acuerdo CAR No 36 de 2014, se modificó la figura de Distrito De Riego Fúquene – Cucunubá, al Sistema hidráulico de manejo ambiental y de control de inundaciones de Fúquene – Cucunubá, este permite la regulación de las aguas de los sistemas hídricos de Fúquene Cucunubá, que equilibradamente distribuidos a través de las corrientes de canales naturales, artificiales y cuerpos lagunares, mitigan el riesgo de inundación en la zona plana, gracias al efecto de amortiguación de crecientes basado en la capacidad de drenaje de la cuenca hidrográfica.

Adicionalmente se obtiene la recuperación del conjunto de lagunas (Fúquene, Palacios y Cucunubá), que, mediante un flujo constante de esas aguas, posibilitan el mantenimiento de la biodiversidad de estos humedales, componentes fundamentales del ecosistema hídrico regional.

El sistema es regulado a partir de la operación conjunta de compuertas principales y secundarias, así como de estaciones de bombeo con el fin de mantener los niveles de los ríos, lagunas y canales o vallados que lo conforman dentro de un rango de cotas que permitan un eficaz control de inundaciones sin deteriorar los ecosistemas acuáticos presentes. El sistema comprende una red de canales de drenaje interconectados a las corrientes naturales y cuerpos lagunares ubicados en las zonas susceptibles de inundación. Para conocer el plano detallado y la relación de las estructuras hidráulicas se puede consultar el sitio web: <http://archivo.car.gov.co/node/3147#contentSec>.

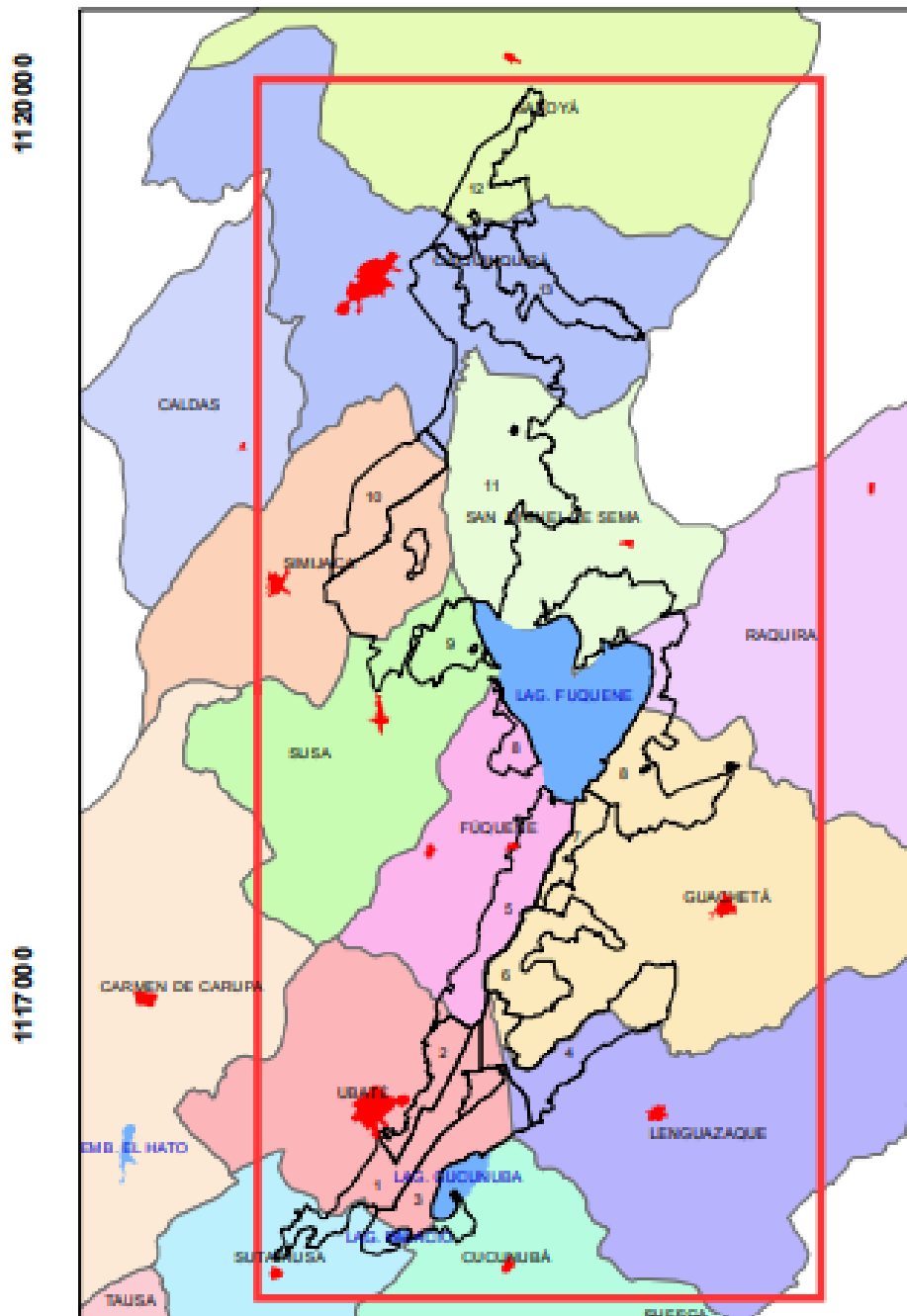


Ilustración 11 – Localización general del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y de Control De Inundaciones Fúquene - Cucunubá.

Fuente: CAR. 2014.

1.5. ESTADO DEL ARTE. REGIONALIZACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS

La regionalización es una herramienta probabilística ampliamente usada en hidrología para establecer la probabilidad de ocurrencia de un evento de cierta magnitud y a través de la cual se buscan crear regiones estadísticamente homogéneas y suplir la carencia de datos hidrológicos en el área de estudio.

A continuación, se presentan algunos estudios desarrollados a nivel nacional e internacional a través de los cuales se realiza análisis de variables hidrológicas y climáticas usando métodos de regionalización y análisis de frecuencia.

A nivel internacional investigadores como (Noto & Loggia, 2007) analizaron los caudales máximos anuales en toda la región de Sicilia en Italia, la cual ha tenido reportes de ocurrencia de graves inundaciones que han generado afectaciones sociales y económicas, para el desarrollo del estudio regional se partió del análisis de 70 estaciones de medición de caudales, estos registros fueron sometidos a evaluaciones de homogeneidad y análisis de datos anómalos o outliers refiriendo que aproximadamente el 8% de los datos totales usados se retiraron del análisis ya que no cumplían con criterios de homogeneidad, a partir de estos procedimientos y los datos depurados se aplicó la metodología de L-Moments.

El parámetro de caudales máximos no es la única variable que puede ser objeto de análisis regional, (Said Arab Khan, 2017) realizó un análisis regional de precipitaciones máximas o extremas basadas en registros mensuales de precipitación en un periodo de tiempo de 17 años en una de las regiones de Pakistan, en esta región las lluvias son fundamentales para mantener niveles de hidroeléctricas y valles donde se desarrollan actividades de agricultura. (Prieto & Doris Vivian Prieto Valdés, 2016) desarrollaron un estudio de aplicación del procedimiento conocido como análisis regional de frecuencias para el estudio de las precipitaciones anuales en la provincia de Camagüey Cuba, región en la cual se han presentado eventos de sequía por reducción extrema de las precipitaciones, se realizó el análisis a partir de 70 estaciones pluviométricas con registros aproximados de 40 años. A partir de la inspección y colección de datos se identificaron regiones homogéneas, cada una descrita con una distribución de probabilidad; a partir del desarrollo de los diagramas L-moments y la curva de crecimiento regional se obtuvo que la distribución Generalizada de valor extremo como aquella más representativa para los datos.

Toledo (Toledo, 2011) Desarrollo cartografía de probabilidades asociadas a sequias en la región de Valparaíso y la región Metropolitana de Santiago de Chile. A partir de la creación de las regiones homogéneas se seleccionó aquella distribución que era más frecuente o se repetía un mayor número de veces en las distintas regiones. Obteniendo como resultados que los valores de probabilidades se ajustan a la distribución espacial de la precipitación, los mapas cartográficos generados pueden ser utilizados en tomas de decisiones de planes de gestión de riesgos ante eventos de variabilidad climática o en la generación de indicadores de sequía.

(Yurekli & Modarres, 2007) Aplicó el método de L-moments para ajustar la distribución regional para la precipitación máxima anual en la región de Tokat (Turquía), como particularidad del estudio se analizó la relación entre la elevación de las estaciones objeto de estudio y los datos de precipitación máxima anual, sin embargo, no se encontró una relación significativa mostrando así que para la región de análisis la precipitación máxima no cambia con la elevación de las estaciones de la región.

A nivel nacional la regionalización de caudales y el método de los L-Moments han sido usados con varias aplicaciones dentro de las que se incluyen:

(Cristina Castillo; Natalia Ortiz, 2015) Esta investigación se desarrolló en la cuenca del río Sinú, en la región norte de Colombia, el principal objetivo consistió en la regionalización de caudales máximos para el desarrollo de obras civiles, como, por ejemplo, acueductos y puentes, las cuales presentan afectaciones debido a fenómenos de caudales máximos, a partir del análisis regional se identificó que la distribución de Gumbel es aquella que se ajusta mejor a las series de datos. (Gutierrez, 2012) desarrolló un análisis de regionalización de caudales, el cual buscaba identificar el valor de caudal en cualquier época del año, esto con el fin de brindar información confiable al gremio de productores de arroz de la región y de esta manera permitir la planeación de fechas de siembra y de cosecha, como principal característica metodológica, a partir de las distribuciones de probabilidad, se usó la metodología de Chi cuadrado χ^2 y de Kolmogorov, esto con el fin de seleccionar la mejor distribución para el modelo de regionalización en cada estación.

(Nuñez, 2015) Aplicó la metodología de regionalización de los L-Moments para la estimación de eventos máximos en Colombia, la problemática de la cual se parte en esta investigación son los pocos registros o series históricas de datos que reporta

el país, dado que en la actualidad se cuenta con una red básica de estaciones de monitoreo de caudales y de variables meteorológicas, el estudio aplicó la metodología a tres variables meteorológicas dentro de las que se encuentran precipitación máxima, temperaturas máximas y caudales máximos, dentro de las limitaciones de la investigación se tiene la corta longitud de registros en regiones como la Amazonía y la Orinoquía. Se destaca que las distribuciones de probabilidad que más se ajustaron al comportamiento de los datos fueron la distribución generalizada Normal y la generalizada Logística las cuales reportaron el mayor número de regiones homogéneas para los tres parámetros de evaluación. Dentro de las consideraciones y recomendaciones el autor sugiere la incorporación de otros parámetros dentro del análisis como la pendiente, la elevación de la cuenca y la longitud, ya que dentro del estudio solo se relacionó el área de la cuenca dentro de las ecuaciones de estimación de los caudales máximos y demás parámetros.


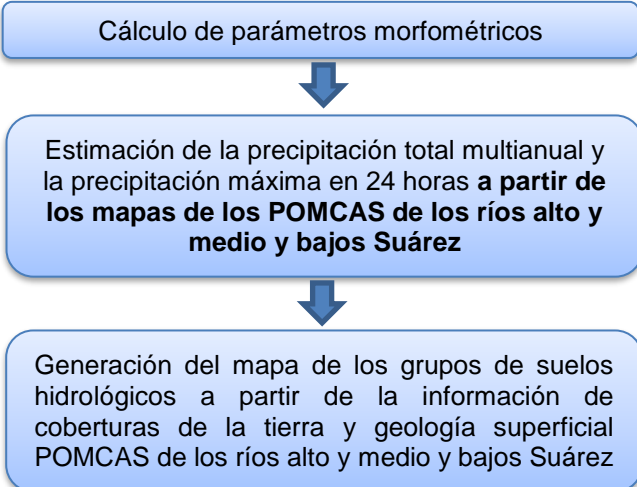

En términos generales varios autores han reportado el análisis de datos hidrológicos y climatológicos con diversos fines y aplicaciones dentro de las que se incluyen el diseño de obras hidráulicas, agricultura y para establecer medidas de contingencia ante eventos que pueden ser precursores de riesgo sobre la población, de igual manera el método de L-Moments como metodología de regionalización ha sido usada por diversos autores encontrando resultados satisfactorios que describen las variables de estudio.

Capítulo II. Metodología

En el presente capítulo se describe el desarrollo metodológico para la obtención de los dos (2) productos del presente estudio a) la estimación de las ecuaciones para el cálculo de la media del caudal máximo y su desviación estándar, b), y la generación de los mapas de rendimientos hídricos para diferentes periodos de retorno.

La metodología considera el desarrollo de 7 etapas. En la Figura 1 se muestra el esquema metodológico usado:

Metodología para la estimación de ecuaciones

Etapas	Actividades	Producto
<p>Etapa 1: Preparación y revisión de los datos</p>	 <p>Recopilación de Información cuenca río Suárez</p> <p>Selección de estaciones con registros de caudales máximos mensuales – absolutos (mínimo 25 años de registros – 1991 al 2015)</p>	<p>Base de datos (Caudales máximos Río Suárez reportados por estación)</p> <p>Resultados de pruebas estadísticas</p>
<p>Etapa 2 Determinación de variables morfométrias y físicas</p>	 <p>Cálculo de parámetros morfométricos</p> <p>Estimación de la precipitación total multianual y la precipitación máxima en 24 horas a partir de los mapas de los POMCAS de los ríos alto y medio y bajos Suárez</p> <p>Generación del mapa de los grupos de suelos hidrológicos a partir de la información de coberturas de la tierra y geología superficial POMCAS de los ríos alto y medio y bajos Suárez</p>	<p>Parámetros morfométricos y físicos.</p>
<p>Etapa 3: Conformación regiones homogéneas</p>	 <p>Conformación de regiones homogéneas</p>	<p>Regiones Homogéneas</p>

Etapas	Actividades	Producto
Etapa 4: Regionalización de caudales máximos	Determinación de ecuaciones de regionalización de caudales máximos mediante el método de regresión	Ecuaciones para el cálculo de la media del caudal máximo y la desviación estándar.

Metodología para la generación de mapas rendimientos hídricos

Etapas	Actividades	Producto
Etapa 5: Determinación de parámetros de distribución y cálculo de cuantiles	<p>Estimación de parámetros mediante el método de los L – Momentos con la utilización del software L - RAP</p> <p>Estimación de cuantiles asociados a los periodos de retorno (2.33, 5, 10 ,50 y 10 años) mediante diferentes distribuciones de probabilidad</p>	Estimación de Cuantiles
Etapa 6: Selección de distribución de frecuencias	Selección de la distribución de los caudales máximos mensuales (absolutos) mediante la aplicación de la medida de bondad de ajuste Z^{DIST} y el diagrama de relación de los L-momento-	Distribuciones de probabilidad que se ajustan a las regiones homogéneas
Etapa 7 : Elaboración de mapas de rendimientos hídricos	Generación de los ráster con los rendimientos hídricos de los caudales máximos para diferentes periodos de retorno (2.33, 5, 10 ,50 y 10 años)	Mapas rendimientos hídricos

Figura 1. Esquema Metodológico

A partir de lo mostrado anteriormente a continuación se describe detalladamente cada una de las fases mencionadas:

Metodología para la estimación de ecuaciones

En las etapas 1 al 4, se presenta la metodología para la estimación de las ecuaciones para el cálculo de la media del caudal máximo y la desviación estándar, con las cuales se puede estimar el caudal máximo en cualquier sitio de interés dentro de la cuenca.

2.1. Etapa 1 - Preparación y control de calidad de los datos de Caudales Máximos para la cuenca del río Suárez.

2.1.1. Recopilación de la información

Dentro de la información utilizada, se tiene como punto de partida los resultados de los POMCA de los ríos Alto (aprobado - Resolución conjunta 1712 del 25 de junio de 2018) y Medio y Bajo Suárez (aprobado - Resolución conjunta 2110 del 08 de junio de 2018), la cartografía básica oficial a escala 1:25.000, junto con el modelo digital de terreno de la cuenca del río Suárez.

En relación a la información hidrológica se utilizaron los registros mensuales multianuales de caudal máximo (absoluto) de las estaciones hidrológicas de propiedad del IDEAM y la CAR localizadas en la cuenca del río Suárez con registros de mínimo 25 años con un periodo de registro de 1991 a 2015.

Posteriormente con la información de las estaciones hidrológicas se realizó el análisis de la calidad de la información de acuerdo con las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial, (Guía de prácticas hidrológicas No. 168. OMM, 2008). En tal sentido se verificó la disponibilidad de información a nivel de cuenca.

2.1.2. Tratamiento de datos

En esta etapa se procedió a preparar y analizar los datos disponibles de caudales máximos para la cuenca del río Suárez, es de considerar que la disponibilidad de datos confiables es un requisito para cualquier análisis hidrológico y aún más dentro del estudio se involucra el cálculo y análisis de probabilidad de ocurrencia del

evento, por lo tanto, asegurar la suficiente cantidad y calidad de datos garantiza la calidad del estudio y que los resultados se ajusten a la realidad.

Se realizó un análisis exploratorio de los datos mediante el cálculo de indicadores estadísticos descriptivos, obteniendo indicadores de dispersión, gráficas de caja (*box plots*) e histogramas de frecuencia. Estos valores se utilizaron con el fin de identificar el comportamiento y tendencias de los datos.

2.2. Etapa 2 - Determinación de variables morfométricas y físicas

El análisis morfométrico de la cuenca consistió en primera instancia en un proceso de delimitación de áreas de drenaje de las 30 estaciones seleccionadas.

En segundo lugar, se realizó el cálculo de diferentes parámetros o atributos de la cuenca, para esto se utilizó el software de procesamiento de información geográfica *ArcGis 10.4*. Los parámetros morfométricos calculados para cada una de las subcuencas identificadas fueron:

- Área
- Ancho de la cuenca
- Longitud axial
- Longitud de la totalidad de las corrientes
- Longitud del valle
- Perímetro
- Pendiente media
- Coeficiente de compacidad (K_c)
- Coeficiente de Forma (K_f)
- Índice de Alargamiento (I_a)
- Densidad de Drenaje (D_d)
- Sinuosidad

2.2.1. Estimación de variables climatológicas y físicas

Para cada una de las áreas de drenaje de las estaciones hidrológicas con la información temática producto de los POMCAs de los ríos Alto y Medio y Bajo Suárez, se determinó la precipitación mensual multianual – PPT y la precipitación

máxima en 24 horas - Pmax24, entendiendo que estas variables influyen directamente en los caudales máximos reportados en la cuenca.

Este ejercicio consistió en la unificación u homologación de los rangos de los mapas de PPT y Pmax24 de los POMCAS de los ríos Alto Suárez (código IDEAM - 2401-01) y río Medio y bajo Suárez (código IDEAM - 2401-01), a partir de las cuales se estimó el valor de cada variable para cada una de las áreas de drenaje

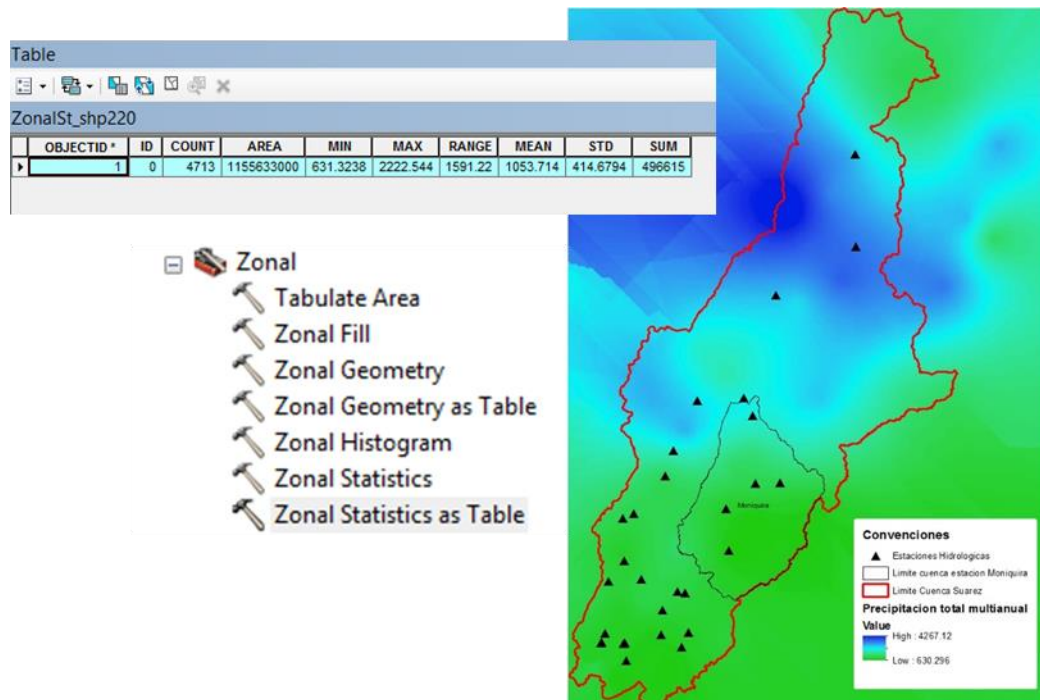


Figura 2. Extracción de datos del raster de precipitación total para el área de drenaje de la estación Moniquirá

Fuente: Autor

Así mismo se generó el mapa de grupos hidrológicos de suelo, en adelante Número de Curva CN de acuerdo a la metodología establecida por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos US SCS, a partir del cruce de la información espacial de coberturas de la tierra y unidades geológicas contenida en los POMCAS, los cuales se encuentran a una escala temática de 1:25000.

2.3. Etapa 3: Conformación de regiones homogéneas

Esta etapa consiste en la asignación de las diferentes estaciones a distintas regiones, es decir, la división de un conjunto de estaciones en distintas regiones. El procedimiento asume que los sitios, dentro de una denominada “región homogénea”, presentan una distribución de frecuencias idéntica, excepto por un factor de escala específico para el sitio, representado por la media del sitio de la variable analizada (Norbiato et al, 2007; Hosking y Wallis, 1996).

Algunos de los métodos más utilizados para formular a priori regiones homogéneas son el análisis clúster, métodos multivariados, métodos basados en atributos geográficos y climáticos del área de estudio, región de influencia, lógica difusa, mapas autoorganizados e índice de estacionariedad (Gaál et al, 2007; Gaál y Kysely, 2009; Fowler y Kilsby, 2003; Chavochi y Soleiman, 2009; Burn y Goel, 2000; Kohnova et al, 2009; Lin y Chen, 2004).

Para el proyecto actual se seleccionó el método geográfico, en el cual las regiones son formadas por un conjunto de estaciones contiguas. Generalmente la formación de regiones se basa en áreas administrativas (Natural Research Council, 1975) o características físicas del área de estudio (Matalas et al., 1975). Aunque existe la posibilidad de modificar los límites de las regiones en consideración al modelo que se ajuste. (Hosking & Wallis, 1997).

En tal caso, se establecieron 2 propuestas de regiones, teniendo como criterio la localización, agrupando las estaciones por subzonas hidrográficas, y por rangos de áreas, toda vez la variación significativa de estas, influye directamente en los valores de escurrimiento superficial.

2.4. Etapa 4: Regionalización de caudales máximos mediante el método de regresión

El objetivo de esta etapa es generar para las regiones homogéneas conformadas ecuaciones para el cálculo del promedio del caudal máximo (\bar{Q}_{Max}) y la desviación estándar ($\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$) que incluyen variables físicas y morfométricos, las cuales en cierto grado se pueden relacionar con el régimen hidrológico de caudales máximos.

Entre las variables morfométricos usadas se encuentran: el área, la pendiente media, los coeficientes de forma y compacidad, el índice de alargamiento, la sinuosidad y la densidad de drenaje, y entre las variables climatológicos se encuentran la precipitación total multianual, la precipitación máxima en 24 horas y el número de curva.

La estimación de los parámetros de las ecuaciones se realizó mediante un proceso de regresión múltiple por mínimos cuadrados con el uso del software XLSTAT statistical and data analysis solution relacionado el promedio del caudal máximo promedio (\bar{Q}_{Max}) y la desviación estándar ($\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$) (variables principales o dependientes) con los parámetros físicos y morfométricos (variables explicativas o independientes).

Se realizaron diferentes iteraciones buscando cumplir con diferentes criterios estadísticos. En primer lugar, que el coeficiente de determinación R^2 se acerque a 1, así mismo que el parámetro T Student (Los parámetros t_{1j} de Student permiten probar si los coeficientes de regresión a_{1j} son significativamente diferentes de cero) para la totalidad de las variables dependientes utilizadas alcance un valor superior al nivel de confianza del 95 %.

Una vez que se identificó que una o varias regresiones alcanzaron un R^2 significativo y que se cumplió el Test de Student, se seleccionó aquella que el error cuadrático medio (MEC) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) obtuviera el valor más cercano a cero (0), con lo cual se puede determinar la menor variación entre los datos observados y los calculados.

Por último se a partir de la regresión seleccionada para cada una de las regiones se extraen los coeficientes de regresión para cada una de las variables utilizada (dependientes e independientes) y se conforma las ecuaciones para el cálculo del promedio del caudal máximo (\bar{Q}_{Max}) y la desviación estándar ($\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$), las cuales servirán para el cálculo del caudal máximo para diferente periodos de retorno en cualquier sitio de interés dentro de la cuenca del río Suárez.

Metodología para la generación de mapas rendimientos hídricos

En las etapas 5 al 7, se presenta la metodología para la generación de los mapas de rendimientos hídricos.

2.5. Etapa 5: Determinación de cuantiles

Para determinar los caudales máximos para 2.33, 5, 10, 50 y 100 años se realizó un análisis de frecuencia a partir de los registros de caudales máximos mensuales multianuales (absolutos), ajustando a las distribuciones: Generalizada Logística (GLO), Generalizada de Pareto (GPA), Generalizada del Valor Extremo (GEV), Generalizada Normal (GNO) y Pearson Tipo III (PE3).

Para la determinación de los parámetros de cada distribución se utilizó el método de los L Momentos. Lo anterior se llevó a cabo mediante la utilización software L – RAP.

2.5.1 Cálculo de los L-Moments de las estaciones

El procedimiento para la estimación de los L-Moments es el siguiente:

1. Se ordenan las series (i) de cada estación, i , en forma ascendente.
2. Se calculan los estimadores lr , aplicando las siguientes ecuaciones:

$$l_1 = \binom{N}{1}^{-1} \sum_{i=1}^N X_{(i)}$$

$$l_2 = \frac{1}{2} \binom{N}{2}^{-1} \sum_{i=1}^N \left\{ \binom{i-1}{1} - \binom{N-i}{1} \right\} X_{(i)}$$

$$l_3 = \frac{1}{3} \binom{N}{3}^{-1} \sum_{i=1}^N \left\{ \binom{i-1}{2} - 2 \binom{i-1}{1} \binom{N-i}{1} + \binom{N-i}{2} \right\} X_{(i)}$$

$$l_4 = \frac{1}{4} \binom{N}{4}^{-1} \sum_{i=1}^N \left\{ \binom{i-1}{3} - 3 \binom{i-1}{2} \binom{N-i}{1} + 3 \binom{i-1}{1} \binom{N-i}{2} - \binom{N-i}{3} \right\} X_{(i)}$$

Donde:

l : PWM (Momentos ponderados por probabilidad) de orden r .

N : Número total de observaciones.

X : Elemento i -ésimo de la serie.

3. Se obtienen los L-Moments: El primer L-Moments es igual al promedio, y es una medida de localización. El segundo L-Moments es el llamado Coeficiente de Variación. Dividiendo los LMoments de mayor orden por el Coeficiente de variación se obtiene las siguientes razones, para: l_1 , τ , τ_3 y τ_4 .

l_1 ,	Promedio de la serie de datos
$\tau = \frac{l_2}{l_1}$	Coeficiente de variación L-CV:
$\tau_3 = \frac{l_3}{l_2}$	Coeficiente de Asimetría L-SK:
$\tau_4 = \frac{l_4}{l_2}$	Coeficiente de Curtosis L-CK:

A modo de ejemplo, se realiza la estimación de los L-Momentos para la estación Garavito (código 2401713), la cual se localiza en el río Suárez a una elevación 2553 m.s.n.m, con los siguientes datos de caudal máximo mensual:

Año	Q Max M ³	Año	Q Max M ³	Año	Q Max M ³
1991	10.924	2000	50.464	2008	69.03
1992	13.749	2001	54.268	2009	70.93
1993	18.815	2002	54.268	2010	72.097
1994	32.317	2003	54.849	2011	72.721
1995	34.563	2004	57.496	2012	81.588
1996	37.21	2005	61.776	2013	95.338
1997	45.055	2006	65.344	2014	102.826
1998	45.09	2007	66.256	2015	110.075
1999	49.914				

A continuación, se realiza el procedimiento anteriormente explicado:

1. Se ordenan las series (i) de cada estación, i , en forma ascendente.
2. Se calculan los estimadores lr , aplicando las siguientes ecuaciones:

i	Serie	A	B	C
1	10.924	-262.176	3015.024	-22110.176
2	13.749	-302.478	2846.043	-13913.988
3	18.815	-376.3	2709.36	-4139.3
4	32.317	-581.706	2811.579	12021.924
5	34.563	-553.008	1244.268	27097.392
6	37.21	-520.94	-334.89	38549.56
7	45.055	-540.66	-2162.64	51723.14
8	45.09	-450.9	-3652.29	51402.6
9	49.914	-399.312	-5390.712	51511.248
10	50.464	-302.784	-6509.856	42591.616
11	54.268	-217.072	-7814.592	32343.728
12	54.268	-108.536	-8303.004	16714.544
13	54.849	0	-8556.444	0
14	57.496	114.992	-8796.888	-17708.768
15	61.776	247.104	-8895.744	-36818.496
16	65.344	392.064	-8429.376	-55150.336

i	Serie	A	B	C
17	66.256	530.048	-7155.648	-68376.192
18	69.03	690.3	-5591.43	-78694.2
19	70.93	851.16	-3404.64	-81427.64
20	72.097	1009.358	-648.873	-74692.492
21	72.721	1163.536	2617.956	-57013.264
22	81.588	1468.584	7098.156	-30350.736
23	95.338	1906.76	13728.672	20974.36
24	102.826	2262.172	21284.982	104059.912
25	110.075	2641.8	30380.7	222791.8

Las estimaciones de lr serían las siguientes:

$$l_2 = \frac{1}{2} \binom{N}{2}^{-1} \cdot \sum \text{Columna A}$$

$$l_3 = \frac{1}{3} \binom{N}{3}^{-1} \cdot \sum \text{Columna B}$$

$$l_4 = \frac{1}{4} \binom{N}{4}^{-1} \cdot \sum \text{Columna C}$$

l_1	l_2	l_3	l_4
57.079	14.4367	0.3029	2.5966

3. Se obtienen los L-Moments: El primer L-Moments es igual al promedio, y es una medida de localización. El segundo L-Moments es llamado Coeficiente de variación. Dividiendo los LMoments de mayor orden por la L- Coeficiente de variación se obtiene las siguientes razones, para: l_1 , τ , τ_3 y τ_4 .

Primer L-Moment	L-Cv	L-Cs	L-Ck
57.079	0.2529	0.0210	0.1799

2.6. Etapa 6: Selección de distribución de frecuencias

Con el fin de seleccionar la distribución de frecuencias que más se ajusta regionalmente a los registros de caudal máximo mensual multianual (absolutos), se utilizó la medida de bondad de ajuste planteada por Hosking y Wallis (1996) denominada el valor Z^{DIST} la cual se basa en la dispersión de τ_3 y τ_4 de los L-momentos regionales. (L-SK y L-CK).

La bondad de ajuste basada en el Z^{DIST} determina si la medida de L-SK y L-CK simulados de una determinada región homogénea se ajustan adecuadamente a L-SK y L-CK de los datos observados. Es así como según lo planteado por Hosking & Wallis (1997), la expresión del estadígrafo Z es la siguiente:

$$Z^{DIST} = \frac{(\tau_4^{DIST} - \bar{t}_4 + B_4)}{\sigma_4}$$
$$\sigma_4 = \left[(N_{sim} - 1)^{-1} \left\{ \sum_{m=1}^{N_{sim}} (t_4^{(m)} - t_4^R)^2 - N_{sim} B_4^2 \right\} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$B_4 = N_{sim}^{-1} \sum_{m=1}^{N_{sim}} (t_4^{(m)} - t_4^R)$$

En donde:

σ_4 , Desviación estándar de L-curtosis regional

B_4 , L-Curtosis regional

τ_4^{DIST} , L-Curtosis de la distribución

\bar{t}_4 , L-Curtosis regional

Las expresiones relacionadas con las distribuciones se obtienen de acuerdo a la simulación para cada una de las cinco distribuciones que se van a utilizar. Según lo planteado por Hosking y Wallis (1997), se considera que el ajuste de una distribución es aceptable o adecuado si el valor del estadígrafo Z es cercano a cero.

En este contexto, un valor razonable es el asociado al grado de significancia del 95%, es decir, $|Z_{DIST}| \leq 1,64$. La estimación de los cuantiles se realiza una vez escogida una función de distribución, aplicando la prueba de bondad de mejor ajuste. Se procede a la estimación de los cuantiles asociados a un cierto período de retorno, para cada una de las estaciones.

Para la estimación de la prueba Z^{DIST} se utilizó el software L-RAP, el cual incluye los códigos Fortran presentados por Hosking (2005), el cual, una vez ejecutado, presenta de manera automática la o las distribuciones de mejor ajuste a las series de datos de las estaciones utilizadas.

2.7. Etapa 7: Generación de los mapas

A partir de los caudales estimados para los diferentes períodos de retorno de acuerdo a la distribución que se ajustó a los registros de caudal máximo mensual multianual, se determinaron los rendimientos hídricos máximos para cada una de las áreas de drenaje de las estaciones hidrológicas, mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento hídrico} = \frac{Q_{Max T} \frac{m^3}{s} * A \text{ Km}^2}{1000} = l/\text{Km}^2/s$$

Donde:

$Q_{Max T}$: Caudal máximo para el período de retorno m^3/s

A: Área de drenaje de la cuenca Km^2

Posteriormente con los valores de rendimientos hídricos estimados para cada período de retorno, se realiza la interpolación por el método de Distancia Inversa

Ponderada (Inverse Distance Weighted - IDW ¹), con el uso del software ArcGis 10.4, con el cual se obtienen la distribución espacial del rendimiento hídrico en formato Raster.

¹ La interpolación mediante distancia inversa ponderada determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. La ponderación es una función de la distancia inversa. La superficie que se interpola debe ser la de una variable dependiente de la ubicación. Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra.

Capítulo III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan los resultados y análisis de la aplicación del esquema metodológico propuesto para la obtención de las ecuaciones de regionalización (etapas 1 al 4) y mapas de rendimientos hídricos (etapa 5 al 7).

Estimación de ecuaciones de regionalización

3.1. Etapa 1: Preparación y revisión de los datos

3.1.1. Recopilación de la información

Se identificaron 66 estaciones hidrológicas en la cuenca del río Suárez con registros de caudales máximos (absolutos), de las cuales 30 son operadas por el IDEAM y 36 de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR, de las cuales se seleccionaron 30 estaciones las cuales se encuentran activas y presenta un porcentaje de completitud del 70% en el periodo comprendido del año 1991 al 2015. En el **Anexo 1. Información hidrológica IDEAM – CAR**, se presentan los datos crudos de caudal máximo mensual absoluto para las estaciones localizadas dentro de la cuenca del río Suárez.

En la Tabla 10 se muestran las estaciones hidrológicas seleccionadas, donde se detallan el número de datos faltantes, porcentaje de completitud, y el caudal máximo mensual multianual (absoluto).

Tabla 10. Estaciones hidrológicas seleccionadas

Código	Estación	Total Datos	N° Datos Faltantes	% Datos Faltantes	% Completitud
24017150	La Boyera	23	2	8.7%	91.3%
24017610	Boquerón	24	1	4.2%	95.8%
24017590	Pte Nacional	24	1	4.2%	95.8%
24017580	Justo Pastor Gómez	20	5	25.0%	75.0%
24017570	San Benito	23	2	8.7%	91.3%
24017600	Moniquirá	24	1	4.2%	95.8%
24017640	Ceiba La	22	3	13.6%	86.4%
24017740	Pte Chacón	24	1	4.2%	95.8%
24017830	Sutamarchán	21	4	19.0%	81.0%
24017820	Bocatoma	23	2	8.7%	91.3%

Código	Estación	Total Datos	N° Datos Faltantes	% Datos Faltantes	% Completitud
24017900	Bocatoma Arriba	22	3	13.6%	86.4%
2401713	Garavito	25	0	0.0%	100.0%
2401714	Tapias	25	0	0.0%	100.0%
2401715	La Boyera – CAR	25	0	0.0%	100.0%
2401716	El Pino	25	0	0.0%	100.0%
2401722	San Agustín	25	0	0.0%	100.0%
2401723	El Boquerón	25	0	0.0%	100.0%
2401729	Puente Colorado	23	2	8.7%	91.3%
2401730	Puente Guzmán	24	1	4.2%	95.8%
2401733	Puente La Balsa	25	0	0.0%	100.0%
2401738	Puente Peralonso	25	0	0.0%	100.0%
2401745	Puente Pinilla	25	0	0.0%	100.0%
2401749	Puente Merchán	22	3	13.6%	86.4%
2401751	Nariño	25	0	0.0%	100.0%
2401755	La Malilla	25	0	0.0%	100.0%
2401780	Corralejas	22	3	13.6%	86.4%
2401793	Fúquene - Ticha Maria	19	6	31.6%	68.4%
2401794	Monasterio	19	6	31.6%	68.4%
2401795	Ticha Muñoz	19	6	31.6%	68.4%
2401798	El Hato	24	1	4.2%	95.8%

Fuente: Autor a partir de información del IDEAM y CAR.

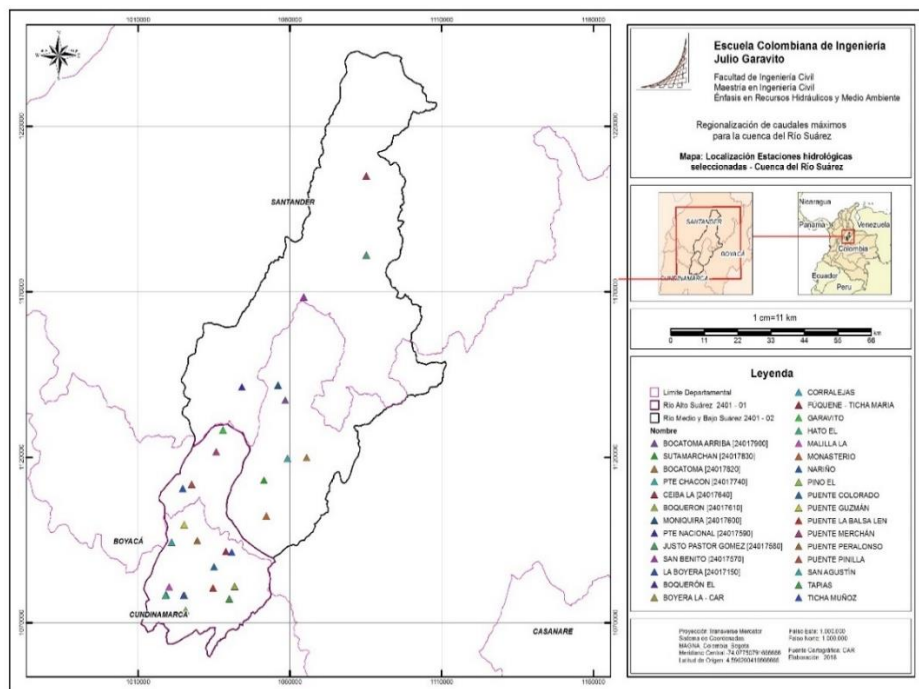


Ilustración 12 – Estaciones hidrológicas seleccionadas

Fuente: Autor a partir de información suministrada por la CAR y el IDEAM

3.1.2. Tratamiento de datos

3.1.2.1. Análisis exploratorio

Una vez seleccionadas las estaciones hidrológicas se realizó un análisis exploratorio de los datos anuales de caudales máximos absolutos, este incluyó el cálculo de los estadísticos descriptivos más importantes los cuales sirven de herramienta para identificar el comportamiento y correlación de los datos (Tabla 11).

En el **Anexo 2. Pruebas de análisis Exploratorio de Datos** se muestra el detalle del análisis exploratorio para todas las estaciones seleccionadas:

Tabla 11. Estadísticos descriptivos en relación caudal máximo mensual multianual (absoluto)

Estadístico	Estación	Mínimo	Máximo	1° Cuartil	Mediana	3° Cuartil	Media	Varianza	Desviación	CV
24017820	Bocatoma	0.25	0.97	0.31	0.37	0.46	0.42	0.03	0.18	0.43
24017900	Bocatoma Arriba	0.78	9.25	1.73	2.12	2.64	2.66	3.26	1.81	0.68
2401798	El Hato	0.24	10.83	2.64	5.03	6.62	4.89	7.73	2.78	0.57
2401722	San Agustín	0.59	13.50	2.96	4.85	5.73	4.88	10.07	3.17	0.65
2401795	Fúquene - Ticha Maria	0.08	17.06	0.36	0.47	4.60	3.61	26.94	5.19	1.44
2401793	Ticha Muñoz	1.04	17.11	5.40	7.94	13.54	9.28	21.00	4.58	0.49
2401729	Puente Colorado	1.34	23.48	21.87	23.29	23.48	20.30	42.21	6.50	0.32
2401714	Tapias	1.44	23.77	3.52	4.12	5.21	6.38	35.43	5.95	0.93
2401716	El Pino	0.14	24.23	3.75	9.84	16.40	9.99	51.94	7.21	0.72
2401738	Puente Peralonso	0.93	25.73	4.20	4.39	9.38	7.90	52.69	7.26	0.92
2401730	Puente Guzmán	0.95	31.46	2.83	4.61	6.16	7.10	58.69	7.66	1.08
24017150	La Boyera	1.56	32.34	3.55	5.80	15.90	9.64	70.30	8.38	0.87
2401733	Puente La Balsa	2.14	36.83	9.66	15.53	18.32	15.29	72.57	8.52	0.56
2401715	La Boyera – CAR	0.59	37.96	5.00	8.52	16.67	11.77	88.89	9.43	0.80
2401745	Puente Pinilla	0.26	40.73	3.65	5.02	7.71	7.91	86.41	9.30	1.18
24017740	Pte Chacón	13.36	44.26	22.03	26.55	34.95	28.30	74.40	8.63	0.30
2401780	Corralejas	0.16	48.52	0.48	0.79	1.39	3.17	103.18	10.16	3.21
2401755	La Malilla	0.11	48.75	3.06	4.89	11.43	8.76	120.96	11.00	1.26
2401723	El Boquerón	3.79	70.56	10.48	22.81	31.66	26.17	384.60	19.61	0.75
2401751	Nariño	0.06	72.31	2.56	3.29	8.50	10.19	281.85	16.79	1.65
24017610	Boquerón	10.90	77.53	23.78	36.84	49.55	36.45	278.99	16.70	0.46
2401749	Puente Merchán	2.51	94.85	19.17	32.14	39.43	33.19	551.32	23.48	0.71
2401713	Garavito	10.92	110.08	45.06	54.85	70.93	57.08	639.02	25.28	0.44
24017830	Sutamarchán	13.76	110.10	22.08	37.75	73.10	46.21	806.31	28.40	0.61
2401794	Monasterio	0.53	135.16	2.79	3.48	11.02	25.43	1765.46	42.02	1.65
24017580	Justo Pastor Gómez	107.40	262.80	137.08	149.85	170.75	160.69	1729.97	41.59	0.26
24017600	Moniquirá	33.50	301.60	114.45	152.50	178.38	153.96	3794.80	61.60	0.40
24017590	Pte Nacional	209.00	567.80	250.25	303.55	379.83	326.80	10503.55	102.49	0.31
24017640	Ceiba La	775.90	1795.00	880.20	1262.50	1592.00	1275.57	127808.29	357.50	0.28
24017570	San Benito	761.70	1816.00	1046.50	1414.00	1628.00	1341.80	123936.42	352.05	0.26

Fuente: Autor

Así mismo utilizando el software L-RAP se generaron graficas descriptivas de probabilidad, diagrama L-momento-ratio, serie de tiempo e histogramas que permite una primera aproximación las características de los datos. En **Anexo 2. Pruebas de análisis Exploratorio de Datos / 04_Graficas_Descriptivas_L-RAP** se presentan las gráficas descriptivas para cada una de las estaciones objeto de análisis, en la Figura 3 se muestra el conjunto de gráficas para la estación Garavito - Código CAR 2401713.

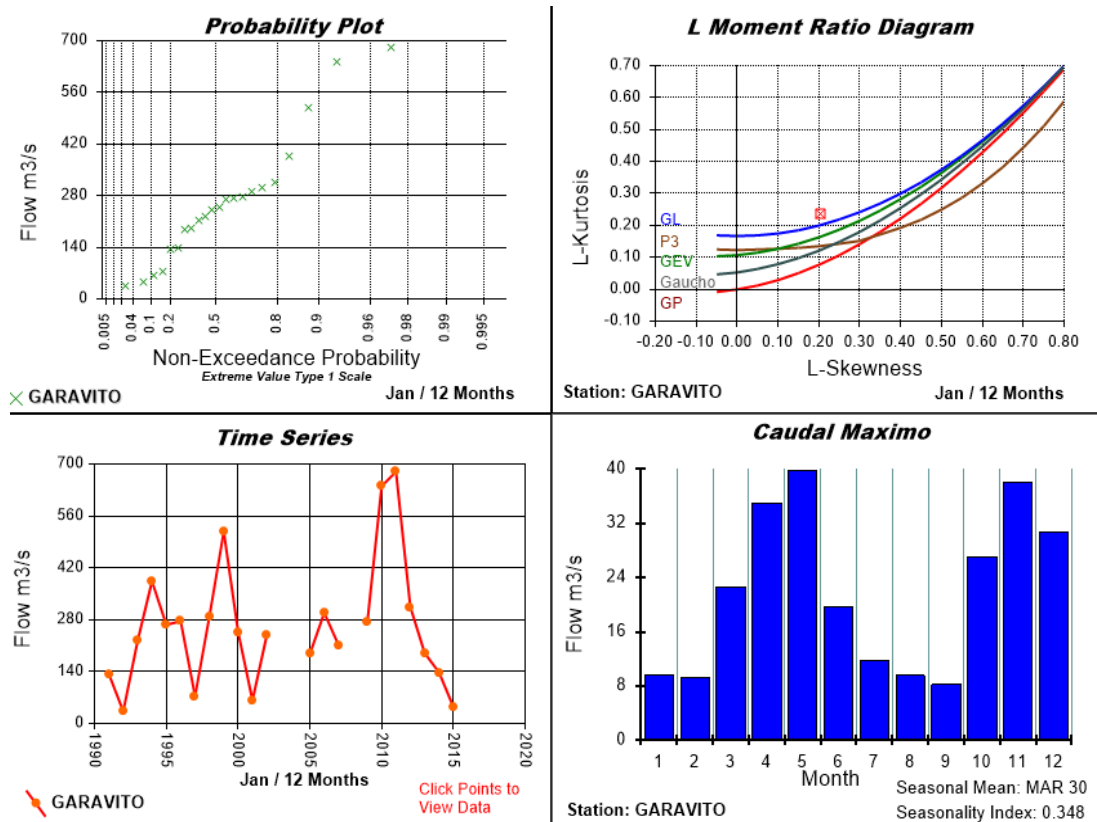


Figura 3 – Gráficas descriptivas estación Garavito Cod. 2401713. Se incluyen gráficas de probabilidad, diagrama L-momento-ratio, serie de tiempo e histogramas.
Fuente: Autor mediante la utilización del software L- RAP

De acuerdo a los gráficos descriptivos presentados en la gráfica anterior, se evidencia que el caudal máximo mensual absoluto para la estación Garavito, se relaciona directamente con el régimen bimodal de las precipitaciones, con picos en los meses de mayo y noviembre. Así mismo de evidencia el caudal máximo ha variado significativamente durante el periodo de análisis, con un valor máximo en el año 2011.

➤ **Gráficas de caja y bigotes (boxplots):**

En el **Anexo 2. Pruebas de análisis Exploratorio de Datos / 03_Gráficas de caja y bigotes_Minitab** se presentan las gráficas Box Plot para cada una de las estaciones, en la Figura 4 se muestra la gráfica de Box Plot aplicado para la estación Garavito.

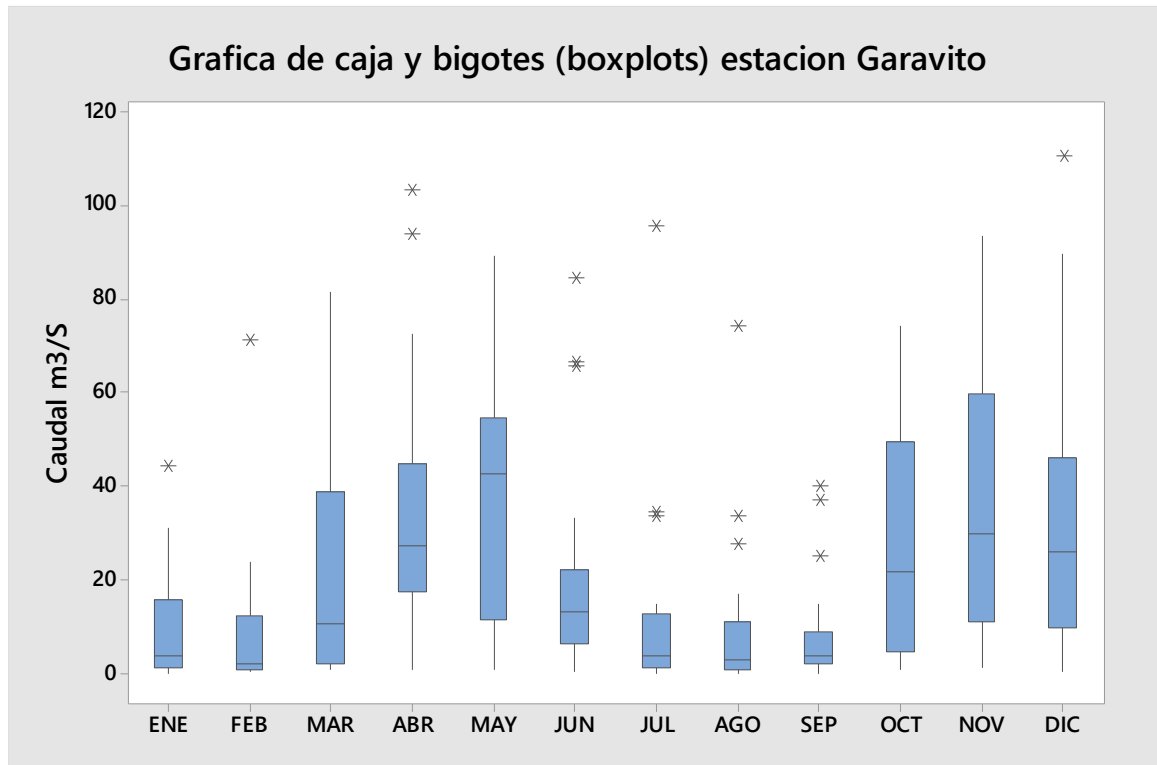


Figura 4 – Gráfica de caja Estación Garavito Cod. 2401713

Fuente: Autor

En la figura anterior se aprecia que el caudal máximo aumenta en magnitud y también en variabilidad en los periodos invernales, entre marzo a mayo y de octubre a diciembre. En estos meses, se presentan valores que podrían considerarse como atípicos, sin embargo, la presencia de ese tipo de datos es común a todas las estaciones analizadas, lo que demuestra que no son producto de un error en la recolección o registro de los datos, sino que tienen una relación con el efecto causado por la ocurrencia del fenómeno de la Niña.

3.2. Etapa 2: Determinación de variables morfométricas y físicas

A continuación, se presentan los resultados del proceso de análisis y determinación de variables morfométricas calculadas para cada una de las áreas de influencia de las estaciones seleccionadas. Para el cálculo de los anteriores valores se usó el software de procesamiento de información espacial ArcGIS 10.4.

Tabla 12. Parámetros morfométricos cuencas estaciones seleccionadas

Código	Área Km ²	Perímetro Km	Pendiente %	Ancho Km	L. Axial Km	L. Valle Km	Kf Coeficiente de forma	Kc Coeficiente de Compacidad	la Índice de alargamiento	S Sinuosidad	Dd Densidad de drenaje.
2401713	1,753.30	254	19.8	39	89	79	0.2	1.7	2.3	0.9	3.8
2401714	170.1	96	18.5	10	30	25	0.2	2.1	3	0.8	3.3
2401715	175.4	24	26.4	5	11	10	1.5	0.5	2.4	0.9	0.6
2401716	76	41	27.7	9	15	13	0.3	1.3	1.6	0.9	3.3
2401722	58.9	36.6	26.1	5.8	13.4	12.2	0.3	1.3	2.3	0.9	3.5
2401723	227.7	92	20.5	11	35	29	0.2	1.7	3.3	0.8	3.5
2401729	785.8	173	22.2	41	55	45	0.3	1.7	1.3	0.8	3.6
2401730	106.2	51	26.3	7	22	19	0.2	1.4	3	0.9	3.2
2401733	225.6	97	23.8	15	30	28	0.2	1.8	2	0.9	3.2
2401738	46.4	32	26.1	4	14	13	0.2	1.3	3.4	0.9	3.8
2401745	94.2	51	19.8	9	25	19	0.1	1.5	2.9	0.8	2.4
2401749	1,640.20	244	19.9	39	81	69	0.3	1.7	2.1	0.9	3.7
2401751	78.2	46	19.9	8	20	15	0.2	1.4	2.4	0.8	2.3
2401755	33.6	29	29.3	4	13	11	0.2	1.4	3.1	0.9	4.4
2401780	17.8	24	32.6	4	11	9	0.1	1.6	3.2	0.8	3.2
2401793	13.3	14	22	4	6	6	0.3	1.1	1.6	1	4
2401794	97.9	45	19.1	14	17	16	0.3	1.3	1.3	0.9	6
2401795	49.2	48	20.8	4	19	17	0.1	1.9	4.6	0.9	5.2
2401798	53.3	40	30.2	4	19	14	0.2	1.5	5	0.8	3.9
24017150	175.4	24	26.4	5	11	10	1.5	0.5	2.4	0.9	0.6
24017570	5,375.50	464	23.9	60	145	127	0.3	1.8	2.4	0.9	3.8
24017580	317	118	17.6	21	49	41	0.1	1.9	2.4	0.8	2.4
24017590	2,291.20	338	19.5	38	103	87	0.2	2	2.7	0.8	4
24017600	1,154.20	166	25.7	30	97	63	0.1	1.4	3.2	0.6	5
24017610	227.7	92	20.5	11	35	28	0.2	1.7	3.3	0.8	3.5
24017640	6,985.60	552.5	27.1	5.8	13.4	12.2	38.8	1.9	2.3	0.9	0.03
24017740	190.5	70	30.5	11	28	24	0.2	1.4	2.6	0.9	2.3
24017820	79.1	45	40.9	12	17	15	0.3	1.4	1.5	0.9	2.2
24017830	328.3	91	16.7	16	43	32	0.2	1.4	2.7	0.8	7.3
24017900	11.3	20	15.6	2	10	9	0.1	1.6	5.7	0.9	2.5

Fuente: Autor

En la Tabla 13 se relacionan los parámetros climáticos precipitación total y precipitación máxima para cada una de las áreas de influencia de las estaciones seleccionadas, de igual manera, se muestra los resultados del cálculo de Número de Curva CN.

Tabla 13. Parámetros climatológicos y físicos morfométricos cuencas estaciones seleccionadas

Código	Número de Curva CN	Precipitación total mm/año	Precipitación máxima mm/día
2401713	63.2	944.7	76.4
2401714	63.4	766.3	79.0
2401715	64.5	838.9	78.6
2401716	68.7	741.0	93.3
2401722	66.8	939.9	67.4
2401723	63.9	783.8	75.4
2401729	65.0	778.6	77.7
2401730	67.9	924.7	67.6
2401733	69.6	709.3	88.2
2401738	59.4	928.0	67.3
2401745	56.9	1,048.1	79.4
2401749	64.0	906.4	75.4
2401751	55.4	1,029.3	79.1
2401755	71.9	885.0	77.2
2401780	71.7	815.3	81.0
2401793	61.5	913.0	65.5
2401794	67.9	737.3	65.5
2401795	58.1	892.8	65.5
2401798	68.9	898.4	85.7
24017150	64.5	838.9	78.6
24017570	64.9	1,536.8	84.6
24017580	58.2	2,925.4	116.2
24017590	64.7	1,286.8	83.7
24017600	67.0	1,053.7	75.1
24017610	63.9	783.8	75.4
24017640	65.0	1,860.9	80.5
24017740	61.6	1,193.4	77.5
24017820	55.6	983.5	69.2
24017830	68.5	847.1	68.5
24017900	72.0	1,957.0	100.6

Fuente: Autor

En la Ilustración 13 se muestra la espacialización de los grupos de suelos hidrológicos (Número de Curva CN) para toda la cuenca.

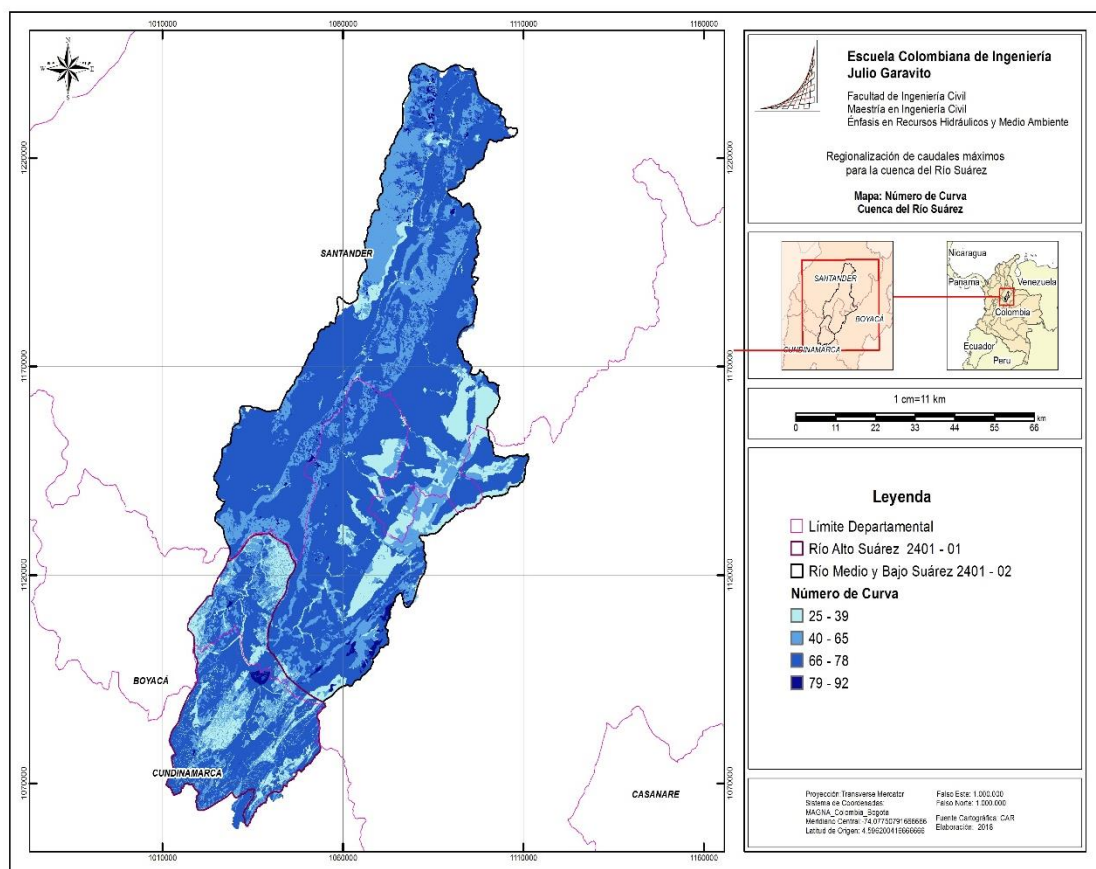


Ilustración 13 –Número de Curva CN cuenca del río Suárez
 Fuente: Autor

En el **Anexo 3. *Calculos variables físicas y morfométricos***, se muestran detalladamente todos los cálculos y valores de entrada usados para la determinación de parámetros morfométricos.

3.3. Etapa 3: Conformación de regiones homogéneas

Se realizaron dos (2) propuestas de conformación de regiones teniendo en cuenta los siguientes criterios:

3.3.1. Propuesta 1 - Zonificación hidrográfica:

Esta primera agrupación se realizó teniendo en cuenta la localización de las estaciones hidrológicas en cada una de las dos subzonas hidrográficas que hacen

parte de la zona hidrográfica del río Suárez., esto siguiendo el criterio de cuenca coherente y lo sugerido por J. R. Wallis et al (2007), el cual propone la identificación de regiones utilizando variables físicas como la localización geográfica.

En tal sentido se conformaron dos (2) regiones homogéneas, tal como se muestra en la Ilustración 14. La región 1 reúne las estaciones hidrológicas localizadas en la cuenca alta del río Suárez, y la región 2 las estaciones ubicadas en la cuenca median y baja del río Suárez.

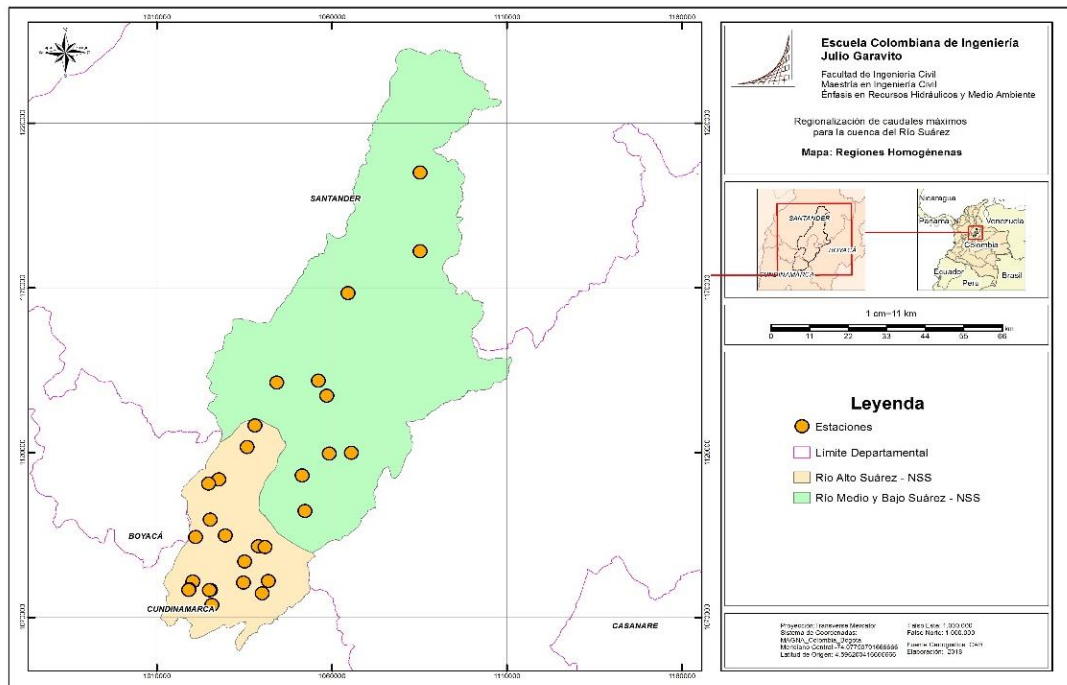


Ilustración 14 – Regiones homogéneas (Propuesta 1 – Criterio zonificación hidrográfica)
 Fuente: Autor a partir de información suministrada por la CAR y el IDEAM

A continuación, se relacionas las estaciones hidrológicas para cada una de las regiones conformadas.

Tabla 14. Formación de regiones homogéneas - Criterio zonificación hidrográfica

Región	Código	Estación	Unidades hidrográficas - POMCA
Región 1 Cuenca Alta	2401755	La Malilla	R. Alto Ubaté
	2401798	Hato El	R. Alto Ubaté
	2401780	Corralejas	R. Alto Ubaté
	2401715	La Boyera - CAR	R. Alto Ubaté

Región	Código	Estación	Unidades hidrográficas - POMCA
Región 2 Cuenca Media y Baja	24017150	La Boyera	R. Alto Ubaté
	2401795	Ticha Muñoz	R. Bajo Ubaté
	2401729	Puente Colorado	R. Bajo Ubaté
	2401793	Fúquene - Ticha Maria	R. Bajo Ubaté
	2401745	Puente Pinilla	R. Chiquinquirá
	2401751	Nariño	R. Chiquinquirá
	2401714	Tapias	R. Lenguazaque
	2401733	Puente La Balsa Lenguazaque	R. Lenguazaque
	2401723	El Boquerón	R. Lenguazaque
	24017610	BOQUERÓN	R. Lenguazaque
	2401722	San Agustín	R. Simijaca
	2401730	Puente Guzmán	R. Simijaca
	2401738	Puente Peralonso	R. Susa
	2401716	El Pino	R. Suta
	24017570	San Benito	R. Alto Suárez
	2401749	Puente Merchán	R. Alto Suárez
	2401713	Garavito	R. Alto Suárez
24017590	Pte Nacional	R. Alto Suárez	
24017640	La Ceiba	R. Alto Suárez	
24017600	Moniquirá	R. Moniquirá	
2401794	Monasterio	R. Moniquirá	
24017830	Sutamarchán	R. Moniquirá	
24017740	Pte Chacon	R. Moniquirá	
24017900	Bocatoma Arriba	R. Moniquirá	
24017820	Bocatoma	R. Moniquirá	
24017580	Justo Pastor Gómez	R. Oibita	

Fuente: Autor

3.3.2. Propuesta 2 - Rangos de Área de las cuencas de drenaje.

La segunda propuesta de conformación de regiones se realizó en función del área de las cuencas de drenaje de las estaciones hidrológicas, teniendo en cuenta la variación significativa del área en algunas de las estaciones que se localiza sobre el río Suárez y algunos de sus afluentes.

En este caso, se conformaron dos (2) regiones. La región 1, la cual relaciona las estaciones hidrológicas con áreas (\geq) a 110 km², y la región 2, la cual agrupa las estaciones con áreas (\leq) a 110 km², como se muestra en la Ilustración 13.

Tabla 15. Formación de regiones homogéneas - Criterio Rangos de Área

Región	Código	Estación	Área Km2
Región 1 Áreas (≥) a 100 km ²	2401714	Tapias	170.1
	2401715	La Boyera - CAR	175.4
	24017150	La Boyera	175.4
	24017740	Pte Chacon	190.5
	2401733	Pte La Balsa Lenguazaque	225.6
	24017610	BOQUERÓN	227.7
	2401723	El Boquerón	227.7
	24017580	Justo Pastor Gomez	317.0
	24017830	Sutamarchán	328.3
	2401729	Puente Colorado	785.8
	24017600	Moniquirá	1,154.2
	2401749	Puente Merchán	1,640.2
	2401713	Garavito	1,753.3
	24017590	Pte Nacional	2,291.2
	24017570	San Benito	5,375.5
	24017640	La Ceiba	6,985.6
	Región 2 Áreas (S) a 100 km ²	24017900	Bocatoma Arriba
2401793		Fúquene - Ticha Maria	13.3
2401780		Corralejas	17.8
2401755		La Malilla	33.6
2401738		Puente Peralonso	46.4
2401795		Ticha Muñoz	49.2
2401798		El Hato	53.3
2401722		San Agustín	58.9
2401716		El Pino	76.0
2401751		Nariño	78.2
24017820		Bocatoma	79.1
2401745		Puente Pinilla	94.2
2401794		Monasterio	97.9
2401730	Puente Guzmán	106.2	

Fuente: Autor

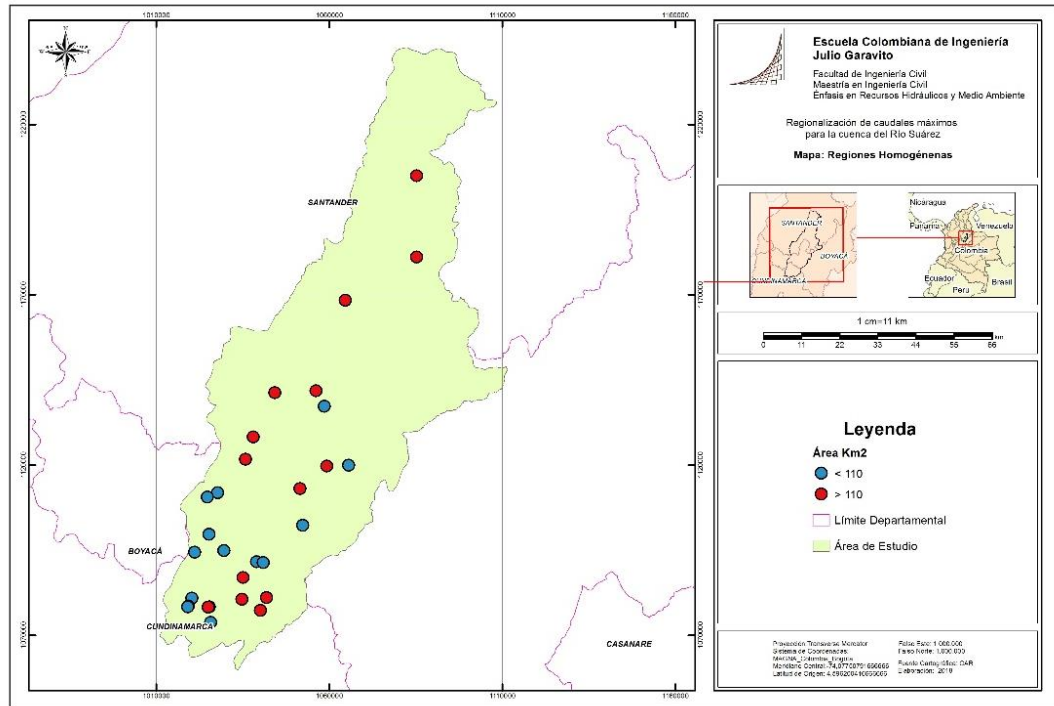


Ilustración 15 – Regiones homogéneas (Propuesta 2 – Criterio Tamaño de Áreas)

Fuente: Autor a partir de información suministrada por la CAR y el IDEAM

3.4. Etapa 4: Regionalización de caudales máximos mediante el método de regresión

Una vez definidas las dos propuestas de regiones homogéneas, se realizó el proceso de regresión múltiple entre las variables dependientes en este caso el promedio del caudal máximo (\bar{Q}_{Max}) y la desviación estándar ($\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$) con las variables independientes mediante el software XLSTA statistical and data analysis solution.

Este es un proceso iterativo que busca encontrar la regresión que mejor explique la relación entre el \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ con las variables físicas y morfométricas, con el fin estimar los coeficientes o parámetros de las ecuaciones para determinar el caudal máximo en cualquier lugar de interés dentro de la cuenca del río Suárez.

La selección de la regresión de mejor ajuste se basa en el cumplimiento de ciertos determinantes estadísticos, como lo son el coeficiente de determinación²(R²), el Test de Student, error cuadrático medio (MCE) y la desviación de la raíz cuadrada media (RSME).

Para las regiones homogéneas producto de la propuesta 1, en relación con \bar{Q}_{Max} , se llevaron a cabo un total de 45 interacciones, de estas 28 para la región 1 y 17 para la región 2. Con respecto a la $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ se realizaron 24 iteraciones, 9 para la región 1 y 15 para la región 2. En el **Anexo 4. Regresiones XLSTAT**, se presentan los resultados del proceso de regresión.

En la Tabla 16 se presenta los resultados estadísticos R², Test de Student, MCE y RSME, de las regresiones seleccionadas para la determinación de los coeficientes de las ecuaciones de regresión para el \bar{Q}_{Max} , y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ para las regiones de la propuesta 1.

Tabla 16. Estadísticos estimados de las regresiones seleccionadas para determinar los parámetros de las ecuaciones de \bar{Q}_{Max} , y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ para las regiones de la Propuesta 1.

Region 1 Alta		Region 2 Media y Baja		Region 1 Alta		Region 2 Media y Baja	
\bar{Q}_{Max}				$\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$			
Observacion	16.00	Observacion	10.00	Observacion	15.00	Observacion	10.00
GL	13.00	GL	5.00	GL	10.00	GL	6.00
R ²	0.58	R ²	0.90	R ²	0.84	R ²	0.81
R ² ajustado	0.52	R ² ajustado	0.81	R ² ajustado	0.77	R ² ajustado	0.71
MEC	0.22	MEC	0.42	MEC	0.04	MEC	0.41
RMSE	0.47	RMSE	0.65	RMSE	0.21	RMSE	0.64
<hr/>		<hr/>		<hr/>		<hr/>	
Fuente	t	Fuente	t	Fuente	t	Fuente	t
Intercepción	4.12	Intercepción	-2.91	Intercepción	5.91	Intercepción	-2.91
PPT	-3.13	Área Km2	2.66	Área Km2	6.79	Área Km2	2.73
Pendiente	-3.39	P24h	3.45	Perímetro	-6.76	P24h	2.70
		CN	2.65	PPT	-5.51	CN	2.88
		Kf	1.55	Kf	-6.83		

Fuente: Autor

En la Tabla 16 se aprecia, que para la región 1, la regresión seleccionada para la determinación de parámetros de la ecuación para el \bar{Q}_{Max} , tuvo en cuenta los valores

² El R² es el porcentaje de variación de la variable de respuesta que explica su relación con una o más variables predictoras. Por lo general, mientras mayor sea el R², mejor será el ajuste del modelo a sus datos. El R² siempre se encuentra entre 0 y 1.

de precipitación total multianual PPT y la pendiente de 16 estaciones. En este caso se obtuvo un R^2 inferior a 0.9, no obstante, el MCE fue el más bajo obtenido en el proceso de regresión. En cuanto a $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$, la regresión seleccionada tuvo en cuenta los valores de área, el perímetro, precipitación total multianual (PPT) y coeficiente de forma de 15 estaciones, en este caso se alcanzó un R^2 superior al 0.9

Para la Región 2, la regresión seleccionada para determinar los coeficientes de la ecuación de \bar{Q}_{Max} , tuvo en cuenta los valores de área, precipitación total multianual (PPT), la precipitación máxima en 24 horas (PMax24), el número de Curva (CN) y el coeficiente de forma de 10 estaciones. En este caso no se cumplió con el T de Student para esta última variable toda vez que no se superó el T para el nivel de confianza esperado de acuerdo a los grados de libertad, así mismo se obtuvo un valor un R^2 menor al 0.9. Por otro lado, en relación a la $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$, la regresión que presento el mejor ajuste, alcanzo un R^2 menor al 0.9, con la inclusión de 11 estaciones con valores precipitación total multianual (PPT), precipitación máxima en 24 horas (PMax24) y número de Curva (CN).

A continuación, se presentan las ecuaciones resultantes para el cálculo del \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ en las regiones homogéneas de la propuesta 1.

$$\bar{Q}_{Max} = e^{33.9} * PPT^{-3.46} * S^{-2.59}$$

$$\sigma = e^{32.76} * A^{2.47} * P^{-4.29} * PPT^{-4.25} * Kf^{-2.50}$$

Ecuaciones Región 1 - Cuenca Alta

$$\bar{Q}_{Max} = e^{-137.79} * Pmax^{0.49} * CN^{23.4}$$

$$\sigma = e^{-136.46} * A^{0.44} * Pmax^{7.39} * CN^{25.18}$$

Ecuaciones Región 2 - Cuenca Media y Baja

De igual forma en la Tabla 17 se presentan los valores de \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ calculados con las ecuaciones generadas para las estaciones que integran cada una de las regiones conformadas en la propuesta 2, así mismo se presenta una comparación con los valores observados y su porcentaje de variación con respecto a los valores calculados.

Para el análisis de los resultados se utilizó una escala de colores de acuerdo con el porcentaje de variación de los valores observados y los calculados. En primero lugar y de color verde se indican las estaciones que presenta una variación menor al 30%, de color naranja aquellas con una variación del 30 al 50% y de color rojo cuando la variación es superior al 100%. Así mismo es preciso indicar que si alguna estación no registra valores, es porque esta no fue utilizada en la regresión seleccionada.

En tal sentido comparando los valores de \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ observados con los estimados a partir de las ecuaciones generadas para las regiones de la propuesta 1, se evidencia lo siguiente:

Región 1

\bar{Q}_{Max} : A pesar de que para esta región se obtuvo el R^2 más bajo de todas las regiones seleccionadas 0.58, se alcanzó una variación menor al 30% en 12 de las 16 estaciones utilizadas en la regresión. Así mismo 2 estaciones obtuvieron una variación entre el 30% y el 50 % y las 2 estaciones restantes presentaron variaciones superiores al 50%.

$\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$: Se alcanzó un R^2 de 0.84, así mismo para las variables utilizadas se cumplió con el T de Student. De las 15 estaciones utilizadas en la regresión se obtuvo una variación de los valores observados con los calculados mediante la ecuación menor al 30% en 14 estaciones y 1 estación con una variación del 32%.

Región 2

\bar{Q}_{Max} : La regresión seleccionada obtuvo un R^2 de 0.9 y cumplió con el T de Student para 3 de las 4 variables utilizadas. En relación al % de variación entre los valores

observados y los calculados, se evidencia que 5 de las 10 estaciones utilizadas en la regresión, presentaron una variación menor al 30%, 3 estaciones del 30% al 50% y 2 estaciones superiores al 100%.

$\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$: De acuerdo a la regresión seleccionada, 4 de 10 estaciones presentaron una variación menor al 30%, 1 estación entre el 30% y 50 % y 5 estaciones con variaciones superiores al 100%.

De acuerdo a lo anterior, se infiere que para la región 1, las ecuaciones para el \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ presentan resultados con porcentajes de variación aceptables, por el contrario para la Región 2, se presentan variaciones considerables frente a los valores observados y los calculados, en especial para la $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$.

Tabla 17. Resultados \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ propuesta 1.

Propuesta 1										
Código	Nombre	Región	\bar{Q}_{Max} (m ³ /s)			Código	Nombre	$\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$		
			Observado	Calculado	% Var			Observada	Calculada	% Var
2401715	BOYERA LA - CAR	1	11.77	8.5	27%	2401715	BOYERA LA - CAR	9.4	9.1	3%
2401716	PINO EL	1	9.99	11.5	16%	2401716	PINO EL	7.2	7.8	8%
2401722	SAN AGUSTÍN	1	4.88	5.9	21%	2401722	SAN AGUSTÍN	3.2	2.9	10%
2401723	BOQUERÓN EL	1	26.17	20.8	20%	2401723	BOQUERÓN EL	19.6	14.4	27%
2401729	PUENTE COLORADO	1	20.3	17.3	15%	2401729	PUENTE COLORADO	6.5	8.4	29%
2401730	PUENTE GUZMÁN	1	7.1	6.1	13%	2401730	PUENTE GUZMÁN	7.7	7.9	3%
2401733	PTE LA BALSA	1	15.29	19.9	30%	2401733	PTE LA BALSA	8.5	8.3	2%
2401738	PUENTE PERALONSO	1	7.9	6.2	22%	2401738	PUENTE PERALONSO	7.3	7.2	1%
2401745	PUENTE PINILLA	1	7.91	8.3	5%	2401745	PUENTE PINILLA	9.3	10.2	9%
2401751	NARIÑO	1	10.19	8.7	14%	2401751	NARIÑO	16.8		
2401755	MALILLA LA	1	8.76	5.4	38%	2401755	MALILLA LA	11	7.7	30%
2401793	FÚQUENE - TICHA MARIA	1	9.28			2401793	FÚQUENE - TICHA MARIA	4.6		
2401798	HATO EL	1	4.89	4.7	3%	2401798	HATO EL	2.8		
24017150	BOYERA LA	1	9.64	8.5	11%	24017150	BOYERA LA	8.4	9.1	9%
2401714	TAPIAS	1	6.38			2401714	TAPIAS	6	5.9	1%
2401780	CORRALEJAS	1	3.17	5.5	72%	2401780	CORRALEJAS	10.2	13.4	32%
2401795	TICHA MUÑOZ	1	3.61	12.7	252%	2401795	TICHA MUÑOZ	5.2	6.1	18%
24017610	BOQUERÓN	1	36.45	20.8	43%	24017610	BOQUERÓN	16.7	14.5	13%
24017820	BOCATOMA	2	0.42			24017820	BOCATOMA	0.2		
2401794	MONASTERIO	2	25.43	21.8	14%	2401794	MONASTERIO	42	18.2	57%
2401713	GARAVITO	2	57.08	66.2	16%	2401713	GARAVITO	25.3	32.5	28%
24017600	MONIQUIRÁ	2	153.96	154.4	0%	24017600	MONIQUIRÁ	61.6	101.9	65%
24017590	PTE NACIONAL	2	326.8	317.1	3%	24017590	PTE NACIONAL	102.5	131	28%
24017640	CEIBA LA	2	1275.57	1,360.70	7%	24017640	CEIBA LA	357.5	177.5	50%
24017900	BOCATOMA ARRIBA	2	2.66			24017900	BOCATOMA ARRIBA	1.8		
24017740	PTE CHACON	2	28.3	14.4	49%	24017740	PTE CHACON	8.6	7.2	16%
24017830	SUTAMARCHÁN	2	46.21	64.6	40%	24017830	SUTAMARCHÁN	28.4	53.2	87%
2401749	PUENTE MERCHÁN	2	33.19	77.6	134%	2401749	PUENTE MERCHÁN	23.5	39	66%
24017580	JUSTO PASTOR GOMEZ	2	160.69	212.7	32%	24017580	JUSTO PASTOR GOMEZ	41.6	43.7	5%
24017570	SAN BENITO	2	1341.8	588.9	56%	24017570	SAN BENITO	352	220.1	37%

Fuente: Autor

Por otro lado, en relación a las regiones homogéneas producto de la propuesta 2, en relación con \bar{Q}_{Max} , se llevaron a cabo un total de 49 interacciones, de estas 30 para la región 1 y 19 para la región 2, hasta que se identificó aquella que cumpliera con los determinantes estadísticos definidos (R^2 , Test de Student, MCE y RSME).

En la Tabla 18 se presenta los resultados estadísticos R^2 , Test de Student, MCE y RSME, de las regresiones seleccionadas para la determinación de los coeficientes de las ecuaciones de regresión para el \bar{Q}_{Max} , y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ para las regiones de la propuesta 2.

Tabla 18. Estadísticos estimados de las regresiones seleccionadas para determinar los parámetros de las ecuaciones de \bar{Q}_{Max} , y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ para las regiones de la Propuesta 2.

	Region 1 Mayores	Region 2 Menores	Region 1 Mayores	Region 2 Menores
Q_{Max}	Observacion	12.00	Observacion	13.00
	GL	8.00	GL	8.00
	R^2	0.98	R^2	0.86
	R^2 ajustado	0.97	R^2 ajustado	0.80
	MEC	0.08	MEC	0.07
	RMSE	0.28	RMSE	0.27
	Fuente	t	Fuente	t
	Intercepción	-6.99	Intercepción	3.82
	Área Km2	4.51	Área Km2	4.20
	Perímetro	2.79	Perímetro	-4.00
PPT	4.68	PPT	-2.47	
		Pendiente	-2.83	
$\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$	Observacion	14.00	Observacion	11.00
	Suma de los	14.00	Suma de los	11.00
	GL	10.00	GL	8.00
	R^2	0.93	R^2	0.71
	R^2 ajustado	0.91	R^2 ajustado	0.64
	MEC	0.16	MEC	0.28
	RMSE	0.40	RMSE	0.53
	Fuente	t	Fuente	t
	Intercepción	-3.41	Intercepción	4.55
	Área Km2	4.47	PPT	-4.40
PPT	4.29	Pendiente	-3.11	
CN	3.03			

Fuente: Autor

En este caso para la región 1, con respecto al \bar{Q}_{Max} , la regresión que superó los determinantes estadísticos tuvo en cuenta las observaciones de los valores de área, perímetro y precipitación total multianual (PPT) de 20 estaciones hidrológicas. Esta regresión alcanzo un R^2 de 0.98, además el valor T de todas las variables utilizadas supero el T de a variable reducida de acuerdo a los grados de libertad.

Del mismo modo la regresión seleccionada para la obtención de los parámetros de la ecuación para la $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$, obtuvo un R^2 de 0.93, relacionando las variables de área, precipitación total multianual (PPT) y número de curva (CN) de 14 estaciones, las cuales el superaron el T de Student de acuerdo a los grados de libertad.

Así mismo para la región 2, la regresión seleccionada para \bar{Q}_{Max} , utilizo los registros de 12 estaciones que incluye el área, el perímetro la precipitación total multianual (PPT), y la pendiente, donde se obtuvo un R^2 de 0.86

En relación a la $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$, la región seleccionada tuvo en cuenta la pendiente y la precipitación total multianual (PPT) de 11 estaciones, alcanzando un R^2 de 0.71 y un error cuadrático medio de 0.28.

A continuación, se presentan las ecuaciones resultantes para el cálculo del \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ en las regiones homogéneas de la propuesta 2.

$$\bar{Q}_{Max} = e^{-10} * A^{0.64} * P^{0.55} * PPT^{1.9}$$

$$\sigma = e^{-69.1} * A^{0.52} * PPT^{1.94} * CN^{13.38}$$

Ecuaciones Región 1 - Áreas Mayores a 110 Km2

$$\bar{Q}_{Max} = e^{18.39} * A^{1.48} * P^{-2.51} * PPT^{-1.29} S^{-1.39}$$

$$\sigma = e^{36.92} * PPT^{-3.7} * S^{-2.98}$$

Ecuaciones Región 2 - Áreas Menores a 110 Km2

En la Tabla 19 se presentan los valores de \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ calculados con las ecuaciones generadas para las estaciones que integran cada una de las regiones conformadas en la propuesta 1, así mismo se presenta una comparación con los valores observados y su porcentaje de variación con respecto a los valores calculados.

En tal sentido comparando los valores de \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ observados con los estimados a partir de las ecuaciones generadas para las regiones de la propuesta 2, se evidencia lo siguiente:

Región 1

\bar{Q}_{Max} : La regresión seleccionada para la determinación de los parámetros de la ecuación obtuvo un R^2 de 0.98 y un MEC 0.8, así mismo las variables utilizadas superaron el T de Student. En cuanto la variación de los valores observados frente a los calculados, 11 de las 12 estaciones utilizadas presentaron una variación menor al 30% y solamente una estación (Pte la Balsa) alcanzo una variación del 55%.

$\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$: La regresión seleccionada para la determinación de los parámetros de la ecuación obtuvo un R^2 de 0.93 y un MEC 0.16, así mismo las variables utilizadas superaron el T de Student. En cuanto la variación de los valores observados frente a los calculados, 11 de las 13 estaciones utilizadas presentaron una variación menor al 30%, 1 estaciones una variación del 37% y 1 estación (El Boquerón) una variación del 52%.

Región 2

\bar{Q}_{Max} : La regresión seleccionada para la determinación de los parámetros de la ecuación obtuvo un R^2 de 0.71 y un MEC 0.28, así mismo las variables utilizadas superaron el T de Student. En cuanto la variación de los valores observados frente a los calculados, 11 de las 13 estaciones utilizadas presentaron una variación menor al 30%, las dos estaciones restantes La Manila y San Agustín, presentaron variaciones del 37% y 54% respectivamente.

$\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$: La regresión seleccionada para la determinación de los parámetros de la ecuación obtuvo un R^2 de 0.71 y un MEC 0.28, así mismo las variables utilizadas superaron el T de Student. En cuanto la variación de los valores observados frente a los calculados, 5 de las 11 estaciones utilizadas presentaron una variación menor al 30%, 3 estaciones entre el 30% y 50% y 3 estaciones superior al 50%.

De acuerdo a lo anterior, se infiere que, para las 2 regiones, las ecuaciones para el \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ presentan variaciones de los valores observados frente a los calculados que se consideran aceptables para el estudio.

Tabla 19. Resultados \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ propuesta 2.

Propuesta 2										
Código	Nombre	Región	\bar{Q}_{Max} (m ³ /s)			Código	Nombre	$\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$		
			Observado	Calculado	% Var			Observado	Calculado	% Var
2401714	TAPIAS	1	6.38			2401714	TAPIAS	6	7	17%
2401715	BOYERA LA - CAR	1	11.77	11.2	5%	2401715	BOYERA LA - CAR	9.4	10.5	12%
2401723	BOQUERÓN EL	1	26.17	25.8	2%	2401723	BOQUERÓN EL	19.6	9.3	52%
24017150	BOYERA LA	1	9.64	11.2	16%	24017150	BOYERA LA	8.4	10.5	26%
24017570	SAN BENITO	1	1341.8	998.3	26%	24017570	SAN BENITO	352	219.8	38%
24017580	JUSTO PASTOR GOMEZ	1	160.69	154.1	4%	24017580	JUSTO PASTOR GOMEZ	41.6	41.3	1%
24017590	PTE NACIONAL	1	326.8	399.8	22%	24017590	PTE NACIONAL	102.5	96.2	6%
24017600	MONQUIRÁ	1	153.96	140	9%	24017600	MONQUIRÁ	61.6	72.2	17%
24017610	BOQUERÓN	1	36.45	25.8	29%	24017610	BOQUERÓN	16.7	9.3	44%
24017640	CEIBA LA	1	1275.57	1,602.90	26%	24017640	CEIBA LA	357.5	371.1	4%
24017740	PTE CHACON	1	28.3	31.3	11%	24017740	PTE CHACON	8.6	11.8	37%
24017830	SUTAMARCHÁN	1	46.21	35.3	24%	24017830	SUTAMARCHÁN	28.4	33.5	18%
2401713	GARAVITO	1	57.08			2401713	GARAVITO	25.3	33.5	33%
2401729	PUENTE COLORADO	1	20.3			2401729	PUENTE COLORADO	6.5		
2401733	PTE LA Balsa	1	15.29	23.7	55%	2401733	PTE LA Balsa	8.5		
2401749	PUENTE MERCHÁN	1	33.19			2401749	PUENTE MERCHÁN	23.5	35.3	50%
2401716	PINO EL	2	9.99	10.2	2%	2401716	PINO EL	7.2	13	80%
2401730	PUENTE GUZMÁN	2	7.1	8.1	14%	2401730	PUENTE GUZMÁN	7.7	6.7	13%
2401738	PUENTE PERALONSO	2	7.9	7.5	5%	2401738	PUENTE PERALONSO	7.3	6.7	7%
2401745	PUENTE PINILLA	2	7.91	8.4	7%	2401745	PUENTE PINILLA	9.3	9.7	5%
2401751	NARIÑO	2	10.19	8.5	16%	2401751	NARIÑO	16.8	10.3	39%
2401755	MALILLA LA	2	8.76	5.5	37%	2401755	MALILLA LA	11	5.7	48%
2401780	CORRALEJAS	2	3.17	3.2	1%	2401780	CORRALEJAS	10.2	5.6	45%
2401793	FÚQUENE - TICHA MARIA	2	9.28	11.3	22%	2401793	FÚQUENE - TICHA MARIA	4.6		
2401794	MONASTERIO	2	25.43	20.3	20%	2401794	MONASTERIO	42	39.8	5%
2401795	TICHA MUÑOZ	2	3.61	4.4	21%	2401795	TICHA MUÑOZ	5.2		
2401798	HATO EL	2	4.89	4.6	6%	2401798	HATO EL	2.8	4.9	77%
24017900	BOCATOMA ARRIBA	2	2.66	2.5	7%	24017900	BOCATOMA ARRIBA	1.8	2	9%
2401722	SAN AGUSTÍN	2	4.88	7.5	54%	2401722	SAN AGUSTÍN	3.2	6.4	103%
24017820	BOCATOMA	2	0.42			24017820	BOCATOMA	0.2		

Fuente: Autor

Posteriormente, con los valores de caudal medio máximo y su desviación estándar (\bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$), estimados a partir de las ecuaciones de regresión, se estimó el caudal máximo para distintos periodos de retorno, para cada una de las estaciones seleccionadas, mediante la distribución de frecuencias Gumbel (Valores extremos Tipo I)

$$F(x) = P(x \leq X_i) = e^{-e^{-y}}$$

$$y = -\ln[-\ln(F(x))]$$

Entonces el caudal máximo para un periodo de retorno es:

$$Q_{Tr} = \bar{Q}_{Max} + \lambda * \sigma_{\bar{Q}_{Max}}$$

Donde la variable reducida es:

$$\lambda = \frac{y - y_n}{S_n}$$

Tr	p	f(x)	y
2	0.5	0.5	0.366512921
5	0.2	0.8	1.499939987
10	0.1	0.9	2.250367327
50	0.02	0.98	3.901938658
100	0.01	0.99	4.600149227

Tabla 20. Caudal máximo estimado con Gumbel a partir de los parámetros \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ de las series de datos de las estaciones.

Código	Estación	Total Dato	Y _n	S _n	λ					Caudal m3/s - Gumbel -				
					2	5	10	50	100	2	5	10	50	100
2401713	Garavito	25	0.53	1.09	-0.15	0.89	1.58	3.09	3.73	53.27	79.52	96.90	135.16	151.33
2401714	Tapias	25	0.53	1.09	-0.15	0.89	1.58	3.09	3.73	5.48	11.66	15.75	24.76	28.56
2401715	La Boyera - CAR	25	0.53	1.09	-0.15	0.89	1.58	3.09	3.73	10.35	20.14	26.63	40.89	46.93
2401716	El Pino	25	0.53	1.09	-0.15	0.89	1.58	3.09	3.73	8.90	16.39	21.35	32.26	36.87
2401722	San Agustín	25	0.53	1.09	-0.15	0.89	1.58	3.09	3.73	4.40	7.69	9.87	14.67	16.70
2401723	El Boquerón	25	0.53	1.09	-0.15	0.89	1.58	3.09	3.73	23.22	43.58	57.06	86.73	99.28

Código	Estación	Total Dato	Y _n	S _n	λ					Caudal m3/s - Gumbel -				
					2	5	10	50	100	2	5	10	50	100
2401729	Puente Colorado	23	0.53	1.08	-0.15	0.90	1.59	3.12	3.77	19.33	26.14	30.65	40.58	44.78
2401730	Puente Guzmán	24	0.53	1.09	-0.15	0.89	1.58	3.10	3.75	5.95	13.94	19.23	30.88	35.80
2401733	Puente La Balsa	25	0.53	1.09	-0.15	0.89	1.58	3.09	3.73	14.01	22.85	28.71	41.60	47.05
2401738	Puente Peralonso	25	0.53	1.09	-0.15	0.89	1.58	3.09	3.73	6.81	14.35	19.34	30.32	34.97
2401745	Puente Pinilla	25	0.53	1.09	-0.15	0.89	1.58	3.09	3.73	6.51	16.17	22.56	36.63	42.58
2401749	Puente Merchán	22	0.53	1.08	-0.15	0.90	1.60	3.14	3.79	29.69	54.44	70.82	106.88	122.13
2401751	Nariño	25	0.53	1.09	-0.15	0.89	1.58	3.09	3.73	7.66	25.10	36.64	62.05	72.79
2401755	La Malilla	25	0.53	1.09	-0.15	0.89	1.58	3.09	3.73	7.10	18.53	26.09	42.73	49.77
2401780	Corralejas	22	0.53	1.08	-0.15	0.90	1.60	3.14	3.79	1.66	12.36	19.45	35.06	41.65
2401793	Fúquene Ticha Maria	19	0.52	1.06	-0.15	0.93	1.64	3.20	3.86	8.61	13.52	16.77	23.93	26.96
2401794	Monasterio	19	0.52	1.06	-0.15	0.93	1.64	3.20	3.86	19.25	64.32	94.17	159.85	187.61
2401795	Ticha Muñoz	19	0.52	1.06	-0.15	0.93	1.64	3.20	3.86	2.85	8.41	12.10	20.21	23.64
2401798	El Hato	24	0.53	1.09	-0.15	0.89	1.58	3.10	3.75	4.47	7.37	9.29	13.52	15.31
24017150	La Boyera	23	0.53	1.08	-0.15	0.90	1.59	3.12	3.77	8.39	17.17	22.99	35.79	41.20
24017570	San Benito	23	0.53	1.08	-0.15	0.90	1.59	3.12	3.77	1289.12	1658.21	1902.57	2440.39	2667.76
24017580	Justo Pastor Gómez	20	0.52	1.06	-0.15	0.92	1.62	3.18	3.84	154.54	198.90	228.26	292.89	320.22
24017590	Pte Nacional	24	0.53	1.09	-0.15	0.89	1.58	3.10	3.75	311.41	418.34	489.14	644.94	710.81
24017600	Monquirá	24	0.53	1.09	-0.15	0.89	1.58	3.10	3.75	144.71	208.98	251.53	345.18	384.76
24017610	Boquerón	24	0.53	1.09	-0.15	0.89	1.58	3.10	3.75	33.94	51.37	62.90	88.29	99.02
24017640	Ceiba La	22	0.53	1.08	-0.15	0.90	1.60	3.14	3.79	1222.29	1599.08	1848.54	2397.58	2629.69
24017740	Pte Chacón	24	0.53	1.09	-0.15	0.89	1.58	3.10	3.75	27.00	36.01	41.97	55.09	60.64
24017820	Bocatoma	23	0.53	1.08	-0.15	0.90	1.59	3.12	3.77	0.39	0.58	0.71	0.98	1.10
24017830	Sutamarchán	21	0.53	1.07	-0.15	0.91	1.61	3.16	3.81	42.00	72.09	92.02	135.87	154.41
24017900	Bocatoma Arriba	22	0.53	1.08	-0.15	0.90	1.60	3.14	3.79	2.39	4.30	5.56	8.34	9.52

En la Tabla 21 se presentan los caudales máximo estimados para diferentes periodos de retorno mediante la distribución de frecuencias Gumbel a partir de los parámetros \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ calculados con las ecuaciones para las propuestas 1 y 2.

Tabla 21. Caudal máximo estimado con Gumbel a partir de los parámetros \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ estimados con las ecuaciones para las propuestas 1 y 2.

Código	Estación	Caudal m3/s - Gumbel Propuesta 1					Caudal m3/s - Gumbel Propuesta 1				
		2	5	10	50	100	2	5	10	50	100
2401713	Garavito	61.31	95.05	117.40	166.57	187.36	12.93	13.73	14.26	15.43	15.92
2401714	Tapias	28.31	34.44	38.49	47.42	51.20	6.75	6.81	6.85	6.95	6.98
2401715	La Boyera – CAR	7.13	16.58	22.84	36.60	42.43	11.19	11.24	11.28	11.35	11.39
2401716	El Pino	10.33	18.42	23.79	35.59	40.58	10.20	10.22	10.23	10.26	10.27

Código	Estación	Caudal m3/s - Gumbel Propuesta 1					Caudal m3/s - Gumbel Propuesta 1				
		2	5	10	50	100	2	5	10	50	100
2401722	San Agustín	5.46	8.47	10.47	14.86	16.71	7.42	7.98	8.35	9.17	9.51
2401723	El Boquerón	18.63	33.58	43.48	65.27	74.49	25.80	25.82	25.83	25.86	25.87
2401729	Puente Colorado	16.04	24.85	30.68	43.51	48.94	79.96	83.06	85.11	89.64	91.55
2401730	Puente Guzmán	4.91	13.16	18.61	30.62	35.70	8.08	8.23	8.32	8.53	8.62
2401733	Puente La Balsa	18.65	27.27	32.98	45.53	50.84	23.62	24.19	24.57	25.40	25.75
2401738	Puente Peralonso	5.12	12.59	17.54	28.44	33.04	7.49	7.54	7.58	7.65	7.69
2401745	Puente Pinilla	6.76	17.36	24.37	39.80	46.33	8.39	8.46	8.51	8.62	8.66
2401749	Puente Merchán	71.79	112.89	140.11	200.00	225.32	183.22	188.01	191.18	198.15	201.10
2401751	Nariño	8.64	9.06	9.33	9.94	10.19	8.48	8.64	8.75	8.99	9.10
2401755	La Malilla	4.24	12.24	17.53	29.18	34.11	5.44	5.83	6.08	6.64	6.88
2401780	Corralejas	3.50	17.63	26.98	47.56	56.26	3.20	3.21	3.22	3.23	3.24
2401793	Fúquene - Ticha Maria	2.43	59.07	96.57	179.10	213.99	11.27	11.50	11.66	12.00	12.15
2401794	Monasterio	19.12	38.65	51.57	80.02	92.05	20.27	20.49	20.63	20.94	21.07
2401795	Ticha Muñoz	11.80	18.35	22.68	32.21	36.24	4.37	4.59	4.74	5.07	5.21
2401798	El Hato	2.82	15.86	24.50	43.50	51.54	4.59	4.65	4.70	4.79	4.82
24017150	La Boyera	7.14	16.68	23.00	36.90	42.77	11.18	11.34	11.45	11.70	11.80
24017570	San Benito	555.96	786.72	939.49	1,275.74	1,417.88	998.26	998.53	998.71	999.11	999.28
24017580	Justo Pastor Gómez	206.24	252.84	283.70	351.61	380.32	154.09	154.14	154.16	154.23	154.25
24017590	Pte Nacional	297.43	434.11	524.59	723.74	807.93	399.77	400.00	400.15	400.48	400.62
24017600	Monquirá	139.10	245.41	315.80	470.71	536.20	139.99	140.08	140.14	140.28	140.34
24017610	Boquerón	18.62	33.75	43.77	65.81	75.13	25.76	26.06	26.26	26.70	26.89
24017640	Ceiba La	1,334.24	1,521.32	1,645.18	1,917.78	2,033.03	1,602.86	1,603.14	1,603.32	1,603.72	1,603.88
24017740	Pte Chacón	13.32	20.83	25.80	36.75	41.38	31.28	31.40	31.47	31.64	31.71
24017820	Bocatoma	0.27	0.48	0.62	0.92	1.05	2.41	10.07	15.14	26.31	31.03
24017830	Sutamarchán	56.71	113.08	150.41	232.55	267.28	35.26	35.52	35.69	36.06	36.21
24017900	Bocatoma Arriba	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	2.49	2.56	2.61	2.72	2.77

Seguido de esto se realizó la comparación de la variación del caudal máximo proyectado mediante la distribución Gumbel, con la \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ de las series de datos y el caudal máximo con la \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ estimados mediante las ecuaciones de las regiones homogéneas de la propuesta 1 y 2.

Para la comparación de la variabilidad, se establecieron escalas del porcentaje variación, las cuales se representan con la siguiente escala de color.

Color	Variación
Verde	0 %- 30%
Amarillo	30% - 50%
Naranja	50% 100%
Rojo	< 100%

Tabla 22. Porcentaje de variación del caudal máximo estimado con Gumbel a partir de los parámetros de las series Vs el caudal máximo estimado con Gumbel a partir de los parámetros calculados con las ecuaciones.

Código	Estación	Propuesta 1					Propuesta 2				
		2.33	50	10	50	100	2.33	5	10	50	100
2401713	Garavito	15%	20%	21%	23%	24%	76%	83%	85%	89%	89%
2401714	Tapias	416%	195%	144%	92%	79%	23%	42%	56%	72%	76%
2401715	La Boyera – CAR	31%	18%	14%	10%	10%	8%	44%	58%	72%	76%
2401716	El Pino	16%	12%	11%	10%	10%	15%	38%	52%	68%	72%
2401722	San Agustín	24%	10%	6%	1%	0%	69%	4%	15%	38%	43%
2401723	El Boquerón	20%	23%	24%	25%	25%	11%	41%	55%	70%	74%
2401729	Puente Colorado	17%	5%	0%	7%	9%	314%	218%	178%	121%	104%
2401730	Puente Guzmán	17%	6%	3%	1%	0%	36%	41%	57%	72%	76%
2401733	Puente La Balsa	33%	19%	15%	9%	8%	69%	6%	14%	39%	45%
2401738	Puente Peralonso	25%	12%	9%	6%	6%	10%	47%	61%	75%	78%
2401745	Puente Pinilla	4%	7%	8%	9%	9%	29%	48%	62%	76%	80%
2401749	Puente Merchán	142%	107%	98%	87%	84%	517%	245%	170%	85%	65%
2401751	Nariño	13%	64%	75%	84%	86%	11%	66%	76%	86%	88%
2401755	La Mailla	40%	34%	33%	32%	31%	23%	69%	77%	84%	86%
2401780	Corralejas	112%	43%	39%	36%	35%	93%	74%	83%	91%	92%
2401793	Fúquene - Ticha María	72%	337%	476%	648%	694%	31%	15%	30%	50%	55%
2401794	Monasterio	1%	40%	45%	50%	51%	5%	68%	78%	87%	89%
2401795	Ticha Muñoz	315%	118%	87%	59%	53%	54%	45%	61%	75%	78%
2401798	El Hato	37%	115%	164%	222%	237%	3%	37%	49%	65%	68%
24017150	La Boyera	15%	3%	0%	3%	4%	33%	34%	50%	67%	71%
24017570	San Benito	57%	53%	51%	48%	47%	23%	40%	48%	59%	63%
24017580	Justo Pastor Gómez	33%	27%	24%	20%	19%	0%	23%	32%	47%	52%
24017590	Pte Nacional	4%	4%	7%	12%	14%	28%	4%	18%	38%	44%
24017600	Moniquirá	4%	17%	26%	36%	39%	3%	33%	44%	59%	64%
24017610	Boquerón	45%	34%	30%	25%	24%	24%	49%	58%	70%	73%
24017640	Ceiba La	9%	5%	11%	20%	23%	31%	0%	13%	33%	39%
24017740	Pte Chacón	51%	42%	39%	33%	32%	16%	13%	25%	43%	48%
24017820	Bocatoma	31%	18%	12%	6%	4%	512%	1631%	2043%	2580%	2726%
24017830	Sutamarchán	35%	57%	63%	71%	73%	16%	51%	61%	73%	77%
24017900	Bocatoma Arriba	25%	58%	68%	78%	81%	4%	40%	53%	67%	71%

Por otro lado, con el fin de validar los resultados obtenidos en especial los de la propuesta 1, se estimaron los caudales máximos utilizando la ecuación de regionalización de caudales máximos mediante el método de multiescalonamiento, presentado en el documento Atlas Hidrológico de Colombia – UNAL- Sede Medellín – 2002, el cual dividió a Colombia en 14 regiones homogéneas.

La ecuación se obtuvo mediante la regresión de Q_{TR} vs área, para cada región y estimado los parámetros $\theta(p)$ y $C(p)$

$$Q(p) = c(p)A^{\theta(p)}$$

A continuación se presenta los parámetros $\theta(p)$ y $C(p)$, estimados para la cuenca del río Sogamoso, del cual hace parte la cuenca del río Suárez.

Subregión	Parámetros	Tr (años)					
		2,33	5	10	25	50	100
Sogamoso	$\theta(Tr)$	0,8927	0,8699	0,8573	0,8455	0,8385	0,8326
	$C(Tr)$	0,2242	0,3482	0,4499	0,5770	0,6700	0,7615
	R	0,9066	0,9117	0,9146	0,9169	0,9180	0,9186

Con la aplicación de la ecuación de regionalización proporcionada en el Atlas Hidrológico de Colombia, se estimó el caudal máximo para diferentes periodos de retorno para las estaciones hidrológicas seleccionadas en el presente estudio.

Tabla 23. Caudal máximo estimado mediante la ecuación de regionalización del Atlas Hidrológico de Colombia.

Estadístico	Estación	Área Km ²	2	5	10	50	100
2401713	Garavito	1,753.30	176.37	231.03	311.79	351.60	382.39
2401714	Tapias	170.1	21.98	30.36	40.42	49.72	54.82
2401715	La Boyera- CAR	175.4	22.59	31.18	41.52	51.01	56.24
2401716	El Pino	76	10.71	15.06	19.96	25.30	28.03
2401722	San Agustín	58.9	8.53	12.07	15.97	20.43	22.67
2401723	El Boquerón	227.7	28.51	39.13	52.18	63.49	69.89
2401729	Puente Colorado	785.8	86.16	114.94	154.39	179.39	196.02
2401730	Puente Guzmán	106.2	14.43	20.15	26.76	33.50	37.04
2401733	Puente La Balsa	225.6	28.28	38.81	51.76	63.00	69.35
2401738	Puente Peralonso	46.4	6.89	9.81	12.96	16.73	18.59
2401745	Puente Pinilla	94.2	12.97	18.16	24.09	30.29	33.52
2401749	Puente Merchán	1,640.20	166.18	218.01	294.10	332.48	361.74
2401751	Nariño	78.2	10.98	15.44	20.47	25.91	28.70
2401755	La Malilla	33.6	5.17	7.41	9.77	12.76	14.21
2401780	Corralejas	17.8	2.93	4.26	5.60	7.49	8.37
2401793	Ticha Muñoz	13.3	2.26	3.31	4.34	5.87	6.57
2401794	Monasterio	97.9	13.42	18.78	24.92	31.29	34.61

2401795	Fúquene - Ticha Maria	49.2	7.26	10.32	13.64	17.57	19.52
2401798	El Hato	53.3	7.80	11.06	14.63	18.79	20.86
24017150	La Boyera	175.4	22.59	31.18	41.52	51.01	56.24
24017570	San Benito	5,375.50	479.49	612.24	831.68	899.56	971.89
24017580	Justo Pastor Gómez	317	38.31	52.18	69.72	83.79	92.06
24017590	Pte Nacional	2,291.20	223.96	291.57	394.12	440.04	477.81
24017600	Monquirá	1,154.20	121.43	160.59	216.20	247.63	269.98
24017610	Boquerón	227.7	28.51	39.13	52.18	63.49	69.89
24017640	Ceiba La	6,985.60	605.84	768.96	1,046.17	1,120.57	1,208.80
24017740	Pte Chacón	190.5	24.32	33.50	44.64	54.67	60.24
24017820	Bocatoma	79.1	11.10	15.60	20.67	26.16	28.98
24017830	Sutamarchán	328.3	39.53	53.79	71.89	86.29	94.78
24017900	Bocatoma Arriba	11.3	1.95	2.87	3.76	5.12	5.73

Consecuentemente, se realizó la comparación de la variación del caudal máximo estimado con Gumbel a partir de los parámetros calculados con las ecuaciones de la propuesta 1 vs el caudal máximo estimado mediante la ecuación de regionalización del Atlas Hidrológico de Colombia.

En este caso se verifico que con las ecuaciones generadas para la estimación \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$, se obtienen resultados de caudal máximo con menores variaciones con respecto a los obtenidos con la ecuación de regionalización del Atlas Hidrológico de Colombia.

Tabla 24. Porcentaje de variación del caudal máximo estimado con Gumbel a partir de los parámetros calculados con las ecuaciones de la propuesta 1 vs el caudal máximo estimado mediante la ecuación de regionalización del Atlas Hidrológico de Colombia.

Código	Estación	Propuesta 1					Propuesta 2				
		2.33	50	10	50	100	2.33	5	10	50	100
2401713	Garavito	15%	20%	21%	23%	24%	231%	191%	222%	160%	153%
2401714	Tapias	416%	195%	144%	92%	79%	301%	160%	157%	101%	92%
2401715	La Boyera – CAR	31%	18%	14%	10%	10%	118%	55%	56%	25%	20%
2401716	El Pino	16%	12%	11%	10%	10%	20%	8%	6%	22%	24%
2401722	San Agustín	24%	10%	6%	1%	0%	94%	57%	62%	39%	36%
2401723	El Boquerón	20%	23%	24%	25%	25%	23%	10%	9%	27%	30%
2401729	Puente Colorado	17%	5%	0%	7%	9%	346%	340%	404%	342%	338%
2401730	Puente Guzmán	17%	6%	3%	1%	0%	143%	45%	39%	8%	3%
2401733	Puente La Balsa	33%	19%	15%	9%	8%	102%	70%	80%	51%	47%
2401738	Puente Peralonso	25%	12%	9%	6%	6%	1%	32%	33%	45%	47%
2401745	Puente Pinilla	4%	7%	8%	9%	9%	99%	12%	7%	17%	21%
2401749	Puente Merchán	142%	107%	98%	87%	84%	460%	300%	315%	211%	196%
2401751	Nariño	13%	64%	75%	84%	86%	43%	38%	44%	58%	61%
2401755	La Malilla	40%	34%	33%	32%	31%	27%	60%	63%	70%	71%

Código	Estación	Propuesta 1					Propuesta 2				
		2.33	50	10	50	100	2.33	5	10	50	100
2401780	Corralejas	112%	43%	39%	36%	35%	77%	66%	71%	79%	80%
2401793	Fúquene - Ticha Maria	72%	337%	476%	648%	694%	74%	76%	74%	75%	76%
2401794	Monasterio	1%	40%	45%	50%	51%	30%	71%	74%	80%	82%
2401795	Ticha Muñoz	315%	118%	87%	59%	53%	155%	23%	13%	13%	17%
2401798	El Hato	37%	115%	164%	222%	237%	74%	50%	57%	39%	36%
24017150	La Boyera	15%	3%	0%	3%	4%	169%	82%	81%	43%	36%
24017570	San Benito	57%	53%	51%	48%	47%	63%	63%	56%	63%	64%
24017580	Justo Pastor Gómez	33%	27%	24%	20%	19%	75%	74%	69%	71%	71%
24017590	Pte Nacional	4%	4%	7%	12%	14%	28%	30%	19%	32%	33%
24017600	Monquirá	4%	17%	26%	36%	39%	16%	23%	14%	28%	30%
24017610	Boquerón	45%	34%	30%	25%	24%	16%	24%	17%	28%	29%
24017640	Ceiba La	9%	5%	11%	20%	23%	50%	52%	43%	53%	54%
24017740	Pte Chacón	51%	42%	39%	33%	32%	10%	7%	6%	1%	1%
24017820	Bocatoma	31%	18%	12%	6%	4%	2723%	2581%	2825%	2565%	2539%
24017830	Sutamarchán	35%	57%	63%	71%	73%	6%	25%	22%	36%	39%
24017900	Bocatoma Arriba	25%	58%	68%	78%	81%	18%	33%	32%	39%	40%

Finalizada la ejecución de las etapas 1 al 5, se obtuvieron las ecuaciones para la estimación \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$, con las cuales se puede estimar el caudal máximo en cualquier sitio de interés al interior de la cuenca. Sin embargo, con el fin establecer otra opción para la obtención y comparación de caudales máximos, se realizó la generación de mapas de rendimientos hídricos, a partir de la aplicación de las etapas 5 al 7.

Generación de mapas rendimientos hídricos

3.5. Etapa 5: Determinación de cuantiles

3.5.1. Cálculo de los L-moments de las estaciones

Para cada una de las estaciones seccionadas a partir de los valores de caudal máximo mensual multianual – absoluto con el software L- RAP se calcularon los L momentos: Primer momento (promedio), segundo momento (coeficiente de variación), tercer momento (coeficiente de asimetría) y cuarto momento (coeficiente de curtosis). En la Tabla 25 se presentan los momentos calculados.

Tabla 25. Valores estimados de los L-Moments para las estaciones seleccionadas

Código	Nombre	Promedio	L-Cv	L-SKEW	L-KURT
2401713	Garavito	57.08	0.2529	0.021	0.1799
2401714	Tapias	6.38	0.4351	0.5146	0.3334
2401715	La Boyera – CAR	11.77	0.4434	0.2303	0.1057
2401716	El Pino	9.99	0.4216	0.0494	-0.0251
2401722	San Agustín	4.88	0.3585	0.1985	0.1922
2401723	El Boquerón	26.17	0.4123	0.2712	0.1036
2401729	Puente Colorado	22.00	0.0581	-0.7638	0.5378
2401730	Puente Guzmán	7.10	0.4876	0.5031	0.3802
2401733	Pte La Balsa Lenguazaque	15.80	0.2917	0.1232	0.2204
2401738	Puente Peralonso	7.90	0.4634	0.4253	0.2255
2401745	Puente Pinilla	7.91	0.5128	0.4926	0.4228
2401749	Puente Merchán	33.19	0.3775	0.2452	0.2559
2401751	Nariño	10.19	0.6723	0.641	0.4536
2401755	La Malilla	8.76	0.559	0.4802	0.369
2401780	Corralejas	1.03	0.4103	0.3164	0.1448
24017150	La Boyera	9.64	0.4673	0.3376	0.0952
2401793	Fúquene - Ticha Maria	9.28	0.2883	-0.013	-0.008
2401794	Monasterio	26.81	0.7241	0.604	0.2419
2401795	Ticha Muñoz	3.61	0.707	0.5343	0.1697
2401798	El Hato	4.89	0.328	0.0422	0.0956
24017570	San Benito	1,341.80	0.1524	-0.1041	-0.0118
24017580	Justo Pastor Gomez	160.69	0.1366	0.2925	0.2646
24017590	Pte Nacional	326.80	0.1756	0.2576	0.076
24017600	Moniquirá	153.96	0.2253	0.0655	0.2159

Código	Nombre	Promedio	L-Cv	L-SkEW	L-KURT
24017610	BOQUERÓN	36.45	0.2636	0.0696	0.0595
24017640	La Ceiba	1,371.98	0.1391	-0.1073	0.0017
24017740	Pte Chacon	28.30	0.1763	0.1195	0.0541
24017820	Bocatoma	0.42	0.2197	0.3972	0.2518
24017830	Sutamarchán	46.21	0.3459	0.2029	-0.0196
24017900	Bocatoma Arriba	2.66	0.3059	0.4828	0.3944

Fuente: Autor mediante la utilización del software L-RAP

3.6. Etapa 6: Selección de distribución de frecuencias

La identificación de las distribuciones de probabilidad depende de aquellas que presentan el mejor ajuste en los datos para las diferentes estaciones en una región. Por lo tanto, la distribución seleccionada es la que proporcione el mejor ajuste, para lo cual se utilizó la medida o el estadístico Z^{DIST} , teniendo en cuenta que el valor absoluto de Z^{DIST} debe ser menor o igual a 1,64.

Las distribuciones consideradas para este estudio son: Generalizada Logística (GLO), Generalizada de Pareto (GPA), Generalizada del Valor Extremo (GEV), Generalizada Normal (GNO) y Pearson Tipo III (PE3), las cuales están integradas en el Paquete L – RAP.

En este caso, se encontró que la distribución que más se ajusta regionalmente a los registros de caudal máximo mensual multianual (absolutos) es la distribución Logística Generalizada – GLO, por cuanto obtuvo un valor Z^{DIST} menor a 1.64.

En la Tabla 26 se presentan los resultados de la prueba Z^{Dist} para cada una de las distribuciones utilizadas.

Tabla 26. Resultados pruebas de bondad de ajuste Z^{DIST}

Tipo de Distribución	Z^{Dist}	Ajuste
GLO	-1.06	Aceptada
GEV	-1.88	Rechazada
GNO	-2.87	Rechazada

GPA	-4.33	Rechazada
PE3	-4.57	Rechazada

Fuente: Autor mediante la utilización del software L-RAP

Lo anterior es ratificado con el diagrama de L-Moments de los coeficientes de asimetría vs curtosis (En la Figura 5), donde se aprecia que la nube de puntos correspondiente al número de estaciones analizadas se acerca a la curva de la distribución GLO.

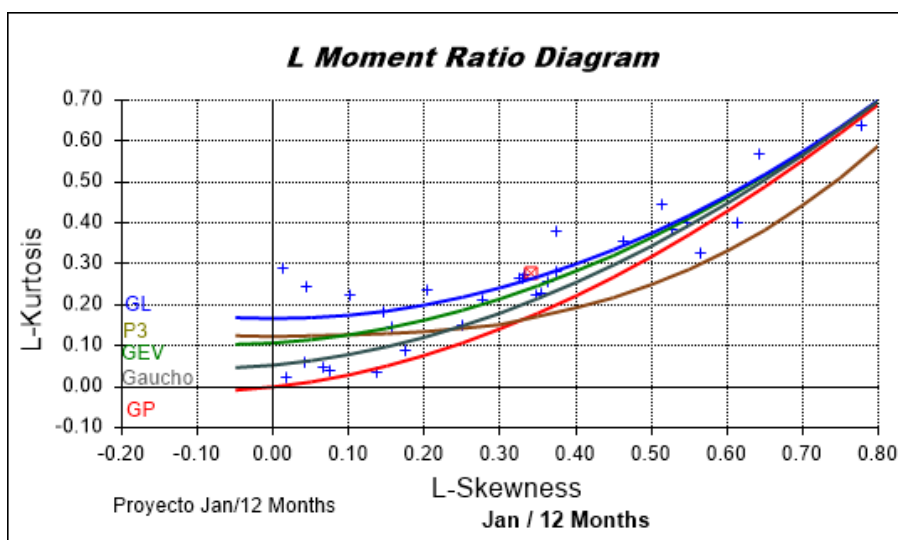


Figura 5 – Diagrama L-momento-ratio de L-asimetría vs. L-curtosis
Fuente: Autor mediante la utilización del software L-RAP

3.6.1. Cálculo de los cuantiles para diferentes periodos de retorno

Para el cálculo de los cuantiles se estimaron los parámetros para la función de probabilidad que presento un ajuste adecuado de acuerdo a la prueba Z^{Dist} , en este caso la distribución Logística Generalizada – GLO, a partir de los L momentos calculados en el numeral 3.5.1 En la Tabla 27 se muestra los caudales máximos para diferentes periodos de retorno.

Tabla 27. Caudales máximos para cada estación para diferentes periodos de retorno

Código	Nombre	Parámetros GLO			Q _{Max} (m ³ /s)				
		Localización (ξ)	Escala (α)	Forma (k)	Periodos de retorno				
					2.33	5	10	50	100
2401713	Garavito	0.9913	0.2527	-0.021	59.48	76.87	89.02	115.08	126.17
2401714	Tapias	0.6769	0.2689	-0.5146	4.68	7.78	11.3	25.66	36.43
2401715	La Boyera - CAR	0.8364	0.4057	-0.2303	10.83	17.64	23.5	39.92	48.86
2401716	Pino El	0.6769	0.2689	-0.5146	10.49	15.66	19.38	27.64	31.28
2401722	San Agustín	0.8852	0.3357	-0.1985	4.65	6.93	8.83	13.93	16.61
2401723	El Boquerón	0.8226	0.3642	-0.2712	23.49	37.57	50.16	87.36	108.58
2401729	Puente Colorado	1.0546	0.0164	0.7638	23.27	23.51	23.59	23.65	23.66
2401730	Puente Guzmán	0.644	0.3085	-0.5031	5.03	8.96	13.37	31.06	44.16
2401733	Pte La Balsa Lenguazaque	0.9413	0.2845	-0.1232	15.78	21.66	26.21	37.31	42.64
2401738	Puente Peralonso	0.7035	0.3373	-0.4253	6.11	10.59	15.24	32.07	43.5
2401745	Puente Pinilla	0.6315	0.3313	-0.4926	5.55	10.2	15.37	35.83	50.81
2401749	Puente Merchán				30.61	46.98	61.26	77.17	124.61
2401751	Nariño	0.4217	0.3016	-0.641	4.96	11.17	19.12	57.62	90.72
2401755	La Malilla	0.6061	0.3698	-0.4802	5.99	11.7	17.95	42.31	59.88
2401780	Corralejas	0.7968	0.346	-0.3164	0.9	1.44	1.96	3.56	4.52
2401793	Fúquene - Ticha Maria	1.0062	0.2882	0.013	9.87	13.01	15.13	19.48	21.26
2401794	Monasterio	0.3995	0.3614	-0.604	12.78	31.73	55.15	162.99	252.07
2401795	Ticha Muñoz	0.4605	0.4188	-0.5343	1.95	4.77	7.99	21.49	31.82
2401798	El Hato	0.9773	0.327	-0.0422	5.1	7.06	8.46	11.54	12.88
24017150	La Boyera	0.7547	0.3845	-0.3376	8.05	13.83	19.35	37.16	48.11
24017570	San Benito	1.026	0.1497	0.1041	1,416.52	1,635.92	1,771.13	2,019.38	2,110.23
24017580	Justo Pastor Gomez	0.937	0.1182	-0.2925	154.49	183.03	209.1	288.3	334.59
24017590	Pte Nacional	0.928	0.1571	-0.2576	313.84	388.78	454.93	646.98	754.82
24017600	Monquirá	0.9758	0.2237	-0.0655	157.19	200.21	231.62	302.91	334.9
24017610	Boquerón	0.9699	0.2615	-0.0696	37.28	49.22	57.98	77.95	86.96
24017640	La Ceiba	1.0244	0.1365	0.1073	1,442.65	1,646.67	1,772.00	2,001.20	2,084.74
24017740	Pte Chacon	0.9656	0.1722	-0.1195	28.31	34.67	39.57	51.47	57.16
24017820	Bocatoma	0.8672	0.167	-0.3972	0.38	0.49	0.61	1.02	1.28
24017830	Sutamarchán	0.8869	0.3229	-0.2029	44.04	64.88	82.31	129.44	154.3

Código	Nombre	Parámetros GLO			Q _{Max} (m ³ /s)				
		Localización n (s)	Escala (α)	Forma (k)	2.33	5	10	50	100
24017900	Bocatoma Arriba	0.7835	0.2014	-0.4828	2.2	3.15	4.19	8.25	11.19

Fuente: Autor mediante la utilización del software L-RAP

3.7. Etapa 7: Mapas rendimiento hídrico caudales máximos para diferentes periodos de retornos

A partir de los caudales estimados en el numeral 3.4.Etapa 4, se generaron los mapas de rendimientos hídricos para periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 50 y 100 años los cuales se presenta en la Ilustración 16 a la Ilustración 20.

Posteriormente, a partir de los mapas de rendimientos hídricos, se estimaron los caudales máximos para las estaciones hidrológicas seleccionadas para los diferentes periodos de retorno. Los resultados se presentan en la Tabla 29, en las columnas denominadas Cal1.

Para la comparación de la variabilidad de los caudales observados y los generados a partir de los mapas de rendimiento hídricos, se establecieron escalas del porcentaje variación, las cuales se representan con la siguiente escala de color.

Color	Variación
Verde	0 %– 30%
Amarillo	30% – 50%
Naranja	50% 100%
Rojo	< 100%

De la comparación entre los caudales para el periodo de retorno de 2.33, se tiene que 15 estaciones presentaron una variación del caudal máximo inferior al 30%, 3 estaciones entre el 30% y 50 %, 4 estaciones entre 70% y 100 % y el 100%, y 8 estaciones con variaciones superiores al 100%. Para los restantes periodos de

retorno aumentan las estaciones con variaciones del caudal máximo superior al 100%.

Con respecto a los caudales para el periodo de retorno de 5 años, 14 estaciones presentaron una variación del caudal máximo inferior al 30%, 4 estaciones entre el 30% y 50 %, 3 estaciones entre 70% y 100 % y el 100%, y 8 estaciones con variaciones superiores al 100%. Para los restantes periodos de retorno aumentan las estaciones con variaciones del caudal máximo superior al 100%

Para los caudales para el periodo de retorno de 10 años, 13 estaciones presentaron una variación del caudal máximo inferior al 30%, 5 estaciones entre el 30% y 50 %, 4 estaciones entre 70% y 100 % y el 100%, y 8 estaciones con variaciones superiores al 100%. Para los restantes periodos de retorno aumentan las estaciones con variaciones del caudal máximo superior al 100%.

Continuando con lo anterior, los caudales para el periodo de retorno de 50 años, 10 estaciones presentaron una variación del caudal máximo inferior al 30%, 4 estaciones entre el 30% y 50 %, 7 estaciones entre 70% y 100 % y el 100%, y 9 estaciones con variaciones superiores al 100%. Para los restantes periodos de retorno aumentan las estaciones con variaciones del caudal máximo superior al 100%.

Para finalizar, los caudales para el periodo de retorno de 50 años, 8 estaciones presentaron una variación del caudal máximo inferior al 30%, 6 estaciones entre el 30% y 50 %, 7 estaciones entre 70% y 100 % y el 100%, y 9 estaciones con variaciones superiores al 100%. Para los restantes periodos de retorno aumentan las estaciones con variaciones del caudal máximo superior al 100%.

Es de anotar que para los distintos periodos de retorno, se evidenció que 8 estaciones presentaron variaciones significativas. En la Tabla 28 se relacionan información sobre las estaciones con variaciones mayores al 100%, incluyendo algunas observaciones del autor, que buscan encontrar una razón física que explique las grandes variaciones entre los caudales observados y los generados partir de los mapas de rendimiento hídricos.

Tabla 28. Estaciones con variaciones significativas (> 100%).

Código	Nombre	Área Km2	Corriente	Propietario	Sub Zona	Máximo	Media	Observación
2401713	Garavito	1,753	R. Suárez	CAR	Alta	110.08	57.08	Estación se localiza después sistema hidráulico Fúquene – Cucunubá y Palacios
2401714	Tapias	165.5	R. Lenguazaque	CAR	Alta	23.77	6.38	Existe incertidumbre sobre la delimitación del área drenaje debido a la localización de la estación.
2401729	Puente Colorado	785.8	R. Ubaté	CAR	Alta	23.48	20.3	Existe incertidumbre sobre la delimitación del área drenaje debido a la localización de la estación.
2401733	Pte La Balsa	222.8	R. Lenguazaque	CAR	Alta	36.83	15.29	Estación se localiza después de la Laguna de Cucunubá
2401749	Puente Merchán	1,640	R. Suárez	CAR	Alta	94.85	33.19	Estación se localiza después sistema hidráulico Fúquene – Cucunubá y Palacios
2401795	Ticha Muñoz	48.4	Q. Niya	CAR	Alta/	17.11	9.28	Estación se localiza antes de La Laguna de Fúquene. Existe incertidumbre sobre la delimitación del área drenaje debido a la localización de la estación.
24017150	La Boyera	175	R. Ubaté	IDEAM	Alta	32.34	9.64	Existe incertidumbre sobre la delimitación del área drenaje debido a la localización de la estación.
24017820	Bocatoma	79.3	Cane	IDEAM	Baja	0.97	0.42	Existe incertidumbre sobre la delimitación del área drenaje debido a la localización de la estación.

Del mismo modo, vale la pena mencionar que las estaciones con variaciones mayores al 100%, se localizan en la cuenca alta del río Suárez, la cual presenta el índice de estado actual de coberturas naturales IEACN³, como transformada (Corpoboyacá; CAR y Fondo de Adaptación, 2018)

Por otro lado, teniendo en cuenta el análisis anterior, se decidió realizar una segunda interpolación con los valores de rendimientos hídricos para los distintos periodos de retorno, descartando las 8 estaciones indicadas anteriormente, y estimando nuevamente el caudal máximo para las estaciones hidrológicas, resultados que se presentan en la Tabla 29, en las columnas denominadas Cal2.

Para finalizar, se realizó la comparación de la variabilidad de los caudales observados y los generados a partir de la segunda versión de los mapas de rendimiento hídricos, usando la misma escala de porcentaje, encontrando variaciones mayores superiores a las calculadas inicialmente.

³ Índice del estado actual de las coberturas naturales (IEACN): se muestran de manera consolidada los resultados de las calificaciones relacionadas con el estado actual por tipo de cobertura natural de los indicadores de vegetación remanente, tasa de cambio de la cobertura, índice de fragmentación e índice de ambiente crítico (modificado de MAVDT, IGAC, 2010), tomando valores entre 0 y 80 dependiendo del grado de transformación o conservación de las coberturas.

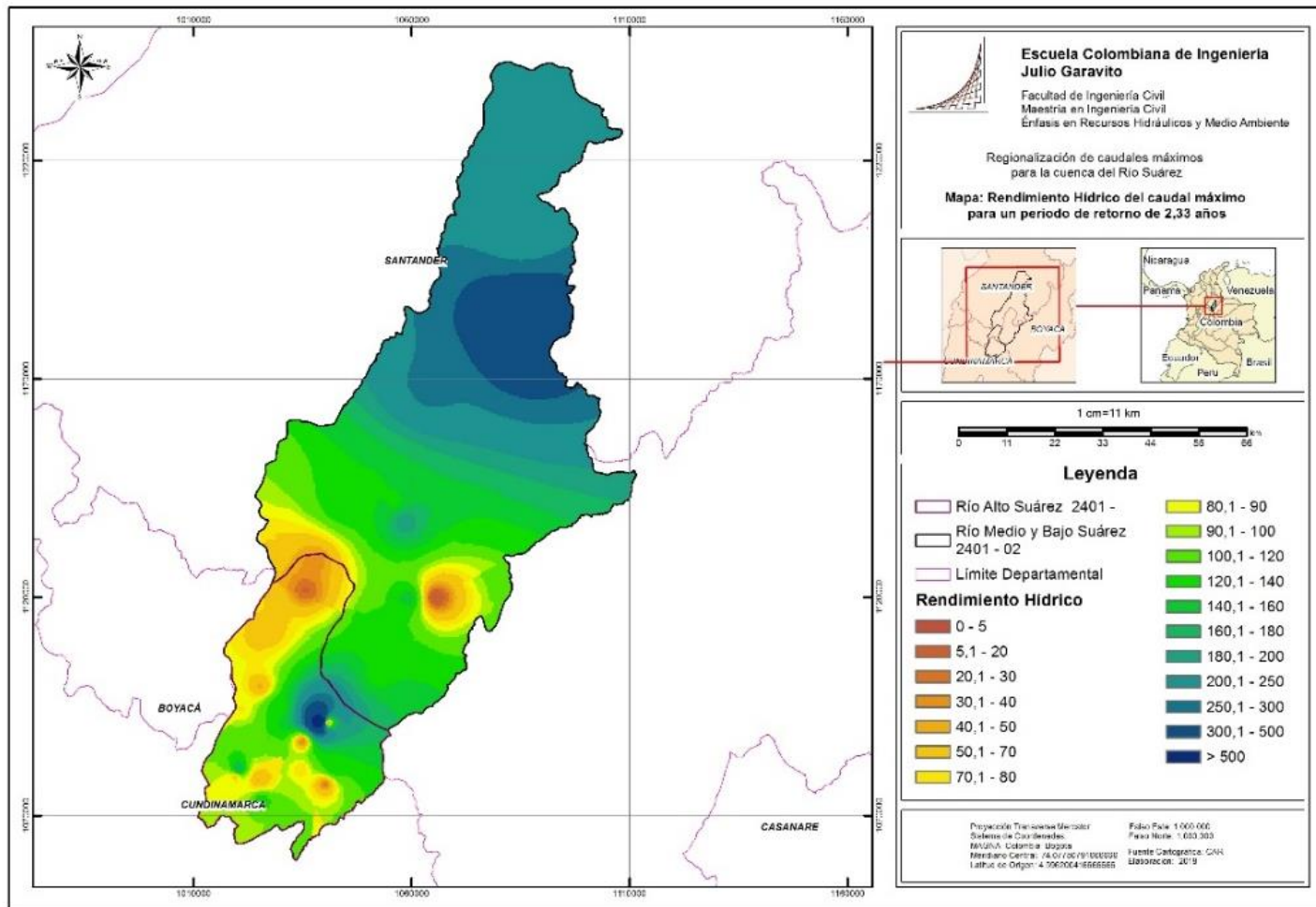


Ilustración 16. Mapa rendimiento hídrico caudal máximo 2.33 años.

Fuente: Autor a partir de información CAR – IDEAM

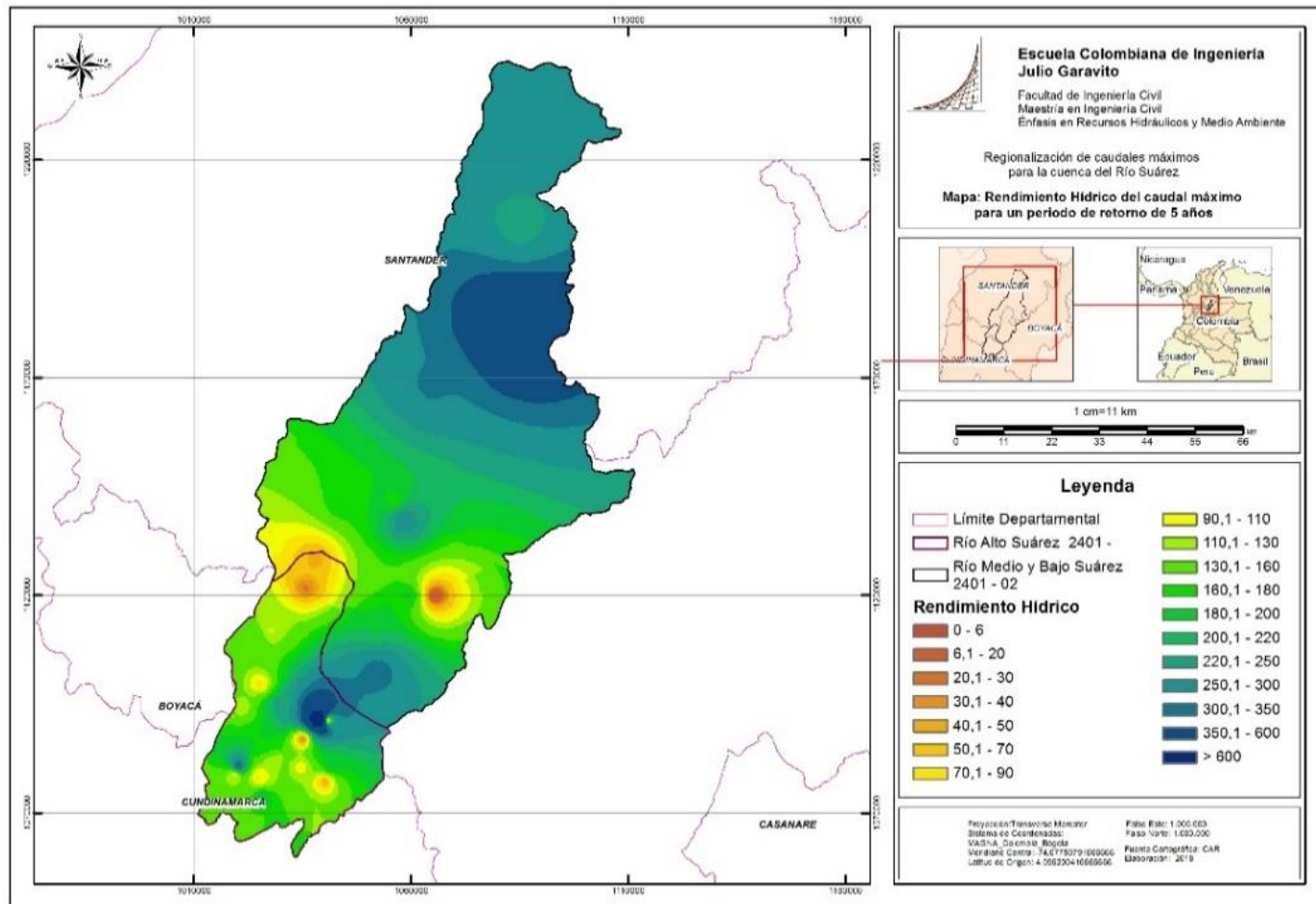


Ilustración 17. Mapa rendimiento hídrico caudal máximo 5 años.

Fuente: Autor a partir de información CAR – IDEAM

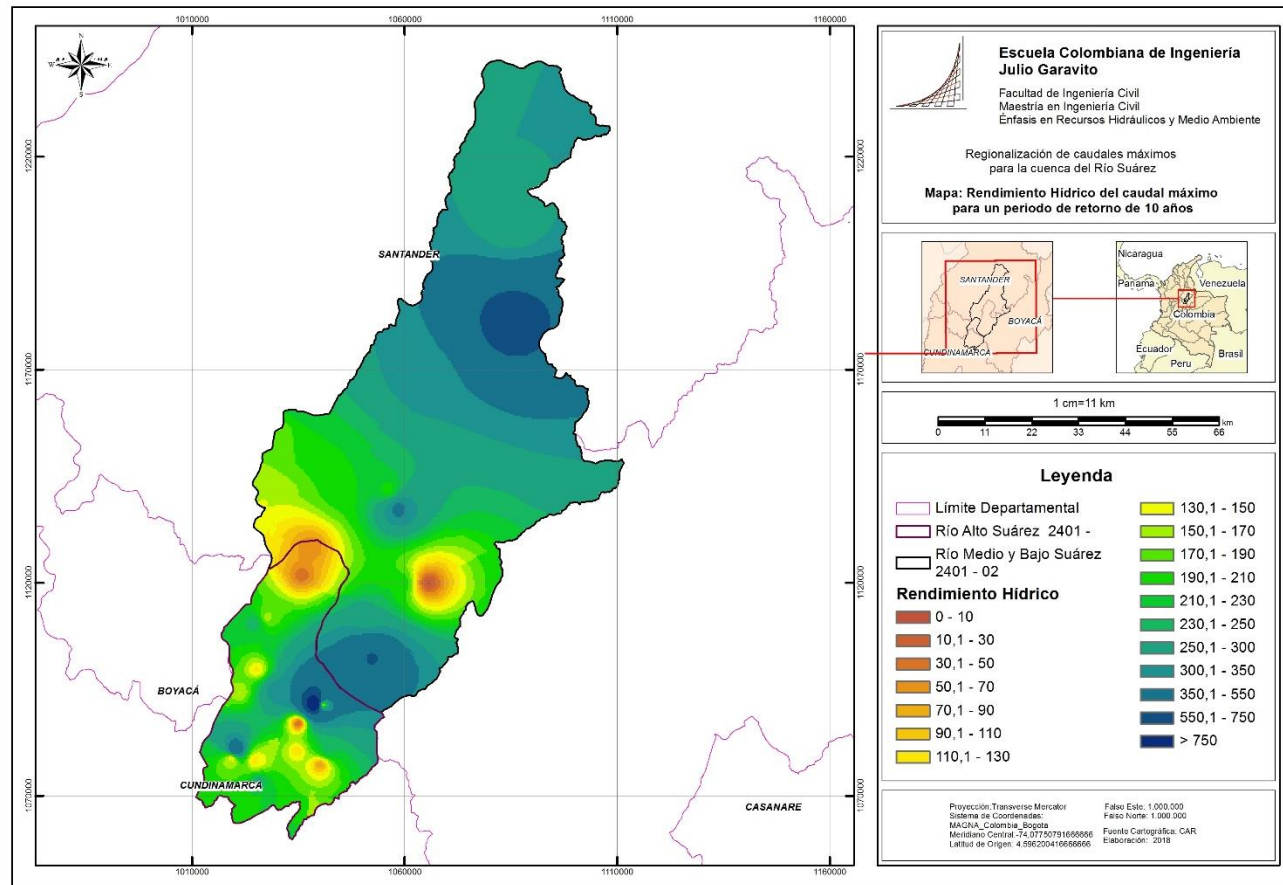


Ilustración 18. Mapa rendimiento hídrico caudal máximo 10 años.
 Fuente: Autor a partir de información CAR – IDEAM

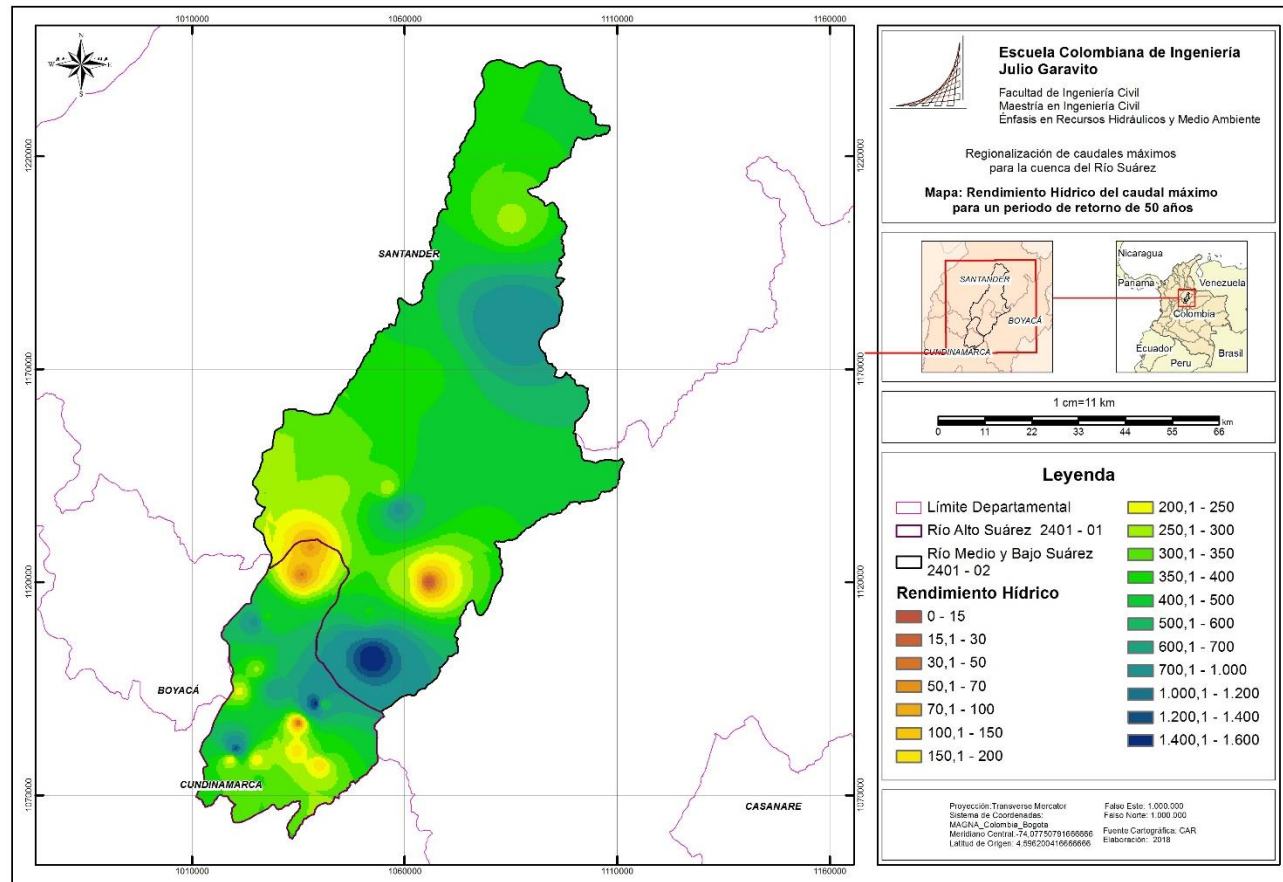


Ilustración 19. Mapa rendimiento hídrico caudal máximo 50 años.
 Fuente: Autor a partir de información CAR – IDEAM

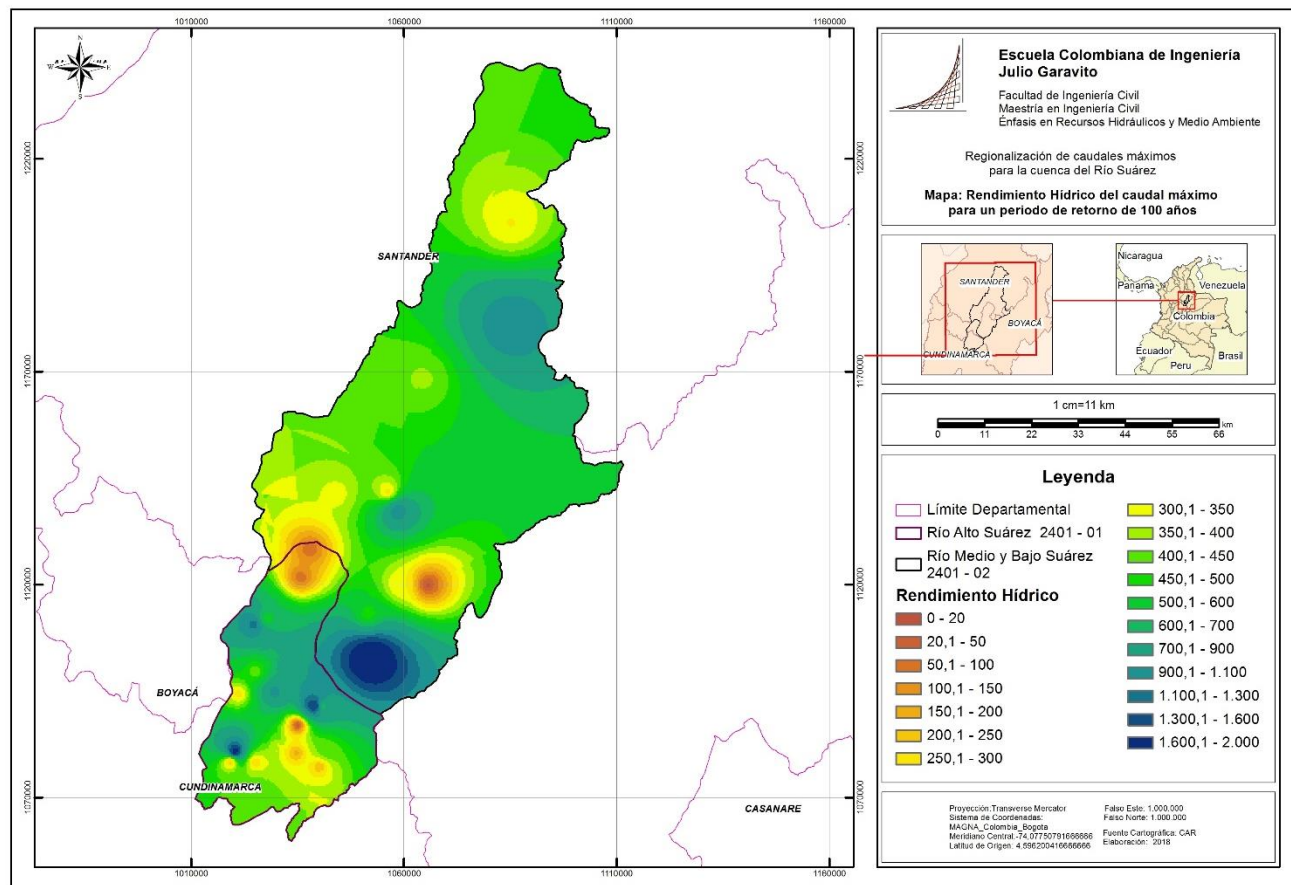


Ilustración 20. Mapa rendimiento hídrico caudal máximo 100 años.
 Fuente: Autor a partir de información CAR – IDEAM

Tabla 29. Comparación de Caudales m³/s observados frente a los calculados mediante los mapas de rendimientos hídricos.

Periodo de retorno		2.33					5					10				
Código	Nombre	Obs	Cal 1	Cal 2	% Var 1	% Var 2	Obs	Cal 1	Cal 2	% Var 1	% Var 2	Obs	Cal 1	Cal 2	% Var 1	% Var 2
2401738	Puente Peralonso	6.1	5.9	7.0	4%	14%	10.6	9.3	11.0	12%	4%	15	12.6	14.84	18%	1%
2401723	El Boquerón	23.5	25.1	36.5	7%	55%	37.6	36.8	53.3	2%	42%	50	47	67.56	6%	35%
2401798	El Hato	5.1	4.7	5.6	7%	9%	7.1	7.6	8.7	7%	23%	8.5	10.2	11.64	20%	37%
24017600	Moniquirá	157.2	143.2	187.9	9%	20%	200.2	225.4	290.6	13%	45%	232	311	396.37	34%	71%
24017830	Sutamarchán	44	48.3	55.9	10%	27%	64.9	86	97.9	33%	51%	82	127.1	143.34	54%	75%
24017900	Bocatoma Arriba	2.2	2	2.1	11%	2%	3.2	2.8	3.0	13%	5%	4.2	3.6	3.96	14%	6%
24017640	La Ceiba	1442	1199.1	1,434.0	17%	1%	1647	1586.1	1920.8	4%	17%	1772	1946.2	2373.57	10%	34%
2401751	Nariño	5	5.9	6.2	19%	24%	11.2	10.9	11.5	2%	3%	19	16.8	17.68	12%	7%
2401793	Fúquene - Ticha Maria	9.9	7.9	15.0	20%	52%	13	11.3	20.4	13%	57%	15	14.2	24.44	6%	63%
2401794	Monasterio	12.8	15.3	18.1	20%	41%	31.7	28.4	32.7	11%	3%	55	43.1	48.86	22%	11%
24017590	Pte Nacional	313.8	248.9	357.1	21%	14%	388.8	372.2	529.0	4%	36%	455	487.9	688.29	7%	51%
2401745	Puente Pinilla	5.6	6.9	7.3	25%	31%	10.2	13	13.7	27%	35%	15	20.1	21.15	31%	41%
2401716	Pino El	10.5	7.7	9.2	27%	13%	15.7	11.9	14.2	24%	10%	19	15.6	18.38	20%	3%
24017580	Justo Pastor Gomez	154.5	110.6	115.0	28%	26%	183	132.7	138.7	27%	24%	209	152.6	160.10	27%	23%
2401722	San Agustín	4.7	6	4.1	29%	12%	6.9	9.6	10.0	39%	44%	8.8	13	13.53	47%	54%
24017610	BOQUERÓN	37.3	25.1	36.5	33%	2%	49.2	36.8	0.0	25%	100%	58	47	67.56	19%	16%
2401755	La Malilla	6	3.7	3.8	39%	36%	11.7	6.3	6.5	46%	44%	18	9	9.23	50%	49%
24017570	San Benito	1416	729.8	951.0	48%	33%	1636	1029.2	1344.5	37%	18%	1771	1316.5	1718.44	26%	3%
24017740	Pte Chacon	28.3	13.8	30.4	51%	7%	34.7	19	41.9	45%	21%	40	23.9	52.87	40%	32%
2401715	La Boyera - CAR	10.8	17.2	19.5	59%	80%	17.6	28.8	0.0	63%	100%	24	40.1	44.84	71%	87%
2401780	Corralejas	0.9	1.6	1.7	76%	91%	1.4	2.5	2.8	77%	97%	2	3.5	3.73	77%	86%
2401730	Puente Guzmán	5	10	10.2	98%	104%	9	16	16.3	78%	82%	13	21.7	22.23	62%	71%
24017150	La Boyera	8.1	17.2	19.5	113%	141%	13.8	28.8	32.3	108%	134%	19	40.1	44.84	107%	136%
2401713	Garavito	59.5	196.2	281.3	230%	373%	76.9	301.6	424.5	292%	452%	89	400.3	555.67	350%	524%
2401729	Puente Colorado	23.3	81.9	112.9	252%	384%	23.5	124.7	170.7	430%	626%	24	162.8	221.43	590%	823%
2401714	Tapias	4.7	18.1	26.9	287%	472%	7.8	26.6	39.5	243%	406%	11	34.1	50.31	202%	357%
2401795	Ticha Muñoz	2	9.3	15.5	377%	677%	4.8	13.9	22.2	192%	363%	8	18.2	27.88	128%	249%
2401749	Puente Merchán	30.6	190.5	265.6	522%	768%	47	293.1	400.9	524%	753%	61	389.1	524.04	535%	759%
2401733	Pte La Balsa Lenguazaque	15.8	170	29.3	977%	85%	21.7	257.3	352.1	1088%	1523%	26	336.4	0.00	1184%	100%
24017820	Bocatoma	0.4	5.4	12.9	1325%	3132%	0.5	7.7	18.4	1472%	3573%	0.6	9.9	23.60	1526%	3833%

Fuente: Autor a partir de información CAR – IDEAM

Continuación Tabla 24.

Periodo de retorno		50					100				
Código	Nombre	Obs	Cal 1	Cal 2	% Var 1	% Var 2	Obs	Cal 1	Cal 2	% Var 1	% Var 2
2401738	Puente Peralonso	32.1	23.7	27.79	26%	13%	43.5	31	36.30	29%	17%
2401723	El Boquerón	87.4	78.2	109.79	10%	26%	108.6	97.5	135.22	10%	25%
2401798	El Hato	11.5	18.5	20.88	60%	82%	12.9	23.7	26.75	84%	107%
24017600	Moniquirá	302.9	644.8	803.89	113%	165%	334.9	896.5	1107.86	168%	231%
24017830	Sutamarchán	129.4	296.7	329.67	129%	155%	154.3	429.3	474.61	178%	208%
24017900	Bocatoma Arriba	8.3	6.8	7.47	17%	10%	11.2	9.1	9.97	19%	11%
24017640	La Ceiba	2001	3162.2	3912.56	58%	96%	2085	3992.4	4959.98	91%	138%
2401751	Nariño	57.6	42.1	44.28	27%	23%	90.7	62.6	65.66	31%	28%
2401793	Fúquene - Ticha Maria	19.5	22.8	34.49	17%	77%	21.3	28.2	39.78	33%	87%
2401794	Monasterio	163	105.4	116.68	35%	28%	252.1	154.9	170.26	39%	32%
24017590	Pte Nacional	647	879.9	1225.09	36%	89%	754.8	1150.4	1587.90	52%	110%
2401745	Puente Pinilla	35.8	51	53.58	42%	50%	50.8	76	79.72	50%	57%
2401716	Pino El	27.6	26.3	30.67	5%	11%	31.3	32.6	37.95	4%	21%
24017580	Justo Pastor Gomez	288.3	213.9	226.38	26%	21%	334.6	251.1	266.97	25%	20%
2401722	San Agustín	13.9	24.2	25.44	73%	83%	16.6	31.4	33.26	89%	100%
24017610	BOQUERÓN	78	78.2	109.79	0%	41%	87	97.5	135.22	12%	55%
2401755	La Malilla	42.3	18.6	18.88	56%	55%	59.9	25.2	25.48	58%	57%
24017570	San Benito	2019	2325.7	3025.96	15%	50%	2110	3036.7	3935.60	44%	87%
24017740	Pte Chacon	51.5	40.7	90.69	21%	76%	57.2	52.4	116.77	8%	104%
2401715	La Boyera - CAR	39.9	79.3	87.99	99%	121%	48.9	105.5	116.90	116%	139%
2401780	Corralejas	3.6	6.5	6.94	83%	93%	4.5	8.5	9.03	87%	101%
2401730	Puente Guzmán	31.1	41.1	42.18	32%	36%	44.2	53.9	55.39	22%	25%
24017150	La Boyera	37.2	79.3	87.99	113%	137%	48.1	105.5	116.90	119%	143%
2401713	Garavito	115.1	735.2	991.93	539%	762%	126.2	965.7	1284.35	665%	918%
2401729	Puente Colorado	23.7	281.9	376.91	1092%	1490%	23.7	356.3	473.06	1406	1896%
2401714	Tapias	25.7	57.2	82.59	123%	221%	36.4	71.5	102.23	96%	181%
2401795	Ticha Muñoz	21.5	32.6	45.55	52%	112%	31.8	42.6	57.10	34%	80%
2401749	Puente Merchán	77.2	715.2	930.73	827%	1106%	124.6	938.4	1201.72	653%	864%
2401733	Pte La Balsa Lenguazaque	37.3	593.5	0.00	1491%	100%	42.6	761.3	0.00	1685	100%
24017820	Bocatoma	1	17.8	42.20	1646%	4120%	1.3	23.4	23.60	1729	1715%

Fuente: Autor a partir de información CAR – IDEAM

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se identificaron 66 estaciones hidrológicas en la cuenca del río Suárez de las cuales se seleccionaron 30 estaciones que se encuentran activas y presenta un porcentaje de completitud del 70% en el periodo comprendido del año 1991 al 2015. Espacialmente 18 estaciones se localizan en la parte alta de la cuenca y 12 en la parte Media y Baja. Vale la pena aclarar que, a pesar de que algunas estaciones cuentan con registros históricos desde los años sesenta, para el presente estudio, se optó por un registro homogéneo de los datos, que considerara también el grado de conservación o intervención de la cuenca en este mismo periodo de tiempo.

Se determinaron para las áreas de drenaje de las estaciones hidrológicas seleccionadas 10 variables morfométricos, entre las cuales se encuentra, el área, ancho, pendiente media de la cuenca, perímetro, coeficientes de forma, compacidad y alargamiento, la densidad de drenaje, la sinuosidad y las longitudes axial y valle.

Así mismo, a partir de los productos cartográficos de los Planes de Ordenación y Manejo de las cuencas hidrográficas - POMCAs de los ríos Alto y Medio y Bajo Suárez, los cuales se encuentran aprobados por las Autoridades Ambientales respectivas, se determinaron para las cuencas de drenaje de las estaciones seleccionadas la precipitación total multianual, la precipitación máxima en 24 horas, y el Grupos hidrológicos de suelo (Número de Curva) mediante el cruce de los mapas de cobertura de la tierra y unidades geológicas superficiales.

Se establecieron 2 propuestas de grupos de estaciones, basado en criterios geográficos y físicos. Buscando que estas posean características hidrológicas similares. La primera propuesta se basó en el criterio de zonificación hidrográfica, conformando dos regiones, la primera, agrupo las estaciones hidrológicas localizadas en la cuenca alta del río Suárez, segunda las estaciones ubicadas en la cuenca median y baja del río Suárez. La segunda propuesta se realizó en función del área de las cuencas de drenaje de las estaciones hidrológicas, en este caso, se conformaron dos (2) regiones. La región 1, la cual relaciona las estaciones hidrológicas con áreas (\geq) a 110 km², y la región 2, la cual agrupa las estaciones con áreas (\leq) a 110 km².

Para cada una de las estaciones conformadas se realizó un proceso de regresión múltiple buscando encontrar la relación estadística que mejor explique la relación entre el \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ con las variables físicas y morfométricos de las diferentes estaciones hidrológicas, a partir de las cuales obtuvieron los parámetros para la elaboración de las ecuaciones regionales para el \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$.

La selección de las regresiones para la determinación de los parámetros de las ecuaciones tuvo en cuenta el cumplimiento de ciertos determinantes estadísticos. En primer lugar, que el coeficiente de determinación (R²) fuera cercano a 1. De igual forma se verificó que el valor T calculado para las variables físicas y morfométricos utilizadas fuera superior al T teórico de acuerdo a los grados de libertad para un nivel de confianza del 95%. Posteriormente una vez aceptados los resultados de las pruebas mencionadas, se seleccionó aquella que presentará un error cuadrático medio (MCE) y desviación de la raíz cuadrada media (RSME) cercano a 0.

Una vez seleccionadas las regresiones de mayor ajuste para cada una de las regiones homogéneas, se extrajeron los coeficientes de las ecuaciones para el cálculo del \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$. En tal sentido se obtuvieron dos (2) ecuaciones para cada una de las regiones que conforman las dos (2) propuestas, para un total de 8 ecuaciones.

Comparando los caudales máximos proyectados para distintos periodos de retorno con la distribución Gumbel – valores extremos tipo I, con los parámetros de las series (\bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$) y los caudales estimados con la misma distribución pero con los parámetros estimados con las ecuaciones, encontrado que los valores estimados para las regiones de la propuesta 1 (zonificación hidrográfica) presentaron variaciones menores con respecto a la propuesta 2 (rango de áreas).

Para la validación y comparación de resultados, se utilizó la ecuación de regionalización de caudales máximos mediante el método de multiescalonamiento, presentada en el documento Atlas Hidrológico de Colombia – UNAL- Sede Medellín – 2002, obteniendo mayores variaciones del caudal máximo, en comparación con los calculados con la distribución Gumbel con los parámetros obtenidos a partir de las ecuaciones de la propuesta 1.

Se calcularon los caudales máximos para periodos de retorno de 2,33, 5, 10, 50 y 100 años, mediante diferentes tipos de distribuciones de frecuencia: Generalizada Logística (GLO), Generalizada de Pareto (GPA), Generalizada del Valor Extremo (GEV), Generalizada Normal (GNO) y Pearson Tipo III (PE3), utilizando el método de L Momentos, para el cálculo de los parámetros de la distribución, mediante la utilización software L – RAP.

Mediante la aplicación de la medida de bondad de ajuste Z^{DIST} la cual se basa en las estadísticas medidas de los L-momentos regionales, se identificó que la distribución Generalizada Logística (GLO) presenta el mejor ajuste regional a los registros de caudal máximo mensual multianual (absolutos).

Posteriormente se generaron mapas de rendimientos hídricos de caudales máximos para los distintos periodos de retorno, a partir de los cuales se estimó el caudal máximo para de las 30 estaciones hidrológicas seleccionados, encontrando en general que 15 estaciones presentaron una variación frente a los valores observados inferior al 30%, 3 estaciones entre el 30% y 50 %, 2 estaciones entre 50% y 70 %, 2 entre el 70% y el 100, y 8 estaciones con variaciones superiores al 100%.

A partir de las herramientas generadas en el presente estudio, como los son las ecuaciones para el cálculo del \bar{Q}_{Max} y $\sigma_{\bar{Q}_{Max}}$ y los mapas de rendimientos hídricos, es posible obtener el caudal máximo en cualquier parte de la cuenca. Sin embargo, se aconseja usar las ecuaciones de la propuesta 1, porque presenta un nivel de confían aceptable, así mismo se advierte, que no es recomendable el uso de los mapas de rendimientos hídricos, por las variaciones tan significativas de los resultados obtenidos, los cuales pueden ser atribuibles al grado de intervención de la cuenca alta.

El uso de las ecuaciones de regionalización presenta resultados con un grado de confianza mayor en cuencas con áreas superiores 250 km², ya que en estas se puede deprecia las intervenciones ocasionas por las obras de control y regulación. Por el contrario, en cuencas pequeñas, los efectos de las obras hidráulicas pueden generar micro regulaciones hídricas, no tenidas en cuenta en el proceso de regionalización.

La cuenca alta del río Suárez, presenta un nivel de intervención hidrológica considerable, por el hoy denominado Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y de Control de Inundaciones Fúquene - Cucunubá, el cual se compone por los ríos principales como el río Suárez y Ubaté (166.7 km), las lagunas de Palacios, y Cucunubá y Fúquene, embalse del Hato y por canales y vallados (214.85 km), y cientos de estructuras hidráulicas, entre las cuales se encuentran compuertas y estaciones de bombeo, que regulan y controlan los picos de caudal máximo.

Entre las compuertas principales, se encuentra: las compuertas Tolón, sobre el río Suárez, las compuertas Madrón, sobre el río Madrón, las compuertas Cubio, sobre el río Ubaté, las compuertas Cartagena sobre el canal Cucunubá y las compuertas Soltará, Sunubá y Flórez sobre el río Suta, no obstante el sistema cuenta con aproximadamente 89 compuertas y 81 estaciones de bombeo, las cuales en su mayoría no cuentan con instrumentalización, como tampoco protocolos de operación, lo que complejiza la elaboración de estudios como el desarrollado en el presente documento.

Para próximos estudios relacionados en la cuenca del río Suárez, es recomendable, analizar a detalle, y si es posible con visita técnica, la localización de algunas estaciones hidrológicas, entre las cuales se encuentran Garavito, Tapias, Puente Colorado, Pte La Balsa, Puente Merchán, Ticha Muñoz, La Boyera y Bocatoma, así como adelantar la delimitación de sus áreas de drenaje con cartografía a escala 1: 10.000 o a mayor detalle.

A la terminación de este estudio, se evidencio que la CAR, realizo verificación y ajuste de la georreferenciación de la red hidroclimatologica, encontrando que la estación limnigráfica Pte Barcelona (código 2401731), la cual fue descartada en la etapa de selección, porque se ubicaba fuera de la cuenca objeto de estudio, esta se localiza sobre el río Ubaté, aguas arriba de la estación Pte Colorado (código 2401729), la cual presenta un registro continuo de caudales absolutos desde 1971 hasta la fecha.

De mismo modo, comparado los registros históricos de las estaciones Pte Barcelona y Pte Colorado, se evidencio, la estación Barcelona, a pesar de que se localiza aguas arriba de Pte Colorado, presenta caudales máximos mayores. Así mismo, revisando el catálogo de estaciones de la CAR, desde el 2019 para la estación Pte

Colorado, ya no se muestran registros de caudal, posiblemente por errores de medición o calibración de la estación.

Para terminar, se recomienda, incluir en futuros estudios de regionalización de caudales máximos, el análisis de estaciones de nivel, con las cuales se podría incorporar las regulaciones hidrológicas ocasionadas por las obras de control, en especial en la cuenca alta del río Suárez.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad, U. N. (2011). *Flood Frequency Analysis of Annual Maximum Stream Flows Using L-Moments and TL-Moments*. University Malaysia.
- Ayros, E., & Salazar, J. (2011). *Análisis regional de avenidas usando el método L-Moments caso de estudio: La costa central del Perú*. III Congreso Nacional del Agua UNMSM.
- Banco Mundial. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas*. Bogotá.
- Bradley, A., & Zhao, H. (1997). Climatic variations in extreme precipitation in the Midwest (Submitted to Journal of Hydrologic Engineering). *University of Iowa*.
- CEPAL; BID. (2007). *Información para la gestión de riesgo de desastres estudio de caso de 5 países*.
- Chereque, W. (1989). *Hidrología*. Lima: Pontificia Universidad Católica de Perú.
- Chow, V. (1964). *Statistical and probability analysis of hydrologic data; part I: frequency analysis*. In: *Handbook of applied hydrology; a compendium of water resources technology*. New York: McGraw-Hill.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill.
- Colombia Humanitaria. (2013). *Estudio de caso. Experiencia derivada de la respuesta del Estado colombiano frente a la emergencia invernal producida por el fenómeno de La Niña 2010-2011*.
- Corpoboyacá; CAR y Fondo de Adaptación. (2018). *Ajuste del Plan Ordenación y Manejo de la cuenca del río Alto Suárez*.
- Corpoboyacá; CAR; CAS. (2018). *Actualización POMCA río Medio y Bajo Suárez*.

- Cristina Castillo; Natalia Ortiz. (2015). *Regionalización de Caudales máximos en la cuenca del río Sinú por medio del método estadístico índice de creciente*. Bogotá: Universidad Santo Tomás.
- Cunnane, C. (1989). Statistical Distributions for Flood Frequency Analysis. *World Meteorological Organization Operational Hydrology*.
- Enjo, M. Á. (2000). *Ánalysis regional de frecuencias aplicado a las precipitaciones máximas y avenidas*. Santiago de Compostela: Universidad de Santiago de Compostela.
- Galeano, L. N. (2015). *Adaptación del Método L-Moments para la regionalización de eventos máximos para las cuencas de Colombia*. Bogotá.
- Gutierrez, P. (2012). *Regionalización de Caudales en la cuenca del río Meta para el sector agropecuario hasta la estación limnigráfica Aguaverde*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Hosking, J., & Wallis, J. (1997). *Regional Frequency Analysis: an approach based on L-moments*. Cambridge University Press.
- IDEAM. (2010). *IDEAM - MINAMBIENTE*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/ia>
- IDEAM. (2013). *Zonificación y Codificación Unidades Hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia*. Bogotá: Publicaciones IDEAM.
- IDEAM. (2018). *Modelación Hidrológica - Amenazas por Inundación*. Bogotá.
- Joel Gutiérrez Lozano, V. V. (2011). Periodos de retorno de lluvias Torrenciales para el estado de Tamaulipas México. . *Investigaciones geográficas* .
- M. Alvarez, J. P. (1999). *Análisis regional de las precipitaciones máximas en Galicia mediante el método del índice de avenida*. . Galicia.

- Melisa, J., & Reason, C. (2007). Return period of extreme rainfall at George, South Africa. *Journal of Science*, 499 - 501.
- Mesa, O., Vélez, J., Giraldo, J., & Quevedo, D. (2003). Adaptación del método de Multiescalamiento para la estimación de Caudales Máximos en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 149-156.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Decreto 1640 de 2012 - Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones*. Bogotá.
- Noto, L. V., & Loggia, G. L. (2007). *Use of L-Moments Approach for Regional Flood Frequency Analysis in Sicily. Italy*. Palermo: University of Palermo.
- Núñez, L. (2015). *Adaptación del método L-Moments para la regionalización de eventos máximos para las cuencas de Colombia*. Bogotá: Universidad Pontificia Javeriana.
- Okur, A., & Sorman, U. (2000). Application of at site regional regional frequency analyses by using the L-moments technique. *Teknik Dergi*, 2199 - 2218.
- Organización Meteorológica Mundial . (2011). *Guía de prácticas Hidrológicas - Volumen II Sexta Edición*. Ginebra.
- Oscar José Mesa Sanchez, J. I. (2003). Regionalización de características medias de la cuenca con aplicación en la estimación de caudales máximos. *Meteorología Colombiana*, 141-147.
- Prieto, R. B., & Doris Vivian Prieto Valdés, R. A. (2016). Estudio de Aplicación del Análisis Regional de Frecuencias Basado en L-Momentos al caso de las precipitaciones anuales en la provincia de Camaguey, Cuba. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 539-545.
- Rao, R., & Srinivas, V. (2006). Regionalization of watersheds by hybrid-cluster analysis. *Journal of Hydrology*, 37-56.

- Said Arab Khan, I. H. (2017). *Regional Frequency Analysis of extremes precipitation using L-Moments and Partial L-Moments*. Advances in Meteorology.
- Segovia, A. M., & Hang, M. (2010). *Estimación del Valor del Número de Curva (CN) a través de imágenes Satelitales Landsat*. Departamento de Hidráulica - Facultad de Ingeniería UNNE.
- Senado de la república de Colombia. (24 de abril de 2012). Ley 1523 del 24 de abril de 2012. Bogotá, Colombia.
- Sistema Nacional de gestión del riesgo de desastres. (2015). *Implementación de los procesos de gestión del riesgo de desastres, para transferir al FNGRD a nivel nacional*.
- Toledo, R. N. (2011). *Análisis regional de frecuencia mediante el método de los L-Momentos en las regiones de Valparaíso y Metropolitana para la generación de cartografía probabilística de sequía Meteorológica*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Universidad Nacional Autónoma de México. (2012). *Distribuciones de probabilidad*. UNAM.
- Varas, E., & Lara, S. (1998). Métodos regionales para estimar la probabilidad de frecuencia de crecidas. *Ingeniería del Agua*, 51 - 58.
- Vera, J. A., & Mora, R. D. (2013). Un método para el análisis de frecuencia regional de lluvias máximas diarias: aplicación en los Andes Bolivianos. *Revista Chilena de Ingeniería*, 111 - 124.
- Vigilone, A., Laio, F., & Claps, P. (2007). A comparison of homogeneity tests for regional frequency analysis. *Water Resources Research*.
- World Meteorological Organization. (2012). *International Glossary of hydrology*. Ginebra: WMO.
- Yanina, M., & Karen Espejo, G. L. (2016). Morfometría de cuencas como base en la evaluación de la susceptibilidad/peligrosidad por aluviones, caso de estudio:

Cuenca del río del Agua, San Juan, Argentina. *Asociación Geológica Argentina* .

Yurekli, K., & Modarres, R. (2007). Regionalization of Maximum Daily Rainfall data over Tokat Province, Turkey. *International Journal of natural and Engineering sciences*, 01-07.