

PRÁCTICA EMPRESARIAL EN CONSTRUSUELOS DE COLOMBIA S.A.S.
ORIENTADA A LOS ESTUDIOS CLIMATOLÓGICOS, MORFOMÉTRICOS E
HIDROLÓGICOS PARA LA FASE DIAGNÓSTICA DEL PLAN DE ORDENACIÓN
Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA (POMCA) DEL RÍO GUATAPURÍ

DANIEL EDUARDO RUEDA SOSA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2016

PRÁCTICA EMPRESARIAL EN CONSTRUSUELOS DE COLOMBIA S.A.S.
ORIENTADA A LOS ESTUDIOS CLIMATOLÓGICOS, MORFOMÉTRICOS E
HIDROLÓGICOS PARA LA FASE DIAGNÓSTICA DEL PLAN DE ORDENACIÓN
Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA (POMCA) DEL RÍO GUATAPURÍ

DANIEL EDUARDO RUEDA SOSA
Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Civil

Director UIS
WALTER LEONARD ANTOLÍNEZ QUIJANO
Ingeniero Civil, MSc.

Tutor ConstruSuelos de Colombia S.A.S
MIGUEL ÁNGEL CAMARGO JAIMES
Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2016

DEDICATORIA

A mi mamá, Flor Victoria Sosa Peña

A mi papa, William Rueda Gómez

A mi abuelo, Arturo Agustín Sosa Ramírez

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la empresa *ConstruSuelos de Colombia S.A.S.*, a su representante legal, ingeniero Miguel Ángel Camargo y su director técnico, ingeniero Miguel Roberto Silva Monsalve, por abrir espacios entre la academia y el sector privado a través del contrato de aprendizaje que hizo posible este proyecto de grado. También resalto la colaboración directa de los ingenieros José Alfredo Rueda, Adrián Rizo y Viviana Gómez quienes estuvieron a cargo de la coordinación del proyecto y orientaron mi proceso de aprendizaje. También agradezco al profesor Walter Antolínez, quien como representante de la Universidad Industrial de Santander, supervisó y avaló este proyecto de grado.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	14
1. METODOLOGÍA.....	18
1.1 TEMÁTICA DE HIDROGRAFÍA.....	18
1.1.1 Revisión y ajuste de los límites hidrográficos. Error! Marcador no definido.	
1.1.2 Patrón de drenaje.....	19
1.1.3 Densidad de drenaje	20
1.2 TEMÁTICA DE MORFOMETRÍA.....	21
1.2.1 Pendiente media de la cuenca.....	21
1.2.2 Tiempo de concentración	22
1.2.3 Curva hipsométrica.....	23
1.3 TEMÁTICA DE CLIMA.....	26
1.3.1 Tratamiento de la información pluviométrica.....	26
1.3.2 Variabilidad temporal y espacial de la precipitación.....	27
1.3.3 Valores extremos de precipitación.....	28
1.3.4 Curva Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)	29
1.4 TEMÁTICA DE HIDROLOGÍA	30
1.4.1 Curva de duración de caudales	31
2. RESULTADOS	32
3. DISCUSIÓN	49

4. CONCLUSIONES.....	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
BIBLIOGRAFÍA.....	60

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Subzona hidrográfica a nivel subsiguiente del río Guatapurí (2801-01) .	16
Figura 2. Patrones de drenaje	20
Figura 3. Ajuste de la delimitación hidrográfica a escala 1:25,000	33
Figura 4. Subcuencas de la subzona hidrográfica del río Guatapurí	34
Figura 5. Curva hipsométrica	36
Figura 6. Variación temporal de la precipitación media mensual multianual	38
Figura 7. Variación espacial de la precipitación media mensual multianual	39
Figura 8. Variación temporal de la precipitación total anual	40
Figura 9. Variación espacial de la precipitación media anual	41
Figura 10. Precipitación máxima en 24 horas	42
Figura 11. Estación hidrológica.....	45
Figura 12. Caudal medio anual, estación El Reposo.....	46
Figura 13. Caudal medio mensual multianual, estación El Reposo.....	47
Figura 14. Curva de duración de caudales, estación el Reposo	48

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de la densidad de drenaje	21
Tabla 2. Clasificación de la pendiente media de la cuenca	22
Tabla 3. Tiempo de concentración (Tc).....	22
Tabla 4. Parámetros morfométricos	24
Tabla 5. Valores de los coeficientes a, b, c y d para curvas IDF en Colombia.	30
Tabla 6. Parámetros morfométricos de la cuenca	35
Tabla 7. Estaciones meteorológicas del IDEAM usadas en el estudio del clima ...	37
Tabla 8. Variación espacial de valores extremos	43

ANEXOS

ANEXO A. Parámetros hidrográficos por subcuenca.

ANEXO B. Parámetros morfométricos por subcuenca.

ANEXO C. Perfil del cauce principal.

ANEXO D. Estaciones meteorológicas

ANEXO E. Llenado de datos faltantes-precipitación.

ANEXO F. Eventos extremos de precipitación.

ANEXO G. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF).

ANEXO H. Llenado de datos faltantes-caudales.

ANEXO I. Curva de duración de caudales.

NOTA: Ver carpeta anexos en archivo adjunto, que puede ser consultado en base de datos biblioteca UIS.

RESUMEN

TÍTULO:

PRÁCTICA EMPRESARIAL EN CONSTRUSUELOS DE COLOMBIA S.A.S. ORIENTADA A LOS ESTUDIOS CLIMATOLÓGICOS, MORFOMÉTRICOS E HIDROLÓGICOS PARA LA FASE DIAGNÓSTICA DEL PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA (POMCA) DEL RÍO GUATAPURÍ

AUTOR:

DANIEL EDUARDO RUEDA SOSA**

PALABRAS CLAVE:

POMCA, CUENCA, HIDROGRAFÍA, MORFOMETRÍA, CLIMA, HIDROLOGÍA.

DESCRIPCIÓN:

Los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAS) son el resultado de un proceso sistemático para la gobernanza de los recursos naturales que se realizan a una escala de estudio 1:25,000. El diagnóstico es una de las seis fases de la formulación de un POMCA en la que se busca caracterizar la cuenca en aspectos: físico, bióticos, sociales, económicos, culturales, políticos, administrativos, funcionales y de gestión del riesgo.

Este proyecto de grado que se desarrolla en la modalidad de práctica empresarial en *ConstruSuelos de Colombia S.A.S.* aportó a la elaboración de los informes técnicos para las temáticas de Hidrografía, Morfometría, Clima e Hidrología del componente físico-biótico en la fase de diagnóstico del POMCA del río Guatapurí en el departamento del Cesar (Colombia), bajo la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Cesar – CORPOCESAR.

La cuenca del río Guatapurí es una cuenca de alta montaña, alargada, simétrica, tiene un régimen de precipitación bimodal y un caudal medio anual de 15.97 [m³/s]. A la fecha de terminación del proyecto de grado, ninguno informe técnico presentado había sido aprobado, por lo que la información aquí consignada podría variar a la que será presentada en la actualización del POMCA del río Guatapurí.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Walter Leonard Antolinez Quijano, MSc en Ingeniería Civil.

ABSTRACT

TÍTULO:

INTERNSHIP IN CONSTRUSUELOS DE COLOMBIA S.A.S. ORIENTED TO CLIMATOLOGICAL, MORPHOMETRIC AND HYDROLOGICAL STUDIES FOR THE DIAGNOSTIC PHASE OF GUATAPURÍ RIVER'S POMCA (PLANS MADE FOR THE ORGANIZATION AND MANAGEMENT OF WATERSHEDS)*

AUTHOR:

DANIEL EDUARDO RUEDA SOSA **

KEYWORDS:

POMCA, WATERSHED, HYDROGRAPHY, MORPHOMETRY, CLIMATE, HYDROLOGY.

DESCRIPTION:

Plans made for the organization and management of watersheds in Colombia are known as POMCAS (Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas). A POMCA is the result of a systematic process for the governance of natural resources which is formulated in a scale of study 1:25,000. The diagnosis is one of the six phases in the development of a POMCA, it seeks to characterize the watershed in: physical, biotic, social, economic, cultural, political, administrative, functional, and risk management aspects.

This thesis was carried out as an internship at *ConstruSuelos de Colombia S.A.S.* contributed to the preparation of technical reports in Hydrography, Morphometry, Climate and Hydrology thematics, which belong to the biophysical component in the diagnostic phase of Guatapurí River's POMCA. This watershed is located in the province of Cesar (Colombia) under the jurisdiction of the Regional Autonomous Corporation of Cesar - CORPOCESAR.

Guatapurí River's watershed is a high mountain basin, elongated, symmetrical, has a bimodal rainfall regime and an annual water flow 15.97 [m³/s] on average. At the end of completion of this thesis, technical reports submitted had not been approved, consequently, the information reported herein could vary from that which will be presented in the Guatapurí River's POMCA.

* Bachelor Thesis

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: MSc. Walter Antolínez.

INTRODUCCIÓN

El artículo 18 del Decreto 1640 de 2012 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [1] define un Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica como: “Instrumento a través del cual se realiza la planeación del uso coordinado del suelo, de las aguas, de la flora y la fauna y el manejo de la cuenca entendido como la ejecución de obras y tratamientos, en la perspectiva de mantener el equilibrio entre el aprovechamiento social y económico de tales recursos y la conservación de la estructura físico-biótica de la cuenca y particularmente del recurso hídrico”. Estos Planes deberán ser elaborados, coordinados, ejecutados, monitoreados y evaluados por las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible para las subzonas hidrográficas y su nivel subsiguiente. Así mismo, este Decreto indica que el POMCA es “norma de superior jerarquía y determinante ambiental para la elaboración y adopción de los Planes de Ordenamiento Territorial de conformidad con lo dispuesto en el artículo 10 de la Ley 388 de 1997”.

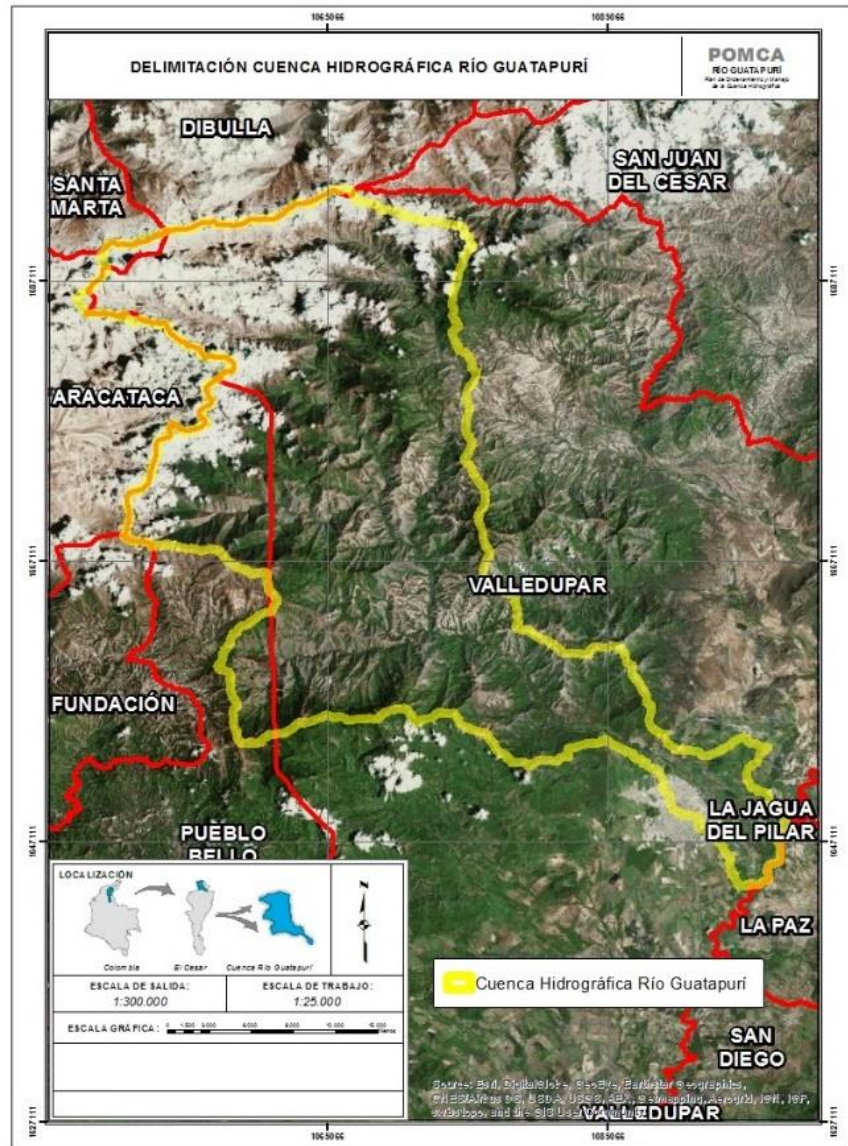
En el año 2013, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM en conjunto con el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC [2] elaboraron la Zonificación Hidrográfica de Colombia a escala 1:500,000. En ese mapa fueron identificados un total de 311 zonas hidrográficas a lo ancho y largo del país entre las que se encuentra la subzona hidrográfica a nivel subsiguiente del río Guatapurí que le corresponde el código 2801-01. La realización del POMCA del río Guatapurí se debe a que esta subcuenca fue priorizada por el Fondo Adaptación para incorporar el componente de Gestión del Riesgo como determinante Ambiental del Ordenamiento Territorial de cuencas afectadas por el Fenómeno de La Niña 2010-2011. Como se muestra en la Figura 1, la cuenca del río Guatapurí se encuentra localizada político administrativamente en el

departamento del Cesar entre los municipios de Valledupar y Pueblo Bello y, además, hidrográficamente en la macrocuenca Magdalena-Cauca y el área hidrográfica del río Cesar.

La formulación y/o actualización de un POMCA considera seis fases: aprestamiento, diagnóstico, prospectiva y zonificación ambiental, formulación, ejecución y seguimiento, y evaluación [3]. Por su parte, en la fase de diagnóstico se realizan cuatro grandes etapas:

1. La conformación del consejo de cuenca,
2. La caracterización de la cuenca hidrográfica en los componentes: físico-bióticos (geología, geomorfología, hidrogeología, hidrografía, clima, hidrología, morfometría, pendientes, calidad de agua y gestión del recurso hídrico, capacidad de uso de la tierra, vegetación y flora, fauna, áreas y ecosistemas estratégicos); socio-económicos y culturales (sistema social, sistema cultural, sistema económico); político-administrativos (oferta institucional, organización ciudadana, instrumentos de planificación y de administración de recursos naturales renovables); funcionales (relaciones urbano-rurales y regionales, relaciones socioeconómicas); y de gestión del riesgo (caracterización histórica de amenazas y eventos amenazantes, amenazas, vulnerabilidad y escenarios de riesgo),
3. El análisis situacional y,
4. La síntesis ambiental.

Figura 1. Subzona hidrográfica a nivel subsiguiente del río Guatapurí (2801-01)



Este proyecto de grado es resultado de una práctica empresarial en ConstrSuelos de Colombia S.A.S., empresa subcontratada por el Consorcio Guatapurí-Cesar para realizar algunas de las temáticas del componente físico-biótico y de gestión del riesgo del POMCA del río Guatapurí. ConstrSuelos de Colombia S.A.S. tiene sede permanente en la ciudad de Floridablanca (Santander) y es reconocida localmente por sus 12 años prestando servicios de laboratorios de

suelos, concretos y pavimentos, estudios en el área de la geotecnia ambiental, hidrología, hidráulica, y estudios de susceptibilidad, amenaza, vulnerabilidad y riesgo (AVR) por eventos naturales en diferentes lugares de Colombia.

En el transcurso de cuatro meses, este proyecto de grado aportó a la realización de informes técnicos para las temáticas de hidrografía, morfometría, clima e hidrología del POMCA del río Guatapurí y con ello se logró: revisar y ajustar los límites hidrográficos de la cuenca, y caracterizar la red de drenaje a nivel de cuenca y subcuenca; realizar la caracterización morfométrica a nivel de cuenca y subcuenca; analizar la variabilidad espacial y temporal del régimen de precipitaciones, valores normales, así como los extremos y frecuencia de presentación; y caracterizar el régimen hidrológico a partir de un análisis de la variabilidad temporal del régimen de caudales, valores normales, así como los extremos.

1. METODOLOGÍA

Los insumos suministrados por el contratante desde la fase de aprestamiento para la realización del POMCA del río Guatapurí son: cartografía básica a escala 1:25,000 del IGAC; Modelo Digital de Elevaciones – MDE a partir de las curvas de nivel cada 25 [m]; información hidro-meteorológica de estaciones monitoreadas por el IDEAM para un periodo de medición superior a 15 años; e imágenes satelitales de alta resolución.

Los criterios, los procedimientos y las metodologías de la Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas POMCAS [3] y el alcance técnico del contrato [4] fueron tomados como línea base para el desarrollo de este capítulo; sin embargo, se debe resaltar que los objetivos aprobados para este proyecto de grado no plasman a totalidad las actividades exigidas en estos dos documentos. Por lo tanto, únicamente se enunciarán los métodos usados en la realización de algunas de las actividades de las temáticas de hidrografía, morfometría, clima e hidrología.

1.1 TEMÁTICA DE HIDROGRAFÍA

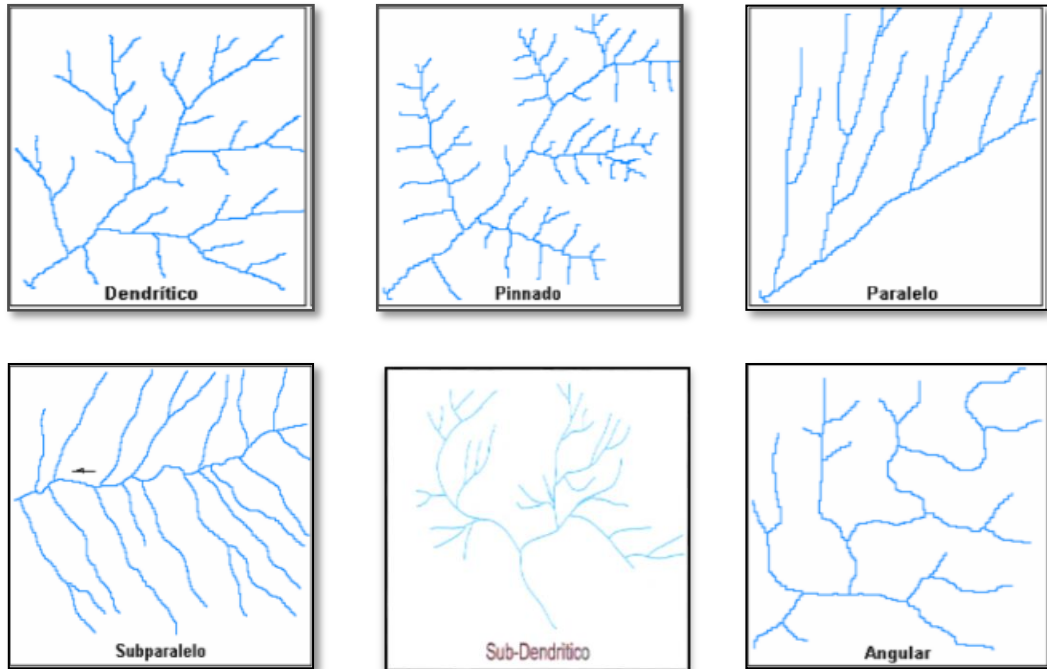
La hidrografía es la “ciencia que se ocupa de la descripción y medición de extensiones de agua con lámina libre tales como océanos, mares, arroyos, ríos, lagos y embalses” [5].

1.1.1 Revisión y ajuste de los límites hidrográficos. La revisión y ajuste de los límites hidrográficos permite afinar la línea divisoria de aguas de una cuenca, este caso, la realizada por el IDEAM y el IGAC [2] a escala 1:500,000 a una de mejor detalle con curvas de nivel cada 25 [m].

El método consiste en realizar un análisis hidrológico del relieve con la herramienta ArcHydro de ArcGIS, considerar diferentes imágenes satelitales (evaluación multitemporal) y revisar a detalle las curvas de nivel. El procedimiento para el análisis hidrológico del terreno tiene el siguiente orden: ajuste de celdas de elevaciones erradas, generación del ráster de direcciones de flujo, generación ráster de flujo acumulado y generación del ráster y el shape de subcuencas. Con estos resultados, se tiene una delimitación preliminar que se confronta con las imágenes satelitales y la forma de las curvas de nivel.

1.1.2 Patrón de drenaje. Para la temática de hidrografía también se realiza la caracterización de la red de drenaje a nivel de cuenca y subcuencas por medio de la identificación de un patrón de drenaje y el cálculo de la densidad de drenaje. En la Figura 2 se muestran los patrones de drenajes más frecuentes que son: el dendrítico, el pinado, el paralelo, el subparalelo, el subdendrítico y el angular.

Figura 2. Patrones de drenaje



1.1.3 Densidad de drenaje. Por su parte, según [6] la densidad de drenaje D es la longitud de cauces por unidad de área expresado en Km/Km^2 como se muestra en la ecuación (1); dónde L es longitud total de los cauces en Km y A es el área en Km^2 de la cuenca o subcuencas.

$$D = \frac{L[\text{Km}]}{A[\text{Km}^2]} \quad (1)$$

La categoría y la clasificación para valores están dadas por los rangos de densidad de drenaje presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de la densidad de drenaje

Categoría	Rango	Clasificación
1	Menor a 1.20	Baja
2	1.21 - 1.80	Moderada
3	1.81 – 2.00	Moderada Alta
4	2.01 – 2.50	Alta
5	Mayor a 2.50	Muy Alta

Fuente: [7]

1.2 TEMÁTICA DE MORFOMETRÍA

La morfometría es “el estudio de las características físicas de una cuenca hidrográfica, y se utiliza para analizar la red de drenaje, las pendientes y la forma de una cuenca a partir del cálculo de valores numéricos” [8]. La caracterización morfométrica a nivel de cuenca y subcuenca se realiza a través de la evaluación de parámetros como: Factor de forma de Horton (Hf), Coeficiente de Compacidad de Gravelius (Kc), Índice de Alargamiento (Ia), Índice de Asimetría (AF), Elevación media de la cuenca y subcuencas (H) y Pendiente media del cauce (Pm), los cuales son presentados en la Tabla 4 junto con las ecuaciones, rangos y clasificaciones que los caracterizan. En la temática de morfometría, también son estudiadas: la pendiente media de la cuenca (S), los tiempos de concentración (Tc) y la forma de la curva hipsométrica.

1.2.1 Pendiente media de la cuenca. La pendiente media de la cuenca (S) se calcula a partir del Modelo Digital de Elevaciones aplicando funciones de la extensión Spatial Analysis del programa ArcGIS como se muestra en [9]. La metodología consiste en la obtención del mapa de pendientes a través de la función Slope y la aplicación de estadística zonal mediante la función Zonal

Statistics. La clasificación de la pendiente media de la cuenca es como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de la pendiente media de la cuenca

Categoría	Rango	Clasificación
1	Menor a 15	Accidentado
2	16 – 30	Fuerte
3	31 – 45	Muy Fuerte
4	46 – 65	Escarpado
5	Mayor a 65	Muy Escarpado

Fuente: [7]

1.2.2 Tiempo de concentración. El tiempo de concentración (T_c) es el tiempo que toma el agua desde los límites más extremos de la hoya hasta llegar a la salida de la misma [10]. Para el cálculo de este parámetro, diferentes autores (Kirpich, Temez, Giandotti y Ventura-Heras) plantearon ecuaciones en función de la pendiente media de la cuenca (S) y la longitud del cauce principal (Lc) como se listan en la Tabla 3.

Tabla 3. Tiempo de concentración (T_c)

Método	Ecuación
T_c de Kirpich	$T_c(K) = 0.06628 * \left[\frac{Lc}{S^{0.5}} \right]^{0.77} \quad (2)$
T_c de Temez	$T_c(T) = 0.3 * \left[\frac{Lc}{S^{0.25}} \right]^{0.76} \quad (3)$
T_c de Giandotti	$T_c(G) = \frac{(4 * A^{0.5}) + (1.5 * Lc)}{25.3 * (Lc * S)^{0.5}} \quad (4)$

Método	Ecuación
<i>T_c</i> de Ventura-Heras	$T_c(V, H) = 0.3 * \left[\frac{Lc}{S^{0.25}} \right]^{0.75} \quad (5)$

Fuente: [10]

1.2.3 Curva hipsométrica. Por su parte, la curva hipsométrica es una gráfica que indica el porcentaje de área de la cuenca que existe por encima de cierta cota determinada. Para su construcción se grafica el promedio de la elevación entre dos curvas de nivel contra su correspondiente área acumulada. Al valor de la cota mayor encontrada en la cuenca corresponde el 0% del área acumulada y al valor de la cota mínima el 100%.

Tabla 4. Parámetros morfométricos

Parámetro	Ecuación	Definición y/o categorización																		
Factor de forma de Horton, H_f Fuente: [8]	$H_f = \frac{A}{La^2} \quad (6)$ <p> <i>A</i>: Área de la cuenca o subcuenca [Km²] <i>La</i>: Longitud axial del cauce principal [km] </p>	Es un índice adimensional que permite comparar la forma de la cuenca con la de figuras geométricas. <table border="1" style="margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th>Rango</th> <th>Clases</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><0.22</td> <td>Muy alargada</td> </tr> <tr> <td>0.22-0.30</td> <td>Alargada</td> </tr> <tr> <td>0.30-0.37</td> <td>Ligeramente alargada</td> </tr> <tr> <td>0.37-0.45</td> <td>Ni alargada ni ensanchada</td> </tr> <tr> <td>0.45-0.60</td> <td>Ligeramente ensanchada</td> </tr> <tr> <td>0.60-0.80</td> <td>Ensanchada</td> </tr> <tr> <td>0.80-1.20</td> <td>Muy ensanchada</td> </tr> <tr> <td>>1.20</td> <td>Rodeando el desagüe</td> </tr> </tbody> </table>	Rango	Clases	<0.22	Muy alargada	0.22-0.30	Alargada	0.30-0.37	Ligeramente alargada	0.37-0.45	Ni alargada ni ensanchada	0.45-0.60	Ligeramente ensanchada	0.60-0.80	Ensanchada	0.80-1.20	Muy ensanchada	>1.20	Rodeando el desagüe
Rango	Clases																			
<0.22	Muy alargada																			
0.22-0.30	Alargada																			
0.30-0.37	Ligeramente alargada																			
0.37-0.45	Ni alargada ni ensanchada																			
0.45-0.60	Ligeramente ensanchada																			
0.60-0.80	Ensanchada																			
0.80-1.20	Muy ensanchada																			
>1.20	Rodeando el desagüe																			
Coeficiente de Compacidad de Gravelius, K_c Fuente: [11]	$K_c = \frac{0.28 * P}{\sqrt{A}} \quad (7)$ <p> <i>P</i>: Perímetro [Km] <i>A</i>: Área de la cuenca o subcuenca [Km²] </p>	Este coeficiente define la forma de la cuenca, respecto a la semejanza con formas redondas. De acuerdo con [12], los rangos son: <table border="1" style="margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th>Rango</th> <th>Clases</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.00 – 1.25</td> <td>Redonda a oval redonda</td> </tr> <tr> <td>1.26 – 1.50</td> <td>De oval redonda a oval oblonga</td> </tr> <tr> <td>1.51 – 1.75</td> <td>De oval oblonga a rectangular oblonga</td> </tr> </tbody> </table>	Rango	Clases	1.00 – 1.25	Redonda a oval redonda	1.26 – 1.50	De oval redonda a oval oblonga	1.51 – 1.75	De oval oblonga a rectangular oblonga										
Rango	Clases																			
1.00 – 1.25	Redonda a oval redonda																			
1.26 – 1.50	De oval redonda a oval oblonga																			
1.51 – 1.75	De oval oblonga a rectangular oblonga																			
Índice de alargamiento, I_a Fuente: [11]	$I_a = \frac{La}{a} \quad (8)$	Este índice relaciona la longitud máxima o axial de la cuenca con su ancho máximo medido perpendicularmente a la dimensión anterior.																		

Parámetro	Ecuación	Definición y/o categorización								
	L_a : Longitud axial del cauce principal [m] a : Ancho máximo de la cuenca [m]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Rango</th> <th>Clases</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$l_a < 1.4$</td> <td>Poco alargada</td> </tr> <tr> <td>$1.5 < l_a < 2.8$</td> <td>Moderadamente alargada</td> </tr> <tr> <td>$2.9 < l_a < 4.2$</td> <td>Muy alargada</td> </tr> </tbody> </table>	Rango	Clases	$l_a < 1.4$	Poco alargada	$1.5 < l_a < 2.8$	Moderadamente alargada	$2.9 < l_a < 4.2$	Muy alargada
Rango	Clases									
$l_a < 1.4$	Poco alargada									
$1.5 < l_a < 2.8$	Moderadamente alargada									
$2.9 < l_a < 4.2$	Muy alargada									
Índice de asimetría, AF Fuente: [6]	$AF_D = 100 \left(\frac{A_D}{A} \right) \& \quad AF_i = 100 \left(\frac{A_i}{A} \right) \quad (9)$ A_D : Área de la margen derecha [Km] A_i : Área de la margen izquierda [Km]	Sintetiza la ausencia o existencia de basculamiento a escala de la cuenca de drenaje, mediante una relación porcentual entre las áreas ocupadas por las dos márgenes del cauce principal, [13]. Este índice se calcula tanto para la margen derecha (AF_D) como para la izquierda (AF_i).								
Elevación media, H Fuente: [6]	$H = \frac{\sum(c_i * a_i)}{A} \quad (10)$	c_i : Cota media ubicada entre dos curvas de nivel. a_i : Área entre dos curvas de nivel [m ²] A : Área de la cuenca o subcuenca [m ²]								
Pendiente media del cauce, P_m Fuente: [14]	$P_m = \frac{\nabla_{mayor} - \nabla_{menor}}{L_c} \quad (11)$ ∇_{mayor} : cota máxima del cauce [m] ∇_{menor} : cota mínima del cauce [m] L_c : Longitud del cauce principal [m]	Es la relación entre la altura total del cauce principal (cota máxima menos cota mínima) y la longitud del mismo. <table border="1"> <thead> <tr> <th>Rango</th> <th>Clases</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1% - 5%</td> <td>Suave</td> </tr> <tr> <td>6% - 11%</td> <td>Moderado</td> </tr> <tr> <td>12% - 17%</td> <td>Fuerte</td> </tr> </tbody> </table>	Rango	Clases	1% - 5%	Suave	6% - 11%	Moderado	12% - 17%	Fuerte
Rango	Clases									
1% - 5%	Suave									
6% - 11%	Moderado									
12% - 17%	Fuerte									

1.3 TEMÁTICA DE CLIMA

El clima es la “síntesis de las condiciones meteorológicas en un lugar determinado, caracterizada por estadística a largo plazo de los elementos meteorológicos en dicho lugar” [5]. Este proyecto de grado tiene como objetivo analizar la variabilidad espacial y temporal, valores normales, así como los extremos y la frecuencia de presentación únicamente para el régimen de precipitaciones.

1.3.1 Tratamiento de la información pluviométrica. El primer paso a seguir consiste en el tratamiento de la información pluviométrica. Los datos de precipitación tal y como son enviados por el IDEAM tienen unos valores faltantes que necesitan ser llenados a través de estimaciones matemáticas. Entre los métodos más usados se encuentra la auto-correlación (llenado de datos faltantes con información propia de la estación en estudio) [15] y la regresión lineal múltiple (llenado de datos faltantes con información de otra estación) de acuerdo con [16]. Bajo la premisa de que la información mensual de precipitación por sí sola no sigue una relación lineal, los métodos trabajan con la precipitación total mensual acumulada porque según [17], la precipitación acumulada media para varias estaciones no es muy sensible a cambios en una de ellas.

Para usar la auto-correlación se necesita:

1. Confirmar que la estación en estudio no supera los 6 meses consecutivos con datos faltantes de precipitación total mensual.
2. Identificar y resaltar la ubicación relativa de dichos datos faltantes.
3. Graficar la precipitación total mensual acumulada contra la posición de los datos hasta una posición anterior al primer dato faltante y añadir la regresión lineal simple. Estas gráficas deben mostrar la ecuación y el coeficiente de

correlación de la regresión lineal. Este procedimiento se realiza en el programa Microsoft Excel.

4. Completar el dato faltante con la pendiente de la regresión lineal.
5. Repetir el paso 3 hasta el siguiente dato faltante y llenar la casilla con la pendiente de la nueva gráfica.

Para usar la regresión lineal múltiple se necesita tener información de estaciones cercanas en distancia y altitud a la estación en estudio con datos medidos directamente en los periodos de tiempo faltantes. Para usar este método es necesario:

1. Identificar y resaltar la ubicación de los datos faltantes.
2. Ordenar la información en columnas de datos descendentes para así usar la herramienta llamada “Regresión”, con la cual relacionamos las estaciones cercanas con datos completos con la que tiene datos faltantes. Este procedimiento se realiza en el programa Microsoft Excel.
3. Llenada la casilla del procedimiento anterior, se repite estos pasos hasta el siguiente dato faltante y se llena la casilla con la columna nueva del pronóstico generado por el programa.

Los valores extremos de precipitación a diferentes periodos de retorno y las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) se elaboran con datos de precipitación máxima en 24 horas que no pasan por el proceso de llenado de datos faltantes.

1.3.2 Variabilidad temporal y espacial de la precipitación. La variación temporal de la precipitación se evalúa a través de la precipitación total anual y la precipitación media mensual multianual o promedio multianual (en los 15 años de

estudio) de la precipitación total mensual en cuya gráfica la ordenada del plano cartesiano son los doce (12) meses del año.

La distribución espacial de la precipitación (cuando se tenga información suficiente, es decir, mínimo tres estaciones de monitoreo, distribuidas espacialmente sobre la zona de estudio), se hace a través de las opciones Kriging o IDW del conjunto de herramientas de interpolación del programa ArcGIS Desktop. Kriging es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores z . Para ello, el programa crea los variogramas y las funciones de covarianza para calcular los valores de dependencia estadística (denominada autocorrelación espacial) que dependen del modelo de autocorrelación (ajustar un modelo); y prevé los valores desconocidos (hacer una predicción) [18]. Por su parte, IDW es considerado un método de interpolación determinístico porque está basado directamente en los valores medidos circundantes o en fórmulas matemáticas especificadas que determinan la suavidad de la superficie resultante. Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra. Es importante tener en cuenta que los puntos de entrada que están lejos de la ubicación de la celda donde se realiza la predicción pueden tener escasa o ninguna correlación espacial, esto puede ser una razón para eliminarlos del cálculo [19].

1.3.3 Valores extremos de precipitación. El análisis de frecuencia y valores extremos busca relacionar la magnitud que se ha presentado en eventos extremos con su frecuencia o probabilidad de excedencias utilizando diferentes tipos de distribuciones de probabilidad. El proceso general a través del cual se lleva a cabo este análisis está conformado por las fases de: suposición de los modelos estadísticos, estimación de los parámetros estadísticos de las funciones de

distribución de probabilidad, realización de pruebas que determinen el grado de ajuste con el modelo y la variable que se desea representar a través de pruebas de bondad de ajuste, estimación de los valores para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50, 100 y 500 años. Las funciones de distribución de probabilidad evaluadas fueron: Normal, Lognormal, Lognormal de tres parámetros, Gamma de dos parámetros, Gamma de tres parámetros y Gumbel. El anterior procedimiento se realiza en Microsoft Excel en una hoja de cálculo programada previamente por los ingenieros de Construcción de Suelos de Colombia S.A.S. Para comprender el comportamiento espacial de los valores extremos a diferentes periodos de retorno, estos también son espacializados a través de las herramientas Kriging o IDW.

1.3.4 Curva Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF). Las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) permiten la estimación de volúmenes de drenaje superficial mediante modelos de lluvia-escorrentía en cuencas pequeñas para las cuales no existen registros históricos de caudal o ausencia de una estación limnimétrica o limnigráfica. Para generar las curvas IDF (para periodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50, 100 y 500 años), a partir del registro diario de las estaciones ubicadas en el área de estudio, se usa la metodología de Vargas & Díaz Granados para días sin lluvia. Este método es recomendado en [10] y se basa en la ecuación propuesta por Kothyari & Garde presentada en la ecuación (12):

$$I = a \frac{T_r^b}{(t/60)^c} M^d \quad (12)$$

Dónde: I es la intensidad de la lluvia para un período de retorno T_r en [mm/h]; a , b , c , d son parámetros adimensionales de ajuste de la regresión de acuerdo a la Tabla 5; T_r es período de retorno en [años]; t es la duración de la lluvia [min] y M

es la precipitación máxima promedio anual en 24 horas a nivel multianual. La cuenca del río Guatapurí se encuentra ubicada en la zona Caribe (R2).

Tabla 5. Valores de los coeficientes a, b, c y d para curvas IDF en Colombia.

Región	a	b	c	d
Andina (R1)	0,94	0,18	0,66	0,83
Caribe (R2)	24,85	0,22	0,50	0,10
Pacífico (R3)	13,92	0,19	0,58	0,20
Orinoquía (R4)	5,53	0,17	0,63	0,42

Fuente: [10]

1.4 TEMÁTICA DE HIDROLOGÍA

La hidrología es la “ciencia que estudia las aguas superficiales y subterráneas de la Tierra, su aparición, circulación y distribución, tanto en el tiempo como en el espacio, sus propiedades biológicas, químicas y físicas, y sus relaciones con el entorno, incluida su relación con los seres vivos” [5]. Este proyecto busca caracterizar el régimen hidrológico a partir de un análisis de la variabilidad temporal del régimen de caudales, y valores normales.

Las mediciones hidrológicas contemplan la siguiente secuencia: el registro de la variable en la escala deseada (al minuto, horaria, diaria, etc.), la transmisión de los registros a una base de datos central, la edición o depuración de los datos y el almacenamiento de la información para la disposición al público. Sin embargo, en cada uno de estos procesos pueden quedar periodos de tiempo sin registrar, depurar o visualizar que deben ser estimados para conservar la uniformidad de la información en el estudio. Para el llenado de datos faltantes de series hidrológicas se utiliza la metodología de autocorrelación tal y como se explicó en la temática de

Clima en el apartado 1.3. El análisis de la variación temporal del régimen de caudales se realiza a través de la elaboración de la curva de duración de caudales como se explica a continuación.

1.4.1 Curva de duración de caudales. Estas curvas interpretan las características del régimen hidrológico de la cuenca de un río. La capacidad de regulación de una cuenca está relacionada con las características: topográficas, geológicas, de suelos, de vegetación y de clima. Entre los factores de mayor influencia en la regulación se encuentran el relieve, el área de cuenca, la lluvia media anual y la altitud. La frecuencia de ocurrencia de los caudales diarios, expresadas en la curva de duración, sintetiza en gran medida esta interacción de factores.

La curva de duración de caudales resulta del análisis de frecuencias de la serie histórica de caudales medios mensuales y se elabora de la siguiente manera:

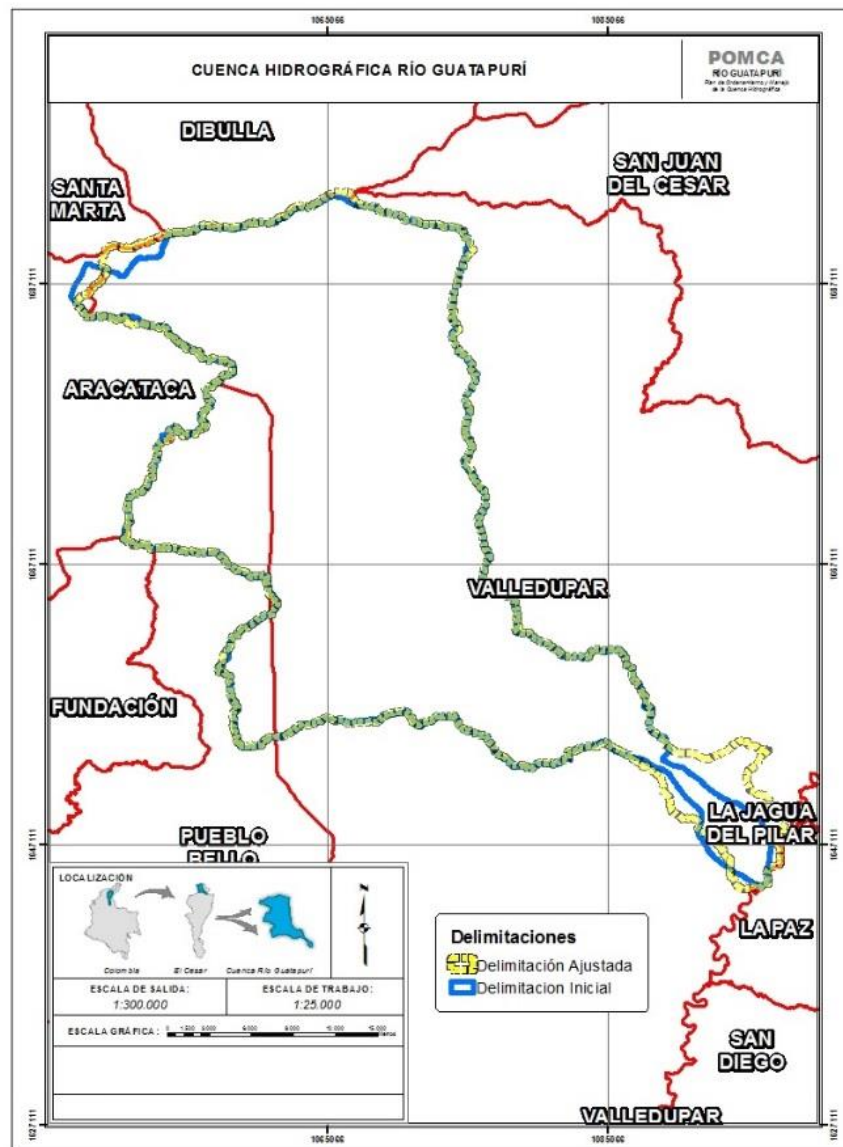
1. Los valores medios mensuales se organizan de forma descendente.
2. Se calcula la frecuencia absoluta como el número de veces que se repite un dato en el registro de caudales.
3. Se calcula el porcentaje de la frecuencia relativa como el cociente entre la frecuencia absoluta y el número total de registros.
4. Se calcula la frecuencia relativa acumulada.
5. En la abscisa se grafica la frecuencia relativa acumulada y en la ordenada los valores de caudales medios de menor a mayor.

2. RESULTADOS

La cuenca del río Guatapurí nace en las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta en el departamento del Cesar a aproximadamente 5112.28 m.s.n.m. En la parte alta predominan las geoformas de origen glaciario, como la sierra glaciario (Gs) y las morrenas (Gm), hacia la parte media las laderas estructurales (Sle), laderas erosivas (Dle), lóbulos de movimiento en masa (Dlmm), y depósitos coluviales (Dco), y hacia la parte baja predominan los abanicos aluviales (Faa), la planicie de inundación (Fpi), y las zonas urbanas (Azu); se encuentran rocas y sedimentos [20]. El área de la cuenca es de 903.11 [Km²], la longitud del cauce principal es de 82.83 [Km], el perímetro de 223.37 [Km] y desemboca sobre la vertiente principal del río Cesar en la cabecera municipal de Valledupar a una altura de 226.68 m.s.n.m.

Del ajuste de la delimitación de la cuenca del río Guatapurí a una escala de trabajo 1:25,000 resultó un delta de 32.49 [Km²], es decir, cambió de 870.62 [Km²] con la delimitación a escala 1:500,000 a 903.11 [Km²] después del ajuste, como se muestra en la Figura 3. Se resalta que en la parte sur de la cuenca cerca de la cabecera municipal de Valledupar, se identificó mediante imágenes satelitales una amplia zona que hace parte de la planicie de inundación del río Guatapurí y por tanto, fue incluida en la delimitación ajustada.

Figura 3. Ajuste de la delimitación hidrográfica a escala 1:25,000



A partir de esta delimitación ajustada, fueron identificadas once (11) subcuencas: Guatapurí alto, Timaca, Valentina, Agua Dulce, Templado, El Mangal, Caño Bobal, Guatapurí medio, Capitanejo, Guatapurí bajo y Donachui; con áreas entre 230.84 [Km²] y 13.76 [Km²], como se muestra en la Figura 4.

Respecto a la temática de Morfometría, en la Tabla 6 son listados los principales parámetros morfométricos evaluados para la cuenca del río Guatapurí. Igualmente, los resultados de estos parámetros para las once (11) subcuencas son presentados en el ANEXO .

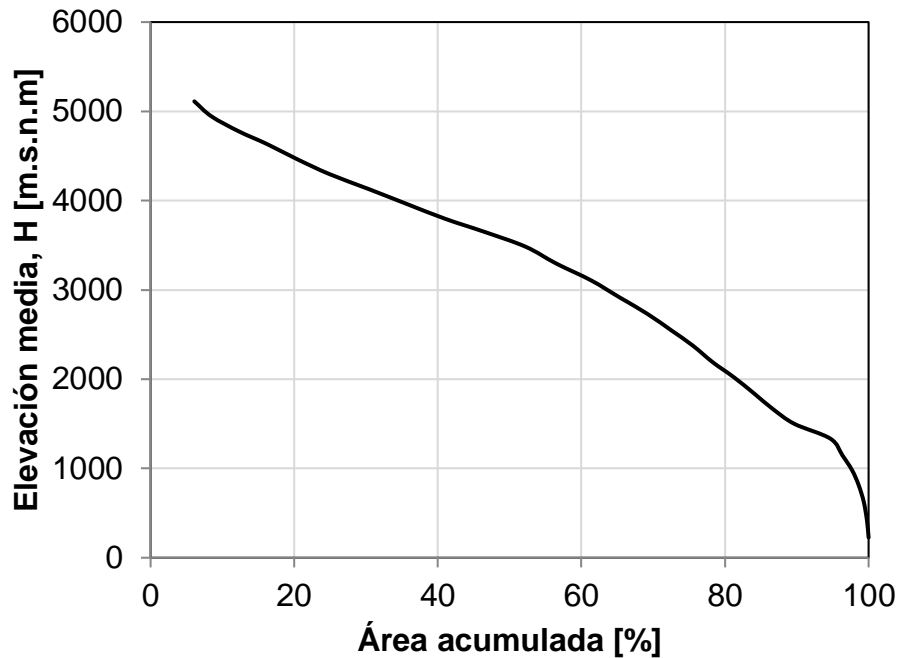
Tabla 6. Parámetros morfométricos de la cuenca

Parámetro	Valor	Clasificación
<i>S</i> [%]	26.934	Escarpado
<i>Hf</i>	0.219	Alargada
<i>Kc</i>	2.078	De oval oblonga a rectangular oblonga
<i>la</i>	2.724	Moderadamente alargada
<i>AFd</i> [%]	48.741	Cuenca simétrica
<i>AFi</i> [%]	51.259	
<i>H</i> [m]	2124.795	
<i>Pm</i> [m/m]	0.053	Moderado

Los tiempos de concentración para la cuenca hidrográfica varían entre 2.04 [H] por el método de Giandotti, 3.29 [H] por Kirpich, 4.44 [H] por Ventura-Heras y 4.61 [H] por el de Temez; los tiempos de concentración por subcuenca también pueden ser consultados en el ANEXO .

La curva hipsométrica de la cuenca del río Guatapurí presentada en la Figura 5 muestra una cuenca geológicamente joven (cuenca de montaña) o en etapa de desequilibrio [21]. Así mismo, en el ANEXO se puede encontrar el perfil del cauce del río Guatapurí en el que se relaciona la longitud respecto a la altura relativa de este cauce principal.

Figura 5. Curva hipsométrica



En relación con la temática de clima, en la Tabla 7 son listadas las dieciocho (18) estaciones meteorológicas usadas en el estudio del clima (precipitación) circundantes a la cuenca del río Guatapurí junto con el porcentaje de datos faltantes. En el ANEXO se puede consultar la ubicación de estas estaciones para que el lector tenga claridad de la configuración espacial de la red del IDEAM. Igualmente, en el ANEXO se adjuntan los resultados del llenado de datos faltantes por estación en el cual se resaltan con color verde aquellos datos de precipitación media mensual que fueron estimados. Estaciones como: Pueblo Bello, San Juan del Cesar, París de Francia, Villanueva y Urumita con 0% de datos faltantes fueron aquellas usadas para la correlación entre estaciones.

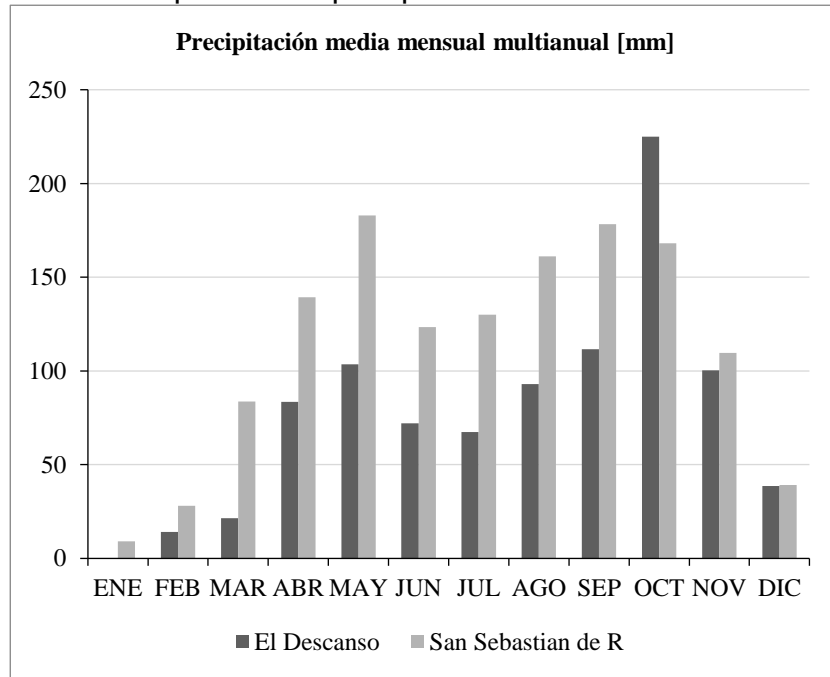
Tabla 7. Estaciones meteorológicas del IDEAM usadas en el estudio del clima

Código	Tipo	Nombre	% Datos Faltantes
28040010	PM	Pueblo Bello	0.000%
15030010	PM	Dibulla	0.490%
29060070	PM	San Pablo	0.490%
29060090	PM	San Sebastián de R	0.980%
29060340	PM	El Palmor	3.922%
28010200	PM	Hatico de los Indios	4.902%
28010290	PM	San Juan del Cesar	0.000%
28010370	PM	París de Francia	0.000%
29060060	PM	El Cenizo	4.412%
28010020	PM	El Descanso	0.490%
28010040	PM	Manaure	1.471%
28010090	PM	Patillal	1.961%
28010340	PM	Villanueva	0.000%
28030220	PM	San Ángel	0.980%
28035030	SP	Apto Alfonso López	0.980%
28025020	CO	El Rincón	2.451%
28015070	CO	Urumita	0.000%
28035020	CO	El Callao	1.471%

PM: Pluviométrica, SP: Sinóptica principal, CO: Climatológica ordinaria.

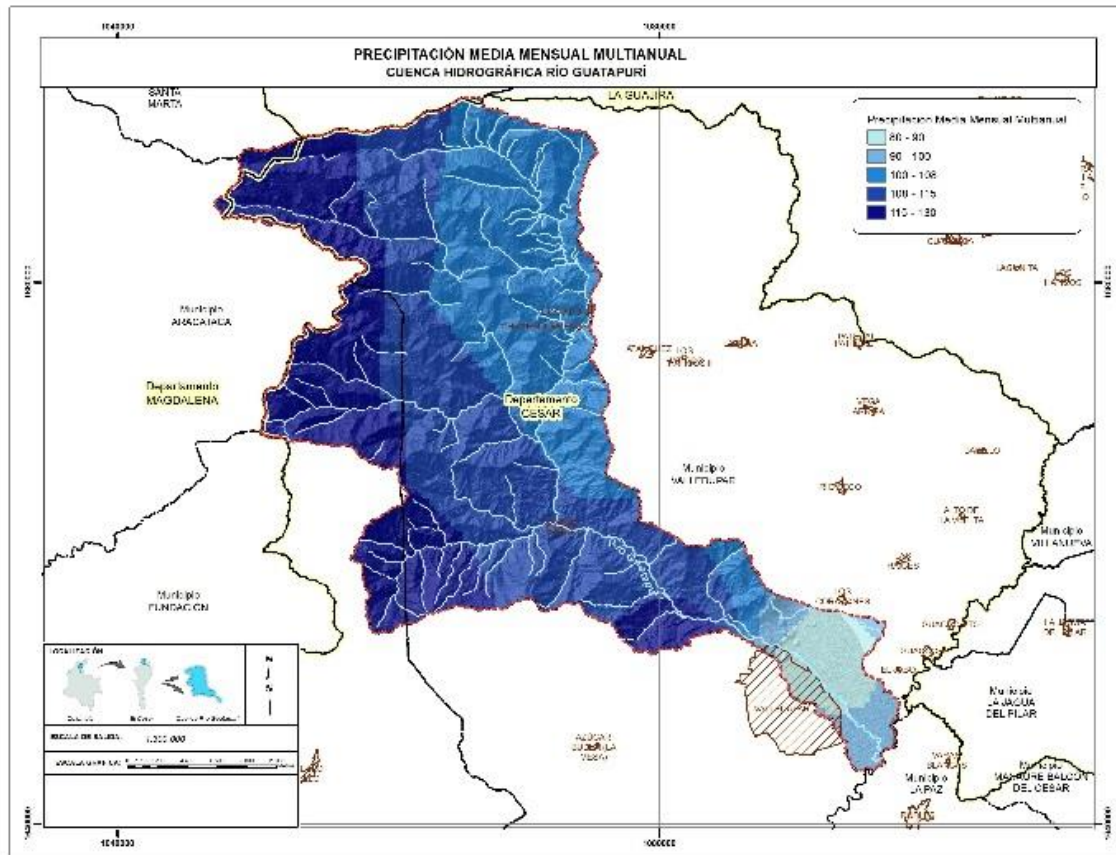
En la Figura 6 se presenta información de la media mensual multianual (15 años) de las estaciones El Descanso y San Sebastián de R, ubicadas al sur-oriente y occidente de la cuenca respectivamente. Siguiendo el patrón de precipitación característica de los trópicos, se observa una variación bimodal de la precipitación con alzas en los meses de mayo, septiembre y octubre. Por su parte, los meses más secos son Enero y Febrero.

Figura 6. Variación temporal de la precipitación media mensual multianual



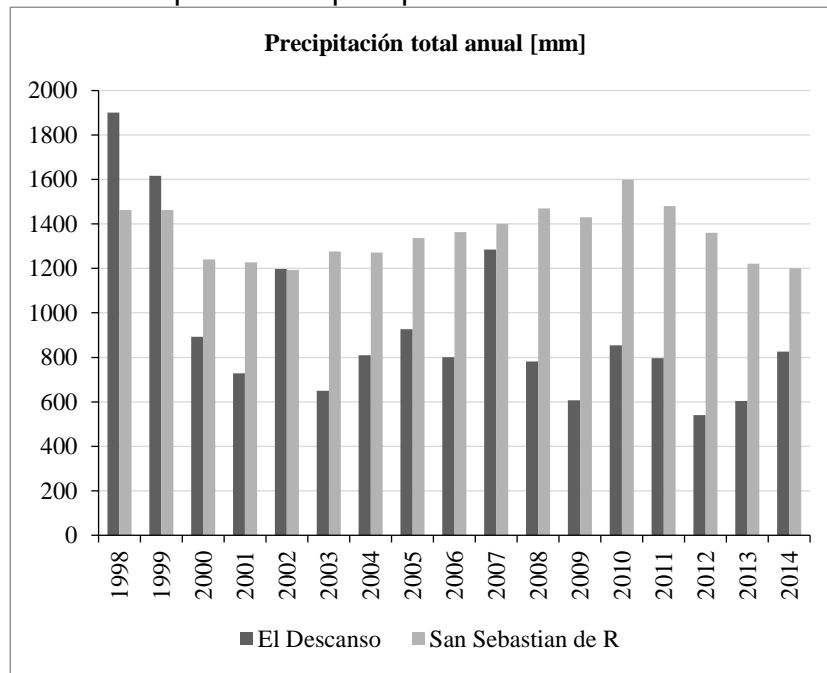
En la Figura 7 se observa la variación espacial en la precipitación media mensual multianual la cual varía entre 80 a 130 [mm]; presenta los valores más bajos en la zona sur de la cuenca hacia la cabecera municipal de Valledupar y los más altos hacia el occidente en el municipio de Pueblo Bello.

Figura 7. Variación espacial de la precipitación media mensual multianual



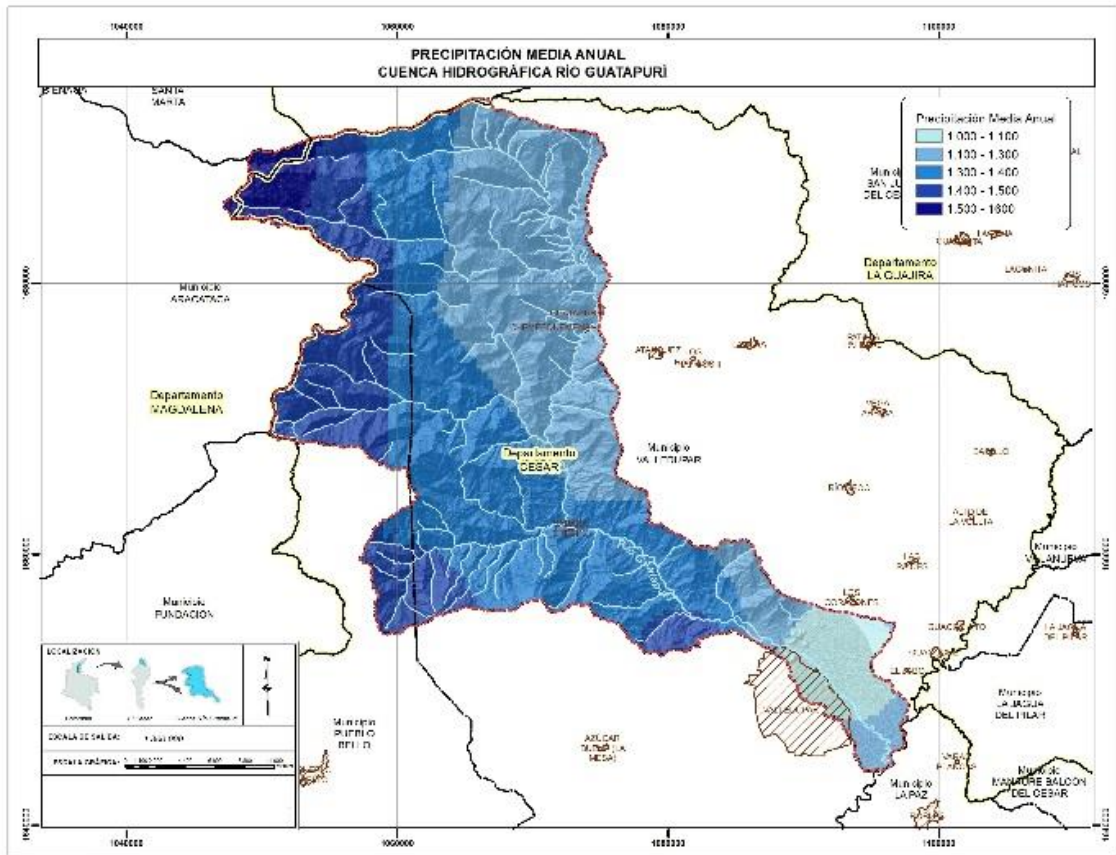
Para la precipitación total anual también se muestra la variación temporal de las estaciones El Descanso y San Sebastián de R como se muestra en la Figura 8. Se evidencian tres (3) años muy lluviosos en los últimos 15 años: 1998, 1999 y 2010 de acuerdo a la variabilidad climática del Fenómeno La Niña. La estación San Sebastián de R por estar localizada hacia la zona montañosa de la cuenca y rodeada de ecosistemas vírgenes resguardados por los grupos indígenas de la zona, por lo general presenta valores más altos que la estación El Descanso.

Figura 8. Variación temporal de la precipitación total anual



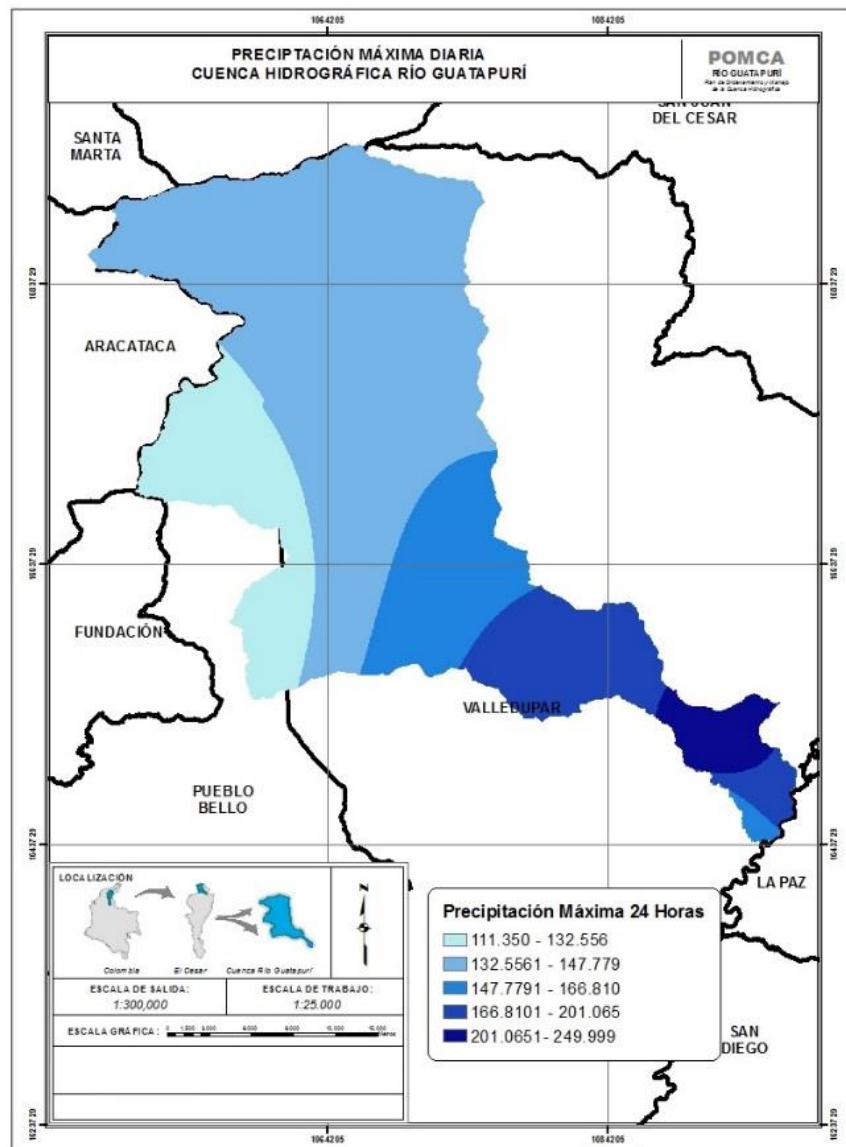
Así mismo, en la Figura 9 se muestra la espacialización de los valores normales de la precipitación total anual; esta varía entre los 1.000 [mm] a 1.600 [mm] con el mismo patrón de distribución que la precipitación media mensual multianual.

Figura 9. Variación espacial de la precipitación media anual



Para el análisis de eventos extremos fueron usadas series históricas de precipitación máxima en 24 horas con una distribución espacial como se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Precipitación máxima en 24 horas



En 15 años, los valores máximos diarios de precipitación diaria están por el orden de 111.35 [mm] a 250 [mm], es decir, el valor máximo es incluso superior a lo que llueve en promedio en todo el mes más lluvioso del año (octubre).

Los valores extremos de precipitación fueron estimados para periodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50, 100 y 500 años; a manera de resumen, en la Tabla 8 están consignados los rangos inferior y superior para cada periodo de retorno y en el ANEXO se encuentra la variación espacial para cada uno de ellos.

Tabla 8. Variación espacial de valores extremos

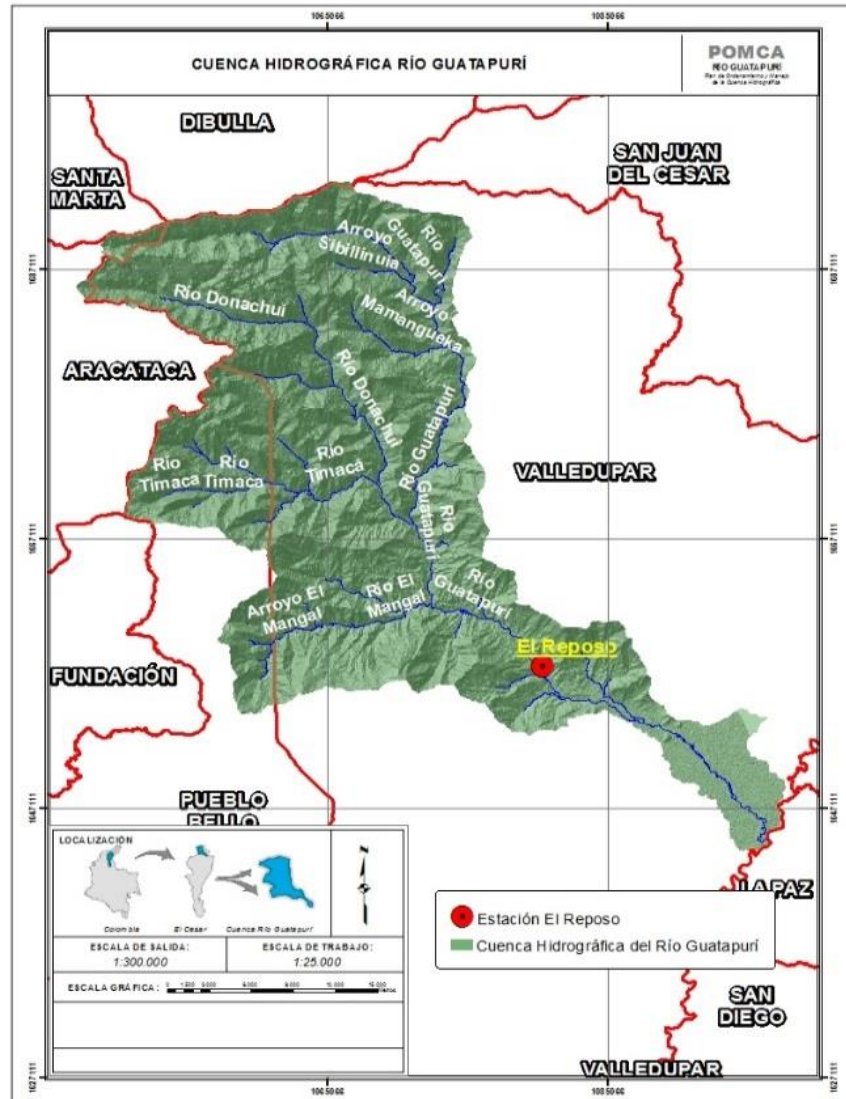
Tiempo de retorno,	Rango espacial inferior	Rango espacial superior
<i>Tr</i>	[mm]	[mm]
2	215.020	323.902
5	285.717	409.685
10	308.974	485.800
15	322.835	577.032
20	332.996	654.760
25	341.357	722.945
30	348.385	784.854
50	369.656	990.971
100	403.340	1,363.956
500	514.738	2,832.138

Por otro lado, fueron elaboradas 18 curvas IDF para cada una de las estaciones meteorológicas con inferencia en la cuenca y presentadas en la Tabla 7 para periodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50, 100 y 500 años. Estas curvas pueden ser consultadas en el ANEXO .

Respecto a la temática de hidrología, se trató información de la única estación hidrológica dentro de la cuenca: la estación limnigráfica El Reposo (28017050). Esta estación se encuentra ubicada mucho antes del punto de cierre de la cuenca

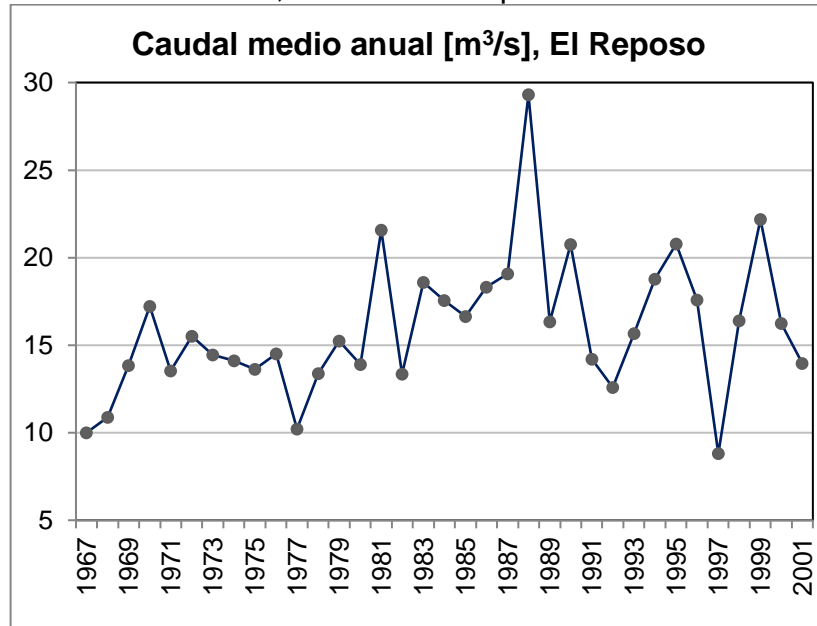
hidrográfica y a su vez, antes de que el río Guatapurí recorra la cabecera municipal de Valledupar, como se muestra en la Figura 11. Sin embargo, esta localización permite medir niveles que transportan corrientes principales como la de los ríos Mangal, Timaca y Donachui en la zona media y alta de la cuenca. Otro limitante consiste en la existencia de información tan solo desde el año 1967 hasta el año 2001; en este periodo de tiempo, el 3.46% de esta información es faltante. Por lo tanto, los resultados para esta temática no podrán ser relacionados directamente con los patrones anuales de precipitación ni tampoco corresponden a la variación más reciente del régimen de caudales de la cuenca del río Guatapurí. En el ANEXO puede ser consultar el procedimiento y los resultados del llenado de datos faltantes.

Figura 11. Estación hidrológica



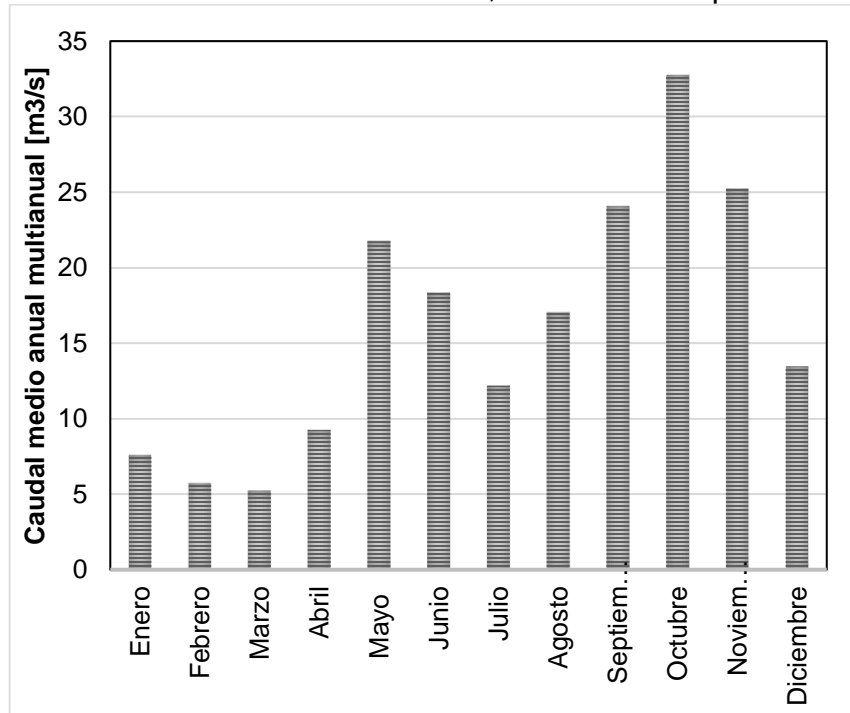
En la Figura 12 se muestra la variación temporal del caudal medio anual entre los años 1967 y 2001. Se observa un valor máximo en el año 1988 (29.30 [m³/s]) y un valor mínimo en el año 1997 (8.80 [m³/s]). El valor de caudal promedio multianual es de 15.97 [m³/s].

Figura 12. Caudal medio anual, estación El Reposo



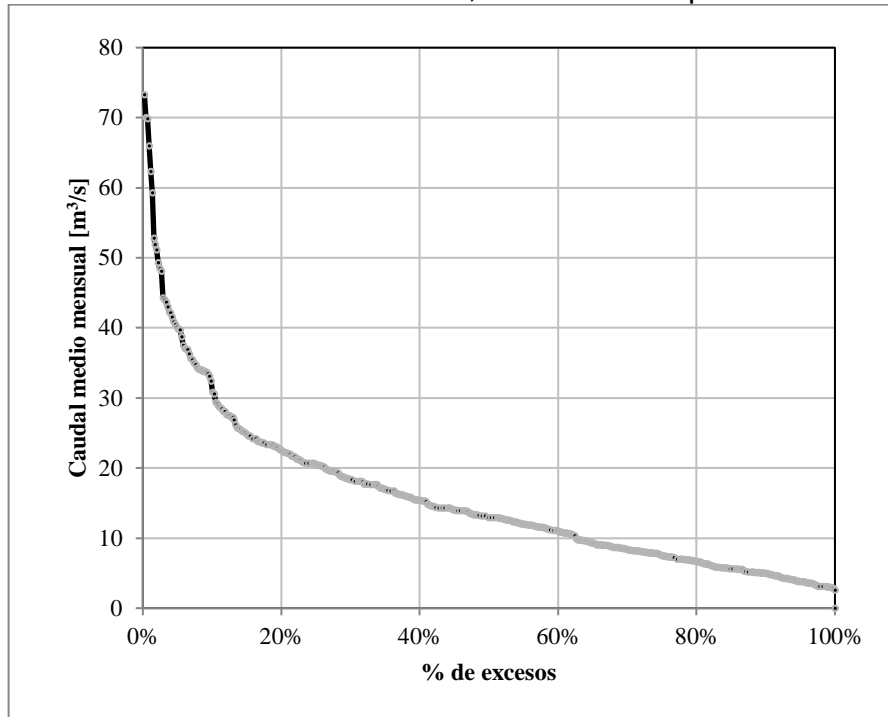
A pesar de ser periodos de estudios diferentes, la variación mensual multianual de caudales guarda el mismo comportamiento bimodal de la precipitación media mensual multianual; es decir, valores altos en los meses de mayo y octubre y valores bajos en los meses de enero, febrero y marzo, como se muestra en la Figura 13.

Figura 13. Caudal medio mensual multianual, estación El Reposo



En la Figura 14 se muestra una ventana de la curva de duración de caudales; la información completa puede ser consultada en el ANEXO . En esta gráfica se distingue la pendiente pronunciada en el tramo inicial de la curva que indica que los caudales altos se presentan durante períodos de tiempo cortos.

Figura 14. Curva de duración de caudales, estación el Reposo



3. DISCUSIÓN

Aunque desde la delimitación inicial de la cuenca del río Guatapurí a escala 1:500,000 fue identificada una pequeña área en el municipio de Aracataca (departamento del Magdalena) que implica crear una Comisión Conjunta entre CORPOCESAR y la Corporación Autónoma Regional del Magdalena – CORPAGMAG para la formulación del POMCA del río Guatapurí, a la terminación de este proyecto de grado las Autoridades Ambientales no habían tomado una decisión definitiva. Por consiguiente, en este documento se mencionó a CORPOCESAR como única responsable en la gobernanza de la cuenca. Además, no solamente la aprobación de los ajustes a la delimitación hidrográfica ha demorado la culminación de la fase de diagnóstico, sino también la dificultad de realizar acuerdos entre algunas comunidades indígenas y la Corporación Autónoma Regional.

La pendiente de la cuenca ($S=26.9\%$) difiere ampliamente de la pendiente del cauce principal ($Pm=5.3\%$) debido a que a pesar de que el río Guatapurí nace en zona de alta montaña y que estas pendientes disminuyen gradualmente en su recorrido, la forma alargada de la cuenca permite que el cauce principal sea lo suficientemente largo (82.83 Km) como para que la relación altura/longitud sea pequeña, como se muestra en el ANEXO .

Según [22], los resultados de la estimación del tiempo de concentración son muy diferentes entre sí puesto que cada autor estima su ecuación para una cuenca con características muy particulares, por lo que debe tenerse mucho cuidado para la selección del valor más adecuado para el tiempo de concentración. Por ejemplo,

para el caso de las subcuencas del río Guatapurí, los tiempos de concentración oscilan entre 0.37 en la subcuenca de Caño bobal y 3.38 en Guatapurí Bajo.

La variación espacial de los valores normales mensuales y anuales, como en el caso de la cuenca del río Guatapurí, no siempre siguen el mismo patrón que la variación espacial de los valores máximos diarios en 24 [h] debido a que estos últimos son eventos de naturaleza aleatoria.

El régimen de caudales fue evaluado con la limitante de que el IDEAM únicamente suministró información para el periodo de tiempo entre 1967 y 2001. Aunque la estación El Reposo (28017050) se encuentra en estado activo (según la página web del IDEAM), por comunicación telefónica con el servicio al cliente de esta entidad, fue dado a entender que los valores no son confiables: largos periodos de tiempo sin medición continua y datos muy por fuera de lo esperado, y por lo tanto no son suministrados al público. Siendo así, el objetivo de evaluar la dinámica de los sedimentos no pudo cumplirse porque la información registrada en esta estación además de ser insuficiente presenta valores poco confiables (valores de concentración y transporte de sedimentos muy altos en el año 1996 incoherentes para la variable estudiada).

A la fecha de terminación de este proyecto de grado, ningún informe técnico realizado por la empresa ConstruSuelos de Colombia S.A.S y presentados a la interventoría y a CORPOCESAR a través del Consorcio Guatapurí-Cesar ha sido aprobado. Por lo tanto, los resultados aquí consignados están sujetos a modificaciones y podrían ser diferentes a los que serán publicados en el informe final del Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca hidrográfica del río Guatapurí,

bien sea por decisiones administrativas de la Corporación o por solicitud de la interventoría tras un debido procedimiento.

4. CONCLUSIONES

Ajustar la hoya hidrográfica a una escala de trabajo más pequeña (de 1:500,000 a 1:25,000) es importante para conocer de manera más detallada las características del medio abiótico de la cuenca, las interacciones del ciclo hidrológico en la zona de estudio, y las entidades ambientales que deben regular el uso de los recursos naturales. A partir de la delimitación ajustada de la cuenca del río Guatapurí, fueron identificadas once (11) subcuencas: Guatapurí alto, Timaca, Valentina, Agua Dulce, Templado, El Mangal, Caño Bobal, Guatapurí medio, Capitanejo, Guatapurí bajo y Donachui; con áreas entre 230.84 [Km²] y 13.76 [Km²].

En la cuenca del río Guatapurí predominan los patrones de drenaje angular, paralelo, dendrítico, pinnado y sub-paralelo. Esto se debe a procesos de acumulación, y levantamientos orogénicos con fuerte metamorfismo e intrusiones ígneas que han modelado a través de su historia un mosaico compuesto por todo tipo de rocas con edades que van desde el precámbrico hasta el cuaternario los cuales configuran la geomorfología de la cuenca [20]. Además, es una cuenca con alta densidad de drenaje (3.66 Km/Km^2) al igual que la mayoría de las subcuencas, únicamente la subcuenca del río Guatapurí bajo tiene un valor de densidad moderada (1.541 Km/Km^2) propia de las pendientes bajas que allí se presentan.

La importancia del cálculo de los parámetros morfométricos radica en que existe una estrecha correspondencia entre la respuesta del régimen hidrológico y estos parámetros. Por ejemplo, la densidad de drenaje, la pendiente media de la cuenca, el coeficiente de compacidad de Gravelius y el factor de forma son usados para el cálculo del índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales. La cuenca del

río Guatapurí tiene 903.11 [Km²] y un perímetro de 223.37 [Km]. Es una cuenca con pendiente escarpada ($S=26.9\%$), moderadamente alargada ($la= 2.72$ & $Hf=0.219$) y simétrica ($AFd=48.7\%$), oval oblonga a rectangular oblonga ($Kc=2.078$) ubicada en alta montaña ($H=2.125$ [m.s.n.m]). No obstante, los parámetros morfométricos por subcuenca no siguen las mismas clasificaciones debido a las particularidades en la forma de cada una de estas sub divisiones y por tanto deben ser consultados por separado. Por su parte, los diferentes tiempos de concentración calculados para la cuenca varían entre 2.05 [H] y 4.61 [H]. Este tiempo es importante porque en los modelos lluvia-escorrentía, los valores máximos de caudales se estiman para lluvias con un periodo de duración igual al tiempo de concentración de la cuenca hidrográfica, consecuentemente, en estudios hidrológicos se recomienda tomar el menor tiempo de concentración calculado, ya que es el tiempo en el que se presenta la mayor intensidad. Asimismo, según [21] la curva hipsométrica muestra una cuenca geológicamente joven (cuenca de montaña) o en etapa de desequilibrio.

La precipitación oscila en el espacio y en el tiempo de acuerdo con el patrón general de circulación atmosférica y con factores locales [23]. La precipitación media mensual multianual sigue un patrón bimodal con alzas en los meses de mayo y octubre y bajas en enero y julio; esta información a su vez está validada con valores máximos en estos mismos meses en el caudal mensual multianual. Conocer el régimen de precipitaciones ayuda, entre otras cosas, a la oportuna prevención de incendios forestales y/o inundaciones. Además, la variación espacial de la precipitación está condicionada por valores considerablemente superiores de las estaciones El Cenizo y El Palmor ubicadas al occidente de la cuenca hidrográfica.

El conocimiento de la magnitud y la frecuencia de los eventos extremos, así como el análisis de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) realizadas en este proyecto de grado para la formulación del POMCA del río Guatapurí, servirán como base para el diseño de infraestructuras hidráulicas a lo largo y ancho de la cuenca hidrográfica y, por lo tanto, también para el conocimiento, la prevención y el manejo de desastres de origen hidro-meteorológico.

Aunque el trabajo realizado con valores de caudales está limitado a un periodo de estudio anterior al año 2001, se concluyó que el valor de caudal promedio multianual es de 15.97 [m³/s] y la curva de duración de caudales indica que los caudales altos se presentan durante períodos cortos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE-MADS. Decreto 1640 (2 de Agosto 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 D.C: El Ministerio.

- [2] INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y DE ESTUDIOS AMBIENTALES-IDEAM. Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia. Bogotá D.C.: Publicaciones IDEAM, 2013.

- [3] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE-MADS. Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas, Bogotá D.C.: El Ministerio, 2014.

- [4] FONDO ADAPTACIÓN. Anexo. Alcances técnicos. Consultoría para la elaboración del Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca hidrográfica del Río Guatapurí (2801-01) localizada en el departamento del Cesar en jurisdicción de CORPOCESAR, 2014

- [5] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION-WMO. Lista de términos equivalentes con sus definiciones. *Glosario Hidrológico Internacional*. Tercera Edición. Ginebra, Suiza: Publications Board, 2012, p. 1-391. ISBN 978-92-63-03385-8.

- [6] MORENO GRANDE, Fredy Alberto y ESQUIVEL KIMENEZ, Jeison Ricardo. Estudio morfométrico de la cuenca del río Azul, afluente del río Calima, Departamento del Valle del Cauca. Trabajo de grado Tecnólogo en construcciones civiles. Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2015. Facultad Tecnológica. Tecnología en Construcciones Civiles.
- [7] INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES-IDEAM. Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. Bogotá D.C.: IDEAM, 2013. ISBN: 978-958-8067-62-9.
- [8] DELGADILLO SANTANDER, Alejandro y MORENO BARRIOS, Ada. Morfometría de cuencas. Mérida, Venezuela: Universidad de Los Andes-ULA, 2012. [Consulta: agosto de 2016]. Disponible en: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoreno/HIDRO/MORFOMETR%CDA%20DE%20CUENCAS.pdf>
- [9] AGUA Y SIG. [Sitio web]. [Consulta: octubre de 2016]. Pendiente media de una cuenca con ArcGIS. Disponible en: <http://www.aguaysig.com/2011/06/pendiente-media-de-una-cuenca-con.html>
- [10] COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE E INSTITUTO NACIONAL DE VIAS-INVIAS. Manual de drenaje para carreteras. Bogotá D.C.: INVIAS, 2009.

- [11] CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL TOLIMA-CORTOLIMA. Aspectos biofísicos. Plan de ordenación y manejo ambiental de la microcuenca de Las Quebradas, Las Panelas y La Balsa. Ibagué: CORTOLIMA, 2005. [Consulta: octubre de 2016]. Disponible en: https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/estudios/cuenca_panelas/DIAGNOSTICO/2.2ASPECTOS_BIOFISICOS.pdf
- [12] ROJO HERNÁNDEZ, J.D. Morfometría de cuencas [En línea]. [Consultado en octubre de 2016]. Disponible en: <http://julianrojo.weebly.com/uploads/1/2/0/0/12008328/morfometria.pdf>.
- [13] KELLER, Edward y PINTER, Nicholas. Active tectonics: Earthquakes, Uplift and Landscapes. Segunda edición. New Jersey: Prentice Hall, 2009, p. 362. ISBN: 978-01-30-88230-1
- [14] UDELAR-FI-IMFIA. Sistema hidrológico [En línea]. [Consulta: octubre de 2016]. Disponible en: http://www.fing.edu.uy/imfia/imfiaweb/sites/default/files/01_Sistema_Hidrologico_2010.pdf.
- [15] ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL-OMM. Guía de prácticas hidrológicas: Hidrología – De la medición a la información hidrológica OMM-No. 168. Sexta edición. Ginebra, Suiza: OMM, 2011. ISBN: 978-92-63-30168-0.

- [16] GIDAHATARI [Sitio web]. Métodos de estimación para completar datos de precipitación. [Consultado: octubre de 2016]. Disponible en: <http://gidahatari.com/ih-es/metodos-estimacion-completar-datos-precipitacion>
- [17] APARICIO MIJARES, Francisco. Fundamentos de hidrología de superficie. Primera edición. México D.F.: Editorial Limusa S.A., 1992. ISBN: 968-18-3014-8.
- [18] ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, INC.-ESRI [Sitio web]. ¿Cómo funciona Kriging? [Consulta: octubre de 2016]. Disponible en: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>
- [19] ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, INC.-ESRI [Sitio web]. ¿Cómo funciona IDW? [Consulta: octubre de 2016]. Disponible en: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-idw-works.htm>
- [20] CONSORCIO GUATAPURÍ-CESAR. POMCA río Guatapurí-Geomorfología (En revisión). [Consultado: 15 de octubre de 2016].
- [21] ROJAS, P. [En línea]. ¿Qué es una curva hipsométrica? [Consultado: agosto de 2016]. Disponible en: <http://www.ingeciv.com/que-es-una-curva-hipsometrica/>
- [22] VÉLEZ, Jorge y BOTERO, Adriana. Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luís, Manizales. Revista DYNA. 2010. ISSN En línea: 2346-2183.

- [23] CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R. y MAYS, Larry W. Hidrología Aplicada. Primera edición. Santafé de Bogotá: McGRAW-HILL INTERAMERICANA S.A., 1994. ISBN: 958-600-171-7

BIBLIOGRAFÍA

AGUA Y SIG. [Sitio web]. [Consulta: octubre de 2016]. Pendiente media de una cuenca con ArcGIS. Disponible en: <http://www.aguaysig.com/2011/06/pendiente-media-de-una-cuenca-con.html>

APARICIO MIJARES, Francisco. Fundamentos de hidrología de superficie. Primera edición. México D.F.: Editorial Limusa S.A., 1992. ISBN: 968-18-3014-8.

CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R. y MAYS, Larry W. Hidrología Aplicada. Primera edición. Santafé de Bogotá: MCGRAW-HILL INTERAMERICANA S.A., 1994. ISBN: 958-600-171-7

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE-MADS. Decreto 1640 (2 de Agosto 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 D.C: El Ministerio.

COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE E INSTITUTO NACIONAL DE VIAS-INVIAS. Manual de drenaje para carreteras. Bogotá D.C.: INVIAS, 2009.

CONSORCIO GUATAPURÍ-CESAR. POMCA río Guatapurí-Geomorfología (En revisión). [Consultado: 15 de octubre de 2016].

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL TOLIMA-CORTOLIMA. Aspectos biofísicos. Plan de ordenación y manejo ambiental de la microcuenca de Las Quebradas, Las Panelas y La Balsa. Ibagué: CORTOLIMA, 2005. [Consulta: octubre de 2016]. Disponible en: https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documento/estudios/cuenca_panelas/DIAGNOSTICO/2.2ASPECTOS_BIOFISICOS.pdf

DELGADILLO SANTANDER, Alejandro y MORENO BARRIOS, Ada. Morfometría de cuencas. Mérida, Venezuela: Universidad de Los Andes-ULA, 2012. [Consulta: agosto de 2016]. Disponible en: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoreno/HIDRO/MORFOMETR%CDA%20DE%20CUENCAS.pdf>

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, INC.-ESRI [Sitio web]. ¿Cómo funciona Kriging? [Consulta: octubre de 2016]. Disponible en: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, INC.-ESRI [Sitio web]. ¿Cómo funciona IDW? [Consulta: octubre de 2016]. Disponible en: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-idw-works.htm>

FONDO ADAPTACIÓN. Anexo. Alcances técnicos. Consultoría para la elaboración del Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca hidrográfica del Río Guatapurí (2801-01) localizada en el departamento del Cesar en jurisdicción de CORPOCESAR, 2014

GIDAHATARI [Sitio web]. Métodos de estimación para completar datos de precipitación. [Consultado: octubre de 2016]. Disponible en: <http://gidahatari.com/ih-es/metodos-estimacion-completar-datos-precipitacion>

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y DE ESTUDIOS AMBIENTALES-IDEAM. Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia. Bogotá D.C.: Publicaciones IDEAM, 2013.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES-IDEAM. Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. Bogotá D.C.: IDEAM, 2013. ISBN: 978-958-8067-62-9.

KELLER, Edward y PINTER, Nicholas. Active tectonics: Earthquakes, Uplift and Landscapes. Segunda edición. New Jersey: Prentice Hall, 2009, p. 362. ISBN: 978-01-30-88230-1

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE-MADS. Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas, Bogotá D.C.: El Ministerio, 2014.

MORENO GRANDE, Fredy Alberto y ESQUIVEL KIMENEZ, Jeison Ricardo. Estudio morfométrico de la cuenca del río Azul, afluente del río Calima, Departamento del Valle del Cauca. Trabajo de grado Tecnólogo en construcciones civiles. Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2015. Facultad Tecnológica. Tecnología en Construcciones Civiles.

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL-OMM. Guía de prácticas hidrológicas: Hidrología – De la medición a la información hidrológica OMM- No. 168. Sexta edición. Ginebra, Suiza: OMM, 2011. ISBN: 978-92-63-30168-0.

ROJAS, P. [En línea]. ¿Qué es una curva hipsométrica? [Consultado: agosto de 2016]. Disponible en: <http://www.ingeciv.com/que-es-una-curva-hipsometrica/>

ROJO HERNÁNDEZ, J.D. Morfometría de cuencas [En línea]. [Consultado en octubre de 2016]. Disponible en: <http://julianrojo.weebly.com/uploads/1/2/0/0/12008328/morfometria.pdf>.

UDELAR-FI-IMFIA. Sistema hidrológico [En línea]. [Consulta: octubre de 2016]. Disponible en: http://www.fing.edu.uy/imfia/imfiaweb/sites/default/files/01_Sistema_Hidrologico_2010.pdf.

VÉLEZ, Jorge y BOTERO, Adriana. Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luís, Manizales. Revista DYNA. 2010. ISSN En línea: 2346-2183.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION-WMO. Lista de términos equivalentes con sus definiciones. *Glosario Hidrológico Internacional*. Tercera Edición. Ginebra, Suiza: Publications Board, 2012, p. 1-391. ISBN 978-92-63-03385-8.