



**Creemos
en Boyacá**



EMPRESA DEPARTAMENTAL DE
SERVICIOS PÚBLICOS DE BOYACÁ S.A. ESP
PAP - PDA

**GOBERNACIÓN DE BOYACÁ
EMPRESA DEPARTAMENTAL DE SERVICIOS PÚBLICOS DE BOYACÁ S.A. ESP
NIT. 900.297.725-0**

**CONSULTOR
AGUAS DE LOS ANDES
NIT. 901.152.609-5**



CONTRATO DE CONSULTORÍA No. 01 DE 2018

**“CONSULTORÍA PARA REALIZAR ESTUDIOS Y DISEÑOS DE DETALLE PARA LA
CONSTRUCCIÓN DE INFRAESTRUCTURA EN 48 ACUEDUCTOS RURALES
INVIABLES SANITARIAMENTE Y EN RIESGO ALTO DEL DEPARTAMENTO DE
BOYACÁ”**

**ESTUDIO HIDROLÓGICO PARA EL ACUEDUCTO INTERVEREDAL DE LAS
VEREDAS TEBGUA, REGINALDO Y SAN ANTONIO**



**DEPARTAMENTO DE BOYACÁ
MUNICIPIO DE MONGUÍ
2018**

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

CONTROL DE CAMBIOS

VERSIÓN ACTUAL	FECHA	NATURALEZA DEL CAMBIO
01	26/11/2018	Versión inicial

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	6
1 ÁREA DE ESTUDIO	7
1.1 MORFOMETRÍA.....	7
1.2 CUENCA HIDROGRÁFICA	7
1.2.1 Delimitación de cuencas.....	8
1.3 CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS	9
1.3.1 Área de la cuenca – área aferente (a)	9
1.3.2 Perímetro	9
1.3.3 Longitud del cauce principal (l_t)	10
1.3.4 Ancho medio de la cuenca (b)	10
1.3.5 Factor de forma (f)	10
1.3.6 Coeficiente de compacidad (k_c) o índice de gravelius	11
1.3.7 Índice de alargamiento (i_a)	11
1.3.8 Altura del cauce principal (H_{CAUCE})	12
1.3.9 Pendiente del cauce principal (I_{CAUCE})	12
1.3.10 Curva hipsométrica.....	13
1.3.11 Resumen parámetros morfométricos.....	15
2 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	16
2.1 INFORMACIÓN RECOPIADA	18
2.1.1 Precipitación total	18
3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO	20
3.1 METODOLOGÍA.....	20
3.1.1 Complementar datos	20
3.2 ESTIMACION DE CAUDALES	20
3.3 CAUDALES MÁXIMOS.....	20
3.3.1.1 Metodo lluvia-escorrentia – Soil Conservation Service (SCS).....	21
3.4 CAUDALES MEDIOS DIARIOS.....	33
3.4.1 Resultados.....	34
3.4.1.1 Evapotranspiración Real por método balance hídrico a largo plazo.	34

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

3.4.1.2 Caudales medios Cuenca Quebrada El tejlar	35
3.5 CAUDAL ECOLOGICO.....	37
3.5.1 Caudales mínimos Cuenca Quebrada EL TEJAR	37
3.5.1.1 Análisis de frecuencia	38
CONCLUSIONES	48
BIBLIOGRAFÍA	49

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Localización general del proyecto.....	7
Figura 1-2 Delimitación de la cuenca El Tejar	8
Figura 1-3 Curva Hipsométrica	14
Figura 2-1 Distribución espacial de las estaciones	18
Figura 2-2 Valores máximos medios y mínimos mensuales de precipitación	19
Figura 3-1 Mapa de regionalización Curvas regionalizadas.....	26
Figura 3-2 Curvas IDF, estación Monguí.....	27
Figura 3-3 Hietograma e hidrograma de descarga 1 hora de tormenta	28
Figura 3-4 Hietograma e hidrograma de descarga 2 horas de tormenta.....	29
Figura 3-5 Hietograma e hidrograma de descarga 3 horas de tormenta.....	29
Figura 3-6 Hietograma e hidrograma de descarga 6 horas de tormenta.....	30
Figura 3-7 Hietograma e hidrograma de descarga 12 horas de tormenta.....	30
Figura 3-8 Hietograma e hidrograma de descarga 24 horas de tormenta.....	31
Figura 3-9 Cuenca El Tejar, HEC-HMS	32
Figura 3-10 Hidrograma y curva de caudal	32
Figura 3-11 Caudal máximo.....	33
Figura 3-12 Evapotranspiración Real estimada para la cuenca El Tejar	35
Figura 3-13 Caudales medios estimados, para la cuenca El Tejar	36
Figura 3-14 Curva de caudales medios estimados	36
Figura 3-15 Valores de Caudales mínimos	38
Figura 3-16 Distribución Normal	40
Figura 3-17 Distribución Log Normal.	41
Figura 3-18 Distribución Pearson tipo III Fuente: http://slideplayer.es/slide/4099819/ ..	43
Figura 3-19 Distribución Gumbel	44
Figura 3-20 Análisis estadístico, ajustes de distribuciones extremos.....	47

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1. Clasificación de unidades hidrográficas en función del área geométrica	9
Tabla 1-2. Clasificación de cuenca de la FAO	11
Tabla 1-3 Datos curva hipsométrica	14
Tabla 1-4. Resumen parámetros morfométricos, cuenca El Tejar	15
Tabla 2-1. Estaciones dentro del área de estudio	16
Tabla 2-2. Cantidad Total de series por variable.....	18
Tabla 3-1. Números de curva CN recomendados	21
Tabla 3-2. Área(s) de las cuencas.....	23
Tabla 3-3. Tiempos de concentración	25
Tabla 3-4. Coeficientes para el cálculo de las curvas IDF, para Colombia.	26
Tabla 3-5 Resultados de caudales de excedencia 85% y 95%.....	37
Tabla 3-6 Caudal ecológico cuenca El Tejar.....	37
Tabla 3-7. Datos estadísticos para las distribuciones y ajustes	47

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

INTRODUCCIÓN

En el presente informe se documentan los procedimientos y cálculos del componente hidrológico con el fin de dar cumplimiento a lo establecido en el contrato de consultoría No. 01 de 2018. De igual manera, se evidencian los estudio y resultados obtenidos de los estudios hidrológicos de la(s) fuentes de captación actuales, esto con el fin de identificar la disponibilidad del recurso hídrico para las demandas estimadas en el sistema de acueducto para el cual se está realizando el análisis.

En el CAPÍTULO 1, se realiza la descripción general de la zona y el estudio morfológico objeto del contrato, al igual que una representación de las cuencas, mostrando la limitación de las mismas con sus principales características.

En los CAPÍTULO 2 y 3, se muestra de forma metódica el análisis de los parámetros climatológicos y cálculos necesarios para realizar este estudio hidrológico, analizando las diferentes características de la cuenca en estudio, manejando la información disponible aplicando el método computacional del HEC – HMS.

Finalmente, se hará un examen de la fuente de agua para revisar la viabilidad para suministrar el recurso hídrico al acueducto que actualmente opera en el área de estudio y el horizonte de diseño.

1 ÁREA DE ESTUDIO

El proyecto se desarrolla en el acueducto Interveredal de las Veredas Tebgua, Reginaldo y San Antonio

La bocatoma de captación se encuentra localizada en las coordenadas 5.708441 m. N y -72.841109 m. E, a una altura de 3641.0 m.s.n.m.

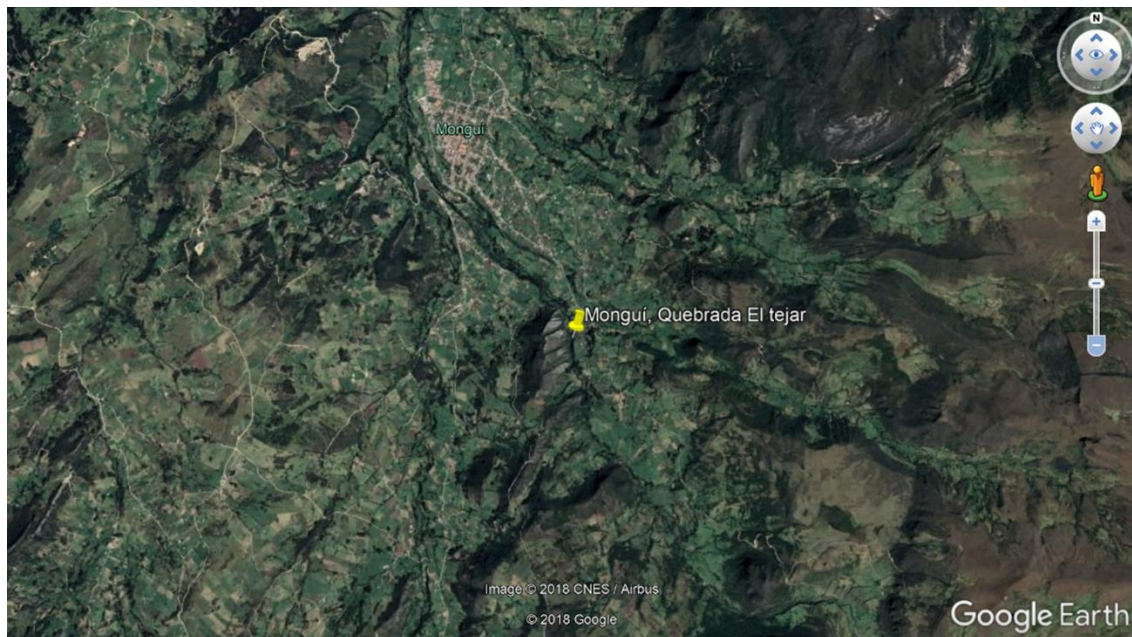


Figura 1-1 Localización general del proyecto
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, Google Earth, 2018

Para la evaluación del proyecto se tuvieron en cuenta el punto de ubicación de la bocatoma, la cual se identificó en las visitas de campo que se realizaron en el área de estudio y la topografía respectivamente.

1.1 MORFOMETRÍA

1.2 CUENCA HIDROGRÁFICA

La WMO y la UNESCO definen el concepto general de cuenca como “área de drenaje de un curso de agua, río o lago” (UNESCO & WMO, 2012). De acuerdo al HIMAT, ahora IDEAM, ...“La cuenca es un espacio geográfico limitado por divisorias de agua donde se expresa el ciclo hidrológico en un volumen de control que permite, a partir del agua precipitada que entra a este dominio, determinar la parte que escurre a lo largo de las laderas y que puede ser interceptada por las depresiones naturales del terreno, la

fracción que se evapora o infiltra y finalmente la cantidad que fluye a través de los drenajes naturales de la cuenca y forma el flujo superficial"... (HIMAT, 1985).

1.2.1 DELIMITACIÓN DE CUENCAS

Para la zona de estudio se delimitaron la(s) cuencas dependiendo del punto de captación, esta se nombraron de acuerdo a los nombre regionales, a razón de lo establecido en el contrato y manejo adecuado de los habitantes de la zona como se puede apreciar en la figura 1-2.

La delimitación se realizó con el software ArcGis, a partir de las curvas de nivel generando un TIN y posteriormente un Raster tipo Grid; a partir del Raster mediante las herramientas de hidrología se eliminaron las imperfecciones (huecos y sumideros) del ráster, se determinó la dirección, acumulación del flujo y por ultimo con la localización de la bocatoma se realizó la delimitación de la cuenca.

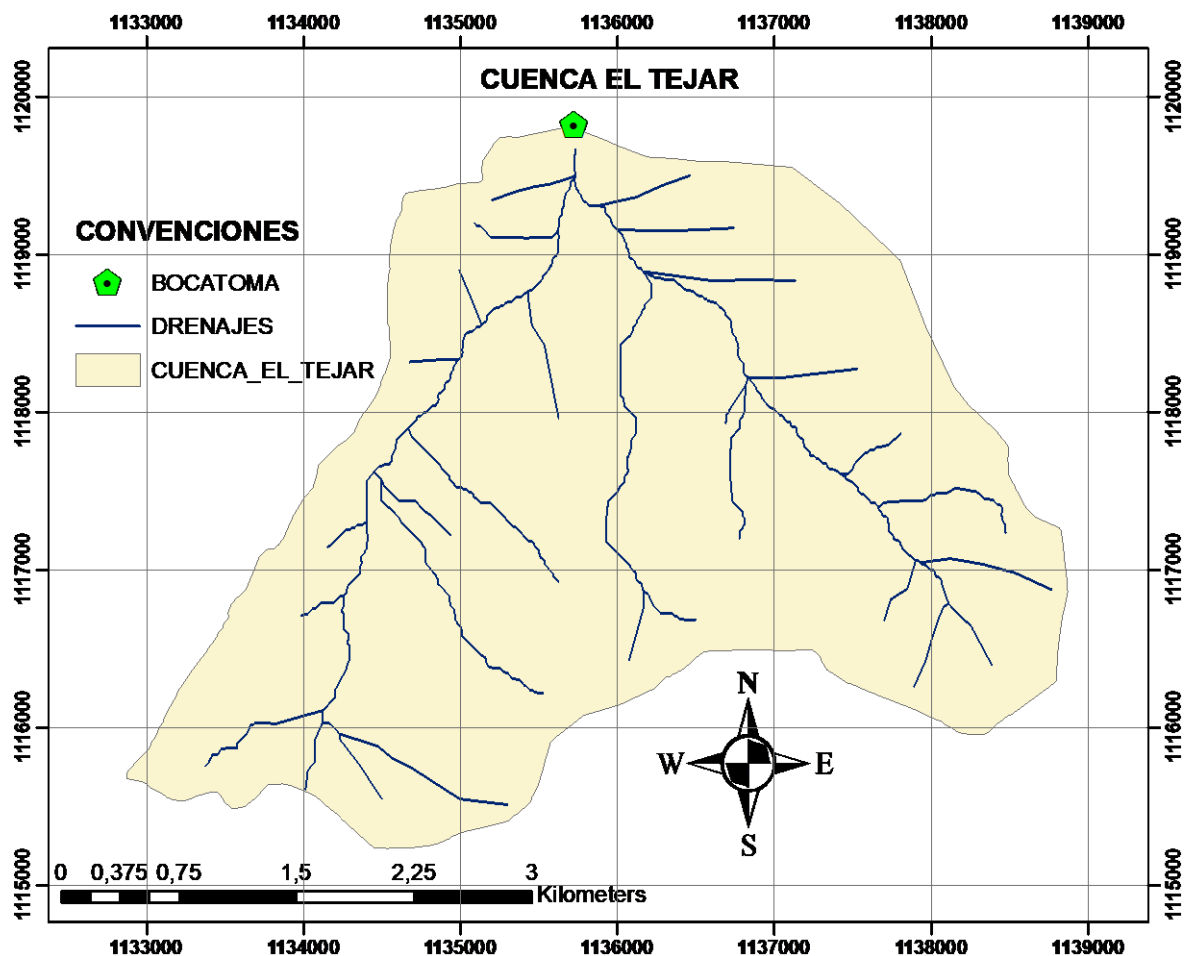


Figura 1-2 Delimitación de la cuenca El Tejar
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

1.3 CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS

De acuerdo con lo anterior, las características de una cuenca y de las corrientes que forman el sistema hidrográfico pueden representarse cuantitativamente mediante índices de forma y relieve de la cuenca y de la conexión con la red fluvial; muchos de los índices son razones matemáticas, por lo que pueden utilizarse para caracterizar y comparar cuencas de diferentes tamaños (Domínguez, 2010). A continuación se muestran los parámetros más importantes en un análisis morfométrico como se encuentran en el Anexo 1:

1.3.1 ÁREA DE LA CUENCA – ÁREA AFERENTE (A)

Este parámetro probablemente resulta ser el más importante ya que está directamente relacionado con los procesos hidrológicos que se dan al interior de la cuenca; está definida como la proyección ortogonal de toda la superficie de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural (Reyes T. et al., 2010). Así mismo, el mismo autor propone una clasificación en función del área de la unidad hidrográfica, y se muestra a continuación:

ÁREA (Km ²)	UNIDAD HIDROLÓGICA
<5	Unidad
5-20	Sector
20-100	Microcuenca
100-300	Subcuenca
>300	Cuenca

Tabla 1-1. Clasificación de unidades hidrográficas en función del área geométrica

Fuente. Jiménez E. & Materón M., 1986

El área de la cuenca El Tejar es respectivamente de 15.88 Km² lo que las clasifica como una Microcuenca.

1.3.2 PERÍMETRO

El perímetro se estima mediante plataformas CAD y/o GIS, y se calcula una vez se ha delimitado la cuenca bajo un sistema de geo-referenciación. Este parámetro junto al área permite inferir sobre la forma de la cuenca (Reyes T. et al., 2010).

El perímetro para la cuenca El Tejar, es respectivamente de 18.00 km.

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

1.3.3 LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL (L_T)

Es la distancia del recorrido que hace el cauce principal desde su nacimiento hasta su desembocadura medida en kilómetros. Usualmente la longitud del cauce principal L_t , presenta un grado de sinuosidad, el cual se representa a través del coeficiente de sinuosidad K_s y que constituye la relación entre la distancia total configurada por el recorrido de la corriente L_t , sobre la distancia lineal desde el nacimiento hasta la desembocadura L_l (Domínguez, 2010), de la siguiente manera:

$$K_s = \frac{L_t}{L_l}$$

Dicho lo anterior, los cauces con índice de sinuosidad mayores a 1.5 son considerados corrientes meándricas, las cuales tienden a presentar pendientes suaves y mayor tiempo de tránsito hidrológico.

La longitud del cauce principal de la cuenca es de 5.94 km respectivamente.

1.3.4 ANCHO MEDIO DE LA CUENCA (B)

Se determina cómo el cociente entre el área de la cuenca y la longitud lineal de la corriente principal:

$$B = \frac{A}{L_l}$$

El ancho medio es de 3.5 km respectivamente.

1.3.5 FACTOR DE FORMA (F)

Esta variable relaciona el área de la cuenca (A) con el cuadrado de la longitud total del cauce principal (L_t), en casos donde la cuenca es perfectamente cuadrada el factor de forma es igual a la unidad, mientras cuando se trate de cuencas alargadas el factor de forma tomara valores inferiores a la unidad (Jardí, 1985).

$$F = \frac{A}{L_t^2}$$

Este parámetro adimensional mide la tendencia de la cuenca hacia las crecidas, rápidas muy intensas a lentas sostenidas; un valor de F superior a la unidad, dará el grado de achatamiento de ella o de un río principal corto, por consiguiente con

tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas (Reyes T. et al., 2010).

Para la cuenca El Tejar, el factor de forma es de 0.45 respectivamente.

1.3.6 COEFICIENTE DE COMPACIDAD (K_c) O ÍNDICE DE GRAVELIUS

Es la relación entre la longitud del perímetro de la cuenca P_{cuenca} y el perímetro de un círculo con área equivalente a la de la cuenca $P_{\text{círculo}}$, de esta manera:

$$K_c = \frac{P_{\text{cuenca}}}{P_{\text{círculo}}} = \frac{P_{\text{cuenca}}}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P_{\text{cuenca}}}{\sqrt{A}}$$

Así, la clasificación de cuencas en función del índice de compacidad según la Organización de las Naciones Unidad para la alimentación y la Agricultura (FAO), las cuencas con valores de compacidad superiores a 1.5, tienden a tener un tránsito más largo de sus crecientes y por lo tanto atenuación de los hidrogramas disminuyendo el riesgo de inundación.

TIPO	RANGO	DESCRIPCIÓN
KC ₁	1.00 – 1.25	Redonda a oval redonda
KC ₂	1.26 – 1.50	Oval redonda a oval oblonga
KC ₃	1.51 – 1.75	Oval oblonga a rectangular oblonga
KC ₄	> 1.75	rectangular oblonga

Tabla 1-2. Clasificación de cuenca de la FAO
Fuente. FAO, 1985

El índice de compacidad para es de 1.26 respectivamente; lo cual la(s) clasifica como oval redonda a oval oblonga.

1.3.7 ÍNDICE DE ALARGAMIENTO (IA)

El índice de alargamiento propuesto por Horton, relaciona la longitud máxima de la cuenca con su ancho máximo medido perpendicularmente a la dimensión anterior; cuando el IA, toma valores mayores a 1, se trata seguramente de cuencas alargadas, mientras que para valores cercanos a 1, se trata de una cuenca cuya red de drenaje presenta la forma de abanico y se puede asumir que posee un río principal corto; así mismo este parámetro adimensional, permite predecir la dinámica del movimiento del agua en los drenajes y su potencia erosiva o de arrastre (Reyes T. et al., 2010).

$$IA = \frac{L_t}{B}$$

Para la cuenca EL Tejar, el índice de alargamiento es de 1.72 respectivamente; que corresponden a unas cuencas alargada.

1.3.8 ALTURA DEL CAUCE PRINCIPAL (H_{CAUCE})

Se calcula como la altura promedio de los tramos característicos utilizados en la construcción del perfil longitudinal del cauce principal. Para las corrientes con muchos cambios de altura en el recorrido del cauce principal se calcula la pendiente promedio ponderada con base en las frecuencias relativas producto de la agrupación en clases (usualmente entre 8 a 12 clases) de los valores de altura tomados en los tramos característicos (Domínguez, 2010):

$$H_{cauce} = H_1 f_1 + H_2 f_2 + \dots + H_n f_n$$

Donde:

H_i = es la cota de altura en la mitad del intervalo de cada clase y,
 F_i = es la frecuencia que le corresponde a ese intervalo.

La altura ponderada del cauce principal es de 3641.0 msnm respectivamente.

1.3.9 PENDIENTE DEL CAUCE PRINCIPAL (I_{CAUCE})

Por pendiente se entiende el cociente entre los incrementos de alturas (cotas) y los incrementos de longitud de la corriente para un tramo determinado. Se distingue la pendiente promedio y pendiente promedio ponderada. La pendiente promedio I_{cauce} es el cociente entre la caída de alturas ΔH sobre la longitud del tramo ΔL en la que esta caída ocurre (Domínguez, 2010), así:

$$I_{cauce} = \frac{\Delta H}{\Delta L}$$

Para las corrientes con muchos cambios de pendiente se calcula la pendiente promedio ponderada. Ésta utiliza las frecuencias relativas producto de la agrupación en clases (usualmente entre 8 a 12 clases) para ponderar los valores de pendiente calculados (Domínguez, 2010):

$$I_{cauce} = I_1 f_1 + I_2 f_2 + \dots + I_n f_n$$

Donde:

I_i = es la pendiente en la mitad del intervalo de cada clase y,

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

F_i = es la frecuencia que le corresponde a ese intervalo.

La pendiente del cauce es uno de los factores importantes que inciden en la capacidad que tiene el flujo para transportar sedimentos, por cuanto está relacionada directamente con la velocidad del agua. En los tramos de pendiente fuerte superiores al 5 % las velocidades de flujo resultan tan altas que pueden mover como carga de fondo sedimentos de diámetros mayores de 5 centímetros, además de los sólidos que ruedan por desequilibrio gracias al efecto de lubricación producido por el agua (Reyes T. et al., 2010).

La pendiente ponderada de su cauce principal es de 7.6 % respectivamente.

1.3.10 CURVA HIPSOMÉTRICA

Esta curva muestra una interpretación clara de la distribución de las áreas de la cuenca contenidas en distintas zonas con respecto a su pendiente. También son un indicativo a los patrones evolutivos de las cuencas (Strahler, 1952); Las ...“cuenas con mayor parte del área con elevación por encima de los valores medios de la misma, son consideradas cuencas con gran potencial erosivo (cuenas inmaduras), de lo contrario son consideradas cuencas maduras o sedimentarias”... (Strahler, 1952). Para cuencas donde esta relación: área relativa cuenca – elevación ponderada, se consideran como cuencas en equilibrio.

Para construirla se determinan de 8 a 12 zonas altitudinales y de acuerdo con la información del modelo digital de terreno, se calcula el porcentaje de área contenido en cada una de ellas. En el eje horizontal se gráfica el porcentaje de área de la cuenca cubierto por cada zona altitudinal y en el vertical los intervalos de clase de cada zona altitudinal (Domínguez, 2010).

A continuación, se muestra la curva hipsométrica para la cuenca El Tejar.

No.	COTAS		PROMEDIO	AREA ENTRE CURVAS	% AREA ENTRE CURVAS	AREA ACUMULADA	% AREA ACUMULADA
	Min	Max					
1	3306.2	3339.7	3323.0	42426.0	0%	15877440	100.0%
2	3339.7	3373.2	3356.5	134001.0	1%	15835014	99.7%
3	3373.2	3406.7	3390.0	282060.0	2%	15701013	98.9%
4	3406.7	3440.2	3423.4	370872.0	2%	15418953	97.1%
5	3440.2	3473.7	3456.9	380682.0	2%	15048081	94.8%
6	3473.7	3507.2	3490.4	490500.0	3%	14667399	92.4%
7	3507.2	3540.7	3523.9	814338.0	5%	14176899	89.3%
8	3540.7	3574.1	3557.4	1529010.0	10%	13362561	84.2%
9	3574.1	3607.6	3590.9	2111022.0	13%	11833551	74.5%
10	3607.6	3641.1	3624.4	1513017.0	10%	9722529	61.2%
11	3641.1	3674.6	3657.9	1116468.0	7%	8209512	51.7%
12	3674.6	3708.1	3691.4	1045170.0	7%	7093044	44.7%
13	3708.1	3741.6	3724.8	1203183.0	8%	6047874	38.1%
14	3741.6	3775.1	3758.3	1133631.0	7%	4844691	30.5%
15	3775.1	3808.6	3791.8	1269936.0	8%	3711060	23.4%
16	3808.6	3842.0	3825.3	917946.0	6%	2441124	15.4%
17	3842.0	3875.5	3858.8	625914.0	4%	1523178	9.6%
18	3875.5	3909.0	3892.3	513882.0	3%	897264	5.7%
19	3909.0	3942.5	3925.8	321291.0	2%	383382	2.4%
20	3942.5	3976.0	3959.3	62091.0	0%	62091	0.4%

Tabla 1-3 Datos curva hipsométrica
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

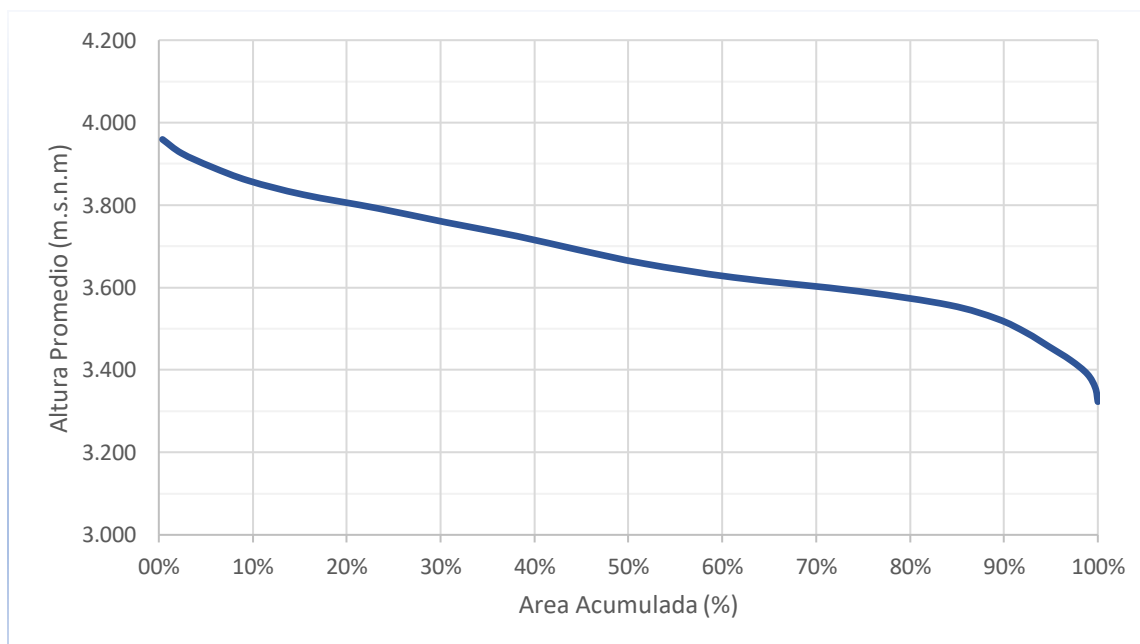


Figura 1-3 Curva Hipsométrica
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

1.3.11 RESUMEN PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS

A continuación, se presenta un resumen de los parámetros morfométricos calculados para la(s) cuencas analizadas (Ver Anexo 1).

PARAMETRO	UNIDAD	CUENCAS
		EL TEJAR
Area	km²	15.88
Perimetro	km	18.00
Longitud	km	4.60
Longitud Cauce Principal	km	5.94
Ancho medio de la cuenca	km	3.5
Factor de Forma	Adimensional	0.45
Coeficiente compacidad	Adimensional	1.26
Altura inicio cauce principal	m.s.n.m	3775
Altura salida cauce principal	m.s.n.m	3322
Pendiente del cauce principal	%	7.6%
Pendiente media de la cuenca	%	24.58
Longitud total de drenaje	km	30.75
Densidad de drenaje	km/km²	1.94
Tiempo concentración promedio	minutos	62.32
X centroide	m	1135993.074
Y centroide	m	1117464.466
CN	Adimensional	61
Rb	Adimensional	2.37
Altura Promedio	m.s.n.m	3641.0

Tabla 1-4. Resumen parámetros morfométricos, cuenca El Tejar
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

2 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

La variabilidad del sistema climático se usa para denotar las desviaciones de las estadísticas en el clima a través de un período de tiempo, para ello se debe comparar dicho periodo con estadísticas más antiguas del mismo periodo calendario, en este sentido, la variabilidad climática es medida como estas desviaciones de las medidas centrales que se denominan como anomalías dentro del sistema (WMO, 1999).

Para la caracterización climática del proyecto, se buscaron estaciones hidrometeorológicas en el catálogo de estaciones del IDEAM, para el presente estudio se identificaron las siguientes estaciones con influencia en la(s) cuencas:

CODIGO	ESTACION	CORRIENTE	MUNICIPIO	ENTIDAD	TIPO
24030190	Monguí	Monguí	Monguí	IDEAM	PM

Tabla 2-1. Estaciones dentro del área de estudio

Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

Se entiende como estación meteorológica al equipo de medición con el que se hacen observaciones y mediciones puntuales de los diferentes parámetros meteorológicos en un sitio determinado, con el fin de establecer el comportamiento atmosférico en las diferentes zonas de un territorio.

A continuación, se da una descripción detallada de los tipos de estaciones meteorológicas basada en normas técnicas de la Organización Meteorológica Mundial, (OMM) y en los criterios del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM.

- Estación Pluviométrica (PM): permite medir la cantidad de lluvia caída entre dos observaciones consecutivas.
- Estación Pluviográfica (PG): Registra en forma mecánica y continúa la precipitación, y permite conocer la cantidad, duración, intensidad y periodo en que ha ocurrido la lluvia.
- Estación Climatológica principal (CP): se hacen observaciones de visibilidad, tiempo atmosférico presente, cantidad, tipo y altura de las nubes, estado del suelo, precipitación, temperatura del aire, humedad, viento, radiación solar, brillo solar, evaporación y fenómenos especiales. Gran parte de estos parámetros se obtienen de instrumentos registradores.
- Estación Climatológica ordinaria (CO): miden lluvias y temperaturas extremas e instantáneas.

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

- Estación Sinóptica principal (SP): se efectúan observaciones de los principales elementos meteorológicos en horas convenidas internacionalmente. Los datos se toman horariamente y corresponden a nubosidad, dirección y velocidad de los vientos, presión atmosférica, temperatura del aire, tipo y altura de las nubes, visibilidad, fenómenos especiales, características de humedad, precipitación, temperaturas extremas, capas significativas de nubes, recorrido del viento y secuencia de los fenómenos atmosféricos. Esta información se codifica y se intercambia a través de los centros mundiales, con el fin de alimentar los modelos globales y locales de pronóstico y para el servicio de la aviación.
- Estación Sinóptica secundaria (SS): Al igual que en la estación anterior, las observaciones se realizan a horas convenidas internacionalmente y los datos corresponden comúnmente a visibilidad, fenómenos especiales, tiempo atmosférico, nubosidad, estado del suelo, precipitación, temperatura del aire, humedad del aire y viento.
- Estación Agrometeorológica (AM): se realizan observaciones meteorológicas y otras observaciones que ayudan a determinar las relaciones entre el clima, por una parte, y la vida de las plantas y los animales, por la otra. Incluye el mismo programa de observaciones de la estación CP, más registros de temperatura a varias profundidades (hasta un metro) y en la capa cercana al suelo (0, 10 y 20 cm sobre el suelo).

En la siguiente figura, se puede observar la distribución espacial de las estaciones que tienen influencia en el área de trabajo definida.

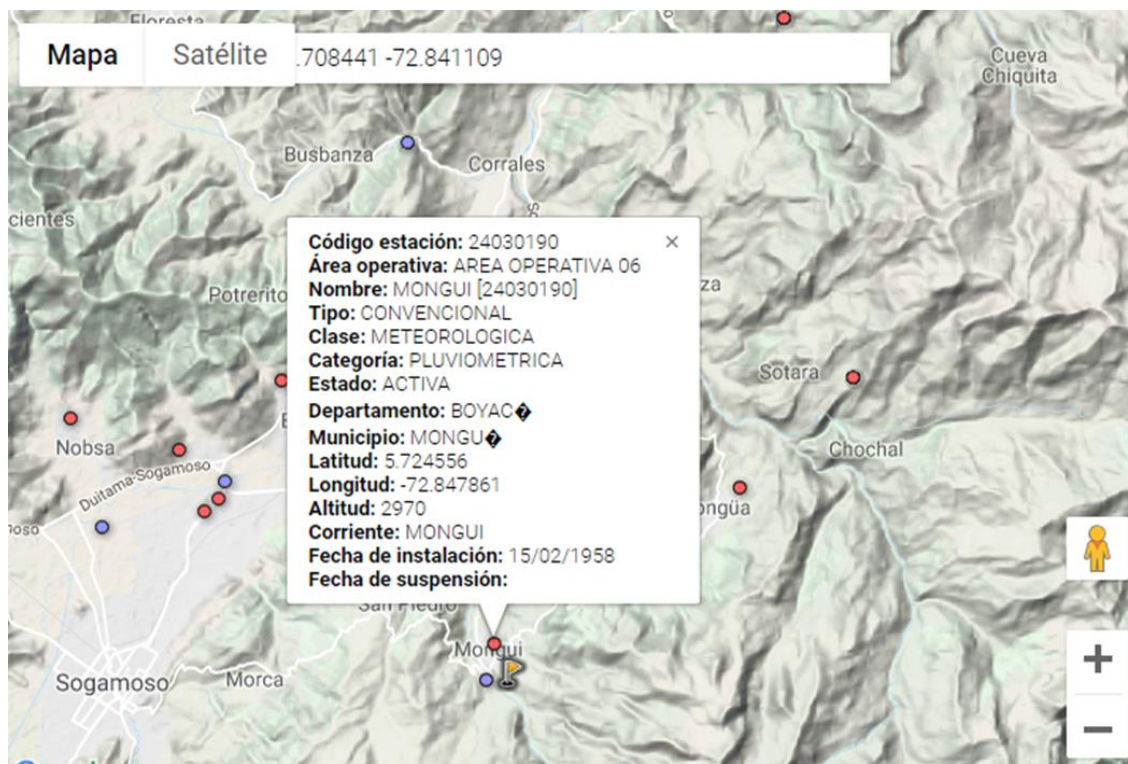


Figura 2-1 Distribución espacial de las estaciones
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, IDEAM, 2018

2.1 INFORMACIÓN RECOPIADA

La noción de recolección refiere al proceso y el resultado de recolectar (reunir, recoger o almacenar) un dato, una información que permite generar un cierto conocimiento; para realizar la caracterización climática, se obtuvo información a resolución diaria de las siguientes variables (Ver Anexo 2).

VARIABLE	SERIES
Precipitación	1

Tabla 2-2. Cantidad Total de series por variable
Fuente: Consorcio Aguas de los Andes, 2018

2.1.1 PRECIPITACIÓN TOTAL

La precipitación se constituye en el componente principal del ciclo hidrológico, pues es en general, la principal fuente de abastecimiento de agua para una región. Los estudios de la precipitación analizan el régimen de lluvias en la región a partir de los datos de estaciones climatológicas, pluviométricas y/o pluviográficas.

La Precipitación media en el área es de 744.00 mm/año, con una distribución bimodal donde se identifican dos períodos bien definidos a lo largo del año, los períodos de máxima precipitación correspondientes a los meses de Mayo, Julio, Septiembre y Diciembre, los cuales tienen una precipitación acumulada de 364.40 mm que es un equivalente al 48.98 % del total, y en el segundo período, se presentan el 51.02 % con 379.60 mm, siendo este el periodo seco correspondiente a los meses de Enero - Abril, Junio, Agosto, Octubre, Noviembre, con precipitaciones máximas en 24 horas promedio de 47.45 mm.

A continuación, se presentan los valores de precipitación máximos, medios y mínimos, para la(s) estaciones influyentes en el área de estudio (Ver Anexo 2 y 3).

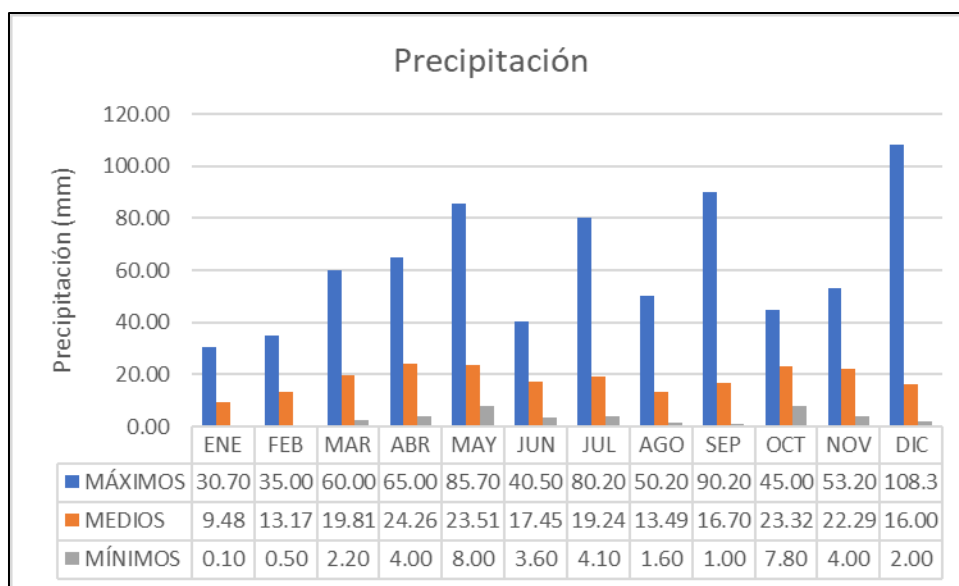


Figura 2-2 Valores máximos medios y mínimos mensuales de precipitación
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

3.1 METODOLOGÍA

Como primer paso se debe realizar un análisis de la(s) variables climatológicas para caracterizar la zona de captación; posteriormente, para el cálculo de cada uno de los escenarios de caudal se utilizará la metodología de lluvia – escorrentía, utilizando el modelo computacional HEC – HMS.

Posteriormente, se obtienen los hidrogramas con base a los registros históricos de las precipitaciones obtenidas de la(s) estaciones influyentes en la zona del proyecto; y finalmente, se desarrolla la metodología, con el fin de simular el proceso de precipitación, evapotranspiración y escurrimiento para lograr obtener el caudal de diseño además de obtener una visión general de la cuenca.

3.1.1 COMPLEMENTAR DATOS

Como las estaciones son simétricas con respecto a las de referencia en los años faltantes se utiliza el método de razón de valores normales, que se utiliza cuando falta el valor faltante se puede completar con estaciones que tienen las mismas características fisiográficas y climatológicas.

$$P_x = \frac{1}{n} \left[\frac{N_x P_A}{N_A} + \frac{N_x P_B}{N_B} + \frac{N_x P_C}{N_C} \right]$$

Donde n es el número de estaciones de referencia, x es la estación que no se conoce el dato, A, B, C son las estaciones de referencia, N_x, N_A, N_C es la media aritmética de las estaciones y P_A, P_B, P_C es el valor conocido de las estaciones referencias del periodo que hace falta de la estación x .

3.2 ESTIMACION DE CAUDALES

3.3 CAUDALES MÁXIMOS

Para realizar la obtención de los hidrogramas con base a los registros históricos de las precipitaciones obtenidas de la(s) estaciones a partir de precipitaciones, se implementó el modelo de lluvia-escorrentía desarrollado por el National Resource Conservation Service del USDA (United States Department of Agriculture).

3.3.1.1 METODO LLUVIA-ESCORRENTIA – SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS)

El modelo lluvia-escorrentía desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS), representa las hidrográficas de respuesta de las áreas de drenaje; este concepto de diseño se basa en la estimación de la precipitación efectiva o escorrentía directa, esto es, la fracción de la lluvia que aparece como escorrentía. Para los modelos lluvia-escorrentía en general y para el modelo del SCS, en particular, el área aportante se divide en dos: un área impermeable, de la cual no se restan pérdidas iniciales o pérdidas por infiltración, y un área que es capaz de infiltrar una fracción de la lluvia y en la cual se pueden presentar pérdidas iniciales.

3.3.1.1.1 Curva numero

El número de curva (CN) es una medida del potencial de escorrentía del suelo en cuestión. Suelos con alto potencial de generación de escorrentía tienen valores de CN más altos. La definición de este factor está en función del tipo de suelo, la impermeabilidad de la zona y del tipo de cobertura presente en el terreno, y en principio no varían de tormenta a tormenta. Estas características determinan la fracción de lluvia que efectivamente se convertirá en escorrentía.

USO DE LA TIERRA	COBERTURA TRATAMIENTO O PRACTICA	CONDICION HIDROLOGICA	GRUPO DE SUELOS			
			A	B	C	D
1.Rastrojo	Hileras Rectas	-----	77	86	91	94
	Hileras Rectas	Mala	71	81	88	91
	Hileras Rectas	Buena	67	78	85	89
	Curvas de Nivel	Mala	70	79	84	88
	Curvas de Nivel	Buena	65	75	82	86
2.Cultivos en Hileras	CutNiv y Terrazas	Mala	66	74	80	82
	CutNiv y Terrazas	Buena	62	71	78	81
	Hileras Rectas	Mala	65	76	84	86
	Hileras Rectas	Buena	63	75	83	87
	Curvas de Nivel	Mala	63	74	82	85
3.Cultivos en Hileras Estrechas	Curvas de Nivel	Buena	61	73	81	84
	CutNiv y Terrazas	Mala	61	72	79	82
	CutNiv y Terrazas	Buena	59	70	78	81
	Hileras Rectas	Mala	66	77	85	89
	Hileras Rectas	Buena	58	72	81	85
4.Leguminosas en Hileras Estrechas o Forraje en Rotación	Curvas de Nivel	Mala	64	75	83	86
	1/ Curvas de Nivel	Buena	55	69	78	83
	CutNiv y Terrazas	Mala	63	73	80	83
	CutNiv y Terrazas	Buena	51	67	76	80
	Curvas de Nivel	Mala	68	79	86	89
5.Pastos de Pastoreo	Curvas de Nivel	Regular	49	69	79	84
	Curvas de Nivel	Buena	39	61	74	80
	Curvas de Nivel	Mala	47	67	81	88
	Curvas de Nivel	Regular	25	59	75	83
	Curvas de Nivel	Buena	6	35	70	79
6.Pastos de Corte	Curvas de Nivel	Buena	30	58	71	78
	Curvas de Nivel	Mala	45	66	77	83
	Curvas de Nivel	Regular	36	60	73	79
7.Bosque	Curvas de Nivel	Buena	25	55	70	77
	Curvas de Nivel	Mala	59	74	82	86
	Curvas de Nivel	Regular	72	82	87	89
8.Patios		-----	59	74	82	86
9.Caminos de Tierra 2/		-----	72	82	87	89
10.Pavimentos		-----	74	84	90	92

Tabla 3-1. Números de curva CN recomendados

Fuente. Resolución 865 de 2004

- Bajo potencial de escorrentía (A): Suelos que tienen alta tasa de infiltración incluso cuando estén muy húmedos. Consisten en arenas o gravas profundas, bien a excesivamente drenadas, estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua.

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

- Moderadamente bajo potencial de escorrentía (B): Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, y permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasas de transmisión de agua moderadas.
- Moderadamente alto potencial de escorrentía (C): Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten en suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo; suelos de texturas moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a sales o álcalis o suelos con niveles freáticos moderados. Esos suelos pueden ser pobremente drenados o bien a moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad (50-100cm).
- Alto potencial de escorrentía (D): Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten en suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a sales o álcalis y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua muy lenta.

Los tipos de suelo A, B, C y D son una clasificación hidrológica basada en el potencial de escorrentía del suelo, donde típicamente los suelos tipo A presentan el potencial de escorrentía más bajo y los suelos tipo D presentan el potencial de escorrentía más alto.

3.3.1.1.2 Método SCS para abstracciones

Según el Título D, 4.4.2.2, del RAS 2000, el valor de la abstracción final S se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Donde:

CN: Valor del número de curva

Teniendo en cuenta lo anterior, según Ven te Chow, al estudiar los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales pequeñas, se desarrolló una relación empírica para calcular la abstracción inicial, la cual se muestra a continuación:

$$I_a = 0.2 S$$

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

3.3.1.1.3 Área de drenaje

Corresponde al área de las cuencas a analizar, a continuación se muestra dicho valor para la cuencas respectivas.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	QUEBRADA EI TEJAR
Área	A	Km ²	15.88
		m ²	15880000
		Ha	1588

Tabla 3-2. Área(s) de las cuencas

Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

3.3.1.1.4 Tiempos de concentración (T_c)

Es el tiempo transcurrido entre el final del hietograma de excesos y el final del escurrimiento directo, siendo esta la definición que aparece reseñada en la literatura con mayor frecuencia. Sin embargo, otros autores reportan el tiempo de concentración como el tiempo comprendido entre el centroide del hietograma de excesos y el punto de inflexión sobre la curva de recesión del hidrograma de escurrimiento directo.

Además, se puede definir como el tiempo que demora en viajar una partícula de agua desde el punto más remoto hasta el punto de interés. Corresponde al lapso entre el final de la lluvia y el momento en que cesa el escurrimiento superficial. Existen una serie de fórmulas que permiten el cálculo de este tiempo desarrolladas por diversos autores. Algunas de las fórmulas que se emplean para el cálculo de este indicador se encuentran, Kirpich, Temez, Giandotti, Bransby-Williams, Dirección General Carreteras (DGC). Sus ecuaciones se muestran a continuación:

➤ Kirpich

$$T_c = 0.02 * L^{0.77} * S^{-0.385}$$

Donde:

T_c = tiempo de concentración (min)

L = longitud del cauce principal en (m)

S = pendiente del cauce principal (m/m)

➤ Témez

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

$$T_c = 0.3 * \left[\frac{L}{S^{0.25}} \right]^{0.75}$$

Donde:

T_c = tiempo de concentración (horas)
 L = longitud del cauce principal en (km)
 S = pendiente del cauce principal (m/m)

➤ **California Culverts Practica**

$$T_c = 60 \left[0.87 * \frac{L}{H} \right]^{0.385}$$

Donde:

T_c = tiempo de concentración (min)
 L = longitud del cauce principal en (Km)
 H = diferencia de alturas del cauce principal (m)

➤ **Bransby-Williams**

$$T_c = \frac{L}{1.5D} \sqrt[5]{\frac{A^2}{S}}$$

Donde:

T_c = tiempo de concentración (Horas)
 L = longitud del cauce principal en (Km)
 A = área de la cuenca (km²)
 S = pendiente media del cauce principal (%)
 D = diámetro del círculo de área equivalente a la superficie de la cuenca (km)

➤ **Dirección general de carreteras**

$$T_c = 0.3 \left[\frac{L}{J^{0.25}} \right]^{0.76}$$

Donde:

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	--	---

T_c = tiempo de concentración (Horas)

L = longitud del cauce principal en (Km)

J = pendiente media del cauce principal (H/L)

H = diferencia de nivel entre el punto de salida y el punto hidrológicamente más cercano (m)

A continuación, se presentan los resultados del cálculo del tiempo de concentración por diferentes metodologías.

EL TEJAR						
PARAMETROS CAUCE PRINCIPAL		METODOS PARA CALCULO TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (T_c en Min)				PROMEDIO
LONGITUD (m)	PENDIENTE m/m	KIRPICH	TEMEZ	CALIFORNIA	VEN TE CHOW	
5940	0.076	43.37	110.96	10.72	84.24	62.32

Tabla 3-3. Tiempos de concentración
Fuente: Consorcio Aguas de los Andes, 2018

3.3.1.1.5 Curvas sintéticas IDF

La metodología simplificada de cálculo de las curvas intensidad – duración –frecuencia se debe llevar a cabo siempre y cuando no se disponga de datos históricos de precipitación de corta duración. Para Colombia se propone el método de curvas sintéticas (Vargas y Granados, 1998), en este estudio se dedujeron curvas intensidad-duración - frecuencia por correlación con la precipitación máxima promedio anual en 24 horas, el número promedio de días de lluvia al año, la precipitación total media anual y la elevación de la estación.

La mejor correlación obtenida, sin embargo, fue la que se obtuvo con la precipitación máxima promedio anual en 24 horas en una estación, y es la que se propone para los estudios, además de que es la más sencilla de utilizar.

La expresión resultante está dada por:

$$I = \frac{axT^b x M^d}{\left(\frac{t}{60}\right)^c}$$

Donde:

I = intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).

T = periodo de retorno, en años.

M = precipitación máxima promedio anual en 24 hrs a nivel multianual

t = Duración de la lluvia, en minutos (min).

a, b, c, d = parámetros de ajuste de la regresión. Estos parámetros fueron regionalizados como se presenta en la siguiente figura sus valores se presentan en la siguiente tabla.

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

Tabla 3-4. Coeficientes para el cálculo de las curvas IDF, para Colombia.
Fuente. Manual de carreteras INVIAS

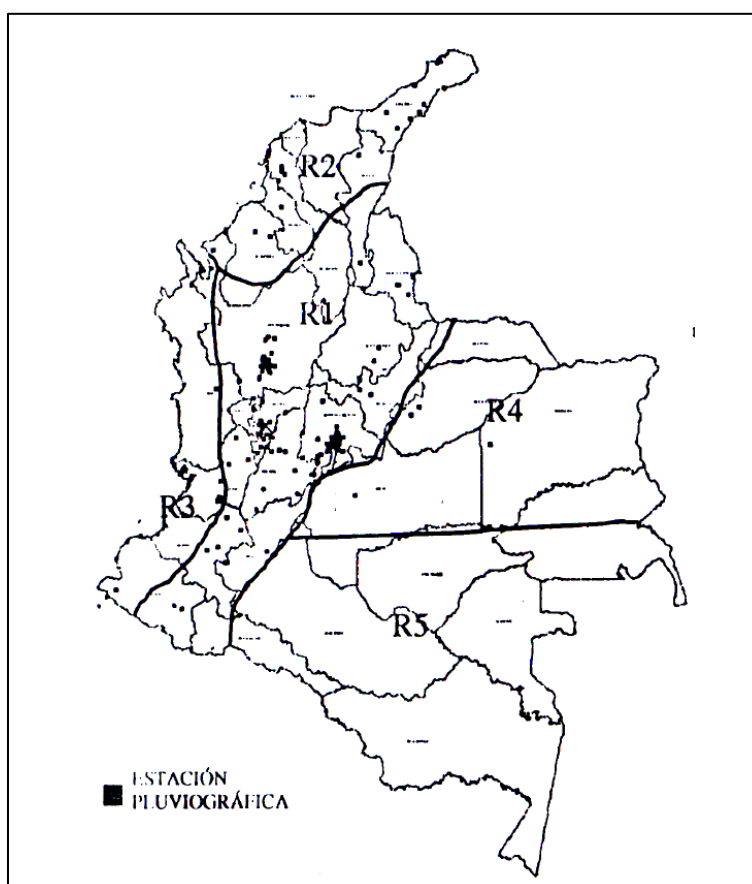


Figura 3-1 Mapa de regionalización Curvas regionalizadas
Fuente. Manual de carreteras INVIAS

A continuación, se muestran los valores obtenidos, por cada periodo de retorno de acuerdo a la precipitación máxima media multianual representativa de la cuenca, $P_{max24hrs} = 16.10 \text{ mm}$ (Ver Anexo 4).

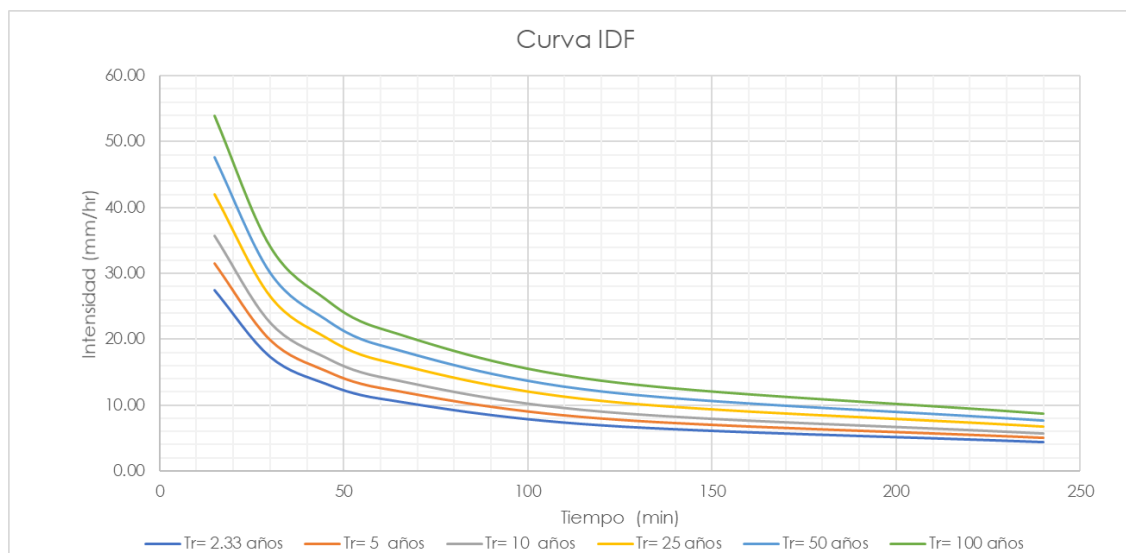


Figura 3-2 Curvas IDF, estación Monguí
Fuente: Consorcio Aguas de los Andes, 2018

3.3.1.1.6 Modelo HEC HMS

El HEC-HMS, siglas que provienen de su nombre en inglés Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System, está diseñado para simular el proceso de precipitación-escorrentía de una cuenca. Este programa posee una vasta gama de modelos matemáticos para simular la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración, la transformación de la precipitación neta, el flujo base y el tránsito hidráulico en canales abiertos.

Según Joo *et al.* (2013), el HEC-HMS se puede categorizar como un modelo conceptual agrupado, ya que representa el proceso de escorrentía de una cuenca por medio de un modelo de pérdidas agrupado el cual combina con un hidrograma unitario principalmente. Además, al ser un modelo conceptual, éste posee menos parámetros y menos solicitudes en lo que a información de entrada respecta, en comparación con los modelos físicos totalmente distribuidos (Jan Seibert & Vis, 2012).

Se recomienda abrir los archivos del Anexo 5 con la versión 4.2.1 del HEC-HMS¹.

3.3.1.1.7 Perdidas SCS

El modelo del número de curva del SCS, es un modelo que fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, el cual se basa en un número adimensional denominado número de curva. Este número es un parámetro empírico definido para la estandarización de curvas de escorrentía directa acumulada

¹ <http://www.hec.usace.army.mil/software/heh-hms/>

en función de la precipitación, para muchas cuencas experimentales, confeccionadas por el Servicio de Conservación de Suelos.

El número de curva varía entre 0 y 100, dependiendo del uso del suelo y la condición hidrológica de la cuenca, asignando 100 para un cuerpo de agua. En general, el método CN-SCS estima la precipitación neta como una función de la precipitación acumulada, la cobertura vegetal, uso de suelo y la condición de humedad antecedente del suelo.

3.3.1.1.8 Hidrogramas de descarga

En hidrología se denomina hidrograma a la representación gráfica de la variación del caudal en relación con el tiempo en determinado punto de una cuenca; en esencia, el hidrograma contiene el comportamiento determinado por un patrón de precipitación sobre unas condiciones fisiográficas y la relación lluvia – escorrentía de la cuenca.

A continuación se generan los hidrogramas de descarga asociados a las tormentas con recurrencia de 100 años y duraciones de 1, 2, 3, 6, 12 y 24 horas como lo establece el contrato (Ver anexo 4).

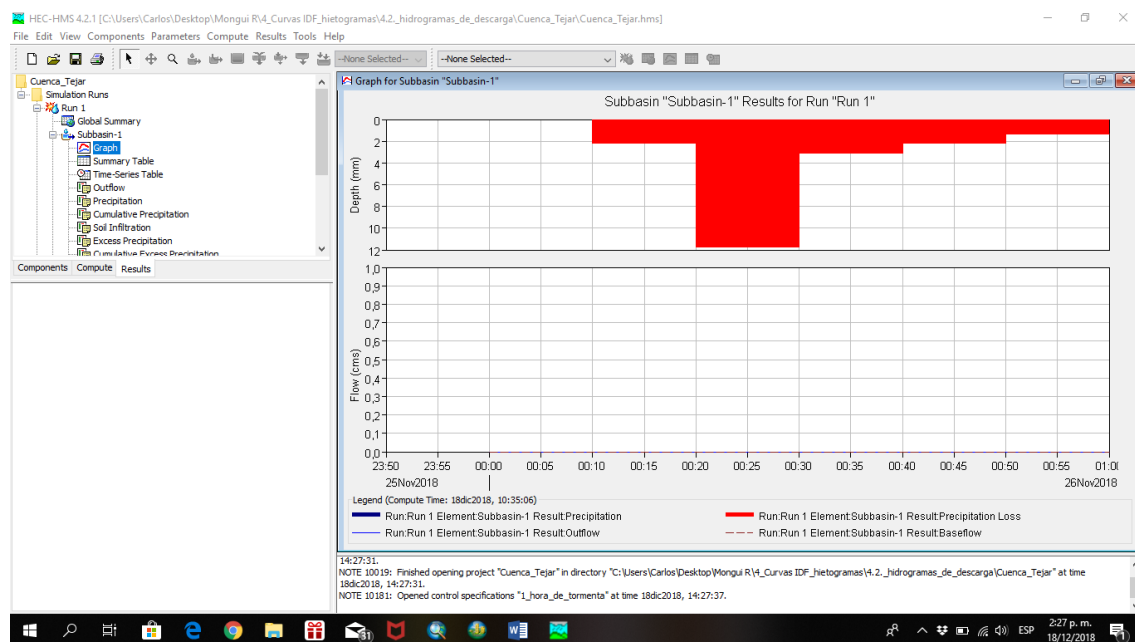


Figura 3-3 Hietograma e hidrograma de descarga 1 hora de tormenta
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

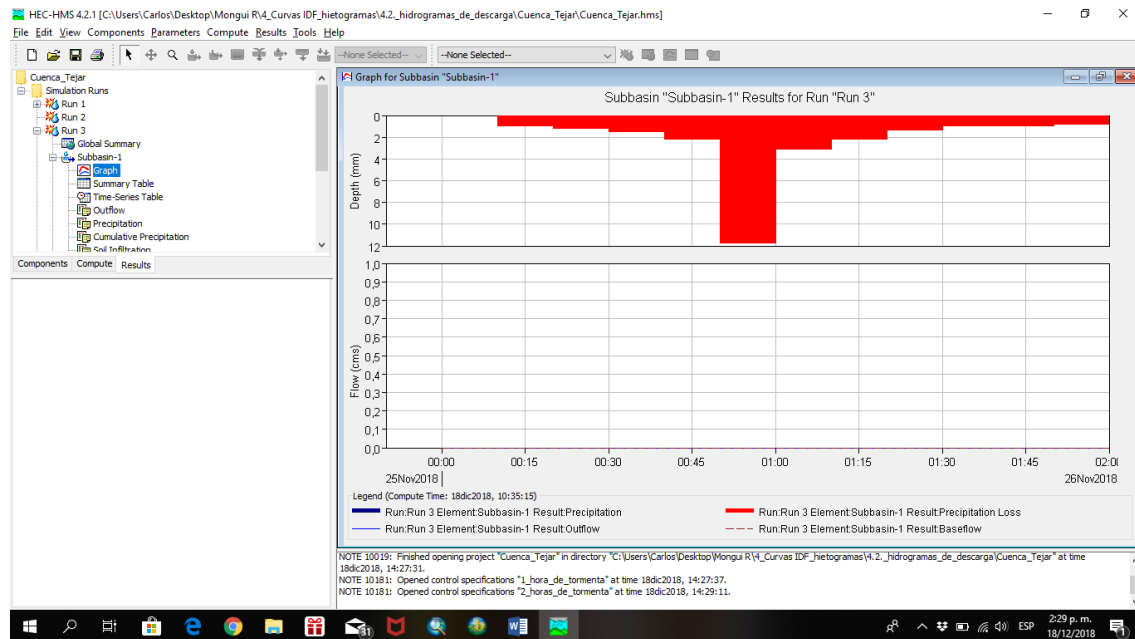


Figura 3-4 Hietograma e hidrograma de descarga 2 horas de tormenta
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

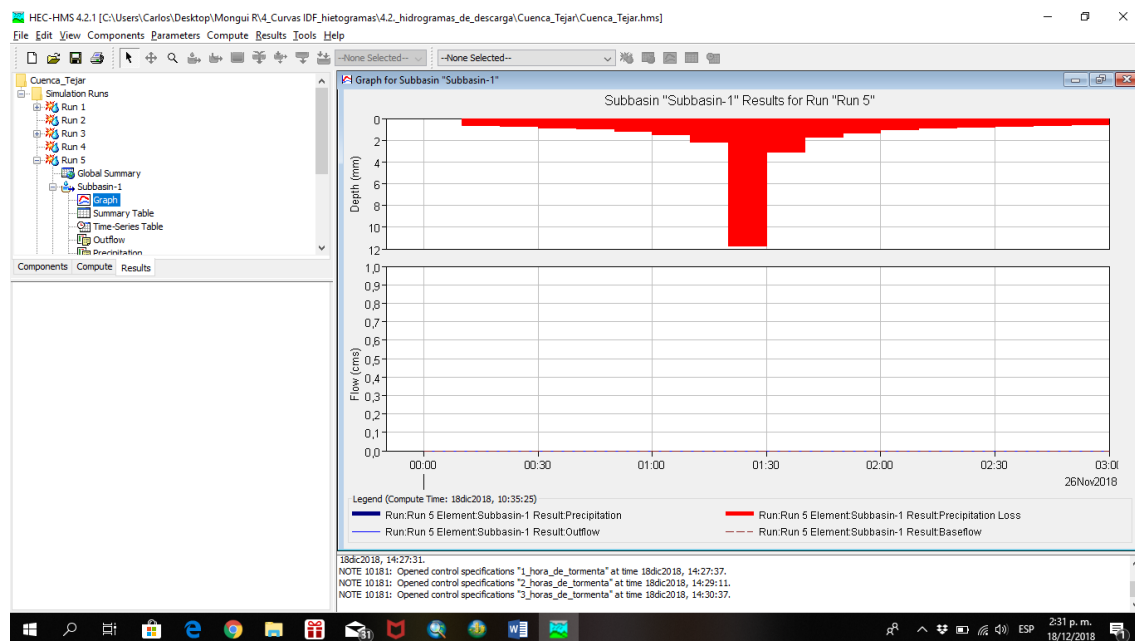


Figura 3-5 Hietograma e hidrograma de descarga 3 horas de tormenta
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

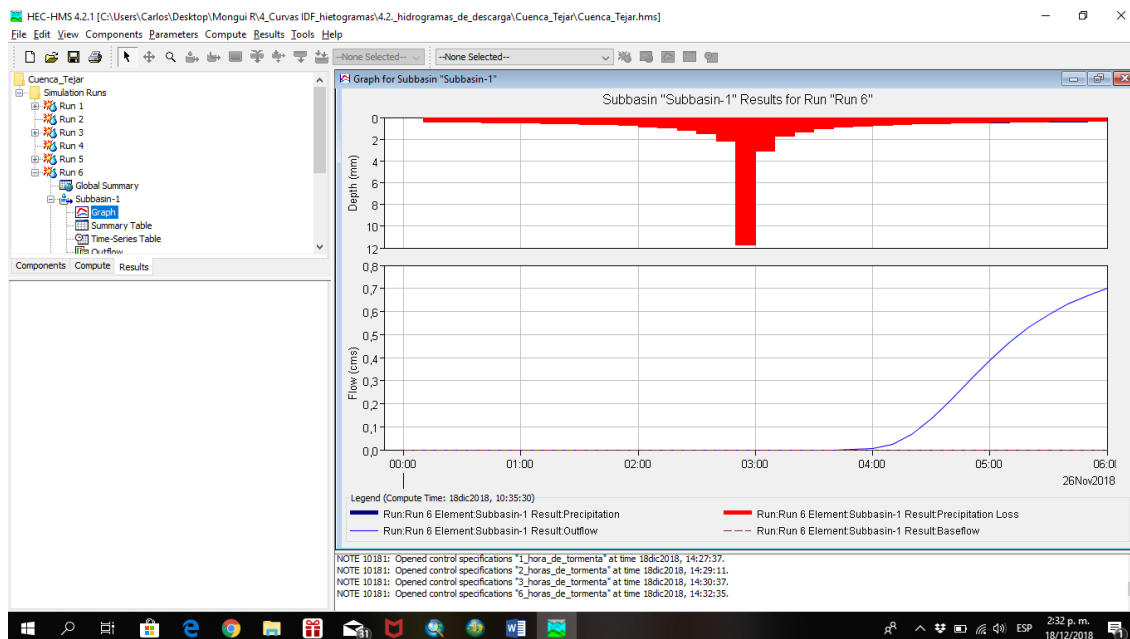


Figura 3-6 Hietograma e hidrograma de descarga 6 horas de tormenta
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

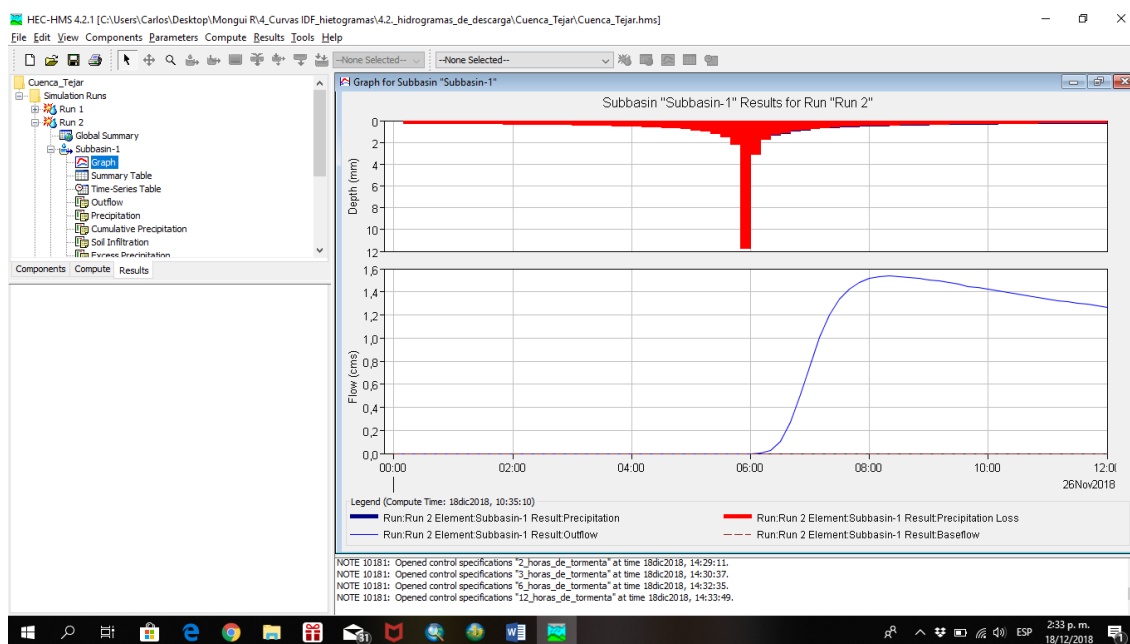


Figura 3-7 Hietograma e hidrograma de descarga 12 horas de tormenta
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

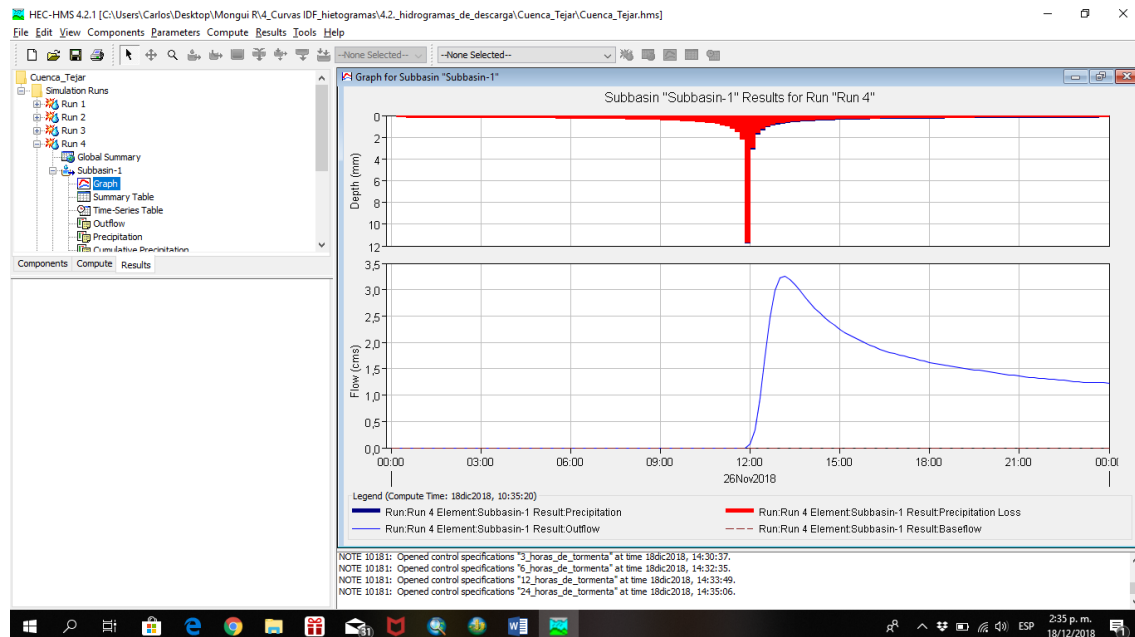


Figura 3-8 Hietograma e hidrograma de descarga 24 horas de tormenta
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

3.3.1.1.1 Caudal máximo

Para la obtención del hidrograma y el caudal máximo se empleó el software HEC-HMS, el cual permite realizar modelos lluvia - escorrentía para la obtención de caudales a partir de precipitaciones, ingresando al mismo los parámetros antes descritos.

En primera instancia se creó el proyecto y se adicionó el Shape de la(s) cuencas de la zona de estudio y el Shape de sus drenajes, una vez identificada la subcuenca se asignan los nodos, es este caso el punto de captación, como se muestra en la siguiente figura:

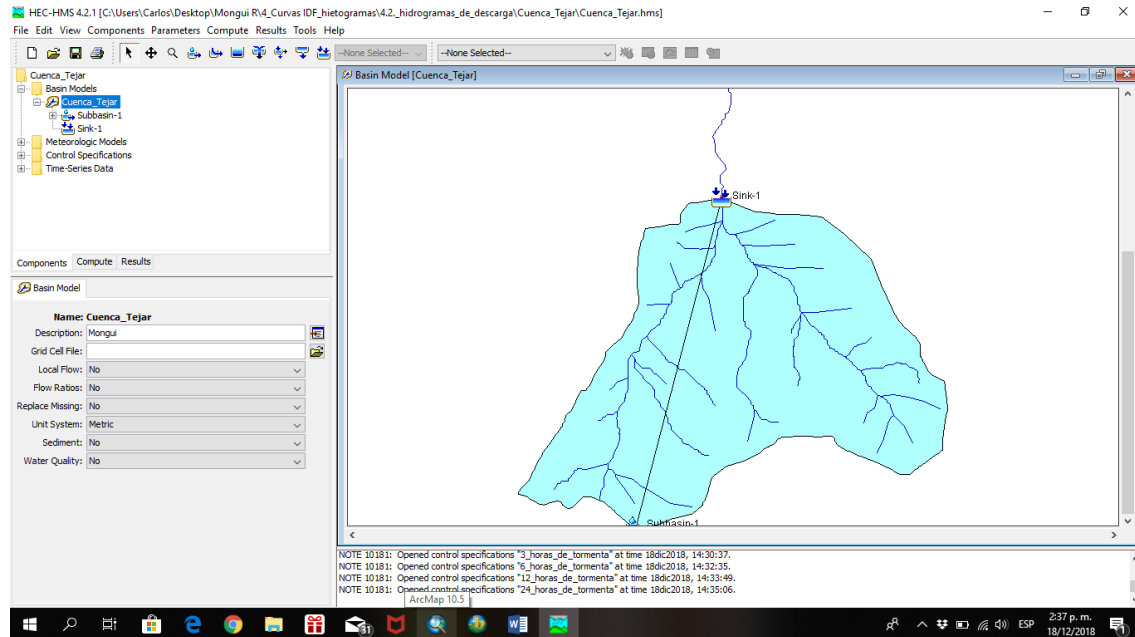


Figura 3-9 Cuenca El Tejar, HEC-HMS
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

Una vez definidos los nodos se ingresaron los parámetros antes calculados, como tiempo de concentración, y parámetros morfológicos como área y curva número.

El modelo de lluvia - escorrentía implementado, corresponde al SCS (Soil conservation service), el cual tiene en cuenta las perdidas por infiltración. Y finalmente, se muestran los hidrogramas generados para la cuenca.

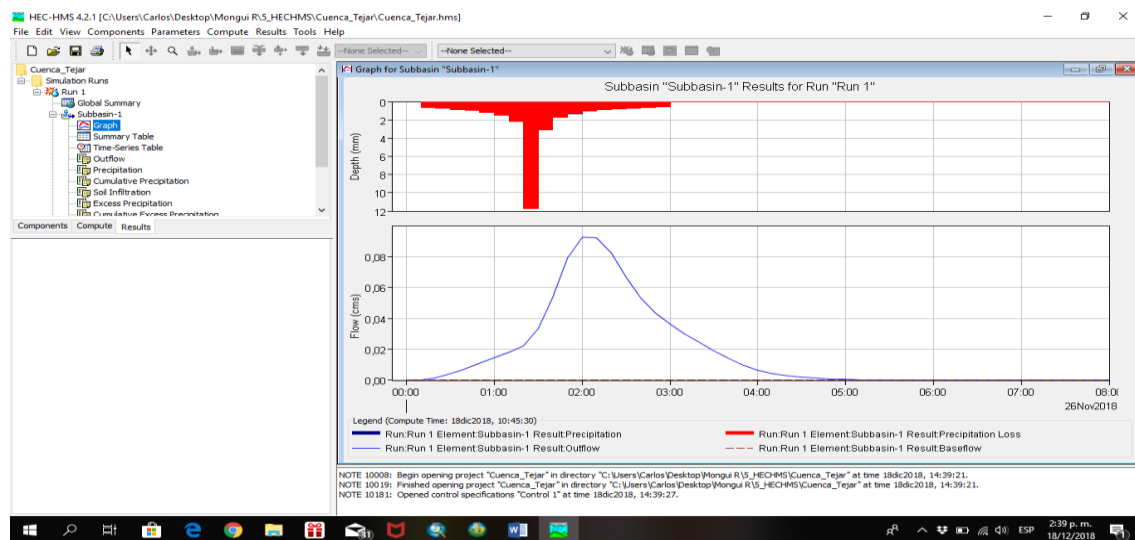


Figura 3-10 Hidrograma y curva de caudal
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

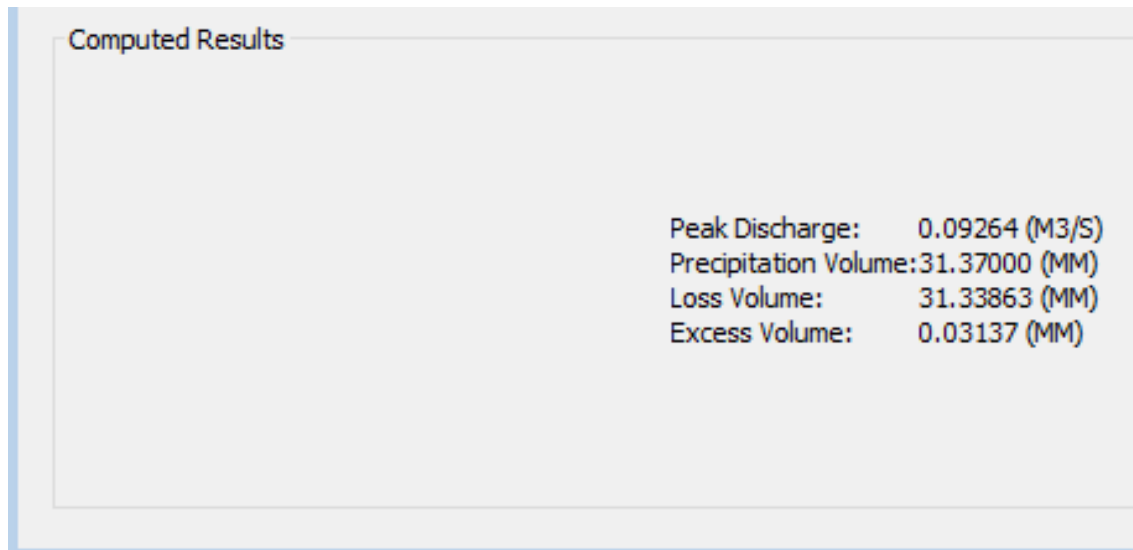


Figura 3-11 Caudal máximo
Fuente: Consorcio Aguas de los Andes, 2018

El resultado obtenido para el caudal máximo en la cuenca, es un estimado de 0.09264 m³/s o 92.64 L/s.

3.4 CAUDALES MEDIOS DIARIOS

La evapotranspiración potencial puede ser calculada mediante fórmulas, siendo una de las más precisas la de Penman – Monteith (Allen et al., 1998); para la zona andina de Colombia se ha adoptado una fórmula basada en la relación de la evapotranspiración potencial por la fórmula de Penman – Monteith y la altura sobre el nivel del mar, cuya expresión es la siguiente:

$$ETP = 4.568 * EXP(-0.0002 * h)$$

Donde:

ETP = evapotranspiración potencial y,
h = altura de la estación sobre el nivel del mar

Posteriormente, la evapotranspiración potencial se transforma a evapotranspiración real mediante la ecuación de Budyko (Budyko, 1974):

$$ETR = \left(ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) * \left(1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right)\right) \right)^{1/2}$$

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

Donde:

ETR = evapotranspiración real

ETP = evapotranspiración potencial

P = precipitación 24 horas promedio y,

Después de obtener el caudal medio, también se calculó el caudal mínimo multianual por medio de la metodología del estudio “Linking Long-Term Water Balances and Statistical Scaling to Estimate River Flows along the Drainage Network of Colombia” Realizado por Germán Poveda; Jaime I. Vélez; Oscar J. Mesa; et al. Estos valores de los caudales mínimos promedios mensuales multianuales estimados fueron sometidos al proceso de análisis estadístico de frecuencias para diferentes modelos de distribución de valores extremos para encontrar el caudal mínimo de modelación a con periodo de retorno 100 años (Ver Anexos 6 y 7).

$$Q_{min} = 0.4168 * Q_{med}^{1.058}$$

3.4.1 RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de cada una de las variables necesarias para el cálculo de los caudales medios:

3.4.1.1 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL POR MÉTODO BALANCE HÍDRICO A LARGO PLAZO.

Entendiendo la evapotranspiración como la pérdida de humedad de una superficie por la evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación y mediante las ecuaciones anteriormente definidas, se encontró los siguientes resultados para la estación analizada y en defecto para la zona de estudio.

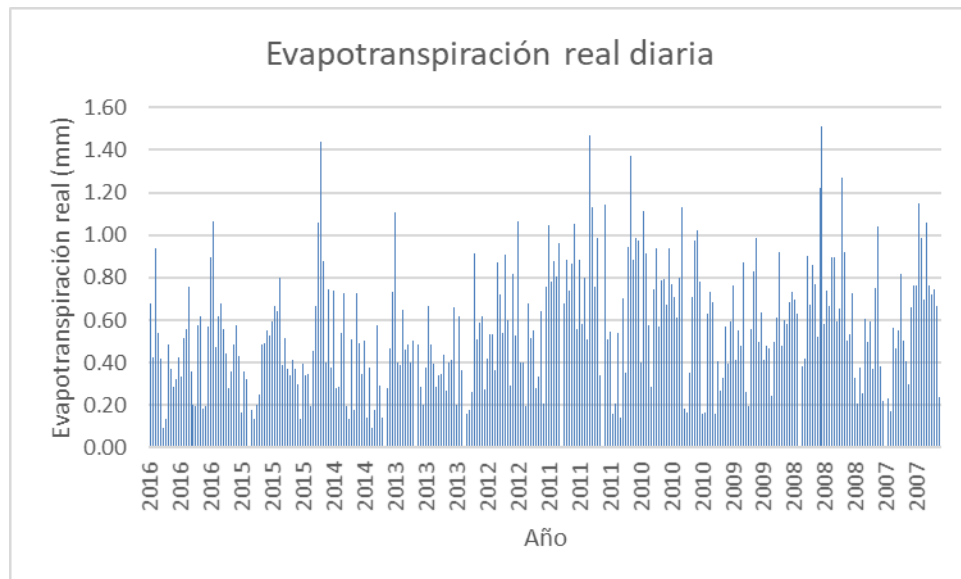


Figura 3-12 Evapotranspiración Real estimada para la cuenca El Tejar
Fuente: Consorcio Aguas de los Andes, 2018

3.4.1.2 CAUDALES MEDIOS CUENCA QUEBRADA EL TEJAR

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en cuanto a los parámetros de precipitación y evapotranspiración, para el cálculo de los caudales medios para la cuenca El Tejar, se realiza la aplicación de la siguiente ecuación:

$$Q_{med} = (P - E) * A$$

Donde:

P = precipitación

E = evapotranspiración

A = área

A razón de lo anterior, y teniendo un área de cuenca de 15.88 Km², los resultados obtenidos fueron los siguientes.

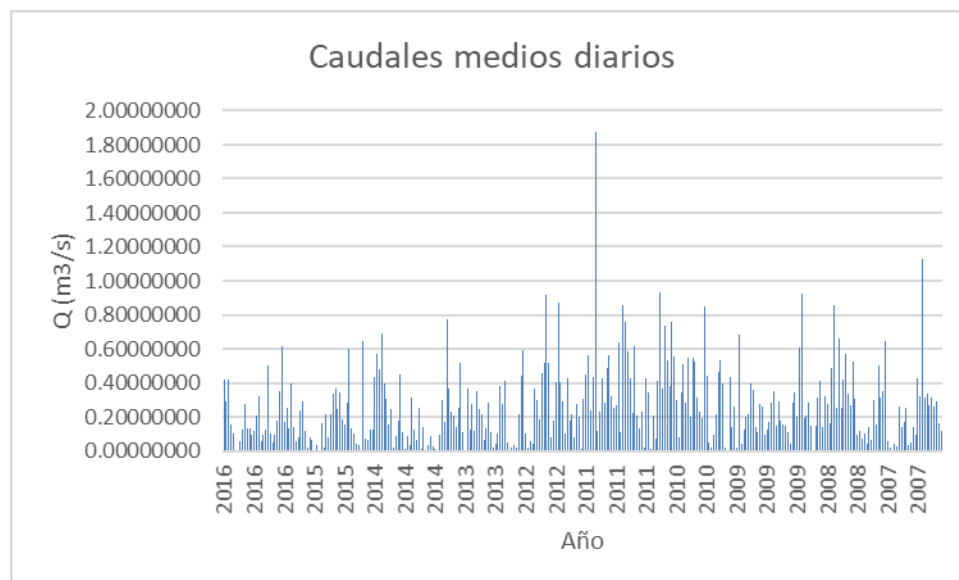


Figura 3-13 Caudales medios estimados, para la cuenca El Tejar
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

Mediante el cálculo de una curva de duración de caudales se encontró que el caudal con excedencia del 85%.

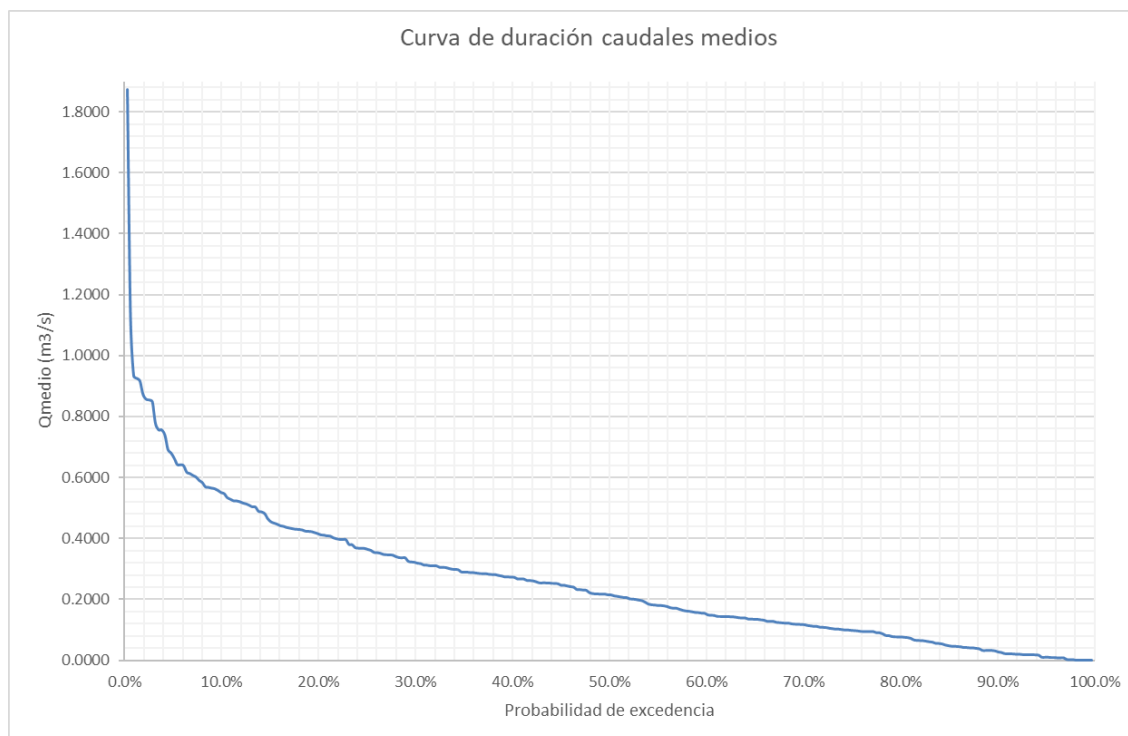


Figura 3-14 Curva de caudales medios estimados
Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

	m ³ /s	L/s
Q85%	0.04793200	47.93200447
Q95%	0.00964671	9.64671107

Tabla 3-5 Resultados de caudales de excedencia 85% y 95%

Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

3.5 CAUDAL ECOLOGICO²

El caudal mínimo, ecológico o caudal mínimo remanente es el caudal requerido para el sostenimiento del ecosistema, la flora y la fauna de una corriente de agua. Existen diversas metodologías para conocer los caudales ecológicos:

- **Hidrológicas:** Se basan en el comportamiento de los caudales en los sitios de interés, para lo cual es necesario el conocimiento de series históricas de caudales.
- **Hidráulicas:** Consideran la conservación del funcionamiento o dinámica del ecosistema fluvial a lo largo de la distribución longitudinal del río, es decir que el caudal de reserva que se deje en los distintos tramos permita que el río siga comportándose como tal.
- **Simulación de los hábitats:** Estiman el caudal necesario para la supervivencia de una especie en cierto estado de desarrollo.
- **Mínimo histórico:** El Estudio Nacional del Agua (2.000) a partir de curvas de duración de caudales medios diarios, propone como caudal mínimo ecológico el caudal promedio multianual de mínimo 5 a máximo 10 años que permanece el 97.5% del tiempo y cuyo periodo de recurrencia es de 2.33 años.
- **Porcentaje de Descuento:** El IDEAM ha adoptado como caudal mínimo ecológico un valor aproximado del 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente en estudio.

	m ³ /s	L/s
Qeco (IDEAM)	0.00044163	0.44163284

Tabla 3-6 Caudal ecológico cuenca El Tejar

Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

3.5.1 CAUDALES MÍNIMOS CUENCA QUEBRADA EL TEJAR

A partir de los valores encontrados de caudales medios para la cuenca de la Quebrada El Tejar, y haciendo uso de la ecuación descrita anteriormente, se obtuvieron los siguientes resultados (Ver anexo 7).

² RESOLUCION 865 DE 2004, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

Prueba No.	X ²	Tipo de distribución				
1	41.8838	Normal				
2	4356.2835	Gumbel				
3	8.4425	Gumbel Infinito				
4	3994.50	Log Gumbel				
5	83.8833	Pearson III				
6	53.9019	Log Pearson III				
7	18.08	Log Normal				

Figura 3-15 Valores de Caudales mínimos

Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

A partir de estos datos se realiza un análisis de frecuencia para encontrar el caudal mínimo a un periodo de retorno (Tr) de 100 años.

La teoría se encuentra a continuación:

3.5.1.1 ANÁLISIS DE FRECUENCIA

Para realizar un análisis de frecuencia para los caudales mínimos se deberá realizar un análisis y ajustes a modelos de valores extremos para encontrar cual es la lluvia que tiene más probabilidad de llegar en un periodo de ocurrencia (tiempo de retorno).

Esté análisis se va a realizar en los datos de caudal mínimo encontrados en el capítulo anterior.

3.5.1.1.1 Procedimiento

Los modelos de valores extremos con que se va hacer una correlación de los datos registrados son los siguientes:

- Distribución normal
- Log Normal
- Gumbel Corregido.
- Gumbel Infinito.
- Log. Gumbel
- Pearson III
- Log. Pearson III
- EV3

En cada uno de los métodos se realizó las pruebas de bondad de ajuste de Chi Cuadrado y de Distributivas Acumulativas Kolmogorov-Smirnov para revisar cual es la distribución de valor extremo de cada cuenca.

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

El procedimiento para realizar y saber cuál es el modelo de valores extremos característico de la cuenca, es el siguiente:

1. Se toman los datos calculados.
2. De los datos se saca el caudal promedio multianual.
3. Se organiza de menor a mayor.
4. En cada uno de los métodos de valores extremos, se obtienen las variables que se requieren para ajustar a los modelos.
5. Se realizan las pruebas de ajuste: Chi-Cuadrado- Distributivas Acumulativas Kolmogorov-Smirnov. *Análisis de Frecuencia*.
6. Se escoge el método que más se acople de acuerdo a lo que se valora en el método de ajustes.
7. Escogido el método se presenta los resultados de los Caudales Mínimos. .

3.5.1.1.2 Funciones de Distribución de Probabilidad.

El comportamiento de las variables aleatorias discretas o continuas se describe con la ayuda de Distribuciones de Probabilidad. La variable se designa por mayúscula y un valor específico de ella por minúscula.

3.5.1.1.2.1 Distribución Normal

La función Normal es el modelo más utilizado y con mayor importancia en el campo de la estadística (Varas y Bois, 1998). Sin embargo, su uso es muy limitado en hidrología, dado que las variables raramente se comportan de esta forma. Linsley et al., (1988) señalan que el uso de esta función, en términos hidrológicos, debe reducirse a zonas húmedas donde el valor medio es alto, no siendo recomendable para valores extremos. Función de distribución de probabilidad normal:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx$$

Donde:

x = variable aleatoria

μ = media de la población

σ = desviación estándar de la población.

Para resolver esta función se recurren a métodos numéricos para evaluarla, y para hacer esto más sencillo se le ha asignado una variable estandarizada, cuya expresión es la siguiente:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

La cual está normalmente distribuida con media cero y desviación estándar unitaria. Así, la función principal queda como:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz$$

La función normal presenta la siguiente tendencia:

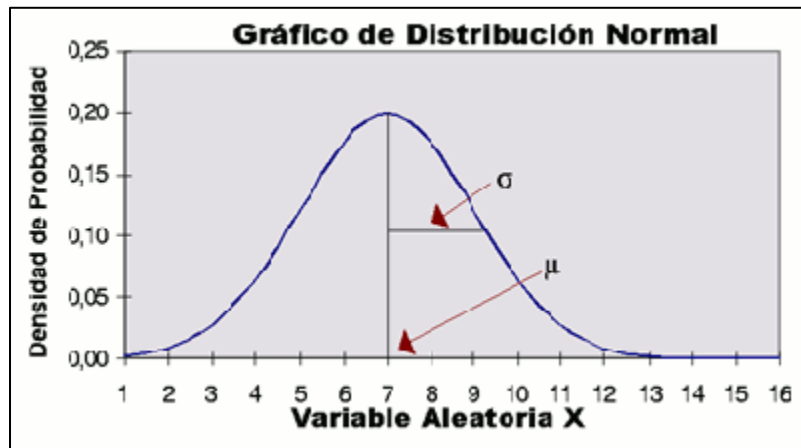


Figura 3-16 Distribución Normal

Fuente: <http://www.matematicasypoesia.com.es/Estadist/ManualCPE04.htm>

3.5.1.1.2 Distribución Logarítmico-Normal

Las variables físicas de interés en Hidrología (precipitación, caudal, evaporación y otras) son generalmente positivas, por lo cual es usual que presenten distribuciones asimétricas. Así, se ha propuesto aplicar una transformación logarítmica (Varas y Bois, 1998), donde $Y = \ln X$, está normalmente distribuida; luego X está distribuida en forma Normal, y su función de densidad de probabilidad es

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta}\right)^2}$$

Donde los parámetros de la función son α y β , que son la media y la desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria, y están definidos como sigue:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{\ln x_i}{n}$$

$$\beta = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\ln x_i - \alpha)^2}{n} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

La función de distribución de probabilidad entonces, sigue la siguiente tendencia:

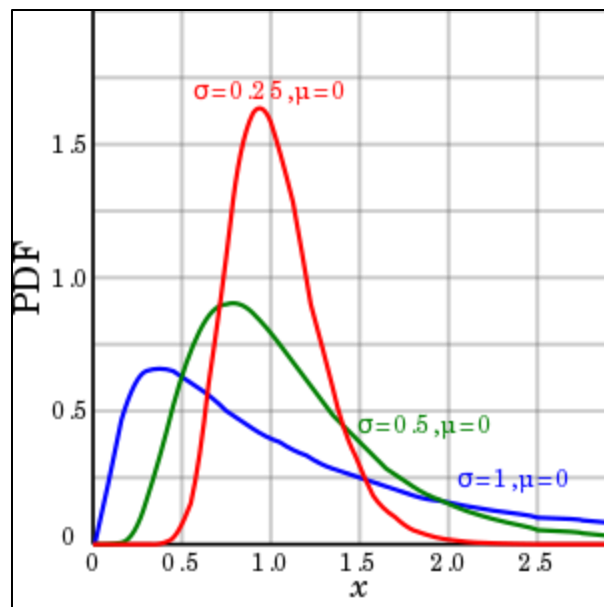


Figura 3-17 Distribución Log Normal.

Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/Log-normal_distribution

Estudios realizados por Poblete et al., (2002), identifican a la función Log-Normal, entre otras funciones, como la que presenta mejor bondad de ajuste a series de caudales anuales, por sobre un 90% para el test de Kolmogorov-Smirnov y ji cuadrado.

3.5.1.1.2.3 Distribución Pearson Tipo III

Chow et al., (1994), señalan que esta distribución posee una gran flexibilidad y diversidad de forma, dependiendo de los valores de sus parámetros, asimilando su utilización para precipitaciones o caudales máximos o mínimos anuales. La función de densidad de probabilidad Pearson III se define como:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \left\{ \frac{x-\delta}{\alpha} \right\}^{\beta-1} e^{-\frac{x-\delta}{\alpha}}$$

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

Donde α, β, δ son los parámetros de la función y $\Gamma(\beta)$ es la función Gamma. Los α, β, δ . Los parámetros α, β, δ se evalúan a partir de n datos medidos. Asimismo, los parámetros de la distribución pueden ser estimados en función del promedio ($\bar{x}$) y de la desviación estándar (S) de la muestra, por medio de las expresiones:

$$\alpha = \frac{S}{\sqrt{\beta}}; \beta = \left(\frac{2}{\gamma}\right)^2; \delta = \bar{x} - \alpha\beta$$

Donde:

γ = Coeficiente de sesgo
 e = Constante de Neper

El coeficiente de sesgo, se define como:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3}{S^3}$$

La función de distribución de este modelo es:

$$F(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \int_0^x e^{-\left(\frac{x-\delta}{\delta}\right)} \left(\frac{x-\delta}{\delta}\right)^{\beta-1} dx$$

Entonces, sustituyendo se alcanza la siguiente expresión:

$$y = \frac{x - \delta_1}{\alpha_1}$$

Finalmente, la ecuación queda como:

$$F(y) = \frac{1}{\Gamma(\beta_1)} \int_0^y y^{\beta_1-1} e^{-y} dy$$

Siendo la anterior una función ji cuadrada con $2\beta_1$, gados de libertad y $\chi^2 = 2y$

$$F(y) = F(\chi^2 | y) = F_{\chi^2}(2y | 2\beta_1)$$

Los resultados del estudio realizados por Kroll y Vogel 2002, en 1.505 estaciones en los Estados Unidos, determinan que la función de Pearson Tipo III, es la que mejor representa a las series de caudales mínimos intermitentes, donde se presentan descargas con valores cero. Asimismo, las series de caudales mínimos permanentes se ven reflejadas en la función Log- Normal de tres parámetros.

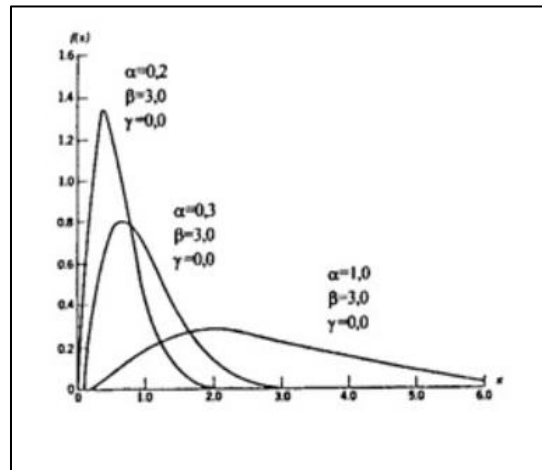


Figura 3-18 Distribución Pearson tipo III

Fuente: <http://slideplayer.es/slide/4099819/>

3.5.1.1.2.4 Distribución Gumbel

Según Aparicio, 1997, si se tienen N muestras, cada una de las cuales contienen n eventos y si se selecciona el máximo de x de los n eventos de cada muestra, es posible demostrar que, a medida que n aumenta, la función de distribución de probabilidad de x tiende a:

$$F(x) = e^{-e^{-d(x-\mu)}} \quad \text{Para } -\infty \leq x \leq \infty$$

Donde:

x = representa el valor asumir por la variable aleatoria
e = Constante de Neper

Los parámetros de la distribución de una muestra de tamaño infinito, tienden a los siguientes valores, en base a la media aritmética y la desviación estándar de la muestra:

$$d = \frac{1}{0.7779696 \cdot S}; \quad \mu = \bar{x} - 0.450047 \cdot S$$

La función de Gumbel sigue la siguiente tendencia:

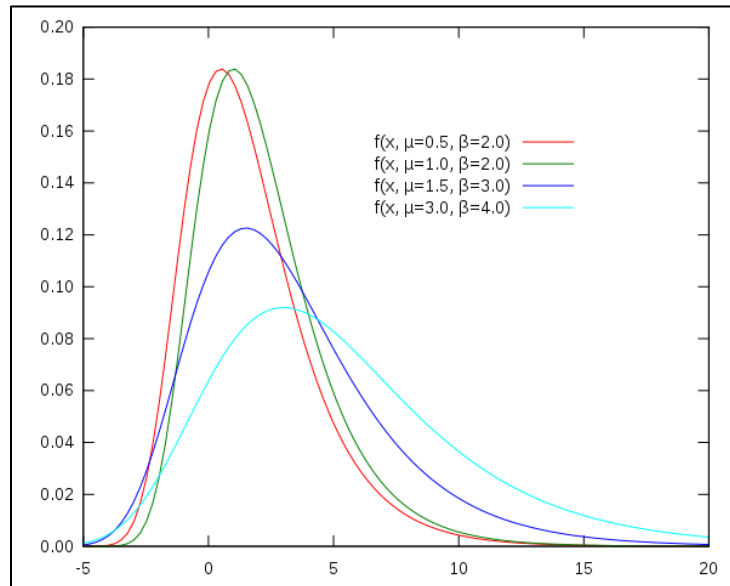


Figura 3-19 Distribución Gumbel

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_de_Gumbel

3.5.1.1.2.5 Distribución EV3. Weibull Tipo III.

La distribución acumulativa de Weibull es una función distribuida que esta representaba de la siguiente forma:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}}$$

Esta se puede expresar en forma lineal de la siguiente forma:

$$\ln \left[\ln \left[\frac{1}{1 - F(x)} \right] \right] = \beta \ln x - \beta \ln \alpha$$

Esta forma sirve para saber si esta distribución cumple con los datos de Caudal mínimo.

3.5.1.1.3 Determinación de bondad de ajuste

Se entiende por bondad de ajuste, a la asimilación de datos observados de una variable, a una función matemática previamente establecida y reconocida. A través de ésta es posible predecir el comportamiento de la variable en estudio (Pizarro, 1986).

Para determinar la calidad del ajuste, se realizó una contrastación para cada dato que se obtenga en la frecuencia acumulada y en la frecuencia teórica acumulada; para ello se utilizarán métodos cuantitativos, como el Chi cuadrado y el test de Kolmogorov-Smirnov.

3.5.1.1.3.1 TEST DE CHI-CUADRADO³

La prueba de Chi-cuadrado se utiliza para comprobar si una muestra de datos procede de una población con una distribución específica. Una característica atractiva de la bondad de Chi cuadrado es que se puede aplicar a cualquier distribución univariante para los que se pueda calcular la función de distribución acumulada.

El test Chi-cuadrado de bondad de ajuste se aplica a los datos desechados. Sin embargo, el valor de la estadística de Chi-cuadrado depende de cómo estén ordenados los datos. Otra desventaja de la prueba de Chicuadrado es que se requiere un tamaño de muestra suficiente para que la aproximación Chi-cuadrado para ser válida.

La prueba de Chi-cuadrado es una alternativa a la de Anderson-Darling y la de Kolmogorov-Smirnov.

El test Chi-cuadrado de bondad de la prueba puede ser aplicado a distribuciones discretas, como la binomial y la de Poisson. Los test de Kolmogorov-Smirnov y de Anderson-Darling se limitan a distribuciones continuas.

La prueba de Chi-cuadrado se define para las hipótesis:

H0 = los datos siguen una distribución especificada.

H1 = los datos no siguen la distribución especificada.

Estadístico:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(F_n(x)_i - F(x)_i)^2}{F(x)_i}$$

Donde:

$F_n(X)_i$ = frecuencia observada

$F(X)_i$ = frecuencia teórica.

³ Conde García, Jose Andino. Análisis de distribuciones estadísticas y alternativas a las tradicionales para la optimización de los caudales de cálculo empleados en las distribuciones hidrológicas. 23.

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

Cuanto mayor sea el valor de x^2 , menos verosímil es que la hipótesis sea correcta. De la misma forma, cuanto más se aproxima a cero el valor de Chi-cuadrado, más ajustadas están ambas distribuciones

3.5.1.1.3.2 Test de Kolmogorov-Smirnov

Este procedimiento es un test no paramétrico que permite probar si dos muestras provienen del mismo modelo probabilístico (Varas y Bois, 1998). Así mismo, Pizarro (1988), hace referencia a que es necesario determinar la frecuencia observada acumulada y la frecuencia teórica acumulada; una vez determinadas las ambas frecuencias, se obtiene el supremo de las diferencias entre ambas.

Este test es válido para distribuciones continuas y sirve tanto para muestras grandes como para muestras pequeñas (Pizarro et al, 1986).

Para la aplicación de este test, se necesita en primer lugar determinar la frecuencia observada acumulada.

$$F(x) = \frac{n}{N+1}$$

Donde:

$F_n(x)$ = frecuencia observada acumulada.

n = número de orden de los datos

N = Número total de datos.

Luego se debe calcular la frecuencia teórica acumulada $F(x)$, determinada para cada una de las funciones. Una vez obtenidas ambas frecuencias, se procede a calcular el valor supremo de las diferencias entre ambas, en la i -ésima posición de orden, que se denomina D_c

$$D_c = \sup |F_n(x)_i - F(x)_i|$$

Si la diferencia suprema es menor que la diferencia tabulada por tabla, definida en base al tamaño de la muestra, se está en presencia de un buen ajuste con el nivel de confianza asumido. Si esta comparación revela una diferencia suficientemente grande entre las funciones de distribución muestral y la distribución propuesta, entonces se rechaza (Canavos, 1988).

3.5.1.1.4 Resultados

Realizando los pasos descritos anteriormente se analizaron las distribuciones y se encontraron las siguientes variables (Ver anexo 7):

n	310		
Media	0.1119		
Mediana	0.0892		
DesvEst	0.1029		
CoefAsim	2.3552		
CoefCurt	2.3552	CoefAsim	-1.0094
Ln X _{Media}	-2.6001	Log X _{Media}	-1.1292
Ln S _{Media}	1.2267	Log S _{Media}	0.5327

Tabla 3-7. Datos estadísticos para las distribuciones y ajustes

Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

Por cada método, posteriormente, se realizaron las pruebas de bondad de ajuste para todas las distribuciones de probabilidad (Ver anexo 7).

Según los resultados generados de la prueba de ajustes de Kolmogorov-Smirnov y Chi cuadrado el mejor modelo de distribución es Gumbel Infinito.

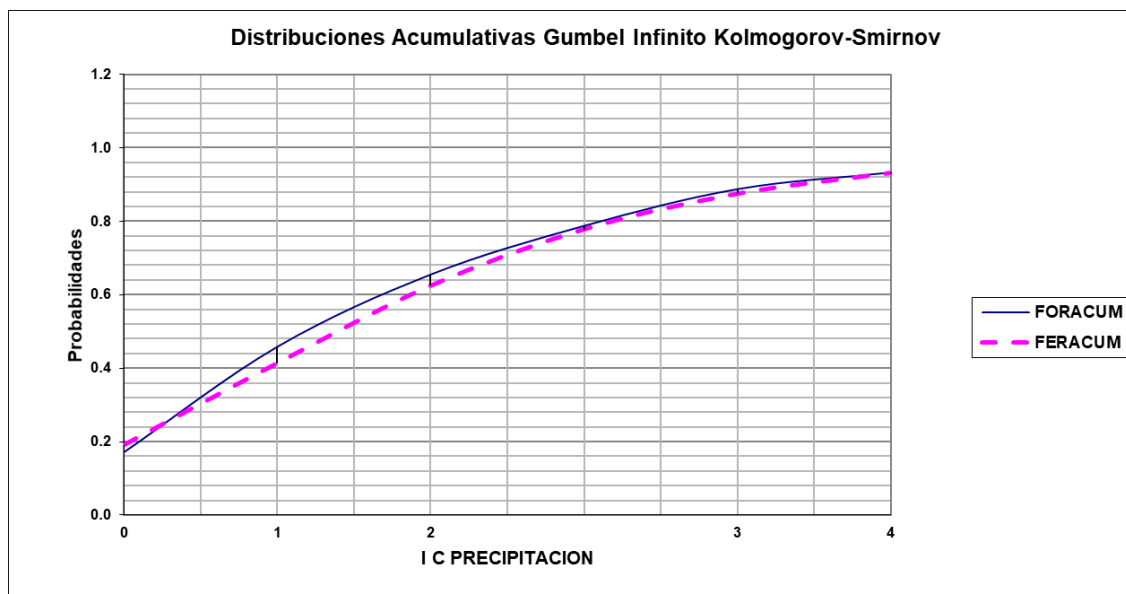


Figura 3-20 Análisis estadístico, ajustes de distribuciones extremos.

Fuente. Consorcio Aguas de los Andes, 2018

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

CONCLUSIONES

- A pesar de que la Quebrada El Tejar no está instrumentada con estaciones limnigráficas o limnimétricas, la metodología de balance hídrico a largo plazo permitió estimar los caudales medios, ecológico y mínimo.
- También se logró estimar los caudales máximos con la ayuda del programa HEC HMS de la US Army Corps of Engineers.
- Los caudales estimados mediante las metodologías aplicadas fueron:
 - Caudal mínimo = 8.44 L/s,
 - Caudal ecológico = 0.4416 L/s,
 - Caudal de excedencia del 85% = 47.93 L/s
 - Caudal de excedencia del 95% = 9.647 L/s y,
 - Caudal máximo = 92.64 L/s
- Los caudales estimados en el presente documento, se utilizaron para la modelación de abastecimiento de agua del acueducto en estudio y teniendo en cuenta el Art 49 de la resolución 0330 del 2017, capacidad de la fuente superficial ...*“El caudal correspondiente al 95% de tiempo de excedencia en la curva de duración de caudales diarios, debe ser superior al caudal máximo diario (QMD) más el caudal ecológico...”*, y con un QMD de 4.461 L/s, se puede concluir que la fuente de abastecimiento es suficiente para la dotación de la población actual y futura.

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

BIBLIOGRAFÍA

- Chow, V. T. (1994). *Handbook of Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Cressie, N. (1990). The origins of kriging. *Mathematical Geology*, 22(3), 239–252.
<https://doi.org/10.1007/BF00889887>
- Domínguez, E. (2010). *Cálculo de parámetros morfométricos*. Bogotá, D.C.
- FAO. (1985). Revista Internacional de Silvicultura e Industrias Forestales Unasyliva. In *IX Congreso forestal mundial México*. México.
- Gallant, J. C., & Dowling, T. I. (2003). A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resources Research*, 39(12), 14.
<https://doi.org/10.1029/2002WR001426>
- Gruber, S., & Peckham, S. (2009). Chapter 7 Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology. In *Developments in Soil Science* (Vol. 33, pp. 171–194).
[https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00007-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00007-X)
- HIMAT. (1985). Inventario de cuencas hidrográficas en Colombia. In *III Congreso de Cuencas Hidrográficas*. Cali, Colombia.
- Jardí, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, 19, 41–68.
- Jiménez E., H., & Materón M., H. (1986). *Hidrología Básica Tomo III*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- Nardi, F., Vivoni, E. R., & Grimaldi, S. (2006). Investigating a floodplain scaling relation using a hydrogeomorphic delineation method. *Water Resources Research*, 42(9).
<https://doi.org/10.1029/2005WR004155>
- Pike, R. J., Evans, I. S., & Hengl, T. (2009). Chapter 1 Geomorphometry: A Brief Guide. In *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications* (Vol. 33, pp. 3–30).
[https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00001-9](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00001-9)
- Reyes T., A., Barroso, F., & Carvajal E., Y. (2010). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas* (Primera Ed). Cali, Colombia: Editorial Universidad del Valle.
- Roberts, B. D. W., Dowling, T. I., & Walker, J. (1997). *FLAG: A Fuzzy Landscape Analysis GIS Method for Dryland Salinity Assessment*.
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bulletin of Geological Society of America*, 63, 1117–1142.
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory data Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company (Vol. 1). Retrieved from <https://www.amazon.com/exec/obidos/ASIN/B0007347RW/ref=nosim/ericstreasuretro>
- UNESCO, & WMO. (2012). *International glossary of hydrology*.
- Velasco, A. N. (2016). *Integración del concepto de variabilidad hidroclimática en pronósticos de largo plazo de resolución mensual en Colombia*. Pontificia Universidad Javeriana.
- WMO. (1999). Introduction. In *Weather, climate and health* (1st ed., pp. 13–15). Geneva, Switzerland: WMO.

	CONTRATO No. 01 DE 2018 ESTUDIO HIDROLOGICO	
---	---	---

WMO. (2011). *Guía de Prácticas Climatológicas*.