

**DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS REGIONALES PARA CAUDALES MÁXIMOS
CON DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO, TENIENDO EN CUENTA LA
VARIABILIDAD CLIMÁTICA, EN LA REGIÓN ANDINA DEL DEPARTAMENTO DEL
CAUCA**



PAOLA JULIETH CALVACHE RENGIFO (Código 104911024104)

**Proyecto de grado modalidad investigación como requisito para optar por el
título de Ingeniera Ambiental**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL
POPAYÁN - 2019**

**DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS REGIONALES PARA CAUDALES MÁXIMOS
CON DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO, TENIENDO EN CUENTA LA
VARIABILIDAD CLIMÁTICA, EN LA REGIÓN ANDINA DEL DEPARTAMENTO DEL
CAUCA**



PAOLA JULIETH CALVACHE RENGIFO (Código 104911024104)

**Proyecto de grado modalidad investigación como requisito para optar por el
título de Ingeniera Ambiental**

Director:

Ing. M.Sc. Carlos Armando Gallardo Barrera

Codirector:

Ing. Esp. Luis Jorge González Muñoz

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL
POPAYÁN - 2019**

Nota de Aceptación:

Firma de los jurados:

Firma del Jurado.

Firma del Jurado.

DEDICATORIA

A Dios por brindarme la fuerza para salir adelante a pesar de todas las dificultades que se me han presentado.

A mi familia, especialmente a mis padres, Martha Elena Rengifo, Aldemar Emiro Calvache, y mis hermanas, Adriana Marcela Calvache e Isabela Calvache quienes han puesto todo su esfuerzo y dedicación en cuidar de mí y en brindarme su apoyo incondicional, y son a quienes debo lo que soy y en donde estoy en este momento, además son la motivación para cada día ser mejor y alcanzar todas mis metas.

A mi compañero y pareja, Juan David Patiño. A él infinitas gracias por su paciencia y por darme el privilegio de contar incondicionalmente con su apoyo, por motivarme a terminar esta etapa de mi vida.

A mis amigos, que me han acompañado y apoyado durante el transcurso de toda mi carrera universitaria.

Paola Julieth Calvache Rengifo

AGRADECIMIENTOS

A mi director, el Ingeniero Carlos Armando Gallardo Barrera, por su compromiso, dedicación y paciencia para lograr la realización de mi trabajo de investigación.

A mi codirector el Ingeniero Luis Jorge González, por brindarme de su tiempo al contestar dudas y proporcionarme información.

Al Acueducto y Alcantarillado de Popayán, especialmente al Ingeniero Víctor Hugo Zúñiga, por su gestión en la obtención de información necesaria para el desarrollo de la investigación y por atender todas nuestras dudas e inquietudes con prontitud.

Al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), por facilitar la información necesaria para la elaboración de la presente investigación.

A mi Alma Máter, la Universidad del Cauca por permitirnos ser parte de ella y así formarnos como profesionales.

A mis profesores, quienes compartieron su conocimiento y enseñanzas para formarnos como profesionales integrales.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	15
2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA	16
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
4. JUSTIFICACIÓN	18
5. HIPÓTESIS	19
6. OBJETIVOS	20
6.1 OBJETIVO GENERAL	20
6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
7. MARCO TEÓRICO	21
8. MARCO CONCEPTUAL	22
8.1 FÓRMULAS Y MÉTODOS EMPÍRICOS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MÁXIMOS	22
8.1.1 Método de Mac Math	22
8.1.2 Método de Burkli – Zieger	23
8.1.3 Método de Chow	24
8.1.4 Método de Creager (Creager, 1945)	25
8.1.5 Método de Lowry	25
8.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS PARA EL CÁLCULO DE EVENTOS EXTREMOS EN CUENCAS INSTRUMENTADAS	26
8.2.1 Funciones de distribución de probabilidad (FDP)	26
8.2.2 Análisis regional de frecuencias	28
8.2.3 Pruebas de Bondad de Ajuste	30

8.2.4 Método de L - Momentos	33
8.3 PRUEBAS ESTADÍSTICAS DE HOMOGENEIDAD	33
8.3.1 Prueba estadística t de Student	33
8.4 VARIABILIDAD CLIMÁTICA: FENÓMENO ENSO	34
8.4.1 Fenómeno ENSO	34
9. METODOLOGÍA	39
9.1 FASE 1: SELECCIÓN DE ESTACIONES LIMNIMÉTRICAS O LIMNIGRÁFICAS	39
9.2 FASE 2: ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES	39
9.3 FASE 3: HOMOGENEIDAD DE LOS DATOS	39
9.4 FASE 4: PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS	39
9.5 FASE 5: VALIDACIÓN DE LAS CURVAS REGIONALES A PARTIR DE CUENCAS INSTRUMENTADAS	40
9.6 FASE 6: AJUSTE DE LAS ECUACIONES DE LOWRY Y CREAGER PARA EL ÁREA DE ESTUDIO	40
10. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	40
10.1 FASE 1: SELECCIÓN DE ESTACIONES DE AFORO	40
10.2 FASE 2: ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES	45
10.3 FASE 3: HOMOGENEIDAD DE LOS DATOS	45
10.4 FASE 4: PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	49
10.4.1 Funciones de distribución de probabilidad tradicional usadas bajo el concepto de estacionariedad para las estaciones limnigráficas y limnimétricas de la región Andina del departamento del Cauca	49
10.4.3 Variabilidad Climática: Fenómeno ENSO	54

10.4.3 Funciones de Distribución de Probabilidad Mixtas usadas bajo el concepto de no estacionariedad para las estaciones limnigráficas y limnimétricas de la región andina del departamento del cauca	60
10.5 ÁREA AFERENTE A CADA ESTACIÓN	70
10.6 CONSTRUCCIÓN DE LAS “CURVAS REGIONALES Y ENVOLVENTES” PARA LA REGIÓN ANDINA DEL DEPARTAMENTO DEL CAUCA, PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO	72
10.7 AJUSTES DE LAS ECUACIONES DE LOWRY Y CREAGER PARA LA REGIÓN DE ESTUDIO	76
11. CONCLUSIONES.....	85
12. RECOMENDACIONES	86
REFERENCIAS.....	87

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 8.1 Factor de escorrentía de Mac Math	23
Tabla 8.2 Valores de C para la fórmula de Burkli - Zieger	24
Tabla 8.3 Características principales de la función de distribución de Fréchet.....	28
Tabla 8.4 Valores críticos de la prueba Chi-cuadrado	32
Tabla 8.5 Valores de ONI desde 1950.....	37
Tabla 8.6 Variación mensual del ONI desde el año 1950 a 2017	38
Tabla 10.1 Estaciones limnimétricas y limnigráficas presentes en la región andina del departamento de Cauca.....	42
Tabla 10.2 Estaciones seleccionadas para el estudio	44
Tabla 10.3 Grupos a comparar para la realización de la prueba T de Student según el tipo de estación	46
Tabla 10.4 Grupos a comparar para la realización de la prueba T de Student según las altitudes.....	46
Tabla 10.5 Distribución T de Student.....	47
Tabla 10.6 Resultados de prueba bilateral	48
Tabla 10.7 Valores del estadístico χ^2 Chi-Cuadrado	52
Tabla 10.8 Caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno calculados por la distribución Gamma II	53
Tabla 10.9 Caudales máximos mensuales afectados por el fenómeno del ENSO de la estación Puente Carretera – 26017040.....	55
Tabla 10.10 Períodos de ocurrencia de El Niño	56
Tabla 10.11 Períodos de ocurrencia de La Niña.....	56
Tabla 10.12 Períodos de NO ENSO	57

Tabla 10.13 Factores de ponderación para la estación Puente Carretera 26017040 ...	63
Tabla 10.14 Caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno calculados por la distribución de probabilidad mixta tipo I (Fréchet) para la estación Puente Carretera 26017040	65
Tabla 10.15 Resultados de la FDP mixta de Fréchet tipo I para cada estación en diferentes periodos de retorno	69
Tabla 10.16 Datos de estaciones para un período de retorno de 20 años	73
Tabla 10.17 Caudales máximos por unidad de área (q) para diferentes períodos de retorno (m ³ /s/Km ²).....	77
Tabla 10.18 Coeficiente de Lowry.....	78
Tabla 10.19 Coeficiente de Creager	78

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 Región Andina en el departamento del Cauca.....	16
Figura 8.1 Regla de decisión para la prueba de bondad de ajuste	31
Figura 8.2 Series de caudales máximos anuales en diversos ríos de Colombia	35
Figura 8.3 ONI (°C): Evolución desde 1950	36
Figura 10.1 Mapa de la distribución espacial de las estaciones limnimétricas y limnigráficas en la Región Andina del Departamento de Cauca	43
Figura 10.2 Serie anual multianual de caudales máximos de la estación Puente Carretera – 26017040. Sin estacionariedad.....	50
Figura 10.3 Caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno calculados por la distribución Gamma II	53
Figura 10.4 Caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno calculados por la distribución Gamma II para el valor anual de la estación Puente Carretera – 26017040	54
Figura 10.5 Caudales máximo mensuales promedio para la estación Puente Carretera – 26017040 (Niño, Niña y No ENSO).....	59
Figura 10.6 Discretización de valores de caudales máximos de la estación Puente Carretera – 26017040, durante la ocurrencia de El Niño, La Niña y años No ENSO....	63
Figura 10.7 Distribución Fréchet extrapolada según las fases del ENSO y No ENSO para la estación Puente Carretera 26017040.....	64
Figura 10.8 Caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno calculados por la distribución de probabilidad mixta tipo I (Fréchet) para la estación Puente Carretera 26017040	65
Figura 10.9 Comparativo de caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno estimados mediante la FDP Gamma II (tradicional) y la FDP Fréchet (mixta) para la estación Puente Carretera 26017040.....	66

Figura 10.10 Distribución Fréchet extrapolada según las fases del ENSO y No ENSO para la estación Santa Rosa	68
Figura 10.11 Distribución Fréchet extrapolada según las fases del ENSO y No ENSO para la estación Santa Rosa teniendo en cuenta que el caudal sea parte del fenómeno	68
Figura 10.12 Información hidrográfica digital del Departamento del Cauca	71
Figura 10.13 Relación funcional de tipo polinómico entre los caudales máximos anuales y las áreas de drenaje correspondientes a cada una de las estaciones empleadas en un período de retorno de 20 años	74
Figura 10.14 Relación entre caudales unitarios y áreas de drenaje correspondientes a cada una de las estaciones empleadas para un período de retorno de 20 años	74
Figura 10.15 Envolvente de gastos máximo para la región Andina del Departamento del Cauca en un período de retorno de 20 años	75
Figura 10.16 Curvas envolventes de la región Andina del Departamento del Cauca en diferentes períodos de retorno sin tener en cuenta los coeficientes mundiales de Lowry y Creager	76
Figura 10.17 Envolvente de caudales máximos unitarios a partir de datos medios en estaciones de aforo para la región Andina del Departamento del Cauca.....	79
Figura 10.18 Envolvente de caudales máximos unitarios con periodo de retorno de 5 años para la región Andina del Departamento del Cauca	80
Figura 10.19 Envolvente de caudales máximos unitarios con periodo de retorno de 10 años para la región Andina del Departamento del Cauca	80
Figura 10.20 Envolvente de caudales máximos unitarios con periodo de retorno de 15 años para la región Andina del Departamento del Cauca	81
Figura 10.21 Envolvente de caudales máximos unitarios con periodo de retorno de 20 años para la región Andina del Departamento del Cauca	81
Figura 10.22 Envolvente de caudales máximos unitarios con periodo de retorno de 25 años para la región Andina del Departamento del Cauca	82

Figura 10.23 Envolvente de caudales máximos unitarios con periodo de retorno de 50 años para la región Andina del Departamento del Cauca	82
Figura 10.24 Envolvente de caudales máximos unitarios con periodo de retorno de 100 años para la región Andina del Departamento del Cauca	83

ANEXOS EN FORMATO DIGITAL

Anexo A: Procedimiento para llenado de datos faltantes

Anexo B: Prueba de homogeneidad de datos

Anexo C: Proyección de caudales por medio de HYFA de la estación Puente Carretera
- 26017040

Anexo D: Registro de estaciones y corrección por variabilidad climática

Anexo E: Área aferente a cada estación

Anexo F: Curvas envolventes de la región Andina del Departamento del Cauca

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, el estudio de fenómenos y eventos hidrometeorológicos tiene gran importancia, especialmente para el dimensionamiento y adecuación de obras hidráulicas. Durante los periodos de lluvias existe una probabilidad alta de ocurrencia de crecidas, pero una de las principales limitaciones que se presenta es la carencia de datos precisos y confiables. Surge entonces la necesidad de aplicar análisis estadísticos para determinar los caudales máximos. La determinación de caudales máximos para una región, es posible hacerla por medio de curvas regionales para diferentes periodos de retorno. En el país la región Andina caucana carece de un número suficiente de corrientes instrumentadas para con base en éstas calcular caudales. Para este caso el área de estudio estará representada por algunas de las cuencas de la región Andina en el departamento del Cauca.

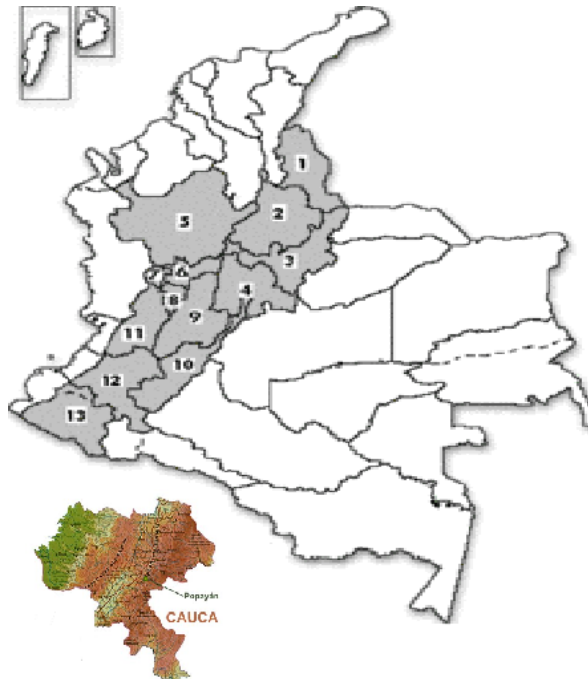
Resulta de vital importancia estimar caudales máximos para periodos de retorno determinados, ya que estos son necesarios para el desarrollo de obras hidráulicas como puentes, represas, entre otras. Para realizar estas mediciones de caudales se contará con las estaciones limnimétricas/limnigráficas disponibles. Las cuales permitirán obtener registros hidrométricos diarios, mensuales y anuales. Es importante tener en cuenta que en las últimas décadas se ha evidenciado un cambio en los fenómenos climáticos, estos cambios pueden intervenir de forma directa o indirecta cualquier tipo de proyecto que se desee realizar, es por esto que para la determinación de las curvas regionales se tendrá en cuenta la variación climática de la región de estudio. Así mismo se realizará un ajuste a las ecuaciones de Lowry y Creager, los cuales son métodos empíricos que dependen de la región de estudio (S.A.G.A.R.P.A., 2012), con la finalidad de tener los caudales máximos unitarios. La obtención de todos estos datos ayudará a la construcción de las curvas de caudales máximos para la región Andina del departamento del Cauca. Finalmente este trabajo investigativo podrá proporcionar las bases técnicas para adoptar decisiones en cuanto al desarrollo integral del recurso hídrico.

2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El presente estudio se realizó en la región Andina del departamento del Cauca. El departamento del Cauca está situado en la zona sur-occidental de Colombia y hace parte de las regiones Andina, Pacífica y Amazónica, limita al norte con el departamento del Valle del Cauca; por el oriente con los departamentos de Huila, Tolima y Caquetá; por el sur con los departamentos de Putumayo y Nariño; y por el occidente con el Océano Pacífico.

Por otro lado, la región andina se encuentra ubicada en el centro del país siendo la región más poblada, ocupando la tercera parte del territorio colombiano. Limita al norte con la región Caribe, al noreste con Venezuela, al este con Orinoquía, al sureste con Amazonia, al sur con Ecuador y al oeste con la región del Pacífico (Figura 2.1).

Figura 2.1 Región Andina en el departamento del Cauca.



Fuente: Elaboración propia.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la región Andina del departamento del Cauca existen diversas cuencas en las cuales se cuenta con obras hidráulicas y estructuras viales. Por tanto se hace importante tener en cuenta el comportamiento de los caudales máximos, debido a que al presentarse crecidas o represamientos, se podrá afectar el desarrollo de las actividades y las estructuras que se encuentran en las cuencas. Tradicionalmente se han estudiado los caudales máximos a partir de métodos estadísticos que no consideran las variaciones climáticas.

Sumado a esta problemática, se presenta deficiencia en los registros de algunas estaciones o deficiencia en el número de éstas.

4. JUSTIFICACIÓN

A pesar de la gran importancia que representan las cuencas de la región Andina del departamento del Cauca dentro de la hidrología colombiana, no se cuenta con los estudios de caudales necesarios debido a la escasez de datos. Es por esto que el presente trabajo investigativo será importante ya que el conocimiento de los caudales máximos facilitará la evaluación de los caudales máximos para el diseño adecuado de obras hidráulicas y de estructura vial como cunetas, p.e., e incluso puede ser utilizado como herramienta para la gestión de riesgos y prevención de desastres.

La metodología de la regionalización como ya se mencionó anteriormente, pretende dar solución a la falta de información hidrométrica, por lo tanto se considera de relevancia para futuros estudios en el área de Hidrología en el resto del país. Es importante resaltar que la investigación tendrá en cuenta las variaciones climáticas ya que si no se consideran caudales máximos determinados para diferentes períodos de retorno no corresponderían a los reales. Estas variaciones climáticas están representadas por el fenómeno ENSO y tienen como uno de los efectos es el aumento en las precipitaciones y por ende en los caudales del río durante el fenómeno de la niña.

5. HIPÓTESIS

Las curvas regionales de caudales máximos sirven para el diseño de obras hidráulicas.

6. OBJETIVOS

6.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar las curvas regionales de caudales máximos para diferentes períodos de retorno, teniendo en cuenta la variabilidad climática en la región Andina del departamento del Cauca.

6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar y construir las curvas regionales de caudales máximos para diferentes tiempos de retorno, teniendo en cuenta la variabilidad climática.
- Ajustar las ecuaciones de Lowry y Creager para la región Andina del departamento del Cauca.

7. MARCO TEÓRICO

En la revisión de la literatura encontrada, no se encontraron estudios realizados en la región Andina del departamento del Cauca, con relación a la determinación de curvas regionales de caudales máximos para diferentes periodos de retorno, además en ningún trabajo revisado se ha tenido en cuenta la variación climática. Esto debido tal vez a que en los últimos años esta variación climática se ha visto más marcada. Por tales razones, los estudios solo de referencia, respecto al trabajo investigativo son escasos.

A continuación se presentan los trabajos revisados durante la búsqueda de referencias bibliográficas relacionados con la regionalización de caudales máximos:

- Regionalización de caudales máximos en la cuenca del río Sinú por medio del método estadístico índice de crecientes: En el presente proyecto de grado se realizó una regionalización de caudales máximos, por medio del método índice de crecientes. Tomando registro de caudales máximos de 14 estaciones del IDEAM ubicadas a lo largo del río Sinú (Castillo & Ortíz, 2014).
- Curvas de regionalización de caudales máximos: En el presente documento se presenta la metodología adoptada para la estimación de las curvas regionales de caudales máximos para las zonas de los seis corredores viales. 1. Bogotá – Bucaramanga 2. Bucaramanga – Pamplona 3. Duitama – Pamplona – Cúcuta 4. Norte de Santander 5. Transversal Cusiana – Carare – Boyacá 6. Manizales – Honda - Villeta (Consortio Estructuración Vial, 2014).
- Hidrología aplicada a las pequeñas obras hidráulicas: El documento presenta los métodos empíricos para estimar las máximas avenidas que pueden presentarse durante la vida útil de las obras, con el fin de diseñar de forma adecuada las

estructuras necesarias que permitan su tránsito sin producir daños (S.A.G.A.R.P.A., 2012).

8. MARCO CONCEPTUAL

8.1 FÓRMULAS Y MÉTODOS EMPÍRICOS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MÁXIMOS

Son los que se han desarrollado por medio de la correlación múltiple y se emplean para tener una idea preliminar sobre los caudales de diseño.

8.1.1 Método de Mac Math

La fórmula de Mac Math está dada en la Ecuación 8.1.

$$Q = 0.0091CIA^{\frac{1}{5}}S^{\frac{1}{5}} \quad (8.1)$$

Donde:

Q = Caudal máximo con un periodo de retorno de T años, en m³/s.

C = Factor de escorrentía de Mac Math, representa las características de la cuenca.

I = Intensidad máxima de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración T_c, y un periodo de retorno de T años, mm/h.

A = Área de la cuenca, en has.

S = Pendiente promedio del cauce principal en (%).

De los parámetros que intervienen en la Ecuación 8.1, el valor de C está dado por la Ecuación 8.2.

$$C = C1 + C2 + C3 \quad (8.2)$$

Donde:

C1 = Función de la cobertura vegetal.

C2 = Función de la textura del suelo.

C3 = Función de la topografía del terreno.

Estos valores se muestran en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1 Factor de escorrentía de Mac Math

Vegetación		Suelo		Topografía	
Cobertura (%)	C ₁	Textura	C ₂	Pendiente (%)	C ₃
100	0.08	Arenoso	0.08	0.0 - 0.2	0.04
80 - 100	0.12	Ligera	0.12	0.2 - 0.5	0.06
50 - 80	0.16	Media	0.16	0.5 - 2.0	0.06
20 - 50	0.22	Fina	0.22	2.0 - 5.0	0.10
0 - 20	0.30	Rocosa	0.30	5.0 - 10.0	0.15

Fuente: Villón (2002).

8.1.2 Método de Burkli – Zieger

La fórmula planteada por Burkli - Zieger para el cálculo del caudal máximo se presenta en la Ecuación 8.3.

$$Q = 0.022CIA^4 \sqrt{\frac{S}{A}} \quad (8.3)$$

Donde:

Q = Caudal máximo m³/s.

C = Variable que depende de la naturaleza de la superficie drenada, cuyo valor se muestra en la Tabla 8.2.

I = Intensidad máxima cm/h.

A = Área de drenaje en has.

S = Pendiente media de la cuenca.

Tabla 8.2 Valores de C para la fórmula de Burkli - Zieger

Tipo de superficie	C
Calles pavimentadas y barrios bastante edificados	0.750
Calles comunes de ciudades	0.625
Poblado con plaza y calles en grava	0.300
Campos deportivos	0.250

Fuente: Villón (2002).

8.1.3 Método de Chow

Este método es aplicable en cuencas no urbanas, no menores a 25 Km² (2500 ha). Su importancia radica en que puede ser empleado en áreas mayores al límite de aplicación de método racional y teniendo la ventaja que puede ser utilizado para cualquier duración de la lluvia no necesariamente igual al tiempo de concentración, que lo hace de una aplicación más extensa. El método de Chow se representa en la Ecuación 8.4.

$$Qp = \frac{0.278 * LLe * A * Z}{D} \quad (8.4)$$

Donde:

Qp = caudal máximos en m³/s

LLe = lluvia efectiva en mm

A = área de la cuenca en Km²

D = duración de la lluvia en horas

Z = factor de reducción del pico

8.1.4 Método de Creager (Creager, 1945)

La idea fundamental de este método es relacionar el gasto máximo unitario (q) con el área de la cuenca (A_c). La fórmula de Creager para la “Envolvente Mundial” de escurrimiento, está dada en la Ecuación 8.5.

$$q = 1,303 * C_c * (0,386 * A)^{0,936 \cdot A^{-0,048}} * A^{-1} \quad (8.5)$$

Donde:

q = Gasto unitario en $m^3/s/Km^2$.

C_c = Evaluado según la región hidrológica a estudiar, cuyo valor es de 100 (envolvente mundial).

A = Área de la cuenca en Km^2 .

8.1.5 Método de Lowry

Este método se basa en el mismo procedimiento que el de Creager, diferenciándose en la ecuación que define a la envolvente de los gastos máximos, la cual es más sencilla en el método de Lowry, definido en la Ecuación 8.6.

$$q = \frac{C_L}{(A+259)^{0.85}} \quad (8.6)$$

Donde:

q = Gasto unitario en $m^3/s/ Km^2$.

A = Área de la cuenca en Km^2 .

C_L = Parámetro que depende de la cuenca considerada, cuyo valor es de 3500 (envolvente mundial).

8.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS PARA EL CÁLCULO DE EVENTOS EXTREMOS EN CUENCAS INSTRUMENTADAS

8.2.1 Funciones de distribución de probabilidad (FDP)

El análisis de frecuencia tiene por objeto analizar registros históricos de variables hidrológicas con el fin de estimar la probabilidad de que vuelva a ocurrir, especialmente en estudios de caudales altos y bajos extremos. Los cuales son importantes de estimar para el diseño de diversas obras de ingeniería, porque pueden ser de naturaleza destructiva en algún momento futuro.

Se pueden distinguir dos tipos de funciones de distribución de probabilidad (FDP): las tradicionales que se basan en la hipótesis de estacionariedad y las FDP mixtas que no tienen en cuenta la hipótesis de estacionariedad. Para la investigación se tendrá en cuenta las FDP mixtas. La estacionariedad no tiene en cuenta la variabilidad climática, mientras que la no estacionariedad sí.

8.2.1.1 FDP Mixta Tipo I Fréchet

El nombre de la distribución viene del matemático francés Maurice Fréchet, se utiliza principalmente en el campo de la hidrología. Es un caso especial de la distribución de valores extremos generalizada, su función de distribución, teniendo tres parámetros, viene dada por la Ecuación 8.7.

$$F(x) = e^{-\left(\frac{x-}{\delta}\right)^{-\alpha}} \text{ Si } x > \quad (8.7)$$

La función de densidad se observa en la Ecuación 8.8.

$$f(x) = \frac{\alpha}{\delta} \left(\frac{x-}{\delta}\right)^{-1-\alpha} e^{-\left(\frac{x-}{\delta}\right)^{-\alpha}} \text{ si } x > \quad (8.8)$$

Donde $\alpha \in (0, \infty)$ es el parámetro de forma, $\zeta \in (0, \infty)$ es el de escala y $\eta \in (-\infty, +\infty)$ el de localización. Cuando se tienen dos parámetros (en el caso en el que $\eta = 0$), la función de distribución será representada por la Ecuación 8.9.

$$F(x) = e^{-\left(\frac{x}{\delta}\right)^{-\alpha}} \text{ si } x > 0 \quad (8.9)$$

Y la función de densidad viene dada por la Ecuación 8.10.

$$f(x) = \frac{\alpha}{\delta} \left(\frac{x}{\delta}\right)^{-1-\alpha} \text{ si } x > 0 \quad (8.10)$$

Por último, cuando la distribución sólo tiene un parámetro ($\delta = 1$).

$$F(x) = e^{-x^{-\alpha}} \text{ si } x > 0 \quad (8.11)$$

$$f(x) = \alpha(x)^{-1-\alpha} e^{-(x)^{-\alpha}} \text{ si } x > 0 \quad (8.12)$$

Algunas características de esta distribución son las que presentan en la Tabla 8.3.

Tabla 8.3 Características principales de la función de distribución de Fréchet

Media	$\lambda + \delta \Gamma\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)$, siempre que $\alpha > 1$.
Varianza	$\delta^2 \left[\Gamma\left(1 - \frac{2}{\alpha}\right) - \left(\Gamma\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)\right)^2 \right]$ siempre que $\alpha > 2$.
Moda	$\lambda + \delta \left(\frac{\alpha}{1 + \alpha}\right)^{\frac{1}{\alpha}}$
Coefficiente de asimetría	$\frac{\Gamma\left(1 - \frac{\delta}{\alpha}\right) - 3\Gamma\left(1 - \frac{2}{\alpha}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + 2\Gamma^3\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)}{\sqrt{\left(\Gamma\left(1 - \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)\right)^3}}$ si $\alpha > 3$.
Coefficiente de curtosis	$-\frac{6}{\Gamma\left(1 - \frac{4}{\alpha}\right) - 4\Gamma\left(1 - \frac{3}{\alpha}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + 3\Gamma^2\left(1 - \frac{2}{\alpha}\right)}$ si $\alpha > 4$.
Primer Cuartil	$\lambda + \frac{\delta}{\sqrt[\alpha]{\ln(4)}}$
Mediana	$\lambda + \frac{\delta}{\sqrt[\alpha]{\ln(2)}}$
Tercer Cuartil	$\lambda + \frac{\delta}{\sqrt[\alpha]{\ln\left(\frac{4}{3}\right)}}$

Fuente: Villón (2002).

Las características para la distribución de Fréchet, con uno y dos parámetros, se pueden calcular sin más que sustituir en las expresiones anteriores los valores $\lambda = 0$ y $\delta = 1$. La distribución de Fréchet está relacionada con los siguientes valores:

$$\text{Si } X \sim U(0,1), \text{ entonces } m + s \left[-\text{Log}(X)\right]^{-\frac{1}{\alpha}} \sim \text{Fréchet}(\alpha, s, m)$$

8.2.2 Análisis regional de frecuencias

Para desarrollar un análisis de frecuencia suelen existir varias muestras de datos disponibles, si las distribuciones presentan similitud en los distintos datos, es posible obtener resultados más precisos en el análisis. En la hidrología este procedimiento es

conocido como análisis regional de frecuencia, ya que los datos utilizados corresponden a observaciones de la misma variable en una serie de lugares de medición dentro de una región determinada. Así, los principios y procedimientos del análisis regional de frecuencias son aplicables cuando existan muestras, de la misma variable, provenientes de diferentes lugares dentro de una misma región. (Hosking & Wallis, 1977).

El fundamento del análisis estadístico de frecuencia se basa en la distribución de Q , definida por la Ecuación 8.13.

$$F(x) = P(Q \leq x) \quad (8.13)$$

Donde:

$F(x)$ = Función de probabilidad de la distribución de frecuencia.

Q = Magnitud del evento que ocurre en un momento dado en un lugar específico.

El valor asociado al periodo de retorno (T), denominado Q_T , es la magnitud de un evento tan extremo que tiene probabilidad $1/T$ de ser excedido por otro evento. Para eventos extremos de alta magnitud que se ubican a lo alto de la curva de la distribución de frecuencia, Q_T se expresa de acuerdo a las Ecuaciones 8.14. y 8.15.

$$Q_T = x \left(1 - \frac{1}{T}\right) \quad (8.14)$$

$$F(Q_T) = 1 - \frac{1}{T} \quad (8.15)$$

Para eventos extremos de baja magnitud que se ubican en la parte baja de la curva de la distribución de frecuencia, las expresiones de Q_T están dadas por las Ecuaciones 8.16. y 8.17.

$$Q_T = x\left(\frac{1}{T}\right) \quad (8.16)$$

$$F(Q_T) = \frac{1}{T} \quad (8.17)$$

8.2.3 Pruebas de Bondad de Ajuste

Estas pruebas sirven para determinar si los datos observados se ajustan a los datos esperados o qué tan cerca está lo real de lo teórico. Para este caso de estudio, se usarán, entre varias la prueba de Chi-Cuadrado.

- **Prueba de Chi Cuadrado**

Esta prueba se basa en el buen ajuste que se tiene entre la frecuencia de ocurrencia de las observaciones en una muestra y las frecuencias esperadas que se obtienen a partir de la distribución hipotética. La finalidad, es decidir si las frecuencias observadas están o no en concordancia con las frecuencias esperadas. Para comprobarlo se hace uso del estadístico de Chi - Cuadrado, Ecuación 8.18.

$$\chi^2 = \sum_{i:1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (8.18)$$

Donde:

O_i = Frecuencias observadas.

E_i = Frecuencias esperadas.

Se puede calcular cada frecuencia esperada (teórica) multiplicando el número total de pruebas n por la probabilidad de ocurrencia asociada, como lo muestra la Ecuación 8.19.

$$E_i = n \cdot p_i \quad i = 1, \dots, k \quad (8.19)$$

Cuanto menor sea el valor del estadístico χ^2 , más coherentes serán las observaciones obtenidas con los valores esperados. Por el contrario, valores grandes de este estadístico indicarán falta de concordancia entre las observaciones y lo esperado. Dado un nivel de significancia o nivel de riesgo α , se define un valor crítico χ^2_{α} para el rechazo de la hipótesis propuesta, de acuerdo a los grados de libertad y el nivel de significancia α propuesto (Tabla 8.4). Después de calcular el valor de estadístico se debe aplicar la regla de la de decisión, de la siguiente forma:

Si $\chi^2 \leq \chi^2_{\alpha}$ no se rechaza la hipótesis.

Si $\chi^2 \geq \chi^2_{\alpha}$ se rechaza la hipótesis.

La regla de decisión se observa en la Figura 8.1.

Figura 8.1 Regla de decisión para la prueba de bondad de ajuste



Fuente: Ordoñez H. (2014).

Tabla 8.4 Valores críticos de la prueba Chi-cuadrado

g.d.l	0,001	0,005	0,01	0,02	0,025	0,03	0,04	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	g.d.l
1	10,828	7,879	6,635	5,412	5,024	4,709	4,218	3,841	2,706	2,072	1,642	1,323	1,074	0,873	0,708	1
2	13,816	10,597	9,210	7,824	7,378	7,013	6,438	5,991	4,605	3,794	3,219	2,773	2,408	2,100	1,833	2
3	16,266	12,838	11,345	9,837	9,348	8,947	8,311	7,815	6,251	5,317	4,642	4,108	3,665	3,283	2,946	3
4	18,467	14,860	13,277	11,668	11,143	10,712	10,026	9,488	7,779	6,745	5,989	5,385	4,878	4,438	4,045	4
5	20,515	16,750	15,086	13,388	12,833	12,375	11,644	11,070	9,236	8,115	7,289	6,626	6,064	5,573	5,132	5
6	22,458	18,548	16,812	15,033	14,449	13,968	13,198	12,592	10,645	9,446	8,558	7,841	7,231	6,695	6,211	6
7	24,322	20,278	18,475	16,622	16,013	15,509	14,703	14,067	12,017	10,748	9,803	9,037	8,383	7,806	7,283	7
8	26,124	21,955	20,090	18,168	17,535	17,010	16,171	15,507	13,362	12,027	11,030	10,219	9,524	8,909	8,351	8
9	27,877	23,589	21,666	19,679	19,023	18,480	17,608	16,919	14,684	13,288	12,242	11,389	10,656	10,006	9,414	9
10	29,588	25,188	23,209	21,161	20,483	19,922	19,021	18,307	15,987	14,534	13,442	12,549	11,781	11,097	10,473	10
11	31,264	26,757	24,725	22,618	21,920	21,342	20,412	19,675	17,275	15,767	14,631	13,701	12,899	12,184	11,530	11
12	32,909	28,300	26,217	24,054	23,337	22,742	21,785	21,026	18,549	16,989	15,812	14,845	14,011	13,266	12,584	12
13	34,528	29,819	27,688	25,472	24,736	24,125	23,142	22,362	19,812	18,202	16,985	15,984	15,119	14,345	13,636	13
14	36,123	31,319	29,141	26,873	26,119	25,493	24,485	23,685	21,064	19,406	18,151	17,117	16,222	15,421	14,685	14
15	37,697	32,801	30,578	28,259	27,488	26,848	25,816	24,996	22,307	20,603	19,311	18,245	17,322	16,494	15,733	15
16	39,252	34,267	32,000	29,633	28,845	28,191	27,136	26,296	23,542	21,793	20,465	19,369	18,418	17,565	16,780	16
17	40,790	35,718	33,409	30,995	30,191	29,523	28,445	27,587	24,769	22,977	21,615	20,489	19,511	18,633	17,824	17
18	42,312	37,156	34,805	32,346	31,526	30,845	29,745	28,869	25,989	24,155	22,760	21,605	20,601	19,699	18,868	18
19	43,820	38,582	36,191	33,687	32,852	32,158	31,037	30,144	27,204	25,329	23,900	22,718	21,689	20,764	19,910	19
20	45,315	39,997	37,566	35,020	34,170	33,462	32,321	31,410	28,412	26,498	25,038	23,828	22,775	21,826	20,951	20
21	46,797	41,401	38,932	36,343	35,479	34,759	33,597	32,671	29,615	27,662	26,171	24,935	23,858	22,888	21,991	21
22	48,268	42,796	40,289	37,659	36,781	36,049	34,867	33,924	30,813	28,822	27,301	26,039	24,939	23,947	23,031	22
23	49,728	44,181	41,638	38,968	38,076	37,332	36,131	35,172	32,007	29,979	28,429	27,141	26,018	25,006	24,069	23
24	51,179	45,559	42,980	40,270	39,364	38,609	37,389	36,415	33,196	31,132	29,553	28,241	27,096	26,063	25,106	24
25	52,620	46,928	44,314	41,566	40,646	39,880	38,642	37,652	34,382	32,282	30,675	29,339	28,172	27,118	26,143	25
26	54,052	48,290	45,642	42,856	41,923	41,146	39,889	38,885	35,563	33,429	31,795	30,435	29,246	28,173	27,179	26
27	55,476	49,645	46,963	44,140	43,195	42,407	41,132	40,113	36,741	34,574	32,912	31,528	30,319	29,227	28,214	27
28	56,892	50,993	48,278	45,419	44,461	43,662	42,370	41,337	37,916	35,715	34,027	32,620	31,391	30,279	29,249	28
29	58,301	52,336	49,588	46,693	45,722	44,913	43,604	42,557	39,087	36,854	35,139	33,711	32,461	31,331	30,283	29
30	59,703	53,672	50,892	47,962	46,979	46,160	44,834	43,773	40,256	37,990	36,250	34,800	33,530	32,382	31,316	30
31	61,098	55,003	52,191	49,226	48,232	47,402	46,059	44,985	41,422	39,124	37,359	35,887	34,598	33,431	32,349	31
32	62,487	56,328	53,486	50,487	49,480	48,641	47,282	46,194	42,585	40,256	38,466	36,973	35,665	34,480	33,381	32
33	63,870	57,648	54,776	51,743	50,725	49,876	48,500	47,400	43,745	41,386	39,572	38,058	36,731	35,529	34,413	33
34	65,247	58,964	56,061	52,995	51,966	51,107	49,716	48,602	44,903	42,514	40,676	39,141	37,795	36,576	35,444	34
35	66,619	60,275	57,342	54,244	53,203	52,335	50,928	49,802	46,059	43,640	41,778	40,223	38,859	37,623	36,475	35
40	73,402	66,766	63,691	60,436	59,342	58,428	56,946	55,758	51,805	49,244	47,269	45,616	44,165	42,848	41,622	40
60	99,607	91,952	88,379	84,580	83,298	82,225	80,482	79,082	74,397	71,341	68,972	66,981	65,227	63,628	62,135	60
80	124,839	116,321	112,329	108,069	106,629	105,422	103,459	101,879	96,578	93,106	90,405	88,130	86,120	84,284	82,566	80
90	137,208	128,299	124,116	119,648	118,136	116,869	114,806	113,145	107,565	103,904	101,054	98,650	96,524	94,581	92,761	90
100	149,449	140,169	135,807	131,142	129,561	128,237	126,079	124,342	118,498	114,659	111,667	109,141	106,906	104,862	102,946	100
120	173,617	163,648	158,950	153,918	152,211	150,780	148,447	146,567	140,233	136,062	132,806	130,055	127,616	125,383	123,289	120
140	197,451	186,847	181,840	176,471	174,648	173,118	170,624	168,613	161,827	157,352	153,854	150,894	148,269	145,863	143,604	140

Fuente: Ordoñez H. (2014).

8.2.4 Método de L - Momentos

Entre los métodos para ajustar los parámetros de las FDP seleccionadas (momentos, máxima verosimilitud, etc.) se utilizará el de los L - Momentos. Este método aprovecha las propiedades básicas de la distribución de los datos. Si tenemos el modelo 'real', se podrá conocer la distribución de los datos generados por el mismo y en particular momentos específicos como medias, varianzas, correlaciones, etc. El método de L - Momentos aprovecha esta característica al comparar los momentos teóricos con los momentos observados de los datos. La ventaja de este es que solo son necesarias algunas restricciones sobre la distribución de los no observables y no conocer totalmente su distribución. La desventaja es perder algo de eficiencia al no utilizar todos los datos (errores estándar de mayor magnitud).

8.3 PRUEBAS ESTADÍSTICAS DE HOMOGENEIDAD

Las pruebas estadísticas de homogeneidad son desarrolladas para verificar si los datos sufren cambios abruptos a través del tiempo.

8.3.1 Prueba estadística t de Student

Esta prueba es útil cuando se sospecha que la pérdida de la homogeneidad se debe a un cambio brusco en la medida, se define por la Ecuación 8.20.

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{n_1 \cdot s_1^2 + n_2 \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} \quad (8.20)$$

Donde:

s_1^2 y s_2^2 = Varianza de x_1 y x_2 en los dos periodos de registro.

$$n_1 \cdot s_1^2 = \sum_1^{n_1} x_i^2 - \frac{1}{n_1} \left(\sum_1^{n_1} x_i \right)^2$$

N = Número de datos.

x_1 y x_2 = Son las medias de las colas uno y dos del registro de la estación.

Si el valor absoluto de t_d es mayor que aquel de la distribución de t de Student, se concluye que la diferencia entre las medidas es evidencia de inconsistencia, por lo tanto la serie se considera no homogénea. En caso contrario la serie es homogénea. (Cahuana & Yugar, 2009).

8.4 VARIABILIDAD CLIMÁTICA: FENÓMENO ENSO

La variabilidad climática se presenta cuando con cierta frecuencia un fenómeno genera un comportamiento anormal del clima, pero es un fenómeno temporal y transitorio.

8.4.1 Fenómeno ENSO

Normalmente, los vientos alisios mueven el agua en la superficie del océano desde el Pacífico tropical del este hacia el Pacífico occidental, esto crea una corriente ascendente de agua fría en la costa de Perú y Chile. El Pacífico occidental se encuentra en un sistema de baja presión y tiene un clima húmedo, mientras el Pacífico este, es un sistema de alta presión seco. Cada 3 a 7 años, la atmósfera y el océano cambian durante los acontecimientos de El Niño y La Niña, estos dos fenómenos son extremos y se conocen como ENSO (inglés), siendo el principal mecanismo modulador del clima global.

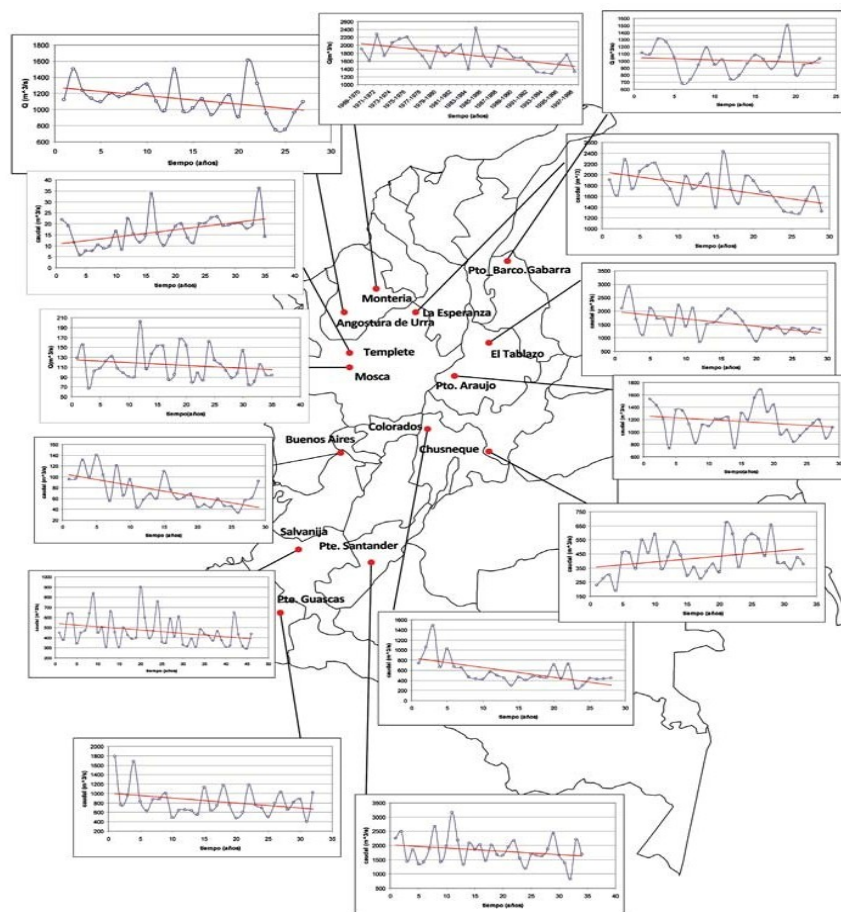
La intensidad y duración de los eventos de El Niño y La Niña son siempre variables, así como los efectos hidrológicos locales (Poveda y Álvarez, 2012).

En Colombia, los años previos a los años ENSO (pre ENSO), se han caracterizado por una sequía entre leve y moderada para las regiones Caribe y Andina y un aumento de lluvias en el piedemonte oriental correspondiente a la franja limítrofe entre la región andina, los llanos orientales y la amazonia. Por su parte los años post ENSO o Niña, se han caracterizado por un aumento generalizado de las lluvias en todo el país (Carvajal *et al.*, 1997).

Dichos fenómenos alteran diversos factores en las cuencas hidrográficas, tales como las precipitaciones, caudales del río, temperatura, balance hídrico, afectaciones al sistema agrícola, pecuario y forestal, entre otros.

En la Figura 8.2 se muestra las series de caudales máximos anuales en diversos ríos de Colombia, donde se puede ver que en algunos de éstos las series anuales crecen, mientras que en otros decrecen, evidenciando así la variabilidad de caudales en el comportamiento de los ríos en respuesta a la variabilidad climática.

Figura 8.2 Series de caudales máximos anuales en diversos ríos de Colombia

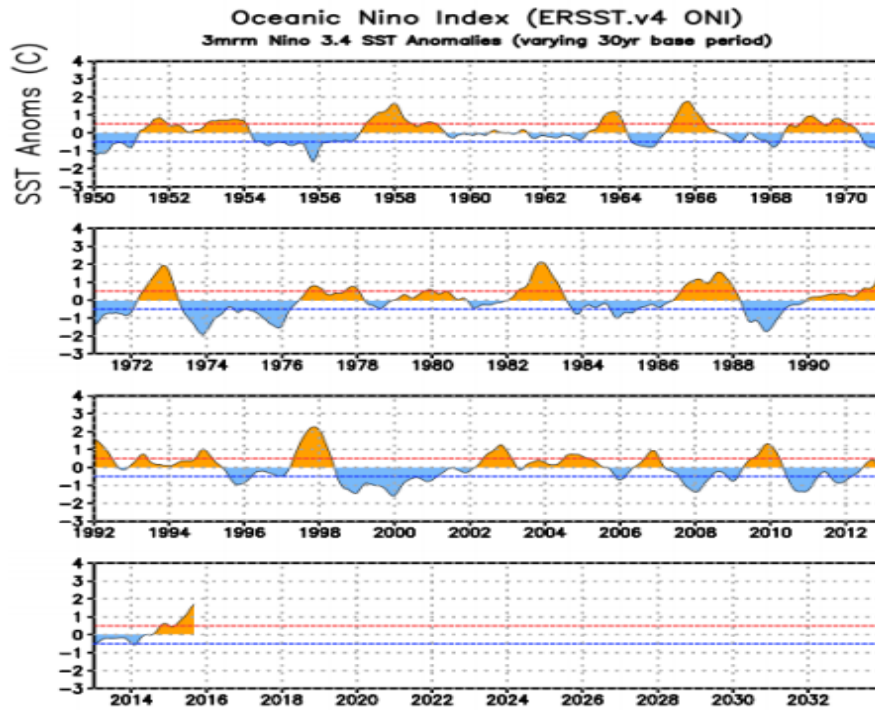


Fuente: Poveda y Álvarez (2012).

Para determinar la ocurrencia del evento El Niño o La Niña, la NOAA creó el indicador oceánico del Niño (ONI) el cual es la principal medida para el seguimiento, la

evaluación y predicción de ENSO. La Figura 8.3 y Tabla 8.5, muestran la variación del ONI desde 1950.

Figura 8.3 ONI (°C): Evolución desde 1950



Fuente: NOAA (2010).

Tabla 8.5 Valores de ONI desde 1950

AÑO	ONI
1950	-1
1952	1
1954	0,5
1956	-1,8
1958	1,8
1960	-0,1
1962	-0,5
1964	1
1966	2
1968	-0,8
1970	0,5
1972	-1
1974	-2
1976	-0,8
1978	0.5
1980	0.5
1982	0
1984	-0,5
1986	-0,5
1988	1
1990	0.1
1992	1,5
1994	0.1
1996	-1
1998	2
2000	-1,8
2002	-0,5
2004	0.5
2006	-0,5
2008	-1,2
2010	1,2
2012	-0,5
2014	-0,5

De la Tabla 8.5 se observa que El Niño se caracteriza por un ONI positivo mayor o igual a + 0.5 °C (rojo) o período cálido y La Niña por un ONI negativo menor o igual a - 0.5 °C (azul) o período frío.

La Tabla 8.6 muestra la variación mensual que el ONI ha tenido desde el año 1950 a 2017.

Tabla 8.6 Variación mensual del ONI desde el año 1950 a 2017

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1950	-1.4	-1.2	-1.1	-1.2	-1.1	-0.9	-0.6	-0.6	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8
1951	-0.8	-0.6	-0.2	0.2	0.2	0.4	0.5	0.7	0.8	0.9	0.7	0.6
1952	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3
1953	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.7
1954	0.7	0.4	0	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.5
1955	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6	-0.6	-1.0	-1.4	-1.6	-1.4
1956	-0.9	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5	-0.4
1957	-0.3	0	0.3	0.6	0.7	0.9	1.0	1.2	1.1	1.2	1.3	1.6
1958	1.7	1.5	1.2	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6
1959	0.6	0.5	0.4	0.2	0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1960	-0.1	-0.2	-0.1	0	-0.1	-0.2	0	0.1	0.2	0.1	0	0
1961	0	0	-0.1	0	0.1	0.2	0.1	-0.1	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2
1962	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4
1963	-0.4	-0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.7	1.0	1.1	1.2	1.2	1.1
1964	1.0	0.6	0.1	-0.3	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
1965	-0.5	-0.3	-0.1	0.1	0.4	0.7	1.0	1.3	1.6	1.7	1.8	1.5
1966	1.3	1.0	0.9	0.6	0.3	0.2	0.2	0.1	0	-0.1	-0.1	-0.3
1967	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.2	0	0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5
1968	-0.7	-0.8	-0.7	-0.5	-0.1	0.2	0.5	0.4	0.3	0.4	0.6	0.8
1969	0.9	1.0	0.9	0.7	0.6	0.5	0.4	0.5	0.8	0.8	0.8	0.7
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1970	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.3	-0.6	-0.8	-0.8	-0.8	-0.9	-1.2
1971	-1.3	-1.3	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.8	-0.7	-0.8	-0.8	-0.9	-0.8
1972	-0.7	-0.4	0	0.3	0.6	0.8	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0	1.9
1973	1.7	1.2	0.6	0	-0.4	-0.8	-1.0	-1.2	-1.4	-1.7	-1.9	-1.9
1974	-1.7	-1.5	-1.2	-1.0	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.4	-0.6	-0.7	-0.6
1975	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-1.0	-1.1	-1.3	-1.4	-1.5	-1.6
1976	-1.5	-1.1	-0.7	-0.4	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.5	0.7	0.8	0.8
1977	0.7	0.6	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6	0.8	0.8
1978	0.7	0.4	0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.1	0
1979	0	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5	0.6
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1980	0.6	0.5	0.3	0.4	0.5	0.5	0.3	0.2	0	0.1	0.1	0
1981	-0.2	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	0
1982	0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.5	1.9	2.1	2.1
1983	2.1	1.8	1.5	1.2	1.0	0.7	0.3	0	-0.3	-0.6	-0.8	-0.8
1984	-0.5	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.3	-0.6	-0.9	-1.1
1985	-0.9	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.3
1986	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.2	0.4	0.7	0.9	1.0	1.1
1987	1.1	1.2	1.1	1.0	0.9	1.1	1.4	1.6	1.6	1.4	1.2	1.1
1988	0.8	0.5	0.1	-0.3	-0.8	-1.2	-1.2	-1.1	-1.2	-1.4	-1.7	-1.8
1989	-1.6	-1.4	-1.1	-0.9	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1990	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4
1991	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	1.2	1.4
1992	1.6	1.5	1.4	1.2	1.0	0.8	0.5	0.2	0	-0.1	-0.1	0
1993	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.6	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.9	1.0
1995	0.9	0.7	0.5	0.3	0.2	0	-0.2	-0.5	-0.7	-0.9	-1.0	-0.9
1996	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.6	1.0	1.4	1.7	2.0	2.2	2.3	2.3
1998	2.1	1.8	1.4	1.0	0.5	-0.1	-0.7	-1.0	-1.2	-1.2	-1.3	-1.4
1999	-1.4	-1.2	-1.0	-0.9	-0.9	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-1.2	-1.4	-1.6
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2000	-1.6	-1.4	-1.1	-0.9	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.3
2002	-0.2	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.8	0.9	1.1	1.2	1.1
2003	0.9	0.7	0.4	0	-0.2	-0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
2004	0.3	0.3	0.2	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.6	0.7
2005	0.7	0.6	0.5	0.5	0.3	0.2	0	-0.1	0	-0.2	-0.5	-0.7
2006	-0.7	-0.6	-0.4	-0.2	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.9
2007	0.7	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.1	-1.3	-1.3
2008	-1.4	-1.3	-1.1	-0.9	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.7	-0.6	-0.4	-0.1	0.2	0.4	0.5	0.5	0.6	0.9	1.1	1.3
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	1.3	1.2	0.9	0.5	0.0	-0.4	-0.9	-1.2	-1.4	-1.5	-1.4	-1.4
2011	-1.3	-1.0	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.6	-0.8	-0.9	-1.0	-0.9
2012	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.1	-0.2
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2014	-0.5	-0.5	-0.4	-0.2	-0.1	0.0	-0.1	0.0	0.1	0.4	0.5	0.6
2015	0.6	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.2	1.4	1.7	2.0	2.2	2.3
2016	2.2	2.0	1.6	1.1	0.6	0.1	-0.3	-0.6	-0.8	-0.8	-0.8	-0.7
2017	-0.4	-0.1	0.2	0.4	0.4	0.2	-0.1	-0.4	-0.6	-0.6		

9. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto se realizara a través de seis fases.

9.1 FASE 1: SELECCIÓN DE ESTACIONES LIMNIMÉTRICAS O LIMNIGRÁFICAS

Se realizará una recopilación, revisión y análisis de la información del IDEAM. Para ello se tendrán en cuenta las estaciones ubicadas en la región andina del Departamento del Cauca que cuenten con la mayor cantidad de datos posibles, ubicados en cuencas con altitudes similares.

9.2 FASE 2: ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES

Una vez determinadas las estaciones a utilizar se procederá a completar los datos faltantes por métodos estadísticos y de estimación.

9.3 FASE 3: HOMOGENEIDAD DE LOS DATOS

Se requieren series homogéneas y estacionarias, para ello se delimitarán las regiones hidrológicamente homogéneas con ayuda de métodos estadísticos y/o de estimación. Se utilizará la prueba estadística de “t de Student”.

9.4 FASE 4: PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

En cualquier estudio hidrológico es indispensable contar con datos confiables especialmente si se trata de determinar la probabilidad de ocurrencia de eventos extremas, pues cualquier error, presencia o ausencia de datos, trae consecuencias en los resultados de la estimación de probabilidad. En esta fase se hará la corrección de los datos teniendo en cuenta las variaciones climáticas, posteriormente se realizarán los cálculos necesarios para la construcción de las curvas regionales. Se utilizará la

distribución de probabilidad mixta Tipo I de Fréchet, apropiada para el sur occidente colombiano.

9.5 FASE 5: VALIDACIÓN DE LAS CURVAS REGIONALES A PARTIR DE CUENCAS INSTRUMENTADAS

Una vez realizadas las curvas de regionalización será necesario realizar una validación de los resultados, para verificar que el modelo se asemeje a la realidad, para ello se tendrán en cuenta los valores arrojados por las cuencas que se encuentran instrumentadas.

9.6 FASE 6: AJUSTE DE LAS ECUACIONES DE LOWRY Y CREAGER PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

Teniendo en cuenta los caudales máximos obtenidos a partir de las curvas regionales y considerando las ecuaciones de Lowry y Creager, se pueden obtener estas ecuaciones para diferentes periodos de retorno para la región Andina del departamento del Cauca.

10.RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

10.1 FASE 1: SELECCIÓN DE ESTACIONES DE AFORO

A partir del criterio de selección, para este estudio se tuvo en cuenta que las estaciones deben contar con el número mínimo de registros necesarios para poder llevar a cabo un estudio estadísticamente confiable.

En la Tabla 10.1 se presentan las estaciones de aforo (limnimétricas o limnigráficas) que se encuentran instaladas en la región andina del departamento de Cauca, de las cuales se seleccionan aquellas que cumplieren con mínimo de 17 años de registro. Las

estaciones referidas, están disponibles en la base de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM, 2017).

En la Figura 10.1 se muestra la ubicación espacial de las estaciones hidrográficas existentes en el área de estudio.

Para el análisis de los datos se tomaron series con un período de registro común, esto es mayores de 17 años, para así contar con suficientes datos que resultaran significativos. Se obtuvo un total de 10 estaciones limnimétricas (LM) y 20 estaciones limnigráficas (LG) que cumplían con el criterio de selección. Las estaciones de tipo LM, permiten la medición y registro periódico de flujo de agua, mientras que las de tipo LG, facilitaron elaborar un gráfico continuo de los datos de flujo de agua. Es preciso aclarar que la estación Bocatoma La Florida (26017030) muestra resultados no muy confiables ya que se encuentra cerca del embalse, por tanto cuando este tiene un aumento en su nivel, la estación reporta valores más altos y viceversa, además la estación Puente Fierro – Guachicono (52027030) no reporta datos en el IDEAM. Por lo anterior, estas dos estaciones fueron descartadas en el proceso de obtención de resultados.

En la Tabla 10.2 se muestra un resumen con el código, tipo y localización de las estaciones seleccionadas para el estudio.

Tabla 10.1 Estaciones limnimétricas y limnigráficas presentes en la región andina del departamento de Cauca

Nº DE ESTACIONES	CÓDIGO ESTACIÓN	NOMBRE DE ESTACIÓN	Limnimétrica (LM) / Limnigráfica (LG)	ESTADO	CUMPLE/ NO CUMPLE
1	44017060	Papas	LG	Activa	CUMPLE
2	44017090	Curiaco	LG	Activa	CUMPLE
3	44017070	Santa Rosa	LG	Activa	CUMPLE
4	26017070	Lomitas	LG	Activa	CUMPLE
5	26017080	Paletara	LM	Activa	CUMPLE
6	26017030	Bocatoma Florida	LM	Activa	NO CUMPLE
7	26027240	Malvasa	LG	Activa	CUMPLE
8	26027080	Totoro	LM	Activa	CUMPLE
9	26017040	Puente Carretera	LM	Activa	CUMPLE
10	26017020	Julumito	LG	Activa	CUMPLE
11	26037030	Puente Carretera	LM	Activa	CUMPLE
12	21057030	Puente Ricaurte Autom	LM	Activa	CUMPLE
13	21057130	Rio Chiquito	LG	Activa	NO CUMPLE
14	26027090	El Cortijo	LG	Activa	CUMPLE
15	26027100	Puente Carretera	LG	Activa	CUMPLE
16	26027250	Buenos Aires	LG	Activa	CUMPLE
17	26027210	Puente Ferrocarril	LG	Activa	CUMPLE
18	26047020	Bocatoma Río Palo	LG	Activa	CUMPLE
19	26017110	Bocatoma Vinagre	LM	Activa	NO CUMPLE
20	21057120	San Juan	LM	Activa	NO CUMPLE
21	21057110	El Trebol	LM	Activa	CUMPLE
22	52027030	Puente fierro-Guachicono	LG	Activa	NO CUMPLE
23	26017060	Puente Aragón	LG	Activa	CUMPLE
24	21057040	Bocatoma	LG	Suspendida	CUMPLE
25	21057070	Puente Coetando	LM	Suspendida	NO CUMPLE
26	21057100	Talaga Toez Automática	LG	Suspendida	NO CUMPLE
27	44017080	El Diviso	LG	Suspendida	NO CUMPLE
28	44017110	Andaqui	LG	Activa	NO CUMPLE
29	52017030	La Fonda	LG	Activa	CUMPLE
30	52017050	Saladito	LG	Suspendida	NO CUMPLE
31	52017060	Loma Alta	LG	Suspendida	NO CUMPLE
32	52017070	Bocatoma Sajandí	LG	Activa	CUMPLE
33	52017080	Puente Carretera	LG	Activa	CUMPLE
34	52017120	El Hoyo	LG	Activa	CUMPLE
35	52017130	Pte Colgante Timbio	LG	Activa	CUMPLE
36	52027020	La Playa	LG	Activa	CUMPLE
37	21057010	Loma Redond	LM	Suspendida	CUMPLE
38	21057020	San Rafael - Laguna	LM	Suspendida	CUMPLE
39	26027030	Puente Carretera	LM	Suspendida	NO CUMPLE
40	26027050	La Salvajina	LG	Suspendida	CUMPLE
41	26027220	Puente Carretera	LM	Suspendida	CUMPLE
42	26047100	Canal Palo	LM	Suspendida	CUMPLE

Tabla 10.2 Estaciones seleccionadas para el estudio

N° DE ESTACIONES	CÓDIGO ESTACIÓN	NOMBRE DE ESTACIÓN	Limnimétrica (LM) / Limnigráfica (LG)	Departamento	LOCALIZACIÓN	
					Latitud (N)	Longitud (W)
1	44017060	Papas	LG	Cauca	153	7641
2	44017090	Curiaco	LG	Cauca	142	7637
3	44017070	Santa Rosa	LG	Cauca	142	7633
4	26017070	Lomitas	LG	Cauca	211	7628
5	26017080	Paletara	LM	Cauca	212	7629
6	26027240	Malvasa	LG	Cauca	228	7626
7	26027080	Totoro	LM	Cauca	230	7624
8	26017040	Puente Carretera	LM	Cauca	226	7630
9	26017020	Julumito	LG	Cauca	228	7638
10	21057030	Puente Ricaurte Autom	LM	Cauca	227	7554
11	26027090	El Cortijo	LG	Cauca	237	7621
12	26027100	Puente Carretera	LG	Cauca	237	7631
13	26027250	Buenos Aires	LG	Cauca	302	7634
14	26027210	Puente Ferrocarril	LG	Cauca	302	7630
15	26047020	Bocatoma Río Palo	LG	Cauca	303	7620
16	21057110	El Trebol	LM	Cauca	215	7607
17	26017060	Puente Aragón	LG	Cauca	212	7629
18	21057040	Bocatoma	LG	Cauca	234	7604
19	52017030	La Fonda	LG	Cauca	208	7702
20	52017070	Bocatoma Sajandí	LG	Cauca	213	7703
21	52017080	Puente Carretera	LG	Cauca	158	7712
22	52017120	El Hoyo	LG	Cauca	212	7700
23	52017130	Pte Colgante Timbio	LG	Cauca	213	7700
24	52027020	La Playa	LG	Cauca	158	7700
25	21057010	Loma Redond	LM	Cauca	220	7616
26	21057020	San Rafael - Laguna	LM	Cauca	219	7615
27	26027030	Puente Carretera	LM	Cauca	228	7613
28	26027050	La Salvajina	LG	Cauca	257	7642
29	26027220	Puente Carretera	LM	Cauca	230	7640
30	26047100	Canal Palo	LM	Cauca	305	7621

10.2 FASE 2: ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES

Una vez seleccionadas las estaciones, se procedió a completar los datos faltantes por medio del método estadístico de los promedios. El método consiste en encontrar el valor de caudal (m^3/s) del mes faltante (y) a partir de la relación entre las medias mensuales multianuales (\bar{y}/\bar{x}), Ecuación 10.1.

$$y = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} x \quad (10.1)$$

En caso de existir más de un mes completo (x), el criterio que se tuvo en cuenta para la elección es el coeficiente de correlación, el cual debe ser mayor a 0,7. Los resultados se muestran en el Anexo A.

10.3 FASE 3: HOMOGENEIDAD DE LOS DATOS

La prueba de homogeneidad desarrollada fue la T de Student, para esta se tuvo en cuenta las estaciones pertenecientes a un mismo tipo como lo muestra la Tabla 10.3.

Tabla 10.3 Grupos a comparar para la realización de la prueba T de Student según el tipo de estación

Limnigráficas		Limnimétricas
Malvasa Pte Aragón Santa Rosa Julumito El Cortijo Pte Carretera 26027100 Buenos Aires Bocatoma Curiaco Bocatoma Sajandí	Bocatoma Río Palo La Fonda El Hoyo La Salvajina Pte Colgante Lomitas Papas Pte Carretera 52017080 Pte Ferrocarril La Playa	El Trebol Totoro Pte Carretera 26017040 Pte Carretera 26037030 Pte Ricaurte Canal Palo Loma Redonda Pte carretera 26027220 Paletara San Rafael - Laguna

Así mismo se realizó la T de Student para analizar la homogeneidad entre estaciones pertenecientes a un rango determinado de altitud, por lo que se establecieron las muestras de estaciones por grupos de altitud que se presentan en la Tabla 10.4.

Tabla 10.4 Grupos a comparar para la realización de la prueba T de Student según las altitudes

Altitudes menores o iguales a 1000	Altitudes mayores a 1000 pero menores o iguales a 2000		Altitudes mayores a 2000
Bocatoma Sajandí La Playa La Fonda El Hoyo Pte Colgante Pte Carretera - 52017080	Sta Rosa Julumito Pte Carretera - 26027100 Buenos Aires Bocatoma Curiaco Pte Ferrocarril Bocatoma Rio Palo	La Salvajina El Trebol Pte Carretera - 26017040 Pte Carretera - 26037030 Pte Ricaurte Canal Palo Pte Carretera - 26027220	Malvasa Pte Aragón El Cortijo Lomitas Papas Totoro Paletara San Rafael - Laguna Loma Redonda

Según la T de Student los datos deben tener una distribución normal. Sin embargo, para este caso no se obtuvo una distribución normal para las dos comparaciones por lo que se procedió a normalizar la información. Para ello se desarrolló las pruebas de bondad de ajuste, se seleccionó la de Chi Cuadrado, tal como se muestra en el Anexo B. Posteriormente, se aplicaron logaritmos base diez a cada uno de los datos y se procedió a realizar la T de Student utilizando la distribución establecida en la Tabla 10.5. El desarrollo de la prueba para los grupos de estaciones se encuentra en el Anexo B, cuyos resultados se observan en la Tabla 10.6.

Tabla 10.5 Distribución T de Student

Grados de libertad	Nivel de significancia		Grados de libertad	Nivel de significancia		Grados de libertad	Nivel de significancia	
	5% *	5% **		5% *	5% **		5% *	5% **
1	6,314	12,706	12	1,782	2,176	23	1,714	2,069
2	2,920	4,303	13	1,771	2,160	24	1,711	2,064
3	2,363	3,182	14	1,761	2,145	25	1,708	2,060
4	2,132	2,776	15	1,753	2,131	26	1,706	2,056
5	2,015	2,571	16	1,746	2,120	27	1,703	2,052
6	1,943	2,447	17	1,740	2,110	28	1,701	2,048
7	1,895	2,365	18	1,734	2,101	29	1,699	2,045
8	1,860	2,306	19	1,729	2,093	30	1,691	2,042
9	1,833	2,252	20	1,725	2,086	40	1,664	2,021
10	1,812	2,226	21	1,721	2,080	60	1,671	2,000
11	1,796	2,201	22	1,717	2,074	120	1,658	1,980
* Prueba de una cola ** Prueba de dos colas						Xi	1,643	1,960

Fuente: Campos Aranda, 1987.

Tabla 10.6 Resultados de prueba bilateral

Estaciones	Prueba de homogeneidad Tde Student
Papas	Homogénea
Curiaco	Homogénea
Santa Rosa	Homogénea
Lomitas	Homogénea
Paletara	Homogénea
Malvasa	Homogénea
Totoro	Homogénea
Puente Carretera	Homogénea
Julumito	Homogénea
Puente Ricaurte Autom	Homogénea
El Cortijo	Homogénea
Puente Carretera	Homogénea
Buenos Aires	Homogénea
Puente Ferrocarril	Homogénea
Bocatoma Río Palo	Homogénea
El Trebol	Homogénea
Puente Aragón	Homogénea
Bocatoma	Homogénea
La Fonda	Homogénea
Bocatoma Sajandí	Homogénea
Puente Carretera	Homogénea
El Hoyo	Homogénea
Pte Colgante Timbio	Homogénea
La Playa	Homogénea
Loma Redond	Homogénea
San Rafael - Laguna	Homogénea
Puente Carretera	Homogénea
La Salvajina	Homogénea
Puente Carretera	Homogénea
Canal Palo	Homogénea

El análisis de resultados de los registros de caudales máximos de las estaciones limnigráficas y limnimétricas presentadas, mostraron que todas las muestras de las estaciones son homogéneas entre sí.

10.4 FASE 4: PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

10.4.1 Funciones de distribución de probabilidad tradicional usadas bajo el concepto de estacionariedad para las estaciones limnigráficas y limnimétricas de la región Andina del departamento del Cauca

Con base al trabajo realizado por Poveda y Álvarez (2012) se dice que los métodos tradicionales que se usan en ingeniería hidrológica para la estimación de caudales extremos de distinto período de retorno, están basados sin tener en cuenta la hipótesis de estacionariedad y utilizan directamente las funciones de distribución de probabilidades de las series de caudales extremos.

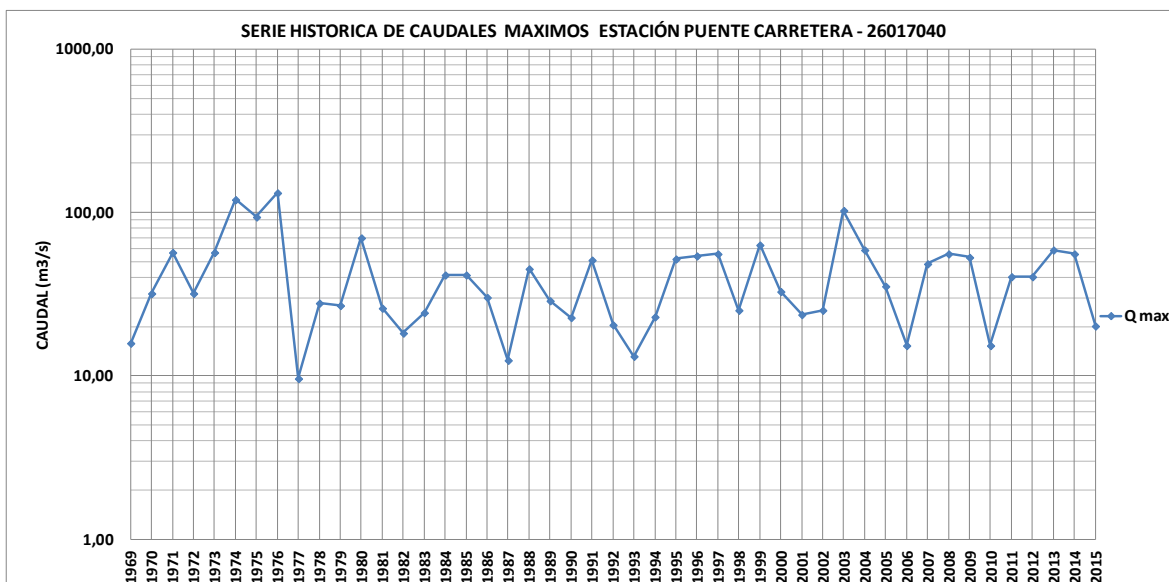
Según la Comisión de Hidrología (Chi, 2009) es más habitual aplicar el análisis de frecuencia a una serie de caudales máximos anuales.

En el análisis de frecuencia, una serie es una secuencia conveniente de datos, por ejemplo, de observaciones horarias, diarias, mensuales o anuales. Para el estudio se realizó el análisis de distribución de frecuencias de probabilidades para la determinación de ocurrencia de caudales máximos. Se trabajó con la serie anual de caudales máximos diarios (24 h), suministrados por el IDEAM, de la estaciones limnimétricas y limnigráficas de la región andina del Departamento del Cauca (ver Tabla 10.2).

Debido a la complejidad de los procesos hidrológicos, los análisis estadísticos permiten hacer estimaciones tan solo aproximadas y dependerán del tipo, la cantidad y la calidad de los datos hidrológicos disponibles. Para este análisis de caudales máximos se contó con datos históricos para cada estación. Para efectos prácticos y en aras de presentar de forma ordenada y comprensible los procedimientos llevados a cabo con las 30 estaciones elegidas para el estudio, se tomó como representativa la estación Puente Carretera – 26017040.

La Figura 10.2 indica la variación temporal anual, multianual de los caudales máximos diarios que se presentaron en cada año de registro de la estación Puente Carretera. La Figura 10.3 se elaboró con los datos que se muestran en el Anexo D, en el archivo que presenta el mismo nombre de la estación.

Figura 10.2 Serie anual multianual de caudales máximos de la estación Puente Carretera – 26017040. Sin estacionariedad



Con los valores de caudales máximos mensuales y anuales registrados, sin corregirlos por estacionariedad, de cada estación se elaboró el análisis estadístico, para poder realizar una proyección de los mismos a través del programa asistido por ordenador HYFA (HYDrological Frequency Analysis).

Con ayuda del programa HYFA se realizaron las proyecciones de caudales máximos asociados a determinados período de retorno, sin corrección por estacionariedad, mediante las siguientes FDP tradicionales:

- Distribución Normal
- Distribución Log-Normal II

- Distribución Log-Normal III
- Distribución Gamma II
- Distribución Pearson III
- Distribución Log-Pearson III
- Distribución Gumbel

HYFA determinó el cálculo de parámetros mediante el método de los Momentos y el de la Máxima Verosimilitud con un nivel de significancia o nivel de riesgo del 1%.

Para poder determinar cuál distribución de probabilidad se ajustaba mejor a los datos de caudales máximos, fue necesario realizar una prueba de bondad y ajuste. Para este caso, con el programa HYFA se utilizó la prueba de ajuste Chi-Cuadrado, la cual se calcula para cada FDP un valor del estadístico χ^2 , de acuerdo a los planteamientos expuestos en el Numeral 8.2.3 (Prueba de Chi Cuadrado). Así, se sugiere que cuanto menor sean los valores del estadístico χ^2 , más coherentes son las observaciones obtenidas con los valores esperados.

De esta manera, con los datos de la Estación Puente Carretera – 26017040, se obtuvieron los resultados de los caudales para el mes de febrero. Los valores del estadístico χ^2 para cada FDP se encuentran en la Tabla 10.7.

Tabla 10.7 Valores del estadístico χ^2 Chi-Cuadrado

FDP	Método	Valor Chi-Cuadrado
Normal	Momentos	33,744
	Max. Verosimilitud	33,744
Log-Normal II	Momentos	9,914
	Max. Verosimilitud	9,914
Log-Normal III	Momentos	1,404
	Max. Verosimilitud	-
Gamma II	Momentos	2,255
	Max. Verosimilitud	5,659
Log-Pearson III	Momentos Dir.	-
	Momentos Ind.	5,234
	Max. Verosimilitud	-
Gumbel	Momentos	24,170
	Max. Verosimilitud	6,297
Pearson III	Momentos	9,914
	Max. Verosimilitud	-

De la Tabla 10.7 se puede observar que las FDP que mejor se ajustan a los datos de caudales máximos para la estación de estudio son Log-Normal III y Gamma II por el método de los Momentos y por el método de máxima verosimilitud la que presenta un mejor ajuste es la distribución Gamma II.

A continuación se presentan los resultados de caudales máximos asociados a determinado período de retorno de la distribución elegida y los resultados obtenidos de la proyección de caudales máximos para todos los meses de la estación en la Tabla 10.8 y la Figura 10.3 respectivamente; esto ha sido con base en los datos de los Anexo C. Así mismo, la Figura 10.4 muestra los caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno calculados por la distribución Gamma II para el valor anual de la estación ejemplo.

Tabla 10.8 Caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno calculados por la distribución Gamma II

Tr (años)	Caudal Máximo (m ³ /s)
1.01	0,006
1.03	0,148
1.05	0,574
1.11	1,638
1.25	4,094
2	13,913
5	33,094
10	47,896
15	56,698
20	63,013
25	67,949
50	83,491
100	99,352

Figura 10.3 Caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno calculados por la distribución Gamma II

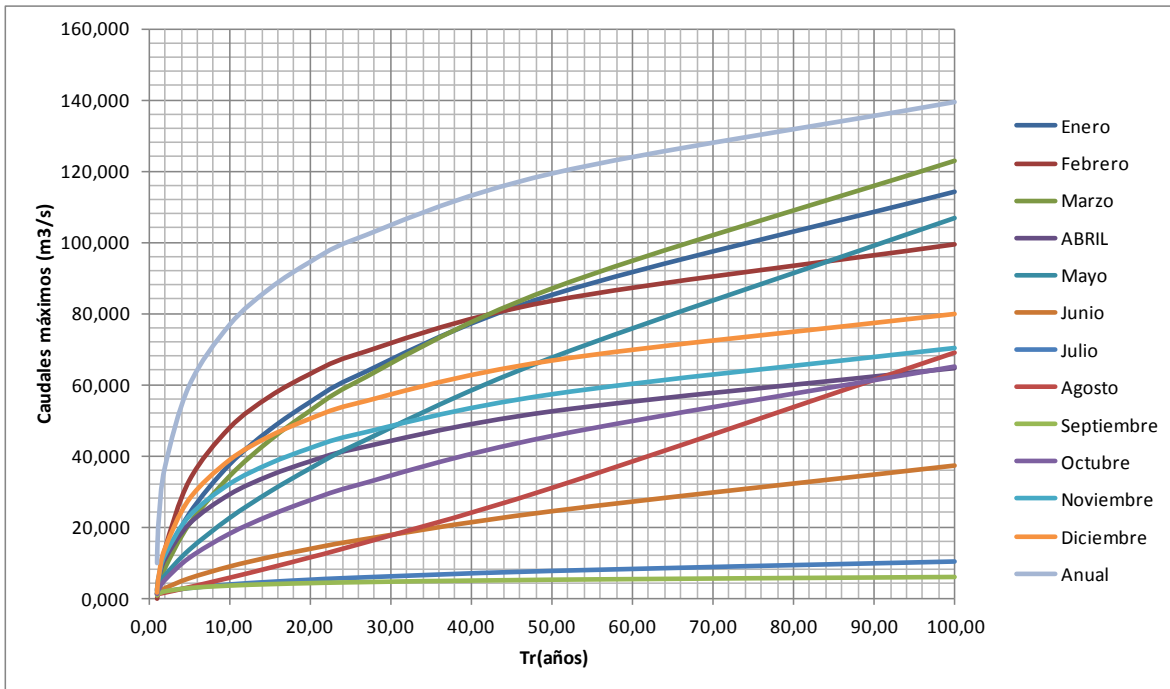
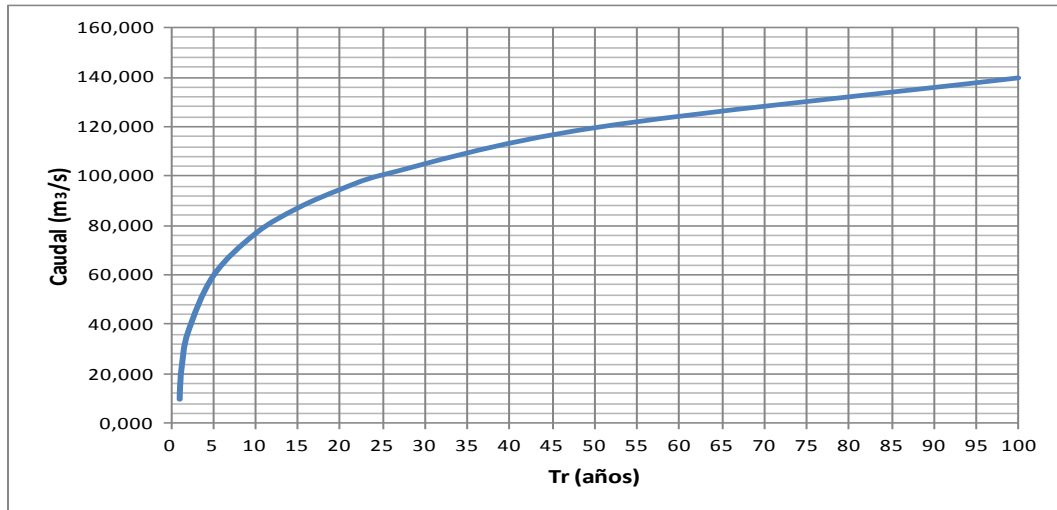


Figura 10.4 Caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno calculados por la distribución Gamma II para el valor anual de la estación Puente Carretera – 26017040



10.4.3 Variabilidad Climática: Fenómeno ENSO

La incidencia que tiene el ENSO en las diferentes estaciones de estudio se verá reflejado en la variación de los caudales máximos mensuales haciendo una relación entre los períodos ENSO y no ENSO por medio del ONI. En la Tabla 10.9 se presentan los caudales máximos mensuales con los que se trabajó para efectos de representar el ejemplo del procedimiento llevado a cabo. Esta se construyó superponiendo el indicador ONI (Tabla 8.6) sobre los caudales máximos mensuales registrados del IDEAM (Anexo D).

Tabla 10.9 Caudales máximos mensuales afectados por el fenómeno del ENSO de la estación Puente Carretera – 26017040

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1969	7,02	9,25	1,35	9,60	7,85	7,85	1,26	2,92	2,64	15,88	11,00	15,50
1970	5,10	32,00	9,25	1,37	10,06	4,53	1,23	1,23	3,02	6,94	14,00	7,90
1971	22,00	23,00	24,80	13,32	7,50	2,36	2,08	1,44	2,08	19,50	57,00	7,50
1972	32,00	32,00	19,50	25,00	4,50	19,50	3,10	1,80	1,60	1,80	5,10	19,50
1973	1,80	1,80	3,60	12,40	4,32	11,00	6,50	11,00	6,10	57,00	11,00	19,50
1974	120,00	81,00	17,28	19,50	120,00	3,20	1,80	1,30	1,30	2,90	5,60	15,01
1975	11,00	19,50	11,06	11,00	5,10	4,15	11,00	2,36	1,80	11,00	16,79	94,00
1976	7,50	132,00	39,00	8,60	3,25	1,68	2,48	1,04	2,86	4,42	6,46	4,42
1977	1,89	1,29	2,77	4,42	4,92	1,68	1,46	0,82	2,77	2,67	5,42	9,65
1978	27,92	1,93	4,27	5,01	2,35	1,75	1,15	1,11	3,38	6,49	4,27	6,49
1979	5,95	5,95	27,00	6,90	3,10	6,90	1,30	2,30	1,71	6,90	9,50	5,95
1980	6,90	70,00	5,61	5,10	5,95	3,10	1,02	0,95	1,55	2,30	3,10	3,10
1981	3,10	23,50	4,05	26,00	13,65	23,50	1,95	1,55	0,85	1,02	18,30	8,95
1982	18,30	18,30	18,30	13,65	18,30	3,10	2,30	1,46	1,55	5,10	5,10	18,30
1983	3,93	13,65	3,77	24,40	6,81	2,73	1,38	1,13	1,05	2,46	3,30	7,84
1984	7,84	3,46	7,84	41,50	8,37	3,30	1,79	1,89	3,14	23,50	22,60	25,75
1985	17,20	3,93	2,87	13,58	16,30	3,61	2,73	2,12	2,00	18,55	17,20	41,50
1986	30,25	23,50	12,20	4,46	8,11	3,14	1,21	1,38	1,13	3,93	12,20	5,06
1987	2,45	1,67	5,45	3,50	12,48	1,50	1,05	1,78	1,05	5,45	6,85	3,67
1988	1,85	1,40	3,65	4,50	2,80	2,61	2,04	1,10	2,42	7,00	45,25	28,86
1989	28,86	17,15	28,86	7,00	10,00	1,70	2,80	1,01	2,80	9,40	8,50	15,00
1990	15,00	4,35	4,35	21,84	4,35	2,20	1,25	22,78	0,82	3,50	15,00	7,42
1991	10,18	12,80	51,20	20,55	5,85	2,39	2,13	2,25	1,77	2,25	13,20	23,00
1992	6,10	20,55	2,25	3,14	2,81	1,15	1,55	1,07	3,33	1,55	11,20	16,14
1993	9,50	13,20	11,20	13,20	7,65	2,95	2,01	1,65	1,77	3,90	6,72	9,50
1994	18,10	9,50	23,00	12,40	3,90	3,52	5,35	2,25	2,95	13,20	23,00	13,20
1995	6,10	10,52	18,10	52,00	32,75	3,90	3,90	7,03	1,55	9,50	16,14	44,00
1996	25,26	20,22	1,98	6,85	54,27	3,00	1,44	2,66	2,70	11,07	6,55	11,07
1997	55,85	6,85	10,77	4,70	2,47	2,65	2,30	1,26	1,62	4,18	7,45	3,50
1998	1,55	2,82	5,04	4,70	15,64	3,67	1,55	1,40	1,12	15,64	25,26	20,22
1999	14,73	35,40	10,77	25,26	20,22	4,53	2,47	63,33	4,87	9,56	35,40	25,26
2000	21,73	30,30	9,86	4,53	5,04	1,96	3,50	1,48	1,55	6,55	32,85	6,85
2001	8,36	3,33	2,13	1,48	3,50	1,40	1,26	1,12	1,26	3,50	23,75	13,81
2002	4,01	2,82	4,36	8,96	3,50	4,87	1,79	1,62	1,55	8,36	2,65	25,26
2003	2,10	2,00	103,00	33,90	2,80	10,80	1,40	1,40	1,20	5,60	3,70	5,60
2004	14,73	2,65	2,65	59,02	6,25	1,48	1,26	1,04	1,79	3,33	45,53	6,25
2005	35,40	15,36	11,47	10,50	4,88	1,56	1,19	1,03	2,55	4,88	10,99	25,26
2006	7,69	15,36	7,38	15,36	8,94	3,68	1,84	1,27	1,11	4,25	7,38	11,47
2007	25,26	1,70	1,70	20,22	13,42	8,94	1,27	1,04	0,88	48,56	25,26	20,22
2008	35,40	55,85	25,26	20,22	12,44	4,25	1,99	25,26	1,70	3,26	35,40	55,85
2009	8,63	25,26	53,21	22,24	8,00	1,70	1,42	1,11	1,04	8,00	20,22	21,73
2010	3,12	15,36	3,40	3,97	10,50	3,68	1,76	3,26	0,53	2,33	4,44	5,02
2011	25,26	30,30	35,40	35,40	25,26	25,26	2,84	2,27	1,42	2,27	25,26	40,50
2012	40,50	35,40	10,50	8,94	2,27	1,42	0,80	0,65	0,56	1,70	3,97	10,50
2013	3,68	1,99	8,94	4,25	4,25	1,42	3,12	1,70	0,65	2,13	59,02	53,21
2014	8,94	55,85	30,30	2,84	7,38	1,99	2,55	1,27	3,54	7,38	10,50	25,26
2015	4,25	20,22	4,25	5,81	7,38	1,70	1,19	1,04	1,42	1,11	4,88	1,04

Fuente: Elaboración propia, datos: IDEAM (2017) y NOAA (2017).

La Tabla 10.9 muestra que los caudales máximos en rojo son los que se presentaron durante la ocurrencia del fenómeno de El Niño; mientras que los representados en azul

se dieron durante el fenómeno de La Niña y aquellos que se muestran en negro son los registrados en los periodos de No ENSO.

En las Tablas 10.10, 10.11 y 10.12 se indican los períodos en los cuales se presentaron los fenómenos de El Niño, La Niña y los períodos normales o períodos de No ENSO ocurridos desde 1969, con su respectiva duración en meses en la región central del océano Pacífico tropical, realizado por el Centro de Predicción Climática de la NOAA. Estos periodos corresponden a la estación que se ha tomado como ejemplo.

Tabla 10.10 Períodos de ocurrencia de El Niño

Fenómeno de El Niño		
Meses	Inicio	Final
6	ene-69	jun-69
6	ago-69	ene-70
11	may-72	mar-73
6	sep-76	feb-77
5	sep-77	ene-78
5	oct-79	feb-80
15	abr-82	jun-83
18	sep-86	feb-88
14	jun-91	jul-92
6	oct-94	mar-95
13	may-97	may-98
9	jun-02	feb-03
10	jul-04	abr-05
5	sep-06	ene-07
10	jul-09	abr-10
14	nov-14	dic-15

Tabla 10.11 Períodos de ocurrencia de La Niña

Fenómeno de El Niña		
Meses	Inicio	Final
19	jul-70	ene-72
14	jun-73	jul-74
18	oct-74	mar-76
9	oct-84	jun-85
13	may-88	may-89
8	ago-95	mar-96
32	jul-98	mar-01
11	ago-07	jun-08
10	jul-10	abr-11
7	ago-11	mar-12

Tabla 10.12 Períodos de NO ENSO

Fenómeno de NO ENSO		
Meses	Inicio	Final
1	jul-69	jul-69
5	feb-70	jun-70
3	feb-72	abr-72
2	abr-73	may-73
2	ago-74	sep-74
5	abr-76	ago-76
6	mar-77	ago-77
20	feb-78	sep-79
25	mar-80	mar-82
15	jul-83	sep-84
14	jul-85	ago-86
2	mar-88	abr-88
25	jun-89	may-91
27	ago-92	sep-94
4	abr-95	jul-95
13	abr-96	abr-97
1	jun-98	jun-98
14	abr-01	may-02
16	mar-03	jun-04
16	may-05	ago-06
6	feb-07	jul-07
12	jul-08	jun-09
2	may-10	jun-10
3	may-11	jul-11
32	may-12	oct-14

Para analizar de manera muy general la influencia de estos fenómenos en los caudales máximos, se calculó a partir de la Tabla 10.9, un promedio de los valores de caudales máximos registrados en los meses en que se presentó cada fenómeno y en los que no (No ENSO), por medio de las Ecuaciones 10.2, 10.3 y 10.4.

$$Q \text{ mmp}_{Niño} = \frac{\sum Q_{máxNiño}}{N_{Niño}} \quad (10.2)$$

Donde:

$Q \text{ mmp}_{Niño}$: Caudal máximo mensual promedio durante El Niño.

$\Sigma Q_{m\acute{a}x_{Ni\tilde{n}o}}$: Sumatoria de los caudales máximos mensuales registrados durante los periodos de ocurrencia de El Niño.

$N_{Ni\tilde{n}o}$: Número de meses en los que se presentó El Niño (Tabla 10.9).

$$Q_{mmp_{Ni\tilde{n}o}} = \frac{1091.349 \left(\frac{m^3}{s}\right)}{153 \text{ meses}} = 7.13 \left(\frac{m^3}{s}\right)$$

$$Q_{mmp_{Ni\tilde{n}a}} = \frac{\Sigma Q_{max_{Ni\tilde{n}a}}}{N_{Ni\tilde{n}a}} \quad (10.3)$$

Donde:

$Q_{mmp_{Ni\tilde{n}a}}$: Caudal máximo mensual promedio durante La Niña.

$\Sigma Q_{m\acute{a}x_{Ni\tilde{n}a}}$: Sumatoria de los caudales máximos mensuales registrados durante los periodos de ocurrencia de La Niña.

$N_{Ni\tilde{n}a}$: Número de meses en los que presentó La Niña (Tabla 10.10).

$$Q_{mmp_{Ni\tilde{n}a}} = \frac{2569.106 \left(\frac{m^3}{s}\right)}{141 \text{ meses}} = 18.22 \left(\frac{m^3}{s}\right)$$

$$Q_{mmp_{No\ ENSO}} = \frac{\Sigma Q_{max_{No\ ENSO}}}{N_{No\ ENSO}} \quad (10.4)$$

Donde:

$Q_{mmp_{No\ ENSO}}$: Caudal máximo mensual promedio durante el período de No ENSO.

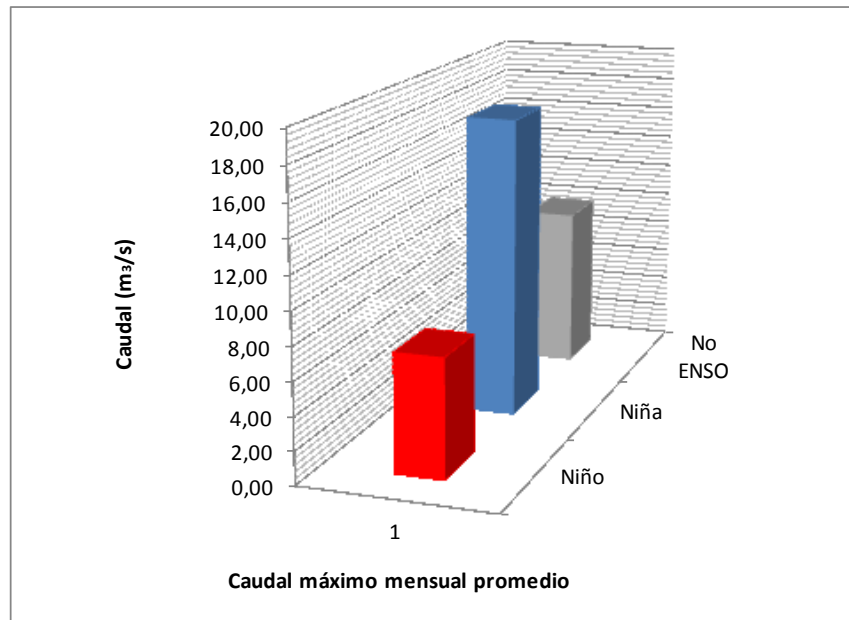
$\Sigma Q_{m\acute{a}x_{No\ ENSO}}$: Sumatoria de los caudales máximos mensuales registrados durante los períodos de No ENSO.

$N_{No\ ENSO}$: Número de meses de No ENSO (Tabla 10.11).

$$Q\ mmp_{No\ ENSO} = \frac{2659.825 \left(\frac{m^3}{s}\right)}{270\ meses} = 9.85 \left(\frac{m^3}{s}\right)$$

En la Figura 10.5 se representan los caudales máximos mensuales promedio para cada fenómeno (Niño, Niña) y meses normales (No ENSO).

Figura 10.5 Caudales máximo mensuales promedio para la estación Puente Carretera – 26017040 (Niño, Niña y No ENSO)



Para (Carvajal *et al*, 1997) el fenómeno de El Niño en Colombia se ha caracterizado como un período de sequía entre moderada y leve, mientras que en el caso del fenómeno de La Niña, se ha caracterizado como un aumento generalizado de las

lluvias en todo el país. La Figura 10.5 indica que la variabilidad climática incide en el comportamiento de la serie histórica de caudales máximos de la estación; en hidrología se define sequía como la presencia de un flujo con una corriente inferior al valor promedio de corrientes. De esta manera cuando se presentó el fenómeno de El Niño (o período cálido) se registró en promedio caudales máximos de 7.13 m³/s (rojo), cuando se presentó el fenómeno de La Niña (o periodo frío) se registró en promedio caudales máximos de 18.22 m³/s (azul) debido al aumento de las precipitaciones y cuando no se presentó ningún de las dos etapas del fenómeno ENSO o periodo normal (No ENSO) se registró en promedio caudales máximos de 9.85 m³/s (gris) un valor intermedio entre las dos etapas del fenómeno ENSO.

10.4.3 Funciones de Distribución de Probabilidad Mixtas usadas bajo el concepto de no estacionariedad para las estaciones limnigráficas y limnimétricas de la región andina del departamento del cauca

En el numeral anterior se pudo analizar de manera muy general la incidencia que tiene la variabilidad climática y su afectación en el comportamiento de los caudales máximos de la estación Puente Carretera – 26017040. Allí se puede apreciar que las dos fases del ENSO alteran el comportamiento hidrológico de la estación y en general de las estaciones abordadas en el estudio, cabe resaltar que el trabajo afronta solamente la afectación que se tienen sobre los caudales máximos.

Como se mencionó anteriormente los fenómenos hidrológicos se caracterizan por una gran variabilidad, aleatoriedad e incertidumbre, por tanto es importante tener en cuenta los fenómenos macroclimáticos que afectan la dinámica hidroclimática a nivel mundial en un análisis estadístico para que este sea más confiable y acertado. En la actualidad existen bastantes documentos que hablan sobre los cambios de las variables hidroclimatológicas, tanto de precipitación de lluvia como de escorrentía, en diferentes

escalas temporales y para distintas estaciones de todo el mundo (Hirschboeck y otros, 2000; Pilon y Yue, 2002; Pekarova y otros, 2003). Así, se evidencia la variabilidad climática.

Es necesario tener en cuenta las distintas fases del ENSO si se desean hacer diseños hidrológicos. El trabajo realizado por Poveda y Álvarez (2012) nos brinda una herramienta importante para poder hacer estimaciones más acertadas sobre caudales máximos, mediante las FDP mixtas ya que estas tienen en cuenta la variabilidad climática, en particular las fases de ENSO. Recomiendan de forma general que en los ríos del territorio Colombiano se deben utilizar las FDP mixtas tipo I, no obstante hicieron aseveraciones particulares para cada región. Por ejemplo para la región del Occidente y sur del país recomiendan usar la FDP mixta Fréchet para el cálculo de caudales máximos, para este caso el área de estudio se encuentra al sur occidente del país, por lo tanto se utilizó la FDP mixta tipo I Fréchet.

Por lo tanto, el análisis se realizó usando un tipo de muestra estadística con tres poblaciones:

Muestras: Caudales durante El Niño (1); La Niña (2) y No ENSO o período Normal (3).

La distribución mixta es el resultado de la suma ponderada de las funciones de distribución de probabilidades de cada muestra, como se observa en las Ecuaciones 10.5 y 10.6.

$$F_T(X \geq x) = \rho_1 F_1(X \geq x) + \rho_2 F_2(X \geq x) \dots \dots \dots + \rho_i F_i(X \geq x) \quad (10.5)$$

$$\sum_{i=1}^n \rho_i = 1, \text{ Con } \rho_i = \frac{\text{Número de datos en la fase } i}{\text{Número de atos en la registro}} \quad (10.6)$$

Donde F_T representa la función de distribución de probabilidad de toda la muestra de caudales extremos, F_i es la función de distribución de probabilidad de cada muestra resultante de la discretización, y ρ_i representa el factor de ponderación de cada muestra.

Para efectuar el análisis se usó la función de probabilidad mixta Fréchet, como se define a continuación:

Del numeral 8.2.1.1, la Distribución Fréchet (Chow, 1994) se representa según la ecuación 10.7.

$$F(X \geq x) = 1 - (\exp(-\exp(-\alpha [\ln x - \beta]))) \quad (10.7)$$

Donde, por el método de los momentos se tiene que $\alpha = 1.281/\sigma$ y $\beta = \mu - 0.45\sigma$, siendo μ y σ , la media de los logaritmos de los datos y la desviación estándar de los logaritmos de los datos, respectivamente.

Para discretizar la muestra de datos, se utilizó el ONI (Índice de Niño Oceánico) con el fin de definir los años en los que tuvo incidencia el fenómeno de La Niña, El Niño y No ENSO. En la Figura 10.6 se muestra la discretización de los datos por poblaciones, años y caudales durante la ocurrencia de El Niño, La Niña y años No ENSO, utilizando los registros de caudal de la estación Puente Carretera – 26017040. Esta discretización representada en la Figura 10.6 se elaboró con la información de la Tabla 10.12.

Figura 10.6 Discretización de valores de caudales máximos de la estación Puente Carretera – 26017040, durante la ocurrencia de El Niño, La Niña y años No ENSO

Población 1		Población 2		Población 3	
Niño		Niña		NO ENSO	
Periodo	Caudal (m3/s)	Periodo	Caudal (m3/s)	Periodo	Caudal (m3/s)
1969-1970	15.9	1970-1971	32.0	1978-1979	27.9
1972-1973	32.0	1971-1972	57.0	1979-1980	27.0
1977-1978	9.7	1973-1974	57.0	1980-1981	70.0
1982-1983	18.3	1974-1975	120.0	1981-1982	26.0
1983-1984	24.4	1975-1976	94.0	1984-1985	41.5
1987-1988	12.5	1976-1977	132.0	1986-1987	30.3
1991-1992	51.2	1985-1986	41.5	1989-1990	28.9
1992-1993	20.6	1988-1989	45.3	1990-1991	22.8
1997-1998	55.9	1995-1996	52.0	1993-1994	13.2
2002-2003	25.3	1998-1999	25.3	1994-1995	23.0
2010-2011	15.4	1999-2000	63.3	1996-1997	54.3
2014-2015	20.2	2000-2001	32.9	2001-2002	23.8
		2007-2008	48.6	2003-2004	103.0
		2008-2009	55.9	2004-2005	59.0
		2011-2012	40.5	2005-2006	35.4
				2006-2007	15.4
				2009-2010	53.2
				2012-2013	40.5
				2013-2014	59.0
				2014-2015	55.9

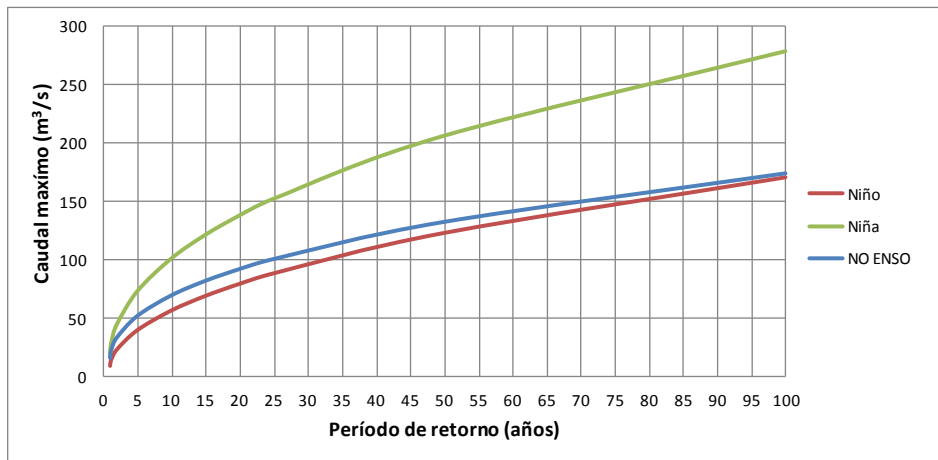
En la Figura 10.6 se muestran los resultados del ajuste de funciones de distribución de probabilidades Fréchet (F_i) según las fases del ENSO, para la estación Puente Carretera – 26017040. Los valores con los que se realizó la Figura 10.7 se encuentran en el Anexo D del archivo que presenta el mismo nombre de la estación, los factores de ponderación que se usaron para el cálculo de la FDP mixta se muestran en la Tabla 10.13.

Tabla 10.13 Factores de ponderación para la estación Puente Carretera 26017040

	Factor de ponderación (ρ_i)
El Niño	0,28
La Niña	0,34
NO ENSO	0,38

Para realizar el cálculo de la función de distribución de probabilidad de toda la muestra de caudales máximos (F_T), se hizo necesario extrapolar los valores de las distribuciones correspondientes a cada fase de ENSO y No ENSO (F_i) hasta períodos de retorno de 100 años (Figura 10.7), esto se debió a que este valor es el máximo período de retorno empleado por El Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2009) para diseño de estructuras hidráulicas, como es el caso de los puentes de gran luz.

Figura 10.7 Distribución Fréchet extrapolada según las fases del ENSO y No ENSO para la estación Punte Carretera 26017040



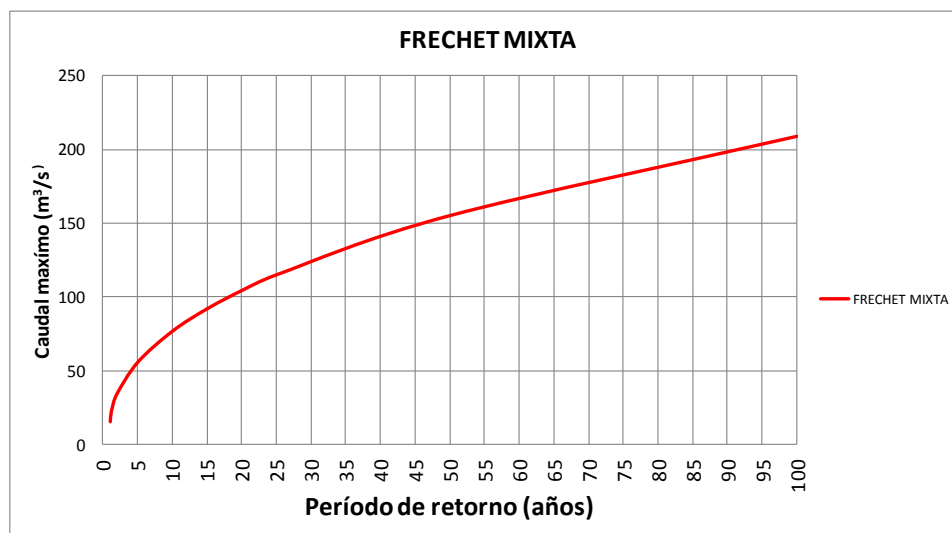
Utilizando los valores extrapolados y los factores de ponderación para cada fase de ENSO y No ENSO, se calculó la FDP mixta de Fréchet (F_T). Los resultados se indican en la Tabla 10.14.

Tabla 10.14 Caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno calculados por la distribución de probabilidad mixta tipo I (Fréchet) para la estación Puente Carretera 26017040

Tr (Años)	Caudal (m ³ /s)
1.01	15,64
1.03	17,17
1.05	18,75
1.11	20,94
1.25	24,35
2	34,75
5	56,09
10	77,06
15	92,20
20	104,55
25	115,18
50	155,26
100	208,90

Con los datos de la Tabla 10.14 se construyó la Figura 10.8.

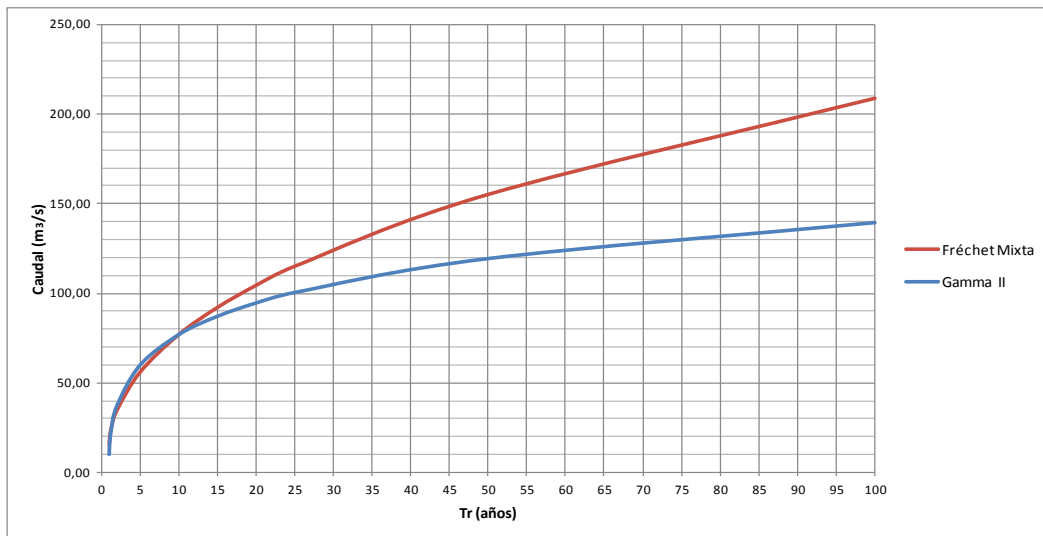
Figura 10.8 Caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno calculados por la distribución de probabilidad mixta tipo I (Fréchet) para la estación Puente Carretera 26017040



Para poder ver las diferencias que existen al utilizar métodos con probabilidades simples o tradicionales de aquellos que poseen una distribución de probabilidad mixta,

se efectuó una gráfica que mostrara dicha diferencia como se observa en la Figura 10.9.

Figura 10.9 Comparativo de caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno estimados mediante la FDP Gamma II (tradicional) y la FDP Fréchet (mixta) para la estación Punte Carretera 26017040



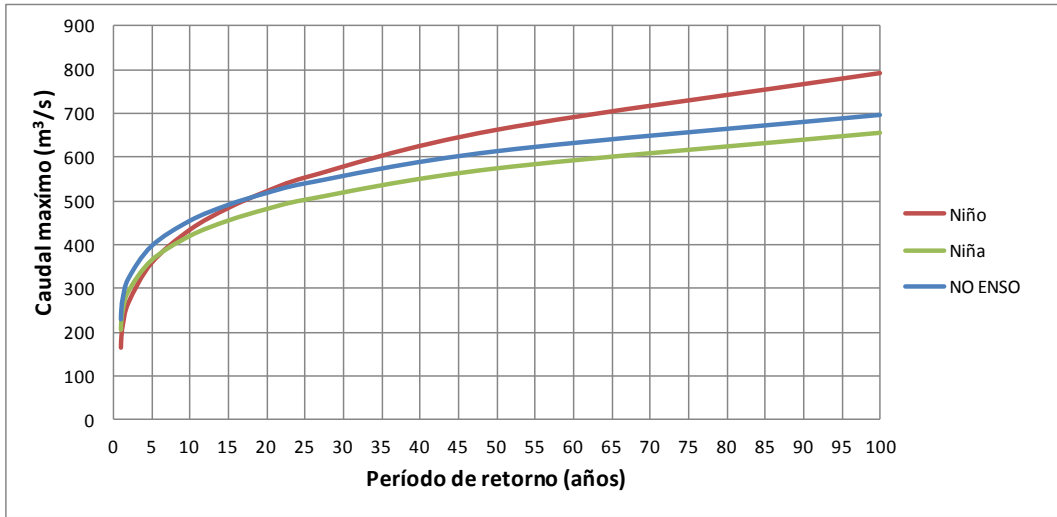
Al realizar un comparativo (Figura 10.9) entre los resultados obtenidos de caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno mediante las FDP Gamma II simple o tradicional que tiene en cuenta la hipótesis de estacionariedad (Figura 10.4) y los caudales estimados mediante FDP Fréchet mixta tipo I que tiene en cuenta los efectos de la variabilidad (Figura 10.8), se pudo concluir que:

- Para períodos de retorno menores a 10 años la FDP Fréchet (mixta) estima valores inferiores que los determinados por la FDP Gamma II (simple o tradicional).
- Para períodos de retorno mayores a 10 años la FDP Fréchet (mixta) estima valores superiores que los determinados por la FDP Gamma II (simple o tradicional) y en la medida que aumenta el período de retorno aumenta progresivamente dicha diferencia.

- Es necesario tener en cuenta la importancia de involucrar FDP que consideran las fases del fenómeno ENSO.
- Al implementar la FDP Gamma II (simple y tradicional) para la estimación de caudales máximos de diseño, se corre el riesgo que las obras queden sub-diseñadas para períodos de retorno mayores a 10 años.
- Finalmente, si se usa la FDP Fréchet (mixta) los costos en construcción de obras civiles serán acondicionados a obras que realmente sean adecuadas para la cuenca en estudio, previniendo así daños a las estructuras. Puesto que al utilizar la FDP Fréchet se mejoran las estimaciones, aproximándose más a la realidad del sistema y obteniendo resultados más precisos.

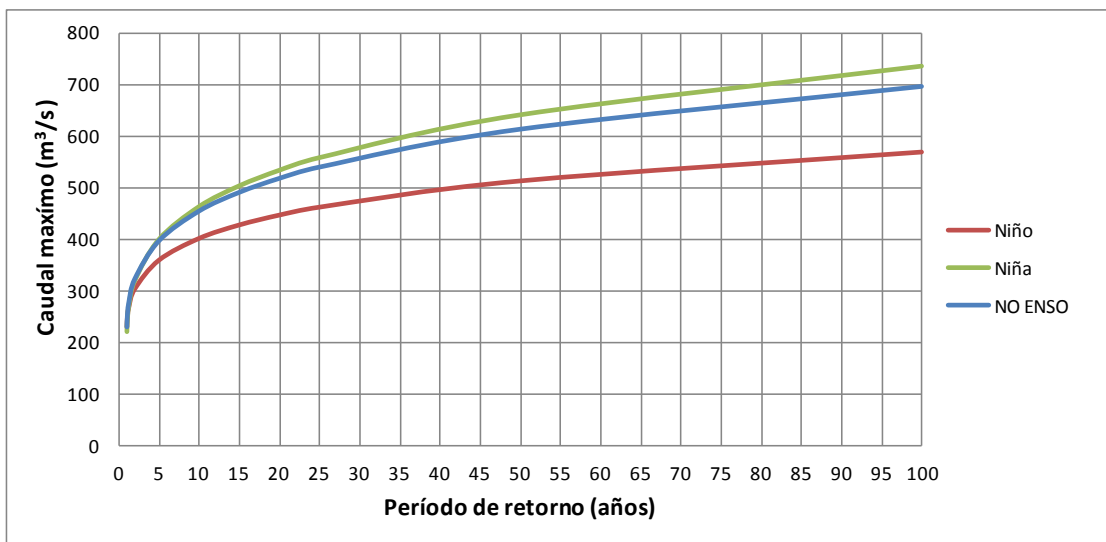
Es preciso aclarar que no todas las gráficas obtienen un fenómeno La Niña por encima y el fenómeno El Niño por debajo como se indica en la Figura 10.7. De las 30 estaciones que son parte del estudio, en algunos casos las gráficas dieron de otra forma como lo muestra la Figura 10.10 correspondiente a la estación Santa Rosa. Lo dicho anteriormente ocurre debido a que para la selección de caudales máximos en cada año se debe tener en cuenta si durante el mismo se presentó total o parcialmente el fenómeno ENSO. El caudal máximo cuando se presenta el fenómeno ENSO en un año determinado se debe seleccionar dentro del mismo fenómeno, siempre y cuando ese fenómeno abarque los meses tradicionales de mayor caudal.

Figura 10.10 Distribución Fréchet extrapolada según las fases del ENSO y No ENSO para la estación Santa Rosa



Como se observa en la Figura 10.10 se tiene que el fenómeno de El Niño se encuentra por encima de los demás fenómenos a partir de un tiempo de retorno de 20 años. En este caso no se tuvo en cuenta lo descrito con anterioridad. En consecuencia, la Figura 10.11 muestra el cambio que se genera en la distribución de Fréchet extrapolada apoyada en las indicaciones anteriores.

Figura 10.11 Distribución Fréchet extrapolada según las fases del ENSO y No ENSO para la estación Santa Rosa teniendo en cuenta que el caudal sea parte del fenómeno



Finalmente la FDP mixta de Fréchet tipo I arroja caudales máximos corregido por variabilidad climática para cada una de la estaciones de estudio, los resultados se muestran en la Tabla 10.15.

Tabla 10.15 Resultados de la FDP mixta de Fréchet tipo I para cada estación en diferentes periodos de retorno

ESTACIONES	CAUDALES MÁXIMOS						
	Tiempos de retorno (Tr) en años						
	Tr 5	Tr 10	Tr 15	Tr 20	Tr 25	Tr 50	Tr 100
PTE CARR - 26017040	56,090	77,059	92,199	104,547	115,179	155,259	208,904
PTE CARR - 26027100	80,281	97,129	108,160	116,625	123,597	147,819	176,583
PTE CARR - 26027220	10,573	13,965	16,363	18,294	19,942	26,065	34,099
PTE CARR - 26037030	68,087	89,412	104,416	116,467	126,734	164,724	214,313
PTE CARR - 52017080	118,817	171,670	211,672	245,299	274,920	391,501	557,946
BOC RIO PALO	183,249	239,522	278,637	309,790	336,155	432,431	555,449
BOC SAJANDI	134,462	174,733	202,576	224,676	243,331	311,130	397,133
BOCATOMA	295,096	367,292	415,613	453,206	484,478	595,128	730,107
BUENOS AIRES	25,060	27,477	28,944	30,018	30,872	33,662	36,685
CANAL PALO	7,516	7,674	7,765	7,830	7,881	8,038	8,199
CURIACO	191,996	237,428	267,847	291,529	311,244	381,136	466,725
EL CORTIJO	55,982	69,852	79,168	86,433	92,486	113,978	140,332
EL HOYO	340,278	421,671	478,260	523,498	561,952	704,075	890,287
EL TREBOL	104,871	111,741	115,855	118,843	121,209	128,858	137,027
JULUMITO	165,097	192,087	209,235	222,152	232,648	268,230	308,979
LA FONDA	780,197	937,477	1040,423	1119,439	1184,536	1410,918	1680,317
LA PLAYA	202,585	253,523	288,924	317,173	341,134	429,174	543,105
LA SALVAJINA	687,879	803,373	877,291	933,241	978,867	1134,599	1314,856
LOMA REDONDA	7,142	10,021	12,175	13,975	15,555	21,740	30,524
LOMITAS	74,333	91,559	103,394	112,777	120,700	149,596	186,647
MALVASA	30,494	37,426	42,017	45,566	48,503	58,808	71,219
PALETARA	26,743	32,120	35,656	38,380	40,630	48,497	57,941
PAPAS	20,439	23,439	25,333	26,755	27,908	31,798	36,226
PTE ARAGON	88,269	106,911	119,117	128,484	136,198	162,996	194,810
PTE COLGANTE	350,176	435,031	491,942	536,288	573,226	704,274	864,870
PTE FERROCARRIL	129,365	184,719	226,017	260,405	290,476	407,178	570,254
PTE RICAURTE	765,802	926,112	1031,674	1113,011	1180,214	1415,176	1697,095
SAN RAFAEL	6,707	8,106	9,031	9,745	10,336	12,407	14,902
SANTA ROSA	375,034	437,577	477,482	507,624	532,167	615,694	711,938
TOTORO	12,309	16,779	19,985	22,589	24,824	33,201	44,315

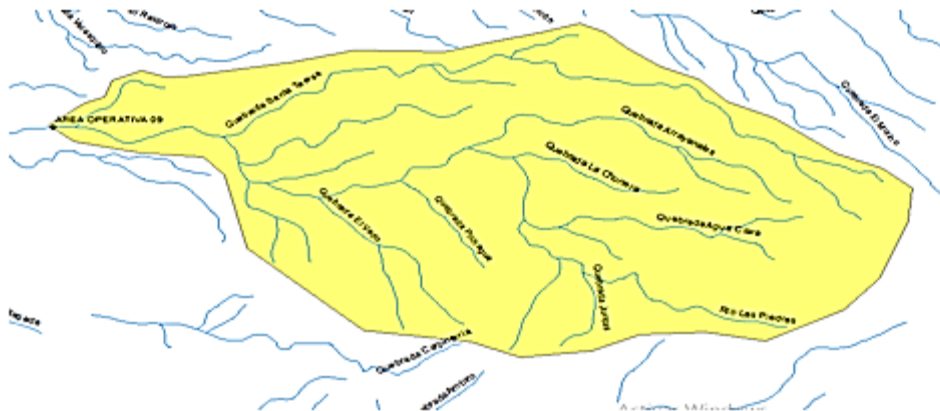
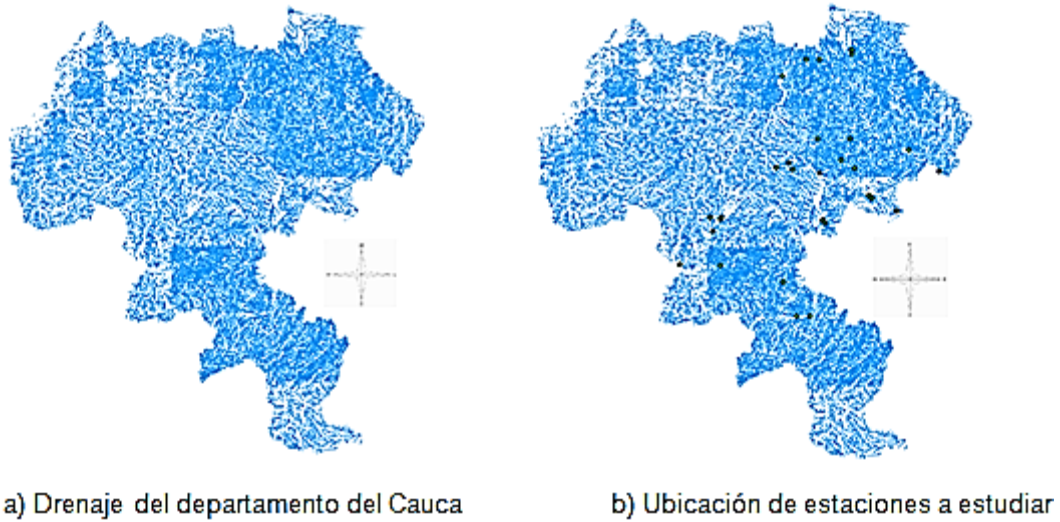
Estos caudales se utilizarán más adelante para la construcción de las curvas regionales de caudales máximos en diferentes periodos de retorno, para ello también se hace necesario hallar las áreas de la cuenca de drenaje que comprenden cada una de las estaciones, lo cual se describirá en el siguiente ítem.

10.5 ÁREA AFERENTE A CADA ESTACIÓN

Para la obtención de las áreas de cada cuenca en donde se ubican las estaciones de estudio, se contó con la ayuda del programa ArcGIS 10 (Versión prueba-9462859037) usando el sistema de coordenadas "MAGNA_Colombia_Oeste". Así mismo se usó información bibliográfica sobre la geomorfología de cada cuenca para poder tener una estimación en la delimitación de cada una de las fuentes hídricas pertenecientes a las estaciones.

Se obtuvo un shapefile (archivo de forma) de la red de drenaje del Departamento del Cauca con información suministrada por el Acueducto de Popayán. Del IDEAM se utilizó otro shapefile de todas las estaciones que manejan y cuya información se encuentra en la página virtual. Con esta información se creó un nuevo shapefile que contiene la información requerida, esto es, la ubicación exclusiva de las estaciones limnigráficas y limnimétricas usadas en el estudio. Finalmente se creó un shapefile de tipo polígono denominado "Área de cuencas1", el cual utiliza el mismo sistema de coordenadas del drenaje del departamento y en el que se determina el área de influencia de cada estación, por medio de los Polígonos de Thiessen. Como resultado, el programa arrojó el área de cada polígono. La Figura 10.12 ilustra el mapa de "drenaje sencillo" del Departamento del Cauca, la ubicación de las estaciones de estudio y como ejemplo, la delimitación de la cuenca de una de las estaciones trabajadas (Puente Carretera 26017040).

Figura 10.12 Información hidrográfica digital del Departamento del Cauca



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo las áreas de las cuencas hidrográficas de cada estación y con los caudales máximos corregidos por la variabilidad climática, se procedió a la construcción de las Curvas Regionales de Caudales Máximos. Los caudales tenidos en cuenta para el análisis fueron los valores medios anuales multianuales, ya que estos son los requeridos para cualquier tipo de estudio en el que se pretenda diseñar estructuras hidráulicas.

10.6 CONSTRUCCIÓN DE LAS “CURVAS REGIONALES Y ENVOLVENTES” PARA LA REGIÓN ANDINA DEL DEPARTAMENTO DEL CAUCA, PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO

Para realizar los gráficos de las curvas regionales en diferentes períodos de retorno se utilizó Excel. A continuación, se presenta como ejemplo el proceso realizado para el período de retorno de 20 años:

- La Tabla 10.16 muestra las estaciones con sus respectivas áreas; los caudales máximos anuales ($Q_{\text{máx}}$) corregidos por variabilidad climática y los caudales unitarios (q), los cuales corresponden a la relación entre el $Q_{\text{máx}}$ y el área respectiva.
- A partir de la Tabla 10.16 se construyó la Figura 10.13 donde se muestra la relación funcional de tipo polinómico entre los caudales máximos anuales y las áreas de drenaje correspondientes a cada una de las 29 de 30 estaciones, consideradas en la región. Se descartó la estación “La Salvajina” puesto que su área es demasiado grande en comparación a las otras 29. La ecuación polinómica que se observa en la Figura 10.13, presenta un coeficiente de determinación alto (0.8804), mayor a 0.7 que es el valor adecuado para estudios hidrológicos, según la Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur de la UNESCO¹. Lo anterior valida las curvas regionales encontradas para cada periodo de retorno.
- Posteriormente se construyeron las curvas envolventes de caudales máximos para las estaciones hidrográficas de la región Andina del Departamento del Cauca. Para lo anterior, se hizo uso de los caudales unitarios mostrados en la Tabla 10.16. Las curvas encontradas se presentan en las Figuras 10.14 y 10.15. La Figura 10.14 muestra la tendencia que existe entre los caudales unitarios y el área de drenaje; así, a mayor área menor caudal unitario. Es de anotar que para la elaboración de la Figura 10.14 fueron necesarias 26 de las 30 estaciones

¹ UNESCO, ROSTLAC, “Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur” Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la Unesco para América Latina y el Caribe, Montevideo, 1982.

seleccionadas. Esto se debió a que las restantes tenían un área de cuenca muy grande, entre 2000 y 6000 Km². Este rango no abarca la generalidad de las áreas de las cuencas de la región Andina del Departamento del Cauca. En la Figura 10.15 se observa la envolvente para un período de retorno de 20 años, esta se construyó con los valores más altos de los caudales unitarios máximos, tal como se aprecia en la Figura 10.14 y cuyos datos se encuentran en el Anexo F.

Tabla 10.16 Datos de estaciones para un período de retorno de 20 años

Tiempo de retorno (Tr) de 20 años			
Estación	A (Km ²)	Q máx (m ³ /s)	q (m ³ /s*Km ²)
SAN RAFAEL	22	9,745	0,44295
CANAL PALO	24	7,830	0,32626
PTE CARR - 26027220	30	18,294	0,60980
LOMA REDONDA	42	13,975	0,33274
TOTORO	43	22,589	0,52533
BUENOS AIRES	44	30,018	0,68222
PALETARA	47	38,380	0,81660
MALVASA	50	45,566	0,91131
PAPAS	53	26,755	0,50482
PTE CARR - 26017040	54	104,547	1,93605
LOMITAS	70	112,777	1,61109
PTE CARR - 26037030	98	116,467	1,18844
JULUMITO	122	222,152	1,82092
PTE ARAGON	127	128,484	1,01168
EL CORTIJO	146	86,433	0,59200
PTE FERROCARRIL	152	260,405	1,71319
BOC SAJANDI	196	224,676	1,14630
PTE CARR - 26027100	278	116,625	0,41951
EL TREBOL	333	118,843	0,35689
BOC RIO PALO	334	309,790	0,92751
EL HOYO	383	523,498	1,36683
BOCATOMA	413	453,206	1,09735
CURIACO	446	291,529	0,65365
LA PLAYA	645	317,173	0,49174
SANTA ROSA	669	507,624	0,75878
PTE CARR - 52017080	798	245,299	0,30739
PTE COLGANTE	1409	536,288	0,38062
LA FONDA	2478	1119,439	0,45175
PTE RICAURTE	2778	1113,011	0,40065
LA SALVAJINA	5340	933,241	0,17476

Figura 10.13 Relación funcional de tipo polinómico entre los caudales máximos anuales y las áreas de drenaje correspondientes a cada una de las estaciones empleadas en un período de retorno de 20 años

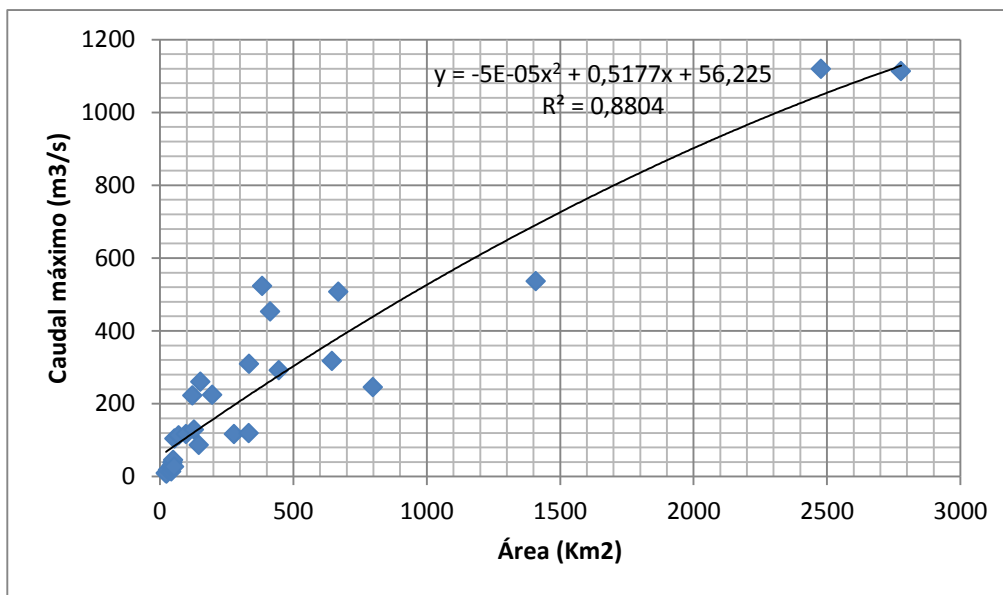


Figura 10.14 Relación entre caudales unitarios y áreas de drenaje correspondientes a cada una de las estaciones empleadas para un período de retorno de 20 años

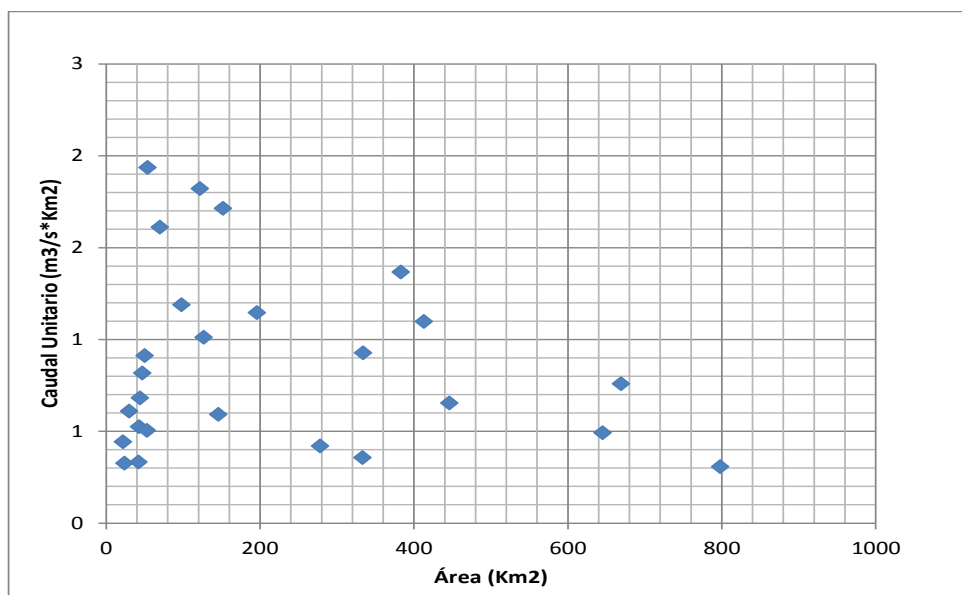
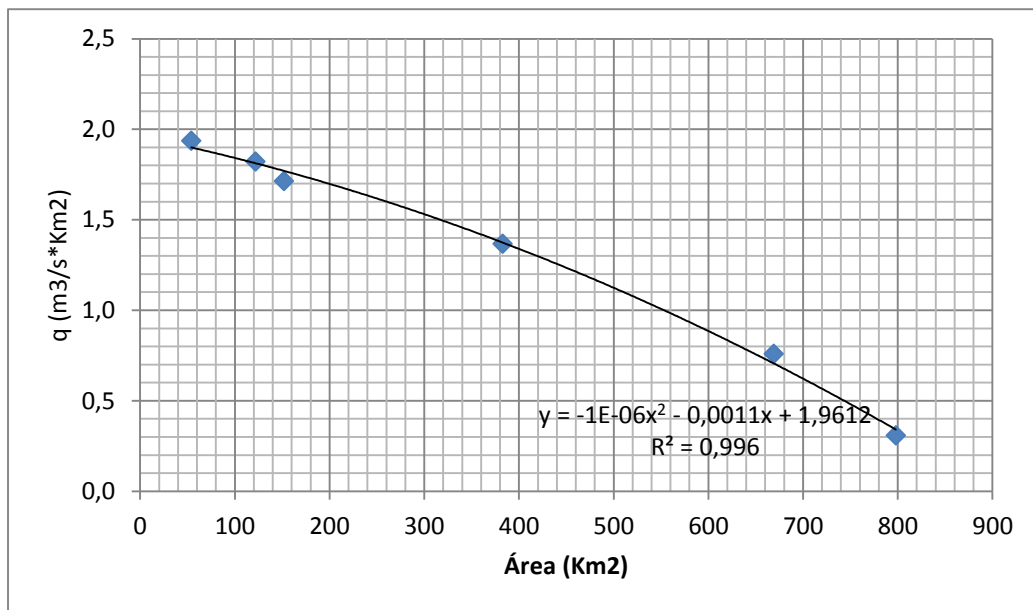


Figura 10.15 Envolverte de gastos máximo para la región Andina del Departamento del Cauca en un período de retorno de 20 años

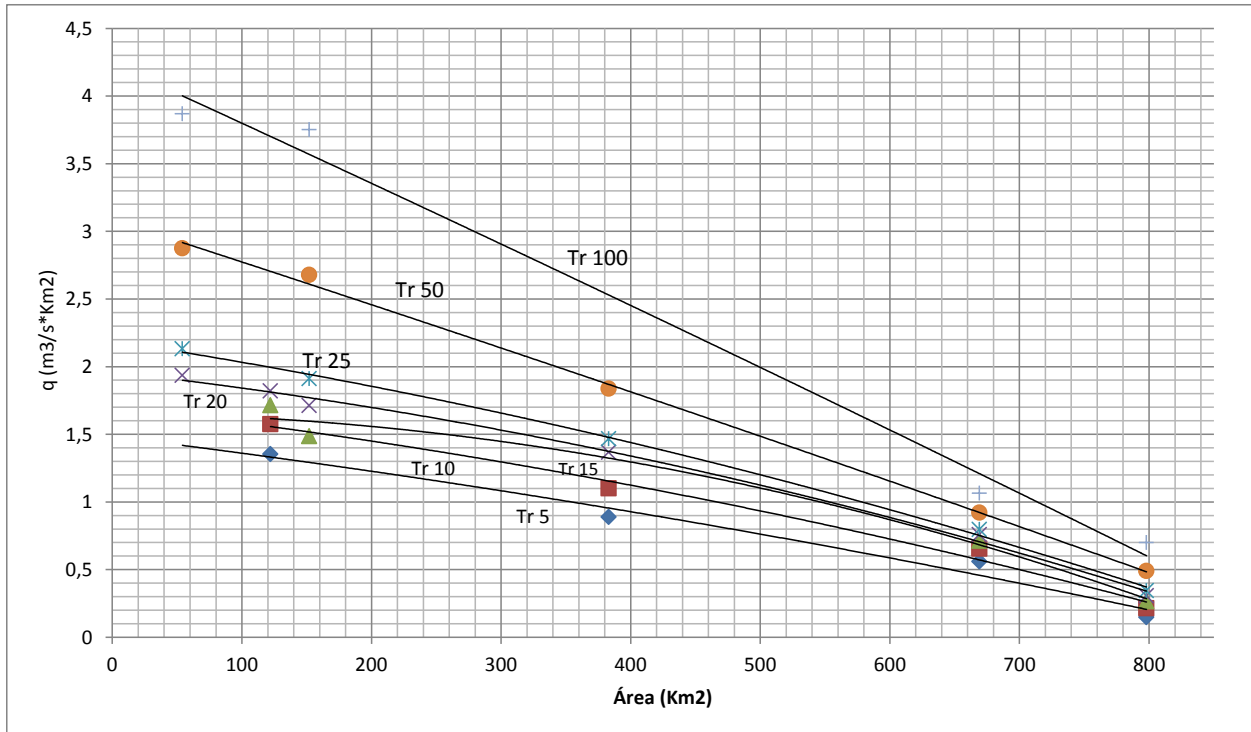


Como se muestra en la Figura 10.15, el coeficiente de determinación cumple con lo planteado con anterioridad (mayor a 0.7). Las curvas regionales de caudales máximos permiten obtener datos de aquellas estaciones no instrumentadas o carentes de información. El procedimiento explicado en el ejemplo para período de retorno de 20 años, se realizó para los otros períodos de retorno y cuyos resultados se muestran en la Figura 10.16. Con esta Figura se puede analizar el rendimiento entre cuencas que pertenezcan a la misma región o similares en altitud media y/o en pendiente ponderada. Este resultado, se convierte en una herramienta para proyectos que requieran el conocimiento del rendimiento de caudales o el caudal máximo a un período de retorno determinado. Los datos con que se elaboró la Figura 10.16 se encuentran en el Anexo F.

Cabe resaltar que las curvas obtenidas en la Figura 10.16 no son comparables con las curvas envolventes realizadas por Lowry y Creager debido a que no se han construido con el ajuste de los coeficientes mundiales (3500 y 100 respectivamente). Por tal razón,

se procedió a realizar las determinaciones teniendo en cuenta las anteriores consideraciones.

Figura 10.16 Curvas envolventes de la región Andina del Departamento del Cauca en diferentes períodos de retorno sin tener en cuenta los coeficientes mundiales de Lowry y Creager



10.7 AJUSTES DE LAS ECUACIONES DE LOWRY Y CREAGER PARA LA REGIÓN DE ESTUDIO

Después de conocer el área de drenaje aferente a cada estación y los caudales máximos unitarios corregidos por variabilidad climática tal como se presenta en la Tabla 10.17, se procedió a realizar los ajustes de las ecuaciones de Lowry y Creager, es decir, se encontraron los parámetros empíricos que definen cada formulación de envolvente, C_L para la envolvente de Lowry y C_C para la envolvente de Creager. Para el cálculo de los coeficientes de ajuste de las curvas envolventes se siguió un

procedimiento que consistió en despejar de las Ecuaciones (8.5) y (8.6) tales coeficientes, posteriormente se sustituyó en las expresiones el caudal unitario para cada tiempo de retorno y en el caudal unitario de los caudales medios de los máximos de cada estación de aforos (limnimétrica o limnigráfica) y el área de la cuenca. De este modo, se seleccionó para cada caso el mayor coeficiente entre las 30 estaciones de medición y el resultado se observa en las Tablas 10.18 y 10.19.

Tabla 10.17 Caudales máximos por unidad de área (q) para diferentes períodos de retorno ($m^3/s/Km^2$)

ESTACIÓN	ÁREA (Km2)	q máx	q máx Tr 5	q máx Tr 10	q máx Tr 15	q máx Tr 20	q máx Tr 25	q máx Tr 50
SAN RAFAEL	20	0,1110	0,3049	0,3685	0,4105	0,4430	0,4698	0,5640
CANAL PALO	24	0,2717	0,3132	0,3198	0,3236	0,3263	0,3284	0,3349
PTE CARR - 26027220	30	0,0937	0,3524	0,4655	0,5454	0,6098	0,6647	0,8688
LOMA REDONDA	42	0,0517	0,1700	0,2386	0,2899	0,3327	0,3704	0,5176
TOTORO	43	0,0760	0,2863	0,3902	0,4648	0,5253	0,5773	0,7721
BUENOS AIRES	44	0,3014	0,5695	0,6245	0,6578	0,6822	0,7016	0,7651
PALETARA	47	0,1555	0,5690	0,6834	0,7586	0,8166	0,8645	1,0318
MALVASA	50	0,1946	0,6099	0,7485	0,8403	0,9113	0,9701	1,1762
PTE CARR - 26017040	54	0,2089	0,3856	0,4422	0,4780	0,5048	0,5266	0,6000
LOMITAS	70	0,3724	1,0387	1,4270	1,7074	1,9361	2,1329	2,8752
PAPAS	73	0,1282	1,0619	1,3080	1,4771	1,6111	1,7243	2,1371
PTE CARR - 26037030	98	0,1922	0,6948	0,9124	1,0655	1,1884	1,2932	1,6809
JULUMITO	122	0,6464	1,3533	1,5745	1,7150	1,8209	1,9070	2,1986
PTE ARAGON	127	0,2639	0,6950	0,8418	0,9379	1,0117	1,0724	1,2834
EL CORTIJO	146	0,1510	0,3834	0,4784	0,5422	0,5920	0,6335	0,7807
PTE FERROCARRIL	152	0,2248	0,8511	1,2153	1,4870	1,7132	1,9110	2,6788
BOC SAJANDI	196	0,1765	0,6860	0,8915	1,0336	1,1463	1,2415	1,5874
PTE CARR - 26027100	278	0,1186	0,2888	0,3494	0,3891	0,4195	0,4446	0,5317
EL TREBOL	333	0,1655	0,3149	0,3356	0,3479	0,3569	0,3640	0,3870
BOC RIO PALO	334	0,1757	0,5486	0,7171	0,8342	0,9275	1,0065	1,2947
EL HOYO	383	0,2426	0,8885	1,1010	1,2487	1,3668	1,4672	1,8383
BOCATOMA	413	0,2546	0,7145	0,8893	1,0063	1,0974	1,1731	1,4410
CURIACO	446	0,1575	0,4305	0,5323	0,6006	0,6537	0,6979	0,8546
LA PLAYA	645	0,0909	0,3141	0,3931	0,4479	0,4917	0,5289	0,6654
SANTA ROSA	669	0,2282	0,5606	0,6541	0,7137	0,7588	0,7955	0,9203
PTE CARR - 52017080	798	0,0454	0,1489	0,2151	0,2653	0,3074	0,3445	0,4906
PTE COLGANTE	1409	0,0789	0,2485	0,3088	0,3491	0,3806	0,4068	0,4998
LA FONDA	2478	0,1001	0,3148	0,3783	0,4199	0,4518	0,4780	0,5694
PTE RICAURTE	2778	0,1106	0,2757	0,3334	0,3714	0,4007	0,4248	0,5094
LA SALVAJINA	5340	0,0576	0,1288	0,1504	0,1643	0,1748	0,1833	0,2125

Tabla 10.18 Coeficiente de Lowry

Cl	
q máx	100,9911
q máx Tr 5	262,8676
q máx Tr 10	315,8952
q máx Tr 15	350,5841
q máx Tr 20	377,2096
q máx Tr 25	399,1450
q máx Tr 50	475,4271
q máx Tr 100	625,1590

Tabla 10.19 Coeficiente de Creager

Cc	
q máx	3,4555
q máx Tr 5	7,7693
q máx Tr 10	9,6277
q máx Tr 15	10,9197
q máx Tr 20	11,9526
q máx Tr 25	12,8306
q máx Tr 50	16,0755
q máx Tr 100	21,9053

En consecuencia, con estos coeficientes se generaron las envolventes para la región Andina del Departamento del Cauca. Los resultados se aprecian en las Figuras 10.17 a 10.24.

Se observa además, que en la Figura 10.17 se puede visualizar la envolvente de caudales máximos unitarios para la Región Andina del Departamento del Cauca. En ésta, a partir del área de drenaje es posible encontrar el caudal máximo correspondiente. El dato entregado por la Figura 10.17, es válido para estimación del caudal máximo promedio de las estaciones de aforo, sin asociarlos a algún periodo de retorno.

En las Figuras 10.18 a 10.24, se pueden observar los caudales máximos unitarios asociados a períodos de retorno de 5, 10, 15, 20, 25 ,50 y 100 años, respectivamente.

Figura 10.17 Envoltente de caudales máximos unitarios a partir de datos medios en estaciones de aforo para la región Andina del Departamento del Cauca

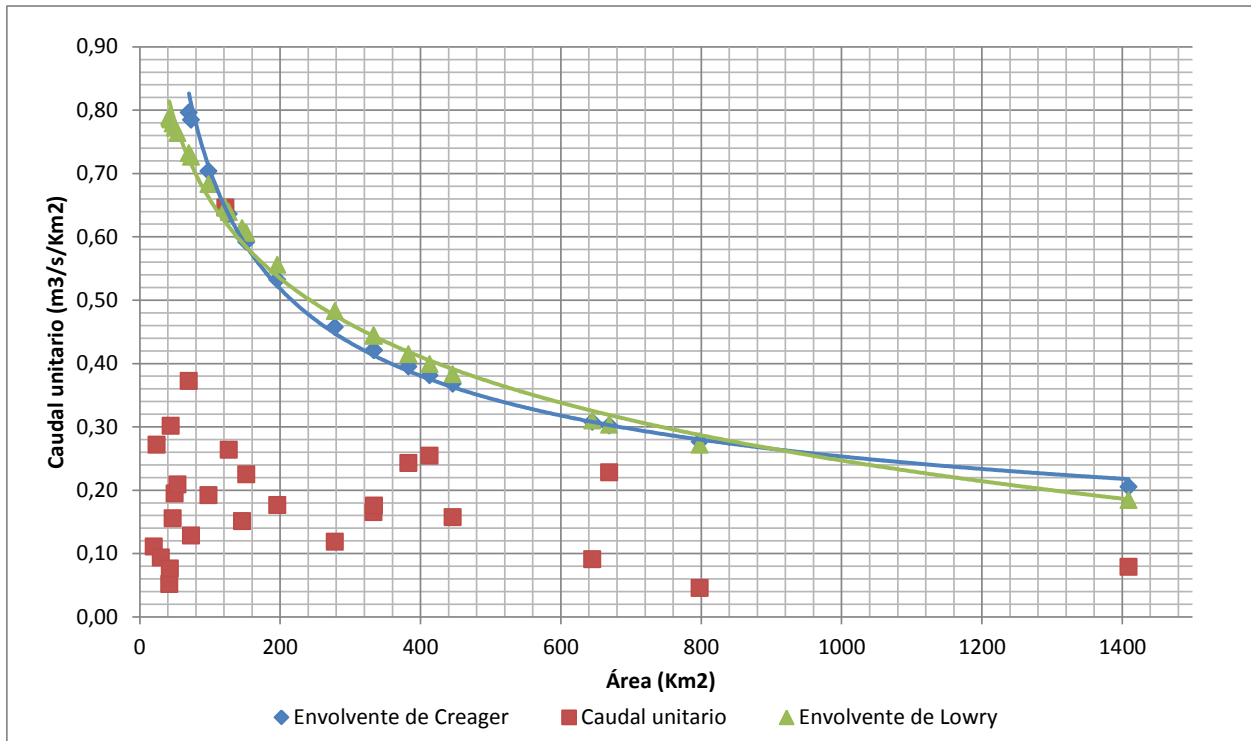


Figura 10.18 Envoltente de caudales máximos unitarios con periodo de retorno de 5 años para la región Andina del Departamento del Cauca

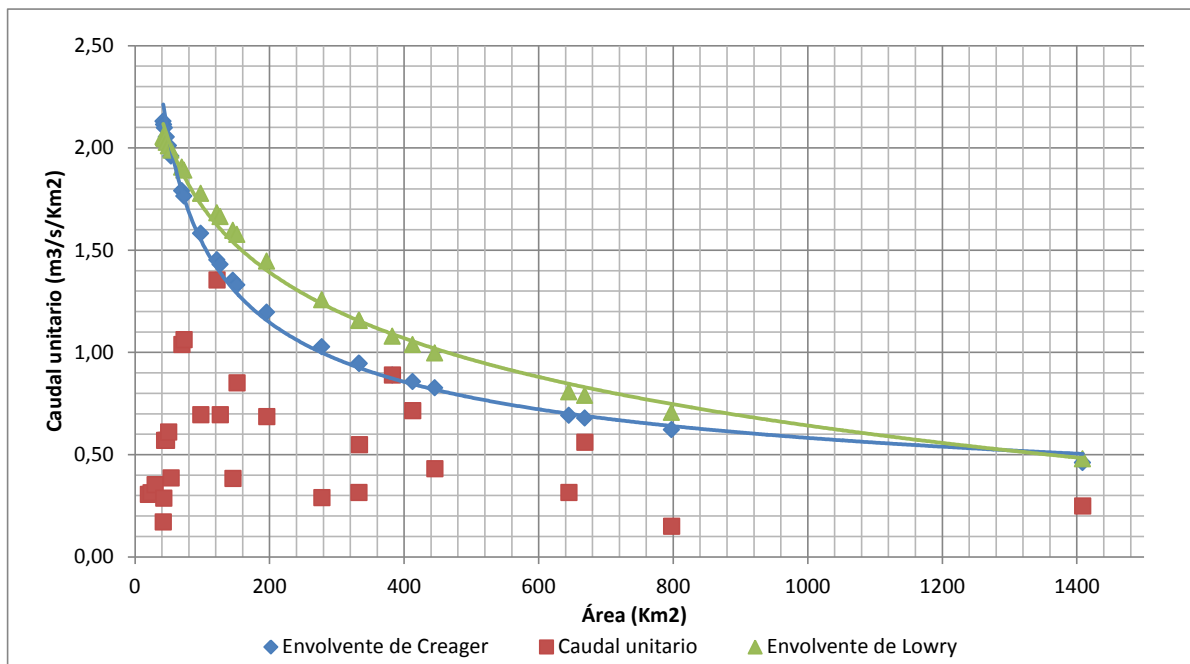


Figura 10.19 Envoltente de caudales máximos unitarios con periodo de retorno de 10 años para la región Andina del Departamento del Cauca

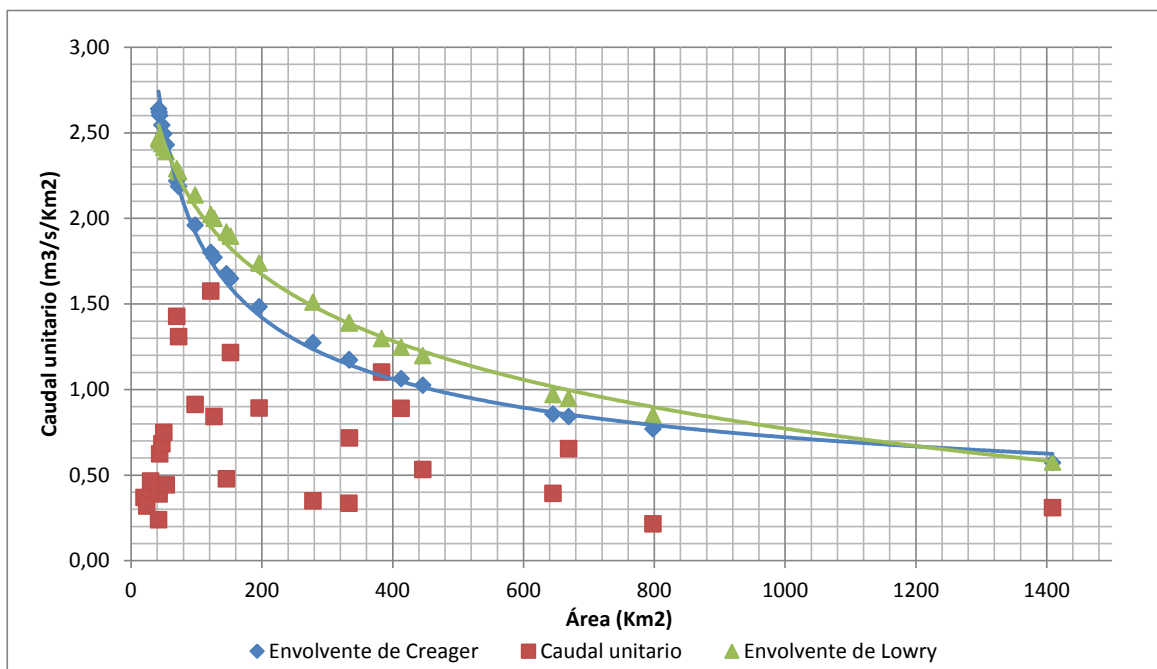


Figura 10.20 Envoltente de caudales máximos unitarios con periodo de retorno de 15 años para la región Andina del Departamento del Cauca

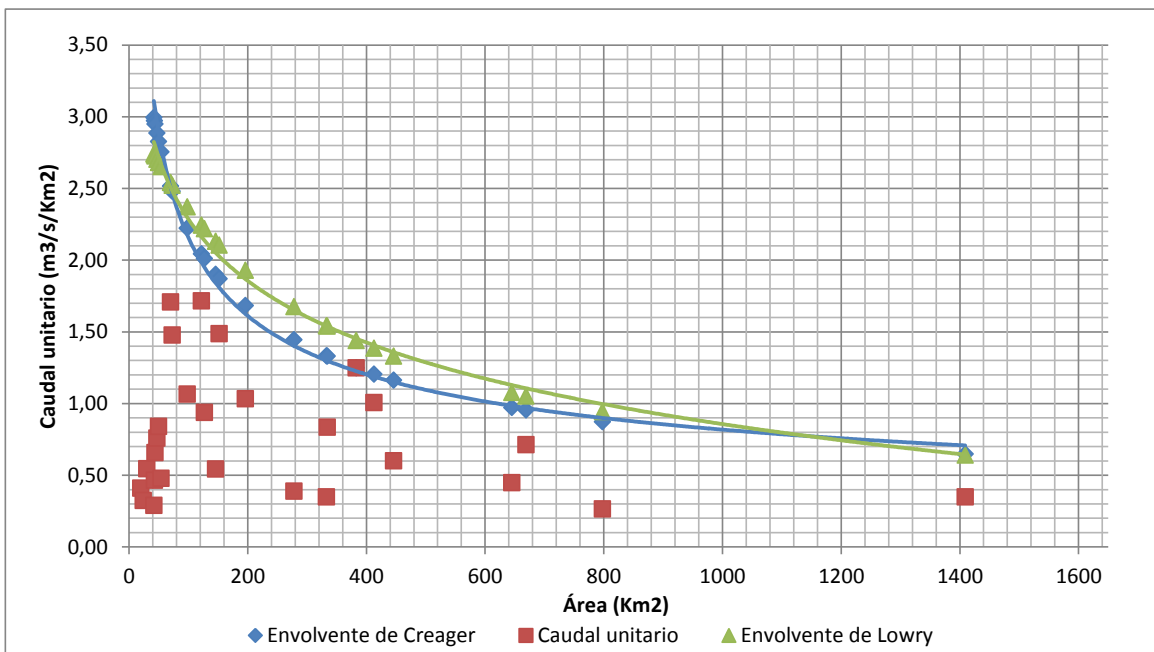


Figura 10.21 Envoltente de caudales máximos unitarios con periodo de retorno de 20 años para la región Andina del Departamento del Cauca

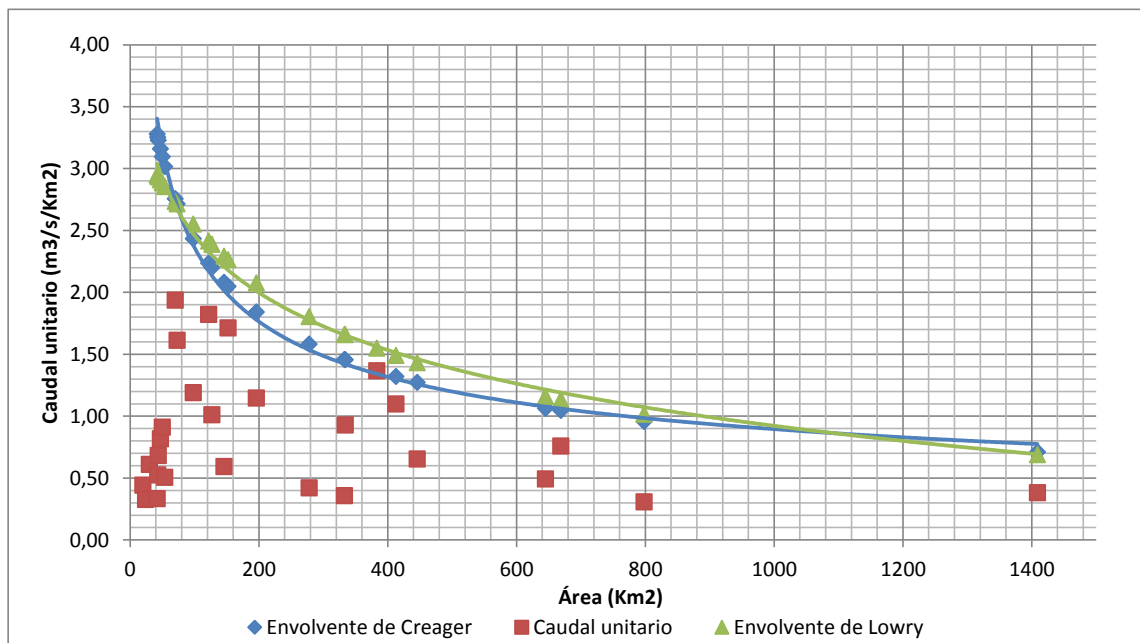


Figura 10.22 Envoltente de caudales máximos unitarios con periodo de retorno de 25 años para la región Andina del Departamento del Cauca

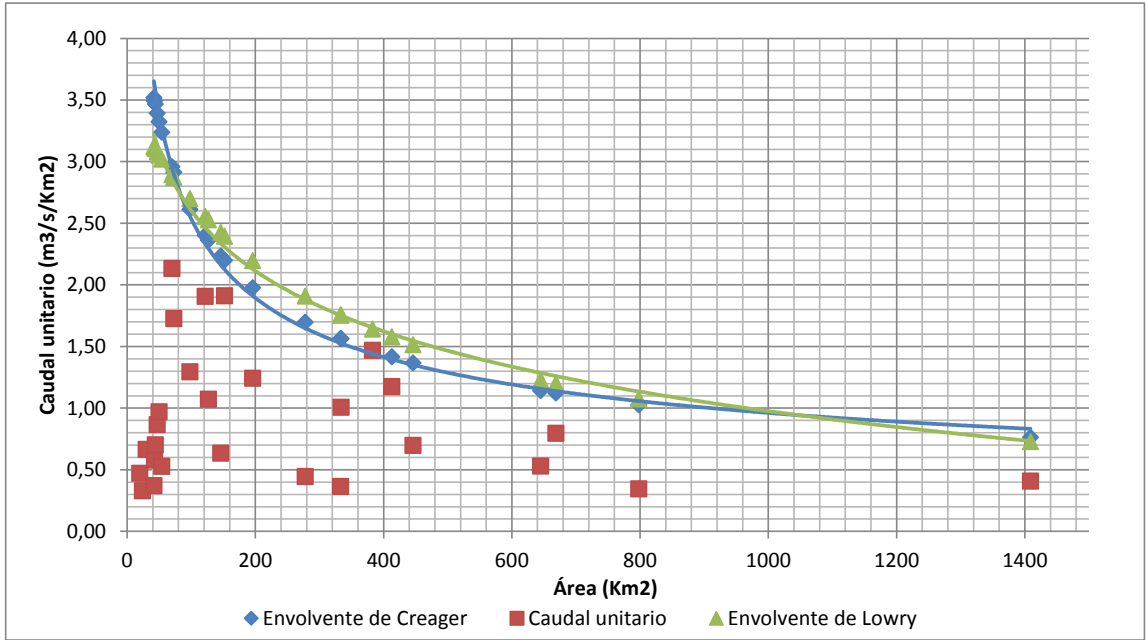


Figura 10.23 Envoltente de caudales máximos unitarios con periodo de retorno de 50 años para la región Andina del Departamento del Cauca

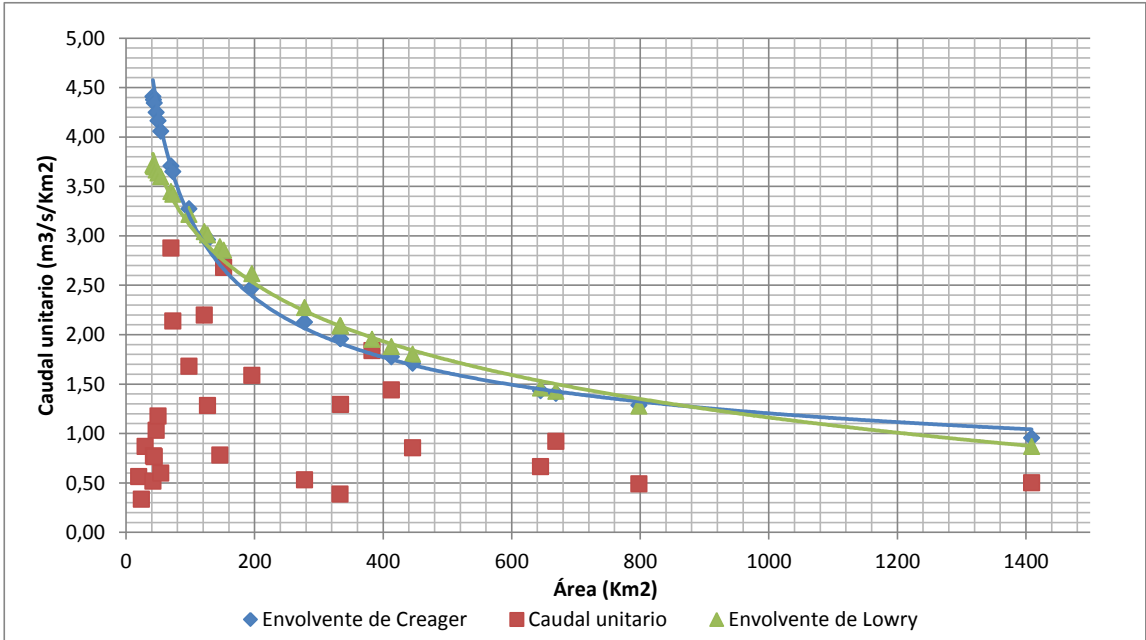
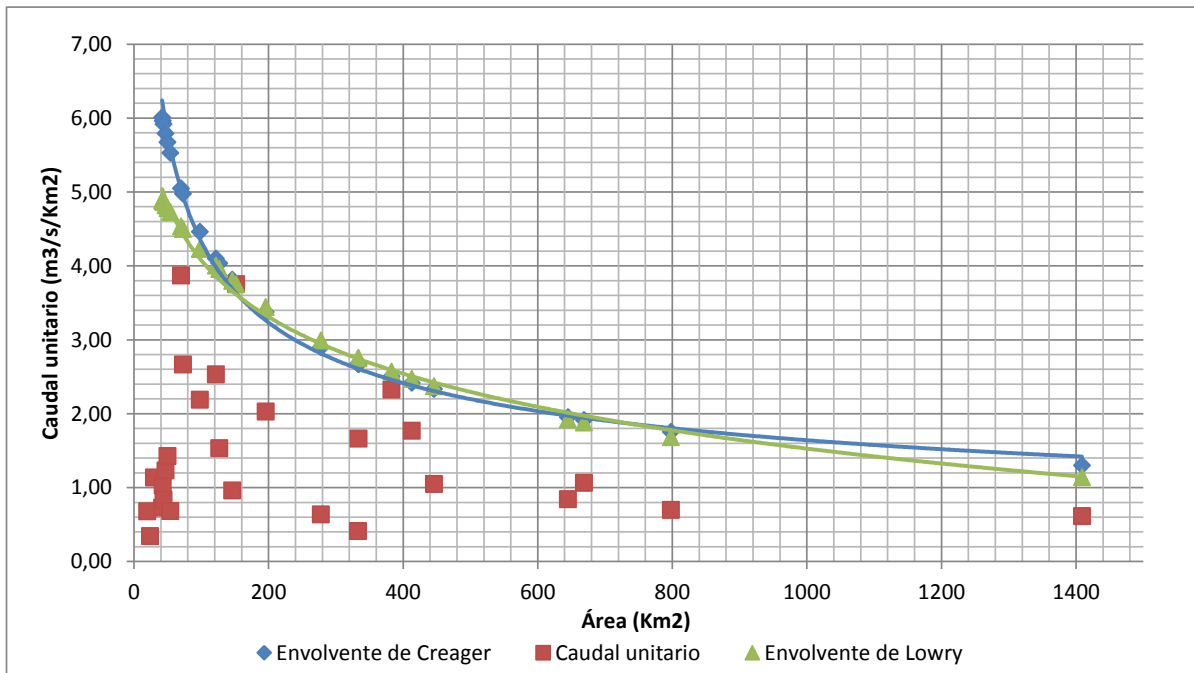


Figura 10.24 Envoltente de caudales máximos unitarios con periodo de retorno de 100 años para la región Andina del Departamento del Cauca



Finalmente para el análisis de las Figuras 10.17 a 10.24 se pudo verificar que la envoltente de caudales unitarios cubre en su totalidad los puntos en el gráfico, tal como se observó en las Figuras 10.15 y 10.16. La diferencia encontrada al realizar las envoltentes con la corrección de coeficientes de Creager y Lowry, Figuras 10.18 a 10.24 es que en éstas se acentúan los caudales altos para menores áreas, mientras que en las Figuras 10.15 y 10.16, se presenta una disminución proporcional del caudal unitario respecto al área.

Por otro lado en las Figuras 10.18 a 10.24, se observa un incremento del caudal unitario a medida que aumentan los tiempos de retorno, es decir que el rendimiento de las cuencas crece significativamente proporcionalmente al tiempo de retorno.

Una forma sencilla para validar las curvas envoltentes que se han construido, es asumir al azar un área de cuenca y encontrar su caudal unitario máximo para un periodo de retorno determinado. Para ello se tomó como ejemplo un área de 300 km² y un periodo de retorno de 20 años, al buscar este valor en la Figura 10.16 se obtiene un

caudal unitario máximo de $1.50 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$, repitiendo este proceso pero con la Figura 10.21 que corresponde un periodo de 20 años se obtuvo que el caudal unitario máximo en la envolvente de Lowry es de $1.70 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ y para Creager es de $1.50 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$. Como se observa, el resultado obtenido en la Figura 10.16 es igual al de la Figura 10.21 para el caso de Creager, en el caso de Lowry este da mayor; no obstante los resultados son similares. En este sentido los resultados obtenidos en esta investigación sirven para encontrar de manera directa y rápida el caudal máximo dentro de las cuencas de la región Andina del Departamento del Cauca y cuyos periodos de retorno sean 5, 10, 15, 20, 25, 50 o 100 años, conociendo solo el área de drenaje.

11. CONCLUSIONES

- Se seleccionaron 30 estaciones de aforo (20 limnigráficas y 10 limnimétricas), con influencia en la región andina del Departamento del Cauca. Estas estaciones se utilizaron para determinar las curvas regionales de caudales máximos, a diferentes períodos de retorno.
- Se evidenció la incidencia que tiene la variabilidad climática en el comportamiento de los caudales máximos. En el análisis estadístico se confirmó que empleando funciones de distribución de probabilidad mixta (para este caso Fréchet), para involucrar la variabilidad climática, se aprecia un aumento significativo en los caudales máximos respecto a los datos que se obtienen si se utilizan funciones de distribución de probabilidad simples o tradicionales.
- Dentro del análisis expuesto es posible vislumbrar que las áreas aferentes de las cuencas hidrográficas seleccionadas para la región Andina del Departamento del Cauca, tienen aparente similitud y en su mayoría se manejan dentro de un rango de 20 a 1000 Km².
- Las curvas envolventes de caudales máximos, para diferentes períodos de retorno en cuencas no instrumentadas, sirven para determinar el caudal máximo de diseño o el rendimiento máximo del área considerada, conociendo solo el área aferente de drenaje de la cuenca hidrológica, hasta un punto determinado.
- Finalmente, al realizar una prueba de los resultados, se pudo comprobar que las curvas envolventes generadas en la investigación son aceptadas para encontrar de manera directa y rápida, el caudal máximo dentro de las cuencas de la región Andina del Departamento del Cauca y cuyo períodos de retorno sea de 5, 10, 15, 20, 25, 50 o 100 años, conociendo sólo el área de drenaje aferente.

12.RECOMENDACIONES

- Se recomienda considerar para el diseño de obras civiles, la incidencia que tiene el fenómeno del ENSO, debido a que se mejoran las estimaciones, aproximándose más a la realidad del sistema y obteniendo resultados más precisos.
- Para precisar más esta investigación, es recomendable en futuros trabajos, tener en cuenta para la selección de las cuencas a procesar, que éstas se clasifiquen por rangos de altitud media y pendiente media ponderada, con lo cual se tendrá una homogeneidad adecuada en las curvas envolventes a encontrar.
- Se aconseja que las entidades encargadas del funcionamiento de las estaciones de aforo, realicen mantenimientos preventivos a los equipos de medición y monitoreo, además de capacitar al personal encargado de la recolección de datos para así garantizar la calidad y confiabilidad de los registros.

REFERENCIAS

CAHUANA, A. y YUGAR, W. (2009). Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV – 233.

CAMPOS, D. (2011). Estimación de envolventes de diseño por subregiones hidrológicas. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222011000400012 [Consultado el 4 de Diciembre de 2017].

CARVAJAL, Y., *et al.* (1997). Efectos del fenómeno del Niño en la disponibilidad hídrica y su impacto en la agricultura del país.

CASTILLO, C. y ORTIZ, N. (2017). Regionalización de caudales máximos en la cuenca del río Sinú por medio del método estadístico índice de creciente. [En línea]. Disponible en: <http://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2906/Castillocristina2016.pdf?sequence=1> [Consultado el 22 de Noviembre de 2017].

CONSORCIO ESTRUCTURACIÓN VIAL - CEV. (2014). Curvas de regionalización de caudales máximos [En línea]. Disponible en: <ftp://ftp.ani.gov.co/Tercera%20Ola/Sogamoso%20Aguazul%20Mani/B/BII/BII3/Anexo%203.8/Anexo%203.8%20Curvas%20de%20regionalizacion.pdf> [consultado el 21 de Noviembre de 2017].

CUELLAR, Y. (2012). Apoyo técnico a la fundación pro cuenca río Las Piedras en el diagnóstico y formulación de estrategias para la gestión del recurso hídrico en la vereda Santa Elena – subcuenca río Molino – Municipio Popayán.

CHOW, V. T., MAIDMENT, D. & MAYS, L. (1994). Hidrología aplicada. Bogotá: Mc Graw Hill.

CREAGER, W.P., JUSTIN, J.D. & HINDS, J. (1945). Engineering for dams, general desing. New York: Jhon Wiley Sons.

HIRSCHBOECK, K. *et al.* (2000). Hydroclimatology of Meteorologic Floods. Stanford, Cambridge University Press

HOSKING, J. & WALLIS, J. (1997). Regional frequency analysis, New York: Cambridge University Press.

INVIAS. (2009). Periodos de retorno de diseño en obras de drenaje vial.

MARTINEZ, D. (2005). Identificación de modelos estadísticos para la regionalización de caudales máximos de la cuenca Magdalena – Cauca.

ORDOÑEZ, H. (2014). Estadística II “Prueba Chi - Cuadrado o bondad de ajuste”, Universidad Nacional de Colombia.

PEKAROVA, P..*et al.* (2003). Spatial and temporal runoff oscillation analysis of the main rivers of the world during the 19th and 20th centuries. Journal of Hydrology, 274, 62–79.

POVEDA, G. y ALVAREZ, D. (2012). El colapso de la hipótesis de estacionariedad por cambio y variabilidad climática: implicaciones para el diseño hidrológico en ingeniería.

[En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n36/n36a13.pdf> [Consultado el 28 de Noviembre de 2017].

QUIMBAYO, L. y MOLINA, Y. (2015). Análisis y comparación del cálculo de caudales máximos mediante aplicación de los métodos racional y estadístico para diferentes estaciones hidrometeorológicas en Colombia.

RAMÍREZ, A. y GÓMEZ, J. (2005) Actualización de las envolventes regionales de gastos máximos para la república mexicana. 99-108.

RAMOS, R. (2016). Apoyo al proyecto “Información climática al alcance de las agriculturas de la cuenca alta del río Cauca, en el mantenimiento de las instalaciones climatológicas y análisis del fenómeno El Niño MODOKI”.

SAGARPA. (2012). Hidrología aplicada a las pequeñas obras hidráulicas [En línea]. Disponible en: http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Documents/FICHAS%20TECNICAS%20E%20INSTRUCTIVOS%20NAVA/INSTRUCTIVO_HIDROLOG%20C3%8DA.pdf [Consultado el 21 de Noviembre de 2017].

VÁSQUEZ, F. y CUEVAS, V. (2016). Cálculo de envolventes para caudales máximos instantáneos asociados a periodos de retorno.

VILLÓN, M. B. (2002). Cálculos hidrológicos e hidráulicos en cuencas hidrográficas.

ZUÑIGA, V. y VIQUEZ, H. (2011). Análisis de la oferta hídrica de la subcuenca del río Las Piedras y su afectación por el fenómeno El Niño.

ZUCARELLI, G. y HAMMERLY, M. (2013). Determinación de curvas envolventes de caudales máximos observados y esperados para la República de Argentina [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3535/353531981010.pdf> [Consultado el 28 de Diciembre de 2018].