



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS PARA LA VERTIENTE
DEL PACÍFICO DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA**

Sammy Francisco Hernández Aviles

Asesorado por el Ing. Sergio Antonio López Dubón

Guatemala, noviembre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS PARA LA VERTIENTE
DEL PACÍFICO DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

SAMMY FRANCISCO HERNÁNDEZ AVILES

ASESORADO POR EL ING. SERGIO ANTONIO LÓPEZ DUBÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian De León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Juan Ramón Ordoñez Hernández
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. José Fernando Samayoa Roldán
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS PARA LA VERTIENTE DEL PACÍFICO DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 5 de junio de 2014.

Sammy Francisco Hernández Aviles

Guatemala, 17 de septiembre de 2014

A quien interese:

Por medio de la presente informo que he procedido a revisar el trabajo de graduación elaborado por el estudiante Sammy Francisco Hernández Aviles con número de carné 2008 19128 de la carrera de Ingeniería Civil, cuyo título es **“REGIONALIZACION DE CRECIDAS MAXIMAS PARA LA VERTIENTE DEL PACIFICO DE LA REPUBLICA DE GUATEMALA”**, considero que el trabajo presentado por el estudiante ha sido desarrollado cumpliendo con los reglamentos y siguiendo las recomendaciones de asesoría, por lo tanto, he **APROBADO** dicho trabajo.

Sin otro particular me suscribo.



Sergio Antonio López Dubón
Ingeniero Civil
Col. No. 9914

Ing. Sergio Antonio López Dubón

Colegiado 9914

Asesor



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
17 de octubre de 2016

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS PARA LA VERTIENTE DEL PACÍFICO DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Sammy Francisco Hernández Aviles, quien contó con la asesoría del Ing. Sergio Antonio López Dubón.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y representa un aporte para el departamento y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

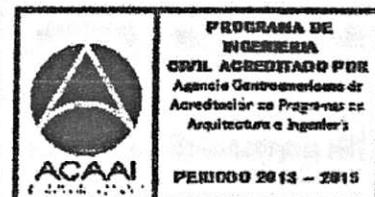
ID Y ENSEÑADA A TODOS

Ing. Claudio César Castañón Contreras
Jefe del Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

/bbdeb.
Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Sergio Antonio López Dubón y del Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Claudio César Castañón Contreras, al trabajo de graduación del estudiante Sammy Francisco Hernández Aviles, titulado **REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS MÁXIMAS PARA LA VERTIENTE DEL PACIFICO DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre 2016
/mrrm.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
de Guatemala

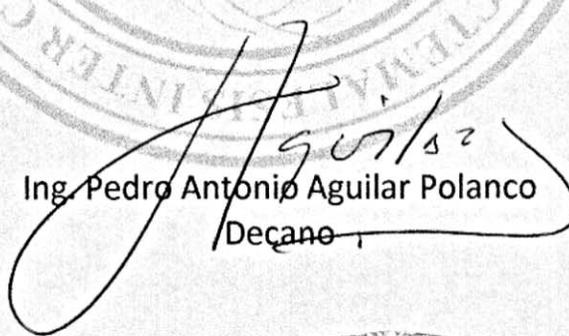


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 582.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS PARA LA VERTIENTE DEL PACÍFICO DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Sammy Francisco Hernández Aviles**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, noviembre de 2016

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme la vida, por llenarme de bendiciones y darme la oportunidad de lograr grandes cosas.
Mis padres	Samuel Hernández y Olga Aviles. Su amor será siempre mi inspiración.
Mis hermanos	Claudia, José, Fabricio y Erick Hernández Aviles. Por el apoyo que me brindan día a día.
Mis sobrinos	Julián y Héctor Álvarez, María Fernanda y Fabián Hernández, Marielos Álvarez, Diana y Viviana Aviles, por ser ángeles en mi vida.
Mi novia	Alba Nájera, por ser una bendición en mi vida y ayudarme a ser mejor persona.
Mis amigos	Larissa Melgar, Paloma Méndez, Kate Castillo, Erick Rodas, Josué García, Eddy Guzmán, Jacobo García, Cristian Marroquín, Alexis Mártir, Abner Orozco, Nelson Rivera, Efraín Villela, Ricardo Pérez, Leonel Morán, Guilmar Flores, Daniel Alemán, por ser una importante influencia en mi carrera, entre otras cosas.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser el lugar donde inicia la etapa más importante de mi vida.

Facultad de Ingeniería

Por ser el lugar donde adquirí los conocimientos necesarios para desarrollar mi vida profesional.

Mis catedráticos

Por el apoyo en diversos problemas y compartir sus conocimientos y experiencias conmigo, en especial a los ingenieros Alejandro Castañón y Mario Corzo, por ser un ejemplo de ética profesional.

Mi asesor de tesis

Ingeniero Sergio López, por el apoyo y conocimiento brindado para realizar el presente trabajo de graduación.

Mis compañeros

Por influenciarme para bien a lo largo de la carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Hidrología en Guatemala.....	1
1.2. Cuenca como unidad de análisis.....	2
1.3. División hidrológica de Guatemala	3
1.3.1. Vertiente del Pacífico.....	3
1.3.2. Vertiente del Atlántico.....	4
1.3.3. Vertiente del golfo de México.....	5
2. ESTUDIO DE CRECIDAS	7
2.1. Estudio de crecidas	7
2.2. Particularidades y tipos de crecidas	8
2.2.1. Crecida periódica.....	8
2.2.2. Crecidas excepcionales.....	9
3. ANÁLISIS REGIONAL.....	11
3.1. Caudal índice.....	12
3.2. Análisis de frecuencia en la regionalización de caudales	14

3.3.	Análisis regional por método de los trazos multidimensionales.....	15
3.4.	Técnica de las estaciones-año.....	17
4.	CONCEPTOS PROBABILÍSTICOS EN EL ANÁLISIS DE CRECIDAS ..	19
4.1.	Series.....	19
4.2.	Probabilidad	20
4.3.	Probabilidad empírica.....	20
4.4.	Período de retorno	21
4.5.	Parámetros estadísticos.....	21
4.5.1.	Media.....	22
4.5.2.	Varianza	22
4.5.3.	Coeficiente de asimetría.....	23
4.6.	Distribuciones de probabilidades utilizadas en hidrología	23
4.6.1.	Distribución normal.....	24
4.6.2.	Distribución Log Normal de dos parámetros	25
4.6.3.	Distribución de Gumbel o extrema tipo I.....	27
4.6.4.	Distribución de <i>Pearson</i> Tipo III	28
4.7.	Prueba de valores atípicos (<i>Outliers</i>)	29
4.8.	Envolvente regional.....	32
5.	ANÁLISIS REGIONAL DE CRECIDAS MÁXIMAS PARA LA VERTIENTE DEL PACÍFICO DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA.....	35
5.1.	Antecedentes de análisis regional de crecidas para la República de Guatemala.....	35
5.1.1.	Región I: Altiplano occidental	36
5.1.2.	Región II: Pacífico suroriental.....	36
5.1.3.	Región III: Pacífico suroriental.....	37
5.1.4.	Región IV: Altiplano oriental	37

5.1.5.	Región V: Motagua	38
5.1.6.	Región VI: Polochic–Cahabón y Bajo Motagua	38
5.1.7.	Región VII: Planicie del Petén	38
5.1.8.	Región VIII: noroccidental.....	39
6.	ANÁLISIS DE FRECUENCIA REGIONAL.....	41
6.1.	Análisis por medio del método de los trazos multidimensionales	41
6.1.1.	Regiones homogéneas.....	43
6.2.	Método de las estaciones-año.....	57
6.3.	Caudales modulares.....	58
6.3.1.	Caudal índice QMM	63
6.3.2.	Determinación de Q_{Tr}	66
6.4.	Modelos de regionalización	80
6.5.	Región 1	80
6.6.	Región 2	81
6.7.	Región 3	82
6.8.	Región 4	83
6.9.	Modelos matemáticos.....	83
6.10.	Comparación de error promedio entre el error por medio de análisis regional y el error promedio por medio de modelo matemático	118
6.11.	Uso de los resultados de los análisis.....	118
	CONCLUSIONES	121
	RECOMENDACIONES.....	123
	BIBLIOGRAFÍA.....	125
	APÉNDICES	127

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Mapa de cuencas hidrográficas de Guatemala	6
2.	Regiones hidrológicas de la República de Guatemala	40
3.	Región I (amarillo) – t=2 años	46
4.	Región II (rojo) – t=2 años.....	46
5.	Región III (verde) – t=2 años.....	47
6.	Región IV (gris) – t=2 años	47
7.	Región I (amarillo) – t=10 años	49
8.	Región II (rojo) – t=10 años.....	49
9.	Región III (verde) – t=10 años.....	50
10.	Región IV (gris) – t=10 años.....	50
11.	Región I (amarillo) – t=25 años	51
12.	Región II (rojo) – t=25 años.....	52
13.	Región III (verde) – t=25 años.....	52
14.	Región IV (gris) – t=25 años.....	53
15.	Región I (amarillo) – t=50 años	54
16.	Región IV (rojo) – t=50 años	55
17.	Región III (verde) –t=50 años.....	55
18.	Región III (verde) – t=50 años.....	56

TABLAS

I.	Cuencas de la vertiente del Pacífico	4
II.	Cuencas de la vertiente del Caribe	5

III.	Cuencas de la vertiente del golfo de México.....	6
IV.	Valores de Kn para datos dudosos	31
V.	Distribuciones de probabilidades utilizadas en hidrología.....	32
VI.	Estaciones hidrométricas	42
VII.	Crecidas máximas para periodos de retorno	44
VIII.	Valores de los trazos multidimensionales, basado en Ec. 30	45
IX.	Cuencas: La Gomera, Cantel II y Melendrez II	48
X.	Valores de los trazos multidimensionales (25 años)	51
XI.	Valores de los trazos multidimensionales (50 años)	54
XII.	Regiones homogéneas	57
XIII.	Caudales máximos anuales	59
XIV.	Caudales modulares	61
XV.	Parámetros estadísticos.....	63
XVI.	Coeficientes regionales de ajuste para análisis de máximos (k).....	64
XVII.	Tablas de error promedio por método estadístico.....	67
XVIII.	Tabla de propiedades morfométricas Región 1	80
XIX.	Tabla de propiedades morfométricas Región 2	81
XX.	Tabla de propiedades morfométricas Región 3	82
XXI.	Tabla de propiedades morfométricas Región 4	83
XXII.	Propiedades morfométricas	84
XXIII.	Caudales medios y caudales determinados por modelo matemático	86
XXIV.	Error promedio con caudales generados por modelo matemático	87
XXV.	Error promedio por medio de análisis regional.....	118
XXVI.	Error promedio por medio de modelos matemáticos	118

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Bank Sta	Banco de marca
Q	Caudal
hr	Hora
km	Kilómetro
Km²	Kilómetro cuadrado
lts	Litros
mts, m	Metros
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cúbico
Msnm	Metros sobre el nivel del mar
mg	Miligramos
mm	Milímetros
WS	Nivel de agua
Ground	Nivel de suelo
Seg, s	Segundo

GLOSARIO

Afluencia	Acción y efecto de una corriente que vierte sus aguas en la de otra corriente, a un lago o a otro cuerpo de agua.
Afluente	Río tributario de otro.
Aforo	Proceso y arte de medir las alturas, áreas, velocidades y caudales en los ríos.
Agua freática	Sinónimo de agua subterránea.
Agua subterránea	Agua del suelo que se encuentra en la zona de saturación y que alimenta pozos, manantiales y escorrentía subterránea.
Agua superficial	Agua sobre la superficie del suelo.
Aguas abajo	Dirección en el sentido de la corriente.
Aguas arriba	Dirección en el sentido contrario de la corriente
Año hidrológico	División anual que principia en el mes en el que se considera que empieza la época de lluvias o invierno en los diferentes países. En el caso de Guatemala,

el año hidrológico inicia el 1 de mayo y finaliza el 30 de abril del año siguiente.

Balance hidrológico	Balance de la entrada, salida y contenido de agua en una unidad hidrológica como por ejemplo una cuenca de desagüe, un lago, un embalse, un sistema de regadío, una napa freática o una zona determinada del subsuelo.
Banco	Banco de arena o lodo que se forma en una corriente.
Cauce	Conducto abierto, creado natural o artificialmente, el cual contiene agua en movimiento periódico o continuamente.
Caudal	Magnitud del flujo de una corriente en un lugar determinado de su curso, o del flujo que mana de una fuente. Se mide por el volumen de agua que en la unidad de tiempo pasa por la sección transversal de la corriente o es vertida por la fuente. En un río el caudal suele expresarse en metros cúbicos por segundo.
Caudal medio	Media aritmética de los caudales de todos los años hidrológicos completos registrados, sean o no consecutivos. Generalmente, solo se publican los caudales medios cuando el número de años es igual o mayor de cinco.

CCAD	Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo.
Ciclo hidrológico	Circulación del agua desde el mar a la tierra y desde esta de nuevo al mar. Los circuitos secundarios se refieren a la circulación entre la tierra y la atmósfera mediante los procesos de precipitación, evaporación y transpiración.
CONRED	Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres.
Corriente	Término general para definir la masa de agua que fluye en un cauce natural o artificial.
Crecida	Flujo relativamente alto de una corriente.
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno.
DQO	Demanda química de oxígeno.
Estación de aforos	Estación para la medida regular del caudal de una corriente.
Estación hidrológica	En un más amplio sentido esta denominación incluye y tanto a las estaciones fluviométricas como a las estaciones limnimétricas, no obstante, casi siempre, la denominación hidrológica es sinónima de fluviométrica.

Hidrología	Es la ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos.
ICTA	Instituto de Ciencia y tecnología Agrícola.
IGN	Instituto Geográfico Nacional.
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.
Precipitación	Agua meteórica que cae en la superficie terrestre.
Reservorio	Estanque, lago o cuenca, natural o artificial, para la conservación, regulación y control de agua.
Río	Corriente de agua superficial que va a desembocar a un lago o al mar.
Sección de aforos	Sección transversal de una corriente donde se mide el caudal.

Sedimentos	Materiales fragmentarios originados por la acción de los elementos atmosféricos en las rocas y que es transportado, en estado de suspensión, por el agua o el viento, o que es depositado por estos dos agentes naturales, o acumulado por otros, en los lechos de las corrientes.
Temporal	En hidrología suele emplearse para designar un período de lluvias persistentes y generales.
Terraza	Parte relativamente llana, en un valle, situada a cierta altura de la llanura de inundación, de la que formó parte en otras edades.
Tributario	Cauce que vierte sus aguas a otro cauce de orden superior.
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i> (sistema de coordenadas).
Volumen de escorrentía	Volumen de agua que desagua a lo largo de la superficie del suelo durante y después de la precipitación.
Zona de inundación	Tierras que bordean un río y que están sujetas a inundaciones con una frecuencia parecida.

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de la aplicación de un conjunto de técnicas tendientes a definir un criterio de regionalización de crecidas para cuencas en la vertiente del Pacífico de la República de Guatemala. Las regiones hidrológicas homogéneas se delimitaron inicialmente mediante un criterio de base geográfica e hidrológica y aplicando el método de los trazos multidimensionales, a partir del cual se segmentó a la vertiente en cuatro regiones homogéneas.

Luego se conformó una compilación de información hidrométrica (caudales líquidos máximos medios anuales para once sitios) con base a las estaciones de aforo emplazadas en el país. Seguidamente, se determinaron las ecuaciones que relacionan el área con el caudal índice para cada una de las regiones. Es de importancia mencionar que para las cuatro ecuaciones obtenidas se obtuvo muy buenos coeficientes de determinación, por esta razón se puede asegurar el uso de las mismas para la determinación de caudales medios máximos en un punto dado conociendo el área de drenaje.

Finalmente, como parte de la regionalización se ajustaron las distribuciones de probabilidad de frecuencia; Normal, Gumbel, Pearson Tipo III, Log Normal, Log Gumbel y Log Pearson Tipo III para cada una de las regiones y para diferentes períodos de retorno, dichas curvas se presentan en gráficos adimensionales.

OBJETIVOS

General

Aplicar la metodología de regionalización de caudales máximos instantáneos en la vertiente del Pacífico, a fin de estimar caudales máximos para distintos períodos de retorno que se puedan presentar en una cuenca hidrográfica en función de sus propiedades morfométricas.

Específicos

1. Determinar los parámetros morfométricos principales que permitan generar un modelo de regionalización de crecidas para la vertiente del Pacífico.
2. Estimar los valores de crecidas en diferentes estaciones de la vertiente del océano Pacífico con distintas distribuciones estadísticas.
3. Identificar posibles regiones de comportamiento homogéneo ante crecidas.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la red hidrométrica de Guatemala es limitada y los sitios donde se requiere conocer las magnitudes de crecidas difícilmente coinciden con las estaciones meteorológicas de la red hidrométrica que proporcionan dicha información; es por ello que la regionalización ofrece una herramienta para estimar caudales de crecida. En este trabajo se realiza un análisis regional hidrológico, con base al comportamiento de la ocurrencia de caudales máximos instantáneos observados en diferentes estaciones de la vertiente del Pacífico, y la ubicación de las cuencas tributarias. Este agrupamiento se hace para obtener mayor información que pueda dar mejor base en la interpolación y extrapolación del régimen de crecidas, tanto temporal como espacial. Para cada región se obtiene una relación para obtener el caudal índice con base a parámetros morfométricos de la cuenca tributaria. Seguidamente, se obtienen curvas regionales de frecuencia para cada región. Aunque, ya existe en la actualidad un estudio por parte del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología INSIVUMEH, acerca de regionalización de crecidas elaborado en 2002, los recientes fenómenos extremos como los huracanes Stan y Agatha, entre otros, hacen necesaria su actualización debido a la suposición de que ha ocurrido un cambio en las cuencas tributarias.

1. GENERALIDADES

1.1. Hidrología en Guatemala

Desde mucho tiempo antes de iniciarse el desarrollo y expansión del ser humano sobre la superficie terrestre, el agua ha jugado un papel muy importante en el moldeado de la corteza terrestre. Su principal exponente es el océano, el cual abarca más del 90 % del agua existente en el planeta, además de que en los continentes se han generado distintos tipos de cuerpos de agua, tales como: ríos, lagos, lagunas, etc., todos los cuales han contribuido en el moldeado de las formas terrestres.

Por su lado, a través de la historia humana, se observa un creciente interés en el estudio de los recursos hídricos, principalmente para aprovecharlos en distintas actividades de las que realiza el ser humano en sus actividades normales, como por ejemplo: abastecimiento de agua potable, riego, generación de energía, entre otros, de esta cuenta, se conocen muchos casos donde las grandes ciudades se fundaron cercanas a los cuerpos de agua.

Conforme el hombre ha ocupado las áreas aledañas a los ríos y lagos, la importancia del estudio de estos recursos se ha incrementado, principalmente al observar la facilidad con que las mismas pueden agotarse y contaminarse, además de la amenaza por inundaciones y crecidas que ellas pueden significar tanto para las poblaciones como para las zonas de aprovechamiento aledañas, principalmente durante las épocas de lluvias.

En el caso de Guatemala, la investigación y control permanente en los diferentes cuerpos de agua, está a cargo principalmente del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh), el cual a través del Departamento de Investigación y Servicios Hídricos, opera estaciones hidrométricas para mantener un monitoreo constante tanto de los ríos, como de algunos de los lagos y lagunas existentes en el territorio nacional.

El departamento se encuentra dividido en las secciones de Hidrometeorología del Norte o Red del Peten, Hidrología operativa, Aguas subterráneas, Hidrología aplicada y Procesamiento de datos.

Actualmente el departamento continúa recopilando en el país la información del recurso agua, evaluando su cantidad y calidad, tanto de lo superficial como de lo subterráneo. De lo primero en ríos y lagos principales y de lo segundo, investigando acuíferos para la explotación y aprovechamiento para agua potable, irrigación e industria. Todo incluye también la parte norte del territorio nacional, en la que además, de medición de caudales superficiales en sus principales ríos y niveles en sus principales lagos, se cuenta con medición de condiciones meteorológicas.

También se incluye la elaboración de un pronóstico de mareas y una efeméride solar. Manuales con datos que vienen a ser bastante utilizados por el público y elaborados con programas especiales por personal profesional y técnicos especializados en esta labor.

En la parte de hidrología aplicada e investigación se cuenta con estudios de cuencas y aplicación de modelos. Se tiene, además, investigación de calidad de agua, y estudios de balance hídrico superficial por cuenca hidrográfica.¹

1.2. Cuenca como unidad de análisis

Se denomina cuenca hidrográfica al área territorial de drenaje natural donde todas las aguas pluviales confluyen hacia un colector común de descarga. Los límites de una cuenca están determinados por la divisoria de aguas.

También a la cuenca hidrográfica se le reconoce como un área de terreno conformada por un sistema hídrico, el cual tiene un río principal, sus afluentes secundarios, terciarios o de cuarto orden. El sistema hídrico refleja un comportamiento de acuerdo con la forma en que se están manejando los recursos agua, suelo y bosque; y qué actividades o infraestructuras afectan su funcionamiento.

La cuenca hidrográfica es la unidad territorial más aceptada para estudiar, planear y ejecutar proyectos y políticas sobre manejo ambiental. La cuenca es un sistema dinámico, abierto y complejo, en el que sus recursos naturales son utilizados por la sociedad, estableciendo asimismo sistemas socioeconómicos específicos que, a su vez, se asocian a los elementos históricos, demográficos y a las dinámicas socioculturales de la población que las habita.

¹ Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Análisis Regional de Crecidas en la república de Guatemala*. <http://myslide.es/documents/inf-resumen-crecidasdoc.html>. Consulta: 8 de agosto de 2014.

1.3. División hidrológica de Guatemala

Desde el punto de vista hidrológico, el territorio de la República de Guatemala, se puede dividir en tres grandes vertientes de acuerdo con el punto donde desembocan finalmente todos los ríos que atraviesan y nacen en el territorio nacional.

En forma general, los ríos en una misma vertiente son similares, pero cada vertiente tiene condiciones propias que afectan las características de los ríos que están incluidos en ella. Las vertientes en las cuales se divide la República de Guatemala son la vertiente del Caribe, la vertiente del golfo de México y la vertiente del Pacífico. Estas vertientes se definen a continuación:

1.3.1. Vertiente del Pacífico

Los ríos que corresponden a la vertiente del Pacífico, tienen longitudes cortas (110 kms. promedio) y se originan a una altura media de 3 000 msnm.

Las pendientes son fuertes en las partes altas de las cuencas, entre el 10 % y el 20 %, cambiando bruscamente a pendientes mínimas en la planicie costera, creando grandes zonas susceptibles a inundación en esta área.

Estas condiciones fisiográficas producen crecidas instantáneas de gran magnitud y corta duración así como tiempos de propagación muy cortos.

“Por otro lado, todos los ríos de la vertiente del Pacífico acarrear grandes volúmenes de material, especialmente escorias y cenizas volcánicas, debido a que la cadena volcánica se encuentra entre los límites de la vertiente. El

arrastre de material ha ocasionado que los ríos tengan cursos inestables causando daños e inundaciones en la planicie costera.”²

La precipitación en la vertiente del Pacífico tiene períodos de gran intensidad, típica de las zonas costeras, con una precipitación media anual de 2 200 mm.

Tabla I. **Cuencas de la vertiente del Pacífico**

CUENCAS DE LA VERTIENTE DEL PACÍFICO					
Núm.	Cuenca	Área Km²	Núm.	Cuenca	Área Km²
1.1	Coatán	270	1,10	Coyolate	1 648
1.2	Suchiate	1054	1,11	Acomé	706
1.3	Naranjo	1 273	1,12	Achiguate	1 291
1.4	Ocosito	2 035	1,13	Maria Linda	2 727
1.5	Samalá	1 510	1,14	Paso Hondo	512
1.6	Sis- Iacán	919	1,15	Los Esclavos	2 271
1.7	Nahualate	1 941	1,16	Paz	1 732
1.8	Atitlán	541	1,17	Ostúa- Güija	2 243
1.9	Madre Vieja	1 007	1,18	Olopa	310
Área total de la vertiente del Pacífico (Km ²)					23 990

Fuente: Insivumeh. www.insivumeh.gob.gt. Consulta: julio de 2014.

1.3.2. Vertiente del Atlántico

En el caso de la vertiente del Atlántico, la longitud de los ríos es mucho mayor e incluye el río más largo del país, el Motagua con 486,55 kms. Las pendientes son más suaves y su desarrollo es menos brusco, ya que en la parte montañosa los ríos hacen su recorrido en grandes barrancas o cañones.

² Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Análisis Regional de Crecidas en la república de Guatemala*. <http://myslide.es/documents/inf-resumen-crecidasdoc.html>. Consulta: 8 de agosto de 2014.

Las crecidas son de mayor duración y los tiempos de propagación son también mayores. Los caudales son más constantes durante todo el año. Parte del área dentro de esta vertiente tiene muy baja pluviosidad, 500 mm/anales, mientras que en la zona de Puerto Barrios y Morales, la pluviosidad alcanza hasta 3 500 mm/anales.

Tabla II. **Cuencas de la vertiente del Caribe**

CUENCAS DE LA VERTIENTE DEL CARIBE					
Núm.	Cuenca	Área Km²	Núm.	Cuenca	Área Km²
2.1	Grande de Zacapa	2 462	2,6	Sarstún	2 109
2.2	Motagua	12 670	2,7	Mopán-Belice	8 159
2.3	Izabal- Río Dulce	3 435	2,8	Hondo	6 100
2.4	Polochic	2 811	2,9	Moho	305
2.5	Cahabón	2 459	2,10	Temans	102
Área total de la vertiente del Caribe (Km ²)					40 612

Fuente: *Insivumeh*. www.insivumeh.gob.gt. Consulta: julio de 2014.

1.3.3. Vertiente del golfo de México

Al igual que los ríos que desembocan en el Atlántico, los que desembocan en el golfo de México, poseen grandes longitudes. Aquí se encuentran los ríos más caudalosos del país, como el Usumacinta, el Chixoy y La Pasión.

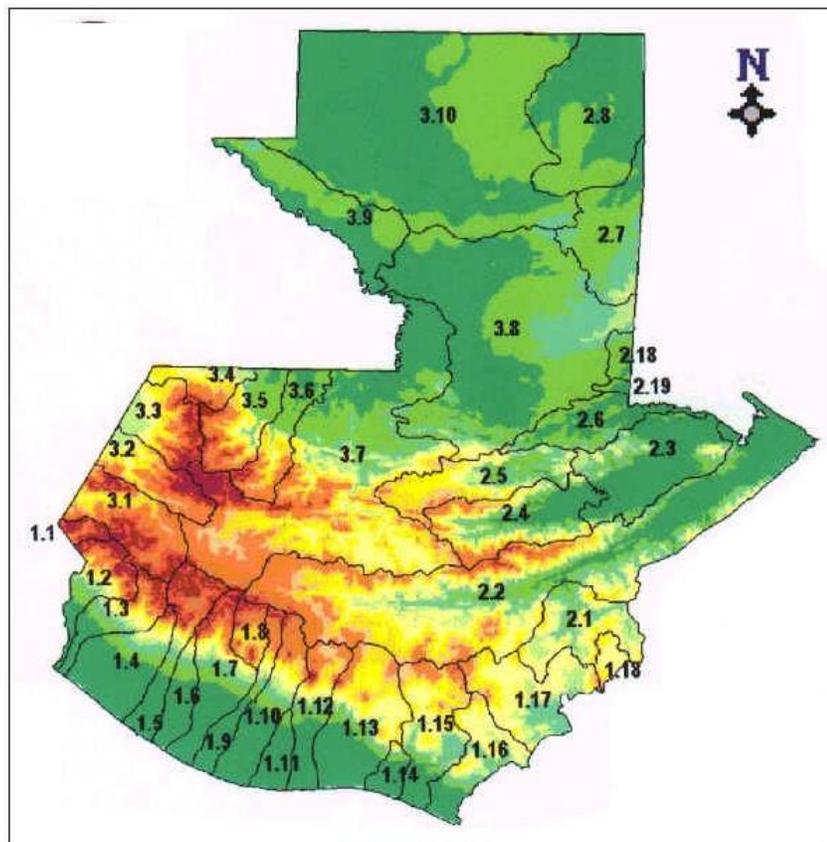
Las crecidas son de larga duración, los cauces son relativamente estables y los recorridos más sinuosos. Las pendientes son relativamente suaves. La precipitación media es de 2 500 mm/anales.

Tabla III. **Cuencas de la vertiente del golfo de México**

CUENCAS DE LA VERTIENTE DEL GOLFO DE MÉXICO					
Núm.	Cuenca	Área Km²	Núm.	Cuenca	Área Km²
3.1	Cuilco	2 274	3.6	Xacbal	1 366
3.2	Selegua	1 535	3.7	Chixoy	12 150
3.3	Nentón	1 451	3.8	La Pasión	12 155
3.4	Pojom	813	3.9	Usumacinta	2 638
3.5	Ixcán	2 085	3.10	San Pedro	14 335
Área total de la vertiente del golfo de México (Km ²)					50 803

Fuente: Insivumeh. www.insivumeh.gob.gt. Consulta: julio de 2014.

Figura 1. **Mapa de cuencas hidrográficas de Guatemala**



Fuente: Insivumeh. www.insivumeh.gob.gt. Consulta: julio de 2014.

2. ESTUDIO DE CRECIDAS

2.1. Estudio de crecidas

Una crecida es un aumento del caudal del agua, significativamente mayor que el flujo medio de este. Durante la crecida, el caudal de un curso aumenta en tales proporciones que el lecho del río puede resultar insuficiente para contenerlo. Entonces, el agua lo desborda e invade el lecho mayor también llamado llanura de inundación manual.

Los caudales máximos de crecidas están condicionados por el aporte de las lluvias en el tiempo. Además de la magnitud de las lluvias, las crecidas están influidas por la topografía del terreno, teniendo influencia no solo en el caudal sino también en el tiempo de concentración.

Lluvias muy intensas provocan crecidas en pequeñas cuencas, en tanto que en cuencas grandes se necesita lluvias de menor intensidad pero de mayor duración y cubrimiento grande.

Las inundaciones provocadas por las crecidas son causantes de daños materiales y en muchos casos pérdidas de vidas humanas. La República de Guatemala no está exenta del peligro que representan las inundaciones para las personas y bienes materiales. Mediante un estudio de avenidas es posible reducir los impactos causados por estas, ya que puede ser útil en una primera aproximación en la elaboración de mapas de riesgo a inundaciones y en la elaboración de planes de prevención y preparación ante desastres de esta índole.

Así mismo, los resultados de un estudio regional de avenidas máximas pueden ser de gran utilidad en el diseño de obras como presas, puentes para carreteras y estructuras para el control de avenidas, entre otros.

2.2. Particularidades y tipos de crecidas

Una crecida elemental solo afecta a uno o a varios afluentes y puede tener causas muy diferentes: *pluvial*, debido a las lluvias continuas sobre una cuenca poco permeable o que ya se ha empapado de agua; *nival*, provocada por la fusión de las nieves, el deshielo que ocasiona la ruptura del obstáculo congelado que retenía las aguas, etc. Muchas veces dos o más de estas causas simples suman sus efectos y el río, sobre todo después de haber recibido las aguas de varios afluentes, experimenta una crecida compleja.

Por otra parte, las avenidas se pueden caracterizar por su variabilidad en el tiempo, así se pueden distinguir:

2.2.1. Crecida periódica

Generalmente, no causa daños, incluso es benéfica, por ejemplo las crecidas que contribuyen a la fertilidad de los valles aguas abajo. Este tipo de avenidas es de larga duración, puede durar semanas o meses. Son causadas principalmente por las variaciones climáticas de vastas regiones de la cuenca hidrográfica. Son previsible, por ello se pueden tomar medidas de protección para evitar o minimizar los daños.

2.2.2. Crecidas excepcionales

Estas son causadas por precipitaciones intensas sobre toda la cuenca o parte de esta. Son difícilmente previsible, para ello se requiere una red de monitoreo operada en el tiempo real. Generalmente, causan daños a las poblaciones y a la infraestructura económica. Se pueden tomar medidas de protección civil y de mantenimiento preventivo de las infraestructuras.

3. ANÁLISIS REGIONAL

Para cuencas con muy pocos datos, el análisis histórico tiene muy poco valor para el estudio de frecuencias. En la región centroamericana este caso se presenta muy a menudo, puesto que muchas de las estaciones cuentan con registros muy cortos que no llenan los requisitos para hacer un análisis de frecuencia que proporcione resultados aceptables.

La estimación de caudales máximos para diferentes períodos de retorno, es uno de los principales procedimientos en hidrología, que tiene como fin la determinación del caudal de diseño para una determinada estructura hidráulica o para el trazado de mapas de inundación.

La metodología más común para la determinación de estos caudales máximos, es la metodología estadística, la cual ajusta los datos registrados en una estación hidrométrica (crecidas máximas instantáneas) a una función de distribución de frecuencia y determina los valores para diferentes períodos de retorno.

La disponibilidad de datos es un aspecto importante en el análisis de frecuencia. La estimación de la probabilidad de ocurrencia de eventos extraordinarios es una extrapolación basada en datos limitados. Así, cuanto mayor sea la base de datos, más precisas las estimaciones serán.

Desde el punto de vista estadístico, estimaciones a partir de pequeñas muestras, pueden dar irrazonable o físicamente estimaciones poco realistas de parámetros, en especial para las distribuciones con una gran número de

parámetros (tres o más). Grandes variaciones asociadas con tamaños de muestra pequeños causan que las estimaciones no sean realistas. En la práctica, sin embargo, los datos pueden ser limitados o en algunos casos no se tienen disponibles para un sitio. En tales casos, el análisis regional es más útil. El análisis regional se basa en el concepto de homogeneidad regional que asume que el flujo anual de poblaciones máximas en varios sitios en una región es similar en características estadísticas y no dependen del tamaño de captación. Aunque esta hipótesis puede no ser estrictamente válida.

La regionalización tiene dos propósitos. Para los sitios donde no se cuenta con disponibilidad de los datos, el análisis se basa en datos regionales. Para sitios con datos disponibles, el uso conjunto de datos medidos en un sitio, (llamada datos en el sitio), y los datos regionales de un número de estaciones en una región proporciona información suficiente que permite determinar una distribución de probabilidad para ser utilizado con mayor fiabilidad.

Este tipo de análisis representa una sustitución del espacio por el tiempo en que los datos de diferentes lugares de una región se utilizan para compensar los registros cortos en un solo sitio. Muchos tipos de regionalización de los procedimientos están disponibles.

3.1. Caudal índice

Uno de los procedimientos más simples que se ha utilizado durante mucho tiempo es el método de caudal índice. La suposición clave en el índice de las inundaciones es que la distribución de las inundaciones en diferentes lugares de una región es el mismo, a excepción de una escala o parámetro de inundación índice, que refleja precipitaciones y los tipos de escorrentía de cada región.

El caudal proporciona la crecida media, aunque cualquier parámetro de localización de la frecuencia de distribución puede ser utilizado. En este caso, estimaciones regionales de cuantiles (Q_{Tr}), en un lugar determinado durante un período de retorno dado Tr se puede obtener como en la ecuación que sigue, donde Q_{Tr} es la estimación de cuantiles de la distribución regional para el período de retorno dado, y Q_I es el caudal índice llamado también caudal medio máximo (QMM), K_{Tr} es el valor adimensional obtenido en la curva de frecuencia.

$$Q_{tr} = Q_I * K_{tr}$$

Otro método de obtención de los parámetros de la distribución regional es mediante los datos de cada estación de año, enfoque en el que todos los datos se ponen en común, después de dividirlos por la media en cada sitio, y son tratados como una sola muestra. El uso conjunto de estos y los datos regionales es aconsejable, siempre que una región de inundación razonablemente homogénea puede ser identificada. Los datos en un sitio pueden ser utilizados cuando el registro en una estación es excepcionalmente largo, o cuando los datos regionales no están disponibles, o cuando una región es heterogénea.

El análisis regional de métodos de análisis de frecuencia se basa en el supuesto de que la variable estandarizada $K_{Tr} = Q_{Tr}/Q_I$, en cada estación (i), tenga la misma distribución en todos los sitios en la región en estudio. En particular C_v (coeficiente de variación) y C_s (coeficiente de asimetría), se consideran constantes en toda la región. Los sitios con C_v y C_s más cercana a la media regional no pueden sufrir de sesgo, pero grandes sesgos en sus estimaciones de cuantiles se espera para los sitios cuyos C_v y C_s se desvían de la media.

Un método de asignación de regiones homogéneas es la geográfica, basada en la similitud en cuanto a los tipos de suelo, clima y topografía. Sin embargo, geográficamente no pueden ser similares en vista de la frecuencia de las inundaciones. Por otra parte, dos sitios en diferentes regiones pueden llegar a ser similares en cuanto a la frecuencia de inundaciones, a pesar del hecho de que todas son geográficamente diferentes.

Otro enfoque es, inicialmente, dividir el grupo entero de las cuencas en dos o más grupos, en función de una o más características de la cuenca tomando en consideración el tamaño de la misma, precipitación u otras características.

3.2. Análisis de frecuencia en la regionalización de caudales

El análisis de frecuencia es una herramienta utilizada para predecir el comportamiento futuro de los caudales en un sitio de interés, a partir de la información histórica de caudales. Es un método basado en procedimientos estadísticos que permite calcular la magnitud del caudal asociado a un período de retorno. Su confiabilidad depende de la longitud y calidad de la serie histórica, además de la incertidumbre propia de la distribución de probabilidades seleccionadas.

Cuando se pretende realizar extrapolaciones para períodos de retorno mayor que la longitud de la serie disponible, el error relativo asociado a la distribución de probabilidades utilizada es más importante, mientras que en interpolaciones la incertidumbre está asociada principalmente a la calidad de los datos por modelar; en ambos casos la incertidumbre es alta dependiendo de la cantidad de datos disponibles. La extrapolación de frecuencias extremas en una distribución empírica de crecientes es extremadamente riesgosa.

El análisis de frecuencias puede ser gráfico o matemático. En el enfoque gráfico, las observaciones históricas de la variable de interés se ordenan en orden ascendente o descendente, y se traza un gráfico de las magnitudes de los eventos en función de su frecuencia de excedencia o intervalo de repetición. Después, se ajusta una curva a través de los puntos representados gráficamente para describir la probabilidad de ocurrencia futura de cualquier evento. Se dispone de un papel especial para gráficos, que puede usarse para ilustrar la curva suave como una línea recta.

El enfoque matemático para el análisis de frecuencias se basa en la suposición de una descripción matemática específica, conocida como distribución de probabilidades, para definir el equivalente de la curva del enfoque gráfico. Los parámetros de la distribución de probabilidades se definen como funciones de las estadísticas de las observaciones hidrológicas.

3.3. Análisis regional por método de los trazos multidimensionales

Nathan y McMahon, desarrollaron una técnica de regionalización que resuelve los problemas asociados con la selección de una aplicada técnica de racimos, la definición de la región homogénea y la predicción del grupo de membresía al cual pertenecería la nueva cuenca.

El método emplea la técnica de regresión lineal múltiple para seleccionar las características fisiográficas y/o meteorológicas más adecuadas.

La heterogeneidad de los grupos que se forman de manera preliminar se evalúa mediante una técnica de posicionamiento propuesta por Andrews (1972), en la cual un punto en el espacio multidimensional se representa por una curva en dos dimensiones vía la función

$$f(t) = \frac{x_1}{\sqrt{2}} + x_2 \sin(t) + x_3 \cos(t) + x_4 \sin(2t) + x_5 \cos(2t) + \dots$$

Donde x_1, x_2, \dots son las características fisiográficas y/o meteorológicas obtenidas del análisis de regresión y la función se evalúa en el rango $-\pi \leq t \leq \pi$.

El hecho de que esta función preserva las distancias la hace una técnica ideal de comparación visual para la formación de grupos homogéneos. Los racimos de cuencas con comportamientos similares aparecen como una banda de curvas muy próximas unas de otras.

Una característica del método, que no se identifica en forma inmediata, consiste en que los resultados que se obtienen dependen del tipo y del ordenamiento de las variables seleccionadas. Las primeras variables son asociadas con componentes cíclicos de baja frecuencia y las últimas de alta frecuencia. Las bajas frecuencias son más fáciles de observar, de esta manera, x_1 representará a aquella que en el análisis de regresión resultó más significativo desde el punto de vista estadístico, x_2 a la segunda y así sucesivamente.

Una vez que se han desarrollado las funciones del tipo $f(t)$ para cada uno de los sitios involucrados, se generarán envolventes que formen conjuntos de curvas de comportamiento similar y se derivará una curva media $\bar{f}(t)$ que presente los atributos físicos de cada grupo formado.

Para las curvas donde se tenga duda si pertenece o no a un grupo en particular se hará la siguiente prueba:

$$SS = \sum_{t=-\pi}^{\pi} \{[f^f(t)] - [f^j(t)]\}^2$$

Donde SS es la suma de las diferencias al cuadrado entre los puntos que forman la curva en el sitio j y la curva característica de cada uno de los grupos ya formados. La cuenca se localizará en la región K donde se haya obtenido el menor valor de SS .

3.4. Técnica de las estaciones-año

Este método considera el tratamiento de una sola muestra de datos conformada por un registro estandarizado de eventos el cual, una vez que se construye, se ajusta a un conjunto de distribuciones de probabilidad. Esta técnica regional, a diferencia de otras, no requiere que las muestras tengan una longitud de registro común. Con referencia al tamaño de muestra aceptable en cada población participante del análisis, se recomienda que al menos sea de diez años. Esta recomendación no es del todo estricta, ya que si se tiene un sitio con, por ejemplo, nueve años, pero dentro de este hay eventos extremos que puedan afectar el comportamiento del fenómeno en la región, entonces se debe incluir en el estudio.

Existe otra recomendación en cuanto el número de estaciones-año que se requieren para una correcta estimación del evento Q_t , y es que $L \leq 5T$ donde T es el período de retorno en años.

La secuencia puede resumirse como:

- Probar dentro de cada región analizada la homogeneidad de la serie de datos.
- Obtener los estadísticos muestrales de las series Q_i^j : \bar{x} , S^2 , S , g , k , C_v , para cada $j = 1 \dots ms$.
- Para cada serie se verifica mediante la prueba de Anderson la independencia de eventos.
- Para cada serie se genera una muestra modulada.
- Se forma el registro de estaciones-año, con todos los eventos modulados.
- El registro se ordena de mayor a menor y se le asigna un período de retorno y una probabilidad de no excedencia.
- Al registro formado en el paso 5 se le ajustan las diferentes distribuciones de probabilidad para el análisis de máximos (Normal, Log normal con 2 y 3 parámetros, Gamma con 2 y 3 parámetros, *Log Pearson* Tipo III, gumbel, general de valores extremos) y se selecciona aquel que proporcione el mínimo error estándar de ajuste.
- Una vez obtenida la distribución de mejor ajuste, es posible estimar los eventos regionales para diferentes períodos de retorno, los cuales serán válidos para cualquier punto dentro de la zona analizada.
- Si se quiere obtener un evento en un sitio que tiene escasa información, basta multiplicar la relación regional obtenida en el paso anterior por el correspondiente valor de la media. Por el contrario, si se desea un evento en un sitio no aforado que esté dentro de la región se debe construir la relación con la media menos el área drenada.

4. CONCEPTOS PROBABILÍSTICOS EN EL ANÁLISIS DE CRECIDAS

4.1. Series

En el análisis probabilístico, una serie es una secuencia conveniente de datos, como son las observaciones horarias, diarias, estacionales o anuales de una variable hidrológica. Si el registro de estas observaciones contiene todos los eventos que ocurrieron dentro de un período dado, a la serie se le llama serie de duración completa. Por razones de conveniencia, el registro contiene frecuentemente solo los eventos cuya magnitud es superior a una base preseleccionada. A esta serie se le llama serie de duración parcial. Una serie que contiene solo el evento con la magnitud más grande que ocurrió en cada año se denomina serie de máximos anuales.

El uso de las series de máximos anuales es muy común en el análisis probabilístico por dos razones. La primera es por conveniencia, ya que la mayoría de los datos se procesan de manera que la serie anual está fácilmente disponible. La segunda es que hay una base teórica para extrapolar los datos de series anuales más allá de las posibilidades de observación.

Una razón de la ausencia de una teoría estadística para las series de duración parcial es la falta de independencia de los eventos que podrían seguirse uno a otro en secuencia contigua.

Una limitación de los datos de series anuales es que cada año está representado por solo un evento. El segundo evento más alto en un año en

particular puede ser más alto que los más altos de otros años, y aun así no estaría contenido en la serie. (Ref. 9)

4.2. Probabilidad

La probabilidad de un evento $P(A)$, se define como la frecuencia de su ocurrencia durante la repetición de un número de observaciones. Si una muestra con N observaciones tiene N_A valores en el rango del evento A , la frecuencia relativa de A es N_A/N . La estimación de la $P(A)$ a partir de la frecuencia relativa, mejora progresivamente al aumentar de tamaño la muestra, matemáticamente,

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{N_A}{N}$$

Tales probabilidades se conocen como probabilidades objetivas o posteriores debido a que dependen concretamente de las observaciones de la variable aleatoria. (Ref. 9)

4.3. Probabilidad empírica

Con los parámetros estadísticos y una función de frecuencia se puede calcular la probabilidad teórica para un valor determinado de x . Para una serie de observaciones puede determinarse la probabilidad $P(X=x_i)$, a partir de la frecuencia. Esta probabilidad empírica corresponde a la suma de las frecuencias relativas, cuando las observaciones se ordenan con criterio ascendente.

Existen diversas ecuaciones para el cálculo de la probabilidad empírica, pero una de las más usadas es la de *Weibull*, misma que se enuncia a continuación:

$$P = \frac{m}{N+1} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

m es la posición, N es el número de datos de la muestra y P es la probabilidad.

4.4. Período de retorno

El período de retorno, Tr de un evento dado, es el número promedio de años dentro del cual se espera que el evento sea igualado. El evento que se espera sea igualado cada N años, es el evento de N años, XTr . Ambos términos se refieren a la frecuencia de ocurrencia promedio esperada de un evento durante un largo período de años. El período de retorno es igual al inverso de la probabilidad de excedencia en un solo año.

$$Tr = \frac{1}{P} = \frac{1}{1-q} \quad (\text{Ec. 2})$$

4.5. Parámetros estadísticos

Los estadísticos extraen información de una muestra, indicando las características de la población. Los principales estadísticos son los momentos de primer, segundo y tercer orden correspondiente a la media, varianza, y asimetría respectivamente.

4.5.1. Media

El punto de partida para describir las propiedades de todos los valores de la población es la tendencia central; es decir, el valor central alrededor del cual se aglomeran todas las observaciones.

El valor estimado de la media a partir de la muestra es:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Ec. 3})$$

4.5.2. Varianza

Mide la variabilidad de los datos. Es el segundo momento respecto de la media.

El valor estimado de la varianza a partir de la muestra es:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{Ec. 4})$$

En el cual el divisor es n-1 en lugar de n para asegurar que la estadística de la muestra no sea sesgada, es decir, que no tenga una tendencia, en promedio, a ser mayor o menor que el valor verdadero. Las unidades de la varianza son la media al cuadrado, la desviación estándar (σ) es una medida de la variabilidad que tiene las mismas dimensiones que la media y simplemente es la raíz cuadrada de la varianza, se estima por s.

4.5.3. Coeficiente de asimetría

La distribución de los valores de una distribución alrededor de la media se mide por la asimetría. Se obtiene a partir del tercer momento alrededor de la media, dividiéndolo por el cubo de la desviación estándar para que sea adimensional.

$$E[(x - \mu)]^3 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^3 f(x) dx \quad (\text{Ec. 5})$$

Tercer momento respecto a la media.

$$\gamma = \frac{1}{\sigma^3} E'[(x - \mu)]^3$$

Un estimado del coeficiente de asimetría está dado por:

$$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2) * s^3} \quad (\text{Ec. 6})$$

4.6. Distribuciones de probabilidades utilizadas en hidrología

Las distribuciones de probabilidades se usan en una amplia variedad de estudios hidrológicos, por ejemplo los estudios de recursos hídricos, de caudales extremos altos y bajos, de sequías, de volúmenes en embalses, de cantidades de lluvia y de modelos de series cronológicas. Los totales anuales, como los volúmenes de escurrimiento o la cantidad de lluvia, tienden a estar distribuidos normalmente o casi debido al teorema estadístico del límite central. Los totales semanales y mensuales son menos simétricos (asimetría casi siempre positiva) y, por lo general, no se pueden modelar con la distribución normal.

4.6.1. Distribución normal

La distribución normal es una distribución simétrica en forma de campana, también conocida como Campana de Gauss. Aunque muchas veces no se ajusta a los datos hidrológicos tiene amplia aplicación, por ejemplo a los datos transformados que siguen la distribución normal.

La función de densidad está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-1(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \quad (\text{Ec. 7})$$

Los dos parámetros de la distribución son la media y la desviación estándar para los cuales \bar{x} (media) y μ (desviación estándar) son derivados de los datos. La estimación de la media y de la desviación estándar se da a partir de la siguiente ecuación:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad -\infty < x < \infty \quad (\text{Ec. 8})$$

$$s = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec. 9})$$

El factor de frecuencia se calcula con la siguiente ecuación: si se trabaja con los "X" sin transformar el "K" se calcula como:

$$K_T = \frac{x_T - \mu}{\sigma} \quad (\text{Ec. 10})$$

Este valor es el mismo de la variable normal estándar.

4.6.2. Distribución Log Normal de dos parámetros

Si los logaritmos Y de una variable aleatoria X se distribuyen normalmente se dice que X se distribuye normalmente.

Esta distribución es muy usada para el cálculo de valores extremos por ejemplo Q máx., Q mínimos, P máx., P mínima. Tiene la ventaja que $X > 0$ y que la transformación Log tiende a reducir la asimetría positiva, ya que al sacar logaritmos se reducen en mayor proporción los datos mayores que los menores.

La función de densidad de la distribución Log Normal viene dada de la siguiente manera:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-1(y-\mu_y)}{2\sigma y^2} \quad x > 0 \quad (\text{Ec. 11})$$

$$y = \ln x \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde μ_y : media de los logaritmos de la población (parámetro escalar), estimado y σ_y : desviación estándar de los logaritmos de la población, estimada s_y .

La estimación de parámetros se da de la siguiente manera:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (\text{Ec. 13})$$

$$s_y = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n ((\ln(x_i) - \bar{y}))^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec. 14})$$

El factor de frecuencia puede trabajarse en el campo original y en el campo transformado.

Campo transformado: si se trabaja en el campo transformado se trabaja con la media y la desviación estándar de los logaritmos, así:

$$\ln(x_{Tr}) = x_{Tr} + ks_y \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

$$X_{Tr} = e^{\ln(x_{Tr})} \quad (\text{Ec. 16})$$

Con K con variable normal estandarizada para el Tr dado, x_y media de los logaritmos y S_y es la desviación estándar de los logaritmos.

En el campo original, si se trabaja con los "X" sin transformar el "K" se calcula como:

$$k_t = \frac{\exp\left\{k_T * (\ln(1+c_v^2))^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{\ln(1+c_v^2)}{2}\right)\right\} - 1}{c_v} \quad (\text{Ec. 17})$$

K es la variable normal estandarizada para el Tr dado, $Cv = \frac{s}{x}$ es el coeficiente de variación, x media de los datos originales y s desviación estándar de los datos originales.

4.6.3. Distribución de Gumbel o extrema tipo I

Una familia importante de distribuciones usadas en el análisis de frecuencia hidrológico es la distribución general de valores extremos, la cual ha sido ampliamente utilizada para representar el comportamiento de crecientes y sequías.

La función de densidad viene dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[\frac{-(x-\beta)}{\alpha} - \exp \left(\frac{-(x-\beta)}{\alpha} \right) \right] \quad (\text{Ec. 18})$$

En donde α y β son los parámetros de la distribución.

$$F(x) = \int f(x)dx = \exp \left[-\exp \left(-\frac{(x-\beta)}{\alpha} \right) \right] \quad (\text{Ec. 19})$$

La estimación de parámetros viene dada de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} s \quad (\text{Ec. 20})$$

$$\beta = \bar{x} - 0,5772\alpha \quad (\text{Ec. 21})$$

Donde \bar{x} y s son la media y la desviación estándar estimadas con la muestra.

El factor de frecuencia viene dado por:

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0,5772 + \ln \left[\ln \left(\frac{T_r}{T_r-1} \right) \right] \right\} \quad (\text{Ec. 22})$$

Donde Tr es el período de retorno. Para la distribución Gumbel se tiene que el caudal para un período de retorno de 2,33 años es igual a la media de los caudales máximos.

4.6.4. Distribución de *Pearson* Tipo III

Esta distribución ha sido una de las más utilizadas en hidrología. Como la mayoría de las variables hidrológicas son sesgadas, la función PTIII se utiliza para ajustar la distribución de frecuencia de variables tales como crecientes máximas anuales, caudales mínimos, volúmenes de flujo anuales y estacionales, valores de precipitaciones extremas y volúmenes de lluvia de corta duración. La función de distribución tiene dos o tres parámetros.

La función de densidad de la distribución *Pearson* Tipo III viene dada por:

$$f(x) = \frac{1}{|\alpha|\Gamma(\beta)} \left(\frac{x-\hat{x}_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x-\hat{x}_0}{\alpha}\right) \quad (\text{Ec. 23})$$

Donde:

$x_0 \leq x \leq \infty$ Para $\alpha > 0$

$\infty < x \leq x_0$ Para $\infty < 0$

α Y β son los parámetros de escala y forma, respectivamente y x_0 es el parámetro de localización.

La estimación de estos parámetros viene dada de la siguiente manera:

$$\hat{\beta} = \left(\frac{2}{c_s}\right)^2; \quad \hat{\alpha} = s \frac{c_s}{2}; \quad \hat{x}_0 = \bar{x} - \alpha \hat{\beta}$$

(Ec. 24)

C_s Es el coeficiente de asimetría, \bar{x} y s son la media y la desviación estándar de la muestra respectivamente.

El factor de frecuencia se determina de la siguiente manera:

$$K \approx z + (z^2 - 1) \frac{C_s}{6} + \frac{1}{3} (z^3 - 6z) \left(\frac{C_s}{6}\right)^2 - (z^2 - 1) \left(\frac{C_s}{6}\right)^3 + z \left(\frac{C_s}{6}\right)^4 + \frac{1}{3} \left(\frac{C_s}{6}\right)^5$$

(Ec. 25)

Donde Z es la variable normal estandarizada.

Este valor de K se encuentra tabulado de acuerdo al valor de C_s calculado con la muestra.

4.7. Prueba de valores atípicos (*Outliers*)

El método *Water Resources Council* recomienda la realización de ajustes de datos dudosos. Los datos dudosos (*Outliers*) son puntos de la información que se alejan significativamente de la tendencia de la información restante. La retención o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos calculados para la información especialmente en muestras pequeñas.

Los procedimientos para tratar datos dudosos requieren de un criterio que involucra consideraciones matemáticas e hidrológicas. De acuerdo con el *Water Resources Council*, si la asimetría de los datos de la serie es mayor que +0,4, se consideran las pruebas para tratar datos dudosos altos, si la asimetría es que -0,4 se consideran las pruebas para tratar datos dudosos bajos.

Un valor atípico es una observación que se aparta significativamente de la mayor parte de los datos, que puede ser debido a errores en la recopilación de datos, o la grabación, o por causas naturales. La presencia de valores atípicos en los datos es la causa de dificultades en la instalación de una distribución a los mismos. Bajo y los valores extremos de alta son posibles y tienen diferentes efectos en el análisis. En esta prueba la X_H y X_L cantidades se calculan utilizando las ecuaciones:

$$X_H = \exp(x + k_n * s_x) \quad (\text{Ec. 26})$$

Donde X_H es el umbral de dato dudoso alto en unidades logarítmicas y k_n es un valor en función del tamaño de la muestra, se usan en pruebas de un lado para detectar datos dudosos en el nivel de significancia del 10% en información normalmente distribuida. Si un valor de la serie en unidades logarítmicas sobrepasa el valor de X_H entonces se considera como dato dudoso alto, en este caso se debe comparar el caudal pico con otros caudales obtenidos en estaciones vecinas.

Una ecuación similar puede utilizarse para detectar los datos dudosos bajos:

$$X_L = x - k_n * s_x \quad (\text{Ec. 27})$$

Donde X_L es el umbral de datos dudosos bajos en unidades logarítmicas. Los picos de crecientes considerados como datos dudosos bajos se eliminan del registro.

El análisis de datos dudosos es aplicable solamente para series que cuentan con un número de observaciones mayores o iguales a 10.

El valor de k_n resulta de la siguiente ecuación propuesta:

$$K_n = -3,62201 + 6,28446N^{0,24} - 2,49835N^{0,5} + 0,491436N^{0,75} - 0,037911N$$

Donde N es el número de observaciones.

Tabla IV. **Valores de K_n para datos dudosos**

Tamaño de muestra n	Kn	Tamaño de muestra n	Kn
10	2,034	24	2,467
11	2,088	25	2,487
12	2,134	26	2,502
13	2,175	27	2,519
14	2,213	28	2,534
15	2,247	29	2,549
16	2,279	30	2,563
17	2,309	31	2,577
18	2,335	32	2,591
19	2,361	33	2,604
20	2,385	34	2,616
21	2,408	35	2,628
22	2,429	36	2,639
23	2,448	37	2,650

FUENTE: CHOW, V., MAIDMENT, D., and MAYS, L. *Hidrología Aplicada*. p. 248.

Tabla V. **Distribuciones de probabilidades utilizadas en hidrología**

NOMBRE	ACRÓNIMO	REFERENCIA
Normal	(N)	Gauss
Log Normal	(LN)	Hazen, 1914
Pearson Tipo III	(P3)	Foster, 1924
Valor Extremo Tipo 1	(EV1)	Gumbel, 1941
Valor Extremo Tipo 2	(EV2)	Gumbel, 1941
Valor Extremo Tipo 3	(EV3)	Jenkinson, 1969
Gamma o Pearson Tipo 3	(G)	Morán, 1957
Gamma Tres Parámetros		
Log Pearson Tipo 3	(LP3)	U.S. Water Resources Council, 1981
Valor Extremo Generalizado	(VEG)	Jenkinson, 1969
Logística Generalizada	(GLG)	Ahmad, 1988

Fuente: *Análisis regional de crecidas máximas para Honduras*. <http://myslide.es/documents/inf-resumen-crecidasdoc.html>. Consulta: 8 de agosto de 2014

4.8. **Envolvente regional**

El comportamiento general de los caudales máximos anuales en una región se puede apreciar en una gráfica que relaciona esta variable con la correspondiente área de drenaje de la cuenca. La curva suave que cubre a todos los puntos de esa gráfica se conoce como envolvente de crecidas.

La envolvente no está asociada con frecuencias o probabilidades específicas de ocurrencia, pero dentro de la región de aplicación, proporciona evidencia de las magnitudes máximas de los caudales esperados.

La envolvente permite realizar estimados gruesos de los eventos extraordinarios esperados en una determinada región, en función solamente de la superficie de la cuenca. En general, este estimado no es totalmente válido para el diseño definitivo de grandes obras hidráulicas, pero puede ser útil en estudios de gran visión, en el análisis del potencial de escurrimiento o en la estimación de eventos en zonas donde se carece de información hidrométrica.

Para una región la curva envolvente puede ajustarse a diferentes ecuaciones, una de ellas y la más utilizada es la propuesta por Creager, que se detalla a continuación:

$$Q = 1.303 * C_c * \left(\frac{A}{2.59}\right)^{0.936 * A^{-0.048}} \quad (\text{Ec. 28})$$

Donde:

Q : Caudal máximo – m^3/s

C_c : Coeficiente empírico de Creager

A : Área de la cuenca – Km^2

Creager encontró que $C_c = 100$ para la envolvente de los datos con los que trabajó, a la cual se le conoce como envolvente mundial. El coeficiente C_c es característico de cada región y para el caso de Guatemala se usa un C_c de 50 y para Centro América, es de 65.

5. ANÁLISIS REGIONAL DE CRECIDAS MÁXIMAS PARA LA VERTIENTE DEL PACÍFICO DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA

5.1. Antecedentes de análisis regional de crecidas para la República de Guatemala

Para el análisis regional que se llevó a cabo en 2002, el país se dividió en ocho zonas, identificándolas del I a la VIII, agrupándolas en cuencas, por ser esta la unidad de análisis. Así mismo, se consideraron otros factores como son la precipitación anual y vertiente de desembocadura, así como la existencia de información histórica de caudales.

Para cada región se establecen relaciones entre la crecida índice y el área de la cuenca tributaria. Luego para cada región se hace un análisis de frecuencia regional con las series estandarizadas, con base a la crecida índice. Se ajustan siete distribuciones teóricas de frecuencia, cuyos parámetros se estiman mediante el método de momentos convencionales y el método de momentos lineales ponderados probabilísticamente.

Con base a la evaluación de la bondad de ajuste se seleccionan las distribuciones que mejor se ajustan a los datos, en cada región. Se puede observar que no existe una distribución que se ajuste mejor a las ocho regiones. No obstante, se aprecia que las que mejor se ajustan a la mayoría de regiones es la Log-Normal y la de Gumbel. Además, se obtienen curvas de frecuencia regionales envolventes. Finalmente, se obtienen curvas envolventes a las crecidas históricas observadas en el país.

Las regiones hidrológicas de la República de Guatemala se describen a continuación:

5.1.1. Región I: Altiplano occidental

Esta región pertenece a la vertiente del Pacífico y las cuencas pertenecientes a esta región son:

- Coatán
- Suchiate
- Naranjo
- Ocosito
- Samalá
- Sis – Iscán
- Nahualate
- Atitlán
- Madre Vieja
- Coyolate
- Acomé
- Achiguate

La Región I comparte sus cuencas (a excepción de la cuenca Coatán) con la Región II.

5.1.2. Región II: Pacífico suroriental

Esta región pertenece a la vertiente del Pacífico y comparte todas sus cuencas con la Región I. Las cuencas que forman esta región son:

- Suchiate
- Naranjo
- Ocosito
- Samalá
- Sis – Iscán
- Nahualate
- Atitlán
- Madre Vieja
- Coyolate
- Acomé
- Achiguate

5.1.3. Región III: Pacífico suroriental

Región perteneciente a la vertiente del Pacífico, formada por las cuencas:

- María Linda
- Paso Hondo
- Los Esclavos
- Paz

5.1.4. Región IV: Altiplano oriental

Esta región es la que posee menor área de la vertiente del Pacífico y está formada simplemente por dos cuencas, las cuales son:

- Ostúa – Güija
- Olopa

5.1.5. Región V: Motagua

Esta región pertenece a la vertiente del Caribe y está formada por las cuencas:

- Grande de Zacapa
- Motagua

5.1.6. Región VI: Polochic–Cahabón y Bajo Motagua

Región que pertenece a la vertiente del Caribe, la cual está formada por las cuencas:

- Río Dulce
- Polochic
- Cahabón
- Sarstún
- Vertiente Belice

5.1.7. Región VII: Planicie del Petén

Región que pertenece a la vertiente del golfo de México, la cual está formada por las cuencas:

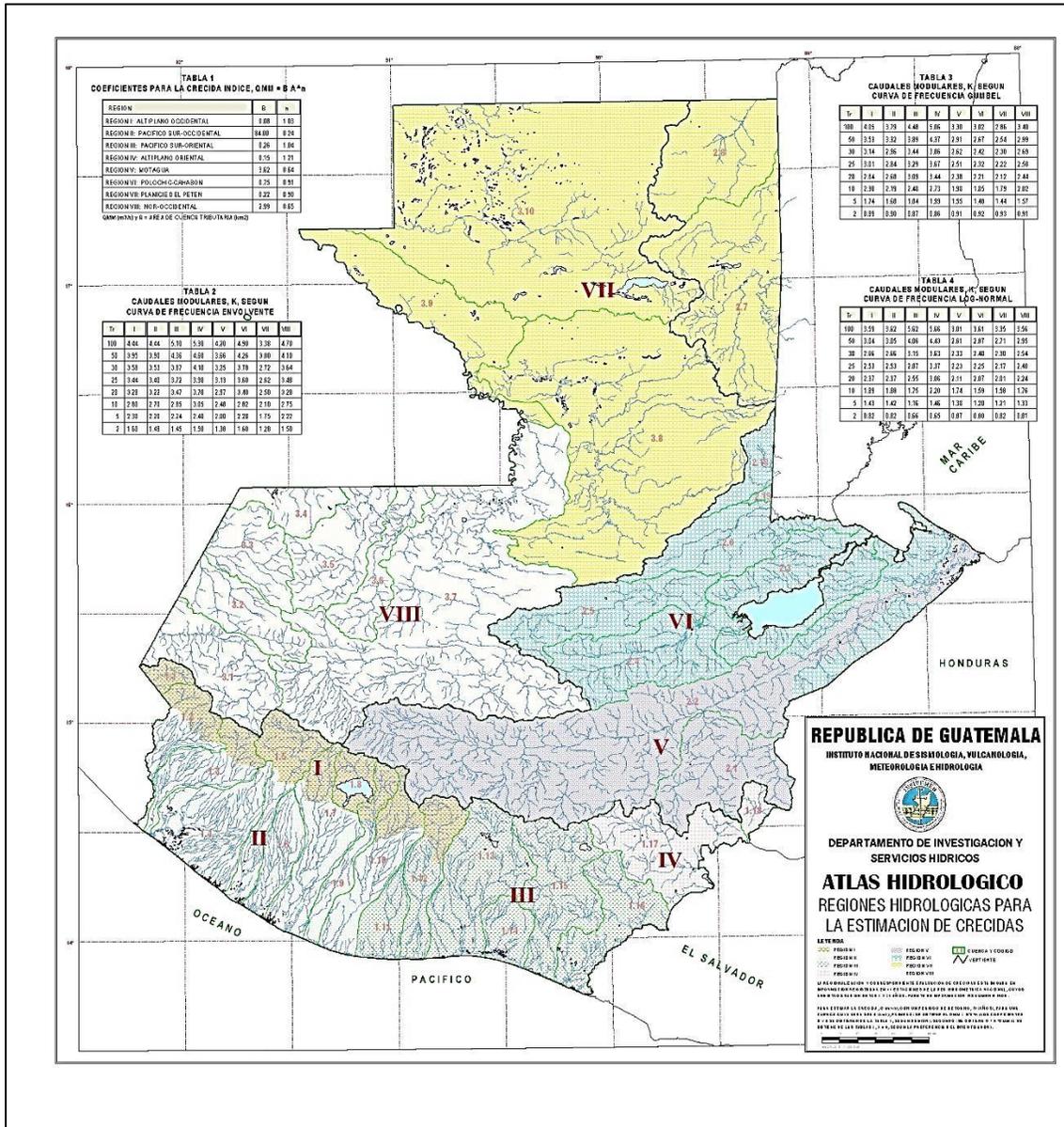
- La Pasión
- Usumacinta
- San Pedro

5.1.8. Región VIII: noroccidental

Región que pertenece a la vertiente del golfo de México, la cual está formada por las siguientes cuencas:

- Cuilco
- Selegua
- Nentón
- Pojom
- Ixcán
- Xaclbal
- Chixoy

Figura 2. Regiones hidrológicas de la República de Guatemala



Fuente: Insivumeh. www.Insivumeh.gob.gt. Consulta: julio de 2014.

6. ANÁLISIS DE FRECUENCIA REGIONAL

6.1. Análisis por medio del método de los trazos multidimensionales

La heterogeneidad de los grupos se evalúa mediante una técnica propuesta por Andrews en 1972, en el que un punto en el espacio multidimensional se representa por una curva de dos dimensiones con la siguiente función:

$$f(t) = \frac{x_1}{\sqrt{2}} + x_2 \sin(t) + x_3 \cos(t) + x_4 \sin(2t) + x_5 \cos(2t)$$

(Ec. 29)

Donde: x_1, x_2, \dots son las características fisiográficas y/o meteorológicas obtenidas del análisis de regresión y la función se evalúa en el rango $-\pi \leq t \leq \pi$.

El hecho de que esta función preserva las distancias la hace una técnica ideal de comparación visual para la formación de grupos homogéneos. Los racimos de cuencas con comportamientos similares aparecen como una banda de curvas muy próximas unas de otras.

Una característica del método, que no se identifica en forma inmediata, consiste en que los resultados que se obtienen dependen del tipo y del ordenamiento de las variables seleccionadas. Las primeras variables son asociadas con componentes cíclicas de baja frecuencia y las últimas de alta frecuencia. Las bajas frecuencias son más fáciles de observar, de esta manera,

x_1 representará a aquella que en el análisis de regresión resultó más significativa desde el punto de vista estadístico, x_2 a la segunda y así sucesivamente.

Para realizar el análisis se utilizarán datos proporcionados por diferentes estaciones hidrométricas ubicadas en diferentes cuencas de la vertiente del Pacífico que se detallan en la siguiente tabla:

Tabla VI. **Estaciones hidrométricas**

ESTACIÓN HIDROMÉTRICA	CUENCA
AGUA CALIENTE	MARIA LINDA
ALOTENANGO	ACHIGUATE
CABALLO BLANCO	OCOSITO
CANDELARIA	SAMALÁ
CANTEL II	SAMALÁ
COATEPEQUE	SAMALÁ
CUNLAJ	COATÁN
GUACAMAYAS II	MARIA LINDA
LA GOMERA	ACOMÉ
LAS CRUCES	OSTUA- GUIJA
LAS LECHUZAS	OSTUA- GUIJA
MALACATÁN	SUCHIATE
MELENDREZ II	NARANJO
MONTECRISTO	NAHUALATE
PAJAPITA	NARANJO

Fuente: elaboración propia.

6.1.1. Regiones homogéneas

Evaluando la ecuación:

$$f(t) = \frac{x_1}{\sqrt{2}} + x_2 \sin(t) + x_3 \cos(t) + x_4 \sin(2t) + x_5 \cos(2t)$$

(Ec. 30)

Donde:

x_1 : Crecida máxima probable para cierto período de retorno de la cuenca bajo análisis.

x_2 : Área de la cuenca bajo análisis.

x_3 : Perímetro de la cuenca bajo análisis.

x_4 : Diferencia de altura entre el punto más alto y el punto más bajo de la cuenca bajo análisis.

x_5 : Longitud del flujo más largo de la cuenca bajo análisis.

t : Intervalo de análisis entre $-\pi \leq t \leq \pi$.

Evaluando para períodos de retorno de 2, 10, 25, 30, 50, 75 y 100 años (aplicando la distribución normal):

Tabla VII. Crecidas máximas para periodos de retorno

Probabilidad	Periodo de Retorno	AGUA CALIENTE	ALOTENANGO	CABALLO BLANCO	CANDELARIA
0.50	2	77.74	15.02	704.19	69.98
0.80	5	185.84	26.60	929.51	109.56
0.90	10	242.34	32.65	1047.29	130.25
0.93	15	270.54	35.67	1106.06	140.58
0.95	20	289.00	37.65	1144.55	147.34
0.96	25	302.60	39.11	1172.89	152.31
0.97	30	313.29	40.25	1195.17	156.23
0.98	50	341.52	43.27	1254.02	166.57
0.99	75	362.41	45.51	1297.56	174.21
0.99	100	376.53	47.02	1327.00	179.39
0.998	500.00	447.40	54.62	1474.74	205.34

CANTEL II	COATEPEQUI	CUNLAJ	GUACAMAYAS II	LA GOMERA	LAS CRUCES	LAS LECHUZAS	MALACATAN	MELENDREZ II	MONTECRISTO	PAJAPITA
66.14	282.26	36.27	218.09	94.88	564.01	742.76	291.91	311.81	302.18	421.02
113.21	416.61	50.66	377.50	125.18	967.56	1502.01	483.21	506.33	439.08	750.90
137.82	486.84	58.18	460.83	141.02	1178.50	1898.88	583.20	608.01	510.64	923.34
150.09	521.89	61.94	502.41	148.92	1283.76	2096.93	633.11	658.75	546.35	1009.39
158.14	544.84	64.40	529.64	154.09	1352.70	2226.63	665.78	691.98	569.73	1065.75
164.06	561.73	66.21	549.69	157.90	1403.45	2322.10	689.84	716.44	586.95	1107.23
168.71	575.02	67.63	565.45	160.90	1443.35	2397.18	708.76	735.68	600.48	1139.85
181.01	610.11	71.39	607.09	168.81	1548.76	2595.50	758.73	786.49	636.24	1226.02
190.10	636.07	74.17	637.89	174.67	1626.73	2742.20	795.69	824.07	662.69	1289.76
196.25	653.63	76.05	658.73	178.63	1679.47	2841.42	820.69	849.49	680.58	1332.87
227.12	741.72	85.48	763.25	198.49	1944.06	3339.23	946.11	977.03	770.34	1549.16

ESTACIÓN	AGUA CALIENTE	ALOTENANGO	CABALLO BLANCO	CANDELARIA II	CANTEL II	COATEPEQUE
AREA (Km2)	247,2	389,81	456,37	844,03	635,33	531,71
PERÍMETRO	88,34	97,1	128,47	178,03	156,15	142,21
LONGITUD DE CAUCE PRINCIPAL	26,06	47,67	63,2	78,36	48,92	56,87
DIFERENCIA DE ELEVACIÓN	1287	2623	3322	3081	1457	3299

CUNLAJ	GUACAMAYAS II	LA GOMERA	LAS CRUCES	LAS LECHUZAS	MALACATAN	MELENDREZ II	MONTECRISTO	PAJAPITA
140.35	667.57	59.03	1550.15	879.38	450.81	153.65	119.69	188.12
64.25	168.76	72.53	273.37	193.96	119.6	75.21	58.1	71.46
25.89	69.22	35.93	96.76	84.07	46.46	40.98	25.35	36
1580	2531	464	2178	2145	3863	1057	2623	2174

Fuente: elaboración propia.

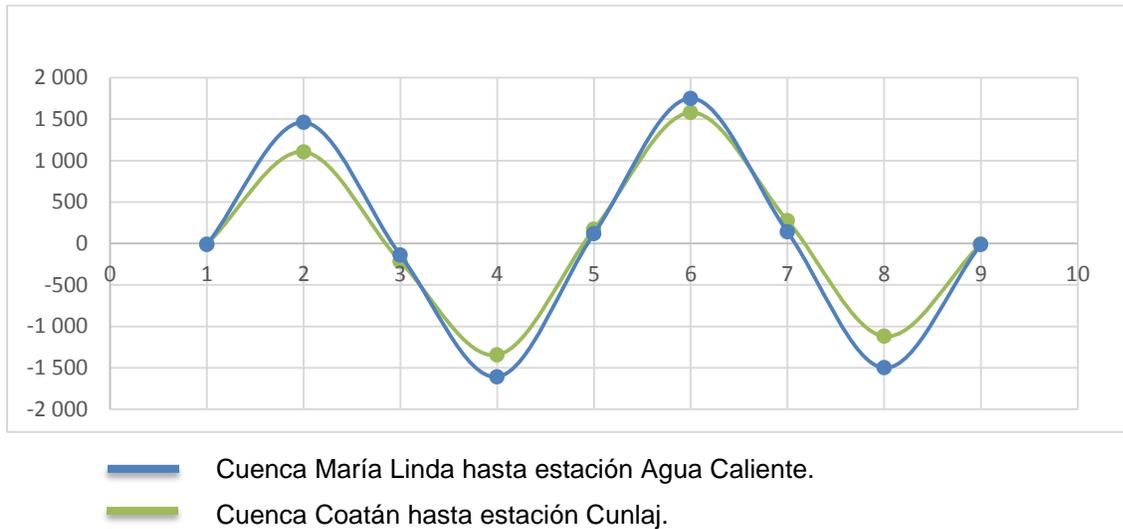
Evaluando para un período de retorno igual a dos años y elaborando las respectivas gráficas de dispersión con los valores obtenidos, se logra observar el comportamiento y se puede determinar visualmente las cuencas pertenecientes a cada zona homogénea.

Tabla VIII. Valores de los trazos multidimensionales, basado en Ec. 30

CUENCA	VALORES DE TRAZOS MULTIDIMENSIONALES									
AGUA CALIENTE	-7.36872875	1104.710518	-218.2868729	-1344.35786	169.373127	1579.23574	276.113127	-1119.65689	7.30687288	
ALOTENANGO	-38.80611336	2289.326519	-426.8561184	-2819.35334	155.393882	2977.92124	357.763882	-2405.39892	-38.8061184	
CABALLO BLANCO	432.6667755	3406.392446	-21.63322446	-3655.92354	689.606776	4233.48111	891.106776	-2592.202911	432.666776	
CANDELARIA	-50.1866982	2357.77745	-872.9066982	-3452.44981	305.873302	3803.18886	815.13302	-2510.585582	-50.1866982	
CANTELI	-60.46497038	908.7488154	-687.4849704	-1784.42174	251.83503	2098.78124	683.17503	-1036.048204	-60.4649704	
COATEPEQUE	114.247253	3022.053651	-388.992747	-3374.83084	398.667253	3975.12065	674.47253	-2823.994656	114.247253	
CUNJAJ	-12.71178555	1460.974194	-140.5917586	-1608.16258	115.788241	1750.32229	140.108241	-1500.540933	-12.7117856	
GUACAMAYAS II	54.6729791	2093.838304	-582.5770821	-2729.49902	392.192918	3276.38753	752.562918	-2024.075149	54.6729791	
LA GOMERA	30.49294305	438.0659749	-27.86705695	-387.361115	175.552943	624.119911	90.192943	-406.4529985	30.492943	
LAS CRUCES	222.2031199	1287.389762	-12.48.09688	-2682.00668	768.94312	3866.23648	1852.20312	-876.367084	222.20312	
LAS LECHUZAS	415.3217207	1911.245728	-438.2382793	-2104.45341	803.241721	3429.17771	1320.52172	-1135.123149	415.321721	
MALACATAN	133.2704526	3666.063674	-290.8595474	-3880.79038	372.470453	4472.75123	610.760453	-3422.38871	133.270453	
MELENDEZ II	186.2517869	1115.65329	25.85178699	-891.983669	336.671787	1439.31024	333.151787	-781.0527572	186.251787	
MONTECRISTO	180.9231112	2710.956597	68.63311119	-2452.8776	297.123111	2962.38963	308.013111	-2365.776182	180.923111	
PAJAPITA	262.2426159	2288.151838	73.58261587	-1938.78946	405.162616	2655.25339	449.822616	-1783.806307	262.242616	

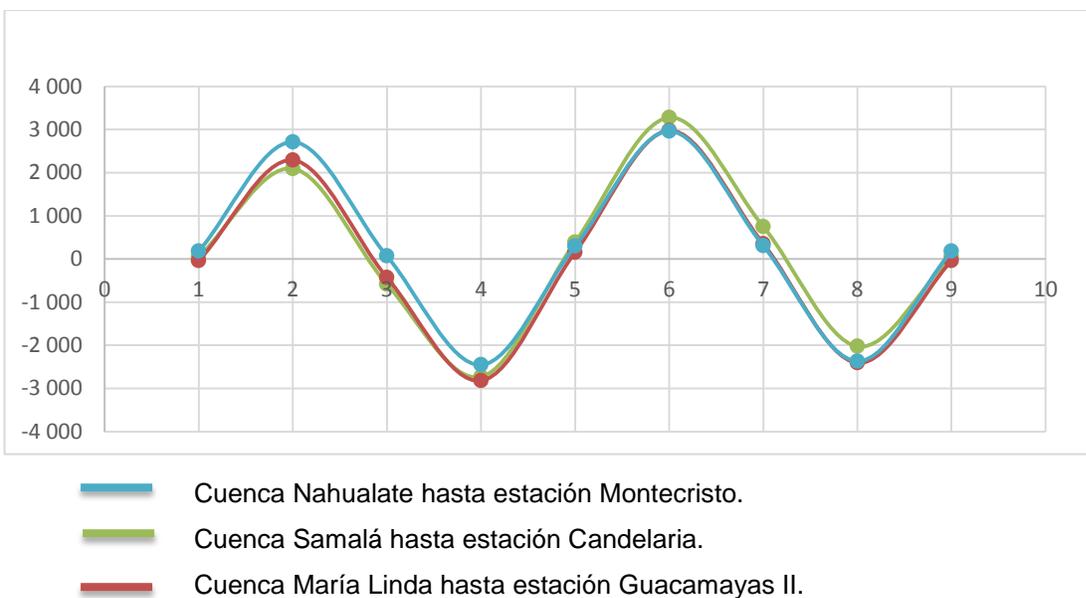
Fuente: elaboración propia.

Figura 3. **Región I (amarillo) – t=2 años**



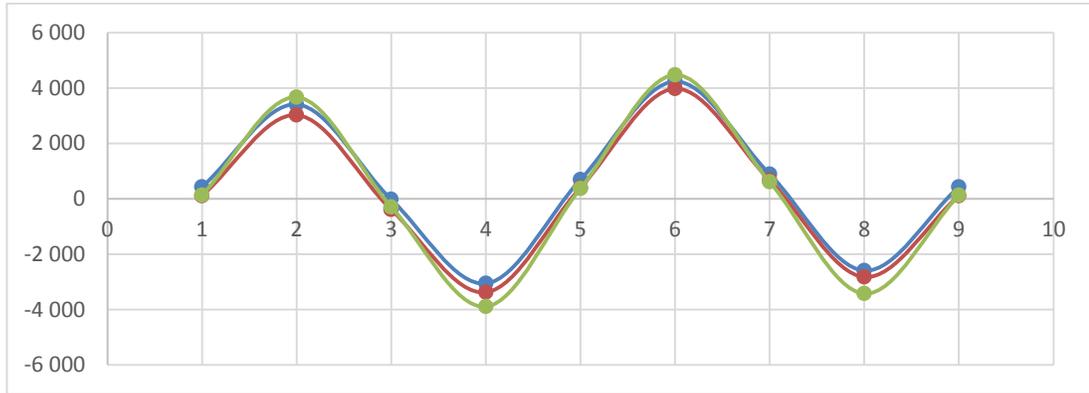
Fuente: elaboración propia.

Figura 4. **Región II (rojo) – t=2 años**



Fuente: elaboración propia.

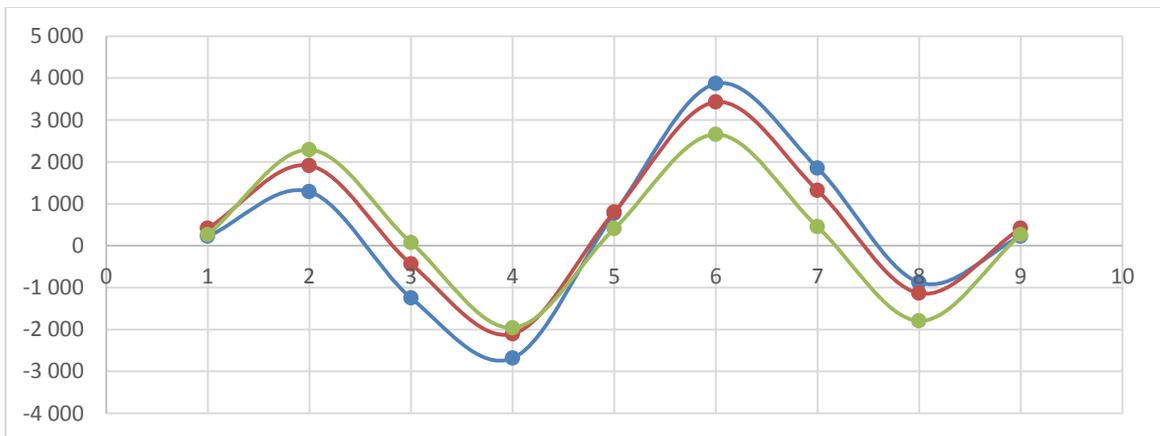
Figura 5. **Región III (verde) – t=2 años**



- Cuenca Ocosito hasta estación Caballo Blanco.
- Cuenca Suchiate hasta estación Malacatán.
- Cuenca Samalá hasta estación Coatepeque.

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Región IV (gris) – t=2 años**



- Cuenca Ostúa- Güija hasta estación Las Cruces.
- Cuenca Naranjo hasta estación Pajapita.
- Cuenca Ostúa- Güija hasta estación Las Lechuzas.

Fuente: elaboración propia.

Las cuencas de las estaciones La Gomera, Cantel II y Melendrez II tuvieron un comportamiento diferente al de las demás cuencas, agrupándolas en las Regiones II y IV (La Gomera, Cantel II zona II y Melendrez II en zona IV), dado su ubicación geográfica.

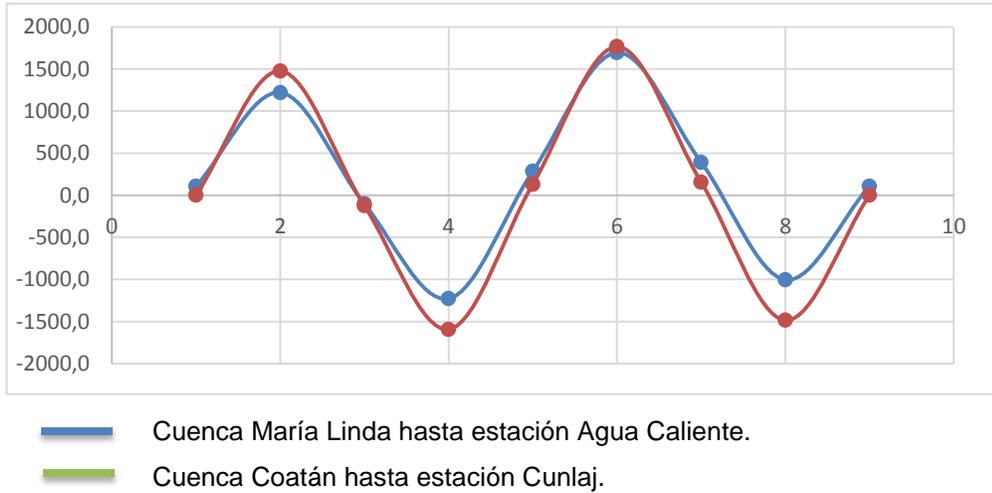
Evaluando para un período de retorno de diez años se obtienen los siguientes resultados y generan las siguientes graficas:

Tabla IX. **Cuencas: La Gomera, Cantel II y Melendrez II**

CUENCA	VALORES DE TRAZOS MULTIDIMENSIONALES									
AGUA CALIENTE	109.0814489	1221.09884	-101.8985511	-1227.96953	285.761449	1695.62406	392.501449	-1003.307568	109.081449	
ALOTENANGO	-26.34095966	2301.791678	-414.3909597	-2806.88819	167.85904	2990.3864	365.22904	-2392.933734	-26.3409597	
CABALLO BLANCO	675.2747382	3649.000408	220.9747382	-2813.31558	932.214738	4476.08907	1133.71474	-2349.594948	675.2747382	
CANDELARIA	-7.568758085	2400.395685	-830.2887581	-3409.83187	348.491242	3845.8068	857.771242	-2467.965642	-7.56875809	
CANTEL II	-9.779654693	959.4341311	-636.7996547	-1733.73642	302.520345	2149.46656	733.860345	-985.3628882	-9.77965469	
COATEPEQUE	258.9077807	3166.714379	-244.3322193	-3230.17031	543.327781	4119.78118	819.087781	-2679.334128	258.907781	
CUNLAJ	2.782760614	1476.468713	-125.0972394	-1592.66807	131.282761	1765.81681	155.602761	-1485.046413	2.78276061	
GUACAMAYAS II	226.316393	2265.481779	-410.933607	-2557.85554	563.836393	3448.23101	924.206393	-1852.431674	226.316393	
LA GOMERA	63.11319187	470.6862237	4.75319187	-354.740867	208.173192	656.74016	122.813192	-373.8327497	63.1131919	
LAS CRUCES	656.7149432	1721.901586	-813.5850568	-2247.49485	1203.45494	4300.7483	2286.71494	-441.8552607	656.714943	
LAS LECHUZAS	1232.822655	2728.746663	379.2626553	-1286.95247	1620.74266	4246.67865	2138.02266	-317.6222147	1232.82266	
MALACATAN	339.248128	3872.047349	-84.88187195	-3684.81271	578.448128	4678.72891	816.738128	-3216.411035	339.248128	
MELENDREZ II	395.6991156	1325.100658	235.2991156	-682.53634	546.119116	1648.75757	542.599116	-571.6054285	395.699116	
MONTECRISTO	328.3244574	2858.357943	216.0344574	-2305.47625	444.524457	3109.79097	455.414457	-2218.374836	328.324457	
PAJAPITA	617.4417297	2643.350951	428.7817297	-1603.58935	760.36173	3010.45251	805.02173	-1438.607193	617.44173	

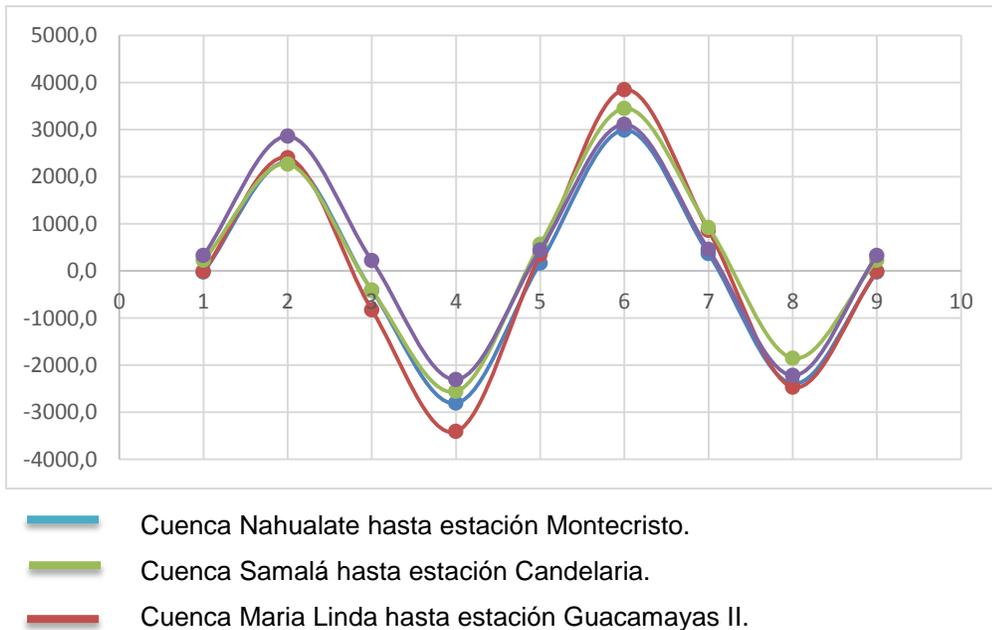
Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Región I (amarillo) – t=10 años**



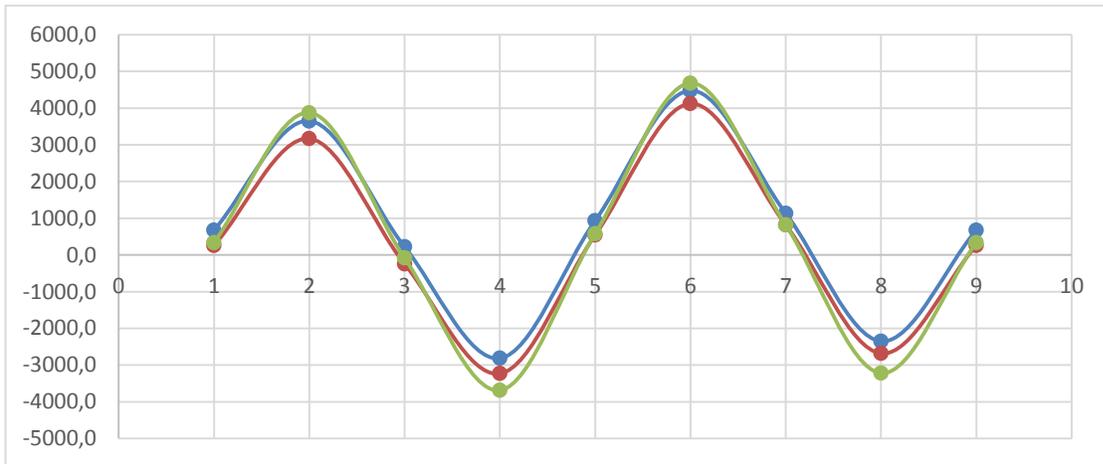
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Región II (rojo) – t=10 años**



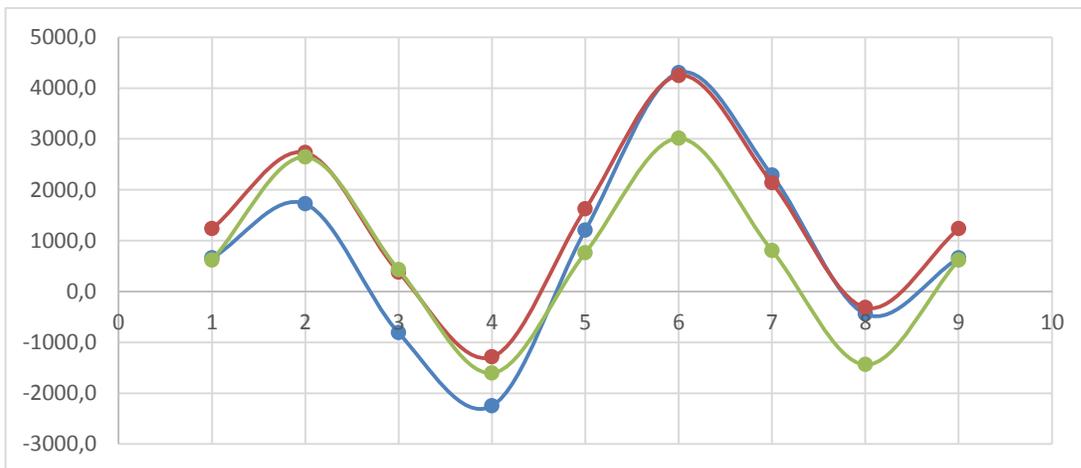
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Región III (verde) – t=10 años**



- Cuenca Ocosito hasta estación Caballo Blanco.
- Cuenca Suchiate hasta estación Malacatán.
- Cuenca Samalá hasta estación Coatepeque.

Figura 10. **Región IV (gris) – t=10 años**



- Cuenca Ostúa- Güija hasta estación Las Cruces.
- Cuenca Naranjo hasta estación Pajapita.
- Cuenca Ostúa- Güija hasta estación Las Lechuzas.

Fuente: elaboración propia.

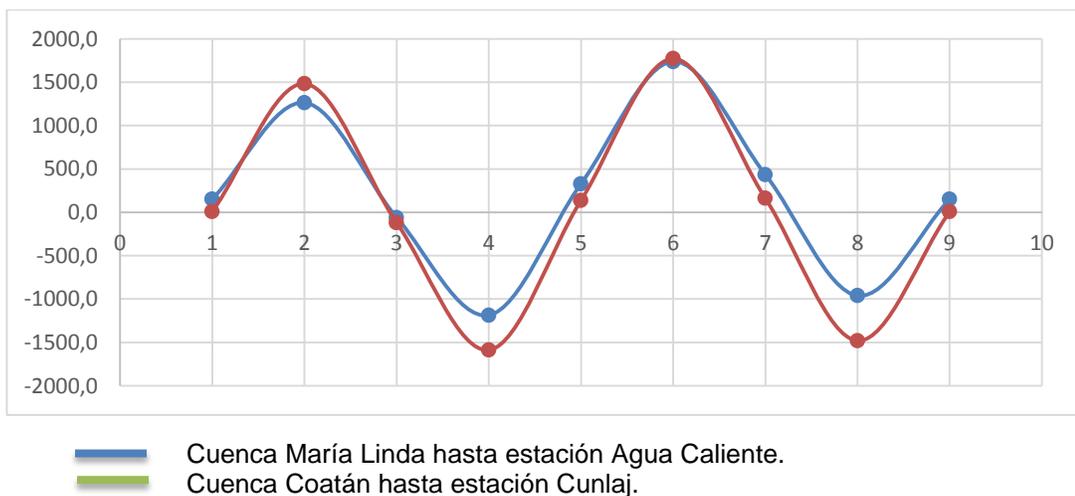
Para un período de retorno de veinticinco años se obtienen los siguientes resultados de datos y graficas:

Tabla X. **Valores de los trazos multidimensionales (25 años)**

CUENCA	VALORES DE TRAZOS MULTIDIMENSIONALES									
AGUA CALIENTE	151.6874425	1263.704833	-59.29255753	-1185.36354	328.367442	1738.23005	435.107442	-960.7015743	151.687442	
ALOTENANGO	-21.77786893	2306.354768	-409.8278689	-2802.32509	172.422131	2994.94949	369.792131	-2388.370643	-21.77786893	
CABALLO BLANCO	764.0856528	3737.811323	309.7856528	-2724.50466	1021.02565	4564.89998	1222.52565	-2260.784034	764.0856528	
CANDELARIA	8.032288963	2415.996732	-814.687711	-3394.23083	364.092289	3861.40785	873.372289	-2452.364595	8.032288963	
CANTEL II	8.77459717	977.9883829	-618.2454028	-1715.18217	321.074597	2168.02081	752.414597	-966.8086364	8.77459717	
COATEPEQUE	311.8633129	3219.669911	-191.3766871	-3177.21478	596.283313	4172.73671	872.043313	-2626.378596	311.8633129	
CUNLAJ	8.454802056	1482.140755	-119.4251979	-1586.99602	136.954802	1771.48885	161.274802	-1479.374372	8.454802056	
GUACAMAYAS II	289.1495079	2328.314894	-348.1004921	-2495.02243	626.669508	3511.06412	987.039508	-1789.598559	289.1495079	
LA GOMERA	75.05440806	482.6274399	16.69440806	-342.79965	220.114408	668.681376	134.754408	-361.8915335	75.05440806	
LAS CRUCES	815.7756435	1880.962286	-654.5243565	-2088.43415	1362.51564	4459.809	2445.77564	-282.7945604	815.7756435	
LAS LECHUZAS	1532.08326	3028.007268	678.5232603	-987.69187	1920.00326	4545.93925	2437.28326	-18.36160971	1532.08326	
MALACATAN	414.6498813	3947.449102	-9.480118693	-3609.41096	653.849881	4754.13066	892.139881	-3141.009282	414.6498813	
MELENDEZ II	472.3709965	1401.772539	311.9709965	-605.864459	622.790996	1725.42945	619.270996	-494.9335476	472.3709965	
MONTECRISTO	382.2833144	2912.3168	269.9933144	-2251.51739	498.483314	3163.74983	509.373314	-2164.415979	382.2833144	
PAJAPITA	747.4686168	2773.377838	558.8086168	-1473.56246	890.388617	3140.4794	935.048617	-1308.580306	747.4686168	

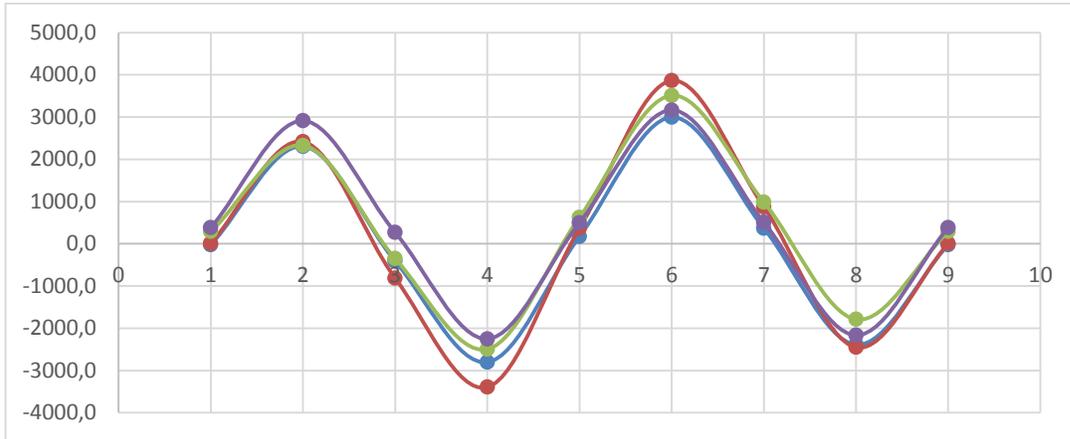
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Región I (amarillo) – t=25 años**



Fuente: elaboración propia.

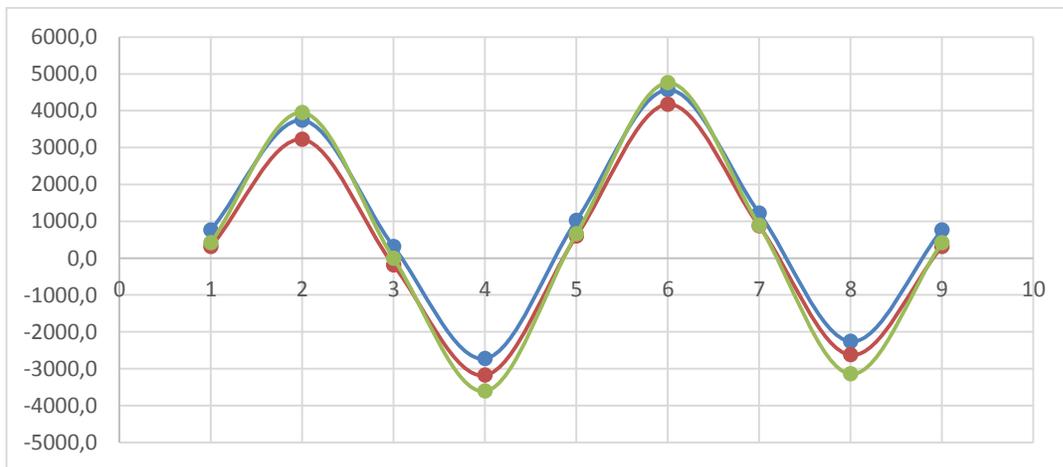
Figura 12. **Región II (rojo) – t=25 años**



- Cuenca Nahualate hasta estación Montecristo.
- Cuenca Samalá hasta estación Candelaria.
- Cuenca María Linda hasta estación Guacamayas II.

Fuente: elaboración propia.

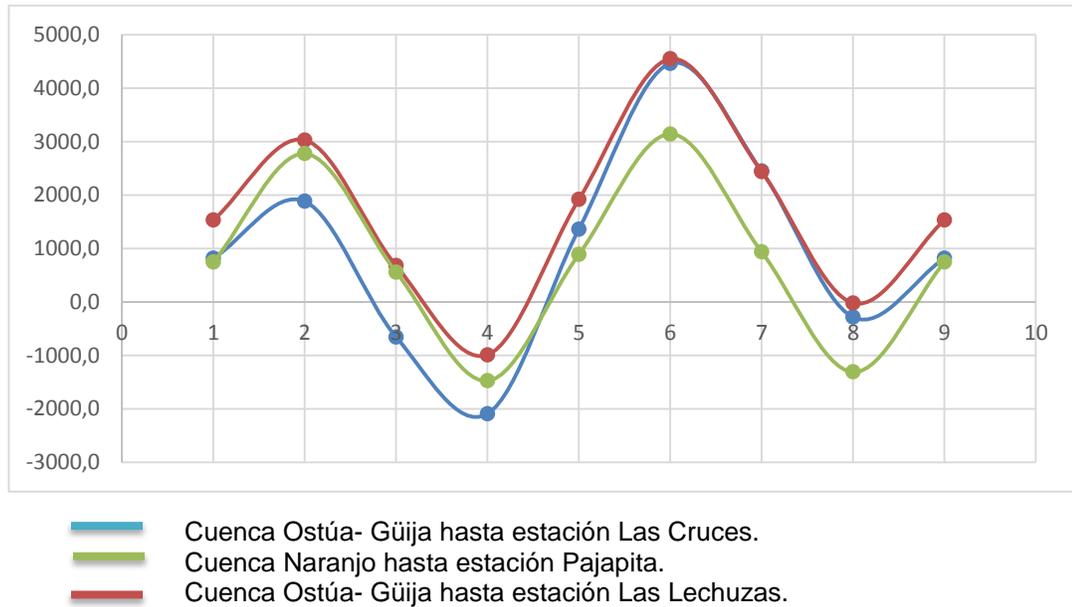
Figura 13. **Región III (verde) – t=25 años**



- Cuenca Ocosito hasta estación Caballo Blanco.
- Cuenca Suchiate hasta estación Malacatán.
- Cuenca Samalá hasta estación Coatepeque.

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Región IV (gris) – t=25 años



Fuente: elaboración propia.

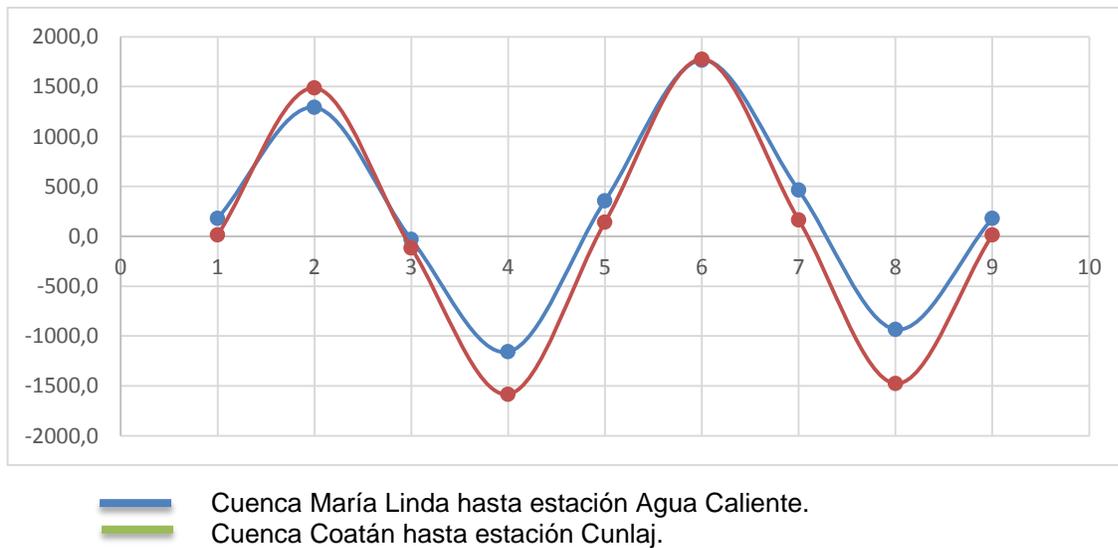
Y debido a que las zonas no demuestran cambios significativos en su comportamiento se evalúan a un período de retorno de cincuenta años para obtener los datos y graficas generadas:

Tabla XI. Valores de los trazos multidimensionales (50 años)

CUENCA	VALORES DE TRAZOS MULTIDIMENSIONALES									
AGUA CALIENTE	179.2110913	1291.228482	-31.76890869	-1157.83989	355.891091	1765.7537	462.631091	-933.1779254	179.211091	
ALOTENANGO	-18.83009337	2309.302544	-406.8800934	-2799.37732	175.369907	2997.89727	372.739907	-2385.422867	-18.8300934	
CABALLO BLANCO	821.4578725	3795.183543	367.1578725	-2667.13244	1078.39787	4622.2722	1279.89787	-2203.411814	821.457873	
CANDELARIA	18.11063016	2426.075073	-804.6093698	-3384.15249	374.17063	3871.48619	883.45063	-2442.286254	18.1106302	
CANTEL II	20.76072094	989.9745067	-606.2592791	-1703.19605	333.060721	2180.00694	764.400721	-954.8225126	20.7607209	
COATEPEQUE	346.0728067	3253.879405	-157.1671933	-3143.00528	630.492807	4206.94621	906.252807	-2592.169102	346.072807	
CUNLAJ	12.11896439	1485.804917	-115.7610356	-1583.33186	140.618964	1775.15301	164.938964	-1475.71021	12.1189644	
GUACAMAYAS II	329.7399612	2368.905347	-307.5100388	-2454.43197	667.259961	3551.65458	1027.62996	-1749.008105	329.739961	
LA GOMERA	82.76848332	490.3415152	24.40848332	-335.085575	227.828483	676.395451	142.468483	-354.1774582	82.7684833	
LAS CRUCES	918.5295166	1983.716159	-551.7704834	-1985.68028	1465.26952	4562.56287	2548.52952	-180.0406874	918.529517	
LAS LECHUZAS	1725.406854	3221.330862	871.8468543	-794.368276	2113.32685	4739.26285	2630.60685	174.9619842	1725.40685	
MALACATAN	463.3597271	3996.158948	39.22972712	-3560.70111	702.559727	4802.84051	940.849727	-3092.299436	463.359727	
MELENDREZ II	521.90135	1451.302892	361.50135	-556.334106	672.32135	1774.95981	668.80135	-445.4031941	521.90135	
MONTECRISTO	417.1409602	2947.174446	304.8509602	-2216.65975	533.34096	3198.60747	544.23096	-2129.558333	417.14096	
PAJAPITA	831.4665259	2857.375748	642.8065259	-1389.56455	974.386526	3224.4773	1019.04653	-1224.582397	831.466526	

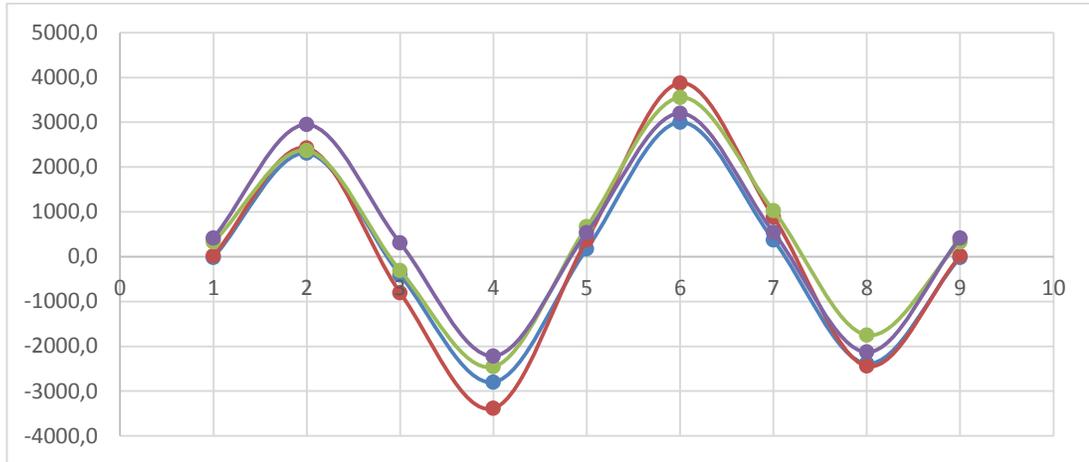
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Región I (amarillo) – t=50 años



Fuente: elaboración propia.

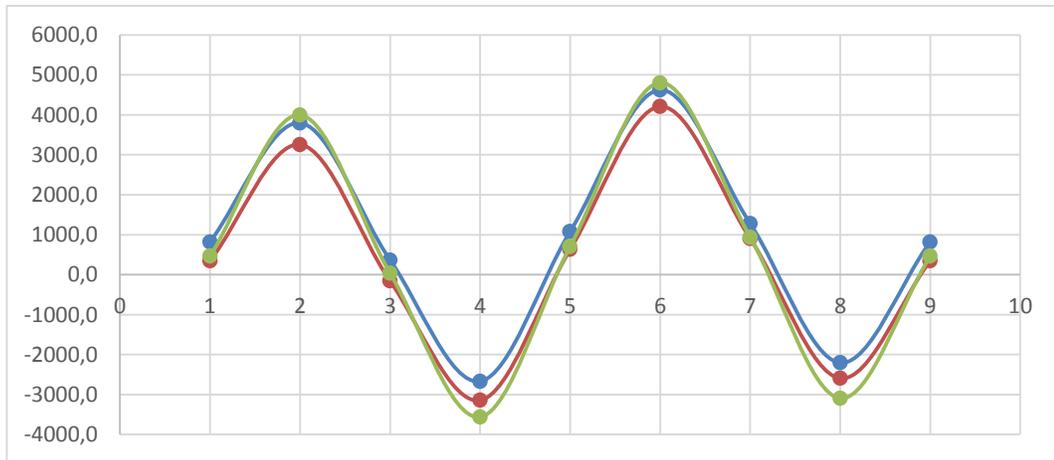
Figura 16. **Región IV (rojo) – t=50 años**



- Cuenca Nahualate hasta estación Montecristo.
- Cuenca Samalá hasta estación Candelaria.
- Cuenca María Linda hasta estación Guacamayas II.

Fuente: elaboración propia.

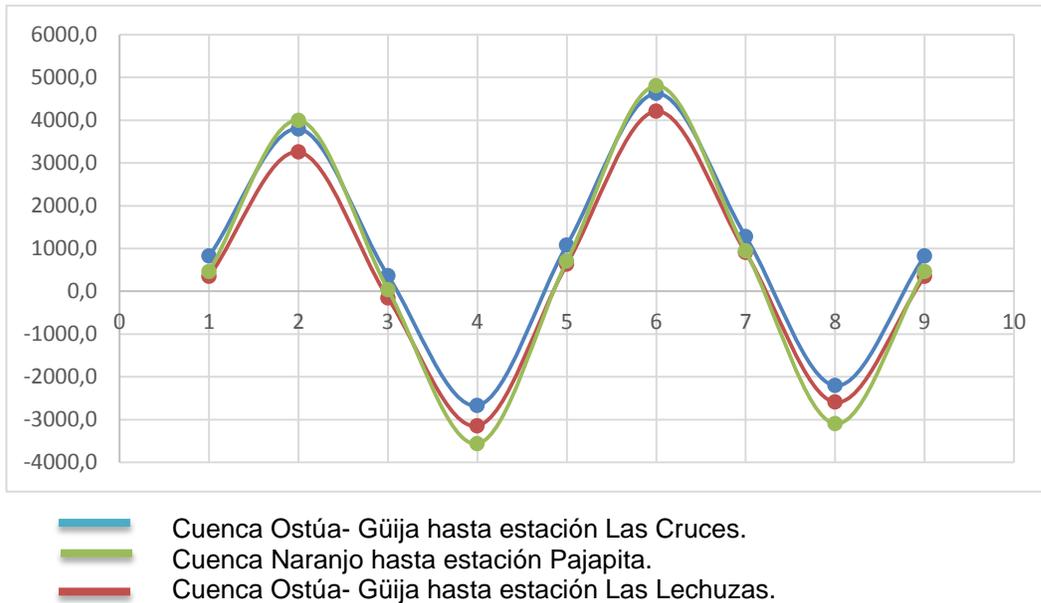
Figura 17. **Región III (verde) –t=50 años**



- Cuenca Ocosito hasta estación Caballo Blanco.
- Cuenca Suchiate hasta estación Malacatán.
- Cuenca Samalá hasta estación Coatepeque.

Fuente: elaboración propia.

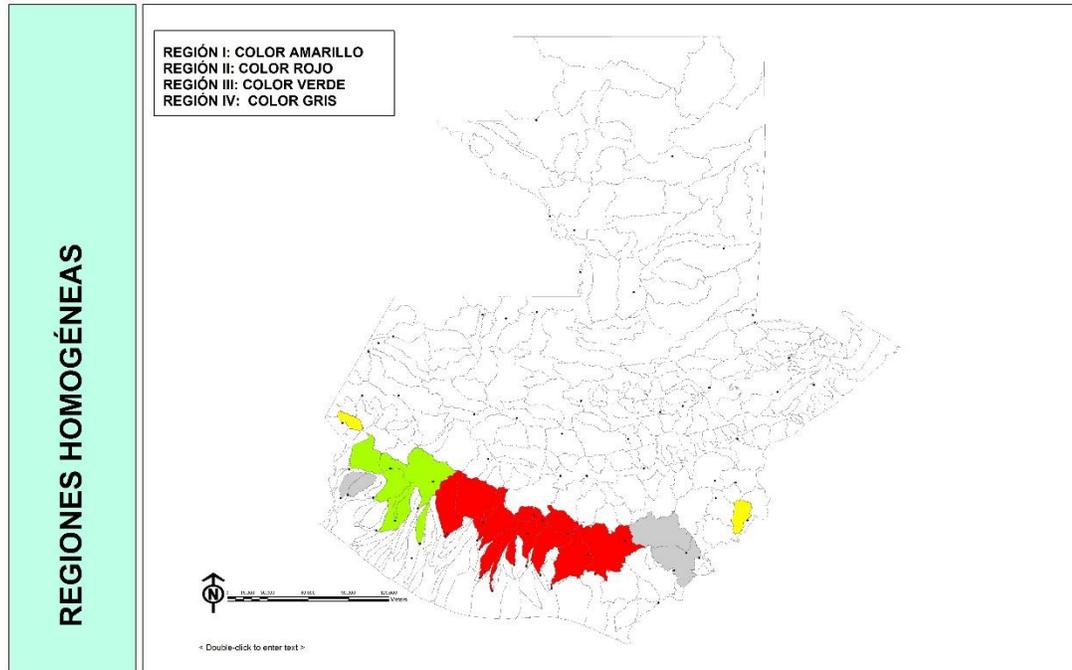
Figura 18. Región III (verde) – t=50 años



Fuente: elaboración propia.

Con la ayuda de las gráficas, se puede determinar visualmente cómo se ajusta cada trazo multidimensional a cada región homogénea que se presentan en la tabla XII.

Tabla XII. **Regiones homogéneas**



Fuente: elaboración propia.

Se determinaron cuatro regiones homogéneas en el análisis.

6.2. Método de las estaciones-año

Para la estimación de los caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno, en cualquier sitio de interés y en cualquier región del país, se usó la siguiente expresión:

$$QTr = QMM * KTr \quad (\text{Ec. 32})$$

Donde QTr es el caudal para el período de retorno, Tr , QMM es la crecida índice o caudal índice y KTr es un valor de ajuste adimensional.

QMM es obtenido a partir de una serie de datos anuales de crecidas máximas, proporcionada por el Insivumeh, válido para la región a la que pertenece la cuenca de interés y es el promedio de los caudales máximos anuales. KTr se obtiene de acuerdo con la región y la curva de frecuencia que se estime conveniente, estos valores han sido proporcionados por el Insivumeh, luego del análisis presentado.

Para QMM y KTr se realizó el mismo análisis estadístico, QMM por cuenca y KTr por región.

En la siguiente tabla se muestran los valores de los caudales máximos anuales para las estaciones y los años que poseen registro

6.3. Caudales modulares

Los caudales modulares que son el resultado de la relación entre el caudal medio anual y el caudal máximo de cada año de la misma estación:

$$K_{ij} = \frac{QMM_{ij}}{Qmax_{ij}}$$

Tabla XIII. Caudales máximos anuales

NOMBRE	AGUA CALIENTE	ALOTENANGO	CABALLO BLANCO	CANDELARIA II	CANTEL II	COATEPEQUE	CUNLAJ	GUACAMAYAS II	LA GOMERA
AREA	343	328	461	861	701	501	141	672	212
QMM	78	15	704	70	85	282	36	218	95
1962									
1963	52								
1964	32				57				
1965	21				70				
1966	32			37	50				
1967	13			38	21				
1968	13			45	30			174	
1969	17		488	25	52			692	
1970	15		710	136	88	389		164	
1971	24			148	35				
1972	44		1011	89	24	168	44	137	66
1973	25	13	610	183	223	309	58	378	72
1974	54	9	1095	114	46	662	33	300	92
1975	16	5	693	23	88	271	9	135	148
1976	13	7	831	51	508	279	8	126	149
1977		5	1032	38	114	93	27	50	92
1978	74	4		45	94			77	
1979	457	7	715	25	220		55	457	91
1980	73	4	789	50	15	162		61	51
1981	78	23	1018	51	26	187		86	
1982	460	26		72	24				
1983		14	828	44	24		49		
1984		19	666	29	38				
1985		27	389	147	82		39		
1986									
1987									
1988									
1989									
1990									
1991									
1992									
1993				78					
1994									
1995			645						
1996									
1997									
1998		58	364	109	61	302	49		
1999		10	88				27		
2000		8		33	40				
2001									
2002	57								
2003	62								

Tabla XIV. Caudales modulares

Año	AGUA CALIENTE	ALOTENANGO	CABALLO BLANCO	CANDELARIA II	CANTEL II	COATEPEQUE	CUNLAJ	GUACAMAYAS II	LA GOMERA
1962									
1963	0.674								
1964	0.415				0.669				
1965	0.274				0.822				
1966	0.415			0.528	0.585				
1967	0.165			0.537	0.249				
1968	0.165			0.639	0.347			0.796	
1969	0.224		0.693	0.357	0.612			3.172	
1970	0.199		1.008	1.940	1.033	1.379		0.751	
1971	0.308			2.114	0.414				
1972	0.567		1.436	1.274	0.286	0.596	1.230	0.628	0.692
1973	0.315	0.873	0.866	2.616	2.624	1.097	1.609	1.732	0.753
1974	0.698	0.630	1.555	1.635	0.542	2.348	0.915	1.376	0.964
1975	0.208	0.346	0.985	0.327	1.029	0.961	0.250	0.617	1.554
1976	0.163	0.470	1.180	0.727	5.976	0.989	0.232	0.578	1.568
1977		0.323	1.466	0.537	1.341	0.330	0.747	0.231	0.965
1978	0.954	0.296		0.636	1.100			0.351	
1979	5.879	0.492	1.016	0.357	2.588		1.531	2.096	0.958
1980	0.934	0.233	1.121	0.714	0.171	0.573		0.280	0.537
1981	1.003	1.503	1.446	0.730	0.311	0.664		0.396	
1982	5.915	1.760		1.033	0.278				
1983		0.947	1.176	0.627	0.285		1.363		
1984		1.292	0.946	0.416	0.448				
1985		1.785	0.552	2.104	0.968		1.088		
1986									
1987									
1988									
1989									
1990									
1991									
1992									
1993				1.116					
1994									
1995			0.916						
1996									
1997									
1998		3.848	0.517	1.553	0.718	1.072	1.361		
1999		0.680	0.126				0.758		
2000		0.548		0.476	0.476				
2001									
2002	0.732								
2003	0.792								

Continuación de la tabla XIV.

Año	LAS CRUCES	LAS LECHUZAS	MALACATAN	MELENDREZ II	MONTECRISTO	PAJAPITA	PUENTE COYOLATE	SAN MIGUEL MOCÁ
1962								
1963								
1964								
1965		0.166						
1966		0.388						
1967	0.189	0.181						
1968		1.334						
1969	0.335	1.478						
1970		2.144						1.207
1971	1.000	4.416				0.767		
1972	1.925	0.360			0.812	0.751	0.424	0.337
1973	2.583	1.389		0.742	1.766	0.765	2.453	1.041
1974	1.918		2.318	0.761	2.055	1.079	0.696	1.223
1975	1.918		1.185	0.524	0.271	0.136	0.315	0.242
1976	1.333	0.218	1.031	0.545	0.457	0.073	0.403	0.485
1977	0.186	0.345	0.394	0.776	0.914	0.384	0.684	0.179
1978		0.190	2.783	0.363	0.586			4.758
1979	0.138		1.421	0.705	1.891	3.052	1.622	2.393
1980	0.099		0.395	1.864	1.229		1.141	0.498
1981	0.690	0.388	0.228		1.033		0.421	1.378
1982	0.684		0.327	2.810	0.998		2.311	0.603
1983			0.623	0.860	1.286	2.510	1.244	0.592
1984			0.773		1.124	1.813	2.107	0.856
1985			0.605	1.690	1.119	1.127	0.716	0.537
1986								
1987								
1988								
1989								
1990								
1991								
1992								
1993								
1994								
1995								
1996								
1997								
1998			0.913	0.353	0.818	0.346	0.545	
1999					0.330		0.413	0.372
2000					0.322	0.198	0.521	0.315
2001								
2002								
2003								

Fuente: elaboración propia.

6.3.1. Caudal índice QMM

Para determinar QMM se prefirió no realizar el cálculo de la manera tradicional que hubiera sido simplemente:

$$QMM = B A^n \quad (\text{Ec. 34})$$

Donde A es el área tributaria de la cuenca, B y n son parámetros de ajuste, obtenidos del método caudal Índice – área tributaria. En cambio se optó por realizar el método estadístico también para el caudal índice, ya que la comparación entre dos métodos similares daría una mejor perspectiva al comparar los resultados obtenidos.

Debido a esas razones, se determinaron los parámetros estadísticos aplicables a la hidrología, los cuales se aprecian en la tabla XVI.

Tabla XV. **Parámetros estadísticos**

Parametro	REGION I	REGION II	REGION III	REGION IV
Media	1.00	1.02	1.00	1.00
Des.Est.	1.35	0.88	0.57	0.93
Coefficiente Sesgo	3.18	2.77	1.24	1.53
α Gumbel	1.06	0.68	0.44	0.72
μ Gumbel	0.39	0.63	0.75	0.58
γ	0.49	0.26	0.17	0.44
Alfa	1.16	2.05	3.16	1.28
Beta	0.86	0.50	0.32	0.78
Alfa 3P	0.39	0.52	2.62	1.71
Beta 3P	2.16	1.21	0.35	0.71
Xo	0.15	0.39	0.09	-0.21
Media Ln	-0.49	-0.24	-0.17	-0.44
Des.Est. Ln	0.94	0.71	0.63	1.00
Coefficiente Sesgo Ln	0.55	0.30	-0.80	-0.18
Alfa 3P Ln	13.03	43.32	6.22	120.51
Beta 3P Ln	0.26	0.11	-0.25	-0.09
Xo Ln	-3.88	-4.92	1.39	10.57
α Log Gumbel	0.73	0.55	0.49	0.78
μ Log Gumbel	-0.91	-0.56	-0.45	-0.89
Años de registro	32.00	101.00	40.00	51.00
Maximo Registrado	5.91	6.01	2.78	4.42

Fuente: elaboración propia.

Ya obtenidos los parámetros, se procedió a calcular el valor del caudal índice para cada distribución estadística, datos que han sido ordenados en las siguientes tablas.

Tabla XVI. **Coefficientes regionales de ajuste para análisis de máximos (k)**

DISTRIBUCIÓN	Probabilidad	Periodo de Retorno	REGION I	REGION II	REGION III	REGION IV
DISTRIBUCIÓN NORMAL	0.50	2	1.00	1.02	1.00	1.00
DISTRIBUCIÓN NORMAL	0.80	5	2.14	1.76	1.48	1.78
DISTRIBUCIÓN NORMAL	0.90	10	2.73	2.14	1.72	2.19
DISTRIBUCIÓN NORMAL	0.93	15	3.03	2.33	1.85	2.39
DISTRIBUCIÓN NORMAL	0.95	20	3.23	2.46	1.93	2.52
DISTRIBUCIÓN NORMAL	0.96	25	3.37	2.55	1.99	2.62
DISTRIBUCIÓN NORMAL	0.97	30	3.48	2.62	2.04	2.70
DISTRIBUCIÓN NORMAL	0.98	50	3.78	2.82	2.16	2.90
DISTRIBUCIÓN NORMAL	0.99	75	4.00	2.96	2.25	3.05
DISTRIBUCIÓN NORMAL	0.99	100	4.15	3.06	2.32	3.15
DISTRIBUCIÓN NORMAL	0.998	500.00	4.90	3.54	2.63	3.66

DISTRIBUCIÓN	Probabilidad	Periodo de Retorno	REGION I	REGION II	REGION III	REGION IV
DISTRIBUCIÓN LOG NORMAL	0.50	2	0.61	0.78	0.85	0.65
DISTRIBUCIÓN LOG NORMAL	0.80	5	1.35	1.42	1.43	1.50
DISTRIBUCIÓN LOG NORMAL	0.90	10	2.04	1.95	1.89	2.33
DISTRIBUCIÓN LOG NORMAL	0.93	15	2.51	2.28	2.17	2.91
DISTRIBUCIÓN LOG NORMAL	0.95	20	2.87	2.52	2.37	3.36
DISTRIBUCIÓN LOG NORMAL	0.96	25	3.17	2.72	2.53	3.73
DISTRIBUCIÓN LOG NORMAL	0.97	30	3.42	2.88	2.67	4.06
DISTRIBUCIÓN LOG NORMAL	0.98	50	4.21	3.37	3.06	5.06
DISTRIBUCIÓN LOG NORMAL	0.99	75	4.90	3.78	3.39	5.96
DISTRIBUCIÓN LOG NORMAL	0.99	100	5.43	4.09	3.63	6.65
DISTRIBUCIÓN LOG NORMAL	0.998	500.00	9.12	6.05	5.13	11.57

DISTRIBUCIÓN	Probabilidad	Periodo de Retorno	REGION I	REGION II	REGION III	REGION IV
DISTRIBUCIÓN GAMMA	0.50	2	0.73	0.86	0.90	0.76
DISTRIBUCIÓN GAMMA	0.80	5	1.59	1.52	1.42	1.57
DISTRIBUCIÓN GAMMA	0.90	10	2.22	1.97	1.75	2.17
DISTRIBUCIÓN GAMMA	0.93	15	2.59	2.22	1.94	2.51
DISTRIBUCIÓN GAMMA	0.95	20	2.85	2.40	2.07	2.75
DISTRIBUCIÓN GAMMA	0.96	25	3.05	2.54	2.16	2.94
DISTRIBUCIÓN GAMMA	0.97	30	3.21	2.64	2.24	3.09
DISTRIBUCIÓN GAMMA	0.98	50	3.66	2.95	2.46	3.51
DISTRIBUCIÓN GAMMA	0.99	75	4.02	3.18	2.63	3.84
DISTRIBUCIÓN GAMMA	0.99	100	4.28	3.35	2.74	4.08
DISTRIBUCIÓN GAMMA	0.998	500.00	5.70	4.26	3.38	5.39

Continuación de la tabla XVI.

DISTRIBUCIÓN	Probabilidad	Periodo de Retorno	REGION I	REGION II	REGION III	REGION IV
DISTRIBUCIÓN GAMMA 3P	0.50	2	0.45	0.69	0.89	0.77
DISTRIBUCIÓN GAMMA 3P	0.80	5	1.52	1.43	1.41	1.64
DISTRIBUCIÓN GAMMA 3P	0.90	10	2.56	2.08	1.76	2.23
DISTRIBUCIÓN GAMMA 3P	0.93	15	3.22	2.49	1.95	2.57
DISTRIBUCIÓN GAMMA 3P	0.95	20	3.70	2.78	2.08	2.81
DISTRIBUCIÓN GAMMA 3P	0.96	25	4.08	3.01	2.18	2.99
DISTRIBUCIÓN GAMMA 3P	0.97	30	4.40	3.20	2.27	3.14
DISTRIBUCIÓN GAMMA 3P	0.98	50	5.31	3.74	2.49	3.55
DISTRIBUCIÓN GAMMA 3P	0.99	75	6.05	4.18	2.67	3.87
DISTRIBUCIÓN GAMMA 3P	0.99	100	6.58	4.49	2.79	4.10
DISTRIBUCIÓN GAMMA 3P	0.998	500.00	9.63	6.26	3.47	5.35

DISTRIBUCIÓN	Probabilidad	Periodo de Retorno	REGION I	REGION II	REGION III	REGION IV
DISTRIBUCIÓN LOG PEARSON III	0.50	2	0.56	0.76	#¡NUM!	#¡NUM!
DISTRIBUCIÓN LOG PEARSON III	0.80	5	1.30	1.41	#¡NUM!	#¡NUM!
DISTRIBUCIÓN LOG PEARSON III	0.90	10	2.13	1.99	#¡NUM!	#¡NUM!
DISTRIBUCIÓN LOG PEARSON III	0.93	15	2.75	2.37	#¡NUM!	#¡NUM!
DISTRIBUCIÓN LOG PEARSON III	0.95	20	3.27	2.67	#¡NUM!	#¡NUM!
DISTRIBUCIÓN LOG PEARSON III	0.96	25	3.73	2.92	#¡NUM!	#¡NUM!
DISTRIBUCIÓN LOG PEARSON III	0.97	30	4.14	3.13	#¡NUM!	#¡NUM!
DISTRIBUCIÓN LOG PEARSON III	0.98	50	5.49	3.77	#¡NUM!	#¡NUM!
DISTRIBUCIÓN LOG PEARSON III	0.99	75	6.80	4.34	#¡NUM!	#¡NUM!
DISTRIBUCIÓN LOG PEARSON III	0.99	100	7.89	4.78	#¡NUM!	#¡NUM!
DISTRIBUCIÓN LOG PEARSON III	0.998	500.00	17.18	7.87	#¡NUM!	#¡NUM!

DISTRIBUCIÓN	Probabilidad	Periodo de Retorno	REGION I	REGION II	REGION III	REGION IV
DISTRIBUCIÓN GUMBEL	0.50	2	0.78	0.88	0.91	0.85
DISTRIBUCIÓN GUMBEL	0.80	5	1.97	1.65	1.41	1.67
DISTRIBUCIÓN GUMBEL	0.90	10	2.77	2.16	1.74	2.21
DISTRIBUCIÓN GUMBEL	0.93	15	3.21	2.45	1.92	2.51
DISTRIBUCIÓN GUMBEL	0.95	20	3.53	2.65	2.05	2.73
DISTRIBUCIÓN GUMBEL	0.96	25	3.77	2.81	2.16	2.89
DISTRIBUCIÓN GUMBEL	0.97	30	3.96	2.94	2.24	3.03
DISTRIBUCIÓN GUMBEL	0.98	50	4.51	3.29	2.47	3.40
DISTRIBUCIÓN GUMBEL	0.99	75	4.94	3.57	2.65	3.70
DISTRIBUCIÓN GUMBEL	0.99	100	5.25	3.76	2.77	3.90
DISTRIBUCIÓN GUMBEL	1.00	500.00	6.95	4.87	3.48	5.07

Continuación de la tabla XVI.

DISTRIBUCIÓN	Probabilidad	Periodo de Retorno	REGION I	REGION II	REGION III	REGION IV
DISTRIBUCIÓN LOG GUMBEL	0.50	2	0.53	0.70	0.76	0.55
DISTRIBUCIÓN LOG GUMBEL	0.80	5	1.20	1.31	1.33	1.33
DISTRIBUCIÓN LOG GUMBEL	0.90	10	2.08	1.98	1.92	2.39
DISTRIBUCIÓN LOG GUMBEL	0.93	15	2.84	2.50	2.36	3.32
DISTRIBUCIÓN LOG GUMBEL	0.95	20	3.53	2.95	2.72	4.19
DISTRIBUCIÓN LOG GUMBEL	0.96	25	4.17	3.35	3.04	5.01
DISTRIBUCIÓN LOG GUMBEL	0.97	30	4.78	3.71	3.33	5.79
DISTRIBUCIÓN LOG GUMBEL	0.98	50	6.97	4.94	4.29	8.68
DISTRIBUCIÓN LOG GUMBEL	0.99	75	9.41	6.19	5.24	11.95
DISTRIBUCIÓN LOG GUMBEL	0.99	100	11.62	7.27	6.03	14.99
DISTRIBUCIÓN LOG GUMBEL	1.00	500.00	37.84	17.76	13.25	52.93

Fuente: elaboración propia.

6.3.2. Determinación de Q_{Tr}

Para obtener el valor del caudal Q , en el período de retorno Tr , es necesario determinar primero el valor del K_{Tr} , los cuales son determinados de la misma manera como lo fueron los Q_{MM} .

Primero fueron establecidos los parámetros estadísticos por región con la ayuda de los caudales modulares.

Ya obtenidos los coeficientes regionales de ajuste para el análisis de máximos, se procede a determinar los errores promedios multiplicando los caudales medios por el factor de ajuste de la región a la cual pertenece dicha cuenca y se ajustan las diferentes distribuciones estadísticas (Normal, Log Normal, Gamma, Gamma 3P, Log Pearson, Gumbel y Log Gumbel).

Tabla XVII. Tablas de error promedio por método estadístico

AGUA CALIENTE		
NORMAL		ERROR
77,74773834	77,74	0 %
166,3255458	185,84	10 %
212,6267352	242,34	12 %
235,7319913	270,54	13 %
250,8630567	289	13 %
262,0015659	302,6	13 %
270,7610927	313,29	14 %
293,8979116	341,52	14 %
311,012475	362,41	14 %
322,5880367	376,53	14 %
380,6645922	447,4	15 %
AGUA CALIENTE		
LOG NORMAL		ERROR
47,62293127	40,09	19 %
104,8956727	94,71	11 %
158,4963059	148,44	7 %
194,7486229	185,75	5 %
222,8724797	215,14	4 %
246,139181	239,7	3 %
266,1304034	260,97	2 %
327,093522	326,67	0 %
381,0073767	385,69	1 %
422,4251829	431,55	2 %
708,9267432	758,26	7 %
AGUA CALIENTE		
GAMMA		ERROR
5686752753	51,15	11 %
123,5200694	126,27	2 %
172,6313203	184,48	6 %
201,0894194	218,81	8 %
221,1937301	243,27	9 %
236,7464405	262,28	10 %
249,4302829	277,84	10 %
284,8703145	321,54	11 %
312,9142667	356,31	12 %
332,7727333	381,03	13 %
443,4165611	519,77	15 %

Continuación de la tabla XVII.

AGUA CALIENTE		
GAMMA 3P		ERROR
35,23679646	28,32	24 %
118,1648074	136,32	13 %
198,8256104	232,82	15 %
250,008632	292,47	15 %
287,6201213	335,83	14 %
317,4090625	369,96	14 %
342,0986259	398,12	14 %
412,7064646	478,18	14 %
470,0122602	542,74	13 %
511,2355712	589,01	13 %
748,3112066	853,05	12 %
AGUA CALIENTE		
LOG PEARSON		ERROR
43,68766581	32,98	32 %
101,2212599	85,01	19 %
165,2681821	157,68	5 %
213,9441441	221,87	4 %
254,6033011	280,9	9 %
290,1231831	336,28	14 %
321,9894805	388,86	17 %
426,7536831	580,06	26 %
528,8035826	791,67	33 %
613,1253928	984,3	38 %
1335,471491	3 217,13	58 %
AGUA CALIENTE		
GUMBEL		ERROR
60,46297224	56,65	7 %
153,4725288	170,15	10 %
215,0529483	245,3	12 %
249,7961006	287,7	13 %
274,1223651	317,39	14 %
292,8599715	340,25	14 %
308,1035433	358,86	14 %
350,5816662	410,69	15 %
384,1317158	451,64	15 %
407,8771529	480,61	15 %
540,278276	642,19	16 %

Continuación de la tabla XVII.

AGUA CALIENTE		
LOG GUMBEL		ERROR
40,82213537	33,9	20 %
93,53955689	83,6	12 %
161,9617907	151,98	7 %
220,7626376	212,92	4 %
274,2256858	269,62	2 %
324,0808819	323,39	0 %
371,253918	374,96	1 %
542,1645	566,27	4 %
731,1808636	784,21	7 %
903,5633744	987,46	8 %
2941,495599	3 569,26	18 %
ERROR PROMEDIO		12 %
ALOTENANGO		
NORMAL		ERROR
15,3200	15,02	2 %
26,3900	26,6	1 %
32,1700	32,65	1 %
35,0600	35,67	2 %
36,9500	37,65	2 %
38,3400	39,11	2 %
39,4400	40,25	2 %
42,3300	43,27	2 %
44,4600	45,51	2 %
45,9100	47,02	2 %
53,1700	54,62	3 %
ALOTENANGO		
LOG NORMAL		ERROR
11,77	11,1	6 %
21,4	21,37	0 %
29,25	30,09	3 %
34,19	35,7	4 %
37,86	39,92	5 %
40,82	43,35	6 %
43,3	46,25	6 %
50,62	54,87	8 %
56,82	62,27	9 %
61,43	67,84	9 %
90,91	104,21	13 %

Continuación de la tabla XVII.

ALOTENANGO		
GAMMA		ERROR
12,92	12,36	5 %
22,88	22,77	0 %
29,63	29,95	1 %
33,43	34	2 %
36,07	36,84	2 %
38,09	39,01	2 %
39,73	40,78	3 %
44,27	45,67	3 %
47,82	49,51	3 %
50,32	52,22	4 %
64,02	67,1	5 %
ALOTENANGO		
GAMMA 3P		ERROR
10,31	10,49	2 %
21,44	22,92	6 %
31,29	32,69	4 %
37,35	38,48	3 %
41,76	42,61	2 %
45,22	45,83	1 %
48,08	48,47	1 %
56,19	55,88	1 %
62,73	61,79	2 %
67,41	65,99	2 %
94,11	89,64	5 %
ALOTENANGO		
LOG PEARSON		ERROR
11,36	10,46	9 %
21,13	20,88	1 %
29,84	31,02	4 %
35,65	38,15	7 %
40,13	43,83	8 %
43,82	48,63	10 %
47	52,82	11 %
56,67	66	14 %
65,25	78,15	17 %
71,86	87,78	18 %
118,25	161,17	27 %

Continuación de la tabla XVII.

ALOTENANGO		
GUMBEL		ERROR
13,16	12,77	3 %
24,78	24,92	1 %
32,48	32,97	1 %
36,82	37,51	2 %
39,86	40,69	2 %
42,2	43,14	2 %
44,1	45,13	2 %
49,41	50,68	3 %
53,6	55,07	3 %
56,57	58,17	3 %
73,11	75,48	3 %
ALOTENANGO		
LOG GUMBEL		ERROR
10,48	9,77	7 %
19,63	19,43	1 %
29,74	30,64	3 %
37,59	39,61	5 %
44,3	47,41	7 %
50,27	54,45	8 %
55,71	60,95	9 %
74,21	83,43	11 %
93,06	106,91	13 %
109,23	127,43	14 %
266,9	339,08	21 %
ERROR PROMEDIO		5 %
CABALLO BLANCO		
NORMAL		ERROR
704,2	704,19	0 %
1039,3	929,51	12 %
1214,46	1 047,29	16 %
1301,87	1 106,06	18 %
1359,12	1 144,55	19 %
1401,25	1 172,89	19 %
1434,39	1 195,17	20 %
1521,92	1 254,02	21 %
1586,67	1 297,56	22 %
1630,46	1 327	23 %
1850,17	1 474,74	25 %

Continuación de la tabla XVII.

CABALLO BLANCO		
LOG NORMAL		ERROR
596,19	626,71	5%
1009,64	1 035,81	3 %
1329,71	1 346,93	1 %
1525,58	1 535,55	1 %
1669,24	1 673,17	0 %
1783,56	1 782,29	0 %
1878,94	1 873,09	0 %
2156,11	2 135,78	1 %
2387,13	2 353,52	1 %
2557,26	2 513,25	2 %
3612,27	3 493,88	3 %
CABALLO BLANCO		
GAMMA		ERROR
631,52	652,23	3 %
998,16	959,02	4 %
1235,23	1 151,28	7 %
1365,81	1 255,79	9 %
1455,86	1 327,39	10 %
1524,46	1 381,7	10 %
1579,81	1 425,39	11 %
1731,95	1 544,91	12 %
1850,11	1 637,23	13 %
1932,77	1 701,56	14 %
2381,28	2047,8	16 %
CABALLO BLANCO		
GUMBEL		ERROR
638,82	660,22	3 %
990,68	896,81	10 %
1223,64	1 053,46	16 %
1355,08	1 141,84	19 %
1447,11	1 203,72	20 %
1517,99	1 251,38	21 %
1575,66	1 290,16	22 %
1736,36	1 398,21	24 %
1863,28	1 483,56	26 %
1953,11	1 543,96	27 %
2454	1 880,75	30 %
CABALLO BLANCO		
LOG GUMBEL		ERROR
537,94	568,18	5 %
935,34	962,98	3 %
1349,04	1 365,59	1 %
1658,68	1 663,07	0 %
1916,88	1 909,15	0 %
2142,85	2 123,24	1 %
2346,19	2 315,01	1 %
3020,5	2 945,77	3 %
3687,52	3 563,28	3 %
4246,85	4 077,06	4 %
9333,46	8 640,12	8 %
ERROR PROMEDIO		10 %

Continuación de la tabla XVII.

CANDELARIA II		
NORMAL		ERROR
71,3746025	69,98	2 %
122,915381	109,56	12 %
149,8566593	130,25	15 %
163,3009171	140,58	16 %
172,1052319	147,34	17 %
178,5863974	152,31	17 %
183,6833043	156,23	18 %
197,1459276	166,57	18 %
207,1043805	174,21	19 %
213,8398539	179,39	19 %
247,6328656	205,34	21 %
CANDELARIA II		
LOG NORMAL		ERROR
54,84001326	57,36	4 %
99,69414122	97,89	2 %
136,2550368	129,46	5 %
159,2432993	148,83	7 %
176,3607226	163,06	8 %
190,1264852	174,4	9 %
201,7027878	183,87	10 %
235,783275	211,42	12 %
264,6465416	234,43	13 %
286,1460333	251,39	14 %
423,4261542	356,93	19 %
CANDELARIA II		
GAMMA		ERROR
60,16287752	61,47	2 %
106,5492564	101,22	5 %
138,0156831	127,37	8 %
155,6871939	141,89	10 %
167,9887826	151,93	11 %
177,4180351	159,6	11 %
185,0578996	165,79	12 %
206,1976348	182,87	13 %
222,7410125	196,17	14 %
234,3716845	205,49	14 %
298,1860025	256,28	16 %

Continuación de la tabla XVII.

CANDELARIA II		
GAMMA 3P		ERROR
48,00341197	61,72	22 %
99,86404925	105,19	5 %
145,7248321	133,04	10 %
173,9848738	148,33	17 %
194,4989489	158,85	22 %
210,6308362	166,85	26 %
223,9368745	173,31	29 %
261,731311	191,02	37 %
292,1837701	204,76	43 %
313,9935649	214,36	46 %
438,3477947	266,33	65 %
CANDELARIA II		
LOG PEARSON		ERROR
52,90525566	55,13	4 %
98,41884135	96,45	2 %
139,0029238	132,24	5 %
166,0386943	155,73	7 %
186,9023557	173,71	8 %
204,1233029	188,47	8 %
218,9050752	201,1	9 %
263,9760382	239,34	10 %
303,9133523	272,96	11 %
334,6854885	298,73	12 %
550,7817372	477,31	15 %
CANDELARIA II		
GUMBEL		ERROR
61,31711375	62,26	2 %
115,4365947	103,82	11 %
151,2684001	131,33	15 %
171,484402	146,86	17 %
185,6391282	157,73	18 %
196,5419813	166,1	18 %
205,4117601	172,91	19 %
230,1285101	191,9	20 %
249,6502812	206,89	21 %
263,4670413	217,5	21 %
340,5072974	276,66	23 %

Continuación de la tabla XVII.

CANDELARIA II		
LOG GUMBEL		ERROR
48,80289157	51,67	6 %
91,412297	90,59	1 %
138,5040398	131,37	5 %
175,0955937	162,01	8 %
206,329779	187,63	10 %
234,1377136	210,1	11 %
259,502633	230,35	13 %
345,6379528	297,66	16 %
433,4488778	364,47	19 %
508,7711751	420,64	21 %
1 243,129143	935,31	33 %
ERROR		15 %
CANTEL II		
NORMAL		ERROR
67,45377285	66,14	2 %
116,1632556	113,21	3 %
141,6245653	137,82	3 %
154,3302882	150,09	3 %
162,6509544	158,14	3 %
168,7760893	164,06	3 %
173,5930072	168,71	3 %
186,3160866	181,01	3 %
195,7274906	190,1	3 %
202,0929634	196,25	3 %
234,0296195	227,12	3 %
CANTEL II		
LOG NORMAL		ERROR
51,82748019	50,81	2 %
94,21763094	93,01	1 %
128,7701224	127,58	1 %
150,495568	149,38	1 %
166,6726778	165,64	1 %
179,6822441	178,72	1 %
190,6226242	189,73	0 %
222,830964	222,19	0 %
250,1086812	249,73	0 %
270,4271388	270,26	0 %
400,1660342	401,75	0 %

Continuación de la tabla XVII.

CANTEL II		
GAMMA		ERROR
56,85794291	55,74	2 %
100,6961733	98,73	2 %
130,434051	127,9	2 %
147,1348105	144,28	2 %
158,7606346	155,68	2 %
167,6719088	164,42	2 %
174,8920917	171,5	2 %
194,8705552	191,09	2 %
210,5051536	206,43	2 %
221,4969165	217,21	2 %
281,8057148	276,36	2 %
CANTEL II		
GAMMA 3P		ERROR
45,36643475	49,01	7 %
94,37820539	100,28	6 %
137,7197124	139,02	1 %
164,4273418	161,67	2 %
183,8145147	177,74	3 %
199,0602271	190,2	5 %
211,6353231	200,38	6 %
247,3535933	228,91	8 %
276,1332039	251,54	10 %
296,7449185	267,6	11 %
414,2679824	357,43	16 %
CANTEL II		
LOG PEARSON		ERROR
49,99900487	48,28	4 %
93,01238726	91,2	2 %
131,3670594	131,03	0 %
156,9176706	158,24	1 %
176,635226	179,57	2 %
192,9101728	197,38	2 %
206,8799363	212,8	3 %
249,4750106	260,54	4 %
287,2184435	303,69	5 %
316,3001702	337,43	6 %
520,5255776	584,47	11 %

Continuación de la tabla XVII.

CANTEL II		
GUMBEL		ERROR
57,94877334	56,95	2 %
109,0953023	106,38	3 %
142,9587549	139,1	3 %
162,0642286	157,57	3 %
175,4413916	170,5	3 %
185,7453169	180,45	3 %
194,1278511	188,56	3 %
217,4868329	211,13	3 %
235,9362122	228,96	3 %
248,9939745	241,58	3 %
321,802169	311,94	3 %
CANTEL II		
LOG GUMBEL		ERROR
46,12199644	45,15	2 %
86,39073427	85,2	1 %
130,8955806	129,72	1 %
165,4770463	164,43	1 %
194,9954403	194,14	0 %
221,2757983	220,63	0 %
245,2473436	244,82	0 %
326,6509815	327,17	0 %
409,6381783	411,37	0 %
480,8227867	483,76	1 %
1 174,84018	1 194,38	2 %
ERROR		3 %
COATEPEQUE		
NORMAL		ERROR
282,27	282,26	0 %
416,58	416,61	0 %
486,79	486,84	0 %
521,83	521,89	0 %
544,77	544,84	0 %
561,66	561,73	0 %
574,94	575,02	0 %
610,03	610,11	0 %
635,98	636,07	0 %
653,53	653,63	0 %
741,6	741,72	0 %

Continuación de la tabla XVII.

COATEPEQUE		
LOG NORMAL		ERROR
238,97	247,46	3 %
404,69	390,79	4 %
532,99	496,23	7 %
611,5	559,05	9 %
669,08	604,43	11 %
714,9	640,18	12 %
753,13	669,77	12 %
864,23	754,68	15 %
956,83	824,34	16 %
1 025,02	875,07	17 %
1 447,9	1 180,75	23 %
COATEPEQUE		
GAMMA		ERROR
1	258,9	100 %
400,09	389,6	3 %
495,12	472,35	5 %
547,46	517,53	6 %
583,55	548,54	6 %
611,05	572,1	7 %
633,23	591,07	7 %
694,22	643,05	8 %
741,58	683,28	9 %
774,71	711,34	9 %
954,48	862,81	11 %
COATEPEQUE		
GAMMA 3P		ERROR
250,23	243,03	3 %
398,42	391,52	2 %
496,13	494,84	0 %
550,39	553,44	1 %
587,95	594,43	1 %
616,64	625,94	1 %
639,83	651,52	2 %
703,75	722,54	3 %
753,56	778,33	3 %
788,47	817,64	4 %
978,83	1 034,44	5 %

Continuación de la tabla XVII.

COATEPEQUE		
GUMBEL		ERROR
256,04	256,04	0 %
397,09	397,12	0 %
490,47	490,52	0 %
543,15	543,22	0 %
580,04	580,11	0 %
608,45	608,54	0 %
631,57	631,66	0 %
695,98	696,09	0 %
746,86	746,97	0 %
782,86	782,99	0 %
983,63	983,81	0 %
COATEPEQUE		
LOG GUMBEL		ERROR
215,62	226,35	5 %
374,91	365,72	3 %
540,73	502,48	8 %
664,85	601,11	11 %
768,34	681,49	13 %
858,91	750,65	14 %
940,42	812,06	16 %
1 210,7	1011,02	20 %
1 478,06	1202,06	23 %
1 702,26	1358,71	25 %
3 741,12	2690,04	39 %
ERROR		8 %

ERROR PROMEDIO REGIÓN I	32 %
ERROR PROMEDIO REGIÓN II	19 %
ERROR PROMEDIO REGIÓN III	10 %
ERROR PROMEDIO REGIÓN IV	16 %

Fuente: elaboración propia.

6.4. Modelos de regionalización

Para la aplicación de los modelos matemáticos en el análisis regional de crecidas, es necesaria la recopilación de datos de las propiedades morfométricas de las cuencas en estudio.

Para los ejemplos de aplicación, se tomará una cuenca de cada región homogénea ya determinada mediante el método de los trazos multidimensionales.

6.5. Región 1

Tabla XVIII. **Tabla de propiedades morfométricas Región 1**

REGIÓN I					
CUENCA	ESTACIÓN	CAUDAL MEDIO REAL	ÁREA	PERIMETRO	LONGITUD
MARIA LINDA	AGUA CALIENTE	78	247,2	88,34	26,06

Fuente: elaboración propia.

El modelo matemático realizado para la Región 1 es el siguiente:

$$x = 0,384932147870847y - 17,7552269536734 \quad (\text{Ec. 29})$$

Donde: X = caudal medio real, Y = área.

Valuando los parámetros en la ecuación, se obtiene que el caudal medio es 77,4 m³/s. Comparando con el caudal medio tomado directamente de la

estación (78 m³/s) se puede determinar que el error es menor a 1 % (0,7 %); por lo tanto, la ecuación es correcta al igual que el caudal encontrado.

6.6. Región 2

Tabla XIX. **Tabla de propiedades morfométricas Región 2**

REGIÓN II					
CUENCA	ESTACIÓN	CAUDAL MEDIO REAL	ÁREA	PERÍMETRO	LONGITUD
ACHIUATE	ALOTENANGO	15	389,81	97,1	47,67

Fuente: elaboración propia.

El modelo matemático realizado para la Región 2 es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 x = & \\
 & 558,787415606024 + 3,3977669795567y + \\
 & 0,00235024909048025wz^2 - 11,1991511623211w - \\
 & 0,0761123080266739yw - 0,103556688362703z^2 \quad (\text{Ec. 30})
 \end{aligned}$$

Donde: X = caudal medio, Y = área, Z = perímetro, W = longitud del cauce principal.

Valuando los parámetros en la ecuación, se obtiene que el caudal medio es 15,02 m³/s. Comparando con el caudal medio tomado directamente de la estación (15 m³/s) se puede determinar que el error es menor a 1 % (0,13%); por lo tanto, la ecuación es correcta al igual que el caudal encontrado.

6.7. Región 3

Tabla XX. **Tabla de propiedades morfométricas Región 3**

REGIÓN III					
CUENCA	ESTACIÓN	CAUDAL MEDIO REAL	ÁREA	PERIMETRO	LONGITUD
OCOSITO	CABALLO BLANCO	704	456,37	128,47	63,2

Fuente: elaboración propia.

El modelo matemático realizado para la Región 3 es el siguiente:

$$x = 160,383570883356 + 25,8996674878299w + 0,00339809279829649z^2 - 1,47230754161253y - 0,00273733818157825yz - 0,00152073917379939y^2 \quad (\text{Ec. 31})$$

Donde: X = caudal medio, Y = área, Z = perímetro, W = longitud del cauce principal.

Valuando los parámetros en la ecuación, se obtiene que el caudal medio es 704.19 3 m³/s. Comparando con el caudal medio tomado directamente de la estación (704 m³/s) se puede determinar que el error es menor a 1 % (0,002 %); por lo tanto, la ecuación es correcta al igual que el caudal encontrado.

6.8. Región 4

Tabla XXI. **Tabla de propiedades morfométricas Región 4**

REGIÓN IV					
CUENCA	ESTACIÓN	CAUDAL MEDIO REAL	ÁREA	PERIMETRO	LONGITUD
NARANJO	PAJAPITA	421	188,12	71,46	36

Fuente: elaboración propia.

El modelo matemático realizado para la Región 3 es el siguiente:

$$x = 503,202847377865 + 1,64859919504118 - 10,7542995473876w - 2,84595822692203e^{-7}y^3 - 3,40176592711871e^{-6}yz^2 \quad (\text{Ec. 32})$$

Donde: X = caudal medio, Y = área, Z = perímetro, W = longitud del cauce principal.

Valuando los parámetros en la ecuación, se obtiene que el caudal medio es 421,02 m³/s. Comparando con el caudal medio tomado directamente de la estación (421 m³/s) se puede determinar que el error es menor a 1 % (0.004 %); por lo tanto, la ecuación es correcta al igual que el caudal encontrado.

6.9. Modelos matemáticos

La finalidad del método matemático es relacionar las propiedades morfométricas de la cuenca con su caudal medio y determinar así una expresión que se cumpla para ese caudal y estimar crecidas futuras.

En este caso se utilizó el software para estudiantes “Eureqa” con el cual se relacionaron las variables conocidas, como por ejemplo, el área, el perímetro, la longitud y la diferencia de alturas, para poder explicar en forma matemática, el comportamiento del caudal máximo registrado, de manera regional.

Tabla XXII. **Propiedades morfométricas**

REGIÓN I					
CUENCA	ESTACIÓN	CAUDAL MEDIO	ÁREA	PERÍMETRO	LONGITUD
MARÍA LINDA	AGUA CALIENTE	77,4	247,2	88,34	26,06
COATÁN	CUNLAJ	36,27	140,35	64,25	25,89
REGIÓN II					
CUENCA	ESTACIÓN	CAUDAL MEDIO	ÁREA	PERÍMETRO	LONGITUD
ACHIGUATE	ALOTENANGO	15,02	389,81	97,1	47,67
SAMALÁ	CANDELARIA	69,98	844,03	178,03	78,36
SAMALÁ	CANTEL II	66,14	685,33	156,15	48,92
MARÍA LINDA	GUACAMAYAS II	218,69	667,57	168,76	69,22
ACOMÉ	LA GOMERA	95	59,03	72,53	35,93
NAHUALATE	MONTECRISTO	302,18	119,69	58,1	25,35
REGIÓN III					
CUENCA	ESTACIÓN	CAUDAL MEDIO	ÁREA	PERÍMETRO	LONGITUD
OCOSITO	CABALLO BLANCO	704,19	456,37	128,47	63,2
SAMALÁ	COATEPEQUE	282,26	531,71	142,21	56,87
SUCHIATE	MALACATAN	291,91	450,81	11,6	46,46
REGIÓN IV					
CUENCA	ESTACIÓN	CAUDAL MEDIO	ÁREA	PERÍMETRO	LONGITUD
OSTUA- GÜIJA	LAS CRUCES	564,01	1 550,15	273,37	96,76
OSTUA- GÜIJA	LAS LECHUZAS	742,76	879,38	193,96	84,07
NARANJO	MELENDREZ II	311,81	153,65	75,21	40,98
NARANJO	PAJAPITA	421,02	188,12	71,46	36

Fuente: elaboración propia.

Por medio del análisis con el software Eureka, se determinan los siguientes modelos matemáticos:

- Para la región I:

$$x = 0.384932147870847y - 17.7552269536734 \quad (\text{Ec. 29})$$

- Para la región II:

$$x = 558,787415606024 + 3,3977669795567y + 0,00235024909048025wz^2 - 11,1991511623211w - 0,0761123080266739yw - 0,103556688362703z^2 \quad (\text{Ec. 30})$$

- Para la región III:

$$x = 160,383570883356 + 25,8996674878299w + 0,00339809279829649z^2 - 1,47230754161253y - 0,00273733818157825yz - 0,00152073917379939y^2 \quad (\text{Ec. 31})$$

- Para la región IV:

$$x = 503,202847377865 + 1,64859919504118 - 10,7542995473876w - 2,84595822692203e^{-7}y^3 - 3,40176592711871e^{-6}yz^2 \quad (\text{Ec. 32})$$

Donde:

x: Caudal medio

y: Área de la cuenca

z: Perímetro de la cuenca

w: Longitud del cauce principal

Evaluando las ecuaciones y comparando con los caudales medios, determinados mediante el promedio de caudales pico anuales:

Tabla XXIII. **Caudales medios y caudales determinados por modelo matemático**

REGIÓN I			
CUENCA	ESTACIÓN	CAUDAL MEDIO	MODELO MATEMÁTICO
MARÍA LINDA	AGUA CALIENTE	77,4	77,4
COATÁN	CUNLAJ	36,27	36,27
REGIÓN II			
CUENCA	ESTACIÓN	CAUDAL MEDIO	MODELO MATEMÁTICO
ACHIGUATE	ALOTENANGO	15,02	15,02
SAMALÁ	CANDELARIA	69,98	69,98
SAMALÁ	CANTEL II	66,14	66,14
MARÍA LINDA	GUACAMAYAS II	218,69	218,69
ACOMÉ	LA GOMERA	95	95
NAHUALATE	MONTECRISTO	302,18	302,18
REGIÓN III			
CUENCA	ESTACIÓN	CAUDAL MEDIO	MODELO MATEMÁTICO
OCOSITO	CABALLO BLANCO	704,19	704,19
SAMALÁ	COATEPEQUE	282,26	282,26
SUCHIATE	MALACATAN	291,91	291,91
REGIÓN IV			
CUENCA	ESTACIÓN	CAUDAL MEDIO	MODELO MATEMÁTICO
OSTUA-GUIJA	LAS CRUCES	564,01	908,72
OSTUA-GUIJA	LAS LECHUZAS	742,76	834,16
NARANJO	MELENDREZ II	311,81	313,89
NARANJO	PAJAPITA	421,02	423,46

Fuente: elaboración propia.

Determinando el error promedio con los caudales generados mediante los modelos matemáticos:

Tabla XXIV. **Error promedio con caudales generados por modelo matemático**

AGUA CALIENTE		
NORMAL		ERROR PROMEDIO
77,4039787	77,74	0 %
165,590142	185,84	11 %
211,686612	242,34	13 %
234,689708	270,54	13 %
249,753872	289	14 %
260,843133	302,6	14 %
269,56393	313,29	14 %
292,59845	341,52	14 %
309,637341	362,41	15 %
321,161722	376,53	15 %
378,981494	447,4	15 %
AGUA CALIENTE		
LOG NORMAL		ERROR PROMEDIO
47,4123677	40,09	18 %
104,431879	94,71	10 %
157,795519	148,44	6 %
193,887547	185,75	4 %
221,887055	215,14	3 %
245,050883	239,7	2 %
264,953715	260,97	2 %
325,647286	326,67	0 %
379,322762	385,69	2 %
420,557441	431,55	3 %
705,792242	758,26	7 %
AGUA CALIENTE		
GAMMA		ERROR PROMEDIO
56,6160892	51,15	11 %
122,973929	126,27	3 %
171,868035	184,48	7 %
200,200308	218,81	9 %
220,215728	243,27	9 %
235,699672	262,28	10 %
248,327433	277,84	11 %
283,610768	321,54	12 %
311,530724	356,31	13 %
331,301387	381,03	13 %
441,456006	519,77	15 %

Continuación de la tabla XXIV.

AGUA CALIENTE		
GAMMA 3P		ERROR PROMEDIO
35,0809979	28,32	24 %
117,642345	136,32	14 %
197,946508	232,82	15 %
248,903225	292,47	15 %
286,348416	335,83	15 %
316,005647	369,96	15 %
340,586046	398,12	14 %
410,881694	478,18	14 %
467,934113	542,74	14 %
508,975156	589,01	14 %
745,002568	853,05	13 %
AGUA CALIENTE		
LOG PEARSON		ERROR PROMEDIO
43,4945019	32,98	32 %
100,773713	85,01	19 %
164,537453	157,68	4 %
212,998196	221,87	4 %
253,477579	280,9	10 %
288,840411	336,28	14 %
320,565812	388,86	18 %
424,866803	580,06	27 %
526,465491	791,67	33 %
610,414475	984,3	38 %
1329,56674	3217,13	59 %
AGUA CALIENTE		
GUMBEL		ERROR PROMEDIO
60,1956368	56,65	6 %
152,793954	170,15	10 %
214,102097	245,3	13 %
248,691634	287,7	14 %
272,91034	317,39	14 %
291,565099	340,25	14 %
306,741271	358,86	15 %
349,031578	410,69	15 %
382,433287	451,64	15 %
406,073735	480,61	16 %
537,88945	642,19	16 %

Continuación de la tabla XXIV.

AGUA CALIENTE		
LOG GUMBEL		ERROR PROMEDIO
40,6416414	33,9	20 %
93,1259742	83,6	11 %
161,245681	151,98	6 %
219,786541	212,92	3 %
273,013204	269,62	1 %
322,647967	323,39	0 %
369,612428	374,96	1 %
539,767334	566,27	5 %
727,947966	784,21	7 %
899,568292	987,46	9 %
2928,48985	3569,26	18 %
ERROR PROMEDIO		12 %
ALOTENANGO		
NORMAL		ERROR PROMEDIO
15,32	15,02	2 %
26,38	26,6	1 %
32,16	32,65	1 %
35,05	35,67	2 %
36,94	37,65	2 %
38,33	39,11	2 %
39,42	40,25	2 %
42,31	43,27	2 %
44,45	45,51	2 %
45,9	47,02	2 %
53,15	54,62	3 %
ALOTENANGO		
LOG NORMAL		ERROR PROMEDIO
11,77	11,1	6 %
21,4	21,37	0 %
29,24	30,09	3 %
34,18	35,7	4 %
37,85	39,92	5 %
40,81	43,35	6 %
43,29	46,25	6 %
50,61	54,87	8 %
56,8	62,27	9 %
61,42	67,84	9 %
90,88	104,21	13 %

Continuación de la tabla XXIV.

ALOTENANGO		
GAMMA		ERROR PROMEDIO
12,91	12,36	5 %
22,87	22,77	0 %
29,62	29,95	1 %
33,42	34	2 %
36,06	36,84	2 %
38,08	39,01	2 %
39,72	40,78	3 %
44,26	45,67	3 %
47,81	49,51	3 %
50,3	52,22	4 %
64	67,1	5 %
ALOTENANGO		
GAMMA 3P		ERROR PROMEDIO
10,3	10,49	2 %
21,43	22,92	6 %
31,28	32,69	4 %
37,34	38,48	3 %
41,75	42,61	2 %
45,21	45,83	1 %
48,06	48,47	1 %
56,18	55,88	1 %
62,71	61,79	1 %
67,39	65,99	2 %
94,08	89,64	5 %
ALOTENANGO		
LOG PEARSON		ERROR PROMEDIO
11,36	10,46	9 %
21,12	20,88	1 %
29,83	31,02	4 %
35,64	38,15	7 %
40,12	43,83	8 %
43,81	48,63	10 %
46,98	52,82	11 %
56,66	66	14 %
65,23	78,15	17 %
71,83	87,78	18 %
118,22	161,17	27 %

Continuación de la tabla XXIV.

ALOTENANGO		
GUMBEL		ERROR PROMEDIO
13,16	12,77	3 %
24,78	24,92	1 %
32,47	32,97	2 %
36,81	37,51	2 %
39,84	40,69	2 %
42,18	43,14	2 %
44,09	45,13	2 %
49,39	50,68	3 %
53,58	55,07	3 %
56,55	58,17	3 %
73,08	75,48	3 %
ALOTENANGO		
LOG GUMBEL		ERROR PROMEDIO
10,47	9,77	7 %
19,62	19,43	1 %
29,73	30,64	3 %
37,58	39,61	5 %
44,29	47,41	7 %
50,25	54,45	8 %
55,7	60,95	9 %
74,19	83,43	11 %
93,03	106,91	13 %
109,2	127,43	14 %
266,82	339,08	21 %
ERROR PROMEDIO		5 %
CABALLO BLANCO		
NORMAL		ERROR PROMEDIO
704,21	704,19	0 %
1039,3	929,51	12 %
1 214,47	1 047,29	16 %
1 301,88	1 106,06	18 %
1 359,12	1 144,55	19 %
1 401,26	1 172,89	19 %
1 434,39	1 195,17	20 %
1 521,92	1 254,02	21 %
1 586,67	1 297,56	22 %
1 630,46	1 327	23 %
1 850,17	1 474,74	25 %

Continuación de la tabla XXIV.

CABALLO BLANCO		
LOG NORMAL		ERROR PROMEDIO
596,19	626,71	5 %
1009,64	1035,81	3 %
1329,72	1346,93	1 %
1525,59	1535,55	1 %
1669,24	1673,17	0 %
1783,56	1782,29	0 %
1878,94	1873,09	0 %
2156,12	2135,78	1 %
2387,14	2353,52	1 %
2557,26	2513,25	2 %
3612,27	3493,88	3 %
CABALLO BLANCO		
GAMMA		ERROR PROMEDIO
631,52	652,23	3 %
998,16	959,02	4 %
1 235,23	1 151,28	7 %
1 365,81	1 255,79	9 %
1 455,86	1 327,39	10%
1 524,47	1381,7	10 %
1 579,81	1 425,39	11 %
1 731,96	1 544,91	12 %
1 850,12	1 637,23	13 %
1 932,77	1 701,56	14 %
2 381,28	2047,8	16 %
CABALLO BLANCO		
GUMBEL		ERROR PROMEDIO
638,82	660,22	3 %
990,68	896,81	10 %
1 223,64	1 053,46	16 %
1 355,08	1 141,84	19 %
1 447,11	1 203,72	20 %
1518	1 251,38	21%
1 575,66	1 290,16	22 %
1 736,36	1 398,21	24 %
1 863,28	1 483,56	26 %
1 953,12	1 543,96	27 %
2 454	1 880,75	30 %
CABALLO BLANCO		
LOG GUMBEL		ERROR PROMEDIO
537,94	568,18	5 %
935,34	962,98	3 %
1 349,04	1 365,59	1 %
1 658,68	1 663,07	0 %
1 916,88	1 909,15	0 %
2 142,85	2 123,24	1 %
2 346,19	2 315,01	1 %
3 020,51	2 945,77	3 %
3 687,53	3 563,28	3 %
4 246,85	4 077,06	4 %
9 333,48	8 640,12	8 %
ERROR PROMEDIO		10 %

Continuación de la tabla XXIV.

CANDELARIA II		
NORMAL		ERROR PROMEDIO
71,3746468	69,98	2 %
122,915457	109,56	12 %
149,856752	130,25	15 %
163,301019	140,58	16 %
172,105339	147,34	17 %
178,586508	152,31	17 %
183,683418	156,23	18 %
197,14605	166,57	18 %
207,104509	174,21	19 %
213,839987	179,39	19 %
247,633019	205,34	21 %
CANDELARIA II		
LOG NORMAL		ERROR PROMEDIO
54,8400473	57,36	4 %
99,6942032	97,89	2 %
136,255121	129,46	5 %
159,243398	148,83	7 %
176,360832	163,06	8 %
190,126603	174,4	9 %
201,702913	183,87	10 %
235,783422	211,42	12 %
264,646706	234,43	13 %
286,146211	251,39	14 %
423,426417	356,93	19 %
CANDELARIA II		
GAMMA		ERROR PROMEDIO
60,1629149	61,47	2 %
106,549323	101,22	5 %
138,015769	127,37	8 %
155,687291	141,89	10 %
167,988887	151,93	11 %
177,418145	159,6	11 %
185,058015	165,79	12 %
206,197763	182,87	13 %
222,741151	196,17	14 %
234,37183	205,49	14 %
298,186188	256,28	16 %

Continuación de la tabla XXIV.

CANDELARIA II		
GAMMA 3P		ERROR PROMEDIO
48,0034418	61,72	22 %
99,8641113	105,19	5 %
145,724923	133,04	10 %
173,984982	148,33	17 %
194,49907	158,85	22 %
210,630967	166,85	26 %
223,937014	173,31	29 %
261,731474	191,02	37 %
292,183952	204,76	43 %
313,99376	214,36	46 %
438,348067	266,33	65 %
CANDELARIA II		
LOG PEARSON		ERROR PROMEDIO
52,9052885	55,13	4 %
98,4189025	96,45	2 %
139,00301	132,24	5 %
166,038797	155,73	7 %
186,902472	173,71	8 %
204,12343	188,47	8 %
218,905211	201,1	9 %
263,976202	239,34	10 %
303,913541	272,96	11 %
334,685696	298,73	12 %
550,782079	477,31	15 %
CANDELARIA II		
GUMBEL		ERROR PROMEDIO
61,3171518	62,26	2 %
115,436666	103,82	11 %
151,268494	131,33	15 %
171,484509	146,86	17 %
185,639244	157,73	18 %
196,542103	166,1	18 %
205,411888	172,91	19 %
230,128653	191,9	20 %
249,650436	206,89	21 %
263,467205	217,5	21 %
340,507509	276,66	23 %

Continuación de la tabla XXIV.

CANDELARIA II		
LOG GUMBEL		ERROR PROMEDIO
48,8029219	51,67	6 %
91,4123538	90,59	1 %
138,504126	131,37	5 %
175,095702	162,01	8 %
206,329907	187,63	10 %
234,137859	210,1	11 %
259,502794	230,35	13 %
345,638168	297,66	16 %
433,449147	364,47	19 %
508,771491	420,64	21 %
1 243,12992	935,31	33 %
ERROR PROMEDIO		15 %
CANTEL II		
NORMAL		ERROR PROMEDIO
67,4581186	66,14	2 %
116,17074	113,21	3 %
141,63369	137,82	3 %
154,340231	150,09	3 %
162,661433	158,14	3 %
168,786963	164,06	3 %
173,604191	168,71	3 %
186,32809	181,01	3 %
195,740101	190,1	3 %
202,105983	196,25	3 %
234,044697	227,12	3 %
CANTEL II		
LOG NORMAL		ERROR PROMEDIO
51,8308192	50,81	2 %
94,223701	93,01	1 %
128,778419	127,58	1 %
150,505264	149,38	1 %
166,683416	165,64	1 %
179,69382	178,72	1 %
190,634905	189,73	0 %
222,84532	222,19	0 %
250,124795	249,73	0 %
270,444561	270,26	0 %
400,191815	401,75	0 %

Continuación de la tabla XXIV.

CANTEL II		
GAMMA		ERROR PROMEDIO
56,861606	55,74	2 %
100,702661	98,73	2 %
130,442454	127,9	2 %
147,14429	144,28	2 %
158,770863	155,68	2 %
167,682711	164,42	2 %
174,903359	171,5	2 %
194,88311	191,09	2 %
210,518716	206,43	2 %
221,511187	217,21	2 %
281,82387	276,36	2 %
CANTEL II		
GAMMA 3P		ERROR PROMEDIO
45,3693575	49,01	7 %
94,3842858	100,28	6 %
137,728585	139,02	1 %
164,437935	161,67	2 %
183,826357	177,74	3 %
199,073052	190,2	5 %
211,648958	200,38	6 %
247,369529	228,91	8 %
276,150994	251,54	10 %
296,764037	267,6	11 %
414,294672	357,43	16 %
CANTEL II		
LOG PEARSON		ERROR PROMEDIO
50,0022261	48,28	4 %
93,0183797	91,2	2 %
131,375523	131,03	0 %
156,92778	158,24	1 %
176,646606	179,57	2 %
192,922601	197,38	2 %
206,893265	212,8	3 %
249,491083	260,54	4 %
287,236948	303,69	5 %
316,320548	337,43	6 %
520,559113	584,47	11 %

Continuación de la tabla XXIV.

CANTEL II		
GUMBEL		ERROR PROMEDIO
57.9525068	56,95	2 %
109.102331	106,38	3 %
142.967965	139,1	3 %
162.07467	157,57	3 %
175.452695	170,5	3 %
185.757284	180,45	3 %
194.140358	188,56	3 %
217.500845	211,13	3 %
235.951413	228,96	3%
249.010016	241,58	3 %
321.822901	311,94	3 %
CANTEL II		
LOG GUMBEL		ERROR PROMEDIO
46,1249679	45,15	2 %
86,3963001	85,2	1 %
130,904014	129,72	1 %
165,487707	164,43	1 %
195,008003	194,14	0 %
221,290054	220,63	0%
245,263144	244,82	0 %
326,672026	327,17	0 %
409,66457	411,37	0 %
480,853764	483,76	1 %
1174,91587	1194,38	2 %
ERROR PROMEDIO		3 %
COATEPEQUE		
NORMAL		ERROR PROMEDIO
282,27	282,26	0 %
416,58	416,61	0 %
486,79	486,84	0 %
521,83	521,89	0 %
544,77	544,84	0 %
561,66	561,73	0 %
574,95	575,02	0 %
610,03	610,11	0 %
635,98	636,07	0 %
653,54	653,63	0 %
741,6	741,72	0 %

Continuación de la tabla XXIV.

COATEPEQUE		
LOG NORMAL		ERROR PROMEDIO
238,97	247,46	3 %
404,69	390,79	4 %
532,99	496,23	7 %
611,5	559,05	9 %
669,08	604,43	11 %
714,9	640,18	12 %
753,13	669,77	12 %
864,23	754,68	15 %
956,83	824,34	16 %
1 025,03	875,07	17 %
1 447,9	1 180,75	23 %
COATEPEQUE		
GAMMA		ERROR PROMEDIO
253,13	258,9	2 %
400,09	389,6	3 %
495,12	472,35	5 %
547,46	517,53	6 %
583,55	548,54	6 %
611,05	572,1	7 %
633,24	591,07	7 %
694,22	643,05	8 %
741,58	683,28	9 %
774,71	711,34	9 %
954,49	862,81	11 %
COATEPEQUE		
GAMMA 3P		ERROR PROMEDIO
250,23	243,03	3 %
398,42	391,52	2 %
496,13	494,84	0 %
550,39	553,44	1 %
587,95	594,43	1 %
616,64	625,94	1 %
639,83	651,52	2 %
703,76	722,54	3 %
753,56	778,33	3 %
788,47	817,64	4 %
978,83	1 034,44	5 %

Continuación de la tabla XXIV.

COATEPEQUE			
GUMBEL			ERROR PROMEDIO
	256.06	256.04	0%
	397.09	397.12	0%
	490.47	490.52	0%
	543.16	543.22	0%
	580.04	580.11	0%
	608.46	608.54	0%
	631.57	631.66	0%
	695.98	696.09	0%
	746.86	746.97	0%
	782.87	782.99	0%
	983.64	983.81	0%
COATEPEQUE			
LOG GUMBEL			ERROR PROMEDIO
	215,62	226,35	5%
	374,91	365,72	3%
	540,74	502,48	8%
	664,85	601,11	11%
	768,34	681,49	13%
	858,92	750,65	14%
	940,42	812,06	16%
	1 210,71	1011,02	20%
	1 478,07	1202,06	23%
	1 702,26	1358,71	25%
	3 741,13	2690,04	39%
ERROR PROMEDIO			6%
CUNLAJ			
NORMAL			ERROR PROMEDIO
	36,2718644	36,27	0%
	77,5963106	50,66	53%
	99,1973308	58,18	70%
	109,976689	61,94	78%
	117,035826	64,4	82%
	122,232305	66,21	85%
	126,318911	67,63	87%
	137,112994	71,39	92%
	145,097498	74,17	96%
	150,497877	76,05	98%
	177,592491	85,48	108%
CUNLAJ			
LOG NORMAL			ERROR PROMEDIO
	22,217656	30,86	28%
	48,9372643	54,66	10%
	73,943714	73,69	0%
	90,8566063	85,54	6%
	103,977306	94,32	10%
	114,831984	101,35	13%
	124,158543	107,24	16%
	152,599833	124,51	23%
	177,752411	139,05	28%
	197,075173	149,84	32%
	330,737527	217,97	52%

Continuación de la tabla XXIV.

CUNLAJ		
GAMMA		ERROR PROMEDIO
26,5305627	32,63	19 %
57,6261549	51,24	12 %
80,5381608	63,24	27 %
93,8147954	69,84	34 %
103,194114	74,38	39 %
110,449963	77,85	42 %
116,36739	80,64	44 %
132,901325	88,32	50 %
145,984746	94,28	55 %
155,249371	98,45	58 %
206,868338	121,05	71 %
CUNLAJ		
GUMBEL		ERROR
28,2079554	33,46	16 %
71,5999575	48,57	47 %
100,329239	58,58	71 %
116,538056	64,22	81 %
127,887055	68,18	88 %
136,628761	71,22	92 %
143,740387	73,7	95 %
163,557821	80,6	103 %
179,210017	86,05	108 %
190,288041	89,91	112 %
252,057498	111,42	126 %
CUNLAJ		
LOG GUMBEL		ERROR PROMEDIO
19,0448622	27,6	31 %
43,6392646	50,31	13 %
75,560476	74,86	1 %
102,992996	93,67	10 %
127,935257	109,59	17 %
151,194338	123,68	22 %
173,202103	136,47	27 %
252,937483	179,51	41 %
341,119803	222,9	53 %
421,541886	259,81	62 %
1 372,30397	610,59	125 %
ERROR PROMEDIO		52 %

Continuación de la tabla XXIV.

GUACAMAYAS II		
NORMAL		ERROR PROMEDIO
223,048321	218,09	2 %
384,115196	377,5	2 %
468,307705	460,83	2 %
510,321517	502,41	2 %
537,835332	529,64	2 %
558,089219	549,69	2 %
574,017244	565,45	2 %
616,08845	607,09	1 %
647,20899	637,89	1 %
668,257598	658,73	1 %
773,862032	763,25	1 %
GUACAMAYAS II		
LOG NORMAL		ERROR PROMEDIO
171,377107	160,78	7 %
311,547946	315,3	1 %
425,802122	448,35	5 %
497,641308	534,45	7 %
551,133901	599,62	8 %
594,152428	652,61	9 %
630,328809	697,55	10%
736,831616	831,72	11 %
827,030411	947,31	13 %
894,217132	1 034,47	14 %
1 323,22268	1 608,76	18 %
GUACAMAYAS II		
GAMMA		ERROR PROMEDIO
188,011258	179.09	5 %
332,97044	330.78	1 %
431,304208	435.48	1 %
486,528345	494.68	2 %
524,971273	536.03	2 %
554,438042	567.79	2 %
578,312907	593.55	3 %
644,375375	665.01	3 %
696,074054	721.07	3 %
732,420342	760.55	4 %
931,842489	977.94	5 %

Continuación de la tabla XXIV.

GUACAMAYAS II		
GAMMA 3P		ERROR PROMEDIO
150,012471	170,68	12 %
312,078915	346,81	10 %
455,395589	470,06	3 %
543,709284	540,12	1 %
607,816541	589,17	3 %
658,229297	626,9	5 %
699,811167	657,55	6 %
817,920205	742,69	10 %
913,085287	809,62	13 %
981,241717	856,81	15 %
1369,85337	1 117,35	23 %
GUACAMAYAS II		
LOG PEARSON		ERROR PROMEDIO
165,330917	152,91	8 %
307,562586	309,43	1 %
434,389373	460,55	6 %
518,877174	565,97	8 %
584,076901	649,58	10 %
637,89301	719,94	11 %
684,086605	781,25	12 %
824,935062	973,01	15 %
949,740673	1 148,43	17 %
1 045,90476	1 286,8	19 %
1 721,21367	2 323,7	26 %
GUACAMAYAS II		
GUMBEL		ERROR PROMEDIO
191,61829	186,98	2 %
360,743706	354,37	2 %
472,719448	465,2	2 %
535,895215	527,72	2 %
580,129268	571,5	2 %
614,201095	605,23	1 %
641,919487	632,66	1 %
719,160262	709,11	1 %
780,166532	769,49	1 %
823,344428	812,22	1 %
1 064,09813	1 050,5	1 %

Continuación de la tabla XXIV.

GUACAMAYAS II		
LOG GUMBEL		ERROR PROMEDIO
152,510874	140,98	8 %
285,666871	285,94	0 %
432,830341	456,69	5 %
547,180325	594,77	8 %
644,788331	715,61	10 %
731,689174	825,18	11 %
810,955503	926,59	12 %
1 080,13162	1 279,83	16 %
1 354,54407	1 651,73	18 %
1 589,92909	1 978,56	20 %
3 884,8254	5 414,4	28 %
ERROR PROMEDIO		7 %
LA GOMERA		
NORMAL		ERROR PROMEDIO
96,89	94,88	2 %
166,86	125,18	33 %
203,44	141,02	44 %
221,69	148,92	49 %
233,64	154,09	52 %
242,44	157,9	54 %
249,36	160,9	55 %
267,63	168,81	59 %
281,15	174,67	61 %
290,29	178,63	63 %
336,17	198,49	69 %
LA GOMERA		
LOG NORMAL		ERROR PROMEDIO
74,45	89,25	17 %
135,34	122,17	11 %
184,97	143,96	28 %
216,18	156,25	38 %
239,42	164,86	45 %
258,1	171,5	50 %
273,82	176,91	55 %
320,08	192,03	67 %
359,27	204,04	76 %
388,45	212,59	83 %
574,81	261,18	120 %

Continuación de la tabla XXIV.

LA GOMERA		
GAMMA		ERROR PROMEDIO
81,67	91,12	10 %
144,64	120,88	20 %
187,36	138,69	35 %
211,35	148,18	43 %
228,05	154,61	47 %
240,85	159,46	51 %
251,22	163,34	54%
279,92	173,88	61 %
302,38	181,95	66 %
318,17	187,54	70 %
404,8	217,19	86 %
LA GOMERA		
GAMMA 3P		ERROR PROMEDIO
65,17	90,45	28 %
135,57	123,16	10 %
197,83	142,93	38 %
236,19	153,5	54 %
264,04	160,69	64 %
285,94	166,11	72 %
304	170,46	78 %
355,31	182,28	95 %
396,65	191,34	107 %
426,26	197,63	116 %
595,07	231,1	157 %
LA GOMERA		
LOG PEARSON		ERROR PROMEDIO
71,82	88,3	19 %
133,61	121,74	10 %
188,7	144,87	30 %
225,4	158,26	42%
253,73	167,78	51 %
277,1	175,21	58 %
297,17	181,31	64 %
358,36	198,62	80 %
412,57	212,62	94 %
454,35	222,72	104 %
747,7	282,26	165 %

Continuación de la tabla XXIV.

LA GOMERA		
GUMBEL		ERROR PROMEDIO
83,24	88,97	6 %
156,71	120,78	30 %
205,35	141,85	45 %
232,8	153,73	51 %
252,01	162,05	56 %
266,81	168,46	58 %
278,85	173,67	61 %
312,41	188,2	66 %
338,91	199,67	70 %
357,66	207,8	72 %
462,25	253,08	83 %
LA GOMERA		
LOG GUMBEL		ERROR PROMEDIO
66,25	83,94	21 %
124,1	116,73	6 %
188,02	145,2	29 %
237,7	164,24	45 %
280,1	179,03	56 %
317,85	191,32	66 %
352,28	201,95	74 %
469,21	234,76	100 %
588,42	264,41	123 %
690,67	287,63	140 %
1 687,59	459,91	267 %
ERROR PROMEDIO		62 %
LAS CRUCES		
NORMAL		ERROR PROMEDIO
909,221839	564,01	61 %
1617,21681	967,56	67 %
1987,29832	1178,5	69 %
2171,97669	1 283,76	69 %
2292,91803	1 352,7	70 %
2381,94719	1 403,45	70 %
2451,96136	1 443,35	70%
2636,892	1 548,76	70 %
2 773,68727	1 626,73	71 %
2 866,20976	1 679,47	71 %
3 330,41079	1 944,06	71 %

Continuación de la tabla XXIV.

LAS CRUCES		
LOG NORMAL		ERROR PROMEDIO
586,176914	347,67	69 %
1 363,28322	906,79	50 %
2 119,29848	1496,7	42 %
2 641,23791	1921,92	37 %
3 050,86998	2263,89	35 %
3 392,48291	2553,93	33 %
3 687,79531	2807,89	31 %
4 597,40557	3606,86	27 %
5 411,74359	4340,83	25 %
6 042,82218	4920,18	23 %
10 509,3365	9224,77	14 %
LAS CRUCES		
GAMMA		ERROR PROMEDIO
686,498978	414,16	66 %
1430,4544	895,06	60 %
1969,628	1 248,68	58 %
2 280,17109	1 453,45	57 %
2 498,94169	1 598,06	56 %
2 667,88958	1 709,9	56 %
2 805,50512	1 801,11	56 %
3 189,32416	2 055,88	55 %
3 492,42493	2 257,43	55 %
3 706,7759	2 400,13	54 %
4 897,77565	3 194,96	53 %
LAS CRUCES		
GAMMA 3P		ERROR PROMEDIO
703,860256	518,8	36 %
1486,45344	948,73	57 %
2 029,86744	1200,24	69 %
2 337,83998	1332,84	75%
2 553,16184	1422,27	80 %
2 718,66108	1489,43	83 %
2 853,01625	1543,03	85 %
3 225,87493	1687,99	91%
3 518,65125	1798,4	96 %
3 724,94004	1874,62	99 %
4 862,19523	2276,01	114 %

Continuación de la tabla XXIV.

LAS CRUCES		
GUMBEL		ERROR PROMEDIO
771,066157	485,26	59 %
1 514,48372	909	67 %
2 006,69084	1189,55	69 %
2 284,38994	1347,84	69 %
2 478,82772	1458,67	70 %
2 628,59584	1544,03	70 %
2 750,43642	1613,48	70 %
3 089,96049	1807,01	71 %
3 358,12322	1959,86	71 %
3 547,9185	2068,04	72 %
4 606,18955	2671,24	72 %
LAS CRUCES		
LOG GUMBEL		ERROR PROMEDIO
497,164345	288,35	72 %
1206,13815	789,03	53 %
2 168,86445	1 536,52	41 %
3 020,00989	2 237,9	35 %
3 807,82168	2 911,92	31 %
4 552,16043	3 566,57	28 %
5 263,79923	4 206,3	25 %
7 890,13686	6 661,29	18 %
10 862,3335	9 577,5	13 %
13 620,334	12 384,03	10 %
48 094,6873	51 901,71	7 %
ERROR PROMEDIO		57 %
LAS LECHUZAS		
NORMAL		ERROR PROMEDIO
834,621917	742,76	12 %
1 484,52724	1 502,01	1 %
1 824,24428	1 898,88	4 %
1 993,77014	2 096,93	5 %
2104,78846	2 226,63	5%
2 186,51296	2 322,1	6 %
2 250,78259	2 397,18	6 %
2 420,54003	2 595,5	7 %
2 546,11151	2 742,2	7 %
2 631,0427	2 841,42	7 %
3 057,15692	3 339,23	8 %

Continuación de la tabla XXIV.

LAS LECHUZAS		
LOG NORMAL		ERROR PROMEDIO
538,082213	420,03	28 %
1 251,42842	1045,81	20 %
1 945,41407	1684,76	15 %
2 424,52936	2137,37	13 %
2 800,5519	2497,78	12 %
3 114,13614	2801,39	11 %
3 385,21872	3065,85	10%
4 220,19719	3890,74	8 %
4 967,72032	4640,65	7 %
5 547,02012	5228,2	6 %
9 647,06539	9508,35	1 %
LAS LECHUZAS		
GAMMA		ERROR PROMEDIO
630,173043	517,14	22 %
1 313,08834	1 194,33	10 %
1 808,02377	1 705,52	6 %
2093,08739	2 004,33	4 %
2 293,90828	2 216,26	4 %
2 448,99432	2 380,62	3 %
2 575,31876	2 514,89	2 %
2 927,64618	2 891	1 %
3 205,8781	3 189,46	1 %
3 402,64199	3 401,19	0 %
4 495,92247	4 585,35	2 %
LAS LECHUZAS		
GAMMA 3P		ERROR PROMEDIO
646,109861	453,7	42 %
1 364,49276	1 274,29	7 %
1 863,32067	1 908,67	2 %
2 146,02465	2 282,6	6 %
2 343,67977	2 548,82	8 %
2495,60011	2 755,75	9 %
2 618,9317	2 925,08	10 %
2 961,19803	3 400,52	13 %
3 229,95261	3 778,8	15 %
3 419,3158	4 047,6	16 %
4 463,26136	5 556,16	20 %

Continuación de la tabla XXIV.

LAS LECHUZAS		
GUMBEL		ERROR PROMEDIO
707.801645	594,6	19%
1390.22322	1391,84	0 %
1842.04567	1919,68	4 %
2096.96009	2217,48	5 %
2275.44462	2425,99	6 %
2412.92455	2586,6	7 %
2524.76835	2717,27	7 %
2836.43511	3081,37	8 %
3082.59559	3368,94	8 %
3256.81853	3572,48	9 %
4228.26045	4707,36	10 %
LAS LECHUZAS		
LOG GUMBEL		ERROR PROMEDIO
456,372956	351,54	30%
1 107,17681	916,15	21 %
1 990,91325	1 727,39	15 %
2 772,22382	2 470,49	12 %
3 495,39716	3 173,84	10 %
4 178,66432	3 849,38	9 %
4 831,91451	4 503,69	7 %
7 242,76614	6 975,19	4 %
9 971,09965	9 853,99	1 %
12 502,8115	12 583,93	1 %
44 148,6097	49 203,21	10 %
ERROR PROMEDIO		9 %
MALACATAN		
NORMAL		ERROR PROMEDIO
291,916652	291,91	0 %
430,825843	483,21	11 %
503,436139	583,2	14 %
539,670185	633,11	15 %
563,398974	665,78	15 %
580,866569	689,84	16 %
594,603405	708,76	16 %
630,886949	758,73	17 %
657,726292	795,69	17 %
675,87928	820,69	18 %
766,955901	946,11	19 %

Continuación de la tabla XXIV.

MALACATAN		
LOG NORMAL		ERROR PROMEDIO
247,139045	225,37	10 %
418,53065	423,85	1 %
551,210795	589,66	7 %
632,405783	695,27	9 %
691,954548	774,49	11 %
739,344775	838,52	12 %
778,882274	892,56	13 %
893,781707	1 052,67	15 %
989,546794	1 189,31	17 %
1 060,07021	1 291,64	18 %
1 497,40556	1 954,34	23 %
MALACATAN		
GAMMA		ERROR PROMEDIO
261,787134	246,81	6 %
413,769752	434,88	5 %
512,044138	562,18	9 %
566,17441	633,62	11 %
603,501653	683,33	12 %
631,941307	721,42	12 %
654,884354	752,28	13 %
717,953332	837,64	14 %
766,934255	904,42	15 %
801,196655	951,36	16 %
987,120543	1 208,79	18 %
MALACATAN		
GAMMA 3P		ERROR PROMEDIO
258,789671	240,63	8 %
412,038073	452,13	9 %
513,093652	595,72	14 %
569,206269	676,38	16 %
608,053755	732,55	17 %
637,72677	775,6	18 %
661,708573	810,48	18%
727,816249	907,02	20 %
779,323825	982,58	21 %
815,431238	1 035,7	21 %
1 012,29791	1 327,23	24 %

Continuación de la tabla XXIV.

MALACATAN		
GUMBEL		ERROR PROMEDIO
264,810395	254,58	4 %
410,669528	455,45	10 %
507,240966	588,44	14 %
561,725755	663,48	15 %
599,874608	716,02	16 %
629,259234	756,48	17 %
653,164457	789,4	17 %
719,779356	881,14	18 %
772,393101	953,6	19 %
809,631091	1 004,88	19 %
1 017,26473	1 290,83	21 %
MALACATAN		
LOG GUMBEL		ERROR PROMEDIO
222,9959	199,23	12 %
387,730049	386,73	0 %
559,222109	599,95	7 %
687,577645	768,62	11 %
794,609194	914,21	13 %
888,281437	1 044,91	15 %
972,574576	1 164,89	17 %
1 252,09948	1 577,02	21 %
1 528,60265	2 003,26	24 %
1 760,4603	2 372,88	26 %
3 869,03389	6 099,73	37 %
ERROR PROMEDIO		14 %
MELENDREZ II		
NORMAL		ERROR PROMEDIO
314,063832	311,81	1 %
558,619785	506,33	10 %
686,453515	608,01	13 %
750,245203	658,75	14 %
792,020815	691,98	14 %
822,773312	716,44	15 %
846,957636	735,68	15 %
910,836467	786,49	16 %
958,088352	824,07	16 %
990,047515	849,49	17 %
1150,39205	977,03	18 %

Continuación de la tabla XXIV.

MELENDREZ II		
LOG NORMAL		ERROR PROMEDIO
202,477503	254,32	20 %
470,905926	435,64	8 %
732,04907	577,18	27 %
912,337632	664,18	37 %
1 053,83293	728,14	45 %
1 171,83303	779,13	50 %
1 273,83998	821,72	55 %
1 588,03798	945,76	68 %
1 869,327	1 049,41	78 %
2 087,31446	1 125,87	85 %
3 630,1399	1 602,31	127 %
MELENDREZ II		
GAMMA		ERROR PROMEDIO
237,130798	273,02	13 %
494,108228	452,23	9 %
680,349823	570,44	19 %
787,617762	636,08	24 %
863,185605	681,54	27 %
921,543665	716,25	29 %
969,078888	744,31	30 %
1 101,65784	821,67	34 %
1 206,35505	881,94	37 %
1 280,39626	924,19	39 %
1 691,79195	1 154,59	47 %
MELENDREZ II		
GAMMA 3P		ERROR PROMEDIO
243,127738	251,75	3 %
513,451441	466,45	10 %
701,157758	618,52	13 %
807,537776	705,35	14 %
881,914356	766,28	15 %
939,081181	813,22	15 %
985,490207	851,39	16 %
1 114,28322	957,55	16 %
1 215,41416	1 041,14	17 %
1 286,67053	1 100,14	17 %
1 679,50175	1 426,63	18 %

Continuación de la tabla XXIV.

MELENDREZ II		
GUMBEL		ERROR PROMEDIO
266,342032	273,85	3 %
523,133675	478,11	9 %
693,152087	613,34	13 %
789,075038	689,64	14 %
856,23783	743,06	15 %
907,970801	784,21	16 %
950,057034	817,69	16 %
1 067,3356	910,97	17 %
1 159,96449	984,65	18 %
1 225,52366	1 036,79	18 %
1 591,07214	1 327,56	20 %
MELENDREZ II		
LOG GUMBEL		ERROR PROMEDIO
171,73074	228,97	25 %
416,624802	402,91	3 %
749,170171	585,76	28 %
1 043,17323	723,44	44 %
1 315,29954	838,68	57 %
1 572,40938	939,81	67 %
1 818,22399	1 031,02	76 %
2 725,41476	1 334,63	104 %
3 752,07229	1 636,43	129 %
4 704,74213	1 890,42	149 %
16 612,8893	4 226,2	293 %
ERROR PROMEDIO		36 %
MONTECRISTO		
NORMAL		ERROR PROMEDIO
308,2	302,18	2 %
530,76	439,08	21 %
6471	510,64	27 %
705,15	546,35	29 %
743,17	569,73	30 %
771,15	586,95	31 %
793,16	600,48	32 %
851,29	636,24	34 %
894,3	662,69	35 %
923,38	680,58	36 %
1 069,3	770,34	39 %

Continuación de la tabla XXIV.

MONTECRISTO		
LOG NORMAL		ERROR PROMEDIO
236,8	257,31	8 %
430,49	433,73	1 %
588,36	569,84	3 %
687,63	652,98	5 %
761,54	713,9	7 %
820,98	762,35	8 %
870,97	802,75	8 %
1 018,13	920,05	11 %
1 142,77	1 017,72	12 %
1 235,61	1 089,59	13 %
1 828,39	1 534,42	19 %
MONTECRISTO		
GAMMA		ERROR PROMEDIO
259,79	272	4 %
460,09	426,61	8 %
595,96	526,25	13 %
672,27	581,06	16 %
725,39	618,84	17 %
766,11	647,6	18 %
799,1	670,8	19 %
890,38	734,54	21 %
961,82	784,01	23 %
1 012,04	818,6	24 %
1 287,6	1 006,17	28 %
MONTECRISTO		
GAMMA 3P		ERROR PROMEDIO
207,28	288,51	28 %
431,22	433,57	1 %
629,25	517,45	22 %
751,28	561,43	34 %
839,86	591,01	42 %
909,52	613,18	48 %
966,98	630,85	53 %
1 130,18	678,54	67 %
1 261,68	714,76	77 %
1 355,85	739,72	83 %
1 892,83	870,63	117 %

Continuación de la tabla XXIV.

MONTECRISTO		
GUMBEL		ERROR PROMEDIO
264,77	275,47	4 %
498,47	419,21	19 %
653,19	514,39	27 %
740,49	568,08	30 %
801,61	605,68	32 %
848,69	634,64	34 %
886,99	658,2	35 %
993,72	723,85	37 %
1 078,01	775,7	39 %
1 137,68	812,4	40 %
1 470,34	1 017,03	45 %
MONTECRISTO		
LOG GUMBEL		ERROR PROMEDIO
210,74	232,38	9 %
394,73	402,08	2 %
598,07	578,05	3 %
756,08	709,43	7 %
890,95	818,81	9 %
1 011,03	914,44	11 %
1 120,56	1 000,42	12 %
149,5	1 285,07	16 %
1 871,67	1 566,1	20 %
2 196,92	1 801,4	22 %
5 367,95	3 931,6	37 %
ERROR PROMEDIO		25 %
PAJAPITA		
NORMAL		ERROR PROMEDIO
423,694644	421,02	1 %
753,618171	750,9	0 %
926,075045	923,34	0 %
1 012,13461	1 009,39	0 %
1 068,49291	1 065,75	0 %
1 109,98023	1 107,23	0 %
1 142,60662	1 139,85	0 %
1 228,78375	1 226,02	0 %
1 292,52993	1 289,76	0 %
1 335,64513	1 332,87	0 %
1 551,96142	1 549,16	0 %

Continuación de la tabla XXIV.

PAJAPITA		
LOG NORMAL		ERROR PROMEDIO
273,15668	260,48	5 %
635,285882	671,08	5 %
987,586721	1 100,55	10 %
1 230,80893	1 408,69	13 %
1 421,69624	1 655,86	14 %
1 580,88684	1 865,11	15 %
1 718,50153	2 048,08	16 %
2 142,37718	2 622,41	18 %
2 521,85625	3 148,55	20 %
2 815,93697	3 563,04	21 %
4 897,3192	6 626,61	26 %
PAJAPITA		
GAMMA		ERROR PROMEDIO
319,90646	309,86	3 %
666,587453	667,69	0 %
917,840726	930,52	1 %
1 062,55287	1 082,64	2 %
1 164,49932	1 190,04	2 %
1 243,22853	1 273,11	2 %
1 307,35695	1 340,84	2 %
1 486,21547	1 530,01	3 %
1 627,45952	1 679,64	3 %
1 727,34643	1 785,57	3 %
2 282,34873	2 375,49	4 %
PAJAPITA		
GAMMA 3P		ERROR PROMEDIO
327,996764	342,48	4 %
692,682835	706,41	2 %
945,912124	946,29	0 %
1 089,4264	1 079,47	1 %
1 189,76574	1171,66	2 %
1 266,88789	1 242,07	2 %
1 329,497	1 298,98	2 %
1 503,24802	1 455,84	3 %
1 639,6809	1 578,05	4 %
1 735,81086	1 663,72	4 %
2 265,76836	2130,76	6 %

Continuación de la tabla XXIV.

PAJAPITA		
GUMBEL		ERROR PROMEDIO
359314511	356,64	1 %
705,744863	703,04	0 %
935,111899	932,38	0 %
1064,51884	1 061,77	0 %
1155,12627	1 152,37	0 %
1224,91776	1 222,15	0 %
1281,69511	1 278,93	0 %
1439,9123	1 437,13	0 %
1564,87532	1 562,08	0 %
1653,31935	1 650,51	0 %
2146,47048	2 143,61	0 %
PAJAPITA		
LOG GUMBEL		ERROR PROMEDIO
231,67709	216,56	7 %
562,05675	584,98	4 %
1 010,68431	1 129,45	11 %
1 407,31553	1 637,09	14 %
1 774,43346	2 122,97	16 %
2 121,29308	2 593,49	18 %
2452,91462	3 052,21	20 %
3 676,78006	4 805,17	23 %
5 061,81473	6 876,68	26 %
6 347,0347	8 862,49	28 %
22 411,9797	36 465,85	39 %
ERROR PROMEDIO		7 %

ERROR PROMEDIO REGIÓN I	29 %
ERROR PROMEDIO REGIÓN II	20 %
ERROR PROMEDIO REGIÓN III	10 %
ERROR PROMEDIO REGIÓN IV	27 %

Fuente: elaboración propia.

6.10. Comparación de error promedio entre el error por medio de análisis regional y el error promedio por medio de modelo matemático

Error promedio por medio de análisis regional:

Tabla XXV. **Error promedio por medio de análisis regional**

ERROR PROMEDIO REGIÓN I	32 %
ERROR PROMEDIO REGIÓN II	19 %
ERROR PROMEDIO REGIÓN III	10 %
ERROR PROMEDIO REGIÓN IV	16 %

Fuente: elaboración propia.

Error promedio mediante de modelos matemáticos:

Tabla XXVI. **Error promedio por medio de modelos matemáticos**

ERROR PROMEDIO REGIÓN I	29 %
ERROR PROMEDIO REGIÓN II	20 %
ERROR PROMEDIO REGIÓN III	10 %
ERROR PROMEDIO REGIÓN IV	27 %

Fuente: elaboración propia.

6.11. Uso de los resultados de los análisis

Como ejemplo de aplicación considerar el río que deriva hasta la estación Agua Caliente. El área de la cuenca es de 247 Km² (tabla XV) y un perímetro de 88,34 Km (tabla XV), de los cuales el 100 % se encuentra dentro de la

Región I del análisis. La estimación de la crecida máxima para un período de retorno de 100 años se realiza de la siguiente manera:

- Calcular el QMM. Como se encuentra en la Región I, se utiliza la ecuación 29:

$$QMM = 0,38493214787847(247,2) - 17,7552269536734$$

$$QMM = 77,4 \text{ m}^3$$

- Para el $Tr = 100$ años, en la región I se utilizara la distribución Log Gumbel debido a que es la que presenta el menor error para este período de retorno, por lo que $Kt_r = 11,62$ (Tabla XIII).

$$Q_{tr} = 77,4 * 11,62 = 899,388 \text{ m}^3.$$

CONCLUSIONES

1. El método de análisis regional por medio de los trazos multidimensionales, es una opción fácil de aplicar para determinar zonas homogéneas, utilizado en este caso para la vertiente del Pacífico de la República de Guatemala, determinando que está dividida en cuatro regiones homogéneas.
2. El análisis regional por medio del método de las estaciones-año es adecuado para determinar las crecidas máximas, además de determinar el error promedio calculado para las diferentes regiones homogéneas.
3. La sustitución de las propiedades morfométricas en las ecuaciones generadas para cada región homogénea da como resultado un número aproximado al valor de caudal medio determinado mediante los caudales pico registrados anualmente.

RECOMENDACIONES

1. El análisis de cuenca se facilita si se hace por medio de un software para delimitar las cuencas, en este caso se utilizó ArcGis.
2. Para realizar modelos matemáticos más exactos, es necesario poseer información de más cuencas.
3. Además de poseer información de más cuencas, es necesario que dicha información esté actualizada debido a que ciertas estaciones hidrométricas iniciaron su funcionamiento a partir de 2004.
4. Se recomienda que en la realización del método de los trazos multidimensionales, las cuencas cuyo comportamiento no corresponda a ninguna región homogénea, sean agrupadas en regiones dadas su ubicación geográfica.
5. Para el análisis de cuencas por medio del software ArcGis, se recomienda un ordenador con un procesador como mínimo Intel Core i3, debido a que otros procesadores soportan el programa pero los procesos se hacen extensos.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILERA SIERRA, Elvin Geovany. *Análisis Regional de crecidas máximas para honduras*. Honduras: s.e. 2010. 147 p.
2. BIONDIC, Doris; BARBALIC, Daniel; PETRAS, James. *Creager and Franco-Rodier envelope curves for extreme floods in the Danube River Basin in Croatia*. In: *Proc. XXIst Conference of the Danube Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management*. Romania: s.e. 2007. 130 p.
3. Chow, Vladimir, Maidment, Danilo, Mays, Laura. *Hidrología aplicada*. México: Mc Graw-Hill Interamericana, 1994. 577 Pág.
4. LARIOS ÁLVAREZ, Rafael. *Análisis regional de frecuencia de avenidas máximas*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería Civil. Guatemala: Universidad Mariano Gálvez de Guatemala, 1986. 176 p.
5. FARÍAS, Hilmar; OLMOS, Lupe, GALVÁN, Lucia; INFANTE, Christian. *Regionalización de crecidas para sistemas fluviales del Noroeste Argentino*. *Congreso Regional de Ciencia y Tecnología*. Argentina: s.e. 2003. 150 p.
6. GONZÁLES, Daniel. *Análisis regional de crecidas de Panamá*. Panamá: s.e. 2008. 108 p.

7. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Análisis regional de crecidas en la república de Guatemala*. [en línea]. <<http://myslide.es/documents/inf-resumen-crecidasdoc.html>>. [Consulta: 8 de agosto de 2014].
8. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Ríos de Guatemala.
9. LINSLEY, Ramon, KOHLER, Melani; PAULHUS, James. *Hidrología para ingenieros*. México: Mc Graw -Hill Latinoamericana, 1977. 386 p.
10. MAGGIO, Ether. *Análisis estadístico de valores extremos*. Argentina: 2003. 102 p.
11. ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM). *Guía de prácticas hidrológicas*. 5ta ed. 1994. 818 p.
12. ZAMORA, Esteban. *Evaluación de un sistema de alerta temprana para inundaciones en la parte baja de la cuenca del río Achiguate*. Tesis Msc. Guatemala, 2008. 167 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Software ArcGIS**

ArcGIS es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica o SIG. Producido y comercializado por ESRI, bajo el nombre genérico ArcGIS se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica. Estas aplicaciones se engloban en familias temáticas como *ArcGIS Server*, para la publicación y gestión web, o *ArcGIS Móvil* para la captura y gestión de información en campo.

ArcGIS Desktop, la familia de aplicaciones SIG de escritorio, es una de las más ampliamente utilizadas, incluyendo en sus últimas ediciones las herramientas *ArcReader*, *ArcMap*, *ArcCatalog*, *ArcToolbox*, *ArcScene* y *ArcGlobe*, además de diversas extensiones. *ArcGIS for Desktop* se distribuye comercialmente bajo tres niveles de licencias que son, en orden creciente de funcionalidades (y coste): *ArcView*, *ArcEditor* y *ArcInfo*.

Además de *ArcMap*, se pueden contar con las extensiones *3D Analyst*, *Geostatistical Analyst*, *Maplex*, *Network Analyst*, *Schematics*, *Spatial Analyst*, *Tracking Analyst* y *ArcScan*.

Continuación del apéndice 1.

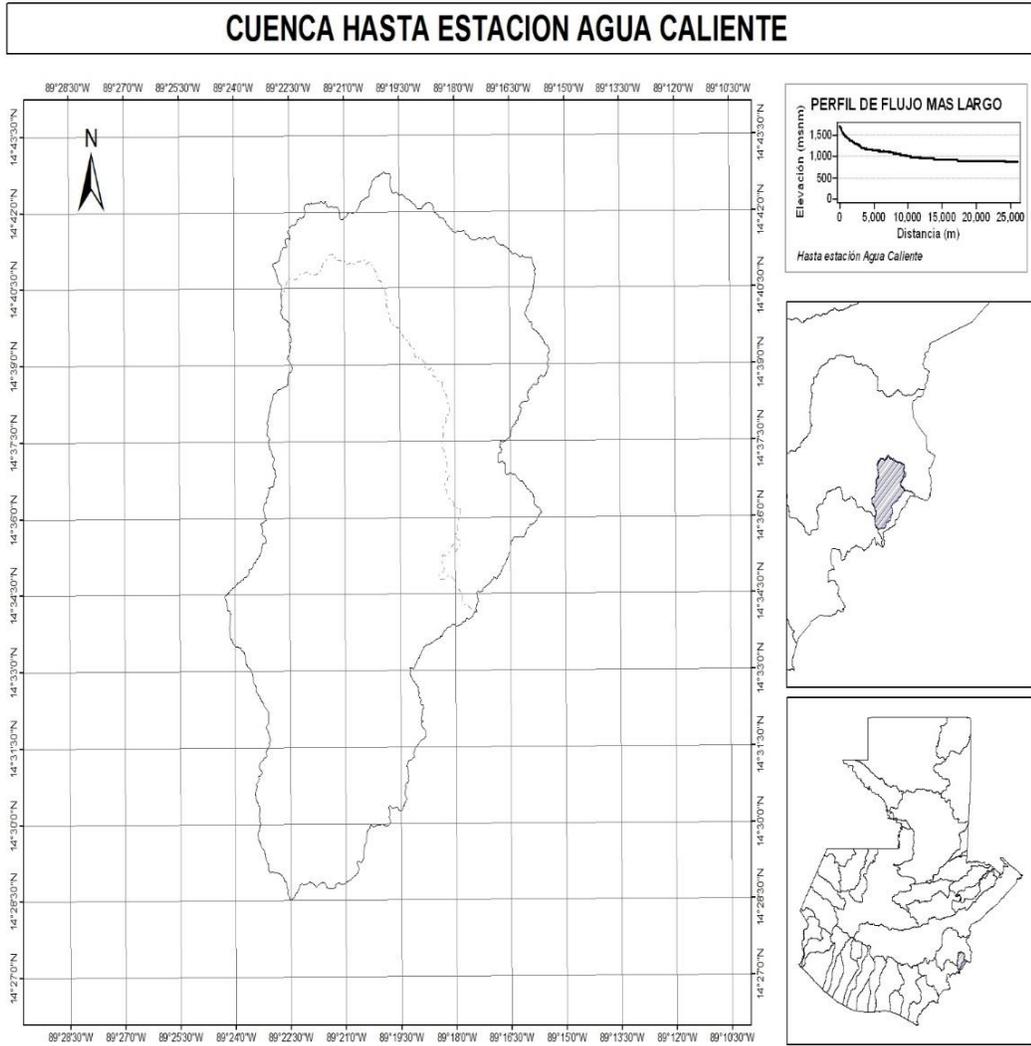
Spatial Analyst. Proporciona una amplia posibilidad de recursos relacionados con el análisis espacial de datos. Con esta herramienta se pueden crear, consultar y analizar datos ráster; combinar varias capas ráster; aplicar funciones matemáticas, construir y obtener nueva información a partir de datos ya existentes, etc. *Spatial Analyst* permite: obtener información nueva de los datos existentes; hallar ubicaciones adecuadas; realizar análisis de distancia y coste del trayecto; identificar la mejor ruta existente entre dos puntos; realizar análisis estadísticos e Interpolación de valores de datos para un área de estudio determinada.

3D Analyst. De acuerdo con Esri, la extensión *3D Analyst* de ArcGIS proporciona herramientas para la creación, visualización y análisis de datos SIG en un contexto tridimensional; la función *ArcScene* por ejemplo permite crear y animar ambientes 3D. Por ejemplo un uso común de esta herramienta es el modelado de capas geológicas y datos de agua subterránea relacionada a las captaciones de hidráulica subterránea.

Geostatistical Analyst. Esta herramienta permite la realización de análisis geoestadístico, partiendo del análisis exploratorio de los datos hasta su representación espacial.

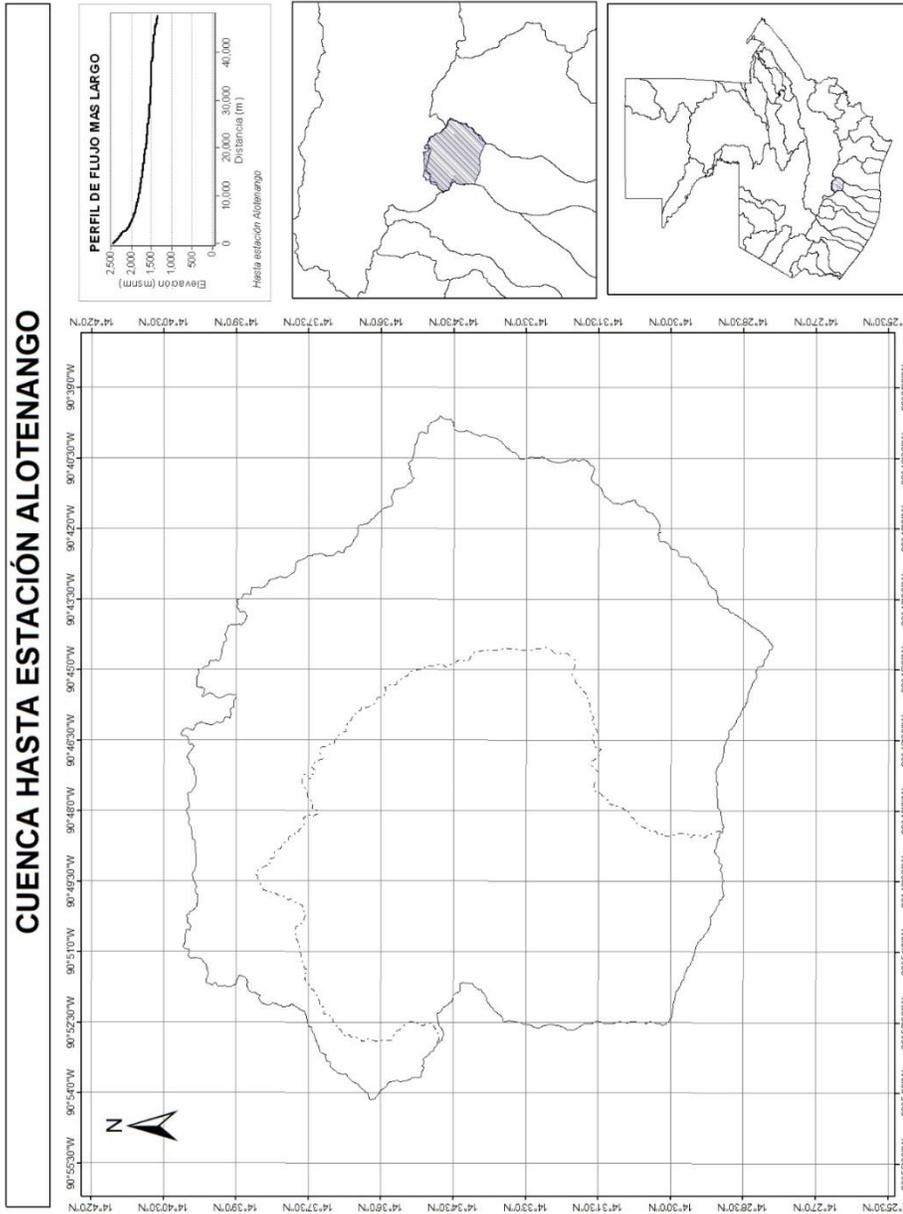
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Cuenca hasta estación agua caliente



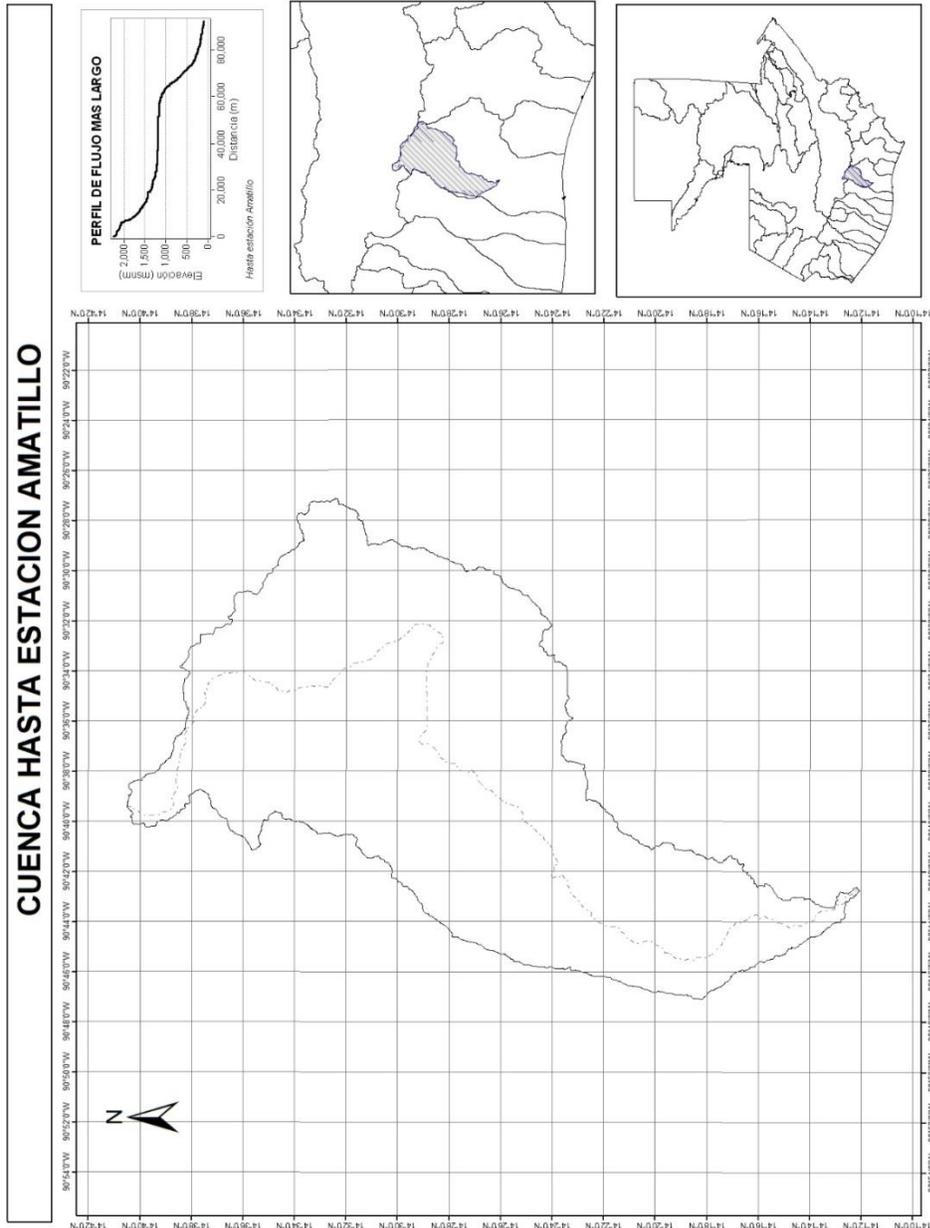
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Cuenca hasta estación Alotenango



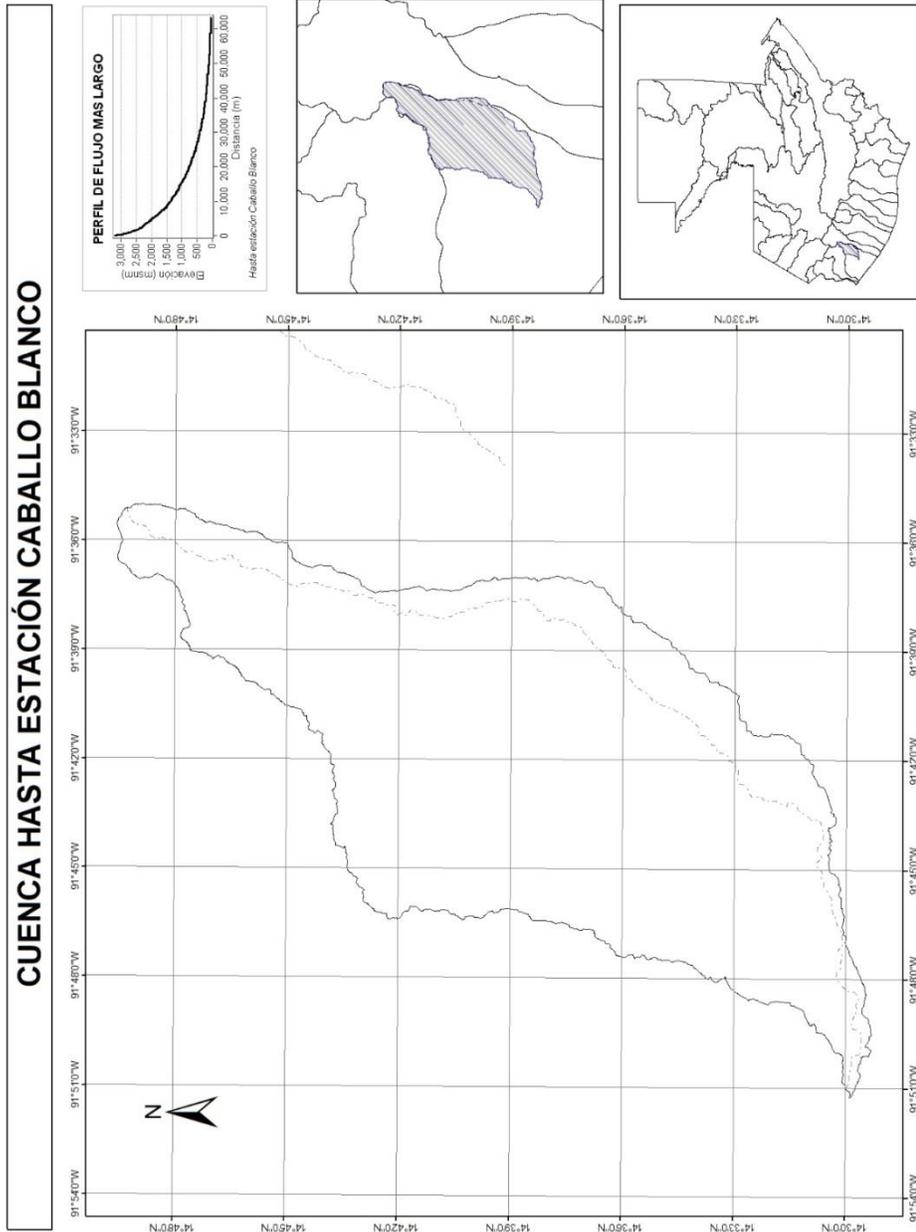
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Cuenca hasta estación Amatillo



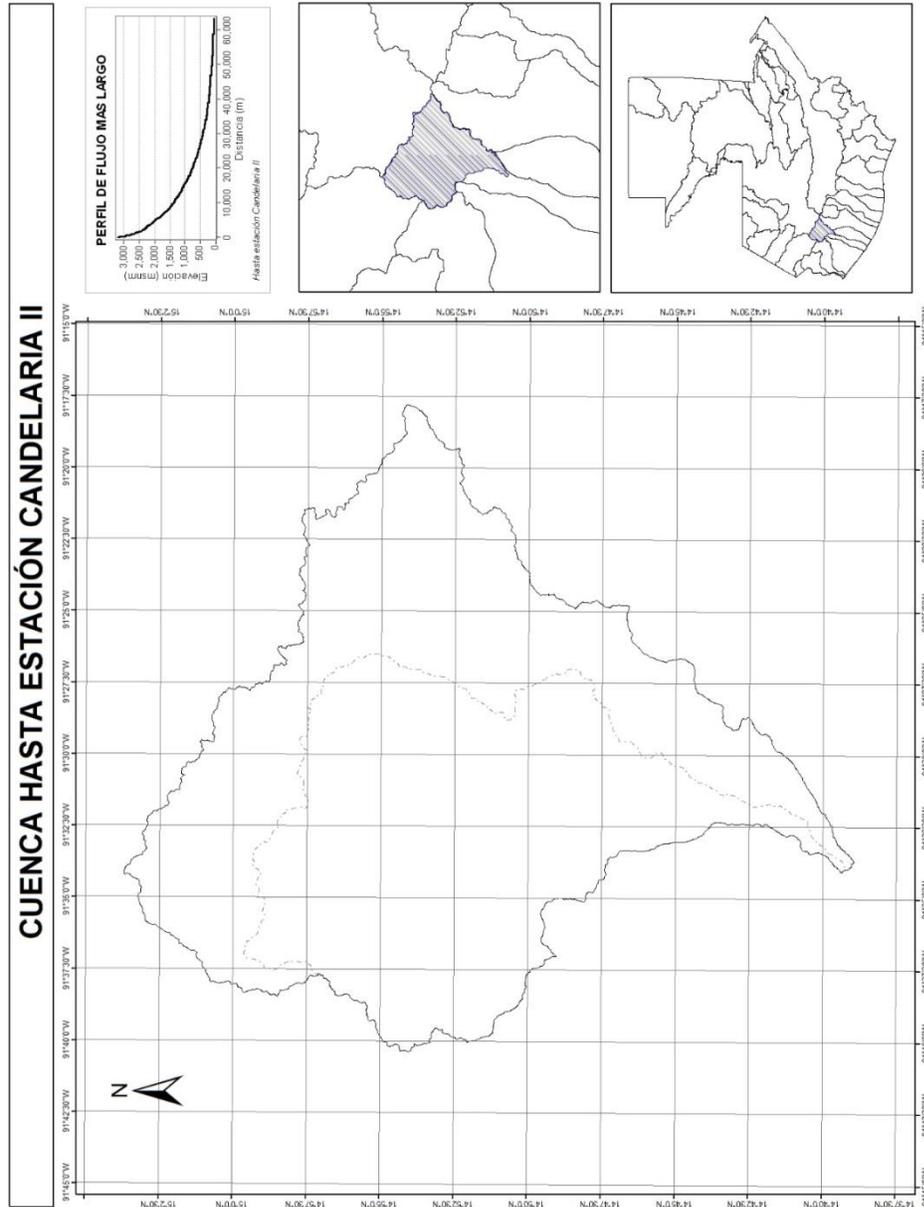
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Cuenca hasta estacion caballo Blanco



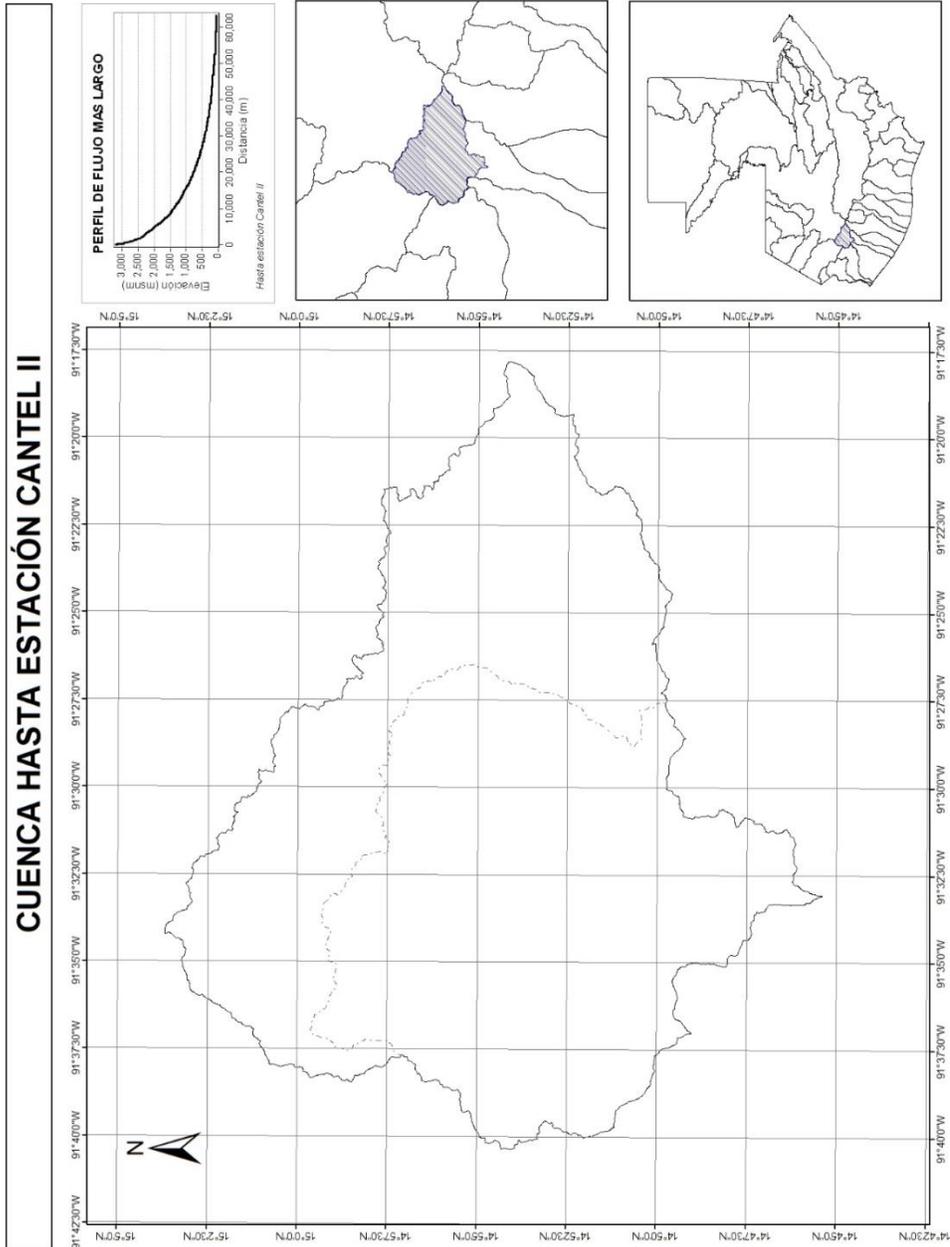
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Cuenca hasta estación candelaria II



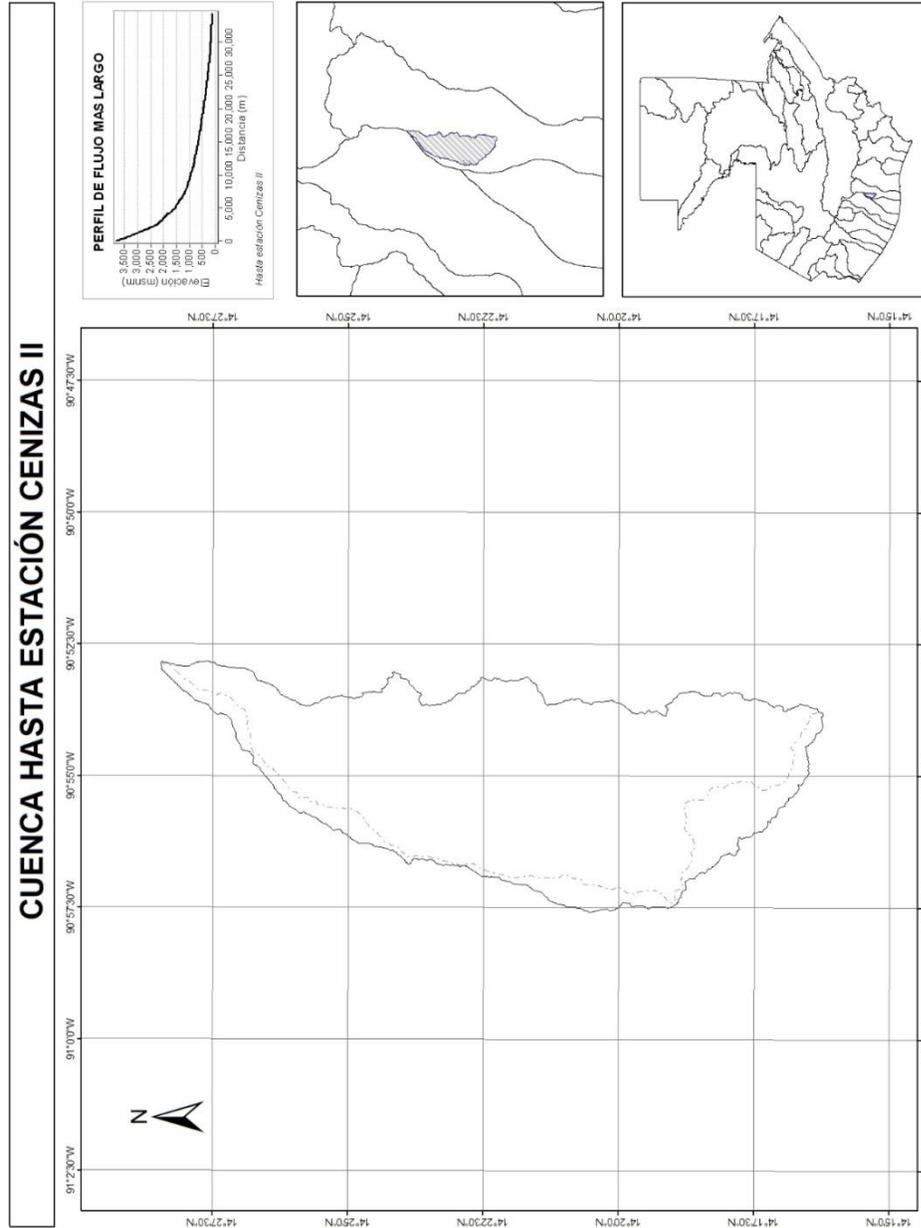
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Cuenca hasta estación cantel II



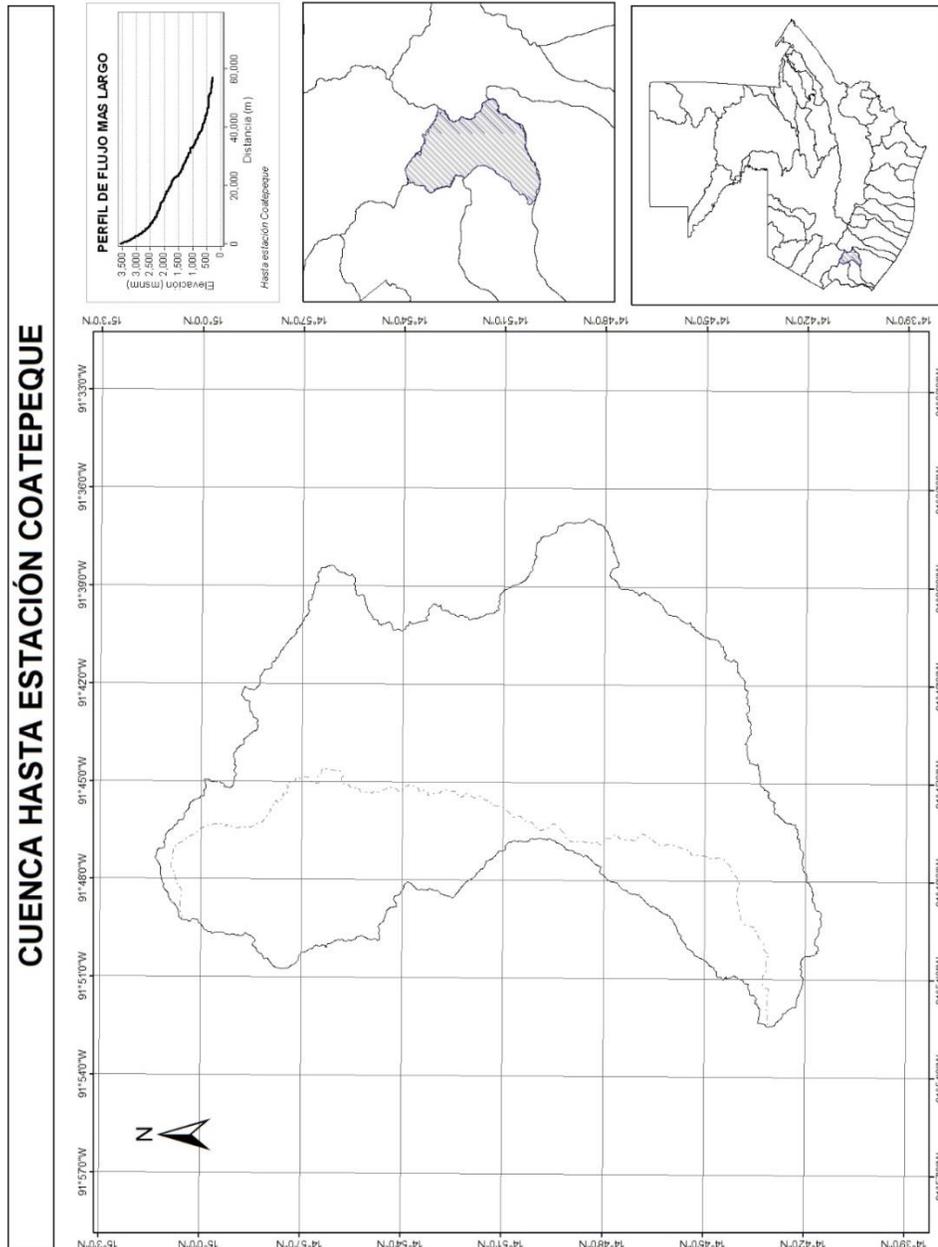
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Cuenca hasta estación Cenizas II



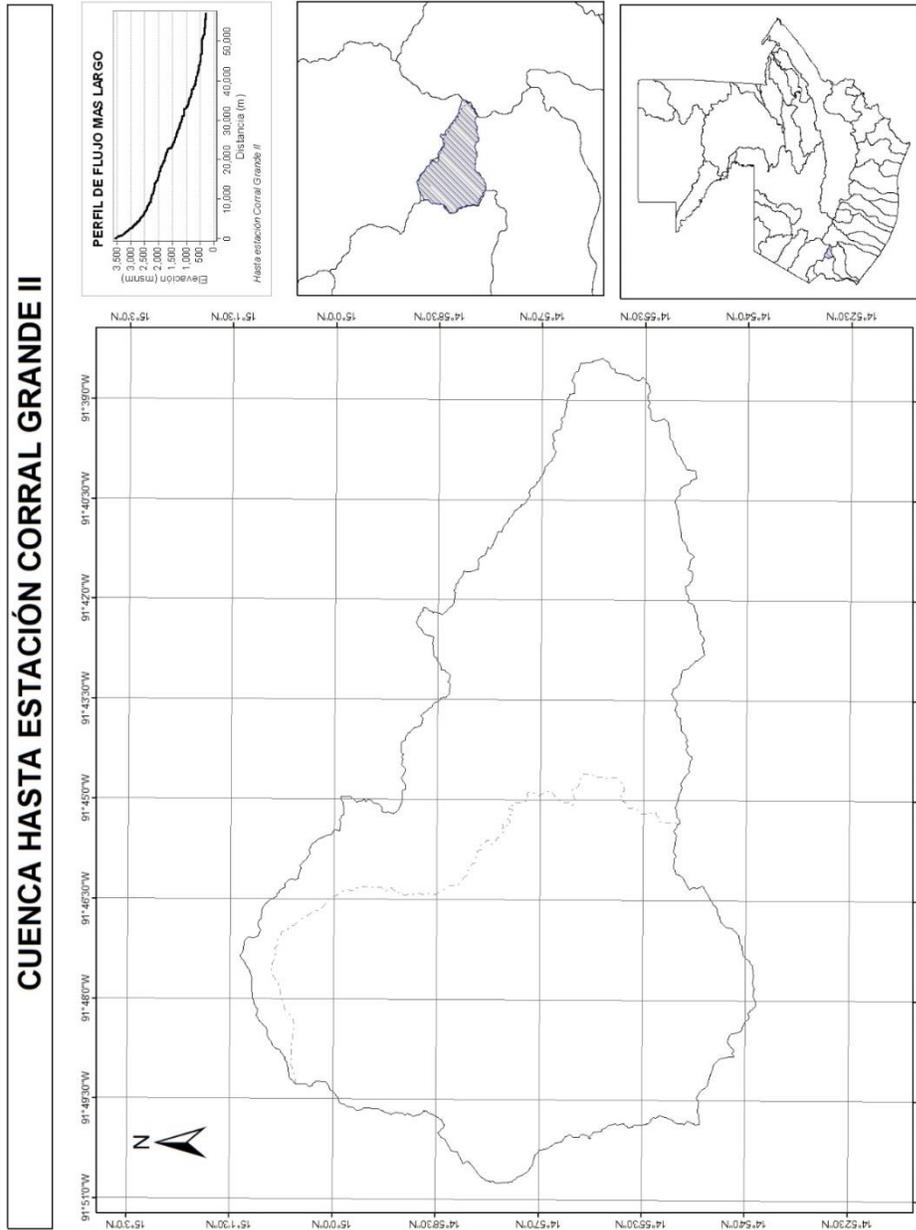
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. Cuenca hasta estación Coatepeque



Fuente: elaboración propia.

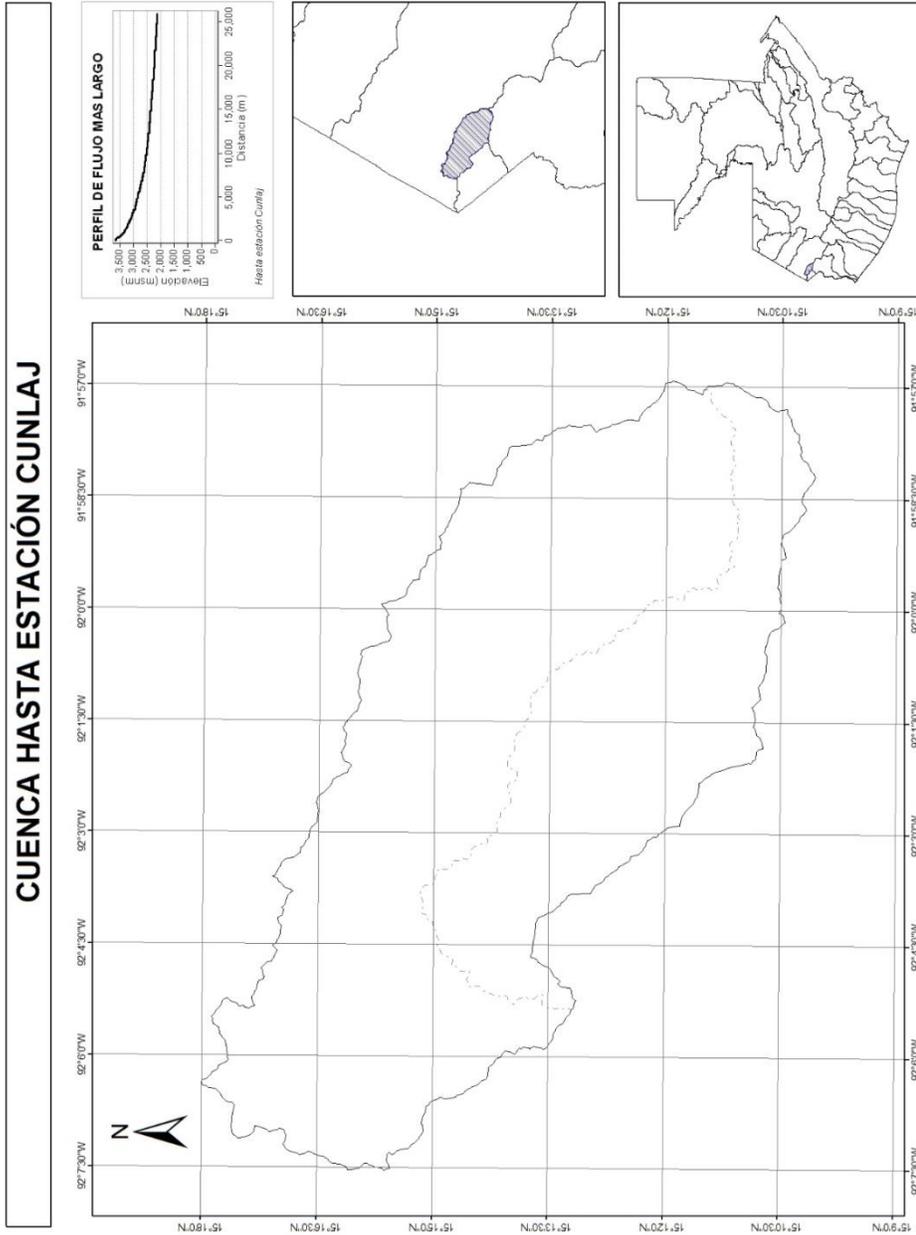
Apéndice 10. Cuenca estación corral



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11.

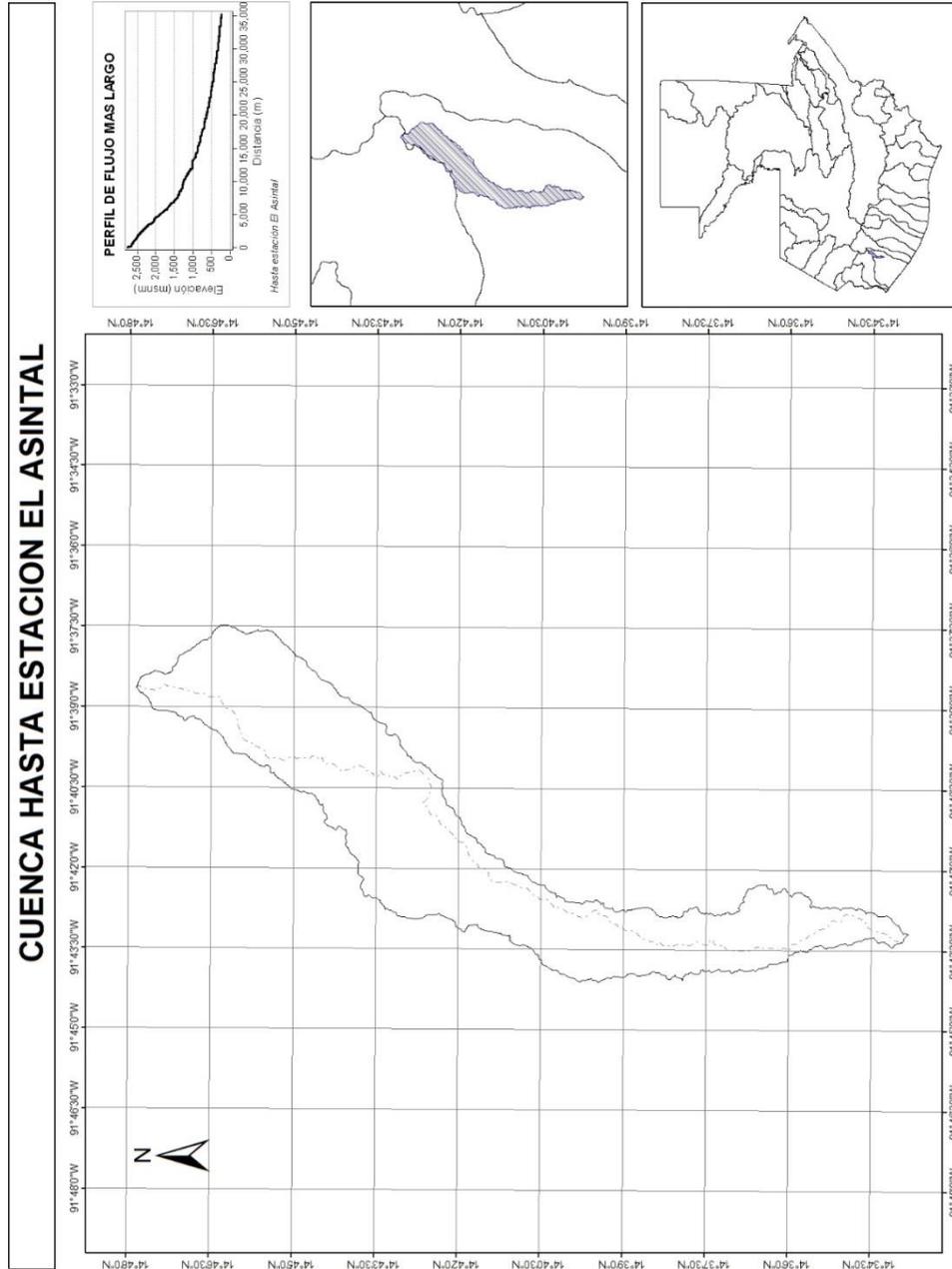
Cuenca hasta estacion Cunlaj



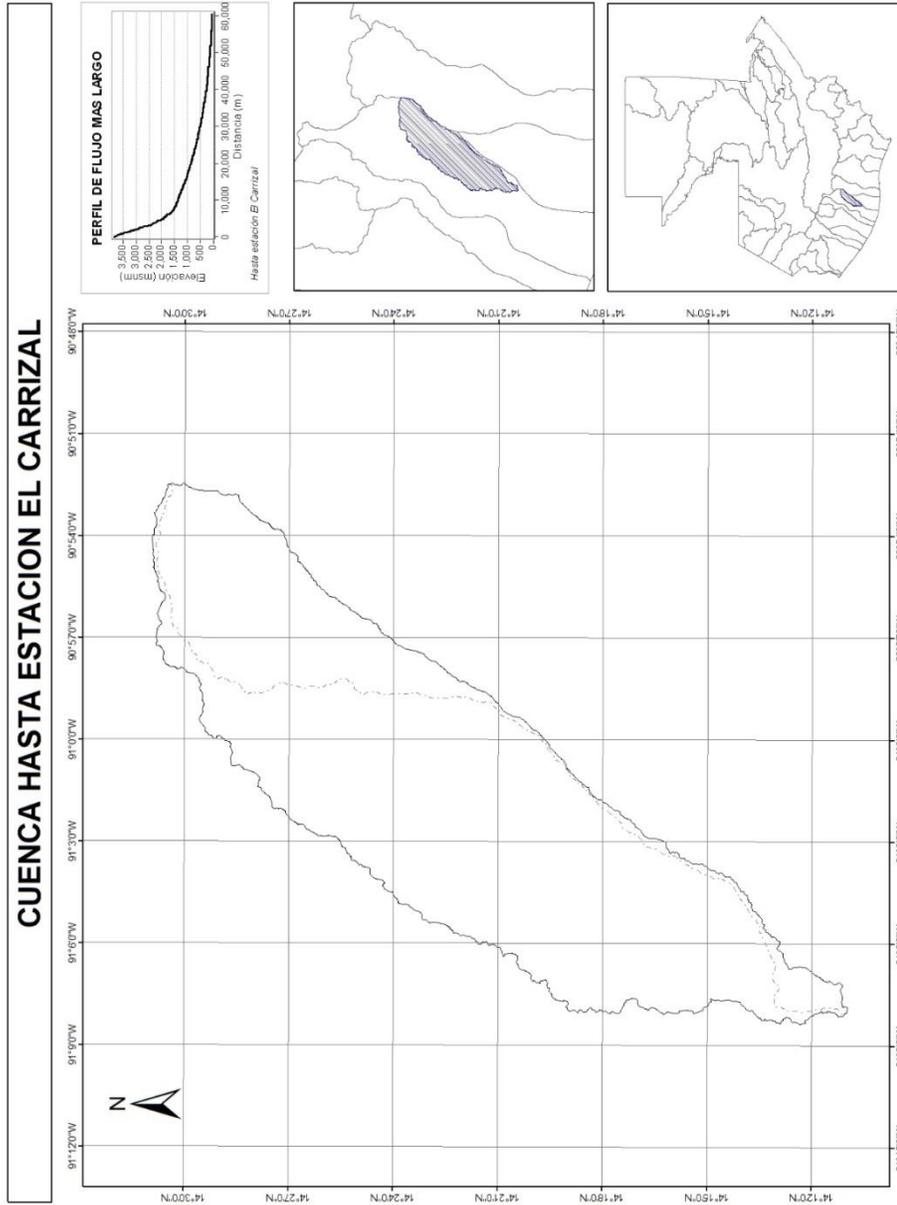
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12.

Cuenca hasta estación El Asintal



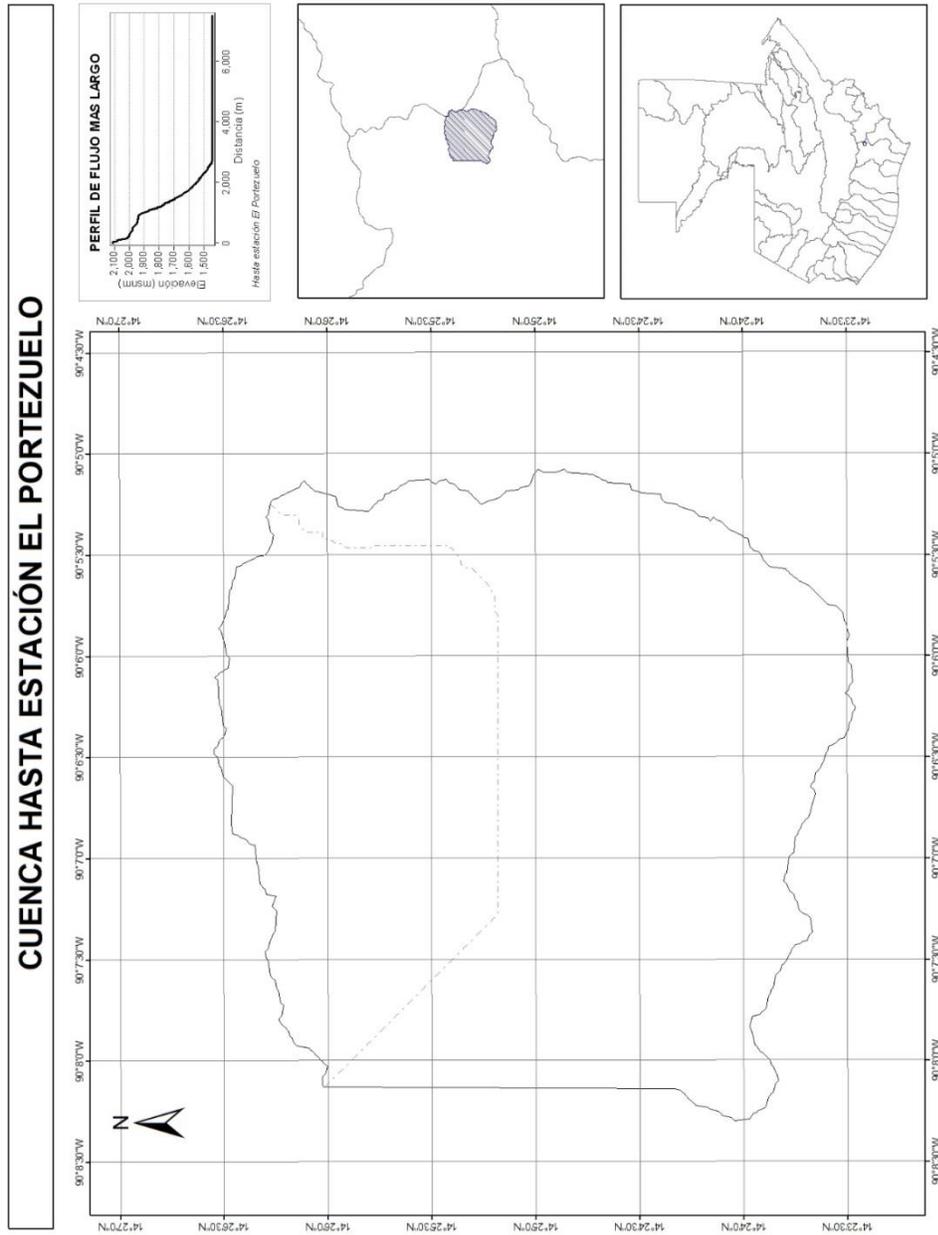
Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14.

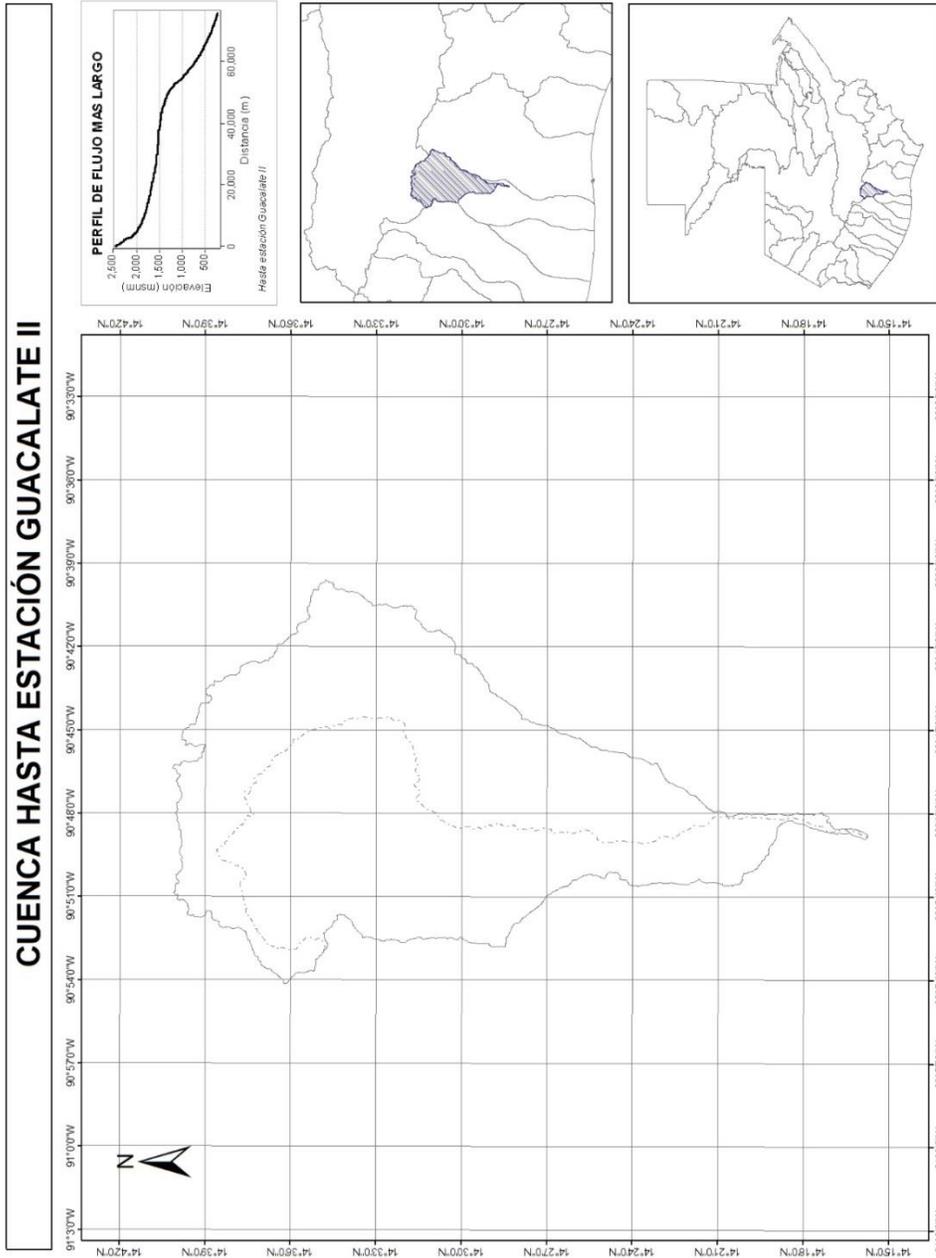
Cuenca hasta estación El Portezuelo



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15.

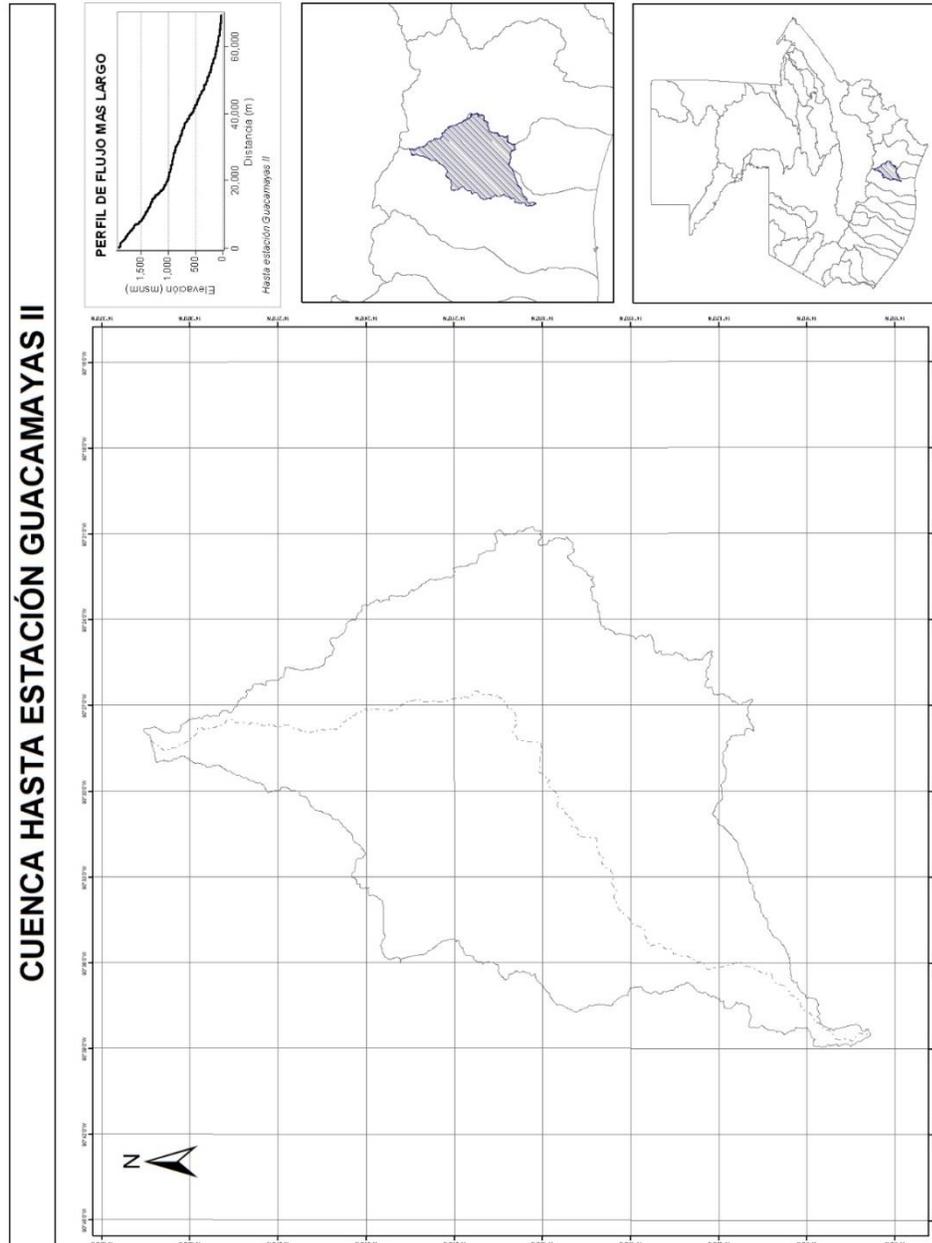
Cuenca hasta estación Guacalate II



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16.

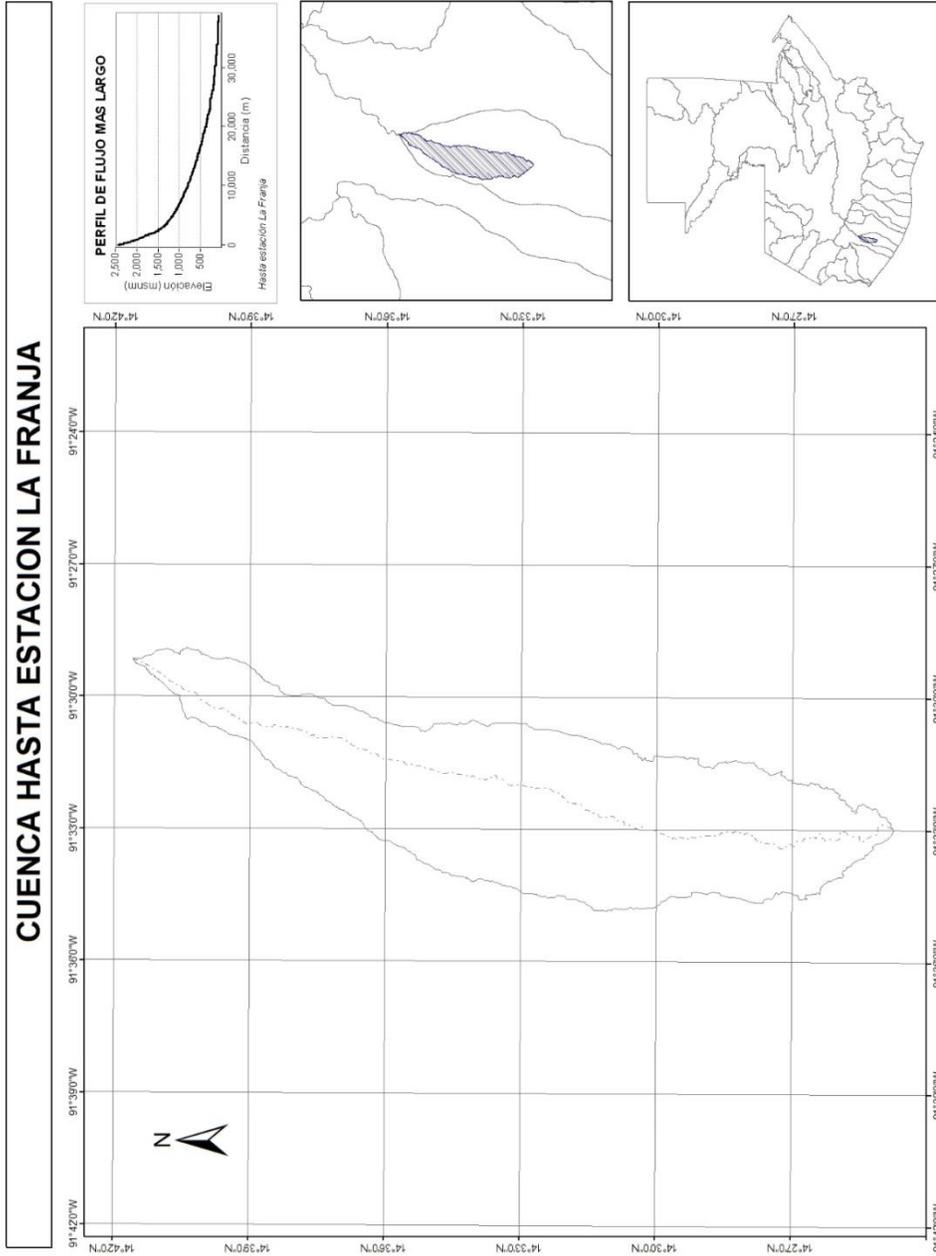
Cuenca hasta estación Guacamayas II



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17.

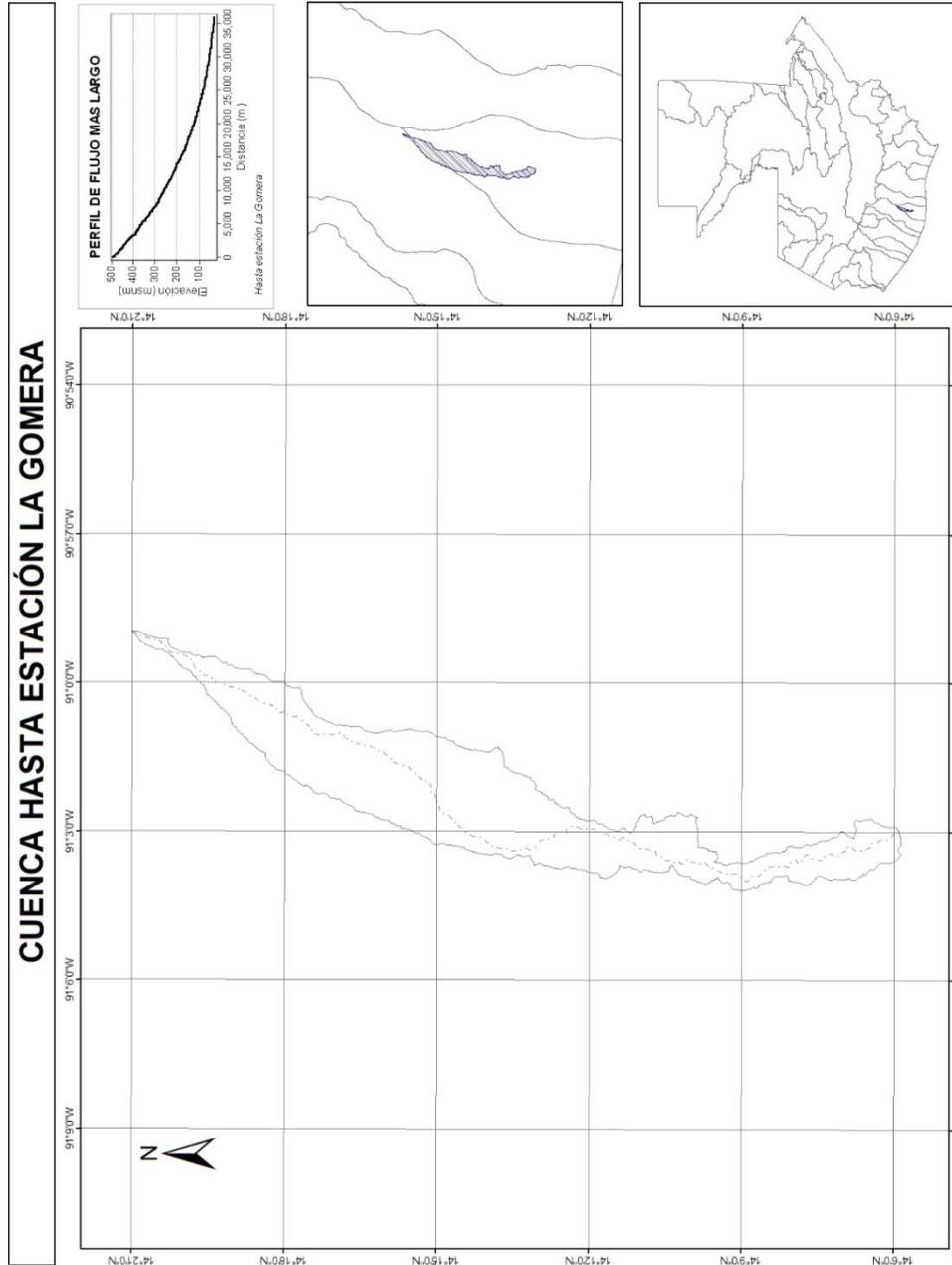
Cuenca hasta estación La Franja



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18.

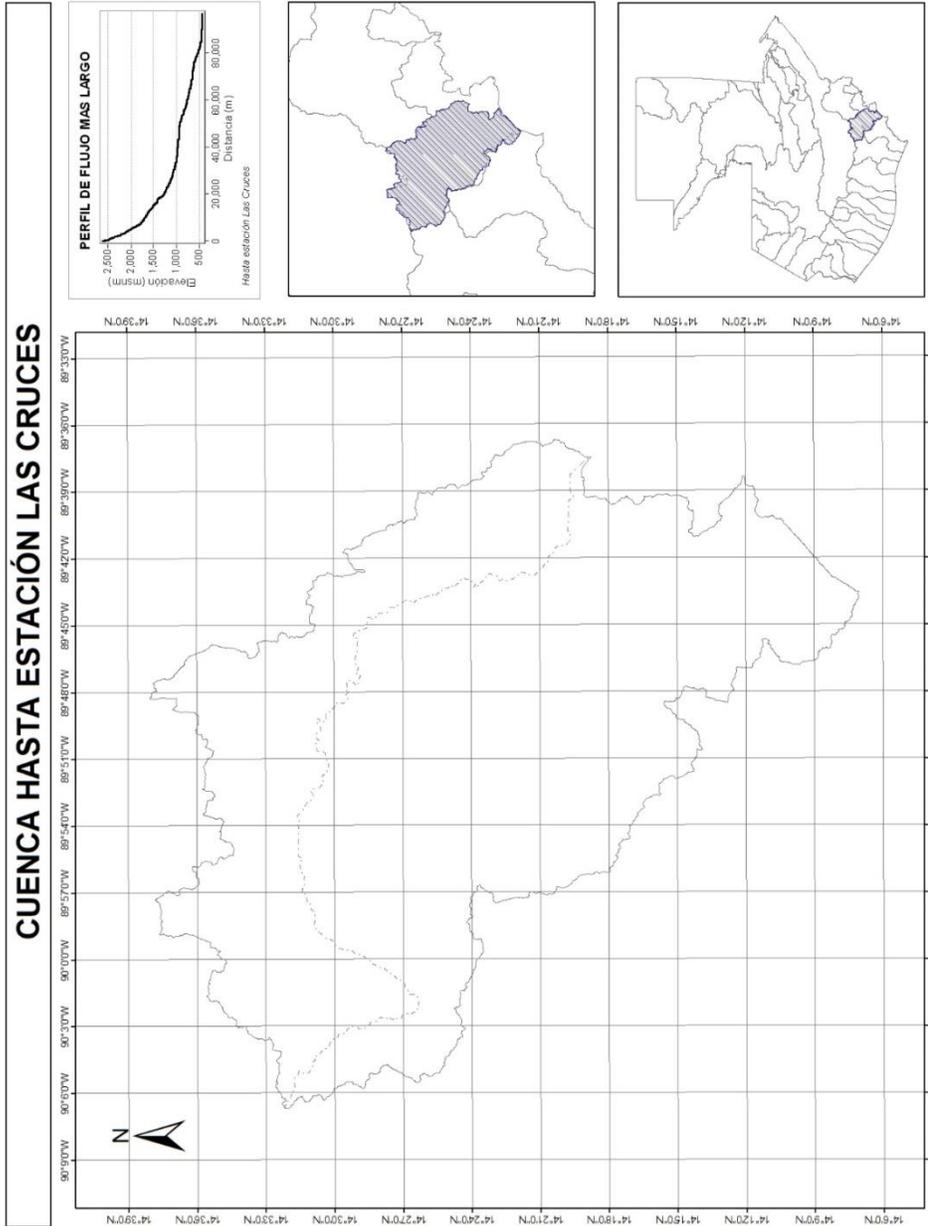
Cuenca hasta estación La Gomera



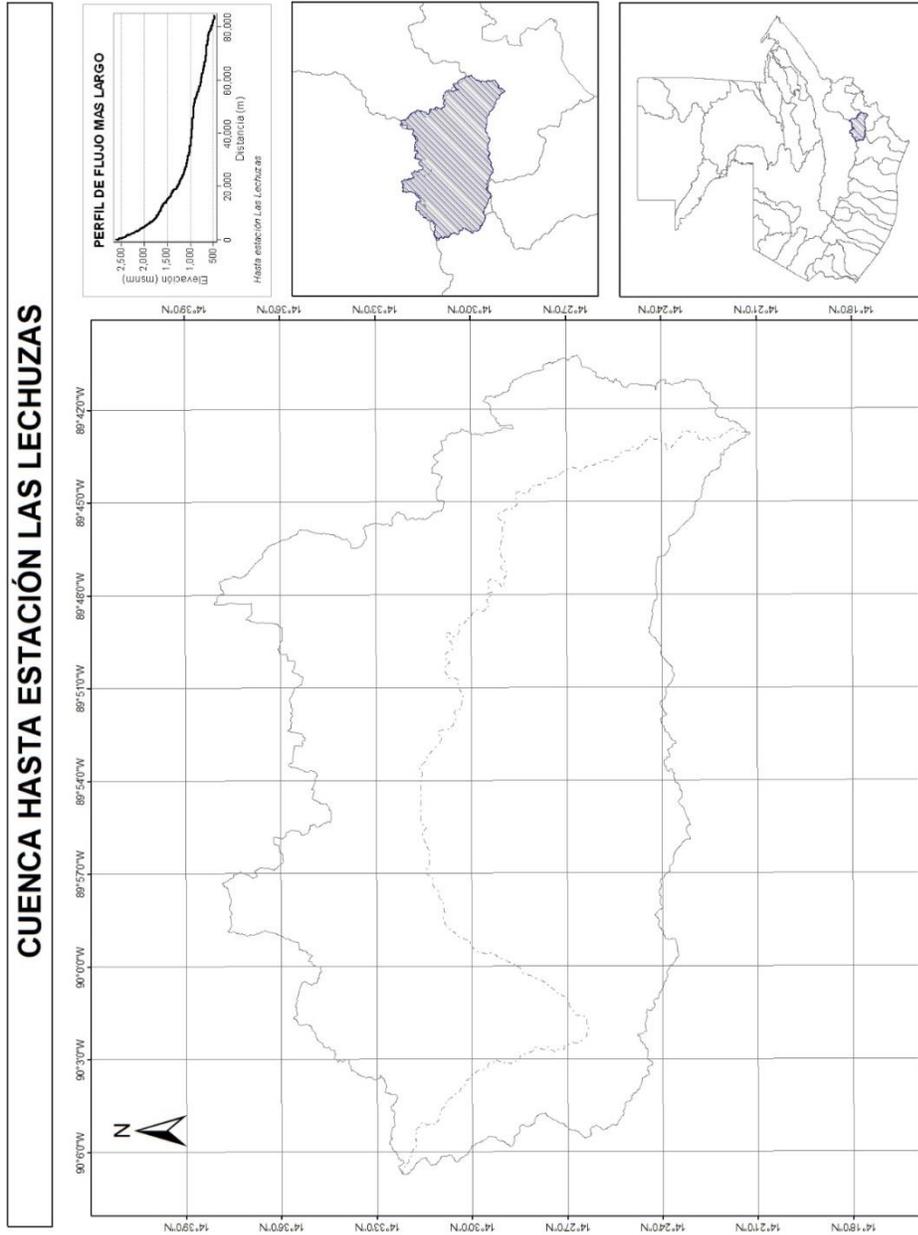
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19.

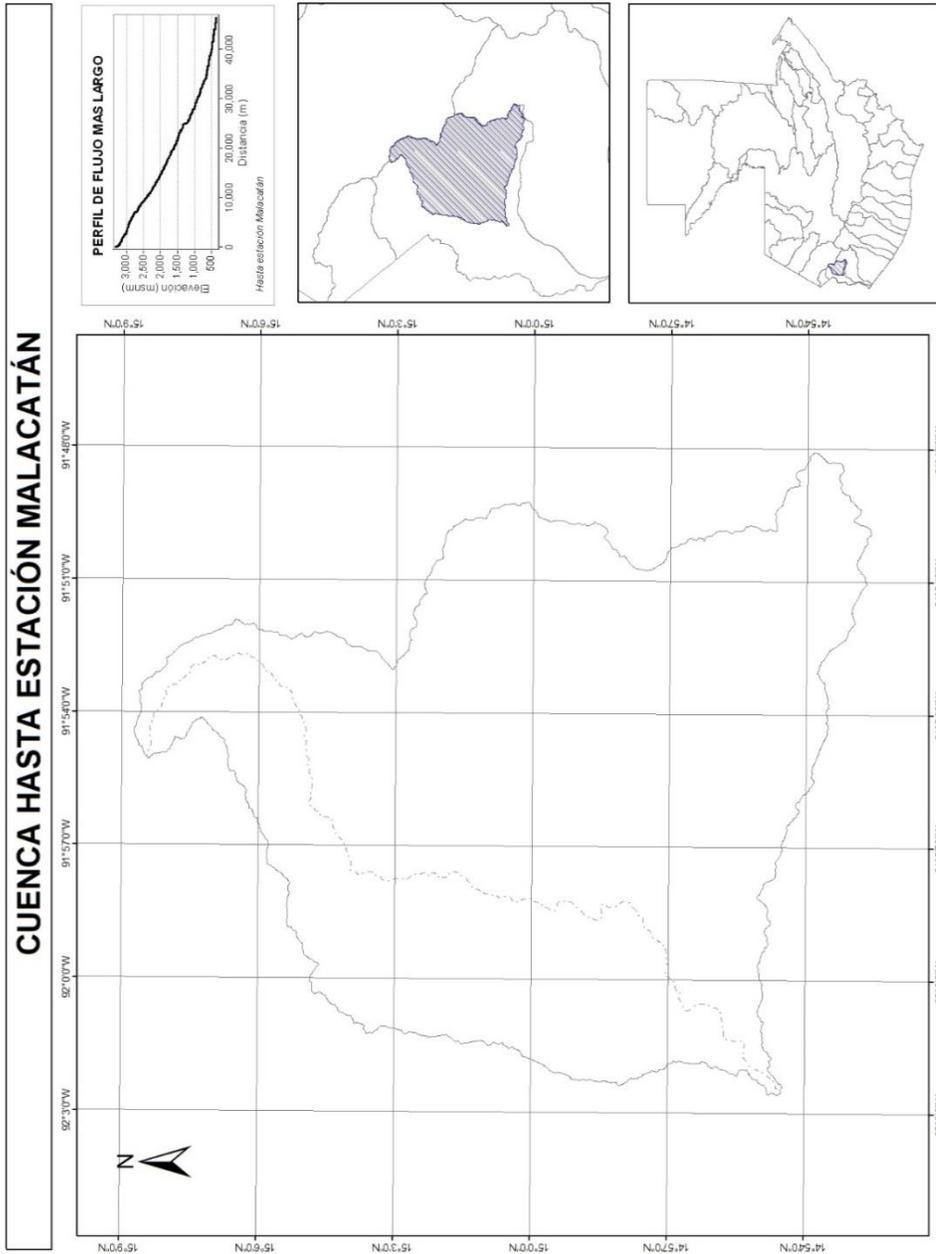
Cuenca hasta estación La Cruces



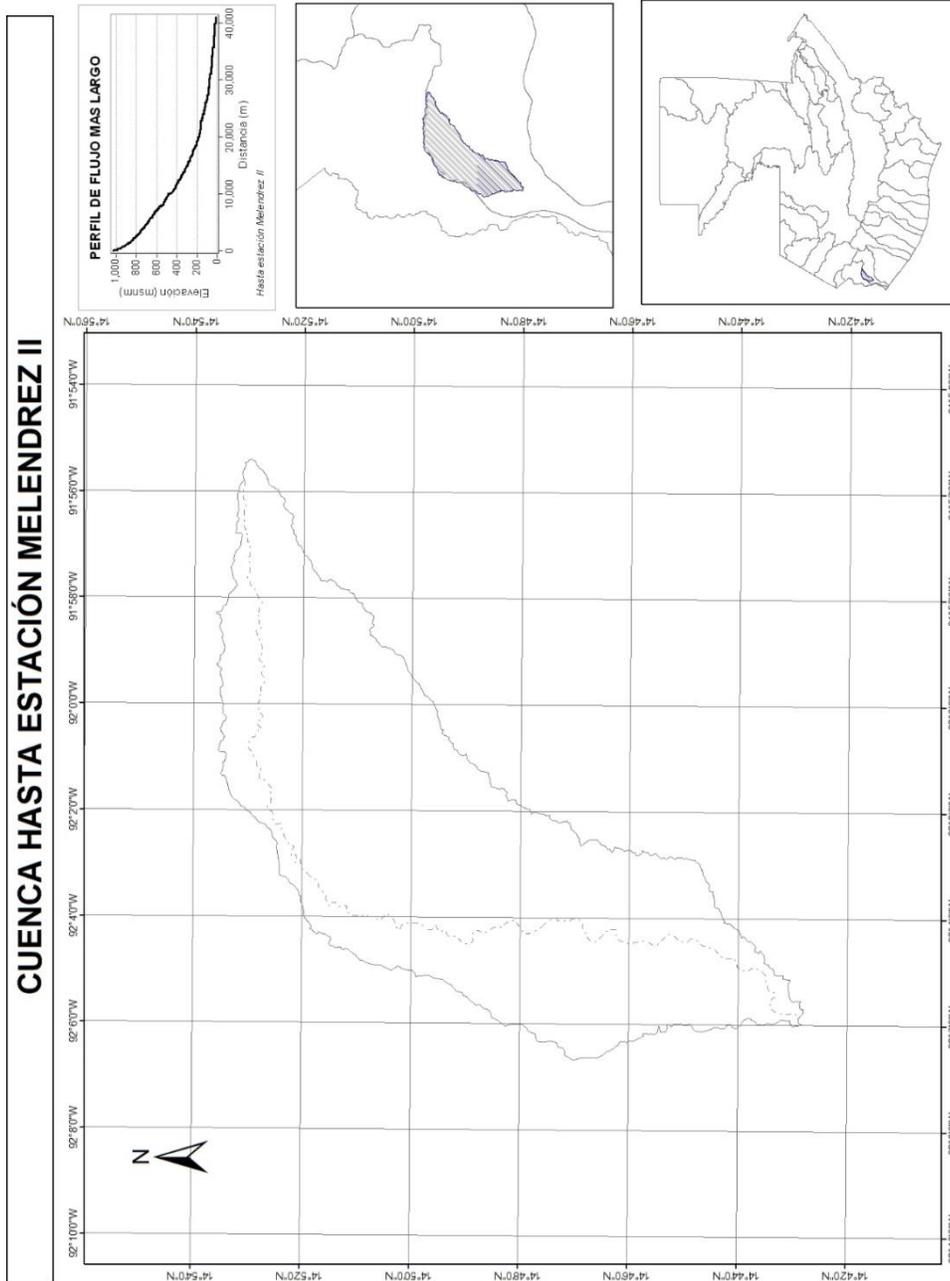
Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.



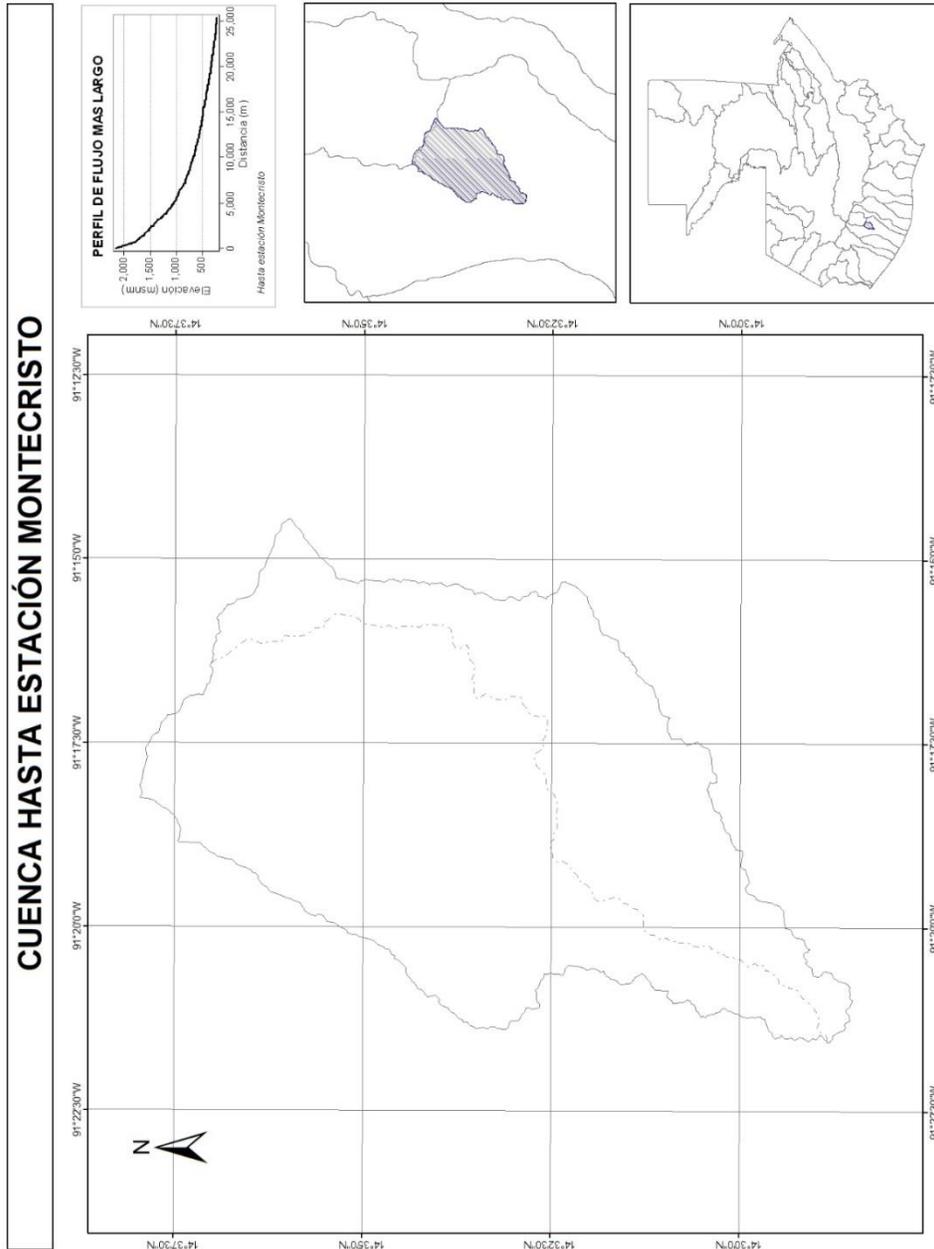
Fuente: elaboración propia.



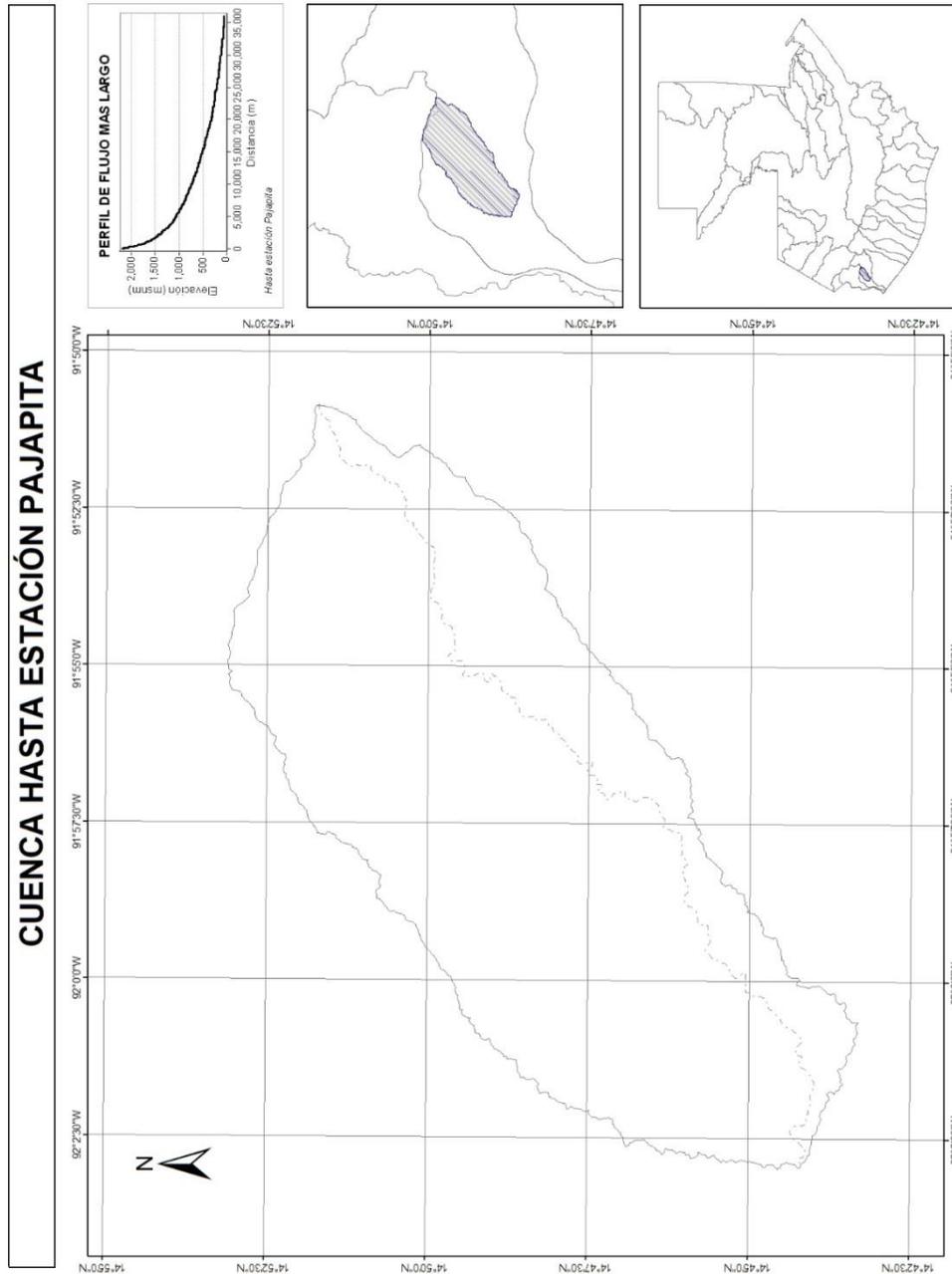
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 23.

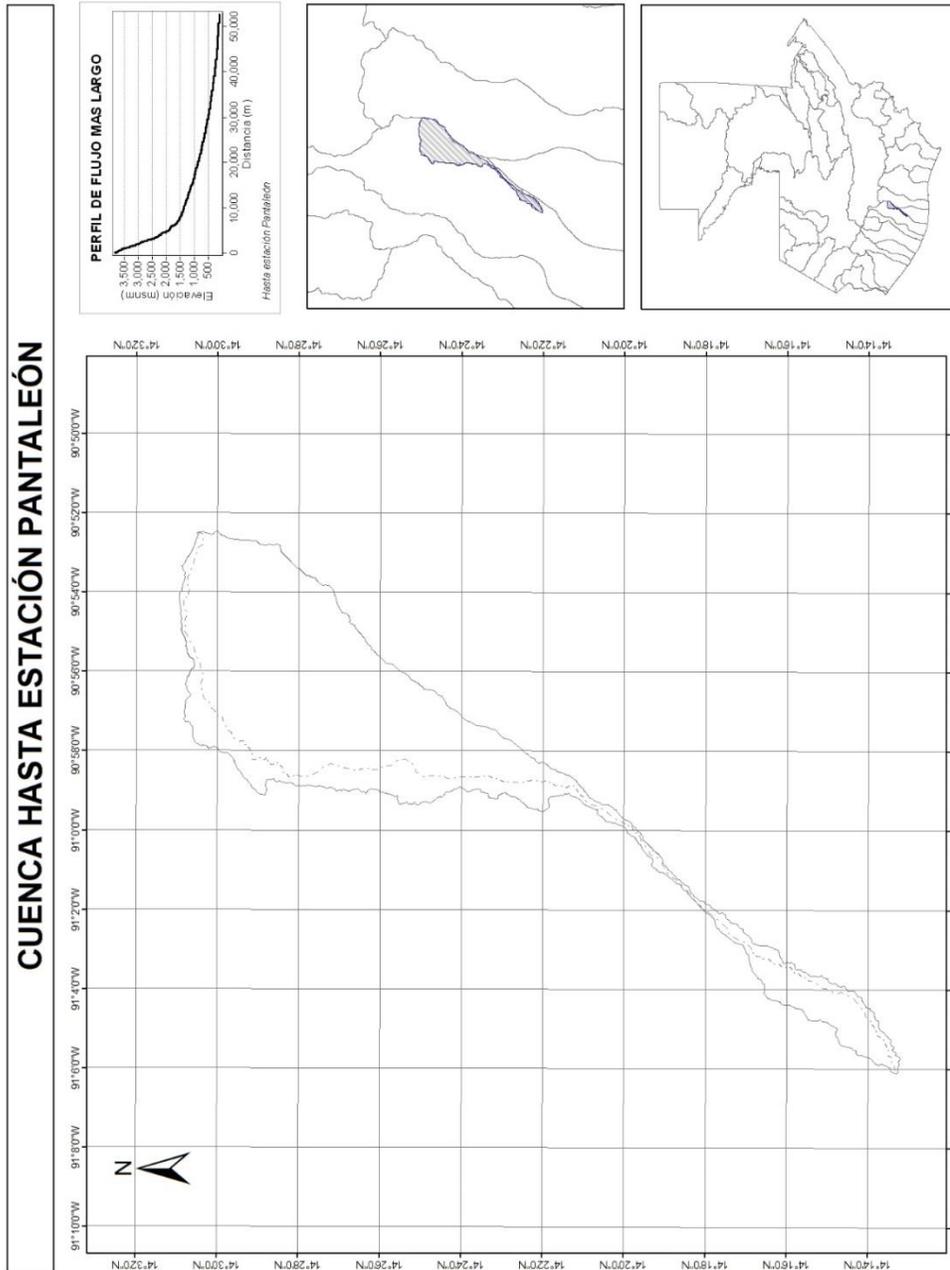
Cuenca hasta estación Montecristo



Fuente: elaboración propia.



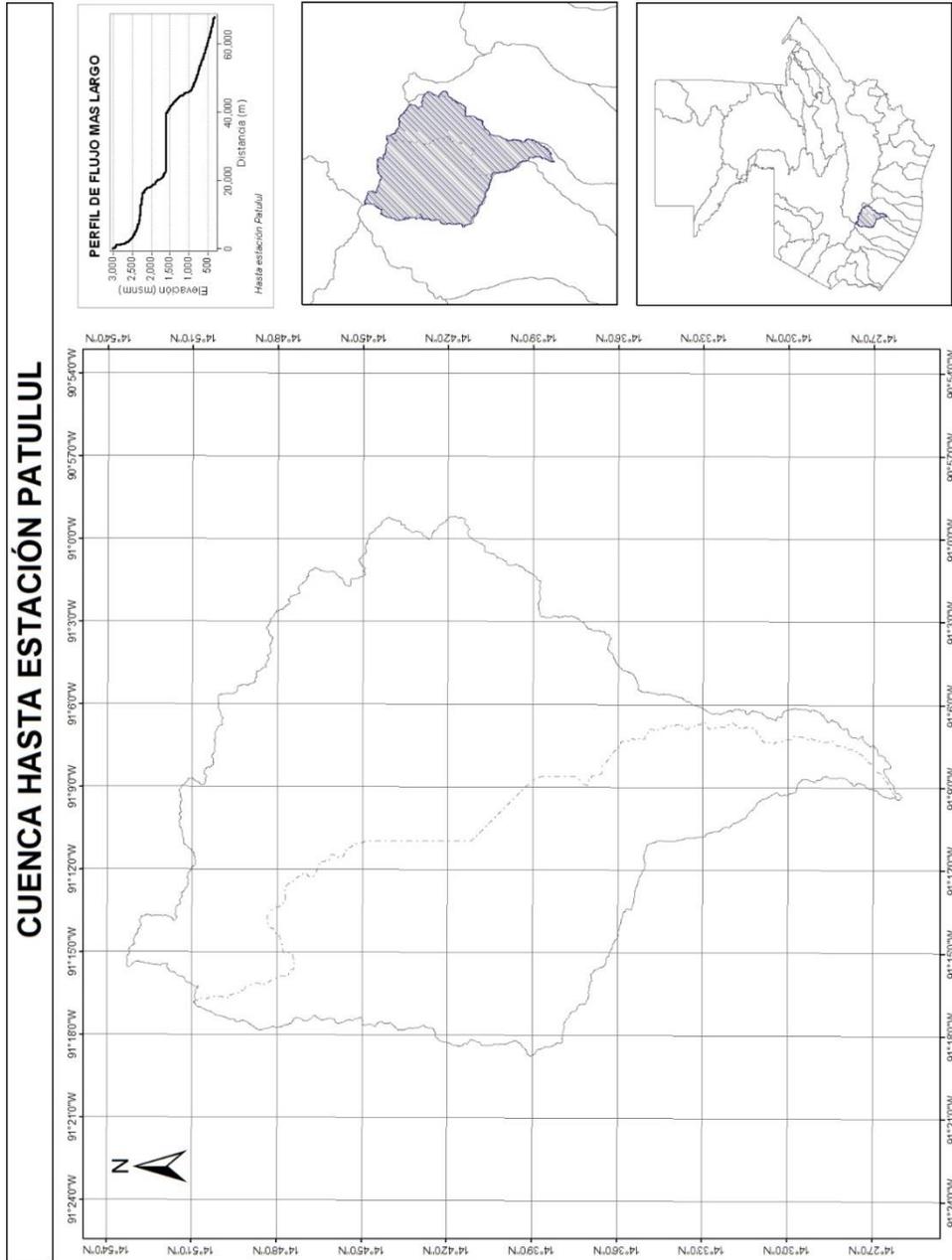
Fuente: elaboración propia.



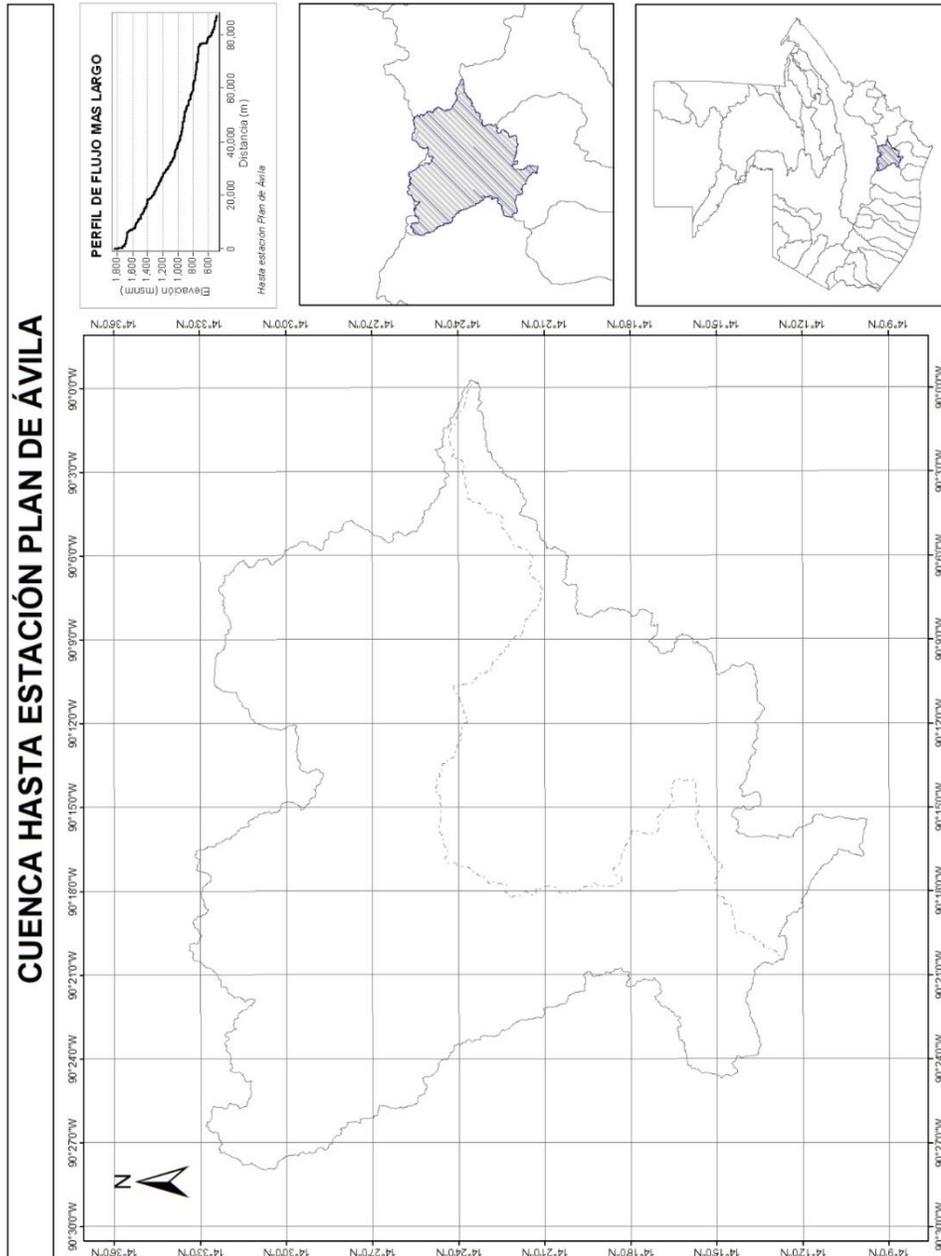
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 26.

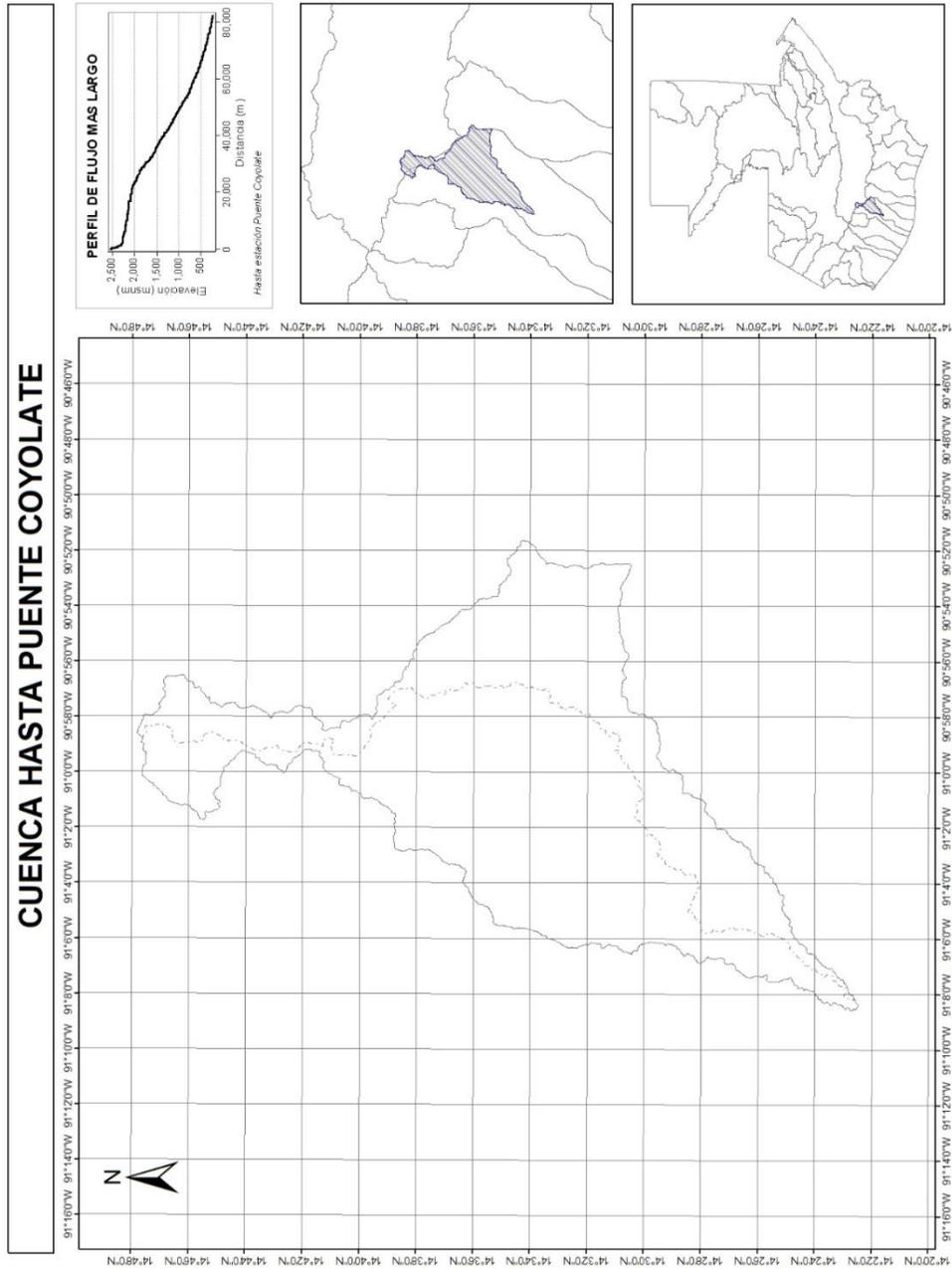
Cuenca hasta estación Patulul



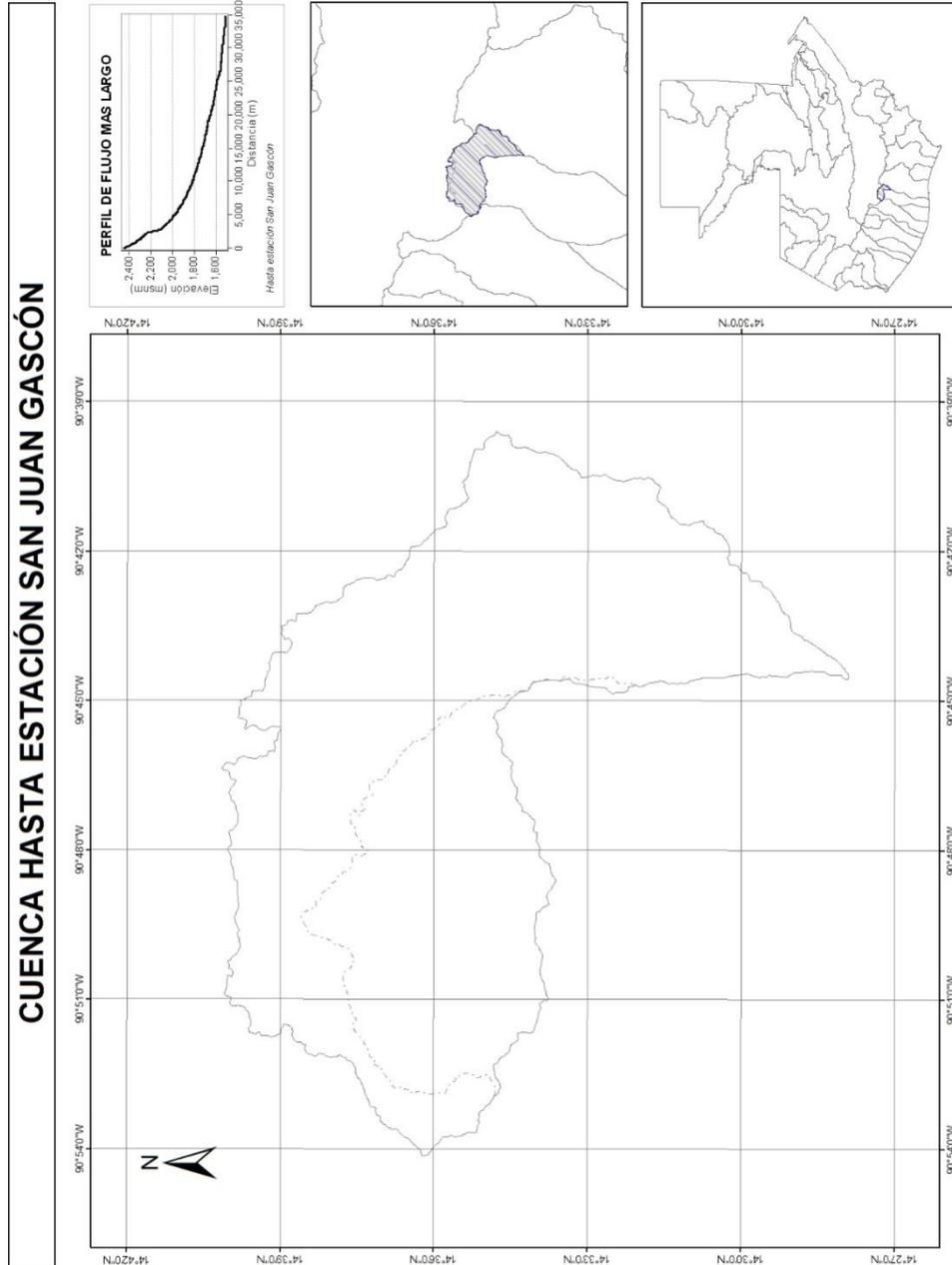
Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.



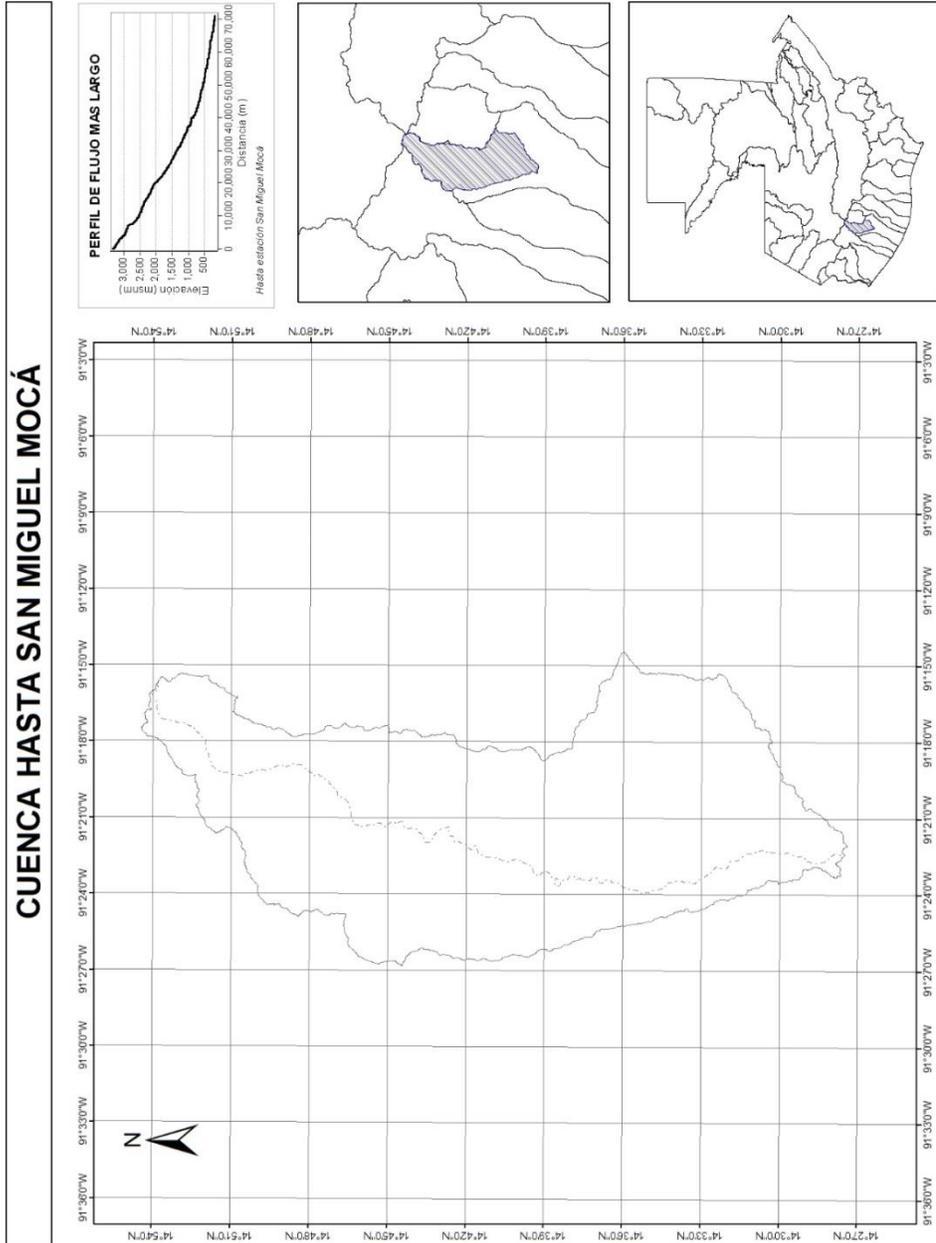
Fuente: elaboración propia.



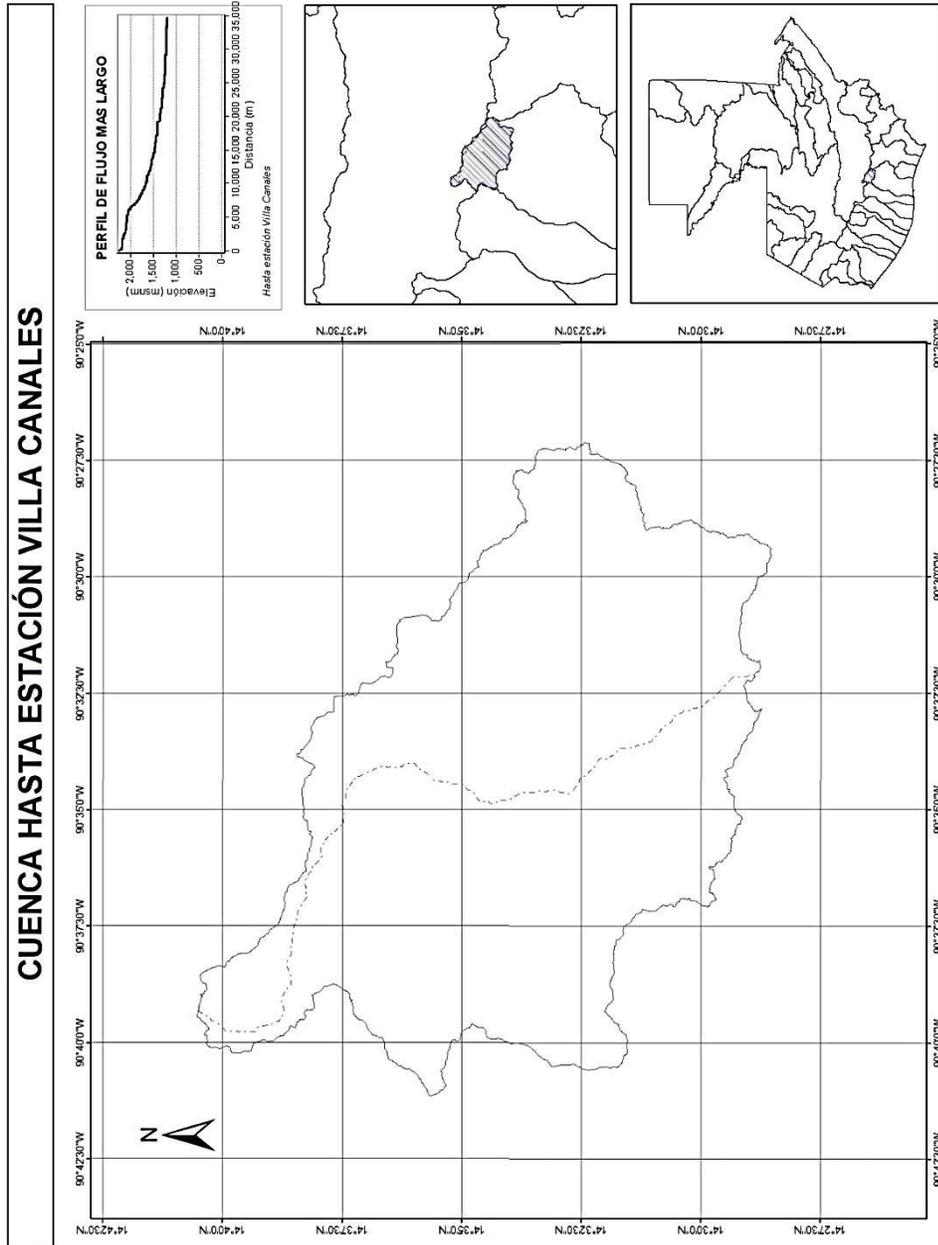
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 31.

Cuenca hasta estación San Miguel Mocá



Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.

