



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

**“ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO PARA LA REGIÓN  
HIDROLÓGICA NÚMERO 23 COSTA DE CHIAPAS USANDO MÉTODOS  
ESTADÍSTICOS”**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

PRESENTA:

**LUZ AURORA MUÑOZ CASTRO**

TUTOR PRINCIPAL:

**DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA, INSTITUTO DE INGENIERÍA**

MÉXICO, D. F. AGOSTO 2015

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Jesús Gracia Sánchez  
Secretario: Dr. Oscar Fuentes Mariles  
Vocal: Dr. Ramón Domínguez Mora  
1<sup>er</sup>. Suplente: M. I. Víctor Franco  
2<sup>d o</sup>. Suplente: Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: México, Distrito Federal.

**TUTOR DE TESIS:**

-----  
**Dr. Domínguez Mora Ramón**

**FIRMA**

## DEDICATORIAS.

*A Dios por darme la fortaleza necesaria para seguir adelante en los momentos difíciles, en los que me ha enseñado a valorarlo más.*

*A mi madre Francisca, por su entrega total a la familia y por todos los esfuerzos y sacrificios que hizo para sacarnos adelante, por impulsar mi superación, a veces con amor, otras tantas con regaños, pero siempre estando para guiarme y apoyarme. ¡Te amo mamita!*

*A mi esposo Juan, por esperarme estos dos años y sin importar la distancia demostrarme que su amor es leal dándome tiempo, espacio y el apoyo necesario para lograr mis sueños.*

*A mis hermanos Iracema, Yamaira y Roberto porque me han demostrado su apoyo incondicional y sé que ustedes siempre están para mí como yo para ustedes. Los amo y están presentes en mi vida a cada momento.*

*A mi tío Alberth por cuidar de la familia y ser un gran hermano para mi madre.*

*A Nayeli, por su amistad sincera, además de arriesgarse a vivir conmigo este tiempo sin dudarlo y soportando mis manías.*

*A Erika por el apoyo brindado de múltiples maneras a lo largo de esta etapa de mi vida, por sus consejos, amistad y por las noches de estudio que por fin han cosechado frutos.*

*A Cesia, Karen, Regina, Tania y Saúl por hacer más amena mi estancia en la maestría y hacerme sentir apapachada.*

## AGRADECIMIENTOS

*Al Dr. Ramón Domínguez Mora por brindarme su apoyo y tiempo para la realización de esta tesis.*

*A mis sinodales: Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez, Dr. Oscar Arturo Fuentes Mariles, Dr. Jesús Gracia Sánchez y M. I. Victor Franco por sus consejos para la mejora de este trabajo.*

*Al M. I. Juan José Muciño Porras por su apoyo y consejos brindados al ingreso de esta maestría.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial a la Facultad de Ingeniería por permitirme realizar mis estudios en sus aulas.*

*Ama usted el mar, capitán.*

*¡Sí! ¡Lo amo! ¡El mar es todo! Cubre las siete décimas partes del globo terrestre. Su aliento es puro y sano. Es el inmenso desierto en el que el hombre no está nunca solo, pues siente estremecerse la vida en torno suyo. El mar es el vehículo de una sobrenatural y prodigiosa existencia; es movimiento y amor; es el infinito viviente, como ha dicho uno de sus poetas. Y, en efecto, señor profesor, la naturaleza se manifiesta en él con sus tres reinos: el mineral, el vegetal y el animal. Este último está en él ampliamente representado por los cuatro grupos de zoófitos, por tres clases de articulados, por cinco de moluscos, por tres de vertebrados, los mamíferos, los reptiles y esas innumerables legiones de peces, orden infinito de animales que cuenta con más de trece mil especies de las que tan sólo una décima parte pertenece al agua dulce. El mar es el vasto receptáculo de la naturaleza. Fue por el mar por lo que comenzó el globo, y quién sabe si no terminará por él. En el mar está la suprema tranquilidad. El mar no pertenece a los déspotas. En su superficie pueden todavía ejercer sus derechos inicuos, batirse, entrededorarse, transportar a ella todos los horrores terrestres. Pero a treinta pies de profundidad, su poder cesa, su influencia se apaga, su potencia desaparece. ¡Ah! ¡Viva usted, señor, en el seno de los mares, viva en ellos! Solamente ahí está la independencia. ¡Ahí no reconozco dueño ni señor! ¡Ahí yo soy libre!*

*Fragmento de << Veinte mil leguas de viaje submarino >>*

*Escrito por: Julio Verne*

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ESTADO DEL ARTE .....	3
3. ZONA DE ESTUDIO: REGION HIDROLÓGICA No. 23 COSTA DE CHIAPAS 5	
a. RÍO ZANATENCO.....	6
b. RÍO DE JESÚS .....	7
c. RÍO SAN DIEGO .....	8
d. RÍO PIJIJAPAN .....	8
e. RÍO COAPA.....	9
f. RÍO LAS MARGARITAS.....	11
g. RÍO NOVILLERO .....	11
h. RÍO SAN NICOLÁS .....	12
i. RÍO CACALUTA.....	13
j. RÍO CINTALAPA.....	14
k. DESPOBLADO.....	15
l. RÍO HUIXTLA .....	15
m. RÍO COATÁN .....	17
n. RÍO SUCHIATE.....	18
4. INFORMACIÓN DISPONIBLE .....	20
a. INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA .....	20
i. UBICACIÓN DE ESTACIONES HIDROMÉTRICAS .....	20
ii. DATOS HIDROMÉTRICOS DISPONIBLES .....	22
b. INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA.....	23
i. UBICACIÓN DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS.....	23
ii. DATOS CLIMATOLÓGICOS DISPONIBLES.....	25
5. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO.....	26
a. CONCEPTOS BÁSICOS .....	26
i. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL.....	26
ii. ESCURRIMIENTO.....	27
iii. PÉRDIDAS .....	28

iv.	FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD .....	33
b.	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA .....	38
i.	ANÁLISIS PUNTUAL.....	38
ii.	ANÁLISIS REGIONAL.....	39
c.	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA .....	42
d.	CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO PARA DIVERSOS PERIODOS DE RETORNO .....	42
i.	MÉTODO DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO .....	42
ii.	MÉTODO DE LOS NÚMEROS DE ESCURRIMIENTO.....	43
6.	APLICACIÓN EN LA REGIÓN HIDROLÓGICA No. 23 COSTA DE CHIAPAS .....	45
a.	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA .....	45
i.	ANÁLISIS PUNTUAL.....	45
ii.	ANÁLISIS REGIONAL.....	49
b.	ANÁLISIS DE INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA .....	57
c.	CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO PARA DIVERSOS PERIODOS DE RETORNO .....	61
7.	CONCLUSIONES.....	67
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Ubicación de la cuenca río Zanatenco .....	6
Figura 3.2. Ubicación de la cuenca río de Jesús.....	7
Figura 3.3. Ubicación de la cuenca del río San Diego .....	8
Figura 3.4. Ubicación de la cuenca del río Pijijapan.....	9
Figura 3.5. Ubicación de la cuenca del río Coapa .....	10
Figura 3.6. Ubicación de la cuenca del río Las Margaritas.....	11
Figura 3.7. Ubicación de la cuenca del río Novillero.....	12
Figura 3.8. Ubicación de la cuenca del río San Nicolás .....	13
Figura 3.9. Ubicación de la cuenca del río Cacaluta .....	13
Figura 3.10. Ubicación de la cuenca del río Cintalapa .....	14
Figura 3.11. Ubicación de la cuenca del río Despoblado .....	15
Figura 3.12. Ubicación de la cuenca del río Huixtla .....	16
Figura 3.13. Ubicación de la cuenca del río Coatán .....	17
Figura 3.14. Ubicación de la cuenca del río Suchiate.....	18
Figura 4.1. Ubicación geográfica de las estaciones hidrométricas en la zona de estudio.....	20
Figura 4.2. Ubicación geográfica de las estaciones climatológicas en la zona de estudio .....	23
Figura 5.1. Método gráfico de determinación de regiones homogéneas (Las estaciones encerradas en rojo pertenecen a la misma región homogénea) .....	39
Figura 5.2. Método grafico de determinación de regiones homogéneas a partir de los coeficientes de variación .....	40
Figura 6.1. Ubicación de las estaciones hidrométricas seleccionadas .....	45
Figura 6.2. Funciones de distribución de probabilidad aplicadas a cada una de las estaciones hidrométricas .....	46
Figura 6.3. Funciones de distribución de probabilidad aplicadas a cada una de las estaciones hidrométricas .....	47
Figura 6.4. Funciones de distribución de probabilidad aplicadas a cada una de las estaciones hidrométricas .....	48
Figura 6.5. Resultado de la delimitación de regiones homogéneas método gráfico .....	50
Figura 6.6. Función de distribución de la probabilidad aplicada al registro obtenido del método de regionalización estaciones-año .....	50
Figura 6.7. Función de distribución de la probabilidad aplicada al registro obtenido del método de regionalización estaciones-año para el grupo 1 .....	51
Figura 6.8. Función de distribución de la probabilidad aplicada al registro obtenido del método de regionalización estaciones-año para el grupo 2 .....	52
Figura 6.9. Resultado de la delimitación de regiones homogéneas método gráfico de coeficientes de variación .....	52

Figura 6.10. Función de distribución de la probabilidad aplicada al registro obtenido del método de regionalización estaciones-año .....	53
Figura 6.11. Resultado del ajuste de funciones de distribución de probabilidad de manera puntual y regional a los datos hidrométricos .....	54
Figura 6.12. Resultado del ajuste de funciones de distribución de probabilidad de manera puntual y regional a los datos hidrométricos .....	55
Figura 6.13. Resultado del ajuste de funciones de distribución de probabilidad de manera puntual y regional a los datos hidrométricos .....	56
Figura 6.14. Funciones de distribución de probabilidad aplicadas al grupo de datos climatológicos correspondientes a la cuenca de cada estación hidrométrica .....	58
Figura 6.15. Funciones de distribución de probabilidad aplicadas al grupo de datos climatológicos correspondientes a la cuenca de cada estación hidrométrica .....	59
Figura 6.16. Funciones de distribución de probabilidad aplicadas al grupo de datos climatológicos correspondientes a la cuenca de cada estación hidrométrica .....	60
Figura 6.17. Coeficientes de escurrimiento obtenidos para los distintos ajustes de distribución de probabilidad de los datos hidrométricos.....	61
Figura 6.18. Coeficientes de escurrimiento obtenidos para los distintos ajustes de distribución de probabilidad de los datos hidrométricos.....	62
Figura 6.19. Coeficientes de escurrimiento obtenidos para los distintos ajustes de distribución de probabilidad de los datos hidrométricos.....	63
Figura 6.20. Coeficientes de escurrimiento obtenidos para los distintos ajustes de distribución de probabilidad de los datos hidrométricos.....	64
Figura 6.21. Coeficientes de escurrimiento obtenidos para los distintos ajustes de distribución de probabilidad de los datos hidrométricos.....	65
Figura 6.22. Ubicación de las estaciones climatológicas usadas para el análisis de la cuenca de la estación hidrométrica 23017 (punto verde).....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Coordenadas geográficas de las estaciones hidrométricas en la costa de Chiapas.....	21
Tabla 4.2. Datos hidrométricos disponibles .....	22
Tabla 4.3. Coordenadas geográficas de las estaciones climatológicas en la costa de Chiapas .....	24
Tabla 4.4. Datos de precipitación disponibles .....	25
Tabla 5.1. Clasificación de suelos .....	31
Tabla 5.2. Valor del número de escurrimiento N, según uso y tipo de suelo, condición de la cuenca y pendiente del terreno .....	32
Tabla 5.3. Factor de corrección del número de escurrimiento N, según la precipitación antecedente .....	33
Tabla 5.4. Números de escurrimiento para las estaciones hidrométricas de la región hidrológica número 23.....	44
Tabla 6.1. Principales características fisiográficas de las cuencas hidrológicas en la zona costa de Chiapas.....	45
Tabla 6.2. Resultado del análisis de la delimitación de regiones homogéneas (método gráfico).....	49
Tabla 6.3. Resultado de la delimitación de regiones homogéneas (método coeficientes de variación) .....	51
Tabla 6.4. Relación de estaciones climatológicas e hidrométricas .....	57

## 1. INTRODUCCIÓN

En la Hidrología Superficial las pérdidas representan principalmente a la parte del agua precipitada que es interceptada por el follaje de las plantas, los techos de las construcciones, la retención en depresiones o charcos (que posteriormente se evapora o se infiltra), la evaporación y la infiltración. La porción más considerable de las pérdidas corresponde a la infiltración, por lo que es costumbre llamarlas con este nombre.

La infiltración juega un papel de primer orden en la relación lluvia-escorrimento y, por lo tanto, en los problemas de diseño y predicción asociados a la dimensión y operación de obras hidráulicas.

La importancia de esta relación reside en que es común que se carezca de suficientes datos de escurrimiento del sitio de interés, mientras que los registros de precipitación suelen ser más abundantes. Dado que el flujo de un río es afectado principalmente por las variaciones de la precipitación, las relaciones lluvia-escorrimento son una herramienta valiosa para suplir esta carencia de información, pues permiten determinar el escurrimiento utilizando las características de la cuenca y los datos de precipitación. Es por ello que existen numerosos métodos para relacionar la precipitación en una cuenca con el escurrimiento de la misma.

Los métodos que han tenido buena aceptación para calcular las pérdidas son el número de curva propuesto por el Soil Conservation Service (SCS), el criterio del coeficiente de escurrimiento y el índice de infiltración; en cuanto al método de coeficientes de escurrimiento este supone que las pérdidas son proporcionales a la intensidad de lluvia y el método de índice de infiltración media supone que la capacidad de infiltración es constante durante toda la tormenta, ambos métodos se pueden llevar a cabo en cuencas aforadas donde es necesario conocer la variación en el tiempo de la lámina de escurrimiento directo. El procedimiento más generalizado y fácil de adaptar a cualquier región es el método del número de curva (NC) desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos (1975). Este método se basa en la estimación directa del escurrimiento superficial de una lluvia aislada a partir de las características de cubierta vegetal y uso de suelo, es útil en cuencas no aforadas pero se ha cuestionado su aplicación debido a que fue desarrollado con base en la información de cuencas agrícolas localizadas en los Estados Unidos.

Por lo anterior, en el presente trabajo se pretende evaluar la eficacia del método de número de curva obteniendo los coeficientes de escurrimiento para las estaciones ubicadas en la región hidrológica No. 23 costa Chiapas,

comparándolos con los obtenidos del análisis de los datos hidrológicos, teniendo además como objetivos particulares los siguientes:

- Ajustar funciones de distribución de probabilidad a los valores máximos anuales de los registros de gasto medio diario en la región hidrológica No. 23, así como a los datos máximos anuales de precipitación media acumulada diaria.
- Calcular el volumen de pérdidas utilizando el criterio del coeficiente de escurrimiento.
- Obtener los coeficientes de escurrimiento derivado de la aplicación del método de número de curva.
- Realizar una comparación de los coeficientes de escurrimiento obtenidos con los métodos ya mencionados.

La zona de estudio fue elegida por su susceptibilidad a fenómenos meteorológicos como ciclones que causan cuantiosas pérdidas humanas, económicas y ambientales. Estos eventos son causa de la ubicación geográfica, el clima y la humedad que lo hacen propenso a estos fenómenos.

La tesis está compuesta por 7 capítulos, siendo el primero la presente introducción.

En el capítulo 2 se hace una breve descripción de las investigaciones de referencia para el estudio realizado.

En el capítulo 3 se describe a la zona de estudio de manera general y de manera local tomando en cuenta que es una región hidrológica compuesta por 23 subcuencas.

El capítulo 4 se expone la información disponible para el desarrollo de este trabajo. Mientras que en el capítulo quinto se describe la metodología utilizada para el desarrollo de la investigación al igual que los conceptos básicos necesarios para su comprensión.

En el apartado 6 se presentan resultados y análisis, seguido del capítulo 7 en donde se encuentran las conclusiones y recomendaciones de este trabajo.

## 2. ESTADO DEL ARTE

Por medio del proceso de investigación fueron identificados los estudios relacionados con el tema del presente trabajo y se describen a continuación los más relevantes.

1. **Estudio de las crecientes en las cuencas de la costa del Estado de Chiapas** (Echeverri, 2007). Se desarrolla un análisis de frecuencias de gastos máximos instantáneos a nivel individual y regional, tanto para escurrimientos como para precipitaciones. Para contar con estimaciones en sitios no aforados se valida un modelo lluvia- escurrimiento. El modelo empleado es el del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico, el cual es aplicado a un hietograma de diseño elaborado a partir de un mapa de isoyetas, a cualquier cuenca perteneciente a la región de la que se tengan sus características fisiográficas.

De este modo se proponen eventos de diseño para diversos periodos de retorno para sitios aforados, y se plantea un procedimiento para hacer estas estimaciones en cualquier sitio no aforado ubicado dentro de la región hidrológica de la costa de Chiapas

2. En el XXIII Congreso Nacional de Hidráulica llevado a cabo en octubre de 2014 en Puerto Vallarta, Jalisco, México, se presentaron dos artículos que son de relevancia para el tema de esta investigación, los cuales fueron:

- a) **Calibración de los números de escurrimiento en microcuencas de la región hidrológica 23 (costa de Chiapas)**. Guichard et al. (2014) obtuvieron eventos de lluvia-escurrimiento, muestras de clasificación de textura del suelo e instalaron sensores de humedad en las microcuencas instrumentadas de Rosita, Chanjalé y Progreso, pertenecientes a la cuenca del río Huixtla y la Vega de los Gatos de la cuenca del río Coatán, que se ubican en la región hidrológica número 23 (costa de Chiapas); lo anterior para calibrar los números de escurrimiento y compararlos con los obtenidos por el Soil Conservation Service en 1954.

Además se ajustaron funciones de distribución de probabilidad a las precipitaciones máximas registradas en la base de datos CLICOM para las estaciones Huixtla y Coatán con el fin de determinar eventos asociados a distintos períodos de retorno y su relación con los números de escurrimiento.

- b) **Cálculo de coeficientes de escurrimiento en cuencas del valle de México usando métodos estadísticos**. Esteban, Domínguez, Arganis,

Carrizosa, y Esquivel (2014) estimaron los coeficientes de escurrimiento de catorce cuencas instrumentadas del Valle de México, además de realizar una comparación con los coeficientes de escurrimiento derivados de la aplicación del método del número de curva.

Con los resultados obtenidos se demostró la importancia de que se siga evaluando y proponiendo técnicas para ajustar el método antes mencionado y sus parámetros con la información de las cuencas instrumentadas.

Básicamente ante este panorama, se deja a la vista del lector, que cada uno de los investigadores pretendía obtener los factores que relacionen la lluvia y el escurrimiento y comprobar que tan factibles son los resultados obtenidos con los distintos métodos empíricos.

### **3. ZONA DE ESTUDIO: REGION HIDROLÓGICA No. 23 COSTA DE CHIAPAS**

Las cuencas de México se encuentran agrupadas en 37 regiones hidrológicas para la realización de estudios hidrológicos y de calidad del agua. Esta regionalización fue definida en los años 60 por la entonces Dirección de Hidrología de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (CONAGUA, 2004).

Chiapas se divide en tres regiones hidrográficas: 1) la costa de Chiapas, que comprende el 14% del territorio e incluye las cuencas del Mar-Muerto y de los ríos Pijijiapan, Huixtla y Suchiate; 2) el Grijalva, con el 85% del territorio y donde se ubican las cuencas Grijalva-La Concordia, Grijalva-Tuxtla Gutiérrez y Grijalva-Villahermosa, principalmente en la depresión central y en la planicie del Golfo de México; y 3) el Usumacinta, con el 1% del territorio, ubicado en la parte este y norte del estado, con las cuencas de los ríos Chixoy, Lacantun y Usumacinta. De acuerdo con la división anterior, la Comisión Nacional del Agua subdivide el territorio de estas cuencas en un total de 101 subcuencas, de las cuales, 23 se ubican en la costa de Chiapas (CONAGUA, 2000a, b, citado por CONABIO, 2013).

La costa de Chiapas abarca la región que se origina del parteaguas conformado por la Sierra Madre de Chiapas y que corre paralelo hasta la costa donde termina. En esta cuenca se tienen altitudes máximas de 2 900 m, aunque en el caso de las cuencas binacionales del Volcán Tacaná, parten de una altitud de 4 110 m, pero todas desembocan en la planicie costera del Pacífico, directamente al mar o a cuerpos de agua salobre; comprende una superficie cercana a los 11 012 km<sup>2</sup>, tiene una longitud de 280 km y 90 km en su mayor anchura y el declive hacia el mar es violento; está atravesado transversalmente por numerosos ríos de cauces pequeños de corto desarrollo, entre los que destacan: Lagartero, El Pedregal, Las Hermanas, La Flor, Urbina, El Bobo, Doña María, Vado Ancho, Huehuetán, Cahuacán, Zanatenco, De Jesús, San Diego, Pijijiapan, Coapa, Margaritas, Novillero, San Nicolás, Cacaluta, Cintalapa, Despoblado, Huixtla, Coatán y Suchiate (Conagua, 2000b, citado por CONABIO, 2013).

Para el presente trabajo se analizarán las estaciones que se encuentran en los ríos que se describen a continuación:

## a. RÍO ZANATENCO

El río Zanatenco se ubica en la parte noroeste del municipio de Tonalá (figura 3.1) entre las coordenadas geográficas  $16^{\circ} 04'10''$  y  $16^{\circ}11'11''00''$  de latitud norte y  $93^{\circ}36'30''$  y  $93^{\circ}43'50''$  longitud oeste. Tiene una superficie de  $414.94 \text{ km}^2$  y un perímetro de  $131.90 \text{ km}$ , con rango altitudinal que va de 0 a los  $1\ 800 \text{ msnm}$ . La subcuenca tiene una población total de  $48\,680$  habitantes y el 94% de su superficie se localiza en el municipio de Tonalá y el resto corresponde a los municipios de Villaflores y Villacorzo. El Zanatenco nace en las partes altas de la Sierra Madre y baja por la cuenca hasta desembocar en los esteros de la costa del Pacífico. Sus principales ríos tributarios son: San Marcos, La Meca, La Danta, El Zapote, San Isidro, San Marcos, río Flor, Las Delicias, El Arrepentido y el Mojudal (INESA, S.F. a).



**Figura 3.1** Ubicación de la cuenca río Zanatenco

El clima predominante en la subcuenca es el Cálido Húmedo que se extiende de los 0 a los  $1000 \text{ msnm}$  con temperatura media anual de entre  $24$  y  $28^{\circ}\text{C}$ . De los  $1000$  y  $1\ 500 \text{ msnm}$ , se presenta el clima Semicálido Húmedo con temperatura media entre  $20^{\circ}$  y  $22^{\circ}\text{C}$ , llegando a los  $18^{\circ}\text{C}$  en los  $2000 \text{ msnm}$ . Y de  $2000$  a  $3000 \text{ msnm}$  el clima se vuelve Templado Húmedo (partes más altas de la Sierra) con rangos de temperaturas  $15^{\circ}$  a  $18^{\circ}\text{C}$  (INESA, S.F. a).

Las precipitaciones más bajas se presentan en la zona de la costa con  $1500 \text{ mm}$  anuales en un promedio de  $100$  días con lluvia en el ciclo; en la parte alta se

registran 3000 mm en el periodo y de 120 a 180 días de lluvias en el año. El río Zanatenco registra un caudal medio anual de  $2.6 \text{ m}^3/\text{segundo}$  con un volumen de  $80.6 \text{ mm}^3$ ; su flujo base en promedio en época de estiaje es de  $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ , y un volumen promedio de  $1111.6 \text{ mm}^3$  en época de lluvias. Los principales usos del suelo son el agrícola (20%) y ganadero (42%) y del 3 al 4% es usado en asentamientos humanos y 30% selvas y bosques (INESA, S.F. a).

## b. RÍO DE JESÚS

El río Jesús, tiene una superficie de aportación de  $347.54 \text{ km}^2$  y se ubica en el sureste del país (figura 3.2), que se encuentra delimitada al norte por la cuenca hidrológica Santo Domingo, al sur por el océano Pacífico, al este por la cuenca hidrológica El Porvenir, y al oeste por la cuenca hidrológica Laguna de La Joya (DOF, 2007).



Figura 3.2 Ubicación de la cuenca río de Jesús

El río Jesús tiene una longitud aproximada de 23.4 km siendo sinuoso en general; de alta montaña por sus fortísimas pendientes los primeros 4.5 km aproximadamente y finalizando en un cauce de planicie con una pendiente del 1.9%. Siendo visible material sedimentario inmediatamente en la zona de planicie y en una longitud de 8 km aproximadamente. Alimenta con su caudal al río Los Patos (Contreras, 2009).

### c. RÍO SAN DIEGO

El río San Diego, tiene una superficie de aportación de 228.86 km<sup>2</sup> y se ubica en el sureste del país (figura 3.3), que se encuentra delimitada al norte por la cuenca hidrológica San Pedro, al sur por el océano Pacífico, al este por la cuenca hidrológica Pijijiapan, y al oeste por la cuenca hidrológica El Porvenir (DOF, 2007).



**Figura 3.3** Ubicación de la cuenca del río San Diego

Este río tiene una longitud aproximada de 38.5 km siendo sinuoso en la parte alta y con meandros en la zona baja. En la parte alta es un cauce de alta montaña con pendiente del 11% aproximadamente y en su parte baja de planicie con pendiente 1.44%. Por otra parte, se presentan de manera importante los sedimentos desde las faldas de la montaña y hasta 9 km aguas abajo; pasando muy cerca de la población La Central. Así mismo se tiene el gasto que aporta el río Frío (2 km aguas abajo de las faldas de la montaña). Su desembocadura tiene lugar en una zona sujeta a inundación a unos 5 km cerca de la laguna Agua Tendida (Contreras, 2009).

### d. RÍO PIJJIAPAN

El río Pijijiapan, tiene una superficie de aportación de 324.93 kilómetros cuadrados y se ubica en el sureste del país (figura 3.4), que se encuentra delimitada al norte por la cuenca hidrológica San Pedro, al sur por el océano Pacífico, al este por la cuenca hidrológica Margaritas y Coapa, y al oeste por la cuenca hidrológica San Diego (DOF, 2007).

Este río tiene una longitud de 53.5 km con formación de islas y barras en la parte alta, así como en la parte baja de meandros. La pendiente del cauce en la zona alta es del 20% lo que lo convierte en uno de alta montaña mientras que en la parte baja es del 1% siendo éste de planicie. Como aspecto importante podemos citar que la población de Pijijiapan se encuentra justamente en las faldas de la montaña siendo seriamente afectada por la formación de un pequeño abanico aluvial (delta aluvial alargado), el cual muestra sus barras de desembocadura y acumulamiento de sedimentos provenientes de las partes altas durante las avenidas.

Más adelante también se muestra la presencia de un fuerte meandro, ocasionando una pequeña zona aislada donde el cauce se presenta como anastomosado. Esta última se da de forma aguda a 9 km aguas abajo de la población de Pijijiapan (Contreras, 2009).



Figura 3.4 Ubicación de la cuenca del río Pijijiapan

### e. RÍO COAPA

La cuenca del río Coapa se localiza en las coordenadas extremas  $15^{\circ} 45' 16''$  y  $15^{\circ} 42' 15''$  latitud norte,  $93^{\circ} 16' 42''$  y  $93^{\circ} 09' 40''$  longitud oeste. La cuenca se ubica en la vertiente sureste de la Sierra Madre de Chiapas (figura 3.5), en el centro de la planicie costera del Pacífico. Geográficamente, está delimitada al norte por el parteaguas de la Sierra Madre de Chiapas, al oeste por el parteaguas con la cuenca del Río Pijijiapan, al este por el parteaguas de la cuenca del Río Margaritas, y al sur por el océano Pacífico (INESA, S. F. b).

Con una superficie de aproximadamente 40,521.82 hectáreas, cuenta con una población total de 8,510 habitantes y topográficamente, la cuenca se divide en dos grandes áreas: la primera, que abarca la zona montañosa de la Sierra Madre de Chiapas, cuenta con un relieve accidentado de pendientes empinadas; la segunda es más amplia, y comprende la zona plana ubicada en el sur de la cuenca. La zona montañosa es una sucesión de cumbres de 25 km de longitud, la cual corre paralela a la costa y tiene una amplitud aproximada de 14 km desde el pie de monte hasta el parteaguas. La zona plana es conocida como planicie costera, comprende una franja de unos 20 km de amplitud que corre de noroeste a sureste, abarcando altitudes entre los 0 y 200 msnm. Pese a eso, existen algunos lomeríos o cerrillos que interrumpen la planicie (INESA, S. F. b).



**Figura 3.5** Ubicación de la cuenca del río Coapa

Por su latitud, toda la zona tiene régimen de clima tropical con estación seca. Sin embargo, las variaciones en el relieve y la proximidad al mar propician la existencia de una gran variedad de climas. En la zona montañosa se encuentran temperaturas entre 24 y 27°C en la base de la Sierra Madre de Chiapas, entre 21 y 24°C en la parte media, y de 18°C en el parteaguas. En la línea costera la temperatura promedio ronda los 30°C (INESA, S. F. b).

La precipitación promedio oscila entre los 2500 y 3000 mm anuales. Sin embargo, en las laderas de las cumbres principales, la cifra escala a 3500 mm anuales con 180 días de lluvia, y se mantiene en los 3000 mm en el parteaguas de la Sierra. En la planicie costera, la precipitación anual promedio está entre los 2000 y 2500 mm, con menos de cien días de lluvia al año. El área de captación de la cuenca

del Río Coapa está localizada al norte, en la zona de la Sierra y tiene un ancho de 10 km (INESA, S. F. b).

## f. RÍO LAS MARGARITAS

El río Margaritas tiene una longitud aproximada de 40.3 km, siendo sinuoso en la planicie tendiendo a recto en algunas partes y con meandros en la zona alta. Las pendientes son 20% y 1% convirtiéndolo en alta montaña y planicie. En cuanto al aporte de sedimentos, éste muestra un comportamiento normal de acuerdo a la configuración y topografía; con presencia de sedimentos desde 9 km aguas arriba a las faldas de la montaña y 8.5 km aguas abajo de la misma. En esta última zona hay rasgos de grandes cantidades de sedimento y desbordamientos producto del paso de fuertes avenidas. La desembocadura de este cauce se da en la zona del estero la Carreta (Contreras, 2009).

La ubicación de esta cuenca se puede observar en la figura 3.6.



Figura 3.6 Ubicación de la cuenca del río Las Margaritas

## g. RÍO NOVILLERO

El río Novillero Alto, tiene una superficie de aportación de 431.60 kilómetros cuadrados y se ubica en el sureste del país (figura 3.7), que se encuentra delimitada al norte por la cuenca hidrológica Presa La Concordia, al sur por el océano Pacífico, al este por la cuenca hidrológica Sesecapa (San Nicolás), y al oeste por la cuenca hidrológica Margaritas y Coapa (DOF, 2007).

Este río tiene una longitud aproximada de 57.2 km es un cauce sinuoso y trenzado con presencia de islas, barras y múltiples canales en su recorrido; lo que lo convierte en un cauce tipo braided. Es de alta montaña en la zona donde nace por tener una pendiente del 12.5% y en la zona baja de planicie con 0.9%. En la intersección de ambas se muestra una gran zona con depósito de sedimento en las márgenes que afecta seriamente la población de Hidalgo Novillero; donde la presencia de islas y depósitos es notoria, en un área aproximada de 1,240 hectáreas. La desembocadura de este río se da en una pequeña zona que se inunda continuamente; antes de esta se muestran diversos tramos de meandro y lunares o lagunas, por los cursos que ha tomado el río desplazándose hasta 1 kilómetro en algunas partes (Contreras, 2009).



Figura 3.7 Ubicación de la cuenca del río Novillero

## h. RÍO SAN NICOLÁS

Este cauce es una bifurcación del río Tablazón, tiene una longitud aproximada de 29 km siendo de planicie debido a la pendiente que tiene (0.7%), sinuoso en una pequeña parte (la más alta) y recto en su mayoría; su desembocadura se da en una zona húmeda sujeta a inundaciones aproximadamente a 5.5 km de la laguna Chantuto. Este cauce presenta cantidades apreciables de sedimento producto de fuertes avenidas, proviniendo de lo alto del río Tablazón; desde donde se bifurca y hasta, aproximadamente 9 km aguas abajo, se aprecian estos sedimentos (Contreras, 2009).

La ubicación de esta cuenca se puede observar en la figura 3.8.



Figura 3.8 Ubicación de la cuenca del río San Nicolás

### i. RÍO CACALUTA

El río Cacaluta, tiene una superficie de aportación de 636.40 km<sup>2</sup> y se encuentra delimitada al norte por la cuenca hidrológica Yayahuita, al sur por el océano Pacífico, al este por la cuenca hidrológica Laguna del Viejo y Tembladeras, y al oeste por la cuenca hidrológica Sesecapa (DOF, 2007).



Figura 3.9 Ubicación de la cuenca del río Cacaluta

En la figura 3.9 se observa la ubicación de la cuenca en el estado.

Este río tiene una longitud de 55.5 km. La parte inicial del cauce es de alta montaña por tener una pendiente del 11% mientras que la parte baja es de planicie con tan solo 1%. En cuanto a los sedimentos, se muestra claramente una gran zona de depósito alrededor de la población de Hidalgo. Aguas abajo de la misma se observa el lecho por donde anteriormente escurría el flujo. Su desembocadura se da en una zona húmeda de inundación que lleva directamente a la laguna el Campón (Contreras, 2009).

## j. RÍO CINTALAPA

El río Cintalapa tiene una longitud aproximada de 57.8 km. De su topografía se puede clasificar en montaña y planicie, 8% y 0.8% respectivamente. En cuanto al transporte de sedimento se ve que se hace presente a lo largo del cauce de planicie en una longitud aproximada de 23 km., concentrándose mayormente en una zona aguas arriba y entre las poblaciones de Acacoyagua y Escuintla. También en ese punto se muestra anastomosado a lo largo de 3 kilómetros por el exceso de sedimento que trae consigo.

La ubicación de la cuenca se puede observar en la figura 3.10.



**Figura 3.10** Ubicación de la cuenca del río Cintalapa

Su desembocadura se da al igual que el río Doña María, en una zona sujeta a inundación y otra con vegetación densa donde se encuentra la población de Embarcaderos en la laguna Tembladeras (Contreras, 2009).

## K. DESPOBLADO

El río Despoblado, tiene una superficie de aportación de 1,041.77 kilómetros cuadrados y se ubica en el sureste del país (figura 3.11), que se encuentra delimitada al norte por la cuenca hidrológica Zacualpa, al sur por el océano Pacífico, al este por la cuenca hidrológica Huixtla y al oeste por la cuenca hidrológica Laguna del Viejo y Temblader (DOF, 2007).



Figura 3.11 Ubicación de la cuenca del río Despoblado

La longitud aproximada es de 71.50 km. Siendo sinuoso al inicio del mismo para terminar con una tendencia a ser recto. Sus pendientes son 6% y 1.3% clasificándose como cauce de faldas de montaña y planicie. El cauce presenta la formación de islas y ocasionalmente algunas barras longitudinales a lo largo de 11 kilómetros, aguas debajo de las faldas de la montaña. Posteriormente se le une como afluente la corriente del río Compoapa. Su desembocadura tiene lugar en la Reserva de la Biosfera La Encrucijada que se encuentra en una zona sujeta a inundaciones (Contreras, 2009).

## I. RÍO HUIXTLA

La cuenca del río Huixtla se localiza en el límite de la Sierra Madre y la llanura costera del Pacífico (figura 3.12); se encuentra contenida principalmente en los municipios de Huixtla, Tuzantán y Motozintla, y en menor porción Villa Comaltitlán, Tapachula, Huehuetán y Mazatán. Sus coordenadas geográficas son 15° 08' N y 92° 28' W. Su altitud es de 50 metros. Su extensión territorial es de 827.312 km<sup>2</sup>

que corresponde a un 1.12% de la superficie estatal. Administrativamente la cuenca cuenta con 514 localidades, de las cuales 351 cuentan con menos de 100 habitantes. Abarca parcialmente la superficie de seis municipios de la región costa de Chiapas, sumando una población de 105,780 habitantes (INESA, S.F. c).



**Figura 3.12** Ubicación de la cuenca del río Huixtla

El río principal en la cuenca es el de Huixtla el cual nace en la sierra y desemboca en el océano Pacífico y tiene un caudal permanente. La cuenca en la parte sur tiene un terreno donde predominan las pendientes planas ( $<1^\circ$ ) y pendientes muy suavemente inclinada ( $1-3^\circ$ ) ambos abarcan el 43% de la superficie de la cuenca, mientras que en la parte norte de la cuenca predominan las pendientes ligera a medianamente inclinadas ( $10-20^\circ$ ) abarcando el 45% de la superficie de la cuenca. Tiene un volumen anual de escurrimiento de  $762.8 \text{ hm}^3$  y una disponibilidad media anual de  $756.5 \text{ hm}^3$  (INESA, S.F. c).

En la cuenca se presentan principalmente el clima cálido húmedo y subhúmedo esto (74% del área de la cuenca) en el que se presentan abundantes lluvias en verano, con una temperatura media anual en la cabecera municipal de  $27^\circ\text{C}$ . De acuerdo a la clasificación de Köppen se distinguen cuatro tipos principales de clima: Cálido húmedo (zona media); Cálido subhúmedo (zona baja); Semicálido húmedo y el Templado húmedo (zona alta). La temperatura mínima anual que se presenta en la cuenca va desde los  $8^\circ\text{C}$  a  $22^\circ\text{C}$ , donde la más baja se encuentra en la parte norte y la más alta en la parte sur de la cuenca (INESA, S.F. c).

La precipitación media anual en la zona es del orden de los 2,883 milímetros (mm) anuales, aunque llega a sobrepasar los 3,800 mm en verano. La zona centro de la

cuenca es donde se presenta mayor precipitación y la menor en la parte norte (entre 1978-2281 mm) (INESA, S.F. c).

### m. RÍO COATÁN

La cuenca del río Coatán es una cuenca compartida entre México y Guatemala en la vertiente del océano Pacífico (figura 3.13) y su río tributario principal es el río Coatán. La cuenca en su totalidad posee una extensión de 73,309 ha, de las cuales 37% se ubica en territorio guatemalteco (273 km<sup>2</sup>) y el restante 63% en México (459 km<sup>2</sup>). Las coordenadas geográficas extremas son 14° 45' y 15° 17' de latitud norte y 91° 56' y 92° 31' longitud oeste, con altitudes que van desde los 0 msnm hasta los 2, 700 msnm. Su población total es de 204, 231 habitantes distribuidos en 216 localidades, lo que la coloca en una región con una densidad poblacional alta, alrededor de 444 hab/km<sup>2</sup>, superior a la media estatal que es de 51 Hab./Km<sup>2</sup> (INESA, S.F. d).



**Figura 3.13** Ubicación de la cuenca del río Coatán

Dentro de los principales ríos que se encuentran en la cuenca están: el río El Cocoa, Cahoacán, Cozalapa, El Huhuecho, Coatán, Tacana Mixcún Cuilco, Aguinalito, Solís, El Naranjo y Salitre. Sin embargo el cauce principal es el denominado río Coatán, el cual es de tipo perenne y es alimentado por escurrimientos permanentes e intermitentes, los cuales se originan por la precipitación pluvial o por manantiales que se ubican en la parte alta de la zona de estudio (INESA, S.F. d).

La subcuenca parte alta del río Coatán, define de manera consistente un paisaje formado por terrenos de laderas fuertes en un 82.4 % de la superficie total, ubicada la mayor parte en la parte media y alta de ésta; las laderas suaves y medias ocupan un 5.8 y 8.6% respectivamente, mientras que los terrenos planos el 1.4% y los ondulados el 1.9%, este tipo de geomorfología se localizan en la parte baja de la subcuenca (INESA, S.F. d).

Los climas predominantes en la zona van desde Templado húmedo asta cálido húmedo, todos estos para la zona alta y media de la cuenca. La zona baja de la cuenca la encontramos el clima Cálido húmedo y Cálido subhúmedo. La temperatura media anual registrada en la parte baja de la subcuenca es de 26.3 °C, mientras que la temperatura media máxima anual es de 33.5 °C, y la mínima media anual es de 19.1 °C (INESA, S.F. d).

La precipitación anual en la parte baja de la subcuenca, es en promedio 2,158.4 mm y en la parte media de la subcuenca se precipitan en promedio anual 4,252.5 mm y en la parte alta de la subcuenca se precipita 857.7 mm. El volumen disponible a la salida es de 712.29 millones de m<sup>3</sup> (INESA, S.F. d).

## n. RÍO SUCHIATE

El río Suchiate, tiene una superficie de aportación de 221.60 km<sup>2</sup> y se ubica en el sureste del país (figura 3.14), que se encuentra delimitada al norte y al oeste por la cuenca hidrológica Cozoloapan, al sur por el océano Pacífico y al este por las cuencas hidrológicas de la República de Guatemala (DOF, 2004).



Figura 3.14 Ubicación de la cuenca del río Suchiate

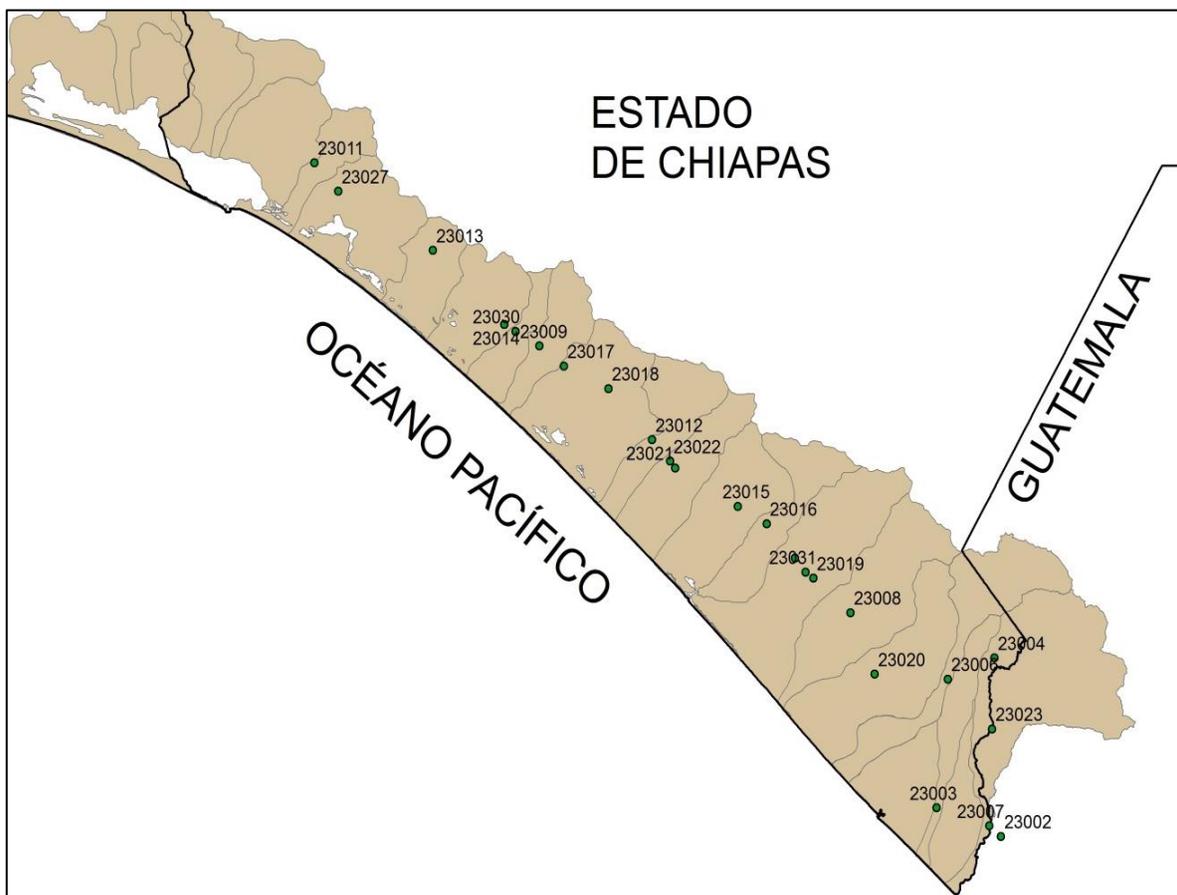
Este cauce tiene una longitud aproximada de 90.66 km haciéndolo el cauce más largo dentro de la región de la costa de Chiapas. En cuanto a sus pendientes (6% y 0.6%) se clasifica como de pie de monte y planicie. Tiene zonas con depósito de sedimento que comienza a partir de la zona media y hasta 16 kilómetros antes de su desembocadura, aunque en varios tramos su cauce en el fondo tiene roca y se dejan ver de manera aislada la formación de algunas islas. La población de Ayutla se encuentra en ambos márgenes del río 21 km aguas arriba de la desembocadura. Este cauce es internacional y sirve de límite fronterizo con Guatemala (Contreras, 2009).

## 4. INFORMACIÓN DISPONIBLE

### a. INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA

#### i. UBICACIÓN DE ESTACIONES HIDROMÉTRICAS

La información disponible se tomó del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra la red hidrométrica nacional. En esta red se registra el nivel de agua (escalas) y la cantidad de agua que pasa a una determinada hora (aforos) en los principales ríos de la República Mexicana.



**Figura 4.1** Ubicación geográfica de las estaciones hidrométricas en la zona de estudio

Se identificaron 24 estaciones hidrométricas ubicadas en la zona costa de Chiapas (figura 4.1) con sus respectivas coordenadas (tabla 4.1).

**Tabla 4.1** Coordenadas geográficas de las estaciones hidrométricas en la costa de Chiapas

CLAVE	NOMBRE	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	
		LATITUD (N)	LONGITUD (O)
23002	SUCHIATE I	14° 39' 23.07"	92° 07' 10.47"
23003	CAHUACAN	14° 43' 3.06"	92° 16' 15.49"
23004	MIXCUM	15° 02' 3.01"	92° 08' 0.46"
23006	MAL PASO	14° 59' 23.28"	92° 14' 37.68"
23007	SUCHIATE II	14° 40' 42.96"	92° 08' 48.84"
23008	HUIXTLA	15° 07' 52.32"	92° 28' 23.52"
23009	PIJIJAPAN	15° 41' 48.48"	93° 12' 35.64"
23011	TONALA	16° 05' 0.6"	93° 44' 40.92"
23012	NOVILLERO	15° 29' 52.80"	92° 56' 33.36"
23013	JESUS	15° 53' 54.88"	93° 27' 45.08"
23014	SAN DIEGO	15° 44' 31.22"	93° 17' 34.88"
23015	CACALUTA	15° 21' 24.48"	92° 44' 22.20"
23016	CINTALAPA	15° 19' 12.36"	92° 40' 17.76"
23017	COAPA	15° 39' 15.12"	93° 09' 04.71"
23018	MARGARITAS	15° 36' 23.40"	93° 02' 44.16"
23019	DESPOBLADO	15° 12' 16.92"	92° 33' 41.04"
23020	HUEHUETAN	15° 0' 3.01"	92° 25' 0.49"
23021	TABLAZON	15° 26' 17.94"	92° 53' 15.53"
23022	SAN NICOLAS	15° 27' 09.46"	92° 54' 00.93"
23023	TALISMAN II	14° 53' 02.40"	92° 08' 23.28"
23027	OCUILAPA	16° 1' 22.84"	93° 41' 15.61"
23030	URBINA	15° 43' 38.89"	93° 15' 57.56"
23031	COMPOAPA	15° 13' 2.98"	92° 34' 45.50"
23032	VADO ANCHO	15° 14' 47.97"	92° 36' 15.50"

## ii. DATOS HIDROMÉTRICOS DISPONIBLES

Se extrajo la información de escurrimientos correspondiente a cada una de las estaciones anteriores, después de lo cual se determinó la longitud del registro y datos faltantes (tabla 4.2).

**Tabla 4.2** Datos hidrométricos disponibles

CLAVE	NOMBRE	No. DE AÑOS	PERIODO	% DE DATOS COMPLETOS
23002	SUCHIATE I	19	1945-1963	68.38
23003	CAHUACAN	61	1948-2008	80.69
23004	MIXCUM	3	1954-1956	66.24
23006	MAL PASO	58	1954-2011	65.62
23007	SUCHIATE II	38	1955-1992	99.54
23008	HUIXTLA	78	1934-2011	62.76
23009	PIJIJAPAN	50	1961-2011	86.18
23011	TONALA	49	1961-2009	82.58
23012	NOVILLERO	50	1962-2011	66.79
23013	JESUS	39	1964-2002	91.87
23014	SAN DIEGO	34	1964-1997	95.19
23015	CACALUTA	48	1964-2011	87.23
23016	CINTALAPA	48	1964-2011	75.82
23017	COAPA	38	1964-2001	92.86
23018	MARGARITAS	38	1964-2001	87.62
23019	DESPOBLADO	48	1964-2011	88.98
23020	HUEHUETAN	47	1964-2010	80.16
23021	TABLAZON	24	1964-1987	57.59
23022	SAN NICOLAS	48	1964-2011	71.89
23023	TALISMAN II	22	1964-1985	96.86
23027	OCUILAPA	2	1986-1987	75.48
23030	URBINA	10	1974-1983	83.9
23031	COMPOAPA	10	1974-1983	90.03
23032	VADO ANCHO	10	1974-1983	79.24

## b. INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA

### i. UBICACIÓN DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS

La información disponible se tomó de la base de datos climatológica nacional (CLICOM) que es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, que significa Climate Computing Project. Las observaciones son diarias y representan los datos recopilados durante las últimas 24 horas, finalizando a las 08:00 AM. Cada una de las diferentes estaciones del país contiene diferentes periodos de información.



**Figura 4.2** Ubicación geográfica de las estaciones climatológicas en la zona de estudio

**ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO PARA LA REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 23 COSTA DE CHIAPAS USANDO MÉTODOS ESTADÍSTICOS**

Se identificaron 77 estaciones climatológicas ubicadas en la zona costa de Chiapas (figura 4.2) con sus respectivas coordenadas geográficas (tabla 4.3).

**Tabla 4.3** Coordenadas geográficas de las estaciones climatológicas en la costa de Chiapas

CLABE	NOMBRE	COORDENADAS		CLABE	NOMBRE	COORDENADAS	
		LATITUD	LONGITUD			LATITUD	LONGITUD
7012	FINCA ARGOVIA	15° 07' 36"	92° 17' 57"	7168	TONALA (DGE)	16° 05' 03"	93° 44' 38"
7014	BELISARIO DOMINGUEZ I	15° 18' 30"	92° 21' 30"	7172	UNION JUAREZ	15° 03' 45"	92° 04' 50"
7018	CACAOATAN	14° 59' 18"	92° 09' 52"	7182	ARRIAGA (DGE)	16° 14' 30"	93° 54' 30"
7019	CAHUACAN	14° 43' 20"	92° 16' 10"	7185	ESCUINTLA (SMN)	15° 19' 00"	92° 40' 00"
7037	FINCA CUXTEPEQUES	15° 43' 43"	92° 58' 08"	7187	FINCA LA PATRIA	15° 06' 54"	92° 13' 55"
7038	DESPOBLADO	15° 12' 09"	92° 33' 29"	7191	MALPASO	14° 55' 11"	92° 15' 25"
7045	EL DORADO	14° 40' 22"	92° 12' 46"	7199	TANQUE REGULADOR (CFE)	14° 50' 00"	92° 17' 00"
7048	FINCA EL TRIUNFO	15° 20' 53"	92° 32' 55"	7200	TAPACHULA (DGE)	14° 54' 29"	92° 15' 38"
7053	ESCUINTLA (DGE)	15° 19' 51"	92° 39' 21"	7201	TONALA (SMN)	16° 05' 00"	93° 44' 00"
7056	FINCA CHIRIPA	15° 10' 00"	92° 18' 00"	7206	BOCA DEL CIELO	15° 51' 08"	93° 40' 15"
7057	FINCA CHICHARRAS	15° 07' 59"	92° 14' 32"	7208	NOVILLERO	15° 30' 02"	92° 56' 35"
7058	EL PERU	15° 06' 00"	92° 16' 00"	7227	TALISMAN II	14° 57' 33"	92° 10' 06"
7060	FINCA GENOVA	15° 10' 00"	92° 19' 00"	7228	TRES PICOS	15° 52' 30"	93° 32' 45"
7061	FINCA HAMBURGO	15° 10' 26"	92° 19' 31"	7234	C.A.E. LAS PALMAS	15° 01' 60"	92° 24' 00"
7066	FINCA SAN ENRIQUE	15° 08' 00"	92° 18' 00"	7318	LA GLORIA	16° 11' 60"	93° 55' 60"
7068	FRONTERA HIDALGO	14° 46' 38"	92° 10' 34"	7320	SALVACION	15° 08' 38"	92° 42' 05"
7072	HACIENDA LAS MARAVILLAS	15° 06' 00"	92° 17' 00"	7326	MAZATAN	14° 53' 11"	92° 27' 14"
7073	HACIENDA SAN CRISTOBAL	15° 59' 00"	93° 43' 00"	7328	PROVIDENCIA	15° 19' 06"	92° 46' 06"
7074	HORCONES	15° 57' 19"	93° 36' 20"	7333	BUENOS AIRES	15° 19' 57"	92° 16' 03"
7075	HUEHUETAN	15° 00' 08"	92° 24' 01"	7334	FRANCISCO SARABIA	15° 25' 04"	92° 59' 54"
7077	HUIXTLA	15° 08' 29"	92° 29' 11"	7336	PLAN DE IGUALA	14° 57' 32"	92° 30' 15"
7078	IGNACIO LOPEZ RAYON	14° 37' 04"	92° 11' 05"	7339	EL PORVENIR	15° 27' 26"	92° 16' 52"
7079	ROSARIO IZAPA (IMPA)	14° 58' 26"	92° 09' 18"	7344	EJIDO IBARRA	15° 20' 02"	92° 57' 08"
7084	JESUS CHIAPAS	15° 48' 30"	93° 21' 30"	7347	GUADALUPE VICTORIA	15° 30' 14"	92° 52' 46"
7092	LA ESPERANZA (CFE)	15° 18' 00"	92° 25' 00"	7348	INDEPENDENCIA	15° 20' 54"	92° 34' 42"
7095	LA NUEVA (CFE)	15° 13' 00"	92° 23' 00"	7350	MOTOZINTLA (DGE)	15° 22' 00"	92° 15' 00"
7098	LA TIGRERA	15° 53' 00"	93° 31' 00"	7352	SAN DIEGO	15° 44' 30"	93° 18' 00"
7113	MAPASTEPEC	15° 27' 06"	92° 52' 34"	7362	ROSENDO SALAZAR	16° 28' 16"	94° 00' 14"
7115	MARGARITAS	15° 35' 20"	93° 03' 38"	7370	ADOLFO RUIZ CORTINEZ	14° 52' 30"	92° 32' 15"
7116	MEDIO MONTE	14° 54' 55"	92° 11' 26"	7371	BELISARIO DOMINGUEZ II	15° 18' 00"	92° 21' 00"
7117	METAPA DE DOMINGUEZ	14° 49' 52"	92° 11' 30"	7380	LAS BRISAS	15° 30' 52"	93° 07' 01"
7119	MOTOZINTLA (SMN)	15° 21' 51"	92° 14' 53"	7386	SAN ISIDRO	15° 44' 34"	93° 21' 05"
7129	PIJIJAPAN	15° 41' 52"	93° 12' 41"	7390	CACALUTA	15° 21' 54"	92° 43' 52"
7136	PUERTO MADERO	14° 42' 05"	92° 23' 11"	7393	FINCA LA PAZ	15° 20' 48"	92° 28' 34"
7146	SAN JERONIMO	15° 02' 23"	92° 08' 11"	7394	FINCA SAN CRISTOBAL	15° 11' 04"	92° 21' 46"
7157	SANTO DOMINGO	15° 01' 39"	92° 06' 15"	7395	FINCA LA VICTORIA	15° 17' 16"	92° 25' 15"
7163	SUCHIATE	14° 42' 52"	92° 08' 56"	7396	FINCA GERMANIA	15° 11' 40"	92° 20' 45"
7166	TALISMAN I	14° 57' 47"	92° 08' 50"	20148	TAPANATEPEC	16° 24' 08"	94° 12' 57"
				20328	CHAHUITES	16° 15' 00"	94° 13' 59"

## ii. DATOS CLIMATOLÓGICOS DISPONIBLES

Se extrajo la información de precipitación de las 77 estaciones climatológicas que se encuentran en la zona de estudio, después de lo cual se determinó la longitud del registro y su periodo (tabla 4.4).

**Tabla 4.4** Datos de precipitación disponibles

CLABE	NOMBRE	No. DE AÑOS	PERIODO	CLABE	NOMBRE	No. DE AÑOS	PERIODO
7012	FINCA ARGOVIA	58	1955-2012	7168	TONALA (DGE)	49	1961-2009
7014	BELISARIO DOMINGUEZ I	38	1962-1999	7172	UNION JUAREZ	63	1951-2013
7018	CACAOATAN	69	1944-2012	7182	ARRIAGA (DGE)	46	1961-2006
7019	CAHUACAN	47	1961-2007	7185	ESCUINTLA (SMN)	35	1945-1979
7037	FINCA CUXTEPEQUES	63	1951-2013	7187	FINCA LA PATRIA	49	1961-2009
7038	DESPOBLADO	50	1964-2013	7191	MALPASO	53	1961-2013
7045	EL DORADO	61	1951-2011	7199	TANQUE REGULADOR (CFE)	19	1966-1984
7048	FINCA EL TRIUNFO	46	1963-2008	7200	TAPACHULA (DGE)	57	1952-2008
7053	ESCUINTLA (DGE)	58	1954-2011	7201	TONALA (SMN)	79	1922-2001
7056	FINCA CHIRIPA	55	1954-2008	7206	BOCA DEL CIELO	8	1972-1979
7057	FINCA CHICHARRAS	53	1961-2013	7208	NOVILLERO	51	1963-2013
7058	EL PERU	56	1954-2009	7227	TALISMAN II	28	1983-2010
7060	FINCA GENOVA	24	1955-1978	7228	TRES PICOS	33	1975-2007
7061	FINCA HAMBURGO	60	1954-2013	7234	C.A.E. LAS PALMAS	4	1977-1980
7066	FINCA SAN ENRIQUE	18	1961-1978	7318	LA GLORIA	6	1978-1983
7068	FRONTERA HIDALGO	70	1944-2013	7320	SALVACION	35	1978-2012
7072	HACIENDA LAS MARAVILLAS	25	1954-1978	7326	MAZATAN	34	1980-2013
7073	HACIENDA SAN CRISTOBAL	32	1940-1971	7328	PROVIDENCIA	3	1980-1982
7074	HORCONES	47	1964-2010	7333	BUENOS AIRES	34	1980-2013
7075	HUEHUETAN	47	1964-2010	7334	FRANCISCO SARABIA	31	1980-2010
7077	HUIXTLA	60	1954-2013	7336	PLAN DE IGUALA	34	1980-2013
7078	IGNACIO LOPEZ RAYON	63	1951-2013	7339	EL PORVENIR	33	1980-2012
7079	ROSARIO IZAPA (IMPA)	30	1961-1990	7344	EJIDO IBARRA	31	1982-2012
7084	JESUS CHIAPAS	40	1964-2003	7347	GUADALUPE VICTORIA	24	1982-2005
7092	LA ESPERANZA (CFE)	10	1962-1971	7348	INDEPENDENCIA	33	1981-2013
7095	LA NUEVA (CFE)	11	1962-1972	7350	MOTOZINTLA (DGE)	28	1961-1988
7098	LA TIGRERA	14	1962-1975	7352	SAN DIEGO	15	1982-1996
7113	MAPASTEPEC	53	1961-2013	7362	ROSENDO SALAZAR	30	1982-2012
7115	MARGARITAS	42	1964-2005	7370	ADOLFO RUIZ CORTINEZ	2	1984-1985
7116	MEDIO MONTE	53	1961-2013	7371	BELISARIO DOMINGUEZ II	13	1990-2002
7117	METAPA DE DOMINGUEZ	70	1944-2013	7380	LAS BRISAS	13	2000-2012
7119	MOTOZINTLA (SMN)	92	1922-2013	7386	SAN ISIDRO	13	2000-2012
7129	PIJIJAPAN	53	1959-2011	7390	CACALUTA	30	1984-2013
7136	PUERTO MADERO	62	1944-2005	7393	FINCA LA PAZ	24	1990-2013
7146	SAN JERONIMO	65	1949-2013	7394	FINCA SAN CRISTOBAL	34	1976-2009
7157	SANTO DOMINGO	69	1944-2012	7395	FINCA LA VICTORIA	50	1960-2009
7163	SUCHIATE	65	1944-2008	7396	FINCA GERMANIA	23	1987-2009
7166	TALISMAN I	40	1944-1983	20148	TAPANATEPEC	50	1961-2010
				20328	CHAHUITES	32	1980-2011

## 5. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO

### a. CONCEPTOS BÁSICOS

#### i. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

La cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida (Aparicio, 2009).

La cuenca hidrológica es la unidad básica de estudio de la Hidrología y sus características geomorfológicas y su urbanización controlan la respuesta de esta a la precipitación, es decir, el escurrimiento. Dichas características se clasifican en dos tipos: las que condicionan el volumen de escurrimiento, como el área de la cuenca y el tipo de suelo, y las que condicionan la velocidad de respuesta, como son el orden de corrientes, pendiente de la cuenca y los cauces, etc. (Aparicio, 2009).

Las características geomorfológicas de la cuenca se describen a continuación:

Parteaguas. Línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa dos cuencas adyacentes (Breña y Jacobo, 2013).

Área de la cuenca. Se define como la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas (Aparicio, 2009).

Corriente principal. Es la corriente de mayor longitud que pasa por la salida de la misma (cuenca exorreica). Las demás corrientes de una cuenca de este tipo se denominan corrientes tributarias (Aparicio, 2009).

Orden de corriente. Expresa la relación de jerarquía entre los diferentes tramos de las corrientes (Summerfield, 1991).

Como menciona Aparicio (2009) la pendiente del cauce principal es un indicador importante de la velocidad de respuesta de una cuenca a una tormenta y dado que la pendiente varía a lo largo del cauce, es necesario definir una pendiente media, para lo cual existen diferentes métodos; un método muy sencillo para calcular dicha pendiente es obtener la diferencia entre las elevaciones de los extremos de la corriente y dividirla por su longitud horizontal, pero entre mayor sea la longitud del tramo considerado, menor será la precisión obtenida, pues no considera los cambios de pendiente que se presentan en los tramos intermedios.

Un método con mayor precisión es el de Taylor y Schwarz (1952), el cual propone calcular la pendiente media como la de un canal de sección transversal uniforme que tenga la misma longitud y tiempo de recorrido que la corriente en cuestión, considerando que el río puede estar formado por una serie de tramos de igual longitud o bien por tramos de longitud variable.

La pendiente media para tramos de igual longitud se determina con la expresión:

$$S = \left[ \frac{n}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}}} \right]^2 \quad (5.1)$$

donde S es la pendiente media del cauce; n es el número de tramos de igual longitud; y  $S_n$  es la pendiente del tramo n.

La pendiente media para tramos de longitud variable se calcula con la ecuación:

$$S = \left[ \frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_n}{\sqrt{S_n}}} \right]^2 \quad (5.2)$$

donde S es la pendiente media del cauce; L es la longitud total del río;  $l_n$  es la longitud del tramo n; y  $S_n$  es la pendiente del tramo n.

Otro concepto importante es el tiempo de concentración que se define como la diferencia temporal entre el inicio de la lluvia hasta el momento en que se establece el gasto de equilibrio y se puede estimar con la fórmula de Kirpich.

$$t_c = 0.000325 \frac{L_{CP}^{0.77}}{S_{CP}^{0.385}} \quad (5.3)$$

donde

$t_c$  es el tiempo de concentración en horas;  $L_{CP}$  es la longitud del cauce principal en metros; y  $S_{CP}$  es la pendiente del cauce principal, adimensional.

## ii. ESCURRIMIENTO

El escurrimiento es la porción de precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para ser drenada hasta la salida de la cuenca.

De acuerdo con Breña y Jacobo (2013) Las fuentes principales del escurrimiento se pueden clasificar en cuatro tipos:

- 1) Precipitación directa sobre el cauce.  
Debido a la pequeña superficie que abarcan los ríos representa un aporte menor.
- 2) Flujo base.  
Es el aporte de un sistema de acuífero somero a un cauce determinado.
- 3) Escurrimiento directo.  
Es el generado por la precipitación efectiva y está asociado a una tormenta en particular.
- 4) Escurrimiento subsuperficial.  
Porción del agua de precipitación que se infiltra y escurre cerca de la superficie del suelo, más o menos en forma paralela a él y dependiendo de la permeabilidad de los estratos puede ser casi tan rápido como el superficial o tan lento como el subterráneo.

El cálculo de los escurrimientos superficiales se considera para dos objetivos: para estimar gastos para el diseño y operación de obras de protección y para aprovechamientos hidráulicos; sin embargo, es común que se carezca de suficientes datos de escurrimiento del sitio de interés, mientras que los registros de precipitación suelen ser más abundantes. Dado que el flujo de un río es afectado principalmente por las variaciones de la precipitación, las relaciones lluvia-escurrimiento son una herramienta valiosa para suplir esta carencia de información, pues permiten determinar el escurrimiento utilizando las características de la cuenca y los datos de precipitación. Es por ello que existen numerosos métodos para relacionar la precipitación en una cuenca con el escurrimiento de la misma.

### iii. PÉRDIDAS

Las pérdidas representan la parte del agua precipitada que es interceptada por el follaje de las plantas, los techos de las construcciones, la retención en depresiones o charcos (que posteriormente se evapora o se infiltra), la evaporación y la infiltración. La porción más considerable de las pérdidas está dada por la infiltración, por lo que es costumbre calcularlas conjuntamente bajo este nombre.

Existen diversos factores que influyen en la estimación de las pérdidas como son:

- Textura del suelo.
- Contenido de humedad inicial.
- Contenido de humedad de saturación.
- Cobertura vegetal.
- Uso del suelo.
- Aire atrapado.
- Lavado de material fino.
- Compactación.
- Temperatura, sus cambios y diferencias.

Estos factores actúan de formas diversas en cada cuenca, lo que genera gran incertidumbre al momento de obtener dicho parámetro.

El análisis de la infiltración es de importancia básica en relación lluvia-escorrimento. Existen diferentes métodos para hacer el cálculo de la infiltración, cuando se tienen registros simultáneos de lluvia y escurrimiento en una cuenca hidrológica, como los métodos empíricos que se presentan a continuación.

a) De acuerdo con su definición

Las pérdidas se definen como la diferencia entre el volumen de agua que llueve en una cuenca y el que escurre por su salida, determinándose con la expresión:

$$V_P = V_{LL} - V_{ED} \quad (5.4)$$

donde  $V_P$  es el volumen de pérdidas;  $V_{LL}$  es el volumen total de lluvia; y  $V_{ED}$  es el volumen de escurrimiento directo.

El volumen total de lluvia se obtiene al multiplicar la altura de precipitación media por el área total de la cuenca, mientras que el volumen de escurrimiento directo es igual al producto del área de la cuenca por la lluvia en exceso o también es igual al área del hidrograma de escurrimiento directo.

La precipitación efectiva o en exceso es la que resulta de restar la total con la producida por las pérdidas y es la que da origen al escurrimiento directo.

b) Criterio de la capacidad de infiltración media

Este método supone que la capacidad de infiltración es constante durante toda la tormenta y a esta capacidad de infiltración se le denomina índice de

infiltración media ( $\phi$ ); tal parámetro se determina con el procedimiento siguiente:

- 1) Del hidrograma de la avenida se separa el gasto base y se calcula el volumen de escurrimiento directo.
- 2) Se estima la altura de lluvia en exceso con la ecuación 5.5.

$$P_e = \frac{V_{ED}}{A_C} \quad (5.5)$$

donde  $P_e$  es la lluvia efectiva y  $A_C$  es el área de la cuenca.

- 3) Se evalúa  $\phi$  trazando una línea horizontal en el hidrograma de la tormenta y a partir de un proceso de prueba y error se determina que la suma de las alturas de precipitación que se ubican arriba de esa línea sea igual a la altura de lluvia efectiva.
- 4) El índice de infiltración media será igual a la altura de precipitación correspondiente a la línea horizontal dividida entre el intervalo de tiempo  $\Delta t$  que dure cada barra del hidrograma.

c) Criterio del coeficiente de escurrimiento

Este criterio considera que las pérdidas son proporcionales a la magnitud total de la lluvia.

$$C = \frac{V_{ED}}{V_{LL}} \quad (5.6)$$

d) Criterio del United States Soil Conservation Service (USSCS)

Según este criterio la relación entre el coeficiente de escurrimiento y la altura de precipitación total de una tormenta está representada por la expresión:

$$C = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P^2 + 0.8SP} \quad (5.7)$$

donde C es el coeficiente de escurrimiento; P es la altura total de precipitación de la tormenta; y S es un parámetro por determinar con las mismas unidades de P.

En la práctica el parámetro S se puede estimar si se conocen varias parejas de valores (P, C); el valor de S puede tomarse como aquel en el cual la varianza del error cometido al calcular C con el apoyo de la ecuación 5.7, con respecto al coeficiente de escurrimiento real, sea mínima.

e) Método de los números de escurrimiento.

El Soil Conservation Service (1975) propone un método llamado “de los números de escurrimiento”, para el cual, no es necesario que la cuenca este aforada, se basa en la lluvia total y las características de la cuenca.

La altura de lluvia total se relaciona con la altura de lluvia efectiva  $P_e$  a través de la expresión matemática:

$$P_e = \frac{\left[ P_t - \frac{508}{CN} + 5.08 \right]^2}{P_t + \frac{2032}{CN} - 20.32} \quad (5.8)$$

donde  $P_t$  es la altura de lluvia total, en cm;  $P_e$  es la altura de lluvia efectiva, en cm; y CN es el número de escurrimiento.

**Tabla 5.1** Clasificación de suelos

Tipo de suelo	Características
<b>Tipo A</b>	Arenas con poco limo y arcilla de tamaño medio (escurrimiento mínimo).
<b>Tipo B</b>	Arenas finas y limos orgánicos e inorgánicos, mezcla de ambos.
<b>Tipo C</b>	Arenas muy finas, limos y bastante arcilla.
<b>Tipo D</b>	Arcillas en grandes cantidades; suelos poco profundos con sub-horizontes de roca sana; suelos muy impermeables.

Fuente. Soil Conservation Service (1975)

Para obtener CN se selecciona el tipo de suelo (tabla 5.1) y posteriormente en función del uso del suelo, de la condición de la superficie de la cuenca y de la pendiente del terreno se podrá conocer dicho valor a partir de la tabla 5.2 y corregir el valor por lluvias antecedentes con la tabla 5.3.

**Tabla 5.2.** Valor del número de escurrimiento N, según uso y tipo de suelo, condición de la cuenca y pendiente del terreno

Uso de la tierra o cobertura	Condición de la superficie	Pendiente Terreno En %	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Bosques (sembrados y cultivados)	Ralo, baja transpiración	-----	45	66	77	83
	Normal, transpiración media	-----	36	60	73	79
	Espeso o alta transpiración	-----	25	55	70	77
Caminos	De tierra	-----	72	82	87	89
	Superficie dura	-----	74	84	90	92
Bosques naturales	Muy ralo o baja transpiración	-----	56	75	86	91
	Ralo, baja transpiración	-----	46	68	78	84
	Normal, transpiración media	-----	36	60	70	76
	Espeso o alta transpiración	-----	26	52	62	69
	Muy espeso, alta transpiración	-----	15	44	54	61
Descanso (sin cultivo) Cultivos en surco	Surcos rectos	-----	77	86	91	94
	Surcos rectos	>1	72	81	88	91
	Surcos rectos	<1	67	78	85	89
	Surcos en curvas de nivel (contorneo)	>1	69	79	84	88
	Surcos en curvas de nivel (contorneo)	<1	65	75	82	86
	Terrazas	>1	66	74	80	82
	Terrazas	<1	62	71	78	81
Leguminosas (sembradas con maquinaria o al voleo) o praderas con rotación)	Surcos rectos	>1	66	77	85	89
	Surcos rectos	<1	58	72	81	85
	Surcos en curvas de nivel	>1	64	75	83	85
	Surcos en curvas de nivel	<1	55	69	78	83
	Terrazas	>1	63	73	80	83
	Terrazas	<1	51	67	76	80
Pastizal	-----	>1	68	79	86	89
	-----	<1	39	61	74	80
	Contorneo	>1	47	67	81	88
	Contorneo	<1	6	65	70	79
	-----	-----	30	58	71	78
Potrero permanente Cereales	Surcos rectos	<1	65	76	84	88
	Surcos rectos	>1	63	75	83	87
	Contorneo	<1	63	74	82	85
	Contorneo	>1	61	73	81	84
	Terrazas	<1	61	72	79	82
	Terrazas	>1	59	70	78	81
Superficie impermeable	-----	-----	100	100	100	100

Fuente. Soil Conservation Service (1975).

**Tabla 5.3.** Factor de corrección del número de escurrimiento N, según la precipitación antecedente

N	Corrección A	Corrección B
10	0.40	2.22
20	0.45	1.85
30	0.50	1.67
40	0.55	1.50
50	0.62	1.40
60	0.67	1.30
70	0.73	1.21
80	0.79	1.14
90	0.87	1.07
100	1.00	1.00
Si 5 días antes tuvo lluvia	Menor de 2.5 cm	Corrección A
	Entre 2.5 y 5 cm	Sin corrección
	Mayor de 5cm	Corrección B

Fuente. Soil Conservation Service (1975)

#### iv. FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD

El diseño y la planeación de obras hidráulicas están siempre relacionadas con eventos hidrológicos futuros, pero debido a la complejidad de los procesos físicos que se llevan a cabo en estos, no suele ser factible realizar estimaciones basados en las leyes de la mecánica o la física, sea porque estos métodos son insuficientes, o bien porque el modelo matemático resultante sería demasiado grande, complicado y difícil de manejar (Aparicio, 2009). Por ello la hidrología se apoya en la probabilidad y estadística para la solución de estos problemas.

En Estadística existen decenas de funciones de distribución de probabilidad teóricas; sin embargo, no es posible probar cada una de ellas al analizar un registro de datos hidrológicos, por lo que es necesario escoger la que mejor se adapten al problema en cuestión.

Entre las funciones de distribución de probabilidad más usadas en hidrología se encuentran las siguientes.

- ♦ Normal
- ♦ Lognormal
- ♦ Exponencial
- ♦ Gamma
- ♦ Gumbel
- ♦ Doble Gumbel

##### 1. Función de distribución normal

Una distribución muy importante y mayormente usada es la Distribución Normal y la ecuación matemática es la siguiente:

$$F(X) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (5.9)$$

Y la función de densidad se define de la siguiente manera:

$$f(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad ; \quad -\infty < X < \infty \quad (5.10)$$

Dónde:

$\mu$  = media

$e$  = 2.7182...

$\pi$  = 3.1415...

$\sigma$  = desviación estándar

$x$  = variable aleatoria

La distribución normal es una curva con forma de campana, con eje de simetría en el punto correspondiente al promedio del universo  $\mu$ . La distancia entre el eje de simetría de la campana y el punto de inflexión de la curva es igual a  $\sigma$ , la desviación estándar de la población. El área total debajo de la curva es igual a 1.

## **2. Función de distribución lognormal**

Si la variable aleatoria  $Y = \log X$  está normalmente distribuida, entonces se dice que  $X$  está distribuida en forma lognormal. La función de distribución de probabilidad es:

$$F(X) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln-\alpha}{\beta}\right)^2} dx \quad (5.11)$$

Y su función de densidad presenta la forma siguiente:

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln-\alpha}{\beta}\right)^2} \quad (5.12)$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de la distribución, estos parámetros corresponden a la media y desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria.

Esta distribución tiene la ventaja sobre la distribución normal de que está limitada ( $X > 0$ ) y de que la transformación log tiende a reducir la asimetría positiva comúnmente encontrada en información hidrológica, ya que al tomar logaritmos se

tiene una reducción en una proporción mayor los números grandes que los números pequeños. Las desventajas de esta distribución son que se tiene solamente dos parámetros en la función y que se requiere que los logaritmos de los datos sean simétricos con respecto a la media.

### 3. Función de distribución exponencial

La función de distribución exponencial está definida por la expresión siguiente:

$$F(x) = 1 - e^{-y} \quad (5.13)$$

donde:

$F(x)$  probabilidad de que  $c \leq h$

$y$  variable reducida, que se calcula como  $y = \frac{x-\beta}{\alpha}$

$\alpha$  y  $\beta$  parámetros que definen la función Exponencial

$\alpha$  desviación estándar

$\beta$  cota inferior

Los parámetros estadísticos de esta función son:

Media

$$u = \alpha + \beta \quad (5.14)$$

Varianza

$$\sigma^2 = \alpha^2 \quad (5.15)$$

Este tipo de función se utiliza en hidrología para el estudio estadístico de precipitaciones máximas anuales y la generación de la magnitud y espaciamento entre eventos hidrológicos.

### 4. Función de distribución Gama

La función de densidad está dada por:

$$f(X) = \frac{1}{\alpha_1 \Gamma(\beta_1)} \left\{ \frac{x - \delta_1}{\alpha_1} \right\}^{\beta_1 - 1} e^{-\frac{x - \delta_1}{\alpha_1}} \quad (5.16)$$

donde  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$  y  $\delta_1$  son los parámetros de la función y  $\Gamma(\beta_1)$  es la función Gamma.

Su función de distribución de probabilidad, es igual a:

$$F(X) = \frac{1}{\alpha_1 \Gamma(\beta_1)} \int_0^x \left( \frac{x - \delta_1}{\alpha_1} \right)^{\beta_1 - 1} e^{-\frac{x - \delta_1}{\alpha_1}} \quad (5.17)$$

### 5. Función de distribución Gumbel

En los estudios realizados para eventos hidrológicos extremos se incluye la selección de una secuencia de observación ya sean máximas o mínimas de un conjunto de datos, por ejemplo en el estudio de los gastos picos en una estación hidrométrica se utilizan solamente los valores máximos registrado cada año, entre todos los valores registrados. Es por ello que se utiliza la función de valores extremos I o también llamada Gumbel en Hidrología, ya que esta función de distribución se utiliza para determinar la probabilidad de que se presenten grandes avenidas, debido a que se ha demostrado teóricamente que se ajusta a los valores máximos.

La función de distribución de probabilidad se representa por la siguiente ecuación:

$$F(X) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (5.18)$$

La función de densidad de probabilidad es la siguiente:

$$f(X) = \alpha e^{[-\alpha(x-\beta) - e^{-\alpha(x-\beta)}]} \quad (5.19)$$

dónde:

- $\alpha$  parámetro de forma
- $\beta$  parámetro de escala
- x variable aleatoria

Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  se estiman por el método de momentos como:

$$\alpha = \frac{1.2825}{S} \quad (5.20)$$

$$\beta = \bar{x} - 0.45S \quad (5.21)$$

dónde:

S es la desviación estándar que se calcula con la ecuación siguiente:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (5.22)$$

$\bar{x}$  Representa la media de la muestra, la cual se calcula con la expresión siguiente.

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (5.23)$$

La distribución de probabilidad Gumbel se utiliza para el estudio de los gastos máximos anuales en un río o de precipitaciones máximas anuales en un sitio, y por lo tanto para la determinación de avenidas de diseño.

### 6. Función de distribución para dos poblaciones o Doble Gumbel

En nuestro país, existen diversos lugares donde los gastos máximos anuales pertenecen a dos poblaciones diferentes, debido a los ciclones que se presentan en ciertas zonas y por las precipitaciones relacionadas con los fenómenos meteorológicos dominantes de la región. En estas situaciones se dice que llegamos a tener dos poblaciones para una misma zona en estudio.

Es por ello que fue necesario desarrollar la función de distribución Doble Gumbel, dada por la siguiente expresión:

$$F(X) = p \left( e^{-e^{-\alpha_1(x-\beta_1)}} \right) + (1 - p) \left( e^{-e^{-\alpha_2(x-\beta_2)}} \right) \quad (5.24)$$

donde  $\alpha_1$  y  $\beta_1$  son los parámetros correspondientes a la población no ciclónica y  $\alpha_2$  y  $\beta_2$  corresponden a la ciclónica,  $p$  es la probabilidad de que en un año cualquiera el gasto máximo no sea producido por una tormenta ciclónica. Los valores  $\alpha_1$  y  $\beta_1$  se obtienen ajustando por momentos una función Gumbel a los datos de la primera población y los valores de  $\alpha_2$  y  $\beta_2$  ajustando otra función de Gumbel a los datos de la segunda población.

Los parámetros  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  definen una cierta inclinación de las curvas, entre más pequeñas más fuerte es la inclinación.  $\beta_1$  y  $\beta_2$  son parámetros de escala, el valor más grande que pueden tomar es el máximo valor de la muestra obtenido para las poblaciones 1 y la 2.

Para estimar los parámetros se recomienda minimizar el error cuadrático.

$$Z = \left[ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_l)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.25)$$

donde  $x_i$  y  $\bar{x}_l$  son los valores medidos y los valores estimados con la función de distribución de probabilidad, y  $n$  es el número de valores que contiene la muestra.

Para obtener la combinación de valores  $p$ ,  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ ,  $\alpha_2$  y  $\beta_2$  que hacen mínima la función  $Z$ , se recomienda hacer primero una gráfica en la que se dibujen los puntos correspondientes a las parejas de valores  $[Q_i, F(Q_i)]$ . Para dibujar los puntos en la gráfica se utiliza el papel de Gumbel.

El papel de Gumbel tiene en el eje de las abscisas los valores de  $Y = -\text{LnLn} \left[ \frac{F(x)}{F(x)-1} \right]$  y en las ordenadas los de  $x$ . Con esto se logra separar a las dos poblaciones que se agrupan en sendas rectas

## **b. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA**

### **i. ANÁLISIS PUNTUAL**

Una vez identificadas las estaciones hidrométricas que se encuentran en la región de estudio, se seleccionaron las que cumplieran con los tres puntos siguientes:

- 1) Estaciones con más de 20 años de registro.
- 2) Estaciones cuyas cuencas no presenten almacenamientos o extracciones importantes.

Los puntos anteriores sirven para garantizar que los registros puedan ser analizados probabilísticamente.

- 3) Como tercer punto se seleccionaron las estaciones hidrométricas cuyas cuencas tienen un tiempo de concentración menor a 10 horas, buscando garantizar que las lluvias registradas en el día sean representativas de los escurrimientos aforados.

Como paso siguiente se obtuvieron las principales características fisiográficas de la cuenca hidrológica perteneciente a cada estación hidrométrica seleccionada, tomando como salida la ubicación de esta; estas características fueron proporcionadas por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Para el análisis de la información se determinaron los valores máximos anuales de los registros de gasto medio diario para cada estación hidrométrica con el fin de evaluar el mejor ajuste de una función de probabilidad para estimar eventos para diferentes periodos de retorno, esto con la ayuda del programa AX.

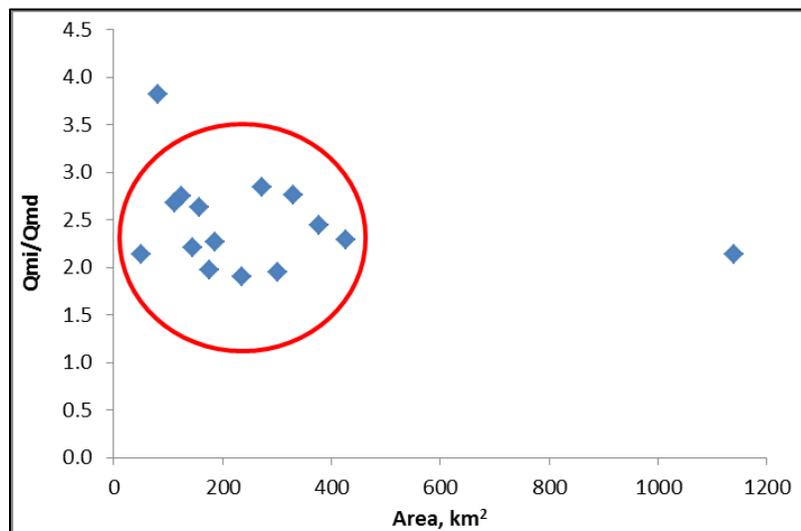
AX es un programa elaborado en el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) que calcula el error estándar de cada una de las funciones de ajuste con respecto a la muestra, también estima las funciones de ajuste con sus respectivos parámetros. Las funciones de probabilidad que se contemplaron en el empleo de este programa son, la Normal, Log-Normal, Gumbel, Exponencial, Gamma y doble Gumbel. El análisis que se realiza de estos métodos es a partir de las modalidades de momentos y por máxima verosimilitud.

De estas funciones se seleccionó aquella que presenta el Error Estándar Mínimo en cada estación y se obtuvieron los valores de los eventos para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000 años.

## ii. ANÁLISIS REGIONAL

Cuando el sitio analizado cuenta con poca información (menor a 30 años) o con nula información, se requiere emplear las técnicas de análisis regional hidrológico para transferir información de un sitio a otro que pertenezca a una misma región hidrológica y de esa manera generar muestras más grandes. Estas técnicas se emplean en zonas meteorológicamente homogéneas.

En general, la delimitación regional se ha sustentado en considerar áreas geográficamente continuas, límites políticos o administrativos. Sin embargo, si la variabilidad espacial de las características fisiográficas o hidrológicas es grande, la consideración de homogeneidad no se puede garantizar; algunas cuencas son similares con respecto a cierta variable, como la cubierta forestal o la lluvia anual, pero no a otras, como son las características fisiográficas.



**Figura 5.1** Método gráfico de determinación de regiones homogéneas (Las estaciones encerradas en rojo pertenecen a la misma región homogénea)

En el presente trabajo se utilizaron tres métodos para determinar las regiones homogéneas, el primero fue graficar el área contra el cociente del gasto medio instantáneo (Qmi) y el gasto medio en un día (Qmd), presentado en cada estación, los grupos de regiones se forman por la concentración de puntos alrededor de un determinado valor (figura 5.1); En cuanto al segundo método se aplicó a partir de los coeficientes de variación de la manera siguiente:

Si  $cv_i \leq cv_j$  y  $\left(\frac{cv_j}{cv_i}\right)^2 \leq 2$  donde  $i= 1, \dots, n$  estaciones y  $j= 1, \dots, m$  estaciones;

entonces las estaciones son agrupables.

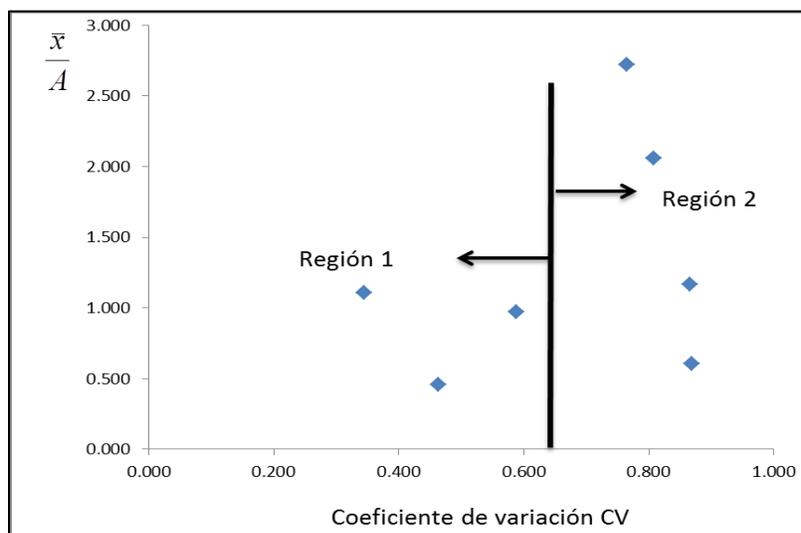
Si  $cv_i \geq cv_j$  y  $\left(\frac{cv_i}{cv_j}\right)^2 \leq 2$  donde  $i= 1, \dots, n$  estaciones y  $j= 1, \dots, m$  estaciones;

entonces las estaciones son agrupables.

Si ninguna de las condiciones anteriores se cumple, las estaciones no son agrupables.

El tercer método de delimitación de regiones homogéneas se obtiene de la gráfica del coeficiente de variación (cv) contra el cociente de la media entre el área de cada cuenca, las regiones se delimitan verticalmente (figura 5.2).

$$Cv = \frac{s}{\bar{x}} \tag{5.26}$$



**Figura 5.2** Método grafico de determinación de regiones homogéneas a partir de los coeficientes de variación

Para regionalizar se utilizó el método de Estaciones-Año que se trata 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. (Escalante y Reyes. 2008).

El Método Estaciones-Año se realizó de la manera siguiente:

Paso 1. Se obtuvieron los estadísticos muestrales de las series  $Q_i^j$  para  $i=1, \dots, n$  años y  $j=1, \dots, m$  estaciones.

Paso 2. Para cada  $j$  se generó una muestra modulada de la forma:

$$q_i^j = \frac{Q_i^j}{\bar{Q}^j} \quad (5.27)$$

donde  $\bar{Q}^j$  es la media de la estación correspondiente.

Paso 3. Se formó el registro llamado estaciones-año, de tamaño  $n_T = \sum_{j=1}^m n_j$  con todos los eventos modulados  $q_i^j$ .

Paso 4. El registro se ordenó de mayor a menor y se le asignó un periodo de retorno y una probabilidad de no excedencia.

$$T = \frac{n_T + 1}{m} \quad (5.28)$$

$$P(X \leq x) = P = 1 - \frac{1}{T} \quad (5.29)$$

donde:

T periodo de retorno en años

$n_T$  tamaño del registro estaciones-año

M número de orden del registro, desde  $m=1, \dots, n_T$

P probabilidad de disponibilidad.

Paso 5. Al registro formado en el paso 3 se ajustaron las diferentes distribuciones de probabilidad; se seleccionó la que proporcionó el mínimo error estándar de ajuste y se obtuvieron los valores de los eventos para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000 años.

Paso 6. Para obtener los eventos  $\hat{Q}_T^j$  en un sitio  $j$ , se multiplico la relación regional obtenida en el paso anterior por el correspondiente valor de  $\bar{Q}^j$ .

### **c. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA**

Localizadas las estaciones climatológicas que se encuentran en la región costa de Chiapas, se eligieron las que tuvieran más de 20 años de registro y estuvieran dentro de alguna de las cuencas pertenecientes a las estaciones hidrométricas previamente seleccionadas.

Las estaciones climatológicas correspondientes a la misma cuenca hidrológica se agruparon y debido a que los eventos extremos de lluvia no ocurren de forma homogénea en toda la cuenca, los valores de precipitación simultánea diaria se calcularon como se explica a continuación.

- 1) Se realizó una depuración de datos para cada estación con el fin de identificar valores extraños que podrían causar errores en el análisis.
- 2) Del grupo de estaciones climatológicas pertenecientes a cada estación hidrométrica se obtuvo para cada día el promedio aritmético de la lluvia acumulada en 24 horas y se seleccionó en cada año el valor máximo de los promedios.
- 3) Se seleccionaron solo los datos de los años en los que se tiene información hidrométrica.
- 4) Mediante el programa AX se evaluó el mejor ajuste de una función de probabilidad para los datos y se seleccionó la que proporcionó el mínimo error estándar de ajuste.
- 5) se estimaron eventos para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000 años.

### **d. CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO PARA DIVERSOS PERIODOS DE RETORNO**

#### **i. MÉTODO DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO**

Los coeficientes de escurrimiento (C) derivados de los registros hidrométricos se calcularon por medio de la expresión siguiente.

$$C = \frac{V_{ED}}{V_{LL}} \quad (5.30)$$

donde  $V_{ED}$  es el volumen de escurrimiento y  $V_{LL}$  es el volumen total de lluvia.

Para la obtención de los coeficientes de escurrimiento para los diversos periodos de retorno, el volumen de escurrimiento  $V_{ED}$ , se puede inferir por medio de la expresión siguiente.

$$V_{ED} = Q_T t \quad (5.31)$$

donde  $Q_T$  es el gasto máximo medio diario para el periodo de retorno determinado y  $t$  la duración (en este caso 24h).

El volumen total de lluvia  $V_{LL}$  se calcula por medio de la expresión (5.32), donde  $A$  es el área de drenaje de cada cuenca en unidades consistentes y  $P_T$  es la precipitación máxima en 24 horas para el periodo de retorno determinado.

$$V_{LL} = P_T A \quad (5.32)$$

## ii. MÉTODO DE LOS NÚMEROS DE ESCURRIMIENTO

El cálculo del coeficiente de escurrimiento se realizó con la ecuación siguiente:

$$C = \frac{P_e}{P_T} \quad (5.33)$$

donde,  $P_T$  es la lluvia total en cm, para el periodo de retorno determinado,  $P_e$  es la precipitación de exceso en cm.

Para el cálculo de la precipitación efectiva o en exceso que se presentan en una tormenta se utilizó la ecuación del método de los números de escurrimiento (ecuación 5.8); donde CN es el parámetro denominado número de escurrimiento que depende del tipo y uso de suelo, los cuales fueron obtenidos por el personal del Instituto de Ingeniería de la UNAM para cada cuenca de la zona en estudio (tabla 5.4.).

**Tabla 5.4** Números de escurrimiento para las estaciones hidrométricas de la región hidrológica número 23

CLAVE	NOMBRE	No. DE ESCURRIMIENTO
23002	SUCHIATE I	S/N
23003	CAHUACAN	75
23004	MIXCUM	S/N
23006	MAL PASO	71
23007	SUCHIATE II	65
23008	HUIXTLA	75
23009	PIJIJIAPAN	70
23011	TONALA	68
23012	NOVILLERO	79
23013	JESUS	75
23014	SAN DIEGO	73
23015	CACALUTA	82
23016	CINTALAPA	77
23017	COAPA	76
23018	MARGARITAS	75
23019	DESPOBLADO	83
23020	HUEHUETAN	83
23021	TABLAZON	S/N
23022	SAN NICOLAS	78
23023	TALISMAN II	60
23027	OCUILAPA	S/N
23030	URBINA	S/N
23031	COMPOAPA	S/N
23032	VADO ANCHO	S/N

Fuente: Instituto de Ingeniería de la UNAM (2013)

## 6. APLICACIÓN EN LA REGIÓN HIDROLÓGICA No. 23 COSTA DE CHIAPAS

### a. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA

#### i. ANÁLISIS PUNTUAL

Las estaciones seleccionadas a partir de la metodología explicada en el capítulo anterior se presentan en la tabla 6.1 con sus principales características fisiográficas y en la figura 6.1 se puede observar su ubicación.

**Tabla 6.1** Principales características fisiográficas de las cuencas hidrológicas en la zona costa de Chiapas

Características	ESTACIÓN							
	23006	23007	23008	23009	23011	23012	23013	23014
Nombre	MALPASO	SUCHIATE II	HUIXTLA	PIJIJAPAN	TONALA	NOVILLERO	JESUS	SAN DIEGO
Área drenada [km <sup>2</sup> ]	426	1139	377	186	157	302	51	124
Tiempo de concentración [hrs]	5	7	4	2	2	3	1	2
Longitud del cauce principal [km]	62	84	51	26	22	35	12	23
Pendiente media del cauce principal (m/m)	0.053	0.043	0.053	0.072	0.078	0.066	0.163	0.076

Características	ESTACIÓN							
	23015	23016	23017	23018	23019	23022	23023	
Nombre	CACALUTA	CINTALAPA	COAPA	MARGARITAS	DESPOBLADO	SAN NICOLAS	TALISMAN II	
Área drenada [km <sup>2</sup> ]	176	236	113	81	273	144	330	
Tiempo de concentración [hrs]	3	3	2	2	4	3	4	
Longitud del cauce principal [km]	33	39	26	20	48	36	54	
Pendiente media del cauce principal (m/m)	0.070	0.059	0.094	0.092	0.053	0.075	0.063	



**Figura 6.1** Ubicación de las estaciones hidrométricas seleccionadas

La función de distribución de probabilidad que mejor se ajustó a la mayoría de los datos de las estaciones hidrométricas fue la Doble Gumbel; en las figuras 6.2-6.4 se presentan las gráficas de dicho ajuste con sus respectivos parámetros.

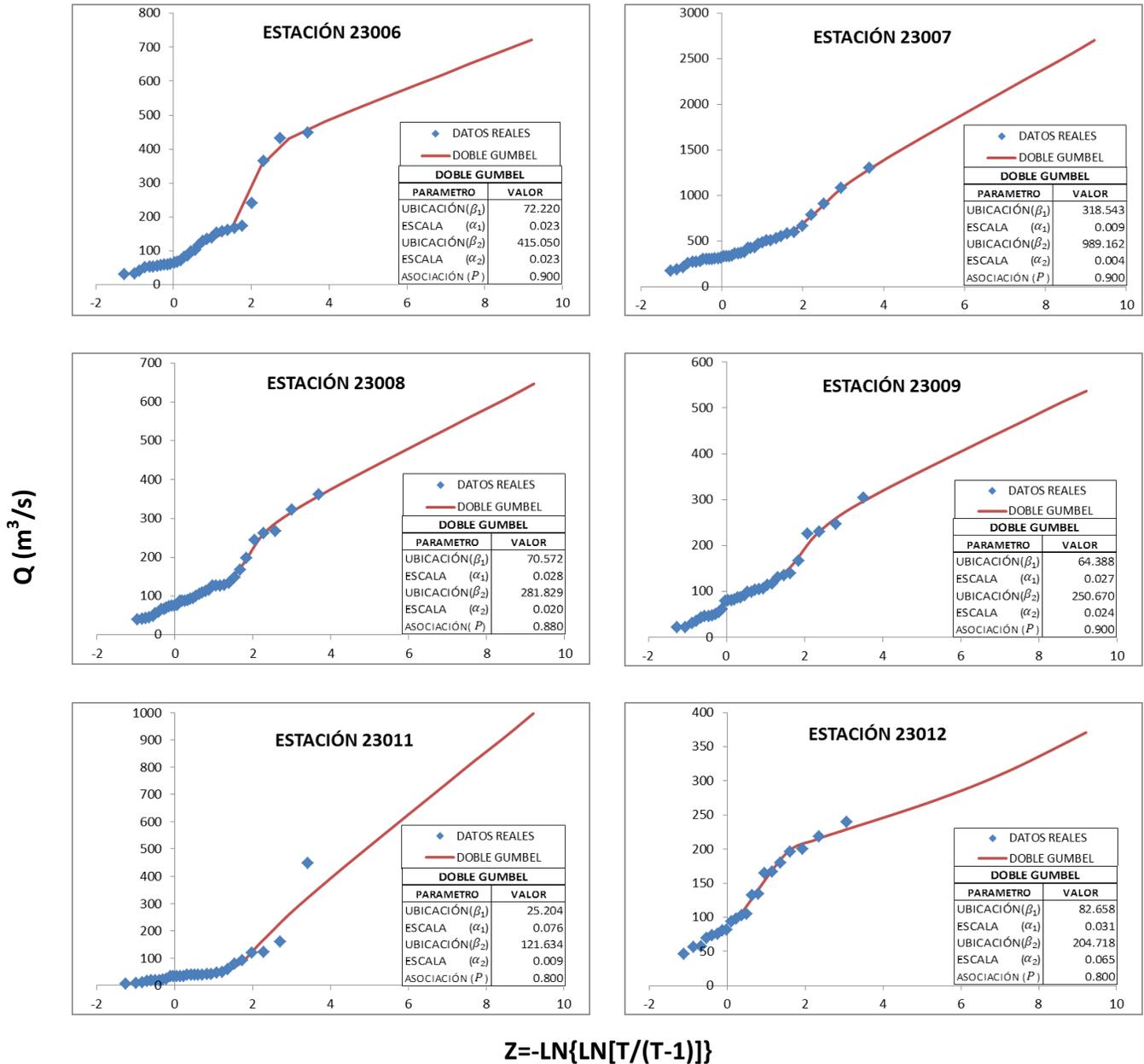
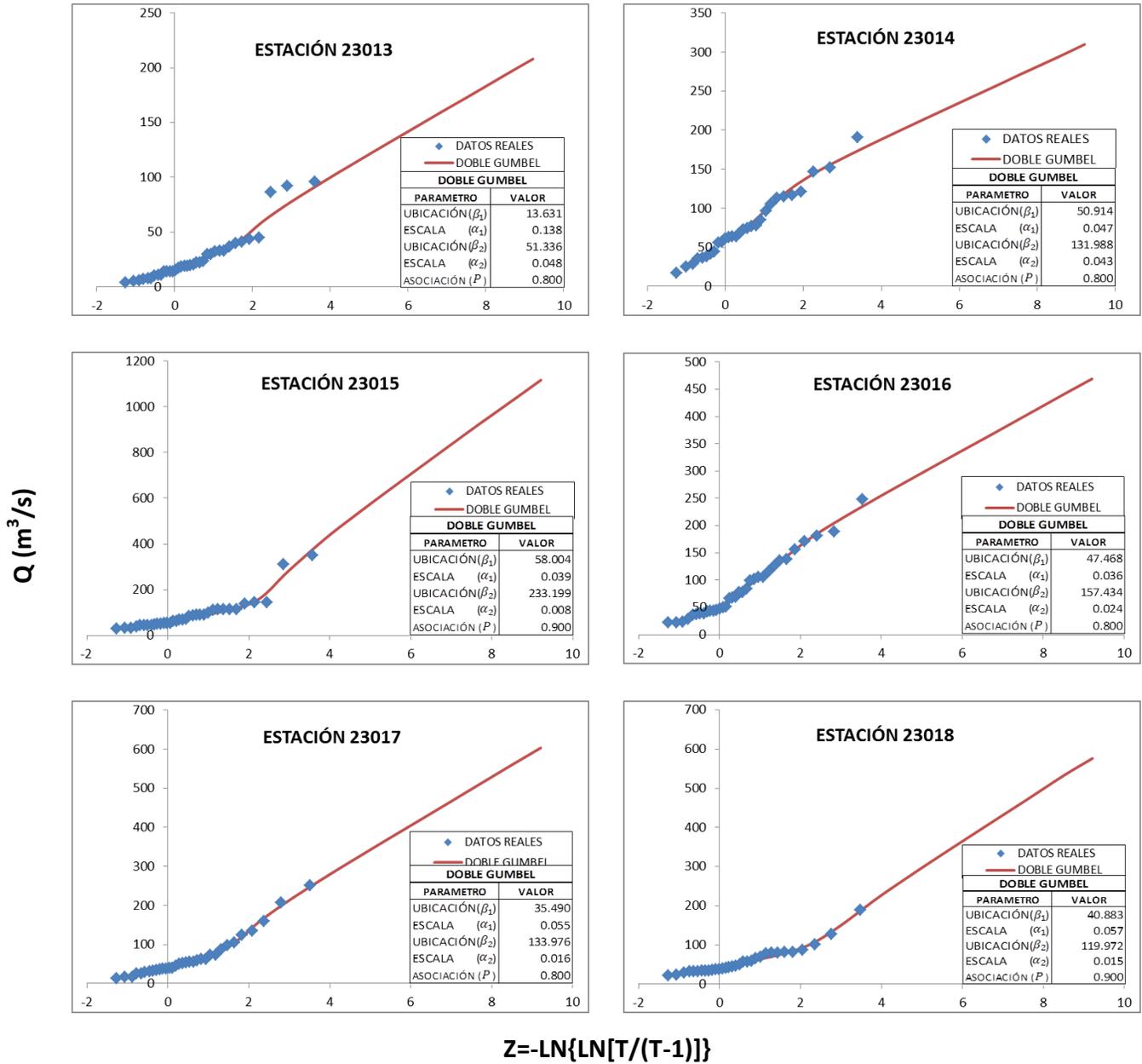
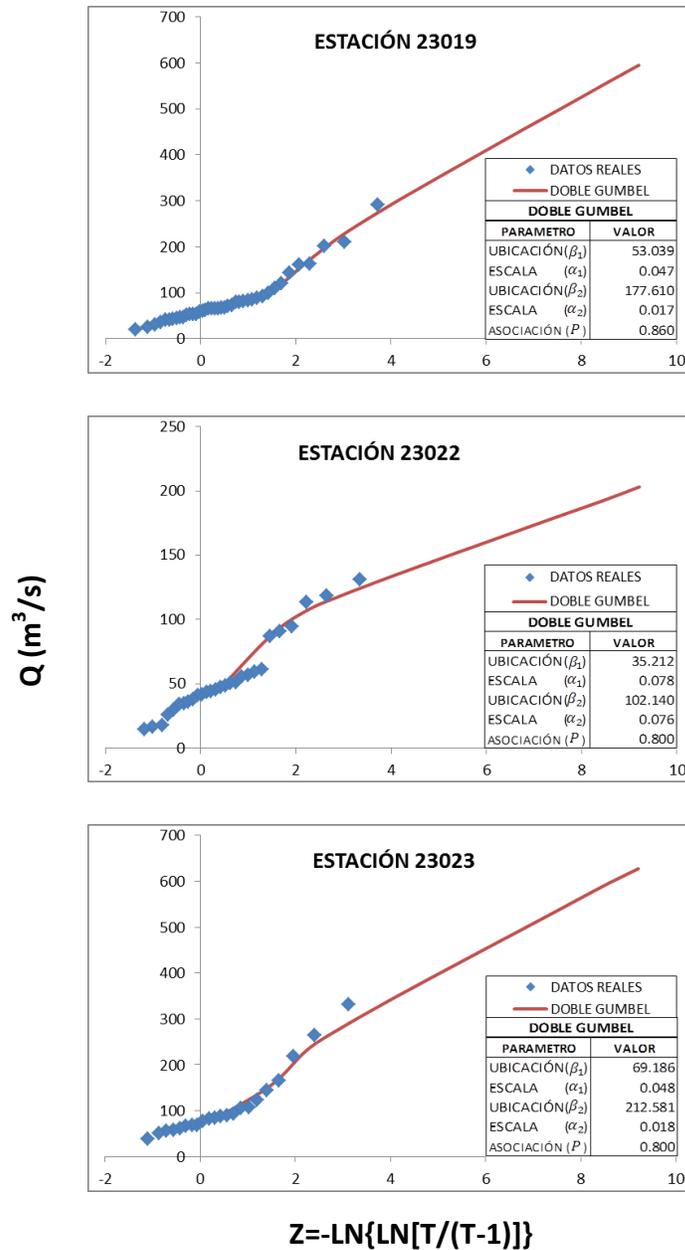


Figura 6.2 Funciones de distribución de probabilidad aplicadas a cada una de las estaciones hidrométricas

**ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO PARA LA REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 23 COSTA DE CHIAPAS USANDO MÉTODOS ESTADÍSTICOS**



**Figura 6.3** Funciones de distribución de probabilidad aplicadas a cada una de las estaciones hidrométricas



**Figura 6.4** Funciones de distribución de probabilidad aplicadas a cada una de las estaciones hidrométricas

En las figuras 6.2 y 6.3, se observa que en las gráficas de las estaciones 23011 y 23015 el cambio de pendiente de la segunda población es más drástico; en la primera estación el gasto mayor se presentó el día 22 de septiembre de 1963, el cual coincide con la fecha de la precipitación máxima para ese año y es el segundo dato de mayor rango en los datos climatológicos. En la estación 23015 los gastos más altos se presentaron en los años 1988 y 2005 que fueron provocados por los Huracanes Kristy (29 de agosto al 06 de septiembre) y Stan (04-05 de octubre), en el primer año se presentó el día 3 de septiembre mientras

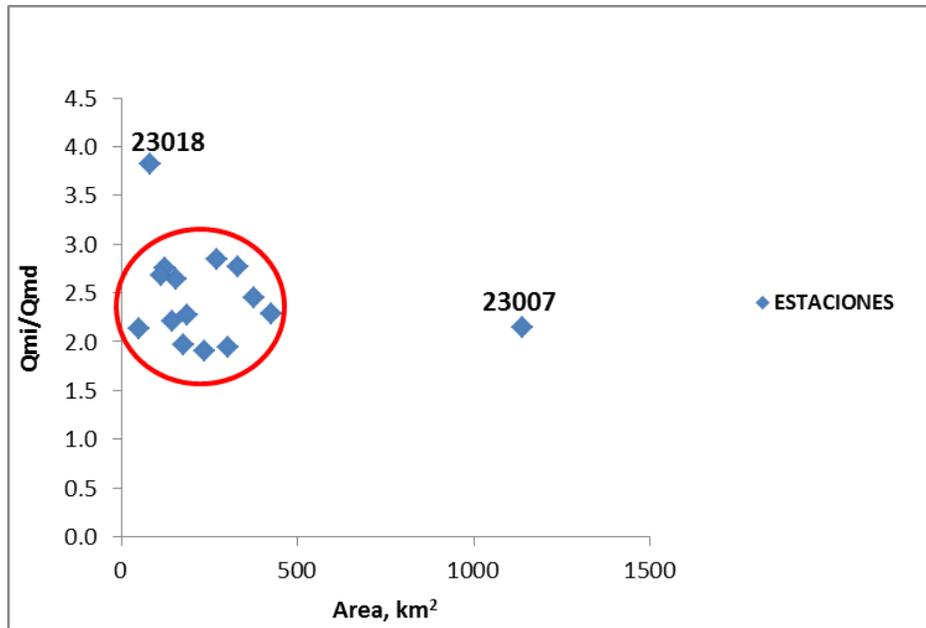
que la lluvia máxima se presentó el día 31 de agosto; con respecto al segundo año, el gasto más alto se presentó el día 05 de octubre mientras que el 04 de octubre se presentó la lluvia máxima; para ninguna de las estaciones sería correcto asegurar que la lluvia y los escurrimientos aforados no son representativos del mismo día, debido a que son cuencas pequeñas menores a 200 km<sup>2</sup>, que tienen pendientes pronunciadas y tiempos de concentración menores a 10 horas.

## ii. ANÁLISIS REGIONAL

Como se explicó en el capítulo 5 se obtuvieron las regiones homogéneas con tres métodos; con respecto al primero, se formó un solo grupo y las estaciones que quedaron fuera son la 23007 y 23008 como se observa en la figura 6.5; en la tabla 6.2 se muestran los resultados de la relación de gasto máximo instantáneo y gasto medio diario para cada estación.

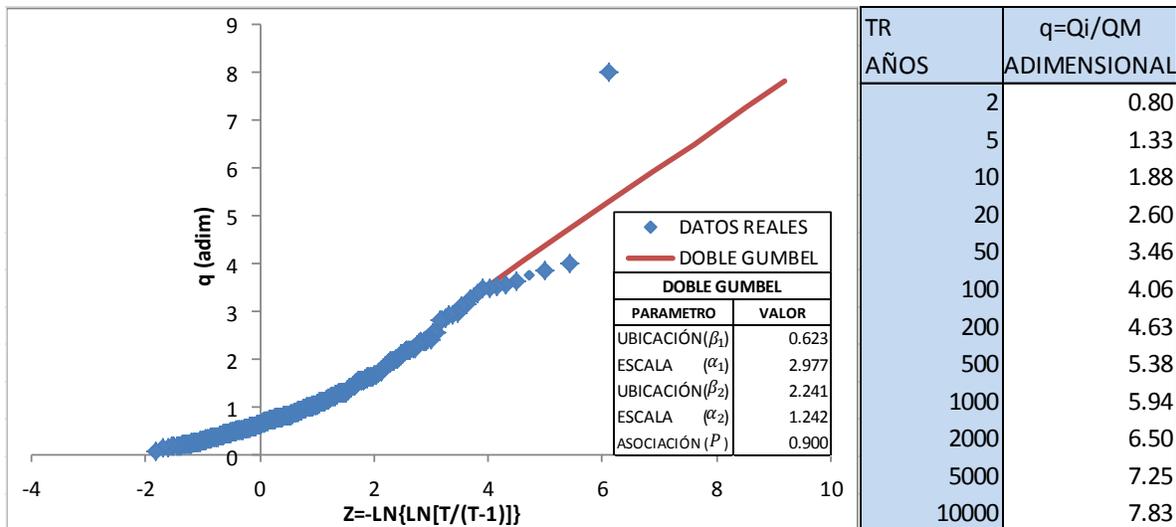
**Tabla 6.2** Resultado del análisis de la delimitación de regiones homogéneas (método gráfico)

ESTACIÓN	NOMBRE	ÁREA, km <sup>2</sup>	Qmi (m3/s)	Qmd (m3/s)	Qmi/Qmd	GRUPO
23006	MAL PASO	426	294.522	128.745	2.288	1
23007	SUCHIATE II	1139	949.718	443.270	2.143	S/G
23008	HUIXTLA	377	280.118	114.342	2.450	1
23009	PIJIJIAPAN	186	234.337	103.302	2.268	1
23011	TONALA	157	147.236	55.905	2.634	1
23012	NOVILLERO	302	247.762	127.361	1.945	1
23013	JESUS	51	56.551	26.452	2.138	1
23014	SAN DIEGO	124	204.456	74.210	2.755	1
23015	CACALUTA	176	172.164	87.273	1.973	1
23016	CINTALAPA	236	161.848	84.954	1.905	1
23017	COAPA	113	178.606	66.611	2.681	1
23018	MARGARITAS	81	223.073	58.293	3.827	S/G
23019	DESPOBLADO	273	235.881	82.954	2.844	1
23022	SAN NICOLAS	144	120.483	54.585	2.207	1
23023	TALISMAN II	330	306.571	110.902	2.764	1



**Figura 6.5** Resultado de la delimitación de regiones homogéneas método gráfico

De la aplicación del método de regionalización de estaciones-año se obtuvieron los estimadores regionales para los periodos de retorno requeridos los cuales se muestran en la figura 6.6.



TR AÑOS	q=Qi/QM ADIMENSIONAL
2	0.80
5	1.33
10	1.88
20	2.60
50	3.46
100	4.06
200	4.63
500	5.38
1000	5.94
2000	6.50
5000	7.25
10000	7.83

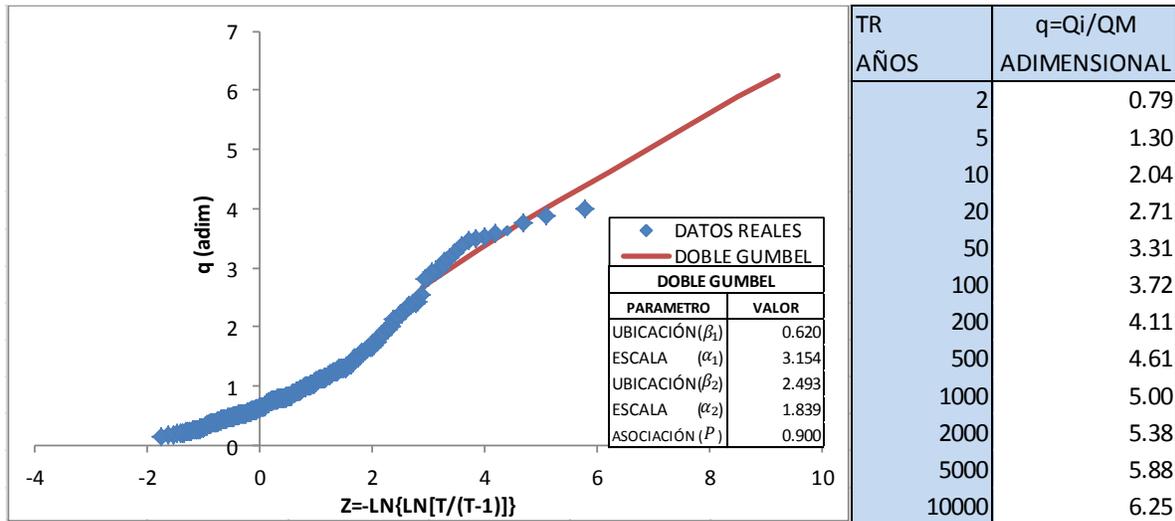
**Figura 6.6** Función de distribución de la probabilidad aplicada al registro obtenido del método de regionalización estaciones-año

Con respecto al segundo método de delimitación de regiones homogéneas se obtuvieron 2 grupos, quedando fuera de ambos la estación 23011; el primer grupo está conformado por las estaciones 23006, 23008, 23009, 23013, 23015, 23016, 23017, 23019 y 23023; el segundo grupo cuenta con las estaciones 23007, 23012, 23014, 23018 y 23022 (Tabla 6.3).

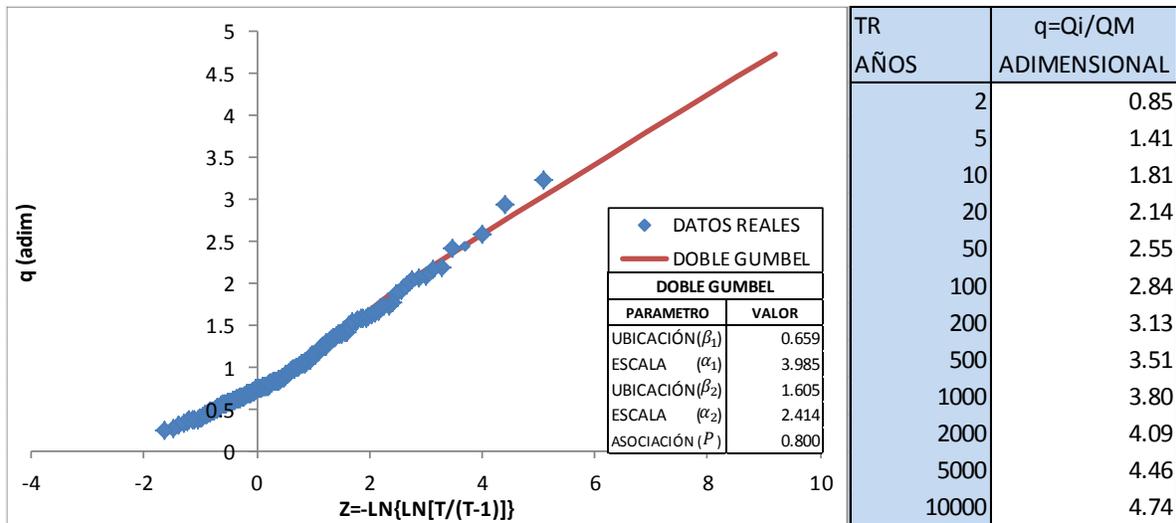
**Tabla 6.3** Resultado de la delimitación de regiones homogéneas (método coeficientes de variación)

ESTACIONES	23006	23007	23008	23009	23011	23012	23013	23014	23015	23016	23017	23018	23019	23022	23023
cv	0.81	0.54	0.69	0.74	1.41	0.47	0.85	0.55	0.75	0.66	0.81	0.59	0.66	0.56	0.66
23006	1.00														
23007	2.22	1.00													
23008	1.35	1.64	1.00												
23009	1.18	1.88	1.15	1.00											
23011	3.06	6.79	4.14	3.60	1.00										
23012	2.90	1.31	2.14	2.46	8.87	1.00									
23013	1.12	2.49	1.52	1.32	2.73	3.25	1.00								
23014	2.13	1.04	1.58	1.81	6.53	1.36	2.39	1.00							
23015	1.16	1.91	1.17	1.02	3.55	2.50	1.30	1.84	1.00						
23016	1.48	1.50	1.10	1.26	4.54	1.95	1.66	1.44	1.28	1.00					
23017	1.00	2.22	1.35	1.18	3.06	2.90	1.12	2.13	1.16	1.48	1.00				
23018	1.87	1.19	1.09	1.58	5.71	1.55	2.09	1.14	1.61	1.26	1.87	1.00			
23019	1.48	1.50	1.09	1.26	4.53	1.96	1.66	1.44	1.28	1.00	1.48	1.26	1.00		
23022	2.04	1.09	1.51	1.73	6.23	1.42	2.28	1.05	1.76	1.37	2.04	1.09	1.38	1.00	
23023	1.47	1.51	1.08	1.25	4.49	1.97	1.65	1.45	1.27	1.01	1.47	1.27	1.01	1.39	1.00
GRUPO	1	2	1	1	S/G	2	1	2	1	1	1	2	1	2	1

De la aplicación del método de regionalización de estaciones-año a los grupos antes mencionados se obtuvieron los estimadores regionales para los periodos de retorno requeridos los cuales se muestran en las figuras 6.7 y 6.8.

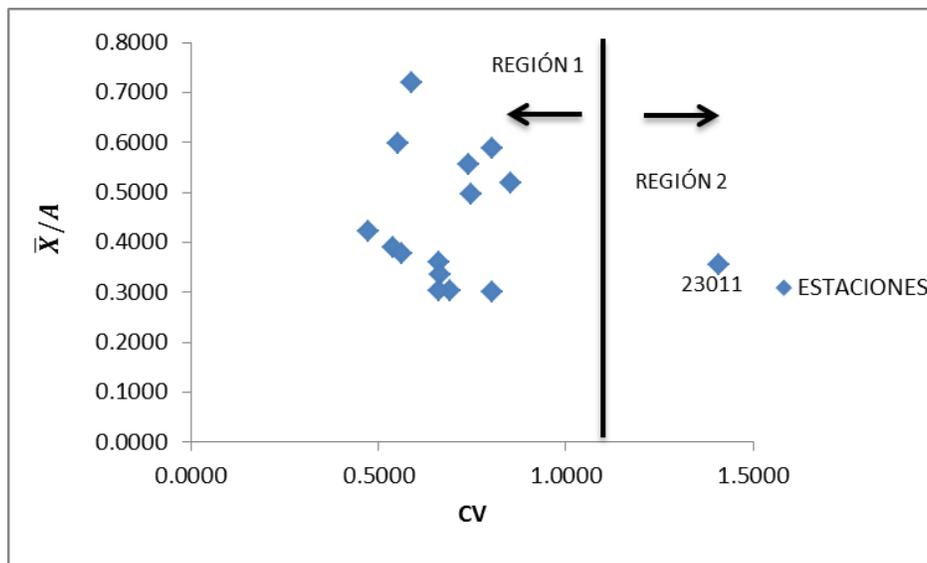


**Figura 6.7** Función de distribución de la probabilidad aplicada al registro obtenido del método de regionalización estaciones-año para el grupo 1

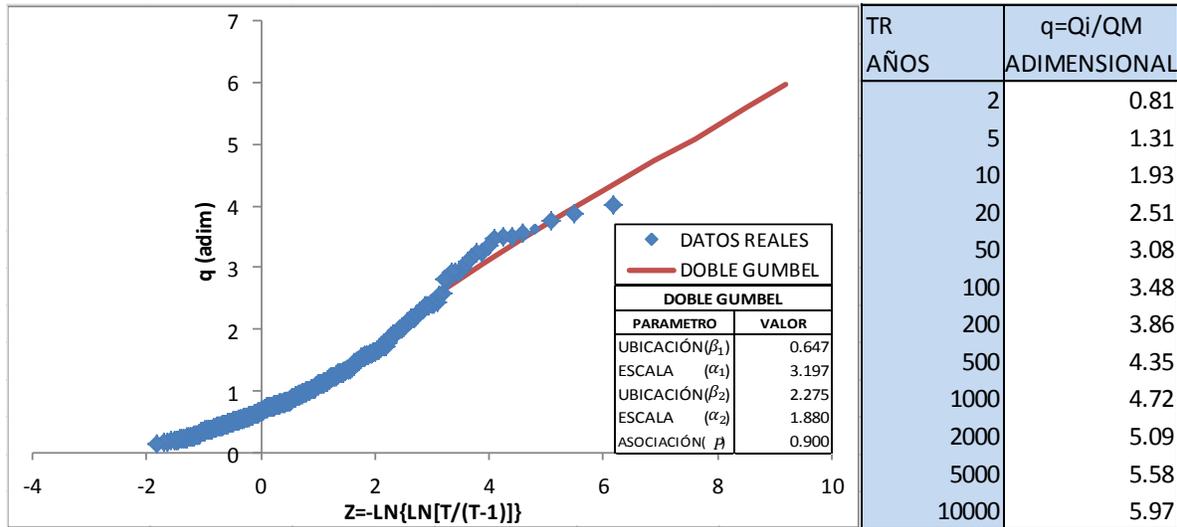


**Figura 6.8** Función de distribución de la probabilidad aplicada al registro obtenido del método de regionalización estaciones-año para el grupo 2

De la delimitación de regiones homogéneas con el método 3 se obtuvo un solo grupo, quedando fuera la estación 23011 (figura 6.9) y los estimadores regionales para los diferentes periodos de retorno se muestran en las figura 6.10.



**Figura 6.9** Resultado de la delimitación de regiones homogéneas método gráfico de coeficientes de variación



**Figura 6.10** Función de distribución de la probabilidad aplicada al registro obtenido del método de regionalización estaciones-año

Con la relación regional obtenida para los tres métodos de determinación de regiones homogéneas, se multiplica con los valores de la media correspondiente de cada estación, obteniendo los valores de gastos para distintos periodos de retorno (figuras 6.11-6.13.).

ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO PARA LA REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 23 COSTA DE CHIAPAS USANDO MÉTODOS ESTADÍSTICOS

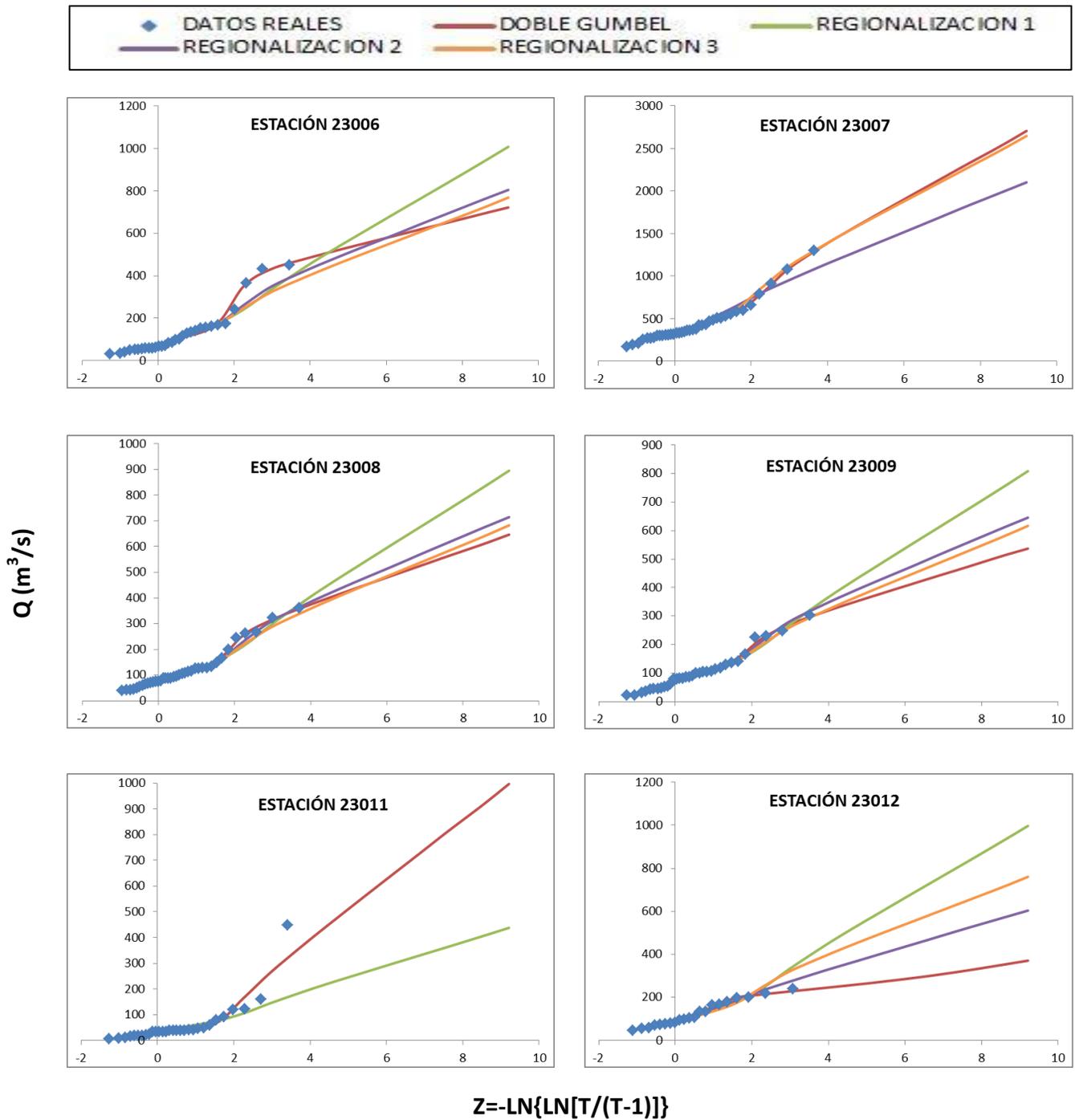
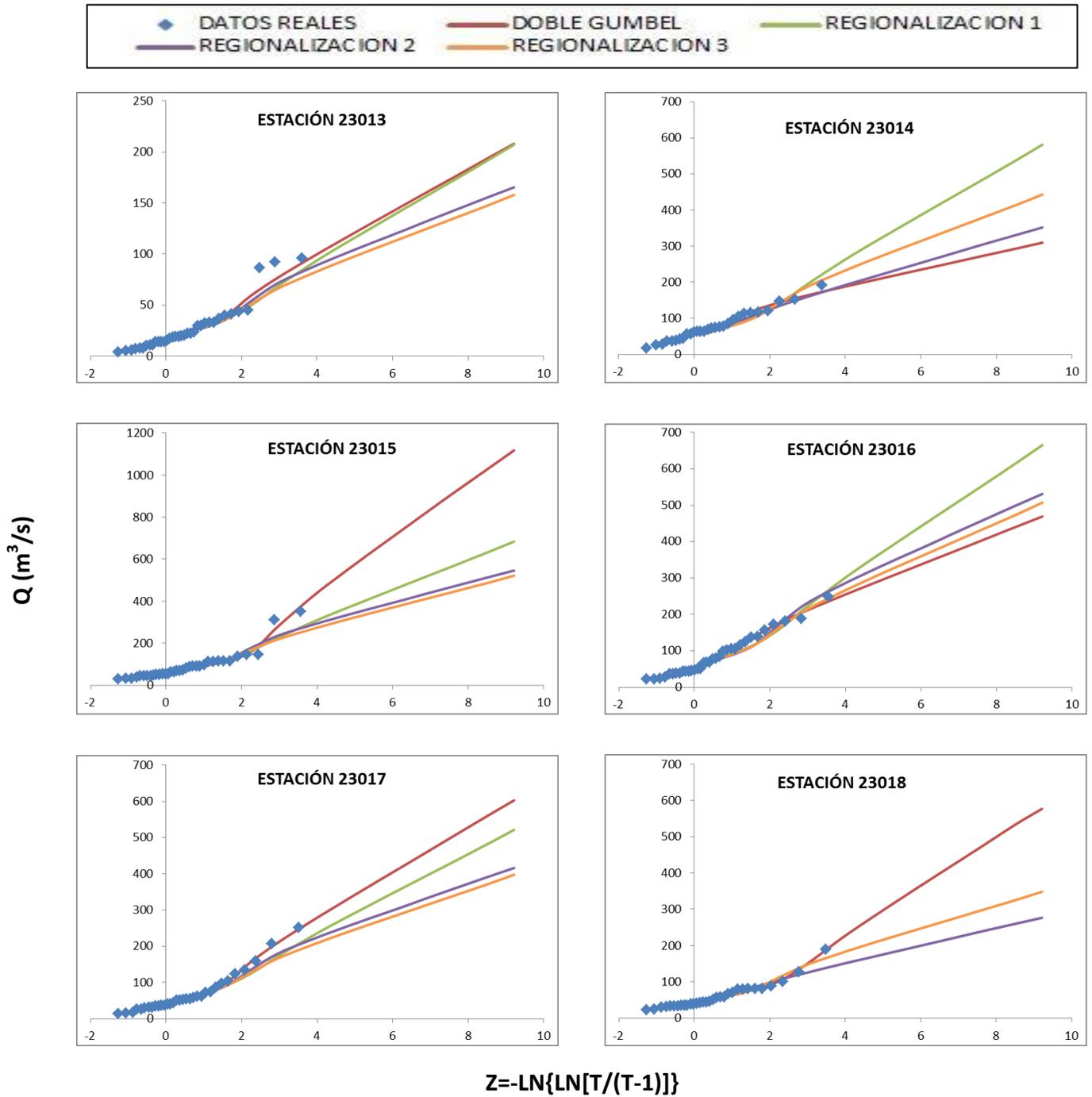
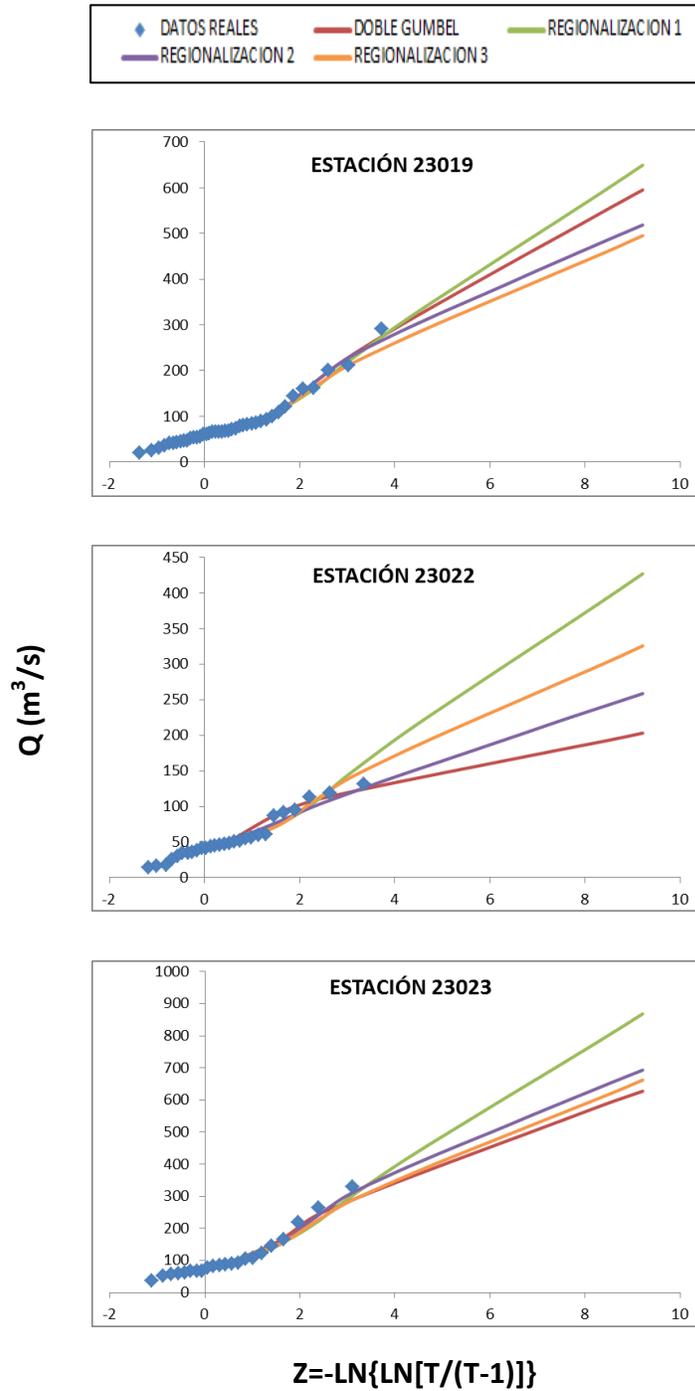


Figura 6.11 Resultado del ajuste de funciones de distribución de probabilidad de manera puntual y regional a los datos hidrométricos



**Figura 6.12** Resultado del ajuste de funciones de distribución de probabilidad de manera puntual y regional a los datos hidrométricos



**Figura 6.13** Resultado del ajuste de funciones de distribución de probabilidad de manera puntual y regional a los datos hidrométricos

Se observa en las figuras anteriores que el análisis puntual se ajusta mejor a los datos medidos, mientras que la regionalización modula los cambios drásticos de pendiente ocasionados por los eventos de mayor magnitud como son los huracanes y tormentas tropicales; otro punto importante a señalar es que la

regionalización en donde los grupos homogéneos se delimitaron con el método 1, los valores de los gastos para periodos de retorno altos resultaron mayores a los obtenidos con los otros métodos, esto se debe a que incluye la estación 23011 en donde la relación de la media con el valor del año 1963 tiene un valor alto .

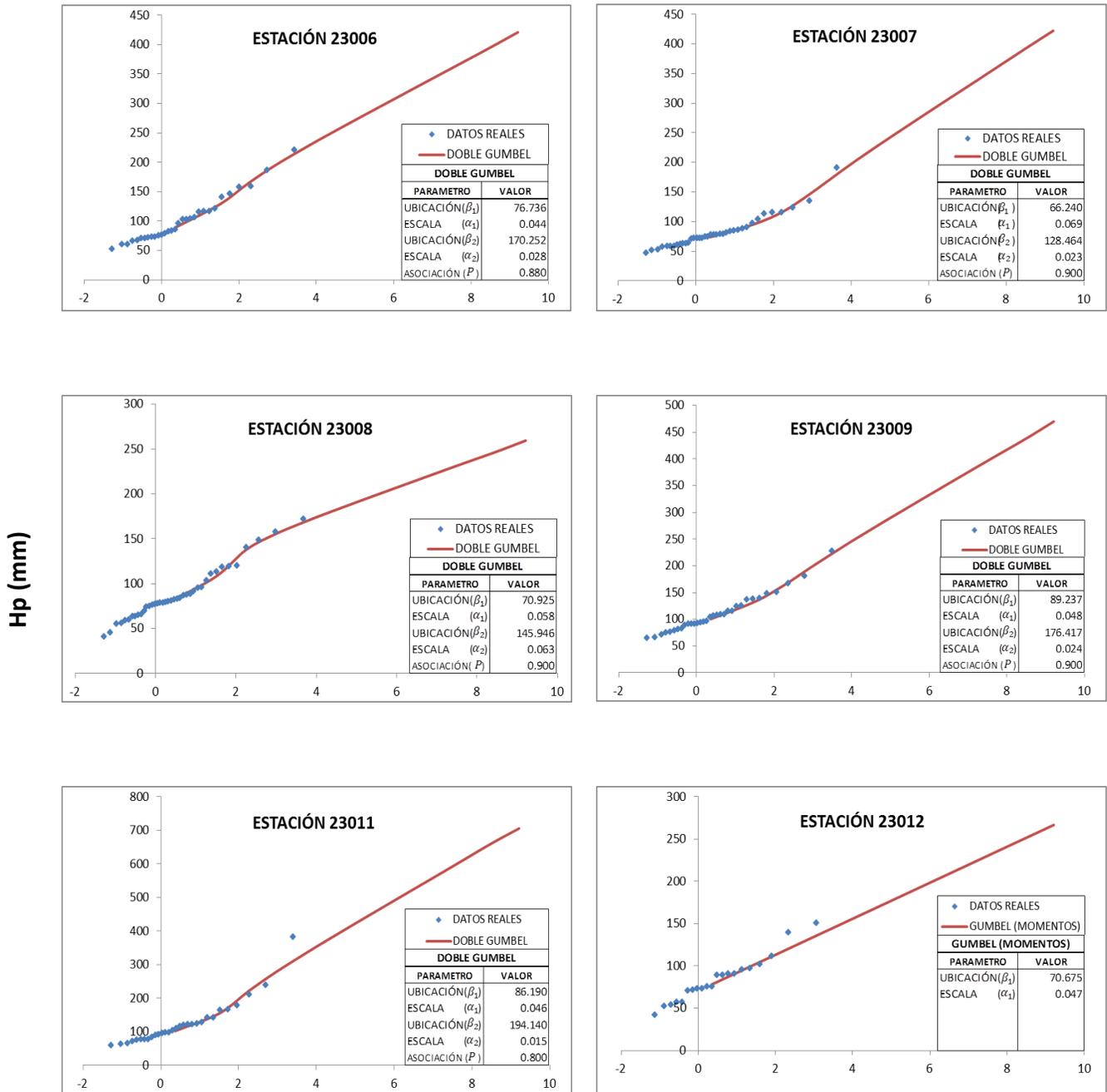
## b. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA

En la tabla 6.4 se presentan las estaciones climatológicas que se utilizaron en el estudio y en las figuras 6.14-6.16 se presenta el ajuste de las funciones de distribución de probabilidad a los grupos de datos climatológicos obtenidos, en las cuales la función doble Gumbel resulto la de menor error estándar de ajuste en la mayoría de los casos.

**Tabla 6.4. Relación de estaciones climatológicas e hidrométricas**

ESTACIONES HIDROMÉTRICAS														
23006	23007	23008	23009	23011	23012	23013	23014	23015	23016	23017	23018	23019	23022	23023
ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS														
7057	7018	7014	7084	7073	7208	7074	7084	7053	7053	7115	7115	7038	7113	7018
7191	7068	7061	7115	7074	7334	7084		7390	7185	7129	7037	7393		7079
7200	7116	7077		7168	7347	7228			7348			7395		7146
	7117	7394		7201										7157
	7146	7395												7166
	7157	7396												7172
	7163													
	7172													

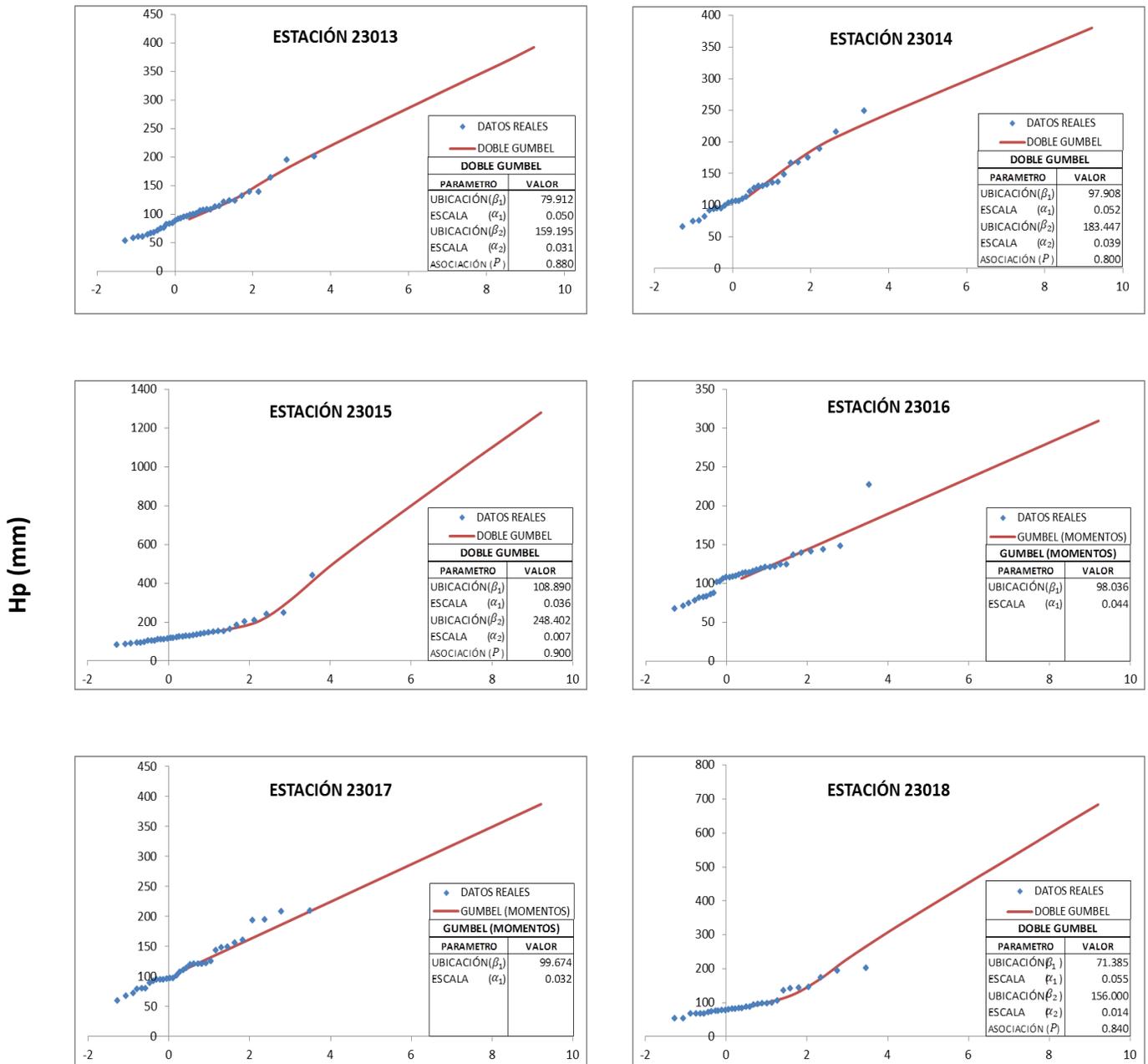
**ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO PARA LA REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 23 COSTA DE CHIAPAS USANDO MÉTODOS ESTADÍSTICOS**



$$Z = -\text{LN}\{\text{LN}[T/(T-1)]\}$$

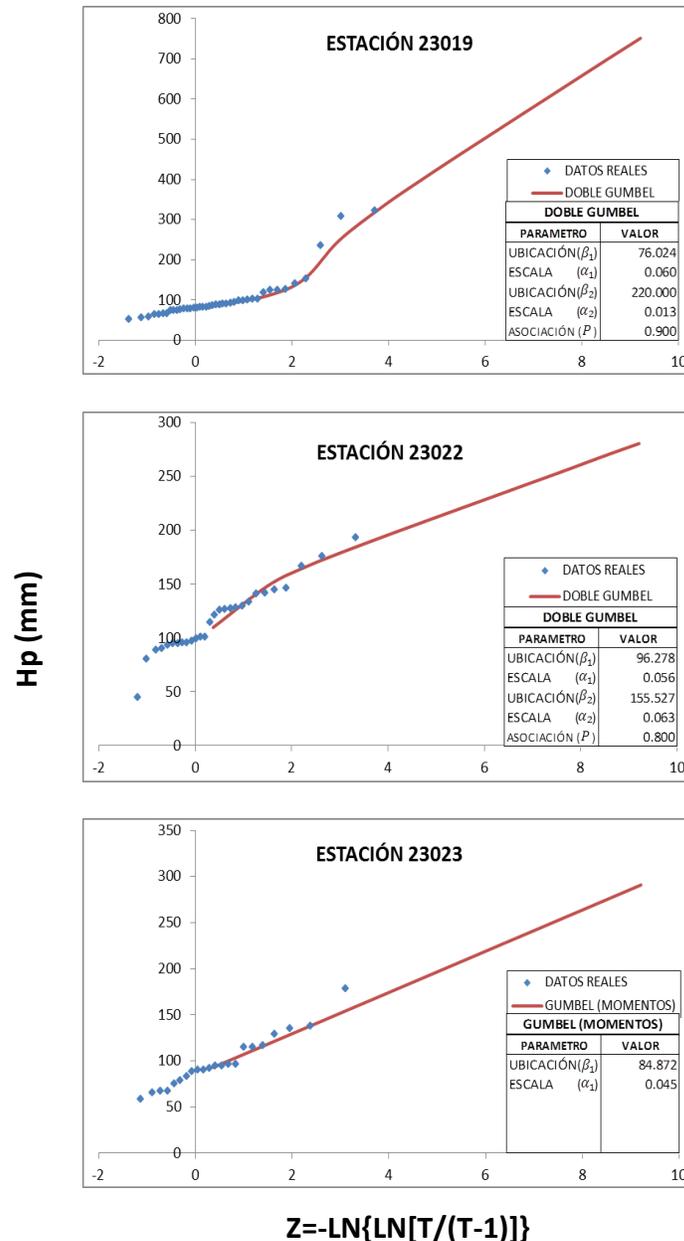
**Figura 6.14** Funciones de distribución de probabilidad aplicadas al grupo de datos climatológicos correspondientes a la cuenca de cada estación hidrométrica

**ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO PARA LA REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 23 COSTA DE CHIAPAS USANDO MÉTODOS ESTADÍSTICOS**



$$Z = -\text{LN}\{\text{LN}[T/(T-1)]\}$$

**Figura 6.15** Funciones de distribución de probabilidad aplicadas al grupo de datos climatológicos correspondientes a la cuenca de cada estación hidrométrica



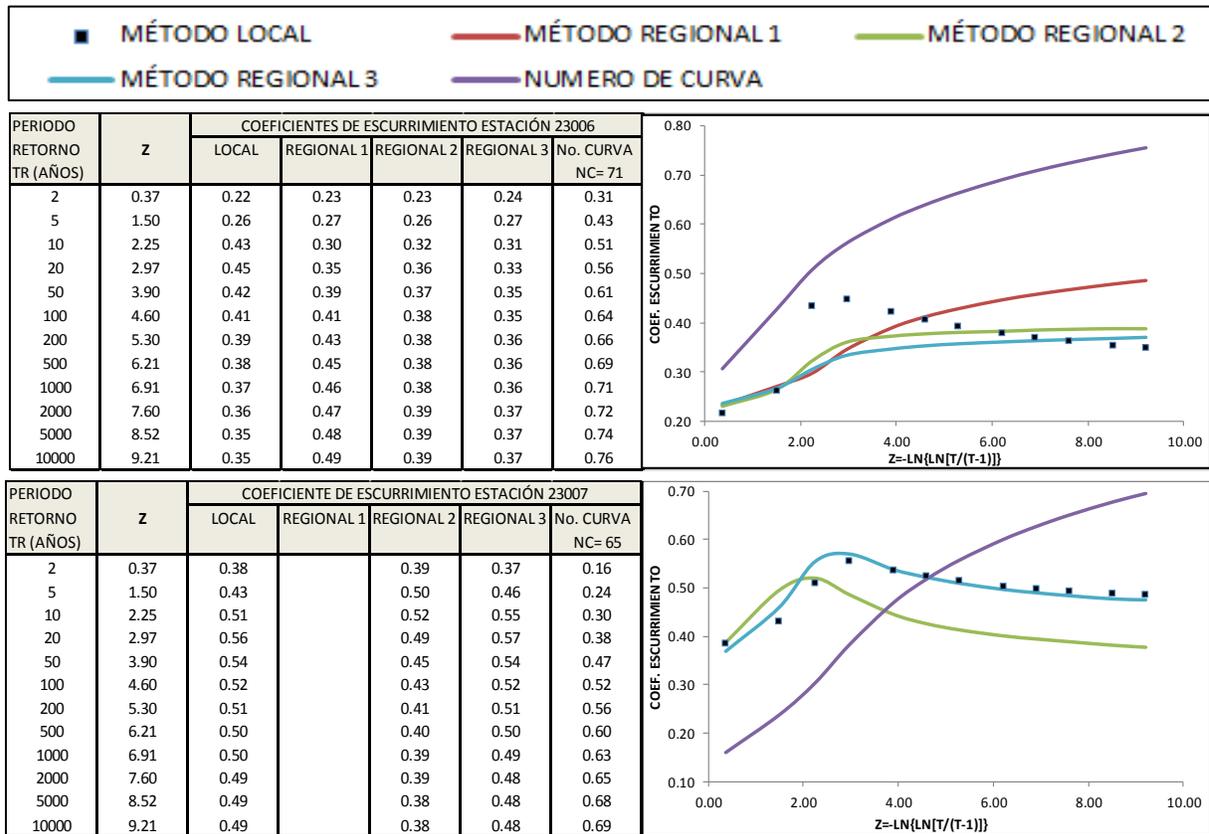
**Figura 6.16** Funciones de distribución de probabilidad aplicadas al grupo de datos climatológicos correspondientes a la cuenca de cada estación hidrométrica

En las figuras 6.15 y 6.16, en las estaciones 23015, 23018 y 23019 es evidente el cambio drástico de pendiente en la segunda población; en la estación 23015 el valor de precipitación más alto se produjo el 01 de septiembre de 1971 mientras que el gasto más alto en este año se originó el 12 del mismo mes, con un valor de  $89.38 \text{ m}^3/\text{s}$ ; en cuanto a la estación 23018 los valores más altos de precipitación se presentaron en los años de 1978 y 1979, con respecto al primer año, fue el 19 de septiembre, sin embargo el gasto máximo se presentó el 20 del mismo mes con un valor de  $46.14 \text{ m}^3/\text{s}$ ; para el año 1979 fue el día 25 de agosto en que se

presentó el valor más grande tanto la precipitación como de gasto, teniendo este último un valor de 127.26 m<sup>3</sup>/s. con respecto a la estación 23019 los tres valores de precipitación más altos se presentaron en los mismos años en los que se presentaron los tres valores más altos de escurrimiento, no obstante, las lluvias máximas se presentaron un día antes según los registros.

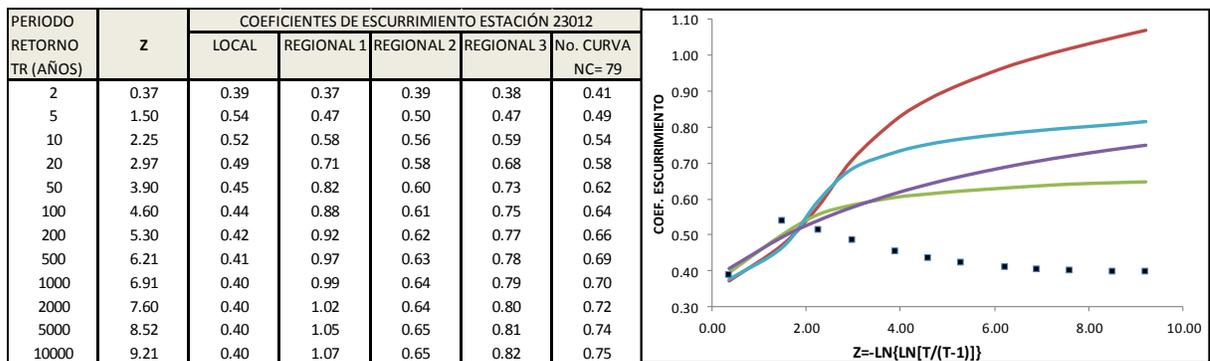
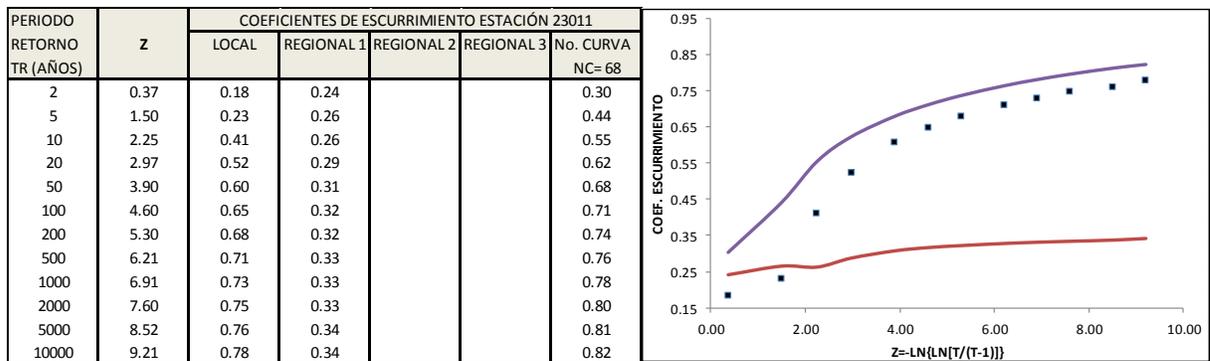
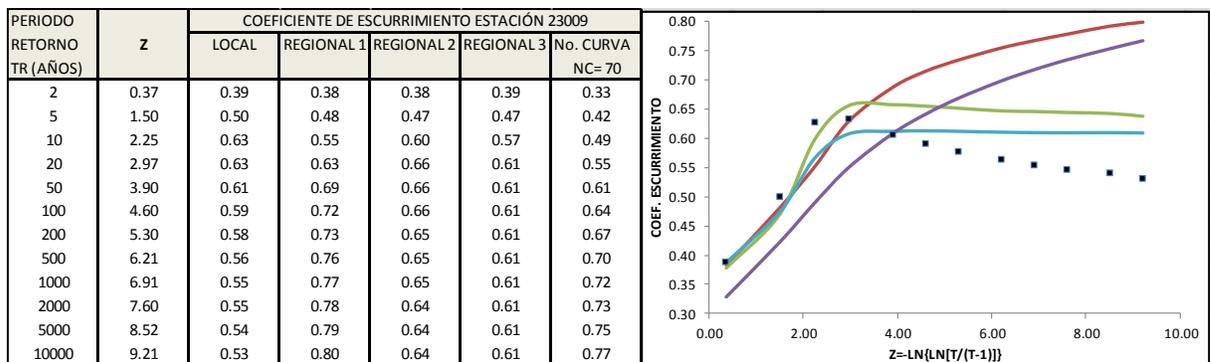
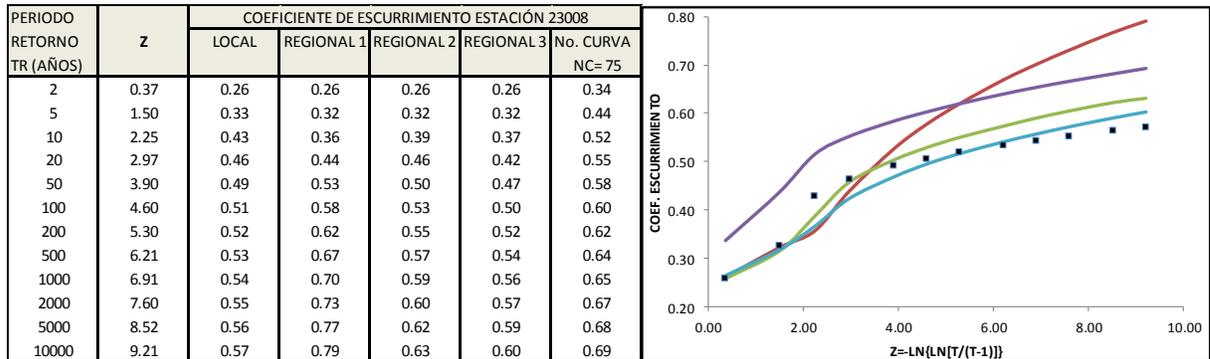
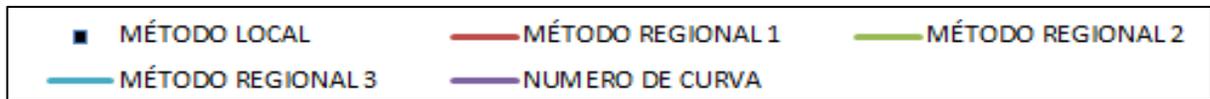
### c. CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO PARA DIVERSOS PERIODOS DE RETORNO

Los coeficientes de escurrimiento se obtuvieron de acuerdo al capítulo 5 y los resultados se presentan en las figuras 6.17-6.21.



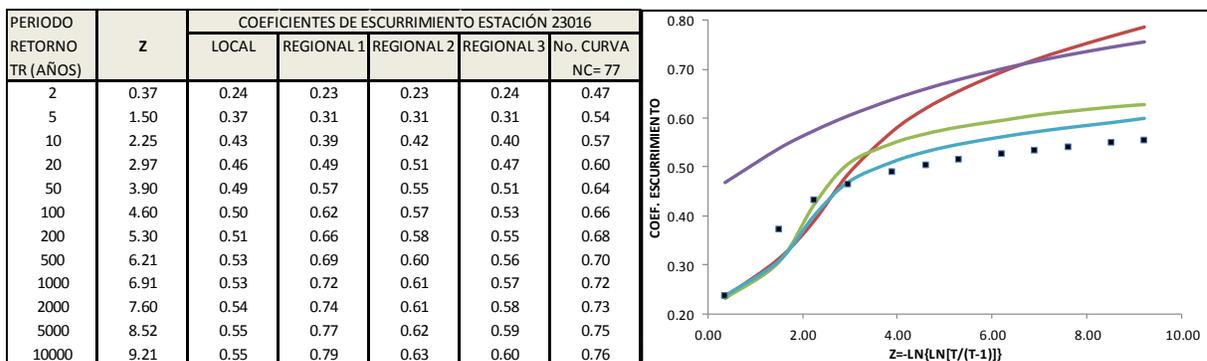
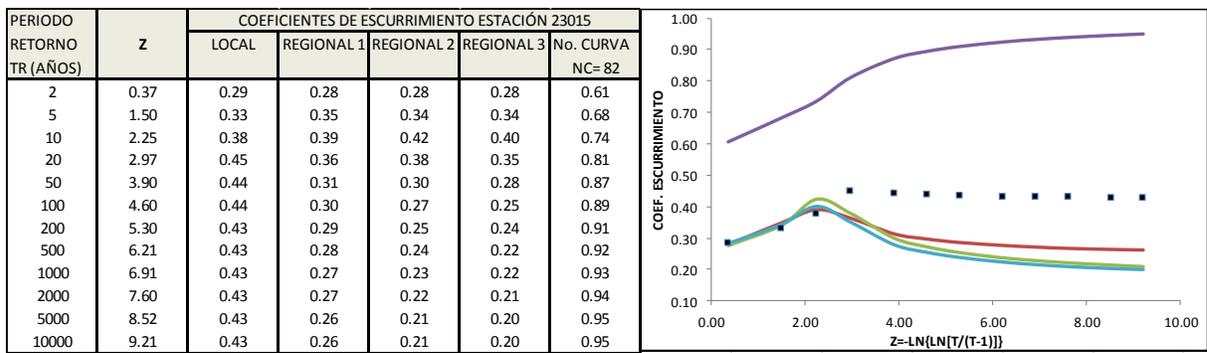
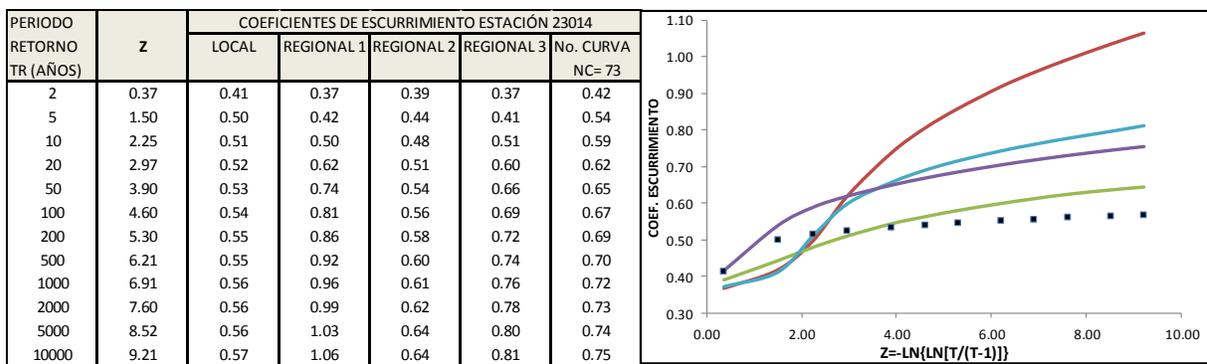
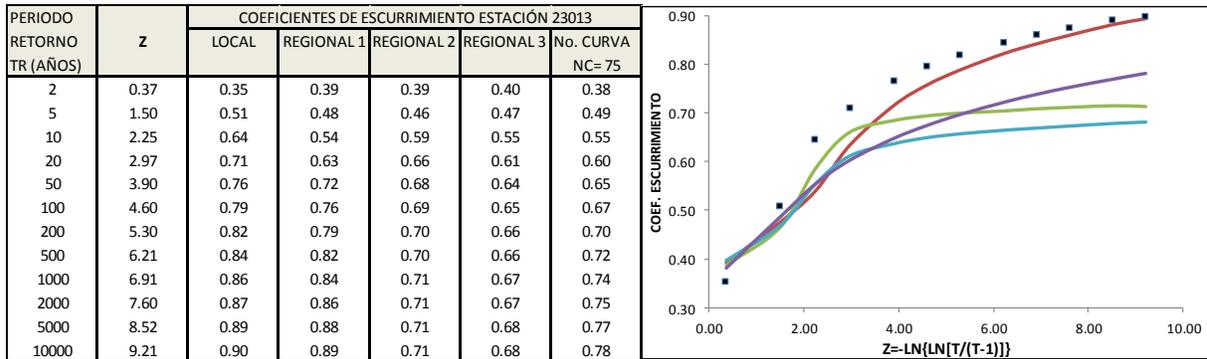
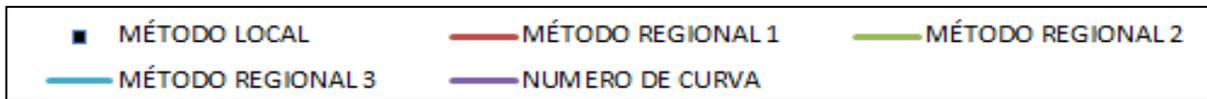
**Figura 6.17** Coeficientes de escurrimiento obtenidos para los distintos ajustes de distribución de probabilidad de los datos hidrométricos

**ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO PARA LA REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 23 COSTA DE CHIAPAS USANDO MÉTODOS ESTADÍSTICOS**



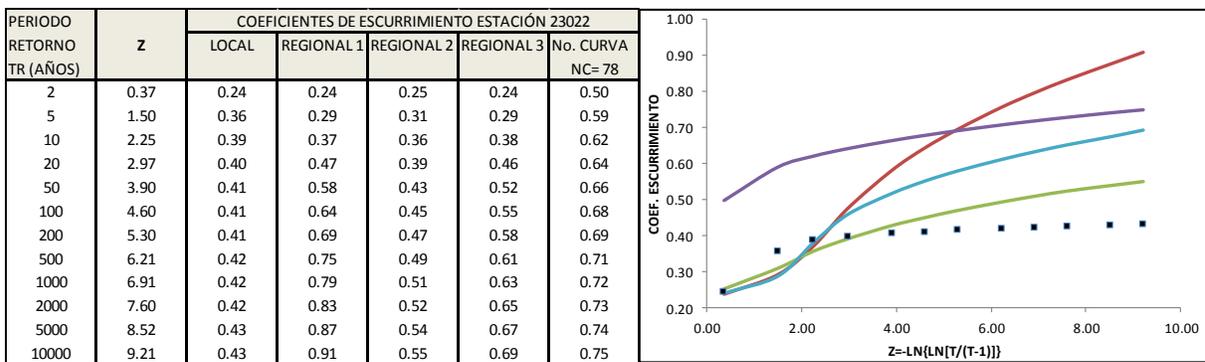
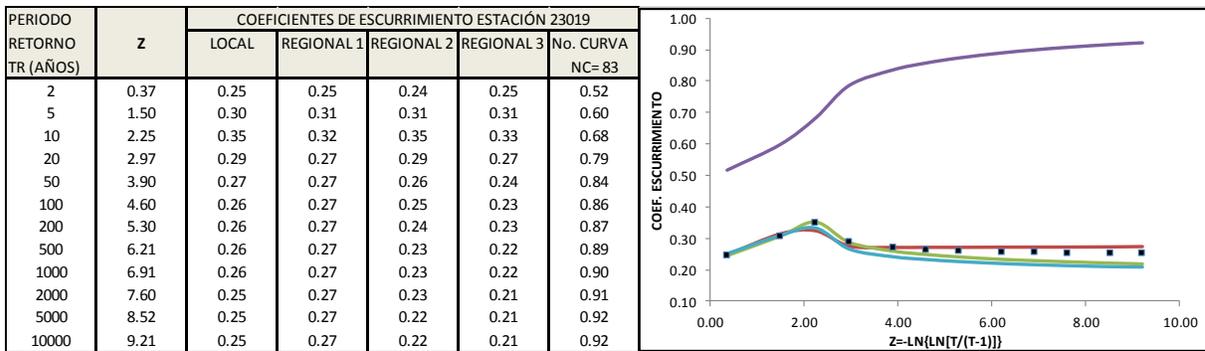
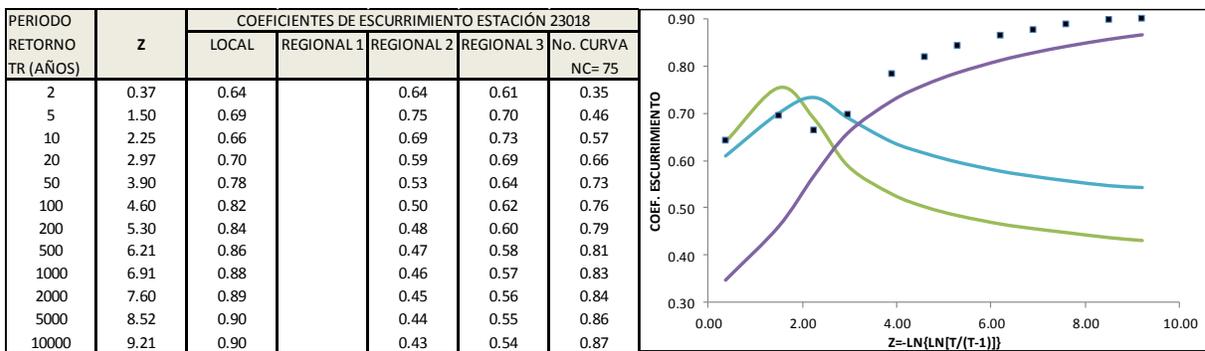
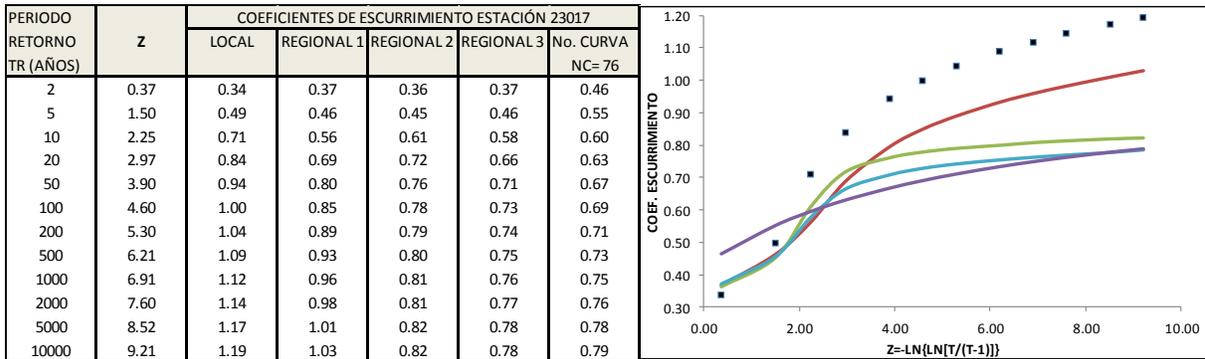
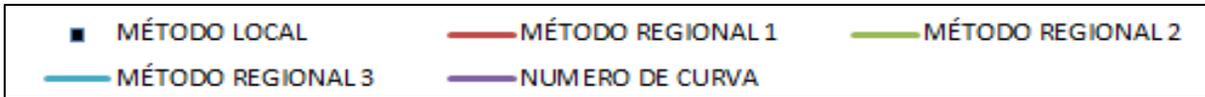
**Figura 6.18** Coeficientes de escurrimiento obtenidos para los distintos ajustes de distribución de probabilidad de los datos hidrométricos

**ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO PARA LA REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 23 COSTA DE CHIAPAS USANDO MÉTODOS ESTADÍSTICOS**

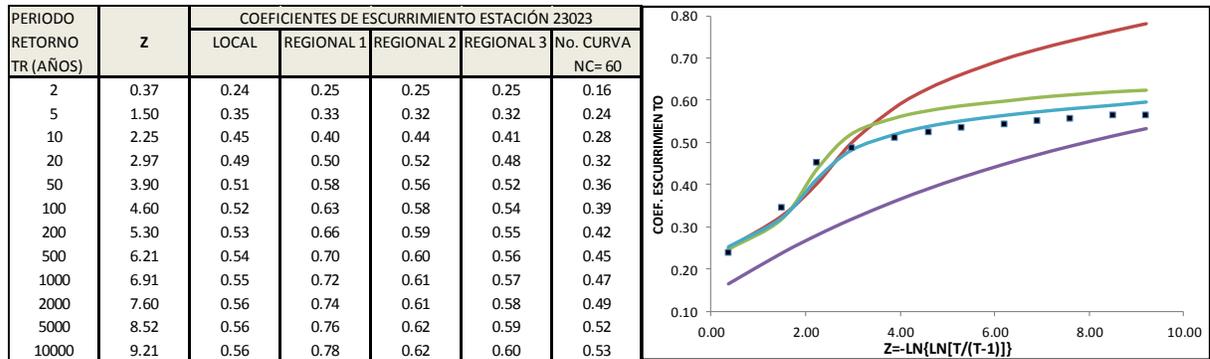
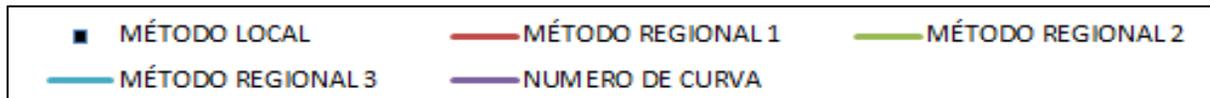


**Figura 6.19** Coeficientes de escurrimiento obtenidos para los distintos ajustes de distribución de probabilidad de los datos hidrométricos

**ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO PARA LA REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 23 COSTA DE CHIAPAS USANDO MÉTODOS ESTADÍSTICOS**



**Figura 6.20** Coeficientes de escurrimiento obtenidos para los distintos ajustes de distribución de probabilidad de los datos hidrométricos



**Figura 6.21** Coeficientes de escurrimiento obtenidos para los distintos ajustes de distribución de probabilidad de los datos hidrométricos

Se observa en las figuras anteriores que la regionalización realizada con el grupo del método de delimitación de regiones homogéneas 1, presenta coeficientes de escurrimiento altos y en las estaciones 23012, 23014 y 23017 estos son mayores a 1, lo cual es incorrecto, como ya se había explicado esto se debe a la incursión de la estación 23011. En cuanto a la estación 23017 en donde el coeficiente de escurrimiento obtenido con el método local presenta valores mayores 1, dado que la pendiente de la segunda población en los datos hidrométricos aumenta, mientras que en los datos de precipitación la pendiente se mantiene, se puede mencionar que de acuerdo a sus características morfológicas la cuenca es de pronta respuesta debido a que cuenta con un área pequeña de 113 km<sup>2</sup> y presenta pendientes de hasta 18%, con un tiempo de concentración aproximado de 2 horas, otro punto importante es que la lluvia no se comporta de manera uniforme en toda la cuenca y como se puede observar en la figura 6.22 las estaciones climatológicas usadas para su respectivo análisis no se encuentran dentro de la cuenca en estudio, más, sin embargo, se espera que los resultados generados de un análisis estadístico sean similares, dado que las condiciones climatológicas varían gradualmente de un lugar a otro y al comparar las fechas en las que ocurrieron los gastos máximos estas concuerdan con las fechas en las que se presentaron las lluvias máximas para los respectivos años.



**Figura 6.22** Ubicación de las estaciones climatológicas usadas para el análisis de la cuenca de la estación hidrométrica 23017 (punto verde)

También se observa que en los cambios de pendientes de los datos tanto hidrométricos como climatológicos generan un descenso en los valores de  $C_e$  en las estaciones 23006, 23007, 23009, 23012, 23015, 23018 y 23019 y esto es a partir de  $T_r = 5$  años, en donde el cambio de pendiente es mayor para los datos de precipitación.

Con respecto a los coeficientes de escurrimiento resultado del método de número de curva en las estaciones 23006, 23008, 23011, 23014, 23015, 23016, 23019 y 23022 los valores se sobreestiman, mientras que en las estaciones 23012 y 23013 los valores son menos discrepantes entre los distintos métodos aplicados para obtener dicho coeficiente; en las estaciones 23017 y 23023 los valores del coeficiente de escurrimiento obtenidos con el método de la Soil Conservation Service están por abajo de los valores obtenidos a partir de la información hidrométrica.

## 7. CONCLUSIONES.

Para estimar eventos de diseño para obras hidráulicas es necesario contar con la mayor cantidad de datos y que estos sean confiables. Sin embargo, no es posible tenerlos en algunas zonas de nuestro país, por eso se recurre a la regionalización de datos.

En el caso particular de la estación 23017, se eligieron las estaciones climatológicas más cercanas a la cuenca debido a la escasez de estas dentro de la misma y suponiendo que los resultados generados de un análisis estadístico son similares, dado que las condiciones climatológicas varían gradualmente de un lugar a otro; no obstante, al observar los coeficientes de escurrimiento obtenidos del método local para esta estación, se notó que son mayores a uno, esto no es correcto debido a que el valor de  $C_e$  es menor o igual a uno, se podría suponer que las estaciones climatológicas que se utilizaron, al estar más alejadas de la zona montañosa presentan precipitaciones menores a las reales para la cuenca en estudio; también la determinación de los gastos no es directa y menos aún durante una tormenta, por lo que se acostumbra a utilizar curvas de elevaciones-gastos para su cálculo, permitiéndose un margen de error y al tratar de relacionar los valores de lluvia con los de escurrimiento los resultados no son los esperados. Aun así, en los métodos de regionalización 2 y 3 se observa un mejor ajuste.

En cuanto a las estaciones 23007, 23015, 23018 y 23019 que presentan descensos en valores de los coeficientes de escurrimiento, lo cual se debe a múltiples factores; como por ejemplo, las funciones de distribución aplicadas, las cuales pueden ocasionar que los valores para los distintos periodos de retorno aumenten de manera gradual o se disparen, o los mismos valores dado que como se dijo las lluvias no se comportan de manera uniforme en toda la cuenca, y los datos de las estaciones climatológicas dan una idea del comportamiento de la lluvia en un punto y entre más estaciones de este tipo se obtengan para la cuenca en cuestión, serán mejores los resultados.

Otros aspectos que influyen en la precisión de los coeficientes de escurrimiento son la topografía, el tipo y el uso de suelo, características que aumentan su importancia mientras menor es el área de la cuenca.

En cuanto a las estaciones 23015, 23018 y 23019 presentan áreas pequeñas y pendientes grandes, mientras que la estación 23007 cuenta con un área de 1139 km<sup>2</sup> la cual es compartida con Guatemala, solo el 17 % se encuentra dentro de México y la información climatológica en este estudio corresponden solo a nuestro país, desconociéndose su comportamiento en el 83% de su área restante.

En las figuras de los coeficientes de escurrimiento de manera local se observa que los resultados están fuertemente condicionados por los eventos extraordinarios existentes tanto en los registros climatológicos como hidrométricos; sin embargo el análisis regional aporta mayor información puesto que nos indica el

comportamiento de los eventos en toda la zona y se observa un mejor ajuste. De lo anterior se comenta que los resultados de la regionalización 2 y 3 tienen un comportamiento aceptable y que de manera general el último demuestra ser más conservador al presentar valores de coeficientes de escurrimiento altos.

Para el método de número de escurrimiento, fueron pocas las estaciones donde se vio un ajuste similar al obtenido con los datos hidrométricos como las estaciones 23012, 23013, 23014 y 23007 y solo en la estación 23023 se mostró con valores menores a los diferentes métodos presentados; no se aplicaron correcciones respecto a lluvias antecedentes debido a que no se asegura que se hayan presentado, ni en que magnitud.

En general, se concluye que es difícil definir un coeficiente de escurrimiento para una cuenca, dados los factores que influyen para reflejarlos directamente en una cifra. Sin embargo, existen diferentes métodos y recomendaciones para definirlo y depende del criterio y la experiencia del ingeniero.

En el presente trabajo se realizó la obtención de estos factores principalmente por tres métodos que es el local, regional y número de escurrimiento, teniendo mejores resultados con el regional.

Retomando el objetivo del estudio, el cual era evaluar la eficacia del método de número de curva del SCS, obteniendo los coeficientes de escurrimiento de la zona en estudio y comparándolos con los obtenidos del análisis de los datos hidrométricos, se puede decir que en la mayoría de los casos el método de la SCS tiende a sobreestimar los valores de  $C_e$  y más aún para periodos de retorno altos como se pueden ver en las gráficas de las estaciones 23006, 23008, 23009, 23011, 23015, 23016 y 23022, aunque también se notó que para estos periodos los incrementos de los valores obtenidos con el CN tienden a decrecer, comportamiento similar a los valores obtenidos con los datos hidrométricos; por lo descrito anteriormente es importante realizar más estudios para analizar el comportamiento de los resultados obtenidos con el número de curva y cómo éstos varían con la magnitud de la lluvia, debido a que en muchas partes de nuestro país es un método muy utilizado por lo escaso de la información hidrométrica para la realización de proyectos hidráulicos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aparicio Mijares Francisco Javier (2009). Fundamentos de Hidrología de Superficie. México: Limusa.
- Breña Puyol, Agustín Felipe y Jacobo Villa, Marco Antonio (2013). Principios y fundamentos de Hidrología Superficial. Universidad Autónoma Metropolitana. México.
- Comisión Nacional del Agua Estadísticas del Agua en México, 2004 / Comisión Nacional del Agua.- México: CNA, 2004.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (conabio). 2013. La biodiversidad en Chiapas: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad/Gobierno del Estado de Chiapas. México.
- Contreras González, Vladimir. (2009). Caracterización fluvial y análisis multivariado, aplicado a la migración de meandros. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Echeverri Vélez, Carlos Alberto. (2007). Estudio de las Crecientes en las Cuencas de la costa del Estado de Chiapas. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Escalante Sandoval, Carlos, Reyes Chávez, Lilia. (2008). Técnicas Estadísticas en Hidrología. 2ª ed., primera reimpresión, México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2008, 298 p.
- Esteban C., Domínguez R., Arganis M., Carrizosa E., y Esquivel G. (octubre del 2014). Cálculo de coeficientes de escurrimiento en cuencas del valle de México usando métodos estadísticos. Artículo presentado en el XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- Guichard Romero Delva et al. (2014). Calibración de los números de escurrimiento en microcuencas de la región hidrológica 23 (costa de Chiapas). Artículo presentado en el XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, Puerto Vallarta, Jalisco, México.

- Diario Oficial de la Federación de México. (2007, 11 junio). Acuerdo del resultado de los estudios de disponibilidad media anual de las aguas superficiales que forman parte de la región hidrológica número 23 (costa de Chiapas). Secretaria de medio ambiente y recursos naturales. Disponible en [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=4990098](http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=4990098)
- Instituto Estatal del Agua del Estado de Chiapas (inesa). (Sin fecha, a). Comité de cuenca del río Zanatenco. Recuperado de <http://www.institutodelagua.chiapas.gob.mx/rio-zanatenco-cch#>
- Instituto Estatal del Agua del Estado de Chiapas (inesa). (Sin fecha, b). Comité de cuenca del río Coapa. Recuperado de <http://www.institutodelagua.chiapas.gob.mx/rio-coapa-cch>
- Instituto Estatal del Agua del Estado de Chiapas (inesa). (Sin fecha, c). Comité de cuenca del río Huixtla. Recuperado de <http://www.institutodelagua.chiapas.gob.mx/rio-huixtla-cch>
- Instituto Estatal del Agua del Estado de Chiapas (inesa). (Sin fecha, d). Comité de cuenca del río Coatan. Recuperado de <http://www.institutodelagua.chiapas.gob.mx/rio-coatan-cch>