

01172

2  
2ej.

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

TESIS

**Regionalización de lluvias y escurrimientos  
en la cuenca del alto río Grijalva**

PRESENTADA POR:

**Delva del Rocío Guichard Romero**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRA EN INGENIERÍA**  
(Aprovechamientos Hidráulicos)

DIRIGIDA POR:

**Dr. Ramón Domínguez Mora**

Ciudad Universitaria, octubre de 1998.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

### **A mis padres**

Por esos cuarenta años que con agrado han dedicado a nuestra familia y el apoyo incondicional brindado para mi formación profesional.

### **A mis hermanos**

Por las experiencias compartidas.

26831

# ÍNDICE

<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1 Lluvias	3
2.1.1 Estudios en el extranjero	3
2.1.2 Estudios en México	8
2.2 Escurrimientos	17
2.2.1 Métodos de regionalización	17
2.2.2 Trabajos en el extranjero	20
2.2.3 Trabajos en México	21
2.3 Características fisiográficas de la región estudiada	24
<b>3 Procesamiento de la información</b>	<b>28</b>
3.1 Revisión de archivos y complemento de datos faltantes	37
3.2 Promedios diarios y obtención de máximos anuales de precipitación en la cuenca	38
<b>4 Resultados de la regionalización de lluvias</b>	<b>47</b>
4.1 Metodología	47
4.2 Resultados obtenidos para los factores de reducción por área	51
4.3 Resultados obtenidos para los factores de ajuste por período de retorno	60
4.3.1 Análisis con 24 estaciones	60
4.3.2 Análisis con 23 estaciones	66
4.4 Resultados obtenidos para los factores de ajuste por duración	70
4.5 Conclusiones	73
4.6 Ejemplo de aplicación	76
<b>5 Resultados de la regionalización de gastos</b>	<b>78</b>
<b>6 Conclusiones</b>	<b>93</b>
<b>Anexo A.1</b>	<b>96</b>
<b>Anexo A.2</b>	<b>103</b>
<b>Anexo A.3</b>	<b>105</b>
<b>Referencias</b>	<b>120</b>
<b>Reconocimientos</b>	<b>123</b>

## 1 INTRODUCCIÓN.

El dimensionamiento de las obras hidráulicas para el control de avenidas es función del caudal o gasto de diseño, éste puede estimarse utilizando métodos hidrometeorológicos o mediante el análisis estadístico de gastos máximos. En el primer caso se calcula primero una tormenta de diseño, asociada al período de retorno seleccionado, y se convierte en avenida mediante modelos lluvia-escurrecimiento. En el segundo se analizan directamente los datos de escurrimientos máximos registrados en una estación hidrométrica representativa del sitio de interés.

Para el cálculo de la tormenta de diseño para cuencas con área mayor a 100 km<sup>2</sup> es necesario utilizar factores de reducción por área que salvo excepciones (Tipacamú, 1992; DGCOH, 1982), no han sido calculados para México, por lo que se utilizan factores obtenidos para otros países, como los que recomienda Viessman (1989). Mediante el análisis tradicional, en que se consideran los máximos anuales de las estaciones de interés, los cálculos tienden a sobrestimar la precipitación, ya que no se considera el efecto de simultaneidad de las lluvias.

Por otro lado, los registros con que se cuenta no son lo suficientemente largos, por lo que el análisis directo de los mismos puede conducir a resultados poco confiables (Viessman, 1989), sobre todo para períodos de retorno grandes. De esta forma se hace necesaria la utilización de herramientas, que permitan solventar estos problemas, que pueden ser los factores de ajuste por período de retorno, obtenidos mediante la regionalización de lluvias; para lo que en este estudio se utilizó el método de índice de avenida con la hipótesis estación-año.

Asimismo, en ocasiones, es necesario estimar esta precipitación de diseño para duraciones menores de 24 horas, especialmente en cuencas pequeñas en las que el tiempo de concentración es menor que dicha duración, para estas duraciones por lo general es difícil contar con información en nuestro país, sin embargo el uso de factores de ajuste permite estimar la tormenta de diseño para cualquier duración a partir de una duración base, por ejemplo 24 horas, para la que se cuenta con registros de mayor longitud.

En cuanto al uso directo del análisis estadístico de gastos máximos, los principales problemas que se presentan se relacionan con la falta de registros históricos suficientemente largos para obtener estimaciones confiables de avenidas asociadas a períodos de retorno grandes. Además en muchas ocasiones no se cuenta con una estación hidrométrica justamente en el sitio de interés. Estos problemas pueden disminuir considerablemente si se analiza regionalmente la información de gastos máximos de un grupo de estaciones con características similares, para lo que existen diversos métodos; en este caso se utilizó el de índice de avenida con la hipótesis estación año.

Para contar en México con una base completa de resultados de análisis regionales de lluvias y escurrimientos que permitan mejorar la estimación de

avenidas de diseño, seguramente será necesario efectuar estudios muy diversos que tomarán varios años para su conclusión.

El objetivo de este trabajo es obtener factores de ajuste por área, período de retorno y duración; así como curvas regionales para la estimación de avenidas de diseño en la región del alto Grijalva, acotada desde la Presa Malpaso hasta la frontera entre México y Guatemala. Esta cuenca, por sus características topográficas, se encuentra protegida de la incidencia directa de ciclones, provenientes tanto del Golfo de México como del Océano Pacífico, por lo que las precipitaciones que se generan, son por lo general de origen convectivo.

Para lograr dicho objetivo se procesó información de lluvias de 71 estaciones climatológicas y los registros de gastos máximos anuales de nueve subcuencas de la región.

Así, el trabajo consta de seis capítulos, en el segundo se presentan los estudios que se han llevado a cabo sobre el tema, tanto en el extranjero como en nuestro país; así como algunos de los métodos de análisis regional que se utilizan en la actualidad. Se incluyen, también, en ese capítulo las principales características de la región estudiada.

En el capítulo tres se muestra la información básica utilizada, especialmente la concerniente a precipitaciones en 24 horas, así como el proceso llevado a cabo para el complemento de la información faltante y el procesamiento de la misma.

En el cuarto capítulo se presentan, tanto la metodología utilizada para el cálculo de los factores de ajuste por área, período de retorno y duración; como el análisis llevado a cabo para la obtención de estos factores y los resultados generados. Además, se muestran los mapas de igual precipitación para distintos períodos de retorno, se presentan las conclusiones particulares sobre el estudio de lluvias y la comparación con resultados de otras investigaciones. Por último se expone un ejemplo aplicación.

Los resultados obtenidos en cuanto al estudio de los gastos máximos anuales se presentan en el capítulo cinco, que consisten básicamente en tres curvas regionales y una ecuación que relaciona el gasto medio máximo anual y las características fisiográficas de las cuencas.

Finalmente, en el sexto capítulo se dan a conocer las conclusiones y recomendaciones generales sobre los resultados de este estudio.

## 2 ANTECEDENTES

### 2.1 Lluvias.

El patrón de lluvias en cualquier zona se describe mediante tres variables: altura de lluvia, duración y frecuencia. El análisis de las mismas permite contar con eventos de diseño, sobre todo para cuencas pequeñas, que generalmente no tienen registros suficientes o confiables de escurrimientos.

Para cuencas de área grande influye también la magnitud de la misma, por lo que para encontrar el evento de diseño, de la obra requerida, se debe considerar también esta variable.

En este contexto, a través del tiempo, ha habido múltiples intentos por estudiar y relacionar estos cuatro factores: área, altura o intensidad de precipitación, duración de las tormentas y frecuencia o período de retorno.

A continuación se presentan, en orden cronológico, algunos de los estudios que diversos investigadores han desarrollado sobre el tema.

#### 2.1.1 Estudios en el extranjero

Wilson (1990), en su fig. 2.5 presenta los resultados obtenidos por Biham, en 1935, que constan de relaciones de la forma

$$n = 0.5 \cdot t \cdot (P + 2.54)^{-3.55}$$

donde:  $n$ , número de ocasiones en 10 años, en que se supera una lluvia de magnitud  $P$  y duración  $t$ .

$P$ , altura de lluvia, en  $mm$  y

$t$ , duración de la lluvia, en horas.

En 1935, Yarnall elaboró mapas de isoyetas para los Estados Unidos de América (EUA), como el mostrado en la fig. 2.9 de Wilson, para lluvias de 5 minutos de duración y período de retorno de 50 años.

En 1961 Holland revisó y extendió los trabajos de Biham, algunos de sus resultados pueden observarse en la fig. 2.6 de Wilson.

En la fig. 16.9 de Viessman (1989) se muestran los resultados presentados por el *U.S. Weather Bureau*, en 1961, en relación con el factor de ajuste por área, para superficies menores de 400 millas cuadradas ( $1036 \text{ km}^2$ ). Asimismo en la fig. 16.10 presenta los resultados del *Soil Conservation Service*, obtenidos en 1968, para duración de seis horas, que consideran tres tipos de clima: cálido, húmedo y subhúmedo; y árido y semiárido.

Hershfield, en 1961 (Bell, 1969) recomendó para los EUA los factores de ajuste, para duración base de una hora, mostrados a continuación

d (min)	5	10	15	30	60
Factor	0.29	0.45	0.57	0.79	1.0

Para los EUA, Hershfield y Wilson en 1960 (Court, 1961), encontraron los siguientes factores de ajuste por área, considerando en lugar de la precipitación puntual, la ocurrida en un superficie de 10 millas cuadradas (29.5 km<sup>2</sup>).

Área (millas) <sup>2</sup>	100	200	500	1000	5000
Area(km <sup>2</sup> )	259	518	1295	2590	12950
6 hr	0.85	0.80	0.73	0.65	0.46
12 hr	0.89	0.85	0.79	0.72	0.51
24 hr	0.92	0.88	0.82	0.76	0.58
48 hr	0.93	0.90	0.84	0.84	0.63

Bell (1969) analizó series de excedentes anuales para 157 estaciones, encontrando que, en relación con la duración base de una hora, el factor de ajuste por duración para 2 horas es de 1.25.

El autor, al analizar 7 estaciones en Australia considerando también la duración base de una hora, obtuvo los siguientes resultados:

	5 min	15 min	30 min	60 min	2 hr
T= 2 años	0.30	0.57	0.77	1.0	1.24
T= 10 años	0.31	0.58	0.78	1.0	1.25
T=25 años	0.30	0.58	0.79	1.0	1.23
media	0.30	0.57	0.78	1.0	1.24

Dado que no existe prácticamente diferencia alguna entre los resultados para EUA y Australia, el autor supuso que los resultados obtenidos para EUA podrían ser utilizados en otras partes del mundo y presentó la ecuación general:

$$\frac{P_t^T}{P_{60}^T} = 0.54t^{0.25} - 0.50$$

donde  $P_t^T$  es la precipitación correspondiente a una duración  $t$  y un período de retorno  $T$ .

En relación con los factores de ajuste por período de retorno, para período base de 10 años, al trabajar con 157 estaciones de EUA encontró los siguientes resultados:

T(años)	1	2	5	10	25	50	100
Factor	0.54	0.63	0.85	1.0	1.17	1.31	1.46



Y para Australia

T(años)	1	2	5	10	25	50	100
Factor	0.52	0.65	0.85	1.0	1.18	1.33	1.50

La ecuación general que describe los resultados para EUA, propuesta por Bell es:

$$\frac{P_t^T}{P_{10}^T} = 0.21 \cdot \ln T + 0.52 \quad ; \quad \text{para } 2 \leq T \leq 100 \text{ años}$$

Y combinando las dos últimas ecuaciones, se tiene:

$$P_t^T = (0.21 \cdot \ln T + 0.52)(0.54 \cdot t^{0.25} - 0.50) P_{10}^{60} \quad ; \quad \text{para } 2 \leq T \leq 100 \text{ años y } 5 \leq t \leq 120 \text{ min}$$

Los estudios realizados por el *Natural Environment Research Council* de Inglaterra fueron presentados en la publicación *Flood Studies Report* (volumen 2) en 1975 y sobre los factores de ajuste por área, duración y período de retorno, pueden resumirse de la manera siguiente:

#### *Factor de ajuste por área*

Los resultados para duraciones entre un minuto y 25 días y áreas de uno a 30 000 km<sup>2</sup> se presentan en la tabla 5.2 y fig. 5.1 (*Flood Studies Report*, volumen 2). Se concluye que el factor de ajuste por área crece con la duración de la lluvia y decrece con el área y que la localización geográfica aparentemente no es importante.

#### *Factor de ajuste por período de retorno*

Según el estudio, este factor varía con la localización geográfica. En las tablas 2.6 y 2.7 (*Flood Studies Report*, volumen 2) se presentan los factores de ajuste correspondientes a un intervalo de precipitaciones entre 0.5 y 1000 mm, y períodos de retorno de 2 a 10 000 años, para Inglaterra y Gales. Y en las tablas 2.8 y 2.9 de la misma referencia para Escocia e Irlanda del Norte. Asimismo en la fig. 2.4 los autores presentan los resultados en forma gráfica.

#### *Factor de ajuste por duración*

Se analizaron precipitaciones para duraciones entre un minuto y 48 horas, así como para 72 y 96 horas; además de su relación con la precipitación para dos días de duración. Se consideró el período de retorno de 5 años. Los resultados se presentan en la fig. 3.5 y tablas 3.2 y 3.10 (*Flood Studies Report*, volumen 2).

La utilización de la fig. 3.2 (*Flood Studies Report*, volumen 5), que contiene las isoyetas para duración de dos días y período de retorno de 5 años, y las tablas 2.7 3.2 y 3.10 (*Flood Studies Report*, volumen 2) permite obtener la precipitación para el sitio de interés y el período de retorno deseado.

A fin de recalcular los factores de ajuste por área presentados en la publicación *Flood Studies Report*, Bell (1976) llevó a cabo un estudio para la Gran Bretaña, obteniendo dichos factores para duraciones de 1, 2 y 24 horas. El análisis de frecuencia lo realizó considerando la distribución de probabilidades exponencial.

Para duración de 24 horas analizó nueve zonas de 1000 km<sup>2</sup> cada una. Los resultados obtenidos se presentan a continuación. El valor promedio del factor de ajuste por área, para todas las regiones, resultó de 0.89.

Región	T (años)			
	2	5	10	20
1	0.95	0.93	0.92	0.91
2	0.95	0.92	0.90	0.89
3	0.89	0.89	0.89	0.89
4	0.90	0.90	0.90	0.90
5	0.95	0.88	0.86	0.82
6	0.90	0.88	0.86	0.85
7	0.93	0.87	0.86	0.82
8	0.86	0.85	0.84	0.84
9	0.89	0.84	0.81	0.80
<b>Valor promedio</b>	0.91	0.88	0.87	0.86

Para duraciones de 1 y 2 horas analizó cinco regiones más, con áreas diferentes, lo que permitió determinar los siguientes factores de ajuste por área.

Región	Duración (h)	Período de retorno (años)				
		2	5	10	20	Promedio
10	1	0.66	0.58	0.54	0.51	0.57
10	2	0.73	0.66	0.62	0.59	0.65
11	1	0.75	0.64	0.59	0.56	0.64
11	2	0.81	0.78	0.76	0.74	0.77
12	1	0.53	0.48	0.45	0.44	0.48
12	2	0.63	0.59	0.58	0.57	0.59
13	2	0.95	0.92	0.91	0.91	0.92
14	1	0.98	0.89	0.85	0.82	0.89
15	1	0.89	0.86	0.86	0.85	0.87

Las principales conclusiones de Bell son:

Los factores obtenidos validan los del *Flood Studies Report*, ya que la variación entre ellos no fue significativa.

Los resultados para las distintas zonas son muy similares, aunque tienden a incrementarse con la latitud.

El factor de reducción por área decrece al incrementar el período de retorno. La variación entre los factores para 2 y 20 años de período de retorno resultó del 2 al 5 % para 24 horas de duración, y del 5 al 15 % para una y dos horas.

Chen (1984), usando los mapas de isolíneas del *U.S. Weather Bureau* obtuvo una fórmula generalizada de la relación intensidad-duración-frecuencia. El autor consideró que las relaciones que describen mejor el patrón geográfico de la lluvias son para período de retorno de 10 años y duración de una hora ( $P_1^{10}$ ), período de retorno de 10 años y duración de 24 horas ( $P_{24}^{10}$ ) y período de retorno de 100 años y duración de una hora ( $P_1^{100}$ ).

Asimismo, el autor destaca que de estudios anteriores se ha comprobado que la relación altura-duración  $P_1^{10}/P_{24}^{10}$  es independiente del período de retorno y varía entre 10 y 60 % con la localización geográfica, mientras que la relación altura-frecuencia  $P_1^{100}/P_1^{10}$  es independiente de la duración y varía en el intervalo 1.33 a 1.63 de acuerdo con la localización geográfica.

La ecuación propuesta por Chen es:

$$I_t^T = \frac{a I_1^{10} \log(10^{2-x} T^{x-1})}{(t+b)^c}$$

donde:

$I_t^T$ , intensidad de la lluvia en pulgadas/hr para período de retorno  $T$  y duración  $t$  de la tormenta.

$I_1^{10}$ , intensidad para 10 años de período de retorno y 1 hora de duración.

$x$ , relación altura-frecuencia  $P_1^{100}/P_1^{10}$ .

$a, b, c$ , parámetros de tormenta dependientes de la relación regional  $K = P_1^{10}/P_{24}^{10}$ .

Kothyari y Garde (1992) probaron la fórmula propuesta por Cheng, utilizando datos de 20 estaciones de la India con más de 20 años de registro y la distribución Gumbel, pero no encontraron resultados satisfactorios. Por lo anterior desarrollaron una nueva relación, utilizando datos de 78 estaciones. Para verificar su aplicación, utilizaron dos estaciones más de India, 19 de Sri Lanka y cinco de Estados Unidos de América. La ecuación obtenida por los autores es la siguiente:

$$I_t^T = \frac{CT^{0.20}(P_{24}^2)^{0.33}}{t^{0.71}}$$

donde

$I$ , Intensidad, en mm/hr.

$T$ , período de retorno, en años

$P$ , precipitación, en mm.

$t$ , duración, en hr.

$C= 8.31$  para las estaciones analizadas.

Al dividir la región en cinco subregiones observaron que los errores disminuyen y encontraron los siguientes valores de  $C$ :

	$C$
Norte de India	8.0
Este de India	9.1
India Central	7.7
Oeste de India	8.3
Sur de India	7.1

En España, Ferrer y Ardiles (1995) aplicaron un enfoque de índice de avenida para regionalizar el coeficiente de variación. Utilizaron las series de precipitaciones máximas en 24 horas de 1545 estaciones con más de 30 años de registro, mismas que agruparon en 26 regiones delimitadas con criterios meteorológicos. La distribución de probabilidades seleccionada fue la SQRT-ET max.

### 2.1.2 Estudios en México

Este tipo de estudios es muy reciente en nuestro país, se inician en la década de los ochenta y los resultados más relevantes se indican a continuación.

Para el Valle de México (DGCOH, 1982) mediante el análisis de 23 estaciones se encontraron los siguientes factores de ajuste por duración:

Duración (minutos)	5	10	15	20	30	60	120
Factor	0.34	0.60	0.75	0.87	1.0	1.20	1.33

Duración (horas)	4	8	12	16	20	24
Factor	0.84	0.92	0.95	0.97	0.99	1.0

Y los factores de ajuste por período de retorno, para período base de 5 años:

$T$ (años)	1	2	5	10	50	100	500
Factor	0.60	0.74	1.0	1.18	1.60	1.78	2.20

En cuanto a los factores de reducción por área, los resultados fueron los siguientes:

Área (km <sup>2</sup> )	10	20	50	100	200	500	1000
Factor	0.96	0.87	0.77	0.70	0.60	0.47	0.30

Asimismo, se obtuvieron isoyetas para duraciones de 30 minutos y 24 horas, para período de retorno de 5 años.

Barrios y Domínguez (1986) estudiaron 17 estaciones ubicadas en la cuenca del río Lerma, consideraron duraciones de 15 a 240 minutos y las mejores funciones de ajuste fueron la Normal y la Gumbel. Se consideró una duración base de 30 minutos y período de retorno de 10 años.

Los factores de ajuste por duración obtenidos fueron los siguientes:

Duración (min)	15	20	30	45	60	80	100	120	180	240
Factor	0.73	0.84	1.0	1.14	1.23	1.30	1.35	1.38	1.45	1.52

Y los factores de ajuste por período de retorno:

Tr (años)	5	10	25	50	100
Factor	0.85	1.0	1.19	1.34	1.48

Los autores concluyeron que los factores de ajuste por duración no dependen de la ubicación ni del período de retorno y los de ajuste por período de retorno son independientes de la ubicación y de la duración.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 1990), publicó mapas de isoyetas para duraciones de 10, 30, 60, 120 y 240 minutos y períodos de retorno de 10, 25 y 50 años, para todos los estados de la República Mexicana.

A fin de comprobar si los resultados obtenidos para Estados Unidos de América, pueden ser utilizados en otras partes del mundo, Campos (1990) utilizó mapas de lluvias con duraciones de 1 y 24 horas para 2 años de período de retorno, obtuvo el factor de ajuste por duración de 0.47, con un intervalo de 0.28 a 0.60.

Utilizando información pluviográfica de 33 estaciones de la República Mexicana, ubicadas principalmente en el centro y norte del país, para las mismas duraciones y período de retorno mencionados, Campos (1990) destaca lo siguiente:

El valor promedio obtenido es 0.479, con valores extremos de 0.646 y 0.204.

El factor varía de 0.40 a 0.60 en la regiones áridas y de 0.30 a 0.40 en las húmedas.

El factor es mas grande a mayor altitud y viceversa.

Para la cuenca del río Papaloapan, Domínguez y Ríos (1991) estudiaron 35 estaciones y nueve duraciones. El período base seleccionado fue el de 10 años y la duración de 120 minutos. Obtuvieron isoyetas de precipitación media anual y

su relación con las intensidades máximas anuales para la duración y período de retorno mencionados. Utilizaron la función exponencial para realizar la regionalización y llegaron a las ecuaciones siguientes:

$$\text{curva I: } i = 0.213 \cdot (\ln(0.4 P_{\text{anual}}))^3 - 22.92$$

$$\text{curva II: } i = 0.200 \cdot (\ln(0.4 P_{\text{anual}}))^3 - 6.97$$

donde  $i$ , en mm/hr y  $P_{\text{anual}}$ , en mm.

Los autores atribuyen la existencia de dos ecuaciones, más a la relación con la precipitación media anual que con la altitud.

Asimismo, trataron de encontrar alguna relación con la pendiente del terreno, los resultados parecen mostrar que para un mismo valor de la intensidad asociada a una duración de 120 minutos y período de retorno de 10 años, las zonas de alta pendiente tienen una precipitación anual mayor que la que corresponde a la zona plana.

Los factores de ajuste por período de retorno promedio se muestran en la tabla siguiente:

T (años)	2	5	10	20	50	100
Factor	0.645	0.856	1.0	1.144	1.333	1.476

En cuanto a los factores de ajuste por duración, trabajaron con intensidades máximas y obtuvieron los siguientes valores promedio:

Duración (min)	10	15	20	30	45	60	80	100	120
Factor	3.929	3.451	3.060	2.481	2.093	1.674	1.358	1.152	1.0

Tipacamú y Domínguez (1992) obtuvieron factores de reducción por área para dos cuencas del río Grijalva:

Chicoasén,	$Ac = 8126 \text{ km}^2$	$F = 0.48$
Copainalá,	$Ac = 2725 \text{ Km}^2$	$F = 0.64$

Con base en estos resultados y tomando en cuenta la forma que adopta la curva área-factor de reducción por área, Domínguez (1993) construyó la curva presentada en la fig. 3.20, de esta referencia.

Cisneros y Domínguez (1996), obtuvieron factores de ajuste por duración para duraciones de 1 y 24 horas con períodos de retorno entre 5 y 100 años para la región del río Papaloapan. Formaron tres grupos de análisis de acuerdo con las características orográficas de la zona: alta, con precipitaciones medias anuales menores de 800 mm, protegida del flujo de humedad proveniente del Golfo de

México; altura media, expuesta al flujo de humedad del Golfo de México, con más de 3000 mm anuales de precipitación; y por último, la zona baja, ubicada en la plataforma costera, con precipitaciones medias anuales entre 1200 y 3000 mm.

Los resultados obtenidos pueden resumirse de la siguiente manera:

Zona	Factor promedio	valores extremos
alta	2.21	1.52-3.54
media	3.33	2.33-4.72
baja	2.35	1.84-3.10

Los autores concluyen que el factor de ajuste por duración es independiente del período de retorno.

Lafragua (1996), analizó 32 estaciones ubicadas en el Golfo de México mediante la distribución de probabilidades Gumbel y construyó planos de isoyetas para período de retorno de 10 años y duraciones de una y 24 horas. Obtuvo los siguientes factores de ajuste por duración:

Duración (min)	5	10	15	30	60	80	100	120	1440
Factor	0.25	0.37	0.47	0.73	1.0	1.08	1.18	1.24	2.16

Para duración de una hora y período base de 10 años obtuvo los siguientes factores de ajuste por período de retorno:

T (años)	2	5	10	25	50	100	200
Factor	0.65	0.86	1.0	1.18	1.31	1.44	1.56

Para la zona del Valle de México, Franco y Domínguez (1997) obtuvieron los siguientes factores de reducción por área:

Area(km <sup>2</sup> )	1	10	20	50	100	200	500	1000
Factor	1.0	0.98	0.96	0.92	0.88	0.82	0.70	0.62

Los factores de ajuste por período de retorno, calculados por los autores, para período base de 10 años:

T (años)	2	5	10	25	50	100	500	1000
Factor	0.67	0.88	1.0	1.14	1.24	1.34	1.55	1.75

En cuanto a los factores de ajuste por duración, los resultados para duración base de una hora son:

Duración (horas)	0.5	1.0	2.0	8.0	24
Factor	0.78	1.00	1.17	1.38	1.52

En las tablas 2.1, 2.2 y 2.3 se presentan, de manera resumida, los resultados obtenidos por distintos autores, en cuanto a los factores de reducción por área; de ajuste por período de retorno, para período base de 10 años y factores de ajuste por duración, para duración base de una hora.



Tabla 2.1. Factores de reducción por área para distintas regiones y duración de 24 horas

Institución (autor)	Área (km <sup>2</sup> )															
	1	10	20	100	200	259	500	518	777	1000	1295	2590	3000	10000	12950	30000
U.S Weather. Bureau, (Viessman, 1989)						0.93		0.92	0.91							
Hershfield y Wilson, (Court, 1961)						0.92		0.88			0.82	0.76			0.58	
Flood Studies Report (1975)	0.99	0.97		0.94						0.89			0.86	0.83		0.80
Bell (1976)										0.89						
DGCOH (1982)		0.96	0.87	0.70	0.60		0.47			0.30						
Tipacamú y Domínguez (1992)										0.86			0.64	0.50		
Franco y Domínguez (1997)	1.0	0.98	0.96	0.88	0.82		0.70			0.62						

Institución (autor)	Comentarios
U.S Weather. Bureau, (Viessman, 1989)	Tomados de la fig. 29.5 (Viessman, 1989), para EUA.
Hershfield y Wilson, (Court, 1961)	Resultados para EUA, considerando que la precipitación puntual es la ocurrida en 10 (millas) <sup>2</sup> .
Flood Studies Report (1975)	Resultados para Inglaterra. El factor crece con la duración de la lluvia, decrece con el área y la localización geográfica no es aparentemente importante
Bell (1976)	Valor promedio para nueve regiones de la Gran Bretaña. Los factores decrecen al incrementar el período de retorno y aparentemente existe variación con respecto a la latitud.
DGCOH (1982)	Resultados para la cuenca del Valle de México.
Tipacamú y Domínguez (1992)	Cuencas del río Grijalva, curva construida con dos puntos.
Franco y Domínguez (1997)	Valle de México.

Tabla 2.2. Factores de ajuste por periodo de retorno, para periodo base de 10 años, en distintas regiones.

Institución (autor)	Periodo de retorno en años										Región
	2	5	20	25	50	100	200	500	1000		
Bell (1969)	0.63	0.85		1.17	1.31	1.46					Resultados para EUA
Bell (1969)	0.65	0.85		1.18	1.33	1.50					Resultados para Australia
Flood studies Report (1975)		0.86	1.15		1.36	1.56			2.42		Inglaterra y Gales
Flood studies Report (1975)		0.87	1.13		1.32	1.50			2.23		Escocia e Irlanda del Norte
Chen (1984)						1.33-1.63					EUA
DGCOH (1982)	0.63	0.85			1.36	1.51		1.86			Valle de México
Barrios y Domínguez (1986)		0.85		1.19	1.34	1.48					Cuenca del Lerma.
Domínguez y Ríos (1991)	0.645	0.856	1.144		1.333	1.476					Cuenca del Papaloapan
Lafragua (1996)	0.65	0.86		1.18	1.31	1.44	1.56				Golfo de México
Franco y Domínguez (1997)	0.67	0.88		1.14	1.24	1.34		1.55	1.75		Valle de México

Institución (autor)	Comentarios
Bell (1969)	Son similares en distintas regiones del mundo
Bell, (1969)	Son similares en distintas regiones del mundo
Flood studies Report (1975)	Para precipitación de 50 mm. Varía con la localización geográfica y aparentemente independiente de la duración idem
Flood studies Report (1975)	Depende de la localización geográfica
Chen (1984)	
DGCOH (1982)	
Barrios y Domínguez (1986)	No dependen de la duración de la lluvia ni de la ubicación
Domínguez y Ríos (1991)	Su comportamiento es similar es distintas partes del mundo
Lafragua (1996)	
Franco y Domínguez (1997)	

Tabla 2.3 Factores de ajuste por duración, para duración base de una hora

Autor	Duración, en minutos													
	5	10	15	20	30	45	60	80	100	120	180	240	1440	
Hershfield (Bell, 1969)	0.29	0.45	0.57	0.79										
Bell (1969)	0.30	0.57	0.78							1.24				
Cheng (1984)													1.67-10	
DGCOH (1982)	0.28	0.50	0.63		0.83					1.11				
Barrios y Dgz (1986)			0.60	0.68	0.81	0.93	1.0	1.06	1.10	1.12	1.18	1.24		
Campos, EUA (1990)													2.13	
Campos, MEX (1990)													2.09	
Dgz y Ríos (1991)		0.40	0.52	0.61	0.74	0.94	1.0	0.9	1.15	1.2			2.22	
Cisneros y Dgz (1996). ZA.														
Cisneros y Dgz (1996). ZM.													3.33	
Cisneros y Dgz (1996). ZB.													2.33	
Lafragua (1996)	0.25	0.37	0.47		0.73		1.0	1.08	1.18	1.24			2.16	
Franco y Dgz (1997)					0.78		1.0			1.17			1.52	

Autor	Comentarios
Hershfield (Bell, 1969)	Para EUA. Independientes del periodo de retorno (Bell, 1969)
Bell (1969)	Resultados para EUA. Independientes de la localización geográfica
Cheng (1984)	Resultados para EUA. Depende de la localización geográfica
DGCOH (1982)	Cuenca del Valle de México
Barrios y Dgz (1986)	Cuenca del río Lerma. No dependen de la ubicación ni del periodo de retorno
Campos (1990), EUA	Análisis con estaciones de EUA, los valores extremos son 1.67 y 3.57. Periodo de retorno de 2 años
Campos (1990) MEX.	Análisis con estaciones de México, los valores extremos son 1.55 y 4.9. Periodo de retorno de 2 años. A mayor altitud el factor es más pequeño y viceversa.
Dguez y Ríos (1991)	Cuenca del río Papaloapan. Su comportamiento es similar en distintas regiones del mundo
Cisneros y	ZA=zona alta, ZM=zona media, y ZB=zona baja de la cuenca del río Papaloapan. Independiente del periodo de retorno
Dominguez (1996)	ZA (valores extremos 1.52 y 3.57), ZM (valores extremos 2.33 y 4.76) y ZB (valores extremos 1.47 y 3.13)
Lafragua (1996)	Para Tr de 10 años. Golfo de México
Franco y Dgz (1997)	Para la región del Valle de México

De los resultados presentados en las tablas 2.1, 2.2 y 2.3 puede comentarse lo siguiente:

a) El factor de reducción por área decrece con el área de la cuenca. Sin embargo, al parecer no lo hace con la misma rapidez para las distintas regiones mostradas en la tabla 2.1. Esta diferencia puede deberse a la magnitud del área de la cuenca analizada y a las características de la región. Por ejemplo al comparar los resultados para la cuenca del Grijalva (fig. 3.20, Domínguez, 1993) con los obtenidos para el Valle de México (Franco y Domínguez, 1997) se observa que mientras en la primera se tienen factores mayores de 0.86 para áreas menores de 1000 km<sup>2</sup>, para la segunda este límite es de 0.30 para los estudios realizados en 1986 y 0.62 para los llevados a cabo en 1997. En cuanto a los estudios presentados por el Flood Studies Report, la variación del factor con respecto al área es mucho menor que para otras regiones, obteniéndose un valor de 0.80 para un área de 30 000 km<sup>2</sup>, mientras que para los EUA Hershfield y Wilson proponen un valor similar para una área mucho menor (1295 km<sup>2</sup>).

De lo anterior se desprende la necesidad de obtener factores de reducción por área para las distintas regiones de nuestro país debido a que los resultados presentados en la tabla 2.1 no pueden ser utilizados por ser de cuencas con características distintas y para las áreas de interés en cada caso.

b) Al analizar los resultados presentados en la tabla 2.2, con respecto a los factores de ajuste por período de retorno se observa que, para períodos menores de 100 años, los resultados son prácticamente iguales en distintas regiones del mundo. Para períodos mayores no se tienen suficientes resultados, porque no se cuenta con registros lo suficientemente largos, que permitan hacer extrapolaciones confiables, sobre todo en nuestro país.

Para períodos de retorno menores de 100 años se pueden usar los factores mostrados en la tabla 2.2, ya que como se indicó no hay variación de acuerdo con la localización geográfica y es necesario llevar a cabo estudios regionales que permitan obtener con mayor seguridad estos factores para períodos de retorno grandes.

c) De los resultados y comentarios presentados en la tabla 2.3, sobre los factores de ajuste por duración, es claro que para duraciones cortas (menores de 120 minutos), los resultados son muy parecidos para las distintas regiones estudiadas, por lo que puede decirse que este factor no depende de la localización geográfica, ni del tipo de lluvias que en ellas se presentan. Para duración de 24 horas se observa que los factores son muy diferentes de una región a otra.

Por lo anterior, para duraciones menores que 120 minutos, pueden ser utilizados los valores obtenidos por los investigadores mencionados y es necesario estudiar estos factores con duraciones mayores, sobretodo para 24 horas, para las que se tienen registros más completos en nuestro país.

## 2.2 Escurrimientos

### 2.2.1 Métodos de regionalización

A fin de estudiar el efecto de la longitud de los registros, en la predicción de gastos con distintos períodos de retorno, Victorov en 1971, analizó un registro de 68 años (Viessman, 1989), encontrando los resultados siguientes:

- a) El análisis de registros menores de 68 elementos causa incrementos fuertes en el error al estimar gastos para 10, 50 y 100 años de período de retorno. Por ejemplo si se utilizan únicamente los últimos diez años del registro, el gasto con período de retorno de 100 años se incrementa en un 211%, mientras que el correspondiente a diez años, en 62%.
- b) En el caso de utilizar los registros de los últimos 20 años, se obtiene un incremento en la estimación del gasto para un período de retorno de 100 años de 123 %, mientras que si se analizan 60 años, el porcentaje de sobrestimación es del 2%.
- c) El considerar gastos de años secos o lluviosos es también muy significativo en la extrapolación de gastos.

De lo anterior se desprende la necesidad, especialmente en nuestro país donde los registros disponibles no son por lo general muy extensos, de aplicar herramientas de análisis regional que permiten disminuir los errores a que se hizo referencia. Además los resultados generados pueden ser útiles en cuencas no aforadas, dentro de la región en estudio.

La filosofía de los métodos de análisis regional es aprovechar la información disponible de toda una zona, en lugar de analizar los datos de las cuencas por separado, lo que permite conformar muestras con más elementos y por lo tanto estimar eventos de diseño más confiables, sobre todo para períodos de retorno grandes.

Respecto a la clasificación de las cuencas en regiones, esta puede realizarse con criterios geográficos o estadísticos. En el primer caso, se definen regiones en función exclusivamente de sus coordenadas geográficas y a menudo coincidiendo con divisiones administrativas.

El segundo enfoque define las regiones agrupando aquellas cuencas con un comportamiento estadístico similar.

A continuación se describen dos de los métodos más comúnmente utilizados en la actualidad en los análisis regionales (Ferrer, 1992):

## Métodos que suponen valores regionales para el coeficiente de sesgo

Dada la gran variabilidad muestral del coeficiente de sesgo, la mayoría de los métodos consideran de una u otra forma su regionalización. Estos métodos pueden resumirse de la siguiente manera:

### a) Cálculo del valor medio del coeficiente de sesgo o asimetría

El valor regional del coeficiente de sesgo se obtiene por media, aritmética o ponderada según el número de años de la serie, de los valores locales del coeficiente de sesgo, en la zona considerada.

### b) Utilización del conjunto de datos previamente estandarizados

Los datos de cada una de las estaciones se estandarizan mediante la expresión

$$Y = \frac{Q - a}{b}$$

en la que los parámetros  $a$  y  $b$  son calculados a partir de cada muestra de forma diversa (por ejemplo su media y su desviación estándar). A continuación, el conjunto de datos  $N_j$  se trata como una única muestra de tamaño  $L = N_1 + N_2 + \dots + N_M$  a la que se ajusta determinada distribución de probabilidades. Una vez estimados los  $Y_T$  de los valores estandarizados correspondientes a un período de retorno  $T$ , los gastos de cada una de las estaciones  $j$  se obtienen deshaciendo la transformación

$$Q_T = a_j + b_j Y_T$$

El método descrito utiliza la hipótesis denominada **estación año** basada en que  $M$  estaciones con  $N$  años de registro proporcionan información análoga que una estación con  $M \times N$  años.

## Métodos que suponen valores regionales para los coeficientes de sesgo y de variación

Estos métodos son los denominados de **índice de avenida** y suponen que la variable  $X$ , resultante de dividir en cada cuenca los valores por su media  $X = Q/\bar{Q}$ , sigue la misma distribución en toda la región. Los parámetros de la distribución de probabilidades de  $X$ , previamente seleccionada, se obtienen a partir de los datos conjuntos de las distintas estaciones, mientras que el valor de

$\bar{Q}_j$  se obtiene a partir de los datos de cada estación por separado. Así, el gasto para determinado período de retorno en cada una de las cuencas se estima como:

$$Q_T = \bar{Q}_j \cdot X_T$$

La estimación de los parámetros de la distribución regional admite una amplia gama de enfoques.

- a) Uso de la media regional de las relaciones adimensionales  $Q_T / \bar{Q}$  obtenidos en cada cuenca.
- b) Uso de la media regional de los coeficientes de variación y de sesgo.
- c) Utilización del conjunto de datos  $X = Q / \bar{Q}$  que es tratado como una única muestra a efectos de estimación de parámetros y relaciones  $X_T$  utilizando por tanto la hipótesis **estación año**.
- d) Uso de la media regional de los momentos ponderados probabilísticamente, expresados en forma adimensional.

Dado que para la región del alto Grijalva la información con que se cuenta no es muy basta y con base en la experiencia que se tiene de estudios regionales llevados a cabo anteriormente en México, en este estudio se decidió aplicar el método de **índice de avenida con la hipótesis de estación año**.

Cabe hacer notar que en este estudio no se regionalizaron ni el coeficiente de sesgo ni el de variación y que el método se aplicó para obtener tanto curvas regionales susceptibles de ser aplicadas a la zona de estudio en el caso de los escurrimientos, como para el cálculo de los factores de ajuste por período de retorno, en el caso de las lluvias.

#### **Método de índice de avenida utilizando la hipótesis estación-año.**

Este método permite obtener una curva regional que relaciona el período de retorno con los gastos máximos anuales por estación, previamente homogeneizados, de manera que el análisis se hace conformando una muestra muy grande de datos, que contiene tantos elementos como estaciones-año se consideren en el análisis.

Adicionalmente pueden relacionarse los resultados obtenidos del análisis de frecuencia efectuado, con las características fisiográficas de las cuencas, lo que permite estimar gastos de diseño en sitios sin registros hidrométricos, ubicados en la región estudiada.

El proceso para aplicar este método consiste en los siguientes pasos:

a) Se eligen las estaciones a considerar en el análisis procurando que tengan características hidrológicas semejantes.

b) Se obtienen los gastos máximos anuales registrados el año  $i$  en la estación  $j$ ,  $Q(i, j)$ , para todas las estaciones. Cuando se compruebe que varias de ellas tengan máximos provocados por el mismo evento (lo que puede hacerse verificando las fechas de ocurrencia), debe considerarse sólo el máximo de todos.

c) Se aplica alguna prueba de homogeneidad de manera de conformar subgrupos, en caso necesario.

d) Se forman muestras de datos homogeneizados, mediante la función de transformación  $T(j)$

$$T(j) = 1 / \bar{Q}(j)$$

donde  $\bar{Q}(j)$  es el promedio de los gastos máximos anuales de la cuenca  $j$ .

e) Se forma una muestra con todos los datos de las estaciones a considerar, obtenidos en el punto d.

f) Se ajustan distribuciones de probabilidad a la muestra anterior, a fin de extrapolar para los períodos de retorno deseados.

g) Contando con esta curva regional, bastará aplicar el proceso inverso cuando se desee obtener gastos de diseño en una cuenca particular.

### 2.2.2) Trabajos en el extranjero.

Para Inglaterra, el *Natural Environment Research Council*, llevó a cabo estudios de regionalización (*Flood Studies Report*, 1975), se analizaron diez regiones de este país, además de Irlanda. La función de distribución utilizada fue la de Valores Extremos Generalizados (GEV, por sus siglas en inglés), estimando sus parámetros en forma gráfica y considerando la hipótesis estación-año (Acreman y Siclair, 1985; Wallis y Wood, 1985).

Los autores obtuvieron curvas que relacionan el período de retorno con el cociente gasto-gasto medio máximo anual ( $\bar{Q}$ ) para cada una de las regiones mencionadas. Estas curvas pueden apreciarse en la fig. 2.14, volumen 1(*Flood Studies Report*).

Adicionalmente encontraron que estas curvas siguen la ley:



$$\frac{Q}{\bar{Q}} = \mu + \frac{\alpha(1 - e^{\alpha})}{k}$$

Los valores de los parámetros  $\mu$ ,  $\alpha$  y  $k$  se muestran en la tabla 2.38, volumen 1 (*Flood Studies Report*)

Asimismo del análisis de la relación entre el gasto medio máximo anual y las características fisiográficas y de precipitación de las regiones estudiadas, se propone la ecuación siguiente:

$$\bar{Q} = C.AREA^{0.94} .STMFRQ^{0.27} .S1085^{0.16} .SOIL^{1.23} .RSMD^{1.03} .(1 + LAKE)^{-0.85}$$

donde

C, coeficiente que depende de la región, varía de 0.0172 a 0.0315, tabla 4.20g , volumen 1 (*Flood studies Report*) o fig 9.7 (Wilson, 1990).

ÁREA, es el área de la cuenca, en km<sup>2</sup>.

STMFRQ, densidad de corrientes (confluencias/km<sup>2</sup>).

S1085, es la pendiente entre dos puntos localizados al 10 y 80 % de la longitud total del cauce principal, a partir de la salida de la cuenca (m/km).

SOIL, Índice de suelo, varía de 0.15 a 0.50 (fig 4.18, volumen 5, *Flood Studies Report*).

RSMD, precipitación neta en 24 horas, para 5 años de período de retorno, en mm (fig 7.25, 7.26 y 7.27, Wilson, 1990).

LAKE, porcentaje de la cuenca formada por lagos o vasos.

El modelo anterior tiene algunas variantes; por ejemplo, cuando se trata de cuencas urbanas, las ecuaciones correspondientes se encuentran en la misma referencia.

Hosking (1985), con el fin de revisar los resultados presentados en el *Flood Studies Report* (1975) aplicó el algoritmo utilizado en dicho estudio, con muestras de datos reales y sintéticos, usando la técnica Monte Carlo de simulación.

Según el autor los cálculos presentados en el *Flood Studies Report* (1975) resultaron hasta cuatro o cinco veces mayores que los que él determinó, aunque aclara que las series actuales son bastante más largas, por lo que recomienda completar la base de datos existente.

Wilson (1990) presenta curvas (figuras 11.1 a 11.4 de su publicación), que relacionan el período de retorno con la relación  $Q_T/\bar{Q}$ , para distintas regiones del mundo. Según el autor no influye únicamente el clima y la topografía, en la forma de estas curvas, sino también otros factores como son el área, tipo de suelo y tipo de vegetación.

### 2.2.3 Trabajos en México

Para la cuenca del río Papaloapan, Domínguez (1981) analizó 21 estaciones y la función de mejor ajuste resultó ser la Gumbel. Asimismo, relacionó los

parámetros de ajuste de la función Gumbel con las características fisiográficas de cada cuenca, encontrando las siguientes ecuaciones:

$$c = \frac{A_r^{0.4541} \cdot P^{1.0267}}{2.69t^{0.36}}$$

$$a = \frac{A_r^{0.4126} \cdot I^{1.461}}{381.5t^{0.275}}$$

donde:

$A_r$  área de la cuenca, en  $\text{km}^2$

$P$  precipitación diaria con período de retorno de 10 años

$I$  precipitación media anual en mm

$t$  tiempo de retraso, en min

Por último, utilizando estos parámetros formó una muestra homogénea de 372 datos, a los que les ajustó una función de distribución del tipo Gumbel.

Domínguez et al (1990) analizaron regionalmente 35 cuencas expuestas a la incidencia directa de ciclones, 15 que vierten al centro y norte del Océano Pacífico y 20 al centro y norte del Golfo de México.

Utilizaron la función de transformación, función del área, siguiente:

$$q_k = \frac{Q_{ij}}{(A_i + 259)^{0.8}}$$

donde:

$q_k$  son los gastos transformados y el índice  $k$  va de 1 al número de estaciones-año disponibles en la región

$Q_{ij}$  son los gastos máximos anuales registrados en la estación  $i$ , el año  $j$ , en  $\text{m}^3/\text{s}$ .

$A_i$  es el área de la cuenca  $i$ .

La ecuación regional obtenida fue la siguiente:

$$F(q) = p(\exp(-\exp(-(q+a_1/c_1)))) + (1-p)(\exp(-\exp(-(q+a_2/c_2))))$$

cuyos parámetros para las dos regiones estudiadas son

	$p$	$a_1$	$a_2$	$c_1$	$c_2$
Pacífico	0.8	-0.50	-1.5	1	3.5
Golfo	0.93	-0.4	-7.5	0.6	1.9

Así, conocido  $F(q)$ , el gasto en cualquier cuenca se determina de la siguiente manera:

$$F(Q) = (A_i + 259)^{0.8} \cdot F(q)$$

donde el área se expresa en km<sup>2</sup>.

Según los autores las ecuaciones anteriores son válidas para cuencas sujetas a la incidencia directa de ciclones y sin protección de barreras montañosas que impidan el paso de este tipo de eventos.

Para el Golfo de México, regiones hidrológicas 25, 27 y 24 oriente, Fuentes (1991) usó la ecuación de transformación anterior para el análisis de 22 estaciones y considerando la hipótesis de estaciones-año, formó un registro de 469 datos, a los que les ajustó una función de distribución Doble Gumbel. Encontró los siguientes parámetros de ajuste:

$$a_1=0.4; a_2=7.5; c_1=0.6 \text{ y } c_2=1.9$$

Para comprobar que los datos pertenecían a la misma región, aplicó la prueba de homogeneidad de Langbein (Dalrymple, 1960).

Vázquez y Domínguez (1993) estudiaron las regiones hidrológicas 10 (Sinaloa), 9 (Sonora sur) y 7 (Río Colorado). Como parámetros de transformación utilizaron el área de la cuenca, el gasto medio máximo anual y el gasto para período de retorno de 25 años, encontrando que los mejores resultados son los siguientes:

Región hidrológica	Variable transformada	Función de ajuste
7	$q_2=Q_{\text{máx}}/Q_{25}$	Doble Gumbel
9	$q_2=Q_{\text{máx}}/Q_{25}$ $q_3=Q_{\text{máx}}/A^{0.8}$	Doble Gumbel
10	$q_2=Q_{\text{máx}}/Q_{25}$	Doble Gumbel

y los parámetros de la función Doble Gumbel mostrados a continuación:

	Región 7	Región 9 ( $q_2$ )	Región 9 ( $q_3$ )	Región 10
$a_1$	-0.25	-0.212	-0.13	-0.1282
$a_2$	-0.03	-0.19	0.06	-0.5332
$c_1$	0.18	0.2161	0.1077	0.0647
$c_2$	0.7	0.45	0.43	0.35
$p$	0.7	0.7	0.7	0.8

Carrizosa (1997) estudió seis métodos de transformación para obtener muestras estandarizadas: parámetros estadísticos de la función Gumbel, gastos medios diarios asociados a un período de retorno prefijado, diferencia entre gastos medios diarios asociados a dos períodos de retorno prefijados, área de la cuenca, desviación estándar de los gastos medios diarios máximos anuales y promedio de los gastos medios diarios máximos anuales. El último de estos métodos arrojó mejores resultados, sin embargo, los demás tampoco provocaron errores significativos.

### 2.3 Características fisiográficas de la región estudiada.

Se seleccionó la región del alto Grijalva situada aguas arriba de la Presa Malpaso, que pertenece a la Depresión Central de Chiapas y se caracteriza por estar protegida de la incidencia directa de huracanes. El área total de la región considerada es de 30,570 km<sup>2</sup> y no incluye la parte correspondiente a Guatemala para la cuál no se encontró suficiente información confiable.

El río Grijalva es la corriente más importante del estado de Chiapas, el área total de su cuenca colectora es de 57,040 km<sup>2</sup> hasta su desembocadura en el Golfo de México; abarca parte de Guatemala y de los estados de Chiapas y Tabasco. La parte guatemalteca es aproximadamente del 10% y los restantes 51,270 km<sup>2</sup> (90 %) corresponden a territorio mexicano.

Aproximadamente un 50 % de la cuenca se encuentra alojada en la Depresión Central de Chiapas, con orientación noroeste y el resto se orienta al norte, ocupando parte de la planicie costera y la vertiente orográfica del Golfo de México (Escobar, 1991). Esta cuenca en la parte alta y media de su zona poniente, queda delimitada por el parteaguas que sigue aproximadamente una paralela a la línea costera del Océano Pacífico, a una distancia que oscila entre los 40 y 80 km., desde la frontera con Guatemala hasta los límites de Oaxaca y Chiapas. En la cordillera de la Sierra Madre de Chiapas, dicho parteaguas se dirige al noreste encimándose, por así decirlo, con la línea divisoria de los estados de Chiapas y Veracruz hasta llegar al Golfo de México. Por su parte oriente, el parteaguas está formado por la línea sinuosa que une los puntos más elevados de las Montañas del Oriente y las Montañas del Norte, pasando por el Altiplano Central (figura 2.1).

Dada la configuración topográfica de su cuenca y la ubicación del cauce, los afluentes de la margen izquierda del río Grijalva son mas numerosos y de mayor caudal que los de la margen derecha, con excepción de los aportadores que escurren del frente orográfico de la región oriente de la zona del bajo Grijalva, como los ríos Tacotalpa y Tulijá, entre los más importantes.

La longitud total del río Grijalva es de aproximadamente 700 km.; nace en Guatemala en la Sierra de los Cuchumatanes donde recibe el nombre de Cuilco, al entrar a México se le incorporan los ríos Lagartero, Dolores y Selegua que al confluir forman el río San Gregorio. Por otro lado el río San Miguel, cuyo origen se sitúa también en Guatemala, baja de la Sierra de Soconusco y se une al río San Gregorio dando origen al Grijalva. Este corre en dirección noroeste, atravesando el Valle de Chiapas en donde se le conoce como río Grande de Chiapa. Recibe por su margen izquierda las aportaciones de los ríos Salinas y la Concordia, y por su margen derecha las de los ríos Blanco y Angostura. En seguida recibe al río Dorado, allí modifica su rumbo, al noreste, y continúa hasta la población de Santa Cruz en donde modifica su cauce al noroeste; 2.5 km. al sudoeste de la población Chiapa de Corzo recibe la aportación del río Santo Domingo; pasa junto a dicha población y sale del Valle de Chiapas por el Cañón del Sumidero. Continúa con el mismo rumbo hasta llegar al vaso de la presa Netzahualcoyotl (Malpaso); a lo

largo de este recorrido recibe por su margen izquierda la contribución del río De La Venta y el Sabinal, mientras que por la derecha las de los ríos Hondo, Chicoasén y Yamonhó.

Entre las presas Netzahualcoyotl (Malpaso) y Ángel Albino Corzo (Peñitas) el río recibe la aportación, por la margen derecha, de los ríos Tzimbac, Sayula, y más abajo de los ríos Platanar y Paredón.

Actualmente, 10 km. aguas abajo del sitio donde estuvo la estación hidrométrica El Dorado, de la Comisión Nacional del Agua, el río sufre una bifurcación debido al nuevo cauce que abrió hacia su margen izquierda en 1932, brazo que recibió el nombre de río Samaria y cuyo rumbo es hacia el norte, hasta desembocar en el Golfo de México. Finalmente, la parte derecha está dividida a su vez en dos corrientes; una localizada al norte, llamada río Carrizal y otra al sur, el río Viejo Mezcalapa.

En esta cuenca hidrológica, los sistemas meteorológicos que establecen las condiciones de precipitación en cualquiera de sus magnitudes, son inicialmente las depresiones, ondas tropicales y zonas de inestabilidad convectiva que se desarrollan en el mar Caribe y Océano Pacífico permitiendo la entrada de aire marítimo tropical saturado de humedad; en condiciones favorables para su expansión, estos meteoros pueden convertirse en tormentas o huracanes que provocan que fuertes lluvias se generalicen en toda la cuenca, produciendo avenidas que arrojan miles de millones de metros cúbicos de agua.

Debido a las magnitudes y períodos de ocurrencia de la precipitación en la cuenca, es necesario dividirla en tres zonas: alta, media y baja, que quedarían limitadas en el embalse de la Central hidroeléctrica (C.H.) Belisario Domínguez (Angostura), la parte media en el embalse de la C.H. Malpaso (Netzahualcoyotl) y la baja en la desembocadura al Golfo de México.

En las partes altas y medias normalmente se tiene un período de lluvias de mayo a octubre, como puede observarse en la figura 2.2, correspondiente a la estación climatológica Villaflores; mientras que en la parte baja se tienen dos períodos, de diciembre a febrero y de mayo a octubre, lo que puede apreciarse en la figura 2.3, de la estación Pichucalco. Con objeto de ilustrar la magnitud de la precipitación en las zonas mencionadas se presenta la tabla siguiente:

Zona	Nombre de la estación	Precipitación media anual (mm)
Alta	Comitán	1020
Media	Tuxtla Gutiérrez	917
	Las Flores (Jiquipilas)	973
	La Cabaña (San Cristóbal)	1021
	Villa Flores	1143
Baja	San Joaquín (Pichucalco)	3570
	Salto de Agua	3127

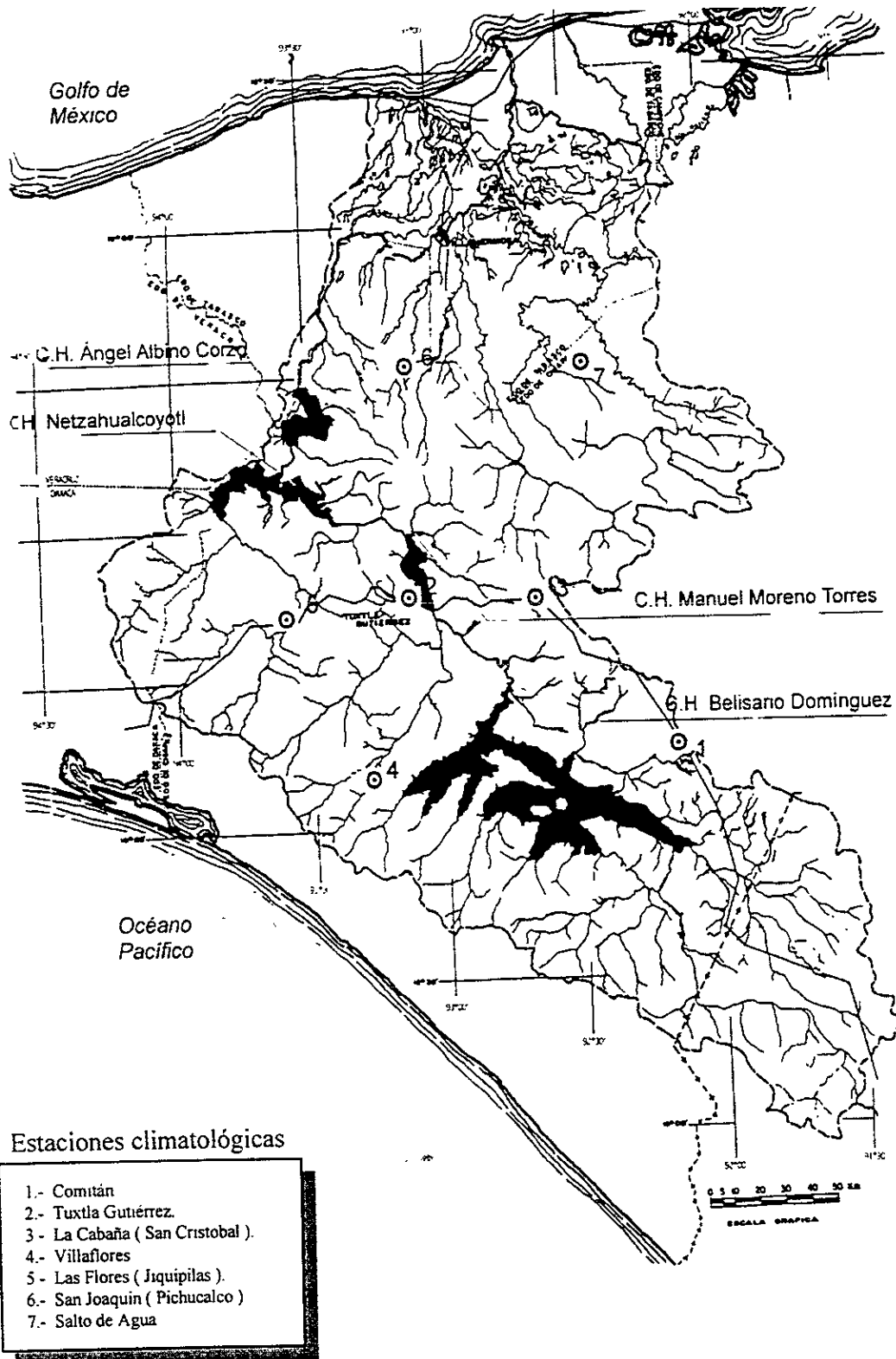
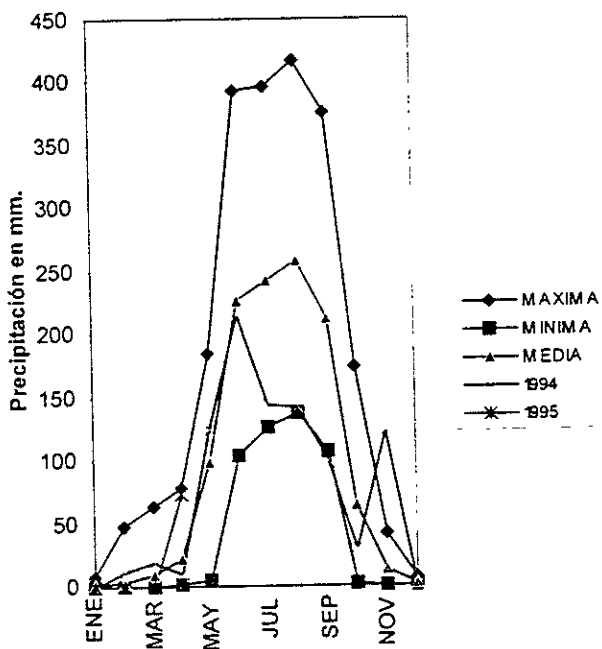
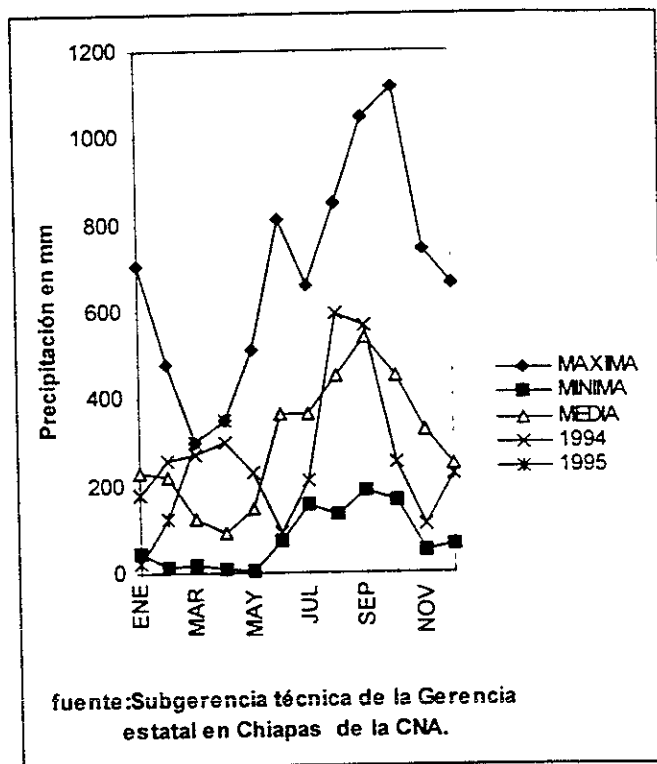


Figura 2.1 Cuenca del río Grijalva.



fuelle: Subgerencia t6cnica de la Gerencia estatal en Chiapas de la CNA



fuelle: Subgerencia t6cnica de la Gerencia estatal en Chiapas de la CNA.

Figura 2.2 Estaci6n climatol6gica Villaflora

Figura 2.3 Estaci6n climatol6gica Pichucalco

Al analizar los registros de precipitaci6n se ha podido determinar para la cuenca del Grijalva una precipitaci6n media anual de 1,850 mm, misma que se ha estimado puede transformarse en un escurrimiento medio anual del orden de 21,930 millones de metros c6bicos y producir una generaci6n media anual aproximada a los 10,688 millones de kw h.

### 3 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.

En cuanto a lluvias para duración de 24 horas, se trabajó fundamentalmente con los datos contenidos en la base de datos CLICOM, elaborada por el Servicio Meteorológico Nacional, complementada con la información de archivos originales proporcionada por la Gerencia Estatal en Chiapas de la CNA y por la División Hidrométrica Sureste (DHS) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Con respecto al cálculo de los factores de reducción por área, un análisis preliminar permitió definir un período base de 1965 a 1983, para el que se construyó un archivo de precipitaciones diarias registradas en 42 estaciones pluviométricas. Adicionalmente se seleccionaron otras 29 estaciones pluviométricas con más de 14 años de registro, aunque no en el período común 1965-1983. Con los datos de las 71 estaciones se formó otro archivo con las precipitaciones máximas correspondientes a cada año de registro (fig. 3.1 y tablas 3.1 y 3.2)

Los datos de la tabla 3.2 también fueron utilizados para la obtención de los factores de ajuste por período de retorno y duración. Para el cálculo de éstos últimos, se consideraron las precipitaciones con duración de una hora de algunas estaciones, mismos que fueron proporcionados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y por la DHS de la CFE (tabla 4.10, pag. 71).

Los gastos máximos anuales registrados en las nueve estaciones hidrométricas seleccionadas se obtuvieron de la base de datos BANDAS conformada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y de datos proporcionados por la DHS de la CFE (tabla 5.1, pag. 81).



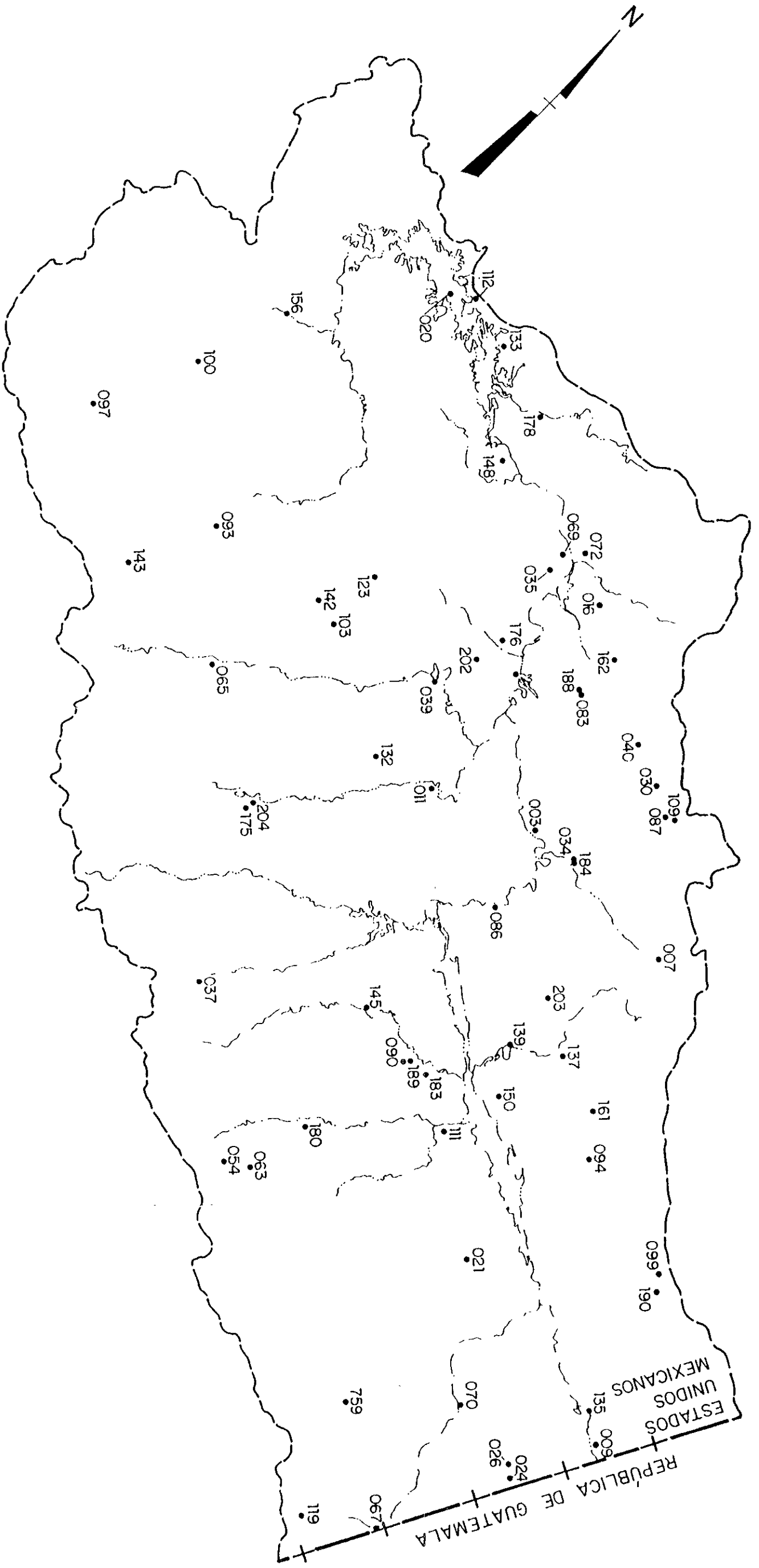


Fig 3.1 Estaciones consideradas en el estudio (numeración CLICOM)

No	Clave CLICOM	Nombre de la estación	Latitud	Longitud
1	07003	Acala, Acala	16 39	92 57
2	07005	Almandro, Huitupan	17 11	92 40
3	07007	Amatenango del Valle	16 32	92 27
4	07009	Aquespaia, Comalapa	15 48	91 51
5	07016	Bombaná, Bochil	16 57	93 01
6	07020	Campamento Dique 2 y 3	17 11	93 37
7	07021	Catarinitas	15 54	92 20
8	07024	Bellavista, Comalapa	15 37	92 09
9	07026	Cd. Cuauhtemoc, Comalapa	15 39	92 00
10	07027	copainalá, Copainalá	17 05	93 13
11	07030	Chamula, Chamula	16 48	92 42
12	07034	Chiapilla	16 31	92 45
13	07035	Chicoasén, Chicoasén	16 57	93 06
14	07037	Cuxtepeques	15 56	93 04
15	07039	El Boquerón	16 39	9309
16	07040	El Burrero, Ixtapa	16 48	92 31
17	07050	El Progreso, Tecpatán		
18	07054	Finca Anexo Prusia	15 50	92 40
19	07063	Finca Liquidambar	15 44	92 45
20	07065	Finca Ocotlán, M. Ocampo	16 23	93 28
21	07067	Amatenango Frontera	15 26	92 07
22	07069	Grijalva, Chicoasén	16 58	93 08
23	07070	Guadalupe Grijalva	15 43	92 10
24	07074	Horcones, Tonalá	15 56	93 34
25	07083	Ixtapa, Ixtapa	16 48	92 54
26	07084	Jesús Chiapas, Tonalá	15 52	93 28
27	07086	La Angostura, V. Carranza	16 24	92 46
28	07087	La Cabaña	16 45	92 38
29	07090	La Concordia	16 05	92 40
30	07091	La Escalera	16 29	93 01
31	07093	La Libertad, Jiquipilas	16 33	93 43
32	07094	La Mesilla	16 12	92 15
33	07097	La Providencia	16 33	93 59
34	07099	La Trinitaria, Zapaluta	16 07	92 03
35	07100	La Unión, Cintalapa	16 35	93 53
36	07102	Las Flores, Jiquipilas	16 42	93 34

Tabla 3.1 Estaciones consideradas en el estudio

No	Clave CLICOM	Nombre de la estación	Latitud	Longitud
37	07103	Las Limas, Ocozocuaútlá	16 42	93 22
38	07106	Las Peñitas, Ostoacán	17 26	93 29
39	07109	Los Arcos	16 45	92 38
40	07111	Los Vados, La Concordia	16 02	92 32
41	07112	Malpaso, Tecpatán	17 13	93 35
42	07119	Motocintla, Motocintla	15 22	92 14
43	07121			
44	07123	Ocozocuaútlá	16 42	93 22
45	07132	Portaceli, Villaflores	16 28	93 06
46	07133	Presa Netzahualcoyotl	17 10	93 29
47	07134	Puente Colgante	16 45	93 03
48	07135	Puente Concordia	15 51	91 58
49	07137	Pujilic, V. Carranza	16 17	92 28
50	07139	Río Blanco	15 13	92 32
51	07142	San Antonio	16 33	93 26
51	07143	San Clemente, Jiquipilas	16 22	93 28
53	07135	San Francisco	16 06	92 41
54	07148	San Juan, San Fernando	17 02	93 20
55	07150	San Pedro Chiapas	16 09	92 30
56	07156	Santa María, Cintalapa	16 57	93 48
57	07159	Siltepec, Siltepec	15 40	92 16
58	07161	Socoltenango	16 15	92 15
59	07162	Soyaló	16 53	92 55
60	07170	Tzimbac, Tecpatán	17 18	93 29
61	07175	Villaflores	16 12	93 16
62	07176	Tuxtal Gtz (vivero, CFE)	16 46	93 08
63	07178	Yamobhó, Tecpatán	17 07	93 20
64	07180	Jaltenango, A.A. Corzo	15 55	92 43
65	07183	Benito Juárez	16 06	92 38
66	07184	Chiapilla, CFE	16 30	92 43
67	07188	Ixtapa, Ixtapa (CFE)	16 48	92 54
68	07189	La Concordia	16 05	92 38
69	07190	La Trinitaria	16 07	92 02
70	07102	Tuxtla Gutiérrez (DGE)	16 45	93 07
71	07203	Venustiano, Carranza(SMN)	16 20	92 33
72	07204	Villaflores (DGE)	16 14	93 15

Tabla 3.1 Estaciones consideradas en el estudio (continuación)

Tabla 3.2. Precipitaciones máximas anuales, en mm.

AÑO	ESTACIÓN ( numeración CLICOM )														
	7003	7005	7007	7009	7016	7020	7021	7024	7026	7027	7030	7034	7035	7037	7039
1927										90.3					
1928										56.5					
1929										93.5					
1930										0					
1931										140					
1932															
1933										91					
1934										72					
1935										98.5					
1936										77					
1937										85.5					
1938										5.5					
1939										48.5					
1940										80.9					
1941										80					
1942										20.5					
1943										25					
1944										18					
1945					71.5					47		40			
1946					61.3					20		45			
1947					70.5					29		68			
1948					68					75		62			
1949					80					80		60			
1950					123					100		45			
1951					75					202		60		122	45
1952					65							60		94.5	35.5
1953					57							62		55	32.5
1954					104					42		63		175	57.5
1955					73.6					124		42		112.6	41.5
1956					78					60		68		106.5	126.6
1957					60					45		62		77.5	34
1958					54.5					60	59.2	48		92	120
1959					60					80	43.5	42		68.5	64
1960					69					60	75	42		77	135
1961				24	0				88	75	60	48	48	120	55
1962				20	0				56	36	50	109	61.5	139	62
1963				20	0	117.5			88.5	105	60	67	66	176	63.5
1964		51	17	25	0	138			87	26	46.1	76	84.1	141	76.5
1965	56	68	72	90	56.5	130			128.5		54	186	53.4	64	63.3
1966	62	60	70	78.8	76.5	109.8			82.5	30	64	29	66.5	97.5	73.3
1967	59	159	50	60	63.5	260	86.0	68	97	62.5	60	79	59	56.5	58.5
1968	64	64	70	60.5	64.8	304.7	70.5	88	77.5	52	37	58	89	85	50.5
1969	147	80.8	80	85	61	126.2	109.0	95.6	83.9	68.5		135	70.4	105	55
1970	80	117	50	78.5	66		72.4	146.1	160.3	21		83	49	57	60.5
1971	58	65.5	42	52.4	53.5		63.1	0	100.4	12	41	63	51	67	92
1972	114	78	37	63.5	53	110	75.0	51.5	75		39	71	66.7	63	48
1973	95	100	54	60	137	127.4	94.0	72	91.2	16	92.5	101	116	90	76.1
1974	48	130	102	87.1	72	201	47.0	70	68	20	105.5	46	62.5	181	91.5
1975	66	121	104	76.3	38.5	115.2	47.0	90	100.3	61	82	74	46	83	68.1
1976	200	68	51	75	48	115	59.4	81.5	72.4		44.5	83	75.5	75	60
1977	54	57	56	80	84	155.4	73.4	82	97		79.2	71	57	95	77
1978	1	85	95	49.5	59	66		113.5	110		80	68	72.5	71.7	60
1979	93	70.5	73	131.1	71.5	140		179.5	220		41	87	82	60.6	70
1980	111	83.5	51	76.6	39	116.5		118.5	127.3		40	102	63.5	206	71.5
1981	67	72	67	190.6	52.5	110		93.5	87.7		41	87	70	60	60
1982	105	57	59	123.6	51.5	118.8		86.2	67.4		34.5	100.2	70.9	135	69.5
1983	67	63	84	90.1	55.5	70.6		65.2	64.3		85	77	57.6	98	74.9
1984		96			53.5				78			78	73.9	65	
1985		51.8			58.5				68.5			88.5	87.6	141	
1986		113.6			95.5				71			64	96.7	86	
1987		106.9			95				97.5			90	108	67.5	
1988		77.2			65.5				102			40	66.3	129.7	
1989		95.5			62.5				84.1			56	65	117.3	
1990		89.9			60.5				71			92	48	64.8	
1991														102.3	
1992														81.2	
1993														95.5	
1994														71.5	

Tabla 3.2. Precipitaciones máximas anuales, en mm (Continuación).

AÑO	ESTACIÓN ( numeración CLICOM )														
	7040	7050	7054	7063	7065	7067	7069	7070	7074	7083	7084	7086	7087	7090	7091
1940															
1941															
1942										13					
1943										14					
1944															
1945															
1946										66					
1947										59					
1948										62					
1949										78					
1950										100					
1951	97									80				56.2	
1952	77									180				76.2	
1953	94									50				96.4	70
1954	79	130.5	81	96						70				72.6	76
1955	67	86	143.9	197						85.3				77.3	65
1956	68.5	147	107	87						60			42.5	143	70
1957	52	81.5	78	97		42				40.5			53	82.5	74
1958	94.5	75	101.4	84		34.5				40.5			69.5	86.5	113
1959	103.5	100	68.3	69		31.5				70.3			77	86.5	62
1960	62	93.5	68.5	88		25				60.3			97	81	80
1961	54	120	88.2	74	60.4	36		100					84	64.5	68
1962	57	72	135.5	109	62	32		100				69	58	83.5	73
1963	46		138.4	110	90.7	44		100				94.5	82	100	75
1964	40		77.7	72		21		89			96	93	42.5	60.5	75
1965	52.1		85	89	62	21	58.5	60	100.3		81.3	73	42.5	91	67
1966	58		91.8	105	65	21	71	100	84.2		105.2	81.5	57.5	96.5	77
1967	54.3	257	73	69	71		61.9	70	91.4		93.3	61	59.5	72	80
1968	71	80	117.3	115	36		52.8	68	104.5		112	109	46.5	120.5	67
1969	45.8		86.7	108			57	60	143.3	30.5	104.7	81	60	87.5	103
1970	62.2	116	90.1	93		201.4	40	60	111	40	102.8	89	60.5	98	99
1971	51		144	62	49.5	40.8	50	70	100		93	72.5	50		120
1972	54	112.5	84.9	96	34	40.5	48.1	70.8	128.2	60	135.5	50	32.5	99	60
1973	117.5	120	122.7	81	67.2	40.1	140.4	115.5	155.5	35	128.6	90.5		86	55
1974	84.3	125	101.6	113	64.5	20.4	64.6	81.4	131	32	166.9	116	55.5	67.9	89
1975	64.6	93	100.9	72	95	0	40.2	91.6	94	35	120	69.6	44		83
1976	45.5	67.5	66.6	89	40.9	201.7	82.6	46.2	90	101.5	97.8	85.8	71.1		108
1977	67.5	81	93.5		55.3	20.1	65.9	85.2	97.3	18.5	126	80	43.4		64
1978	58.5	47	92.4		76.4	20.8	90	81	152.5	8	165	74	54.3		74
1979	58.4	95	75.3	57		60	110	95.4	120.5		131.5	89.4	45.8		69
1980	107.4	80	112.5	129	65	40.5	75	63.6	88		214.5	104.6	98.7		70
1981	63.6	180	73.5	105	70.6	20.9	77.7	60	160.5		129.1	112.6	38.9		59
1982	93	100.3	109.1	80	65	40.5	76.2	137.2	142		90.6	85	65.6		55
1983	84		100	95.2	73	40.7	87.2	60	64.5		73.3	84.5	84		75
1984			93.8			40.7						81			
1985			102.5			40.2						111			
1986			93.4			35						71			
1987			138.3			33						67.5			
1988			138.4			61.8						60.4			
1989			99.4			66.3						71			
1990						36.9						61.8			
1991															
1992						140									
1993															
1994						40									
1995															

Tabla 3.2. Precipitaciones máximas anuales, en mm (Continuación).

AÑO	ESTACIÓN ( numeración CLICOM )													
	7093	7094	7097	7099	7102	7103	7106	7109	7111	7112	7119	7121	7123	7132
1922											22.2			
1923											55			
1924											29			
1925														
1926											29.8			
1927											31.3			
1928											30.2			
1929											23.4			
1930											26.2			
1931											27.5			
1932														
1933											61.3			
1934											30			
1935											39			
1936											52			
1937											40.5			
1938											23.2			
1939											27.7		73.4	
1940											23.3		71.5	
1941											50.7		70	
1942											11		39.1	
1943													94	
1944											79		64.5	
1945											41		61	
1946											33		45	
1947				36							30.6		62	
1948				28.6							23		63	
1949				30	71						46		57	
1950				35.5	0						33.5		20	
1951				84	55.2						30.5		80	
1952				65.3	60						32		68	
1953				49.3	68						52.4		62	
1954				88.5	87					240	57.2		58	
1955				63	64					155.5	76.5		78.5	
1956				93.5	76			17.5		164.5	37.2			
1957				64	45			43.5			23.5		45	
1958				55	33			40.5			74	95	63	
1959				50	70			58.5		86.4	45.2	68	76	
1960				165	80			47		92	65	114	67	
1961			49	50	56.4			45.5		125.6	36	53	88	
1962			75	56	75.2			53.5	142.5	73.5	50.2	81	49	73.5
1963	90.3		164	28.5	88.8			78.5	81	140	75		81	69
1964	58		57	91	78.3			63.5	75	141.5	54	119.5	72.5	85
1965	75		78.2	58	55.5			86	75	91.5	44	128.3	81	66.5
1966	4.4		87	50	71.6			53	120	76.5	32.5	166.6	113	67.5
1967	4		60	75	63.4			65	70	250	42.5	95.2	93.5	93.5
1968	36		60	45	67.5		150.5	65	101.3	140	33	71.6	58	61
1969	40.7		56	70	92		146.7	62	58	85	39	92.9	63	61
1970	80			51	61.8	73	171.4	47.5	97.5	116.5	65.5	90.8	57.5	74.4
1971	88.5		100	43	85.5					85				91
1972	80.5	85		48	100.3	66	178.6	55	71	80	43.5	100	80	77
1973	85	53	61.5	70	108	75	123.6	55.5	98.5	88.9	70.5	100.2	98	72.5
1974	80.5	86	70	50	110.5	126	167.5	48.6	25.5	125.8	43	90.4	97	91
1975	84	63	40.9	73	84	60	126.7	52.4		95.2	42.5	84.9	53	54
1976	90.3	65	65.8	51	73.8	66.2	129.8			96	34	130	51.5	73
1977	80.5	44	54.7	50	68.7	58	96.4			128	55.8	97.6	60.5	41
1978	70	75	55	83	114.8	52	170.6			107	33.8	107.5	68	56
1979	100.4	66	31	56	81	124	135.3			149.2	48	121.1	91.5	
1980	127	46.5	165.9	69	94.5	57	182.6			123	140.7	66.9	83	47
1981	135	85.5	49.2	89	67.3	57.5	237.2			97		143	52.7	70
1982	100	80.5	100.6	49	82.7	101.2	158.7			104.4		60.3	52.7	74.5
1983	80	76.5	48.8	76	76.7	76.5	93.7			80		107.5	46	53
1984				68			0					107.6	80	
1985				42			0					94.8	53.5	
1986				63			0					156.4	106.9	
1987							0					154.3	48.3	
1988							197.5					106.3	80	
1989							230					194.2	93.2	
1990							120					89.4	96	
1991												65.7	71.6	
1992												70.7	68	
1993												148	153	
1994													54.5	
1995													67.7	

Tabla 3.2. Precipitaciones máximas anuales, en mm (Continuación).

AÑO	ESTACIÓN ( numeración CLICOM )														
	7133	7134	7135	7137	7139	7142	7143	7145	7148	7150	7156	7159	7161	7162	7170
1947															
1948															
1949															
1950								51 5							
1951		76 5						70							
1952		65						48 5		90 4					
1953		91 5						64 5							
1954		69		87 5				62 3		80					
1955		110 4		91				38 3		116					
1956		60 5		101				34 7		52					
1957		62		80				29 3		59					
1958		87		56				49 6		58 6					
1959		86 1		88				55 6		75 5					
1960		75 3		66 5				54 3		62 6					
1961		115 4	82 5	70 5				45 5	126	69 5	89 8			40	
1962		63	67 5	82				38 7	49	67 2	127 5			71	106
1963		49 5	54 5	57	59 5			38 4	107 5	96 5	90			83 5	166 4
1964		52 6	88 5	60	58 5			49	80	67 5	112			62 5	200
1965	60	64 8	62 4	60 5	51 5	117		52 2	131	54 5	133 4			50	107 7
1966	18	75	66 9	124	63	72		127 8	106	83	63 6			65 5	104 5
1967	60	75 1	58 1	72	69	66 6		70	180	53	131 4			60 5	237 5
1968	68 3	52 9	64 5	118	99	51		71 8	60	84	84 6			64	125
1969	77 2	75 7	65 5		71	76		90 5	91	72	102 5	14	2	68 5	92 3
1970	114 5	75 2	70	52	77 5	80		80	78	83	93 8	48	80	63 5	121
1971		78	54	68	64	56		60			81 8			60	
1972	82	50	58	98 5	97 5	98 6	100	97	73	60	125 8	63 5	70 5	60	163 9
1973		94	53 6	105	85	107 4	37	140 1	114	76	112	26		200	145 5
1974	360	50	67	67	98 5	72	85	58 5	170	34 2	92 7	60 8	490	73	157 5
1975	88 2	75 7	89 5	41 5	75	80 1	87	130	95	65	101 2	46	69	49	158 7
1976	51	63 7	70 1	66	59 5	71 2	46	71 5	46	89	82 8	21	75	60	83
1977		36	57 5	86	50	55 6	39	60	40		103 5	24	300	92	150 1
1978		55 2	49 4		91	82 7	52	88	78 5	30	90 1	42	70	78	113
1979		110	87		136 5	112 8	52	100	166		127 1	47	49 5	52	156
1980		100 3	88 5		51	60 4	45	32 5	45 7		110 8	58	106 5	48 5	74
1981		86 4	85 5		72 8	72 3	60	115 5	110		80 3	52	153	39	112 5
1982		131	100 8		64 5	85	53 5	52 6	68 5		91 2	77	99	77	236 5
1983		120 3	86		82 7	87 4	95	48 6	51 5		98 8	34	107	60	170 4
1984			89 5		75			79						42	
1985			84 5		83 5			64 4						35	
1986			77 8		148			66						52	
1987			56 4		69			54 6						62	
1988			60 5		73 5			84 6					66	47	
1989			91 4		70			63					60	42	
1990			61 3		62			101					85	46	
1991			67 9					86							
1992								67							
1993								109							
1994								76							

Tabla 3.2. Precipitaciones máximas anuales, en mm (Continuación).

AÑO	ESTACIÓN ( numeración CLICOM )											
	7175	7176	7178	7180	7183	7184	7188	7189	7190	7202	7203	7204
1927	66											
1928												
1929												
1930												
1931												
1932												
1933	66.6											
1934	62											
1935	52.4											
1936	95.2											
1937	78											
1938	55											
1939	57.7											
1940	81.2											
1941	55.9											
1942	68.3											
1943	73											
1944	135										45	
1945	60										83	
1946	83										84	
1947	58.5										72.1	
1948	95										72.1	
1949	65										83	
1950	71.2										60.2	
1951	79									62	55	
1952	87.7									60.4	130.2	90.4
1953	72									50.5	120.4	72
1954	66.6									63.5	120.2	67
1955	94.6									77	80.2	94.6
1956	81									81	90.3	81
1957	81									60.3	50.2	81
1958	40.5									96	115.2	46.8
1959	84.5									65.5	55	84.5
1960	77									64	100	77
1961							55	60.4		106.4	80.2	75
1962							57	130.8		68.6	90.4	88.9
1963							72.5	103.7		56.1		125
1964							63.5	58.4		46.3		91
1965							53	105.6		103.8	90.3	62.8
1966							49	75.4		75.9	90.2	59
1967			290				67	45.8		94.5	50	85
1968			188.9	103			45			52.1	210	69
1969			150				45	96		74.3	120	64
1970	62	65.8	174	73		83.5	68	108	49	62.2	120	62
1971				71			47			59	80.2	73.2
1972	58.8	36.5	154.3	176	57.9	71	40		48	63.7	60	58.8
1973	74	78	317.5	80	71	101	49.5		70	87.7	100	74
1974	48.5	63.5	215	105	67	46	43		55	86.5	150	48.5
1975	60.7	82	123.6	108.7	87.3	74	55		73	79.5	60	60.7
1976	41	100.2	67.8		66.5	83	33		40	97	45	41
1977	52.2	53.5	101	65	69.7	71	45		50	58.7	120	52.2
1978	75	47.3	292.5	80.9		68	60		83	46.5	120	75
1979	80	79	195	95.5	83	87	48		56	75.5	80	80
1980	56.4	53.3	75	70.8		102	85		69	49.6	125	56.4
1981	166.9	59	220	91.5		87	88		89	59	95	166.9
1982	71.2	60	180	68.1		100.2	75		49	60	85	71.2
1983	55.5		57	70.5		77	92		76	79.9	180	50.5
1984	109.4			51.4			124				180	
1985	72.5			90.6			70				160	
1986	67.5			98.3			90				85	
1987	73.5			98.6			60				35	
1988	70			61.3	91	40	60					
1989	60.2	87.5			62	56	48.3					
1990	69.5	72			85	92	48.8					



### 3.1 Revisión de archivos y complemento de datos faltantes.

Al revisar los archivos de los datos capturados en la base de datos CLICOM, se detectó que en la mayoría faltaban algunos registros de días, meses y hasta años, por lo que se procedió a completarlos en el período seleccionado, a fin de calcular los factores de reducción por área. Para lograr lo anterior se utilizó directamente información de los expedientes de las estaciones climatológicas respectivas, proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CNA), el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Los períodos que no se pudieron complementar con datos de campo, porque no aparecieron los registros en los expedientes, se obtuvieron mediante correlación con estaciones que se encuentran muy cercanas entre sí y en las que se observó un comportamiento similar en los registros.

Para obtener las correlaciones se tomaron los registros de tres años completos simultáneos, cercanos a los datos faltantes, en cada una de las estaciones a correlacionar, con objeto de que la correlación fuera representativa del período faltante. Los datos de lluvia diaria de la estación con registros faltantes se asociaron a la variable  $Y$  y los de la estación con datos completos a la variable  $X$ , de tal forma que:

$$Y_i = m \cdot X_i \quad (3.1)$$

donde  $Y_i$ ,  $X_i$ , son los datos correspondientes al mismo día "i" en las dos estaciones consideradas.

El valor de  $m$  se estimó utilizando los valores mensuales acumulados de las dos estaciones, con ayuda de la función TENDENCIA de la hoja de cálculo EXCEL. Se obtuvieron así coeficientes de correlación muy cercanos a 1.0.

Finalmente, utilizando nuevamente la ecuación 3.1, pero aplicada a los días "i" del período faltante, se completaron los valores  $Y_i$ .

En la tabla 3.3 se indican las estaciones que quedaron comprendidas en la cuenca ( para el análisis con período común, esto es, considerando el efecto de simultaneidad), y se especifican los datos que se recuperaron de archivos que proporcionaron las dependencias y los que se completaron por medio de correlaciones. Finalmente, los números que se encuentran en las celdas indican cuántos días se encontraron sin datos en cada estación.

### **3.2 Promedios diarios y obtención de máximos anuales de precipitación en la cuenca.**

Para obtener las precipitaciones diarias de cada estación fue necesario extraerlas de la base de datos CLICOM, de donde se obtuvieron archivos de caracteres separados con comas. Utilizando el programa PRECIPI.BAS, elaborado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se procesaron estos archivos, que originalmente contienen temperaturas, evaporaciones y datos de lluvias, y se generan archivos de salida (\*.TBJ), que contienen únicamente las precipitaciones diarias.

Para obtener los valores máximos de la lluvia promedio, se utilizó el programa PREMED.BAS el cual lee los archivos de lluvia con extensión TBJ que fueron generados por el programa PRECIPI.BAS, y genera dos archivos de resultados:

- a) PREMED.RES. Contiene los valores de precipitación media diaria asociada a un conjunto de estaciones pluviométricas, obtenidos mediante el método de Polígonos de Thiessen. El conjunto de estaciones puede ser cualquiera (desde una estación hasta las que conforman el total de la cuenca) siempre que la suma de los porcentajes de Thiessen sea igual a 100.
- b) PREMED.MAX. Este archivo está formado por los cinco valores máximos de precipitación media de cada año de registro; además indica la fecha (mes y día) en que ocurrió cada uno de los cinco máximos.

### **3.3 Ajustes de funciones de probabilidad**

Tanto para el análisis de precipitaciones como de escurrimientos se utilizó el programa AX (Jiménez, 1993), elaborado en el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Los ajustes se hicieron con las distribuciones de probabilidad Gumbel y Doble Gumbel.



















## 4 RESULTADOS DE LA REGIONALIZACIÓN DE LLUVIAS

Una de las formas de estimar eventos de diseño es mediante la aplicación de los modelos lluvia-escorrentía; para ello es necesario obtener la precipitación para la duración y período de retorno deseados.

Sin embargo, para estimar la lluvia de diseño es conveniente contar con factores de ajuste por área, duración y período de retorno. La aplicación de estos dos últimos factores puede facilitar el análisis ya que generalmente no se cuenta con registros para la duración de interés ni con los datos necesarios que permitan hacer extrapolaciones confiables.

Por otro lado, el análisis tradicional tiende a sobrestimar la magnitud de la precipitación, ya que considera los máximos anuales sin poner interés al hecho de que éstos seguramente no se presentaron el mismo día en todas las estaciones analizadas. Para evitar lo anterior es necesario aplicar los factores de reducción por área.

A continuación se presentan los trabajos realizados para obtener factores de ajuste por área, período de retorno y duración en la cuenca del alto río Grijalva, utilizando la metodología descrita a continuación.

### 4.1 Metodología

#### Factores de ajuste por área

La necesidad de utilizar factores de reducción por área se deriva de que al ajustar funciones de distribución de probabilidad a los datos de precipitación máxima anual de cada estación por separado y extrapolar a los períodos de retorno seleccionados, no se toma en cuenta que las precipitaciones que resultan no necesariamente se presentarán simultáneamente y que dicha falta de simultaneidad se acentúa conforme el área considerada para la tormenta es mayor.

El problema anterior puede evitarse utilizando factores de reducción por área, los cuáles pueden calcularse mediante el procedimiento que se describe en seguida.

- 1) Se seleccionan diversas áreas  $A_i$  dentro de la región, así como los períodos de retorno deseados para el análisis.

#### **Proceso tradicional (análisis de cada estación por separado).**

- 2) Con los datos de precipitaciones máximas anuales de cada estación por separado, se ajustan las funciones de distribución de probabilidades correspondientes y se extrapolan, para obtener las precipitaciones puntuales asociadas a cada período de retorno seleccionado.

- 3) En planos de la región estudiada se dibujan las líneas de igual precipitación correspondientes a cada período de retorno, y con algún procedimiento de cálculo del promedio espacial (con las isoyetas o los polígonos de Thiessen, por ejemplo) se obtiene la precipitación media correspondiente al área seleccionada en el paso 1.

#### **Análisis estadístico de precipitaciones simultáneas**

4) Se determina la media espacial de las precipitaciones de todas las estaciones para cada día de registro simultáneo. Así, para un registro simultáneo de 19 años será necesario calcular la precipitación media para cada uno de los 365x19 días del registro y para cada área  $A_i$  seleccionada en el paso 1.

5) Para cada año se selecciona la precipitación media máxima y se forma una muestra de tantos valores máximos como años tenga el registro simultáneo.

6) Se ajusta una función de distribución de probabilidades a los valores de la muestra obtenida en el paso 5 y se extrapola a los períodos de retorno seleccionados.

#### **Cálculo de factores de reducción por área**

7) Para cada área seleccionada  $A_j$  (incluyendo el área total de la región) y cada período de retorno  $T$ , se calcula el factor de reducción  $FRA(A,T)$  dividiendo la precipitación obtenida en el paso 6 entre la obtenida en el paso 3. Es decir:

$$FRA(A,T) = \bar{P}(A,T) / \hat{P}(A,T)$$

donde  $\bar{P}(A,T)$  es el valor medio obtenido al considerar la simultaneidad en las precipitaciones (paso 6) y  $\hat{P}(A,T)$  el estimado al analizar cada estación por separado sin tomar en cuenta la simultaneidad (paso 3).

Al aplicar el procedimiento anterior con varias áreas dentro de la región, es posible construir una gráfica como la de la figura 4.1 para cada período de retorno analizado. Si no se encuentran diferencias significativas entre las gráficas se considera que el factor de reducción por área es independiente del período de retorno, es decir, que:

$$FRA(A,T) \approx FRA(A)$$

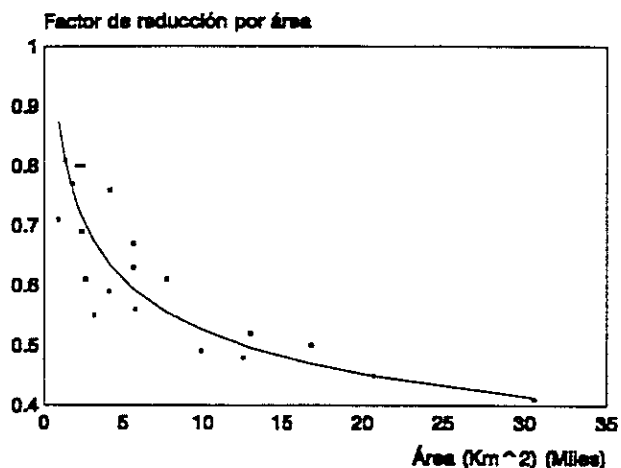


Figura 4.1 Esquema de la relación entre FRA y A.

### Factores de ajuste por período de retorno

Los registros de precipitación en México no son por lo general suficientemente extensos para hacer extrapolaciones confiables, sobre todo para períodos de retorno grandes; así, el uso de los factores de ajuste por período de retorno representa una herramienta útil, ya que para el cálculo de los mismos se pueden utilizar métodos de análisis regional, con lo que esta incertidumbre se reduce. Estos factores se obtienen por lo general con respecto a períodos base pequeños (5 o 10 años), para los que la estimación de la precipitación en cuencas con registros no muy largos es en cierta forma segura. Así, habiendo estimado la altura de lluvia para el período de retorno base en la cuenca de interés, bastará multiplicar ésta por el factor correspondiente para calcular la precipitación para el período deseado.

Como se indicó en el capítulo dos, es necesario obtener factores de ajuste para períodos de retorno sobre todo grandes; para el cálculo de los mismos en este trabajo se decidió aplicar el método de índice de avenidas con la hipótesis estaciones-año. El proceso consiste en lo siguiente:

- a) Se eligen las estaciones a analizar
- b) Se verifica que pertenezcan a la misma región
- c) Se forma una sola muestra compuesta por las precipitaciones máximas anuales de todas las estaciones previamente transformadas, esto es, divididas entre el promedio de la estación correspondiente.
- d) Se ajusta una función de distribución de probabilidades a la muestra obtenida en el inciso anterior, y se extrapola para distintos períodos de retorno.

- e) Se obtienen los factores de ajuste por período de retorno, como la relación entre el dato extrapolado para el período deseado entre el valor calculado para alguno de los períodos analizados, a este último se le denomina período base. En este estudio el período seleccionado como base fue el de diez años.

### **Factores de ajuste por duración**

En nuestro país se tienen 2682 estaciones con pluviómetro y 345 pluviógrafos (datos tomados del ERIC, Extractor Rápido de Información Climatológica y de la SCT, respectivamente). Esto hace que los registros de precipitación en 24 horas sean más largos y confiables que los que puedan tenerse para duraciones menores. Sin embargo la estimación para duraciones cortas se hace necesaria sobre todo para cuencas pequeñas.

Por lo anterior, es conveniente obtener factores de ajuste por duración, para duraciones pequeñas, con respecto a 24 horas. La idea es que como los registros de pluviógrafo son cortos hacer un ajuste directo resulta poco confiable; por otra parte Bell y otros han demostrado que las relaciones en el intervalo 5 minutos a 2 horas son casi universales, por lo que el problema se reduce a relacionar la precipitación de una duración pequeña (por ejemplo de 1 hora) con la de 24 horas. Los resultados de investigaciones anteriores (Bell, 1969; Barrios y Domínguez, 1986) muestran que estos factores de ajuste son independientes del período de retorno, por lo que de algún modo podrían ser utilizados para estimar eventos de diseño de obras importantes.

Contar con factores de ajuste por duración para diversas regiones de nuestro país es importante, ya que para el diseño de obras futuras bastará con estimar la precipitación para duración de 24 horas y multiplicarla por el factor correspondiente a la duración de interés para conocer la altura de lluvia de dicha duración.

Procedimiento para obtener los factores de ajuste por duración.

- a) Se eligen las estaciones por analizar dentro de la cuenca en estudio, las cuales deben contar con registro pluviométrico y pluviográfico de al menos 8 o 10 años.
- b) Para cada una de las estaciones se forman registros de precipitaciones máximas anuales para las duraciones de interés.
- c) Se ajustan funciones de distribución de probabilidad para todos los registros del punto b y se extrapola para los períodos de retorno deseados, no muy altos, especialmente si los registros son cortos.
- d) Los factores de ajuste por duración se obtienen, para cada estación, al relacionar el dato extrapolado para cada duración con el dato correspondiente a 24 horas.

En resumen, conocidos los factores de ajuste por área, período de retorno y duración de una región determinada, para estimar la precipitación con la duración y período de retorno deseados en una cuenca de área conocida, bastará conocer la precipitación en 24 horas para el período base (por lo que es importante construir planos de isoyetas para distintas regiones del país) y multiplicarla por los tres factores mencionados, con lo que se tendrán diseños más racionales.

#### 4.2 Resultados obtenidos para los factores de reducción por área

Como se comentó en el capítulo 3, se trabajó con un total de 71 estaciones pluviométricas con mas de 14 años de registro, de las cuales en 42 pudo formarse el registro simultáneo para el período 1965-1983 (19 años).

Al trabajar con cada estación por separado, se obtuvieron los planos de isolíneas de precipitación puntual para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. En la figura 4.2 se muestra el plano correspondiente a 5 años de período de retorno y en el anexo A1 se presentan las figuras correspondientes a otros períodos de retorno.

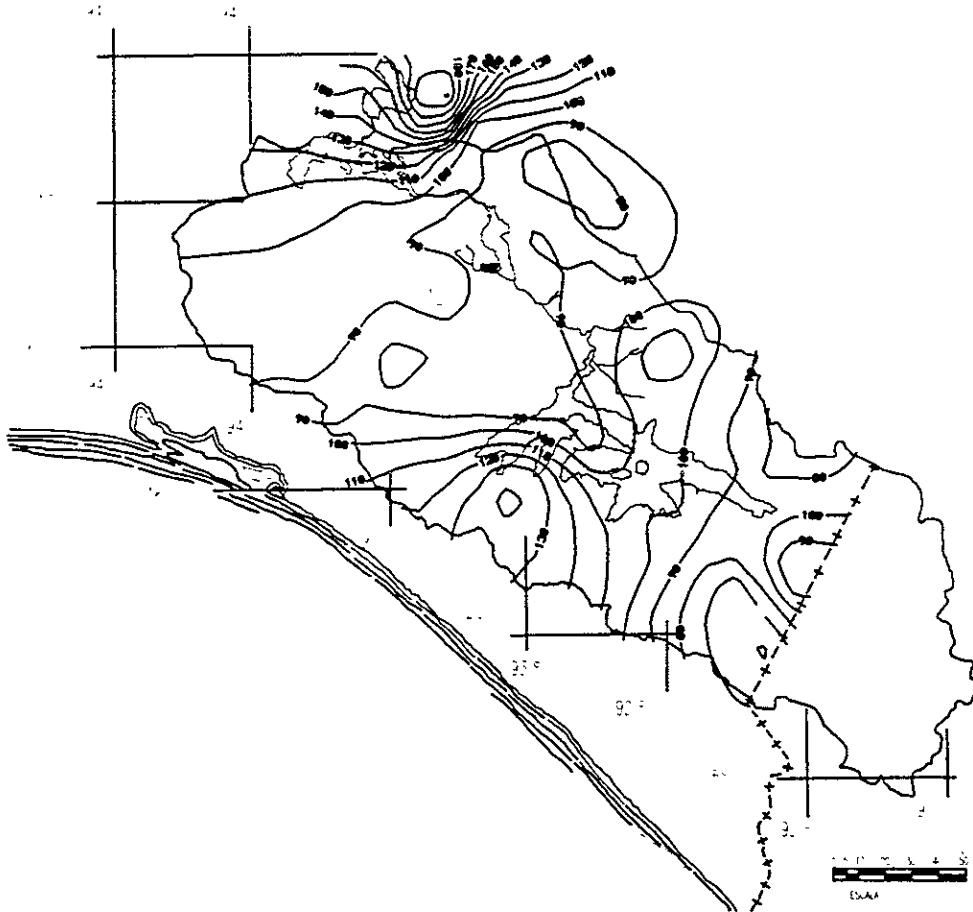


Figura 4.2 Precipitación puntual para  $T = 5$  años y  $d = 24$  horas.

Para considerar el efecto de simultaneidad se estudiaron diversas áreas dentro de la región en un rango de 400 a 30,000 km<sup>2</sup>. Para cada área considerada se calcularon las precipitaciones diarias en los 365 x 19 = 6935 días de registro y se formó la muestra de los 19 valores máximos anuales, a los que se les ajustó una función de distribución de probabilidades para estimar la precipitación media máxima anual para los 6 períodos de retorno estudiados.

Finalmente al dividir los valores obtenidos considerando simultaneidad entre los que resultaron del análisis de cada estación por separado, se obtuvieron los factores de reducción por área que se muestran en la tabla 4.1. Adicionalmente se dibujaron las gráficas de la relación entre el factor de ajuste y el área, como se muestra en la figura 4.3. En esta figura puede observarse que las curvas para los factores correspondientes a período de retorno de 5 años y los promedio son muy similares, lo que refuerza la hipótesis de que estos factores son independientes del período de retorno.

**Tabla 4.1 Factores de reducción por área**

Area (km <sup>2</sup> )	Período de retorno (años)							Promedio
	2	5	10	25	50	100	500	
941	0.71	0.71	0.72	0.72	0.72	0.72	0.73	0.72
1346	0.81	0.73	0.72	0.72	0.74	0.71	0.72	0.74
1792	0.77	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71	0.71	0.73
1810	0.77	0.82	0.85	0.87	0.88	0.89	0.91	0.86
2101	0.8	0.68	0.64	0.6	0.58	0.57	0.54	0.63
2387	0.69	0.65	0.64	0.62	0.61	0.61	0.59	0.63
2444	0.8	0.77	0.76	0.76	0.75	0.75	0.74	0.76
2632	0.61	0.53	0.5	0.46	0.45	0.43	0.4	0.48
3151	0.55	0.48	0.45	0.42	0.4	0.39	0.36	0.44
4123	0.59	0.61	0.62	0.63	0.63	0.64	0.64	0.62
4162	0.76	0.74	0.73	0.73	0.72	0.72	0.71	0.73
5610	0.67	0.62	0.6	0.57	0.56	0.55	0.53	0.59
5622	0.63	0.61	0.6	0.59	0.59	0.58	0.57	0.60
5740	0.56	0.51	0.49	0.47	0.45	0.44	0.43	0.48
7711	0.61	0.55	0.52	0.49	0.47	0.46	0.44	0.51
9862	0.49	0.46	0.45	0.44	0.43	0.43	0.42	0.45
12524	0.48	0.42	0.39	0.37	0.36	0.35	0.33	0.39
12997	0.52	0.48	0.47	0.45	0.44	0.43	0.42	0.46
16570	0.5	0.48	0.47	0.46	0.46	0.46	0.45	0.47
20707	0.45	0.41	0.39	0.37	0.36	0.36	0.34	0.38
30570	0.406	0.37	0.354	0.3392	0.331	0.3244	0.312	0.35



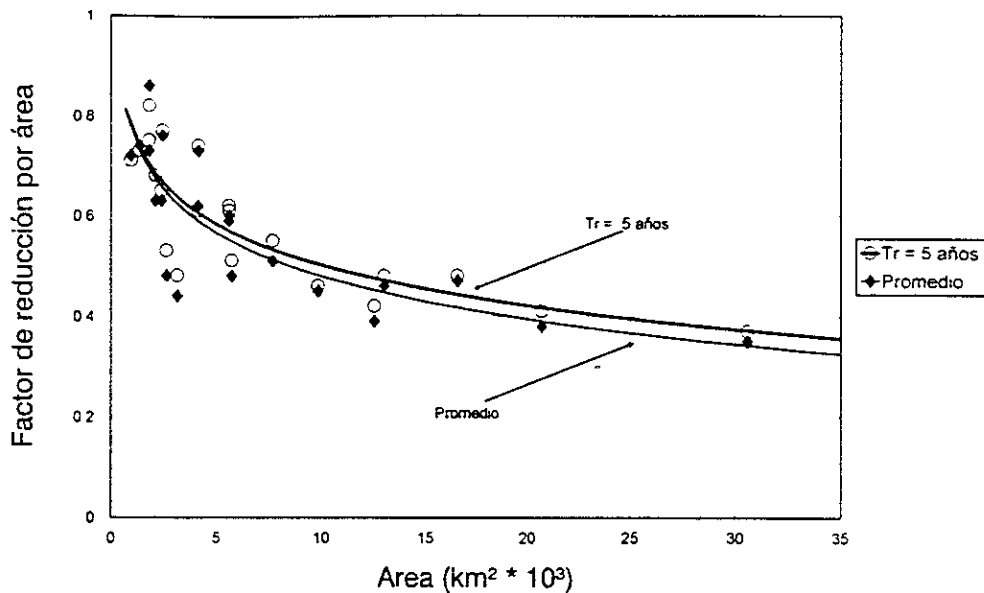


Figura 4.3. Variación del Factor de reducción por área.

Al ajustar las curvas mostradas en la figura 4.3 se obtiene una ecuación de la forma:

$$F = a \ln A + b \dots\dots\dots(4.1)$$

donde  $F$  es el factor de reducción por área (adimensional) y  $A$ , el área de la cuenca, en  $\text{km}^2$ .

En la tabla 4.2 se muestra el valor de los parámetros  $a$  y  $b$  para los dos casos presentados.

Tabla. 4.2 Parámetros de las ecuaciones de ajuste

	$a$	$b$	Coef de correlación
Tr = 5 años	-0.117	1.5803	0.838
Promedio	-0.124	1.6213	0.81

Tomando en cuenta que los factores para período de retorno de 5 años son más confiables debido al tamaño de las muestras analizadas para los eventos sin considerar simultaneidad y que el coeficiente de correlación obtenido en el ajuste es más cercano a uno, se recomienda utilizar la ecuación correspondiente a dicho período de retorno.

En la figura 4.4 (pag. 55) se muestra la ubicación de las estaciones pluviométricas utilizadas en el estudio de los factores de reducción por área y los polígonos de Thiessen correspondientes.

En las tablas 4.3 (pag. 56) se muestran los resultados del ajuste; en ellas se indican los parámetros de la función Doble Gumbel, que resultó la de mejor ajuste en la mayoría de los casos, y de la función Gumbel para los casos restantes. En el anexo A2 se presenta un análisis de los motivos por los que no se consideró adecuado incluir en el análisis las estaciones 7021, 7050, 7054, 7067, 7074, 7084, 7111, 7121, 7133 y 7143, 7189, de tal forma que para el análisis posterior (método tradicional) se utilizaron únicamente 60 estaciones.

El cálculo de precipitaciones medias diarias y factores de reducción por área se hizo para las siguientes áreas  $A_i$ .

- i =1) Toda la cuenca;  $A_i=30570 \text{ km}^2$ ,  $N_i=42$ .
  - i =2) Cuenca entre Angostura y Malpaso;  $A_i=16850 \text{ km}^2$ ,  $N_i=26$ .
  - i =3) Cuenca situada arriba de Angostura;  $A_i=12524 \text{ km}^2$ ,  $N_i=14$ .
  - i =4) Margen izquierda de toda la cuenca,  $A_i=20707 \text{ km}^2$ ,  $N_i=22$ .
  - i =5) Margen derecha de toda la cuenca,  $A_i=9862 \text{ km}^2$ ,  $N_i=19$ .
  - i =6) Arriba de Angostura, margen izquierda;  $A_i=7711 \text{ km}^2$ ,  $N_i=7$ .
  - i =7) Arriba de Angostura, margen derecha;  $A_i=5740 \text{ km}^2$ ,  $N_i=10$ .
  - i =8) Abajo de Angostura, margen izquierda;  $A_i=12997 \text{ km}^2$ ,  $N_i=15$ .
  - i =9) Abajo de Angostura, margen derecha;  $A_i=4122 \text{ km}^2$ ,  $N_i=9$ .
- 12 grupos de pocas estaciones con áreas de 400 a 5600  $\text{km}^2$ .

En la tabla 4.4 se muestran los cálculos correspondientes a precipitaciones simultáneas en toda la cuenca (primera parte de la tabla, pag. 58) y a precipitaciones de cada estación por separado (para el periodo de registro simultáneo 1965-1983) multiplicados por el porcentaje de área correspondiente a cada polígono (segunda parte de la tabla, pag. 59) . En la primera parte se presentan también las áreas y porcentajes de cada polígono y los parámetros de ajuste de ajuste, alfa y beta, de la función Gumbel, utilizada en este caso; y, en los últimos renglones, los valores de  $\bar{P}(A_i, T)$  (renglón Pro1),  $\hat{P}(A_i, T)$  (renglón Pro2) y  $FRA(A_i, T)$  (renglón faju).

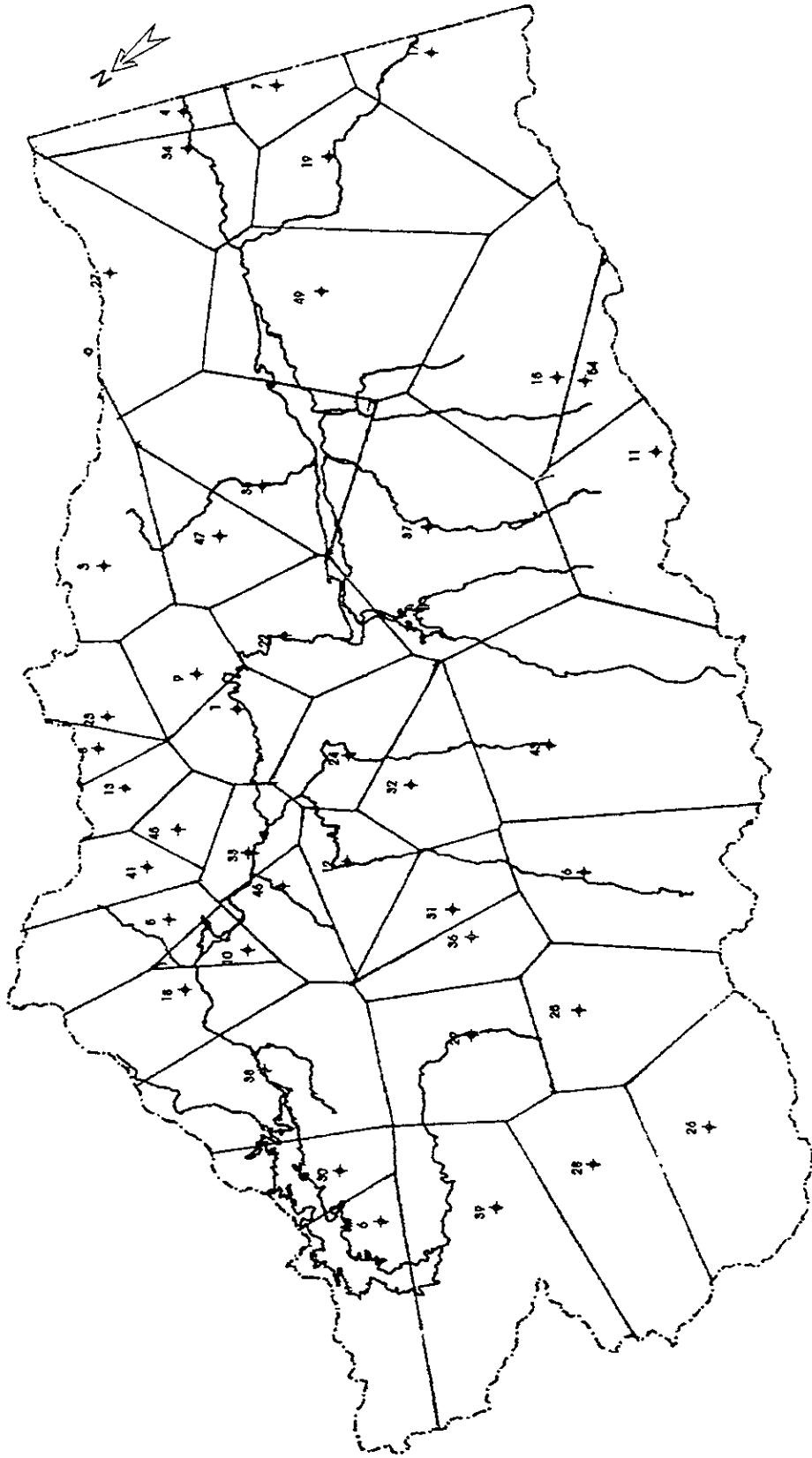


Figura 4.4. Cuenca en planta con polígonos de Thiessen.

**Tabla 4.3. Precipitaciones máximas calculadas para periodos de retorno entre 2 y 100 años**

ESTACION	PERIODO DE RETORNO						PARAMETROS				
	2	5	10	25	50	100	a <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	P
7003	70,7	100	140	185	215	244	0,0850	62,0	0,025	125	0,80
7005	78,0	111	129	147	160	172	0,0750	68,0	0,060	120	0,80
7007	70,0	102	131	165	190	214	0,0650	59,0	0,030	115	0,80
7009	65,0	103	136	176	205	234	0,0500	50,0	0,025	115	0,80
7016	62,0	77	97	120	135	150	0,1400	57,0	0,050	94	0,83
7020	120,0	156	246	302	337	370	0,0650	110,0	0,022	245	0,84
7021	70,0	88	100	116	127	138	G U M B E L				
7024	83,0	118	151	183	204	225	0,0800	74,0	0,035	140	0,80
7026	82,0	103	142	190	220	250	0,1000	76,0	0,025	140	0,84
7027	64,0	100	128	168	197	225	0,0500	51,0	0,025	110	0,82
7030	54,0	80	92	104	112	120	0,0900	46,0	0,090	86	0,80
7034	62,0	84	108	143	168	192	0,0850	55,0	0,030	97	0,82
7035	67,0	82	92	105	114	124	0,0743	61,7			
7037	89,0	149	176	198	213	227	0,0500	74,0	0,050	167	0,80
7039	64,0	85	99	116	130	143	0,0536	56,7			
7040	64,0	91	103	114	121	129	0,1000	56,0	0,100	98	0,80
7050	88,0	114	131	143	152	160	0,0950	81,0	0,090	128	0,83
7054	57,0	77	97	126	148	168	0,0900	50,0	0,035	90	0,84
7063	86	107	129	168	198	227	0,0780	79,0	0,025	120	0,85
7065	59	74	84	97	106	116	0,0740	53,8			
7067											
7069	63	86	110	142	165	188	0,0750	54,0	0,032	102	0,84
7070	78	97	109	126	138	149	0,0590	71,3			
7074	109	150	155	160	165	172	0,0600	96,0	0,250	152	0,80
7083	53	87	119	161	190	219	0,0600	41,0	0,025	100	0,80
7084	108	139	171	210	236	262	0,0700	97,0	0,028	156	0,80
7086	80	95	104	117	126	135	0,0760	75,0			
7087	57	73	83	96	106	116	0,0720	52,0			
7090	83	104	119	140	155	171	0,0800	75,0	0,045	106	0,82
7091	71	87	107	119	127	135	0,1400	66,0	0,095	106	0,84
7093	79	100	114	132	145	158	0,0540	72,5			
7094	66	80	88	100	108	116	0,0850	62,0			

**Tabla 4.3. Precipitaciones máximas calculadas para periodos de retorno entre 2 y 100 años(continuación)**

ESTACION	PERIODO DE RETORNO						PARAMETROS				
	2	5	10	25	50	100	a <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	P
7097	61	94	138	179	205	231	0,0900	53,0	0,028	125	0,80
7099	56	71	85	115	142	167	0,0950	51,0	0,030	100	0,92
7102	73	91	103	114	122	129	0,0950	67,0	0,100	102	0,88
7103	66	103	124	137	145	153	0,1400	61,0	0,090	120	0,80
7106	148	194	224	249	266	282	0,0450	134,0	0,045	220	0,85
7109	53	68	79	89	96	102	0,1500	49,0	0,110	77	0,84
7112	104	137	178	251	276	298	0,0450	93,0	0,035	240	0,92
7119	38	56	67	76	82	87	0,1100	32,0	0,130	65	0,85
7121	99	137	156	178	191	206	0,0500	84,0	0,050	142	0,80
7123	66	86	97	109	118	126	0,0850	57,0	0,085	88	0,80
7132	67	79	88	98	106	114	0,0900	63,0			
7134	73	93	106	123	136	148	0,5600	66,5			
7135	66	84	95	109	120	130	0,0660	61,0			
7137	73	98	113	127	136	145	0,0800	65,0	0,080	110	0,85
7139	71	90	114	141	157	172	0,0900	65,0	0,050	125	0,89
7142	76	93	104	118	128	139	0,0680	71,0			
7145	58	87	117	134	145	156	0,0750	49,5	0,070	117	0,85
7148	87	124	148	179	201	224	0,0310	75,0			
7150	69	84	95	108	117	127	0,0730	64,0			
7156	98	115	126	139	150	160	0,0680	93,0			
7159	44	58	68	80	89	98	0,0780	39,0			
7161	73	98	128	165	190	214	0,0900	65,0	0,030	115	0,80
7162	55	70	94	136	165	192	0,1200	50,0	0,026	78	0,80
7170	135	175	201	234	259	284	0,0280	122,0			
7175	66	81	99	133	159	183	0,1100	61,0	0,030	94	0,85
7176	64	79	89	102	112	121	0,0745	59,2			
7178	162	233	280	339	383	426	0,0160	139,0			
7180	81	105	128	163	187	211	0,0800	72,0	0,030	112	0,80
7183	53	86	117	157	187	216	0,0600	41,0	0,025	97	0,80
7184	77	100	101	103	107	111	0,0950	69,0	1,420	101	0,80
7188	55	76	93	111	124	136	0,1100	49,0	0,060	88	0,82
7190	56	73	82	94	102	110	0,0830	55,1			
7202	68	82	98	124	143	163	0,0900	57,0	0,038	94	0,86
7203	89	124	147	176	198	219	0,0330	78,0			
7204	68	87	107	146	176	205	0,0850	61,0	0,025	95	0,84

Tabla 4.4 (primera parte) Cálculos de precipitaciones simultáneas en toda la cuenca.

EST	CLI	AREA	THI	T2	T5	T10	T25	T50	T100	T500	ALFA *10 <sup>-4</sup>	BETA
1	3	407.73	1.334	78.9	112.5	134.8	162.9	183.7	204.4	252.2	337	68.1
3	7	803.56	2.629	72.6	100.9	119.7	143.5	161.1	178.5	218.9	400	63.4
4	9	248.81	0.814	79.2	108.5	127.9	152.5	170.7	188.7	230.5	387	69.7
5	16	590.47	1.932	59.8	78.7	91.2	107	118.7	130.3	157.2	600	53.7
6	20	877.96	2.872	130.6	180.8	214.1	256.1	287.2	318.2	389.6	226	114.4
7	26	279.76	0.915	94.3	127.8	149.9	177.9	198.6	219.2	266.8	339	85.5
8	30	119.05	0.389	63	82.4	95.2	111.5	123.5	135.5	163.2	548	56.7
9	34	455.35	1.490	78.7	108.4	128	152.8	171.2	189.5	231.7	382	69.2
10	35	247.62	0.810	64.6	79	88.5	100.5	109.3	118.2	138.6	791	60
11	37	836.89	2.738	84.2	121.1	145.4	176.2	199.1	221.8	274.2	308	72.3
12	39	434.52	1.421	65.4	76	83	91.9	98.5	105	120.1	1068	61.9
13	40	249.99	0.818	64.8	82.7	94.5	109.5	120.6	131.6	157.1	633	59
15	63	1303.55	4.264	91.3	107.5	118.2	131.8	141.8	151.8	174.9	699	86
16	65	1196.41	3.914	59.8	78.8	91.3	107.2	118.9	130.6	157.6	598	53.7
17	67	816.66	2.671	51.4	98	128.7	167.6	196.4	225.1	291.3	244	36.4
18	69	627.97	2.054	64.5	86.7	101.4	120	133.8	147.5	179.2	510	57.3
19	70	1004.15	3.285	76.2	96.3	109.7	126.5	139	151.4	180	563	69.7
22	86	633.92	2.074	81.9	97	107	119.6	129	138.3	159.8	750	77
23	87	352.38	1.153	55.5	70.7	80.7	93.5	102.9	112.3	133.9	745	50.5
24	91	554.75	1.815	74.5	90.9	101.7	115.4	125.6	135.7	159.1	691	69.2
25	93	841.66	2.753	79.1	102.9	118.6	138.5	153.2	167.8	201.6	477	71.5
26	97	1267.84	4.147	67.1	93	110.1	131.7	147.8	163.7	200.5	439	58.8
27	99	960.11	3.141	58.5	70.9	79.2	89.5	97.2	104.9	122.5	913	54.5
28	100	1095.22	3.583	49.6	82.5	104.3	131.8	152.2	172.5	219.4	344	39
29	102	838.68	2.743	79.2	94.6	104.8	117.6	127.1	136.6	158.5	738	74.3
30	112	431.54	1.412	105	140.1	163.3	192.7	214.4	236	286	323	93.7
31	123	410.71	1.344	67.1	85.6	97.8	113.3	124.7	136.1	162.4	614	61.2
32	132	580.35	1.898	66.5	78.9	87.2	97.6	105.3	113	130.7	911	62.5
33	134	300.59	0.983	73.2	95.4	110.1	128.6	142.4	156	187.6	511	66
34	135	583.33	1.908	67.8	80.9	89.6	100.6	108.7	116.8	135.5	863	63.5
35	139	1064.87	3.483	73.3	92.2	104.6	120.4	132.1	143.8	170.6	601	67.2
36	142	397.02	1.299	76	92.8	103.9	117.9	128.3	138.6	162.5	676	70.6
37	145	1598.19	5.228	80.7	105.9	122.7	143.8	159.5	175.1	211	449	72.5
38	148	1134.51	3.711	87.3	124.6	149.3	180.4	203.6	226.5	279.6	304	75.2
39	156	1578.55	5.164	97.6	114.3	125.3	139.3	149.7	160	183.8	678	92.2
41	162	344.04	1.125	63.9	93.9	113.7	138.8	157.4	175.8	218.5	378	54.2
43	204	2128.54	6.963	64.6	87.9	103.2	122.6	137	151.3	184.4	488	57.1
45	188	219.64	0.718	54.4	69.6	79.7	92.4	101.9	111.3	132.9	745	49.5
46	202	363.09	1.188	69.1	84	93.9	106.3	115.6	124.8	146	760	64.3
47	203	518.45	1.696	97.2	135	160	191.6	215	238.2	292	300	85
49	21	1558.91	5.100	70	88	100	116	127	138	155.2	681	64
54	54	312.5	1.022	95.5	118.9	134.4	154	168.5	182.9	216.3	484	87.9
	pro1	30569.8		31.1	37.2	41.2	46.3	50.1	53.9	62.5	1859	29.1
	pro2			75.59	99.37	115.1	135.023	149.76	164.402	197.81		
	faju			0.411	0.374	0.358	0.3429	0.3345	0.32786	0.316		
			100.000									

**Tabla 4.4 (segunda parte) Valores obtenidos al multiplicar la precipitación de cada estación por el porcentaje correspondiente a su polígono asociado.**

T2	T5	T10	T25	T50	T100	T500
105.234	150.049	179.792	217.270	245.013	272.622	336.376
190.837	265.226	314.644	377.205	423.468	469.206	575.401
64.461	88.309	104.099	124.121	138.934	153.584	187.606
115.506	152.013	176.157	206.675	229.274	251.680	303.639
375.081	519.254	614.891	735.514	824.833	913.864	1118.924
86.299	116.956	137.181	162.805	181.749	200.601	244.162
24.534	32.090	37.074	43.422	48.095	52.769	63.556
117.227	161.466	190.661	227.602	255.009	282.268	345.126
52.327	63.991	71.686	81.406	88.535	95.744	112.268
230.509	331.527	398.052	482.371	545.063	607.207	750.659
92.960	108.026	117.976	130.627	140.008	149.247	170.710
52.991	67.629	77.279	89.545	98.623	107.618	128.471
389.319	458.398	504.025	562.018	604.659	647.301	745.803
234.039	308.399	357.320	419.548	465.338	511.128	616.798
137.313	261.803	343.816	447.736	524.674	601.345	778.195
132.497	178.100	208.297	246.506	274.854	302.997	368.115
250.300	316.324	360.340	415.524	456.584	497.315	591.259
169.834	201.147	221.884	248.012	267.504	286.790	331.374
63.975	81.496	93.023	107.778	118.613	129.449	154.347
135.195	164.956	184.555	209.416	227.926	246.254	288.718
217.781	283.308	326.534	381.323	421.796	461.993	555.052
278.288	385.704	456.624	546.207	612.979	678.922	831.545
183.732	222.676	248.744	281.094	305.277	329.460	384.737
177.701	295.571	373.674	472.197	545.284	618.013	786.040
217.284	259.534	287.518	322.634	348.697	374.761	434.843
148.224	197.773	230.523	272.025	302.658	333.150	403.733
90.150	115.005	131.396	152.220	167.536	182.852	218.187
126.246	149.787	165.544	185.288	199.906	214.524	248.126
71.977	93.806	108.260	126.451	140.020	153.393	184.465
129.375	154.372	170.974	191.964	207.420	222.876	258.559
255.333	321.170	364.364	419.401	460.157	500.913	594.268
98.704	120.522	134.938	153.120	166.627	180.004	211.044
421.899	553.645	641.475	751.786	833.865	915.422	1103.107
323.988	462.416	554.083	669.502	755.602	840.588	1037.653
503.982	590.217	647.018	719.310	773.013	826.200	949.097
71.915	105.677	127.961	156.209	177.142	197.849	245.905
449.802	612.037	718.569	853.649	953.914	1053.483	1283.954
39.086	50.007	57.263	66.388	73.214	79.967	95.487
82.073	99.770	111.529	126.257	137.303	148.230	173.410
164.847	228.954	271.352	324.945	364.630	403.976	495.218
356.965	448.756	509.950	591.542	647.637	703.731	791.443
97.625	121.545	137.390	157.426	172.249	186.969	221.113
31.100	37.200	41.200	46.300	50.100	53.900	62.500
7558.512	9936.611	11509.634	13502.339	14975.783	16440.166	19780.995

En el anexo A3 se presentan los cálculos del factor de reducción por área para las demás áreas seleccionadas.

### **4.3 Resultados obtenidos para los factores de ajuste por período de retorno**

#### **4.3.1 Análisis con 24 estaciones.**

Se eligieron 24 estaciones distribuidas en toda la cuenca que, preferentemente, contaran con registros de por lo menos 25 años.

Al aplicar a estas 24 estaciones el proceso descrito, considerando que pertenecen a una región homogénea con 800 datos, se encontró lo siguiente:

- a) Si se ajustan a una distribución Gumbel, en la fig. 4.5 puede observarse que aunque la mayor parte de los puntos se pegan, por así decirlo, a la curva, hay especialmente tres que se separan de la misma.

Estos puntos aparentemente son reales, como lo muestran los registros diarios de las estaciones en que se presentaron los mismos.

- b) Si se considera una distribución Doble Gumbel, en la fig. 4.6 se observa que aunque en menor medida, persiste la separación de estos puntos.

Como se mencionó en el capítulo I, se considera la región analizada como homogénea, en el sentido que los procesos meteorológicos que provocan las precipitaciones son similares en toda la cuenca.

Sin embargo a fin de determinar si estadísticamente las 24 estaciones pertenecen a la misma muestra, se aplicó la prueba de Fisher (Carrizosa, 1997), considerando un intervalo de confianza de 99 %. En la tabla 4.5 se muestran los parámetros necesarios para efectuar dicha prueba.

Se encontró que pueden formarse tres grupos:

El primero por las estaciones con número de CLICOM 16, 35, 40, 63, 86, 87, 91, 134, 135, 139 y 202

El segundo con las estaciones 26, 30, 34, 39, 99, 112, 123, 145, 188, 203 y 204.

Y el tercero por las estaciones 97 y 162 de CLICOM.

Los resultados de los ajustes, se muestran en las figuras 4.7 a 4.11.

Como puede observarse, salvo para el grupo 1, el mejor ajuste en todos los casos es el de la función Doble Gumbel.



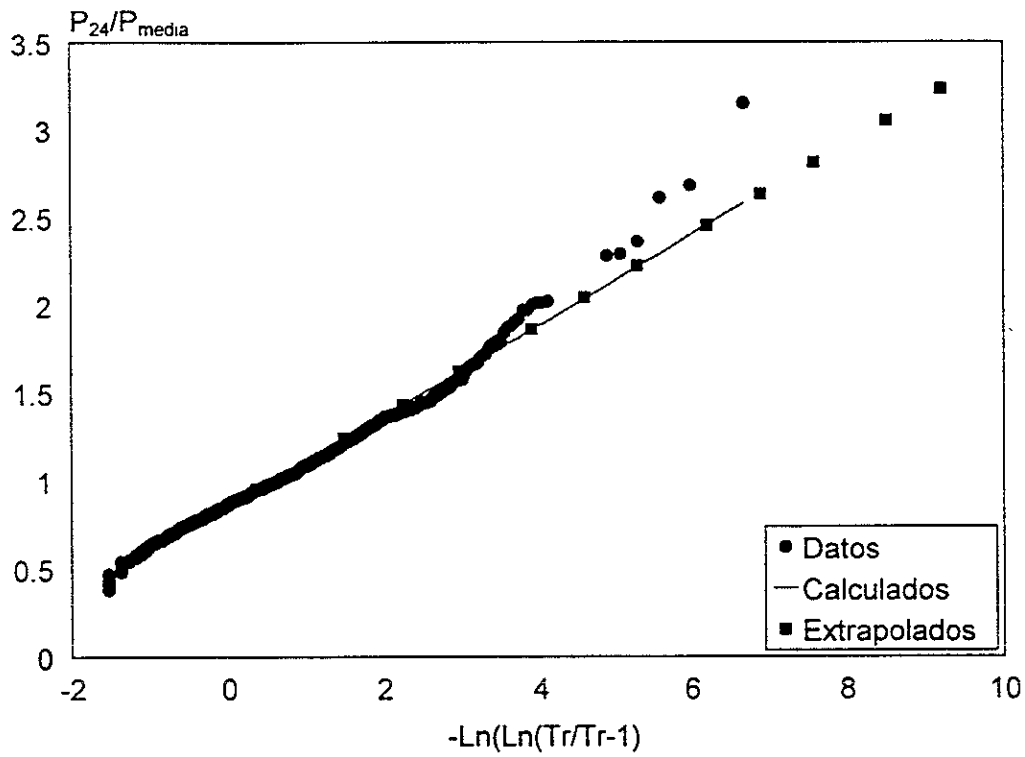


Fig. 4.5 Ajuste con 24 estaciones. Distribución Gumbel.

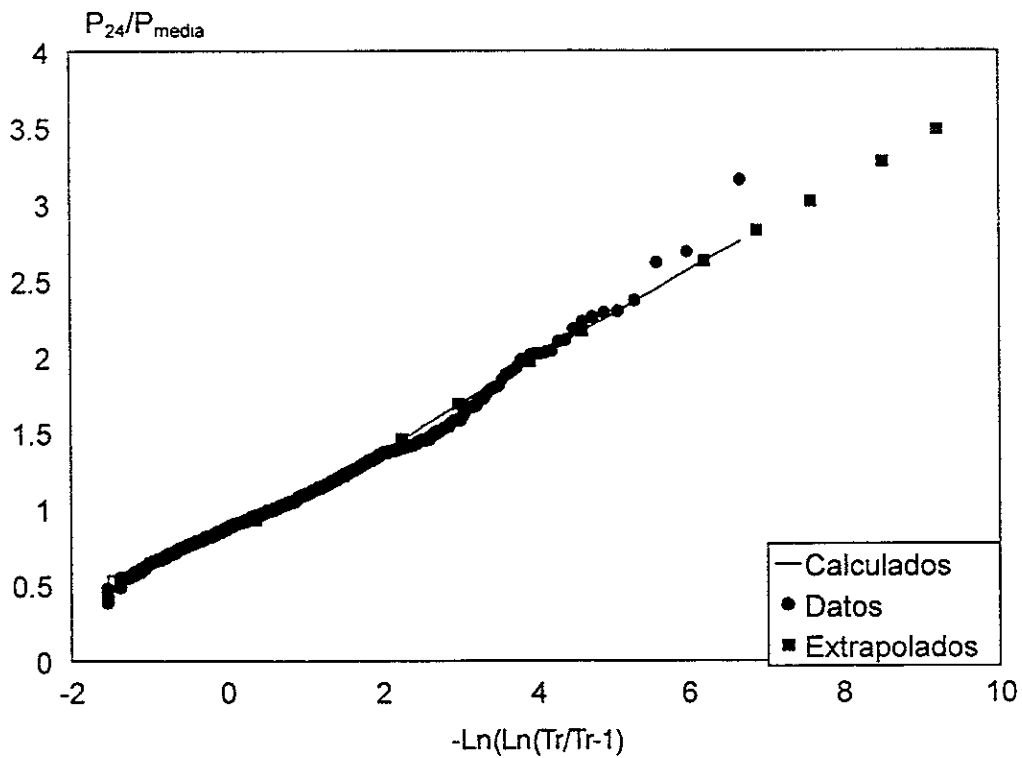


Fig. 4.6 Ajuste con 24 estaciones. Distribución Doble Gumbel.

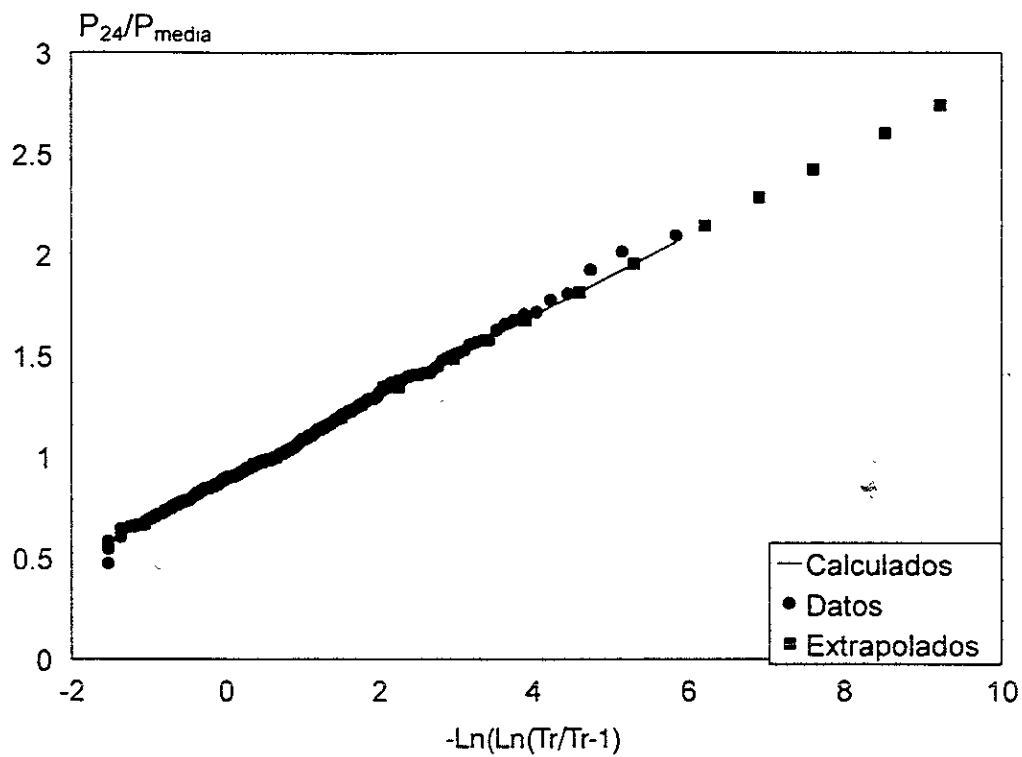


Fig. 4.7 Ajuste para el grupo 1. Análisis con 24 estaciones. Distribución Gumbel.

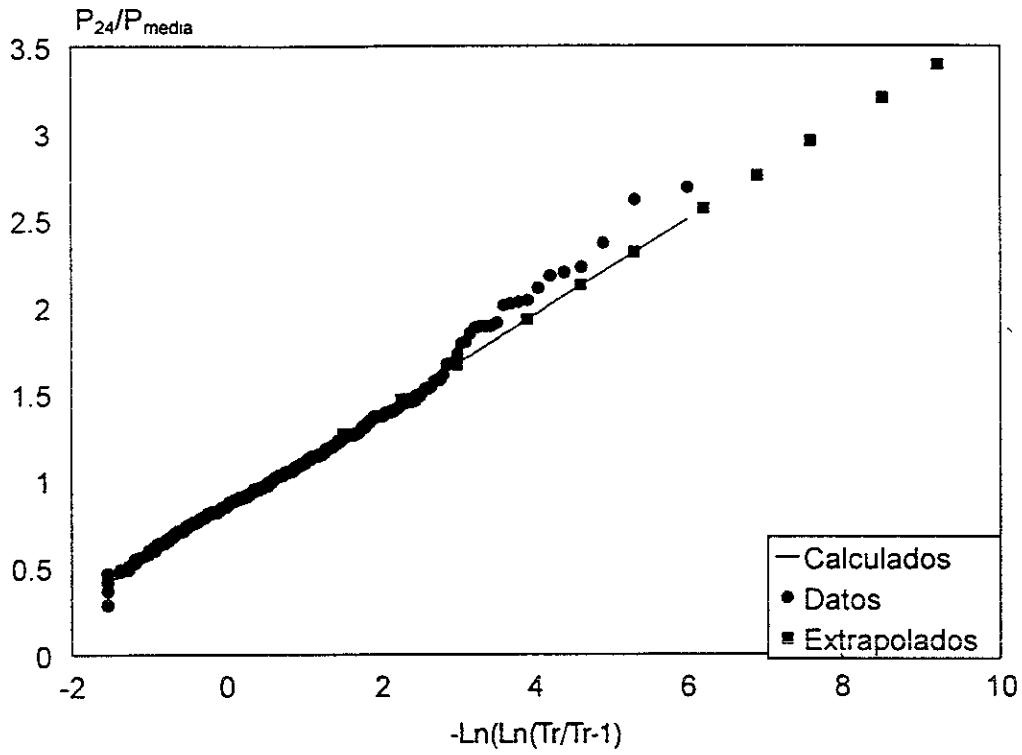


Fig. 4.8 Ajuste para el grupo 2. Análisis con 24 estaciones. Distribución Gumbel.

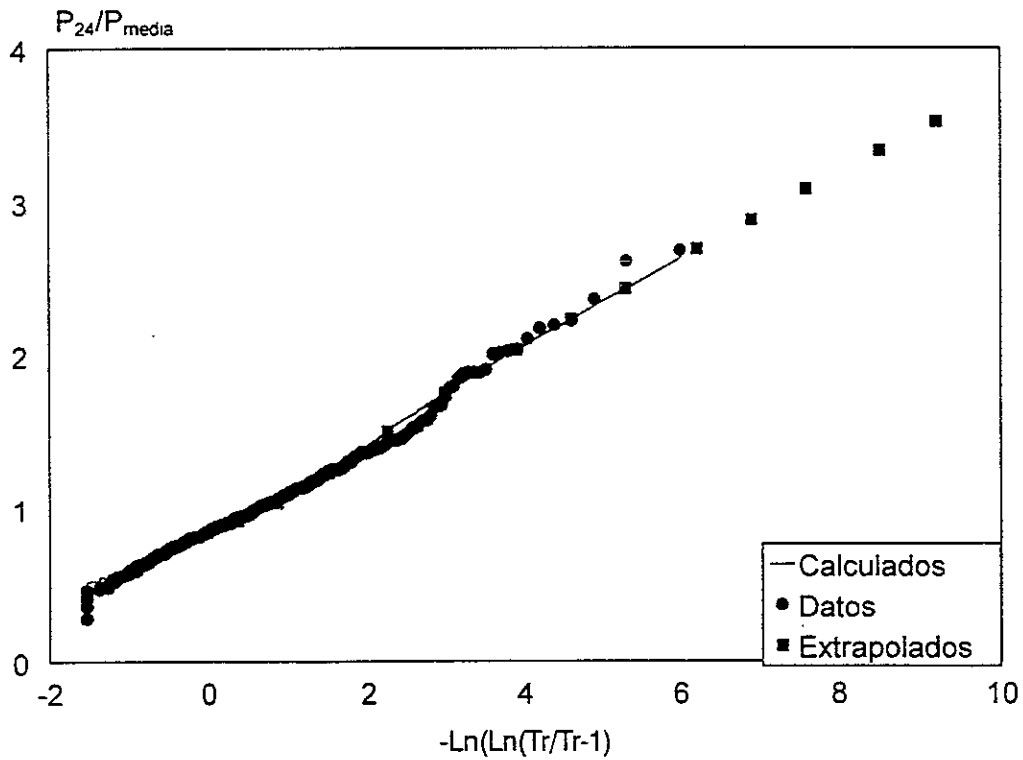


Fig. 4.9 ajuste para el grupo 2. Análisis con 24 estaciones. Distribución doble Gumbel

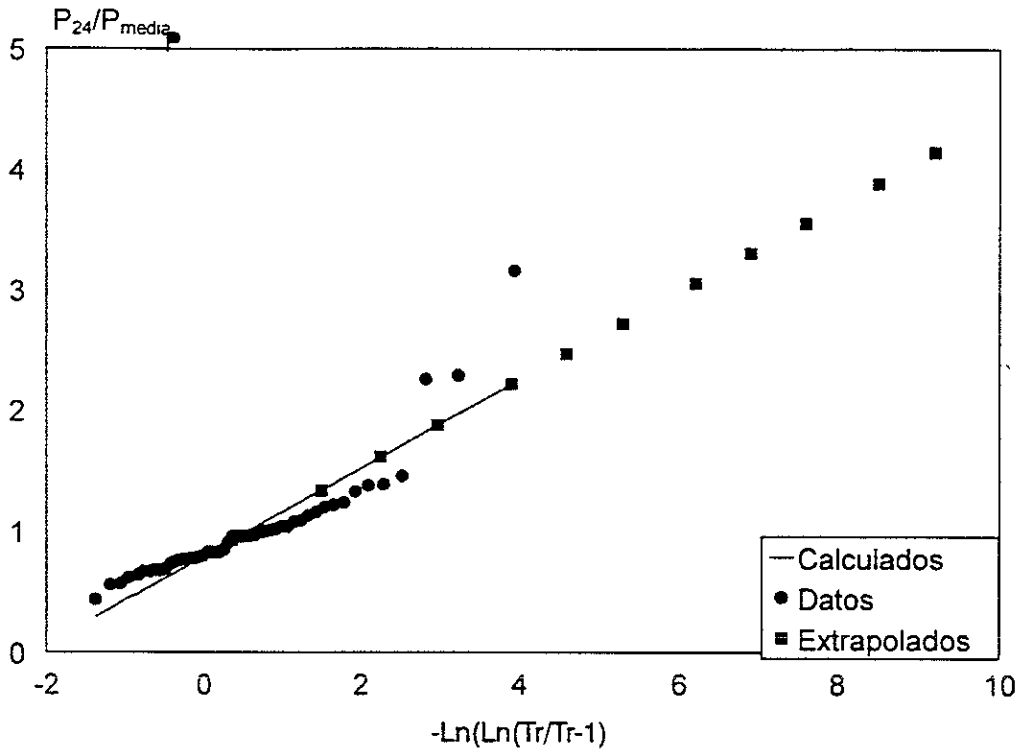


Fig. 4.10. Ajuste para el grupo 3. Análisis con 24 estaciones. Distribución Gumbel

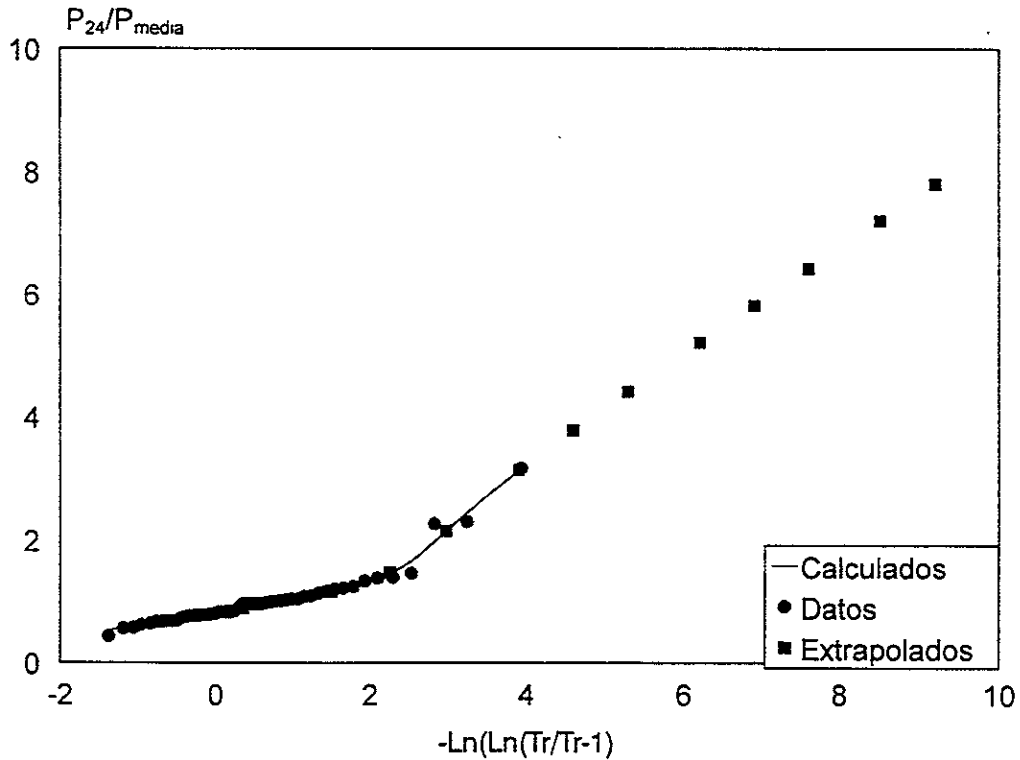


Fig. 4.11 Ajuste para el grupo 3. Análisis con 24 estaciones. Distribución Doble Gumbel

**Tabla 4.5 Datos requeridos para aplicar la prueba de Fisher**

No. CLICOM	No. Datos	Varianza
07135	31	0.040
07086	29	0.042
07091	31	0.046
07202	33	0.056
07063	28	0.062
07035	30	0.062
07016	42	0.082
07040	33	0.084
07134	33	0.088
07087	27	0.089
07139	28	0.089
07123	55	0.092
07188	30	0.101
07030	24	0.114
07026	30	0.120
07039	33	0.126
07204	32	0.129
07112	28	0.136
07145	45	0.147
07034	46	0.150
07099	40	0.157
07203	42	0.168
07162	30	0.213
07097	21	0.234

Finalmente se obtuvieron los factores de ajuste por periodo de retorno que se muestran en la tabla 4.6.

**Tabla 4.6 Factores de ajuste por periodo de retorno. Análisis con 24 estaciones**

T (años)	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
<b>Análisis con 24 estaciones</b>									
Gumbel	0.66	0.87	1.00	1.13	1.30	1.43	1.55	1.71	1.84
Doble Gumbel	0.63	0.83	1.00	1.16	1.35	1.49	1.63	1.81	1.94
<b>Grupo 1</b>									
Gumbel	0.72	0.89	1.00	1.10	1.25	1.35	1.46	1.60	1.70
<b>Grupo 2</b>									
Gumbel	0.64	0.86	1.00	1.14	1.32	1.45	1.58	1.75	1.88
Doble Gumbel	0.61	0.82	1.00	1.17	1.35	1.49	1.62	1.79	1.92
<b>Grupo 3</b>									
Gumbel	0.57	0.83	1.00	1.16	1.37	1.53	1.68	1.89	2.05
Doble Gumbel	0.60	0.79	1.0	1.47	2.14	2.58	3.01	3.57	3.98

### 4.3.2 Análisis con 23 estaciones.

Como se mencionó anteriormente y en base a los resultados de la prueba de Fisher, el grupo tres está formado únicamente por dos estaciones, la 97 y la 162. La primera tiene el registro de menor tamaño (21 datos) y a la segunda corresponde el dato mas grande de toda la muestra.

Por lo anterior se decidió aplicar nuevamente el proceso, con los datos de todas las estaciones, excepto los de la estación 97 y los tres máximos con incertidumbre (uno de ellos corresponde a la estación 162).

Se conformó una muestra de 776 datos y la distribución de mejor ajuste resulto ser la Gumbel (fig. 4.12).

Se aplicó la prueba de Fisher a estas estaciones con los parámetros utilizados que se presentan en la tabla 4.7. Se encontró que pueden formarse dos grupos.

Tabla 4.7. Prueba de Fisher. Análisis con 23 estaciones.

No. CLICOM	No. Datos	Varianza
07135	31	0.040
07086	29	0.042
07091	31	0.046
07162	30	0.049
07202	33	0.056
07063	28	0.062
07035	30	0.062
07016	42	0.082
07099	40	0.083
07040	33	0.084
07134	33	0.088
07087	27	0.089
07139	28	0.089
07123	55	0.092
07034	46	0.092
07188	30	0.101
07030	24	0.114
07026	30	0.120
07039	33	0.126
07204	32	0.129
07112	28	0.136
07145	45	0.147
07203	42	0.168

El primero con las estaciones, con número de CLICOM, 16, 35, 40, 63, 86, 87, 91, 99, 134, 135, 139, 162 y 202

Y, el segundo por las estaciones 26, 30, 34, 39, 112, 123, 145, 188, 203 y 204.

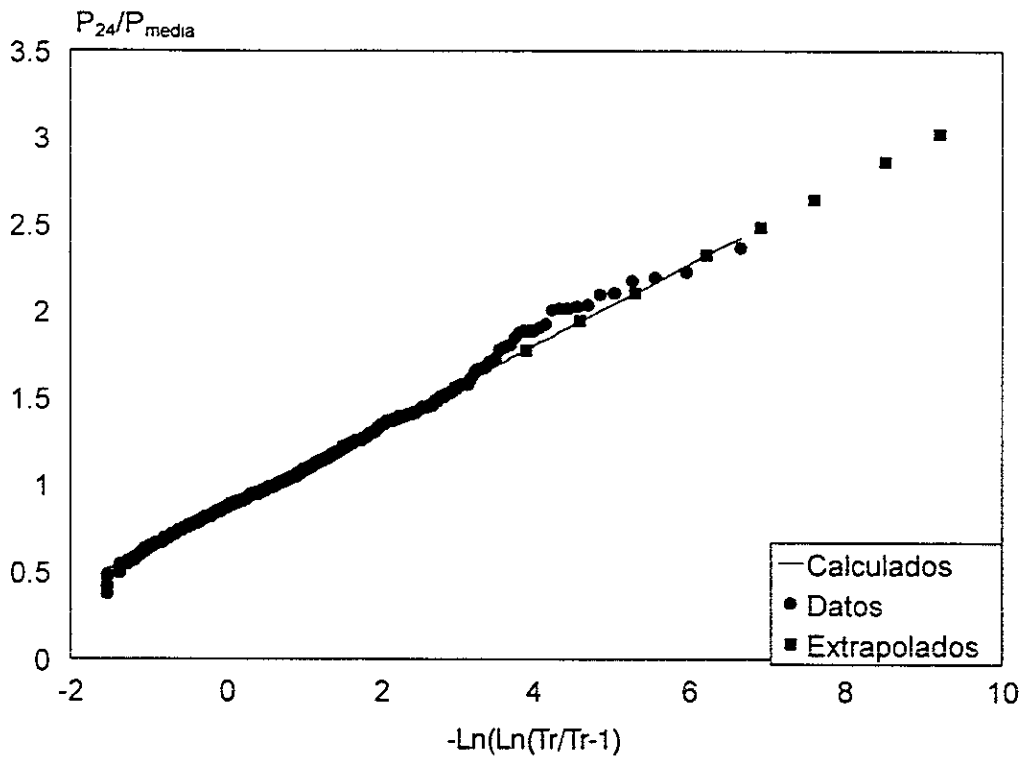


Fig. 4.12. Ajuste con datos de 23 estaciones. Distribución Gumbel.

Los ajustes efectuados con distribución Gumbel se presentan en las figuras 4.13 y 4.14.

Asimismo, se obtuvieron los factores de ajuste por período de retorno correspondientes que se presentan en la tabla 4.8.

**Tabla 4.8 Factores de ajuste por período de retorno. Análisis con 23 estaciones**

T (años)	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
Análisis con 23 estaciones	0.68	0.87	1.00	1.12	1.27	1.40	1.51	1.66	1.78
Grupo 1	0.71	0.89	1.00	1.11	1.25	1.36	1.47	1.60	1.71
Grupo 2	0.65	0.86	1.00	1.13	1.31	1.44	1.56	1.74	1.86

Al comparar los resultados de las tablas 4.6 y 4.8 se observa que estos factores son muy similares, con excepción de los calculados para el grupo tres del análisis con 24 estaciones y distribución Doble Gumbel los que difieren hasta en un 100 % con respecto a los demás.

En general, los factores presentados en la tabla 4.6 para el análisis con 24 estaciones, son mayores que los de la tabla 4.8, por lo que arrojarían eventos más desfavorables (o conservadores) para fines de diseño.

A fin de estudiar el comportamiento con respecto a la duración, se conformó una nueva muestra, de 114 elementos, con los datos para duración de una hora de las estaciones 35, 91, 134, 135, 202 SMN y 202 DGE, que por su ubicación se encuentran totalmente protegidas tanto de eventos provocados por huracanes del Golfo de México como del Océano Pacífico. Se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 4.9.

**Tabla 4.9 Factores de ajuste por período de retorno para duración de una hora. Análisis con seis estaciones.**

T (años)	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
Factor	0.64	0.86	1.0	1.14	1.32	1.45	1.59	1.76	1.90

Al comparar estos resultados con los obtenidos para duración de 24 horas, tabla 4.8, puede verse que son muy parecidos, lo que refuerza las conclusiones obtenidas en otros trabajos (Barrios y Domínguez, 1991) referentes a que estos factores son independientes de la duración.



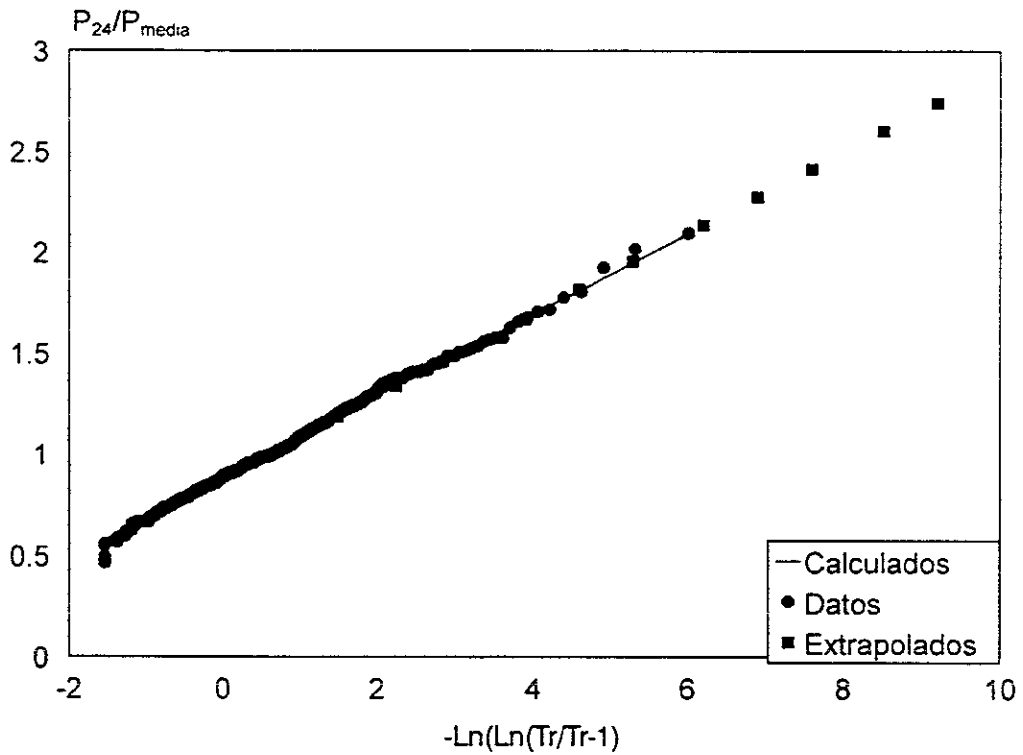


Fig. 4.13. Ajuste para el grupo 1. Análisis con 23 estaciones. Distribución Gumbel.

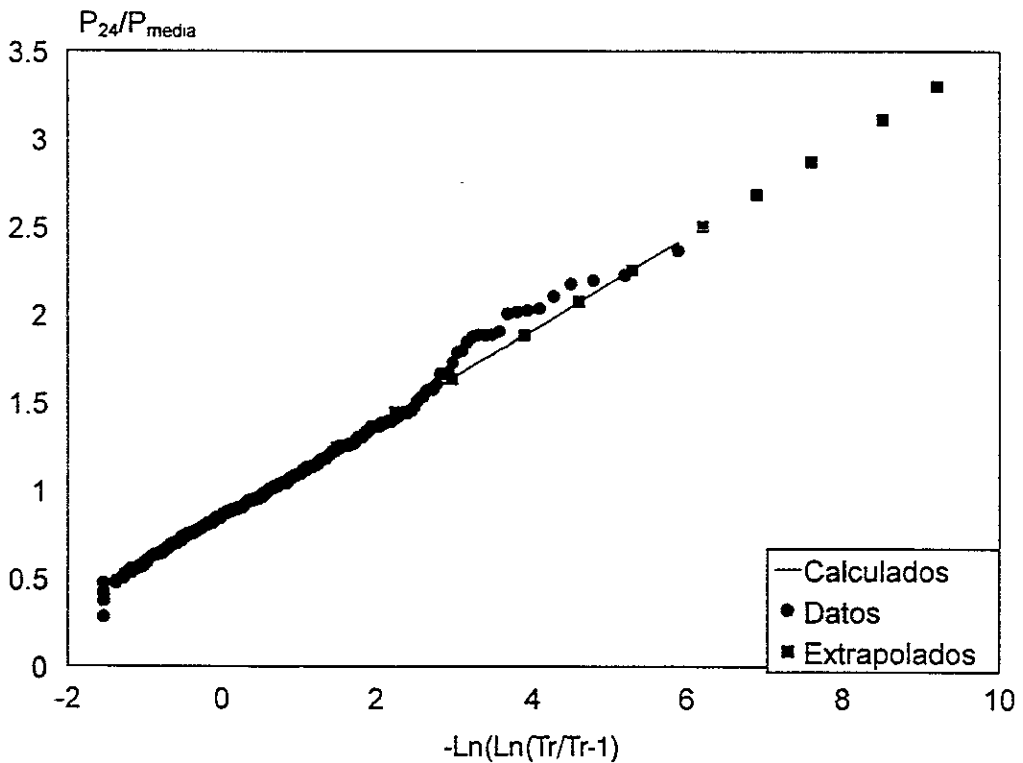


Fig. 4.14. ajuste para el grupo 2. Análisis con 23 estaciones. Distribución Gumbel.

#### 4.4 Resultados obtenidos para los factores de ajuste por duración

Se obtuvieron factores de ajuste para duración de 24 horas con respecto a 1 hora ( $P_{24}^T/P_1^T$ ) para periodos de retorno de 5 y 10 años en nueve estaciones dentro de la cuenca. Para estudiar el comportamiento de este factor con respecto a la ubicación, se analizaron cuatro estaciones fuera de la región en estudio, una en el sur del estado de Chiapas expuesta a los eventos provenientes del Océano Pacífico y tres en la parte baja de la cuenca del río Grijalva, con influencia de eventos de origen ciclónico generados en el Golfo de México. La información para duración de una hora se obtuvo de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y de La División Hidrométrica Sureste de la Comisión Federal de Electricidad, misma que se presenta en la tabla 4.10 (pag. 71).

Se ajustaron funciones de distribución de probabilidad Gumbel y Doble Gumbel a las muestras, tanto para duración de una hora como de 24 horas.

Los factores de ajuste por duración obtenidos se presentan en la tabla 4.11.

Tabla 4.11 Factores de ajuste por duración

Estación	Tr=5 años	Factores para Tr=5 años		Factores para Tr=10 años	
	$P_{24}$ (Gumbel)	Doble Gumbel	Gumbel	Doble Gumbel	Gumbel
07135	81.78	1.41	1.47	1.3	1.37
07035	81.88	1.47	1.52	1.42	1.47
07202 DGE	82.35	1.42	1.43	1.39	1.39
07202 SMN	86.11	1.29	1.33	1.24	1.29
07091	88.45	1.29	1.39	1.31	1.28
07204	92.47	1.72	1.77	1.72	1.77
07134	94.13	1.52	1.57	1.6	1.56
07156	117.21	1.86	1.77	1.69	1.69
07112	150.89	2.12	2.26	2.3	2.31
07084	145.49	1.66	1.63	1.57	1.62
07106	187.86	2.24	2.25	2.27	2.2
27054	176.23	2.13	2.4	2.67	2.51
27044	212.32	3.07	2.97	3.04	3.04

En la fig. 4.15 se presenta la variación de estos factores con respecto a la precipitación en 24 horas, para período de retorno de 5 años, obtenidos con distribución Gumbel.

Tabla 4.10. Altura de lluvia máxima para duración de una hora, en mm

AÑO	07202 SMN	07202 DGE	07035	07204	07135	07091
1945	53.5					
1946	32.4					
1947	42.5					
1948	42.2					
1949						
1950						
1951		40				
1952		24.11				
1953		32.36				
1954		42.13		45		
1955				48.33		
1956				38		
1957				31.33		
1958				38.5		
1959				50		
1960				30.91		
1961	52			55		
1962	48			40		
1963	37	38.46		50.19		
1964		36.53				41.12
1965	103	80		44.6		41.10
1966	36	53		42.26		63.75
1967		50		41.74		47.50
1968		42.61		39.6		57.00
1969		46.67		47.73		30.33
1970		48.27		41		45.50
1971		44		86.8		70.00
1972		26.13		34.7		47.80
1973	63	53.11		40.5		36.50
1974	64	60.9		39.28		81.61
1975	58	39.7	30.8		42.7	20.83
1976	48	79.6	62.2	20		
1977			46.3		22.9	
1978			40.4		21.5	100.00
1979			51.9			
1980				50.25		30.00
1981	68		28.9	40.9	50.4	
1982	38		44.6	33.6	57.6	33.33
1983	56		35.7	20	20.9	24.35
1984	107		48		55	
1985	49				37.2	
1986	54.6				42.8	
1987	34.4				27.8	
1988	34.6		34.4		42.7	
1989	27.3		64.2		78.8	
1990	38.3		30.4		20	
1991	72		81.8			
1992			44.4		31.9	
1993	26		32		67.1	
1994	30.3		32		44	
1995	41.2		28		58.4	

**Tabla 4.10. Altura de lluvia máxima para duración de una hora, en mm (continuación)**

AÑO	07134	07156	07112	07084	07106	27044	27054
1945							
1946							
1947							
1948							48.75
1949							50.75
1950							37.5
1951							37.6
1952							30
1953							34
1954							76.67
1955							79.5
1956							45
1957							75
1958							55.14
1959			37.50				65
1960			70.94				101.2
1961			74.49				66.06
1962	47.00	66.67	41.20		94.34	64	60
1963	46.50	38.70	54.00		56.80	65	76.67
1964		65.90	43.90		67.50	58	61.67
1965		54.55	62.83	47.81	52.80	74.25	90
1966	41.75	65.05	52.60	65.00	70.73	90	64.25
1967	52.80	90.00	39.33	52.33	67.51	67.3	40
1968	35.78	35.25	65.08	67.01	65.00	64.53	60
1969	60.00	50.33	48.67	66.48	57.25	54.35	60
1970	61.60	36.67	100.00	71.00	69.79	65	50
1971	48.10	69.55	30.00	64.43	105.70	58	47
1972	29.00	57.50	68.20	73.80	90.00	60.61	66.67
1973	49.50	56.50	58.50	58.33	62.00	90.17	36.67
1974	45.00	42.13	58.00	131.50	62.23	72.1	63.65
1975	60.58	23.53	36.00	76.56	61.73	58.57	51.2
1976	47.00	52.90	45.00	67.30	64.58	71	70
1977	26.90	38.20	55.00	58.50	45.70	60	40
1978	45.59	62.50		85.00	87.78	50.37	89
1979	80.00	46		80.00	78.75	50	63.5
1980	77.92	52.55		89.00	32.00	42.6	56.68
1981	39.66			125.83	98.60	61.51	43.33
1982	26.70			48.70	39.17	50.13	85
1983				55.53	34.95	54.35	74.73
1984							52.4
1985							
1986							
1987							
1988							
1989							
1990							
1991							
1992							
1993							
1994							
1995							

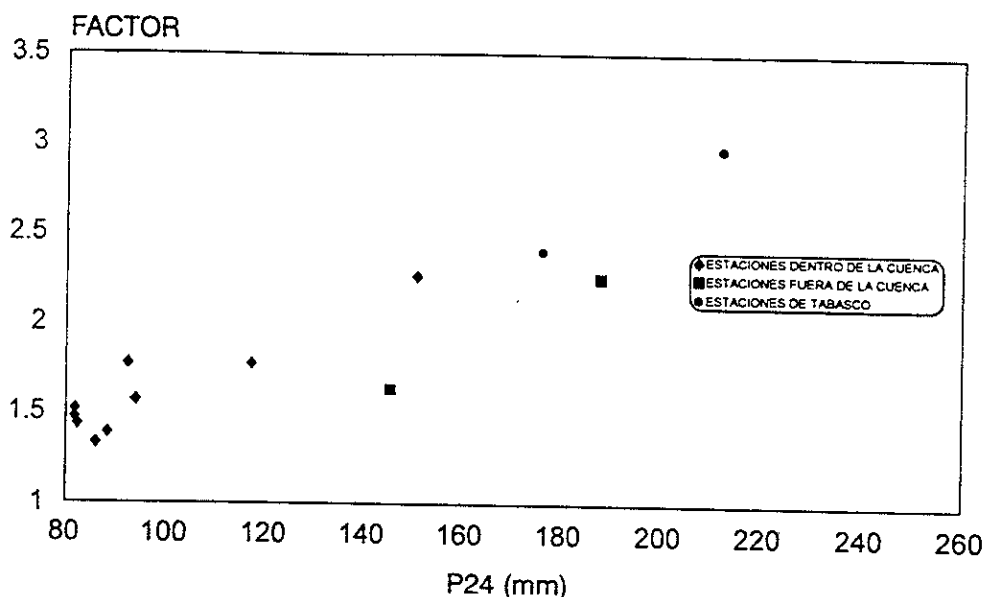


Fig. 4.15. Variación del factor de ajuste por duración con respecto a la precipitación en 24 horas, para período de retorno de 5 años. Distribución Gumbel.

De los resultados anteriores puede comentarse lo siguiente:

Los factores considerando distribución Gumbel o Doble Gumbel no presentan variación significativa, por lo que pueden utilizarse indistintamente.

De la fig. 4.15 se observa que al aumentar la precipitación total en 24 horas se incrementa también el factor de ajuste por duración, y que existe una tendencia de incremento de este factor para las estaciones ubicadas hacia el Golfo de México, esto es en zonas bajas. En este caso, la influencia de eventos ciclónicos provenientes del Golfo de México es mayor y el factor también se incrementa. Al parecer, a mayor precipitación total, ésta ocurre de manera más distribuida en el tiempo. Sin embargo, el número de estaciones consideradas en este análisis es pequeño y para comprobar lo anterior deberán hacerse estudios más completos tanto en esta región del país como en otras, de tal modo que pueda compararse el comportamiento de estos factores en zonas protegidas y expuestas al efecto de lluvias de origen ciclónico.

#### 4.5 Conclusiones

##### Factores de reducción por área

Se utilizó la ecuación 4.1, con los parámetros correspondientes a 5 años de período de retorno y a fin de comparar los resultados obtenidos en este estudio con los presentados previamente por otras instituciones, se presenta la tabla 4.12

**Tabla 4.12. Factores de ajuste por área**

Zona	Area (km <sup>2</sup> )				
	500	1000	30000	10000	30000
Inglaterra		0.89	0.86	0.83	0.80
Valle de México (1982)	0.47	0.30			
Grijalva (1992)		0.86	0.64	0.50	
Valle de México (1996)	0.70	0.62			
Alto Grijalva	0.85	0.77	0.64	0.50	0.37

Al comparar los resultados se observa que son muy diferentes entre sí, salvo para el estudio de la cuenca del río Grijalva (Tipacamú y Domínguez, 1992) y los presentados en este trabajo que son muy similares, lo que refuerza la hipótesis de que el área total de la cuenca analizada para la obtención de los mismos es factor determinante, así como, las características de la zona en estudio.

De cualquier forma, se considera que los valores obtenidos en este estudio son aplicables a la cuenca del alto río Grijalva y es necesario trabajar en la determinación de factores de reducción por área para otras cuencas de la República Mexicana, que puedan ser utilizados en zonas específicas, ya que éstos dependen de las características de cada región.

Como se comentó, para un área determinada, la variación del factor de reducción por área es muy grande, dependiendo del área total de la cuenca para la se hayan obtenido estos factores, por lo que en estudios posteriores sería recomendable trabajar con áreas normalizadas (Cisneros, 1977), con respecto al área total, a fin de probar si de esta manera la variación a que se hizo referencia disminuye.

#### **Factores de ajuste por periodo de retorno.**

En la tabla 4.13 se presentan los resultados obtenidos en este estudio, del análisis regional con 23 estaciones, así como los de algunos de los estudios en otras zonas.

**Tabla 4.13. Factores de ajuste por periodo de retorno, con respecto a periodo base de 10 años.**

Zona	Periodo de retorno (años)						
	5	20	50	100	200	500	1000
EUA (Bell)	0.85		1.31	1.46			
Cuenca del Lerma	0.85	1.34	1.48				
Cuenca del Papaloapan	0.86	1.144	1.33	1.48			
Golfo de México	0.86		1.31	1.44	1.56		
Valle de México (1997)	0.88		1.24	1.34		1.55	1.75
Alto Grijalva (para 24 horas)	0.87	1.12	1.27	1.40	1.51	1.66	1.78
Alto Grijalva (para 1 hora)	0.86	1.14	1.32	1.45	1.59	1.76	1.9

Como puede observarse, los factores anteriores son muy similares; existe variación más notable de los factores obtenidos para la región del Alto Grijalva con duración de una hora y periodos de retorno grandes, sin embargo esta diferencia no rebasa el 10 %.

Lo anterior reafirma los resultados presentados en otros trabajos (Bell, 1969; Barrios y Domínguez, 1986), en cuanto a la independencia de estos factores de ajuste tanto de la ubicación como de la duración.

Sin embargo, en la tabla 2.2 (pag. 14) puede observarse que estos factores han sido estudiados especialmente para períodos de retorno no muy grandes (hasta 100 años), por lo que en estudios futuros sería conveniente abocarse a obtenerlos para períodos grandes, aplicando técnicas de análisis regional.

### Factores de ajuste por duración

En la tabla 4.14 se presentan los resultados obtenidos en cuanto al factor de ajuste por duración, para duración de una con respecto a 24 horas y período de retorno de 5 años ( $P_{24}^5/P_1^5$ ), para la región del alto Grijalva, así como algunos de los obtenidos anteriormente para otras zonas

**Tabla 4.14 Factores de ajuste por duración para distintas regiones.**

Zona	Factor	Valores extremos
EUA (Cheng)		1.67-10
EUA (Campos)	2.13	1.57-3.57
México (Campos)	2.09	1.55-4.9
Papaloapan (zona alta)	2.22	1.52-3.57
Papaloapan (zona media)	3.33	2.33-4.76
Papaloapan (zona baja)	2.33	1.47-3.13
Golfo de México	2.16	1.43-4.17
Valle de México	1.52	
Alto Grijalva	1.6	1.14-2.3

Sobre los resultados presentados en la tabla 4.14 pueden hacerse las siguientes precisiones:

El valor 1.6 presentado para la región del alto Grijalva es el promedio de los factores calculados para las nueve estaciones climatológicas ubicadas dentro de la cuenca, mismo que coincide para los cuatro casos presentados en la tabla 4.11, esto es, para períodos de retorno de 5 y 10 años, obtenidos con distribución Gumbel o Doble Gumbel.

Como se comentó en el capítulo dos, el factor de ajuste por duración para duración de 24 horas es muy variable de una región a otra, según estos resultados el intervalo podría ser de 1 a 10; y, para el caso particular de la República Mexicana de 1 a 5, de acuerdo con los estudios efectuados hasta ahora.

De los resultados encontrados para la cuenca del Papaloapan y en este trabajo (incluyendo las estaciones ubicadas fuera de la cuenca de análisis), se observa que este factor se incrementa en zonas de lluvias de origen ciclónico.

Al parecer, a mayor precipitación total, ésta se distribuye más en el tiempo, sin embargo, el número de estaciones analizadas en este trabajo es pequeño, por lo que deben hacerse estudios más completos tanto en esta región como en otras del país.

Los valores menores se presentan en zonas de precipitaciones convectivas, como son la cuenca del alto río Grijalva y la del Valle de México, que en este caso se tienen valores muy parecidos, 1.6 y 1.52, respectivamente.

Sin embargo, para comprobar lo anterior deberán obtenerse factores de ajuste tanto en zonas protegidas de la incidencia directa de ciclones como en regiones afectadas por los mismos, a fin de comparar dichos resultados.

Aunque en este trabajo únicamente se trabajó con períodos de retorno de 5 y 10 años, los resultados aquí obtenidos, así como los de estudios anteriores, demuestran que los factores de ajuste por duración son independientes del período de retorno.

Por último, es recomendable calcular factores de ajuste por duración para diversas regiones del país, que puedan ser utilizados en las zonas correspondientes.

#### 4.6 Ejemplo de aplicación

A fin de mostrar la utilidad de contar con mapas de precipitación y factores de ajuste, se presenta la siguiente aplicación:

*Supóngase que se quiere determinar la lluvia de diseño en un sitio ubicado en las coordenadas  $16^{\circ} 30'$ , latitud norte y  $93^{\circ} 30'$ , longitud oeste; para período de retorno de 50 años y duración de una hora. El área de la cuenca en análisis es de  $5\ 000\text{ km}^2$ .*

Primeramente es necesario obtener de la fig. A1.3 (anexo A.1), para 10 años de período de retorno (que es el período base para los factores de ajuste por período de retorno de la región) la precipitación en 24 horas en el sitio de interés, que es de 102 mm.

La precipitación en 24 horas, para 50 años, es entonces

$$P_{24}^{50} = 102\text{mm} \cdot (1.27) = 129.54\text{mm}$$

donde el factor 1.27 fue tomado de la tabla 4.8 para 50 años de período de retorno.

Nótese que en este caso, también se cuenta con el mapa de precipitaciones para 50 años y 24 horas (figura A1.5, anexo A1), del que se obtiene la altura de lluvia



para el sitio de interés, de 125 mm, que es muy similar a la calculada anteriormente.

Ahora, para calcular la precipitación para una hora y 50 años de período de retorno, es necesario aplicar el factor de ajuste por duración, con lo que

$$P_1^{50} = \frac{129.54}{1.6} = 80.96mm$$

En este caso se aplicó el valor promedio para esta región, que resultó ser de 1.6, ya que la región analizada es homogénea en cuanto al tipo de fenómenos que en ella provocan las lluvias y a que la variación de dichos factores en la zona no fue notoria. Sin embargo, es importante señalar que en general este factor sí depende de la ubicación y aparentemente de la influencia de ciclones en la zona, por lo que para elegir el factor correspondiente debe tenerse especial cuidado.

Finalmente, para considerar el efecto de no simultaneidad de los eventos presentados en la cuenca en cuestión, debe aplicarse el factor de reducción por área, con la ecuación 4.1 y los parámetros correspondientes a 5 años de período de retorno (recordemos que todo parece indicar que no hay variación de este factor con respecto al período de retorno y que al menos para esta región esto se comprueba), se tiene

$$F = -0.117(5000) + 1.5803 = 0.58$$

que es muy similar al que se obtendría de la fig. 4.3.

Entonces, la altura de lluvia para duración de una hora y 50 años de período de retorno, para la cuenca de interés resulta:

$$P_1^{50} = 86.96.(0.58) = 50.74mm$$

Puede observarse que contando con factores de ajuste por área, duración y período de retorno y con mapas de isoyetas, sobre todo para el período de retorno base, se pueden obtener alturas de lluvia de diseño de manera muy sencilla y confiable.

## 5 RESULTADOS DE LA REGIONALIZACIÓN DE GASTOS.

Una de las formas de obtener el gasto de diseño para el dimensionamiento de las obras hidráulicas es mediante el análisis de los registros históricos de la estación de interés, sin embargo no siempre se cuenta con una estación hidrométrica ubicada precisamente en el sitio necesario o el registro existente no es lo suficientemente largo para hacer la estimación con seguridad.

Uno de los objetivos de este trabajo es tratar de aprovechar los datos hidrométricos de varias estaciones ubicadas en la cuenca del alto río Grijalva y aplicar un análisis regional a los mismos, a fin de tener resultados que eventualmente puedan ser utilizados en el diseño de futuras obras en sitios ubicados dentro de esta cuenca.

Para seleccionar las estaciones se tomó en cuenta la extensión de los registros históricos; la ubicación de las estaciones, esto es que se distribuyeran en toda la cuenca de análisis y el área de las subcuencas correspondientes, a fin de tener un intervalo que permitiera obtener una relación entre los escurrimientos y las características fisiográficas. Las estaciones consideradas fueron Las Flores, Santo Domingo, Santa María, Puente Colgante, Yamonhó, Boquerón, San Miguel, Puente Concordia y Río Blanco (fig. 5.1).

En la tabla 5.1 se muestran los gastos máximos anuales registrados en las estaciones mencionadas, mismos que se obtuvieron de las fuentes siguientes:

Las Flores: de la base de datos BANDAS ( Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales)

Santo Domingo: De la División Hidrométrica Sureste (DHS), de la Comisión Federal de Electricidad.

Santa María: De 1962 a 1985 del BANDAS y 1961, 1990 a 1996 de la DHS.

Puente Colgante: De 1948 a 1951 del BANDAS y de 1952 a 1973 de la DHS.

Yamonhó, Boquerón, San Miguel, Río Blanco, Puente Concordia y Boquerón de la DHS.

Al analizar la tendencia de los gastos máximos anuales (Q) de cada estación por separado, se observa que los de Las Flores, Santa María y Santo Domingo (figuras 5.5, 5.6 y 5.7) podrían ajustarse a una distribución del tipo Doble Gumbel; las estaciones Río Blanco, Puente Concordia y San Miguel (figuras 5.11, 5.12 y 5.13), siguen una tendencia del tipo Gumbel; y, por último, las estaciones Boquerón, Puente Colgante y Yamonhó (figuras 5.8, 5.9 y 5.10) no presentan una tendencia muy clara de ajuste con respecto a estas dos funciones.

A fin de tener resultados más confiables, sobretodo con extrapolaciones para períodos de retorno largos, se decidió analizar la información en forma regional, para lo que se utilizó el método de índice de avenida con la hipótesis de las estaciones-año (considerando como variable de transformación el promedio de los gastos máximos anuales,  $Q_{medio}$ , como lo propone este método), de la siguiente manera.

a) Con los 95 datos transformados de las estaciones Las Flores, Santa María y Santo Domingo, se ajustó una distribución del tipo Doble Gumbel (figura 5.2). Cabe aclarar que estas estaciones presentaron en 1980 gastos sumamente altos, al parecer por la presencia del huracán Herminia, ya que, por ejemplo en Las Flores se estimaron  $9350 \text{ m}^3/\text{s}$ , punto que se separa totalmente de la muestra conformada por los datos de estas tres estaciones.

Al hacer el ajuste se decidió conservar este dato pero procurando que la curva pasara por la mayor parte de los datos de la muestra, ya que la estimación de estos gastos extraordinarios no es por lo general totalmente confiable<sup>1</sup> y que, como se comentó, el valor de  $9350 \text{ m}^3/\text{s}$  resulta extraordinario; y probablemente corresponda a un período de retorno mayor que el número de datos de la muestra.

Sin embargo, en las tres estaciones se tienen máximos para 1980, provocados aparentemente por el mismo fenómeno, por lo que sería recomendable analizar en un estudio posterior, esta muestra considerando únicamente el máximo de los tres o bien obteniendo la mediana de los mismos.

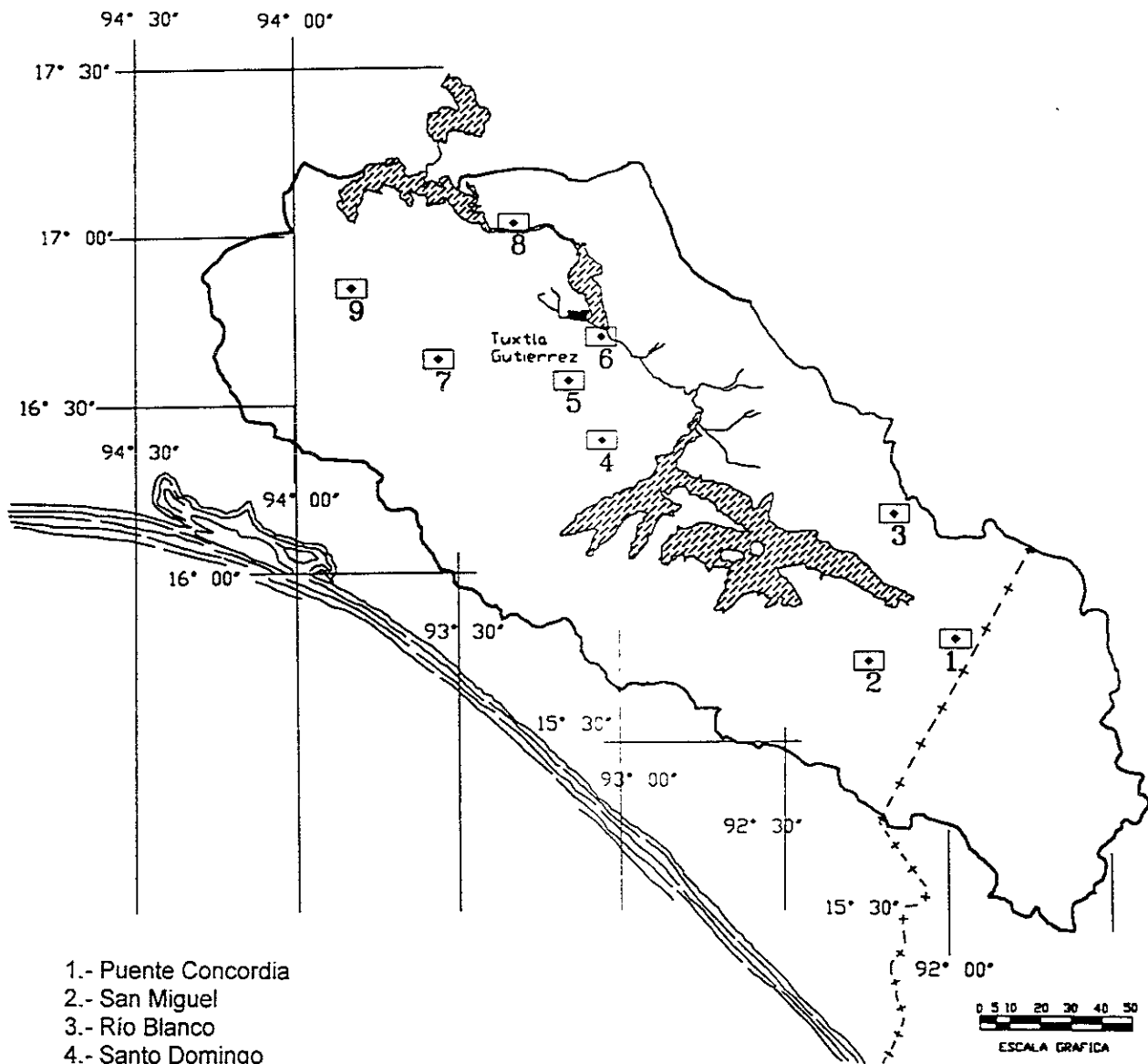
b) Como se mencionó, el interés es aprovechar los datos de toda la región, de esta manera con los gastos transformados de todas las estaciones( 255 datos) se hizo un análisis de tendencia, del cual se dedujo que éstos pueden ajustarse a una distribución Doble Gumbel (figura 5.3). Al igual que en el caso anterior, este ajuste se efectuó procurando que la mayor parte de los datos pasara por la curva propuesta, aunque el dato extraordinario de la estación Las Flores se separe de la misma.

La hipótesis es que las estaciones Puente Colgante, Yamonhó y Boquerón, por la tendencia que presentan, puedan ser analizadas mediante esta segunda curva regional

c) Por último, con los datos transformados de todas las estaciones, excepto las del inciso a, se conformó una muestra de 160 elementos a los que se les ajustó una función de distribución de probabilidades de Gumbel (figura 5.4). Se espera que las estaciones San Miguel, Puente Concordia y Río Blanco se comporten siguiendo esta curva.

---

<sup>1</sup> En este sentido, sería conveniente (aunque excede los alcances de este trabajo) hacer un análisis cuidadoso de la extrapolación de la curva de gastos, con el procedimiento descrito en (Domínguez, 1989)



- 1.- Puente Concordia
- 2.- San Miguel
- 3.- Río Blanco
- 4.- Santo Domingo
- 5.- Boquerón
- 6.- Puente Colgante
- 7.- Las Flores
- 8.- Yamonhó
- 9.- Santa María

Fig. 5.1. Estaciones hidrométricas consideradas en el estudio

Tabla 5.1 Gastos máximos anuales (Q), en m<sup>3</sup>/s, de las cuencas analizadas

Año	Puente Concordia	Santo Domingo	Boquerón	San Miguel	Santa María	Río Blanco	Yamonhó	Las Flores	Puente Colgante
1948									1256
1949									1896
1950									1754
1951									1420
1952			282						2116
1953		177	181						2056
1954		486	260						1751
1955		610	272						3449
1956		278	222						2367
1957		246	80						1590
1958		255	299						2003
1959		295	168						1684
1960		353	239						2479
1961		300	139		651				1702
1962	529	265	290		284			482	2422
1963	845	1740	623		559	152		798	5908
1964	557	675	158		365	173		436	1868
1965	571	625	130		244	107		243	2810
1966	726	898	238		440	89		309	2515
1967	510	475	185		409	47		272	1579
1968	448	665	181		347	121	245	279	2347
1969	1032	587	296		529	224	269	349	2715
1970	481		323		1397	298	333	741	3156
1971	362		268		671	130	39	434	2164
1972	530		267		700	76	160	185	1733
1973	481		501		1453	329	203	1163	3825
1974	629				638	111	354	379	
1975	693				432	98	300	192	
1976	448	88.1		1069	387	125	86	142	
1977	422	118		1016	401	117	107	80	
1978	545	276		1250	537	165	372	311	
1979	841	280		1566	500	213	632	302	
1980	479	1418		1670	3247	139	129	9350	
1981	597	256		1552	1060	173	220	581	
1982	578	287		1053	345	133	131	154	
1983	385	204		934	396	175	79	499	
1984	671	325		1199	1008		148		
1985	249	191	166	942	291		298	190	
1986	308	141	306	590			621		
1987	394	147	173	1166			111		
1988	675	474	271	1396			363	1881	
1989	636	534	768	1667			517	2891	
1990	370	187	100	734				119	
1991	337	40.8	112	1054	220			163	
1992	519	276	184	1589	252			184	
1993	396	200	260	1408				258	
1994	215	35.4	76	859	303		297	64	
1995	480	153		1440	454		355		
1996	644	111		1013	277		106		

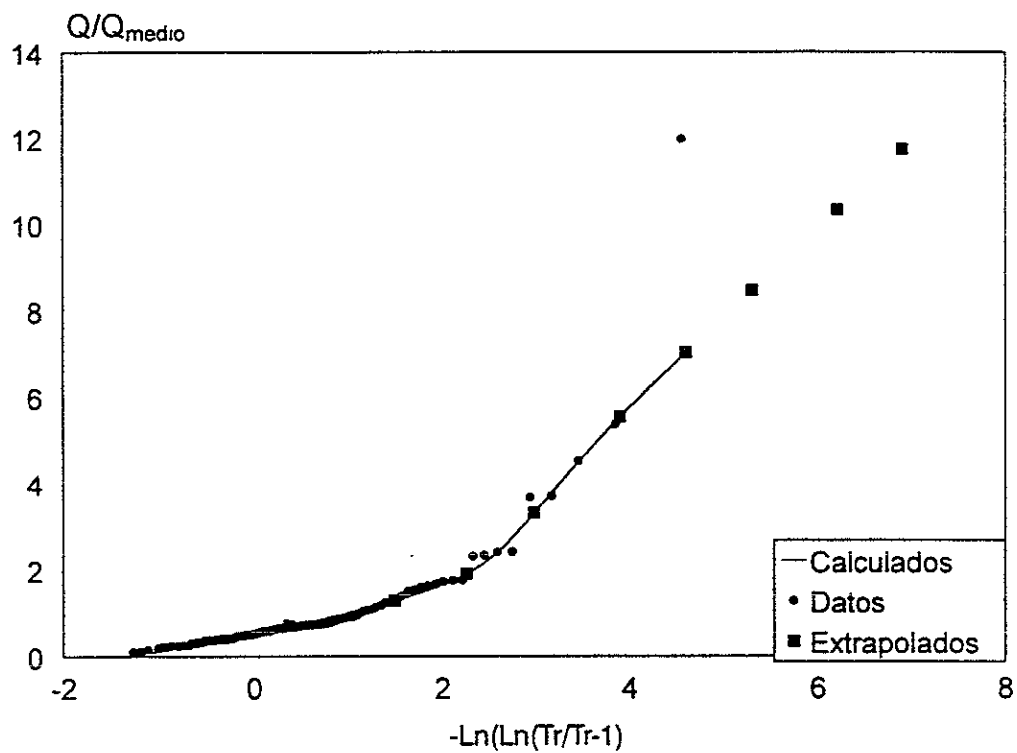


Fig. 5.2 Ajuste con datos de Las Flores, Santa María y Santo domingo.

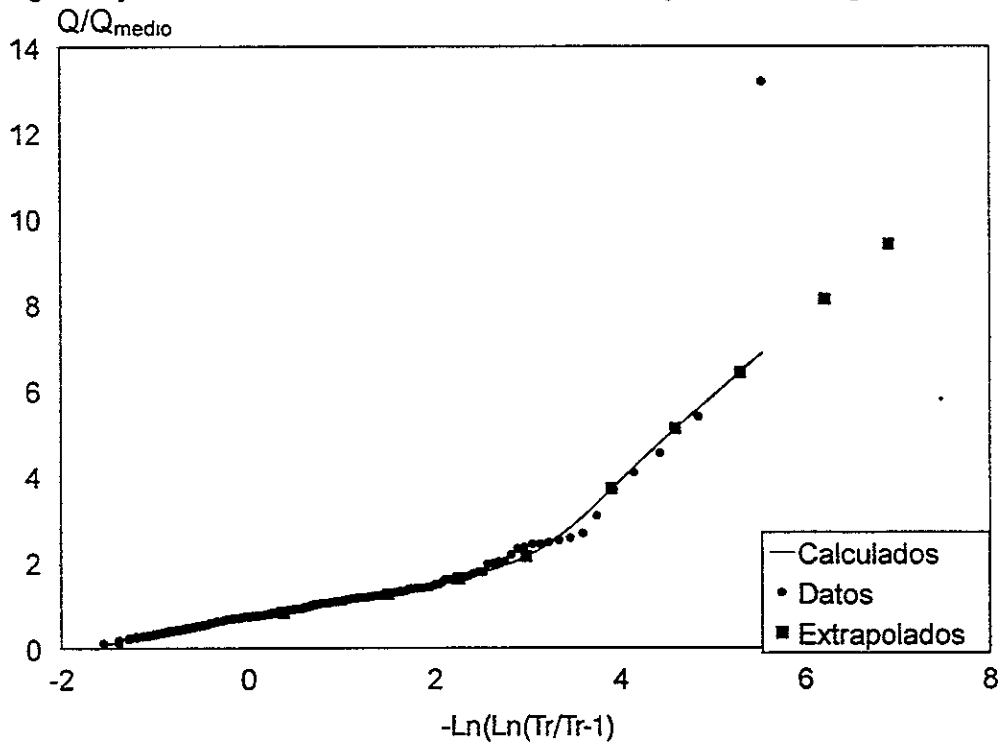


Fig. 5.3 Ajuste con datos de todas las estaciones.

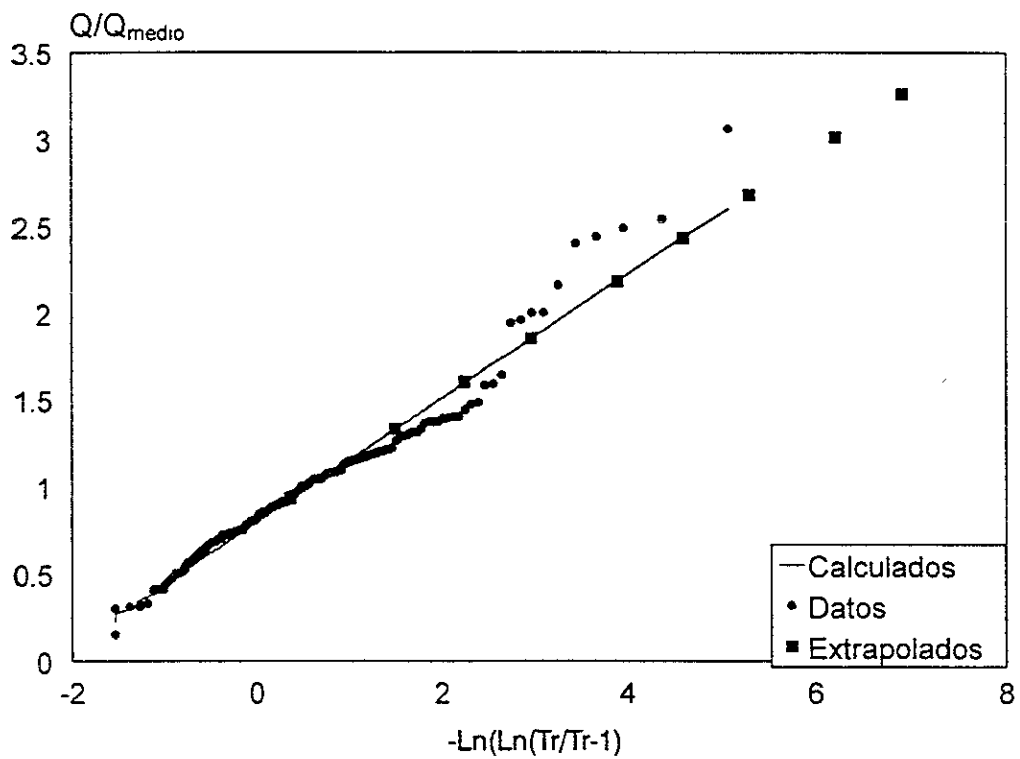


Fig. 5.4 Ajuste considerando todas las estaciones, excepto Las Flores, Santa María y Santo Domingo.

En la tabla 5.2 se muestran los parámetros de las funciones de ajuste para los tres casos descritos.

**Tabla 5.2 Parámetros de ajuste de las curvas regionales**

Ajuste	$a_1$	$c_1$	$a_2$	$c_2$	$p$
<i>a</i>	2.53	0.5	0.5	2.53	0.9
<i>b</i>	3.1	0.683	0.55	1.42	0.92
<i>c</i>	2.81	0.795			

Las relaciones  $Q/Q_{\text{medio}}$  obtenidas al extrapolar con las funciones antes mencionadas se presentan en la tabla 5.3.

**Tabla 5.3 Factores  $Q/Q_{\text{medio}}$  obtenidos con las curvas regionales**

Ajuste	Período de retorno (años)								
	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
<i>a</i>	0.7	1.28	1.9	3.31	5.53	7.03	8.47	10.33	11.73
<i>b</i>	0.83	1.25	1.6	2.12	3.69	5.08	6.4	8.1	9.38
<i>c</i>	0.93	1.33	1.6	1.85	2.18	2.43	2.68	3.01	3.26

Al aplicar la transformación inversa, se utilizaron los factores de la tabla 5.3, y los gastos medios de las estaciones estudiadas, considerando que Las Flores, Santo Domingo y Santa María se comportan como el caso *a*; Boquerón, Yamonhó y Puente Colgante como el *b*; y San Miguel, Puente Concordia y Río Blanco como el *c*, se obtienen los gastos máximos mostrados en las figuras 5.5 a 5.13.

Al analizar estas figuras se observa que los datos medidos en cada una de las estaciones sí se comportan, en general, como las curvas regionales obtenidas. Pueden apuntarse sin embargo, los siguientes comentarios.

Para el caso particular de la estación San Miguel sería recomendable obtener información en cuanto a la forma en que se hacen los aforos en la misma, ya que el comportamiento de dichos datos sale de lo común ( los 5 valores más grandes son muy semejantes entre sí, de tal forma que la asimetría de la muestra resulta negativa, cosa que casi nunca se presenta en muestras de gastos máximos anuales).

En cuanto a la estación Boquerón, es necesario completar su registro, especialmente para el año de 1980, ya que por su ubicación debería tener un comportamiento similar a Las Flores, Santo Domingo y Santa María.

Adicionalmente se aplicó la prueba de Fisher (Carrizosa, 1997) a los datos transformados de las nueve estaciones; en la tabla 5.4 (pag. 90) se indican los parámetros necesarios



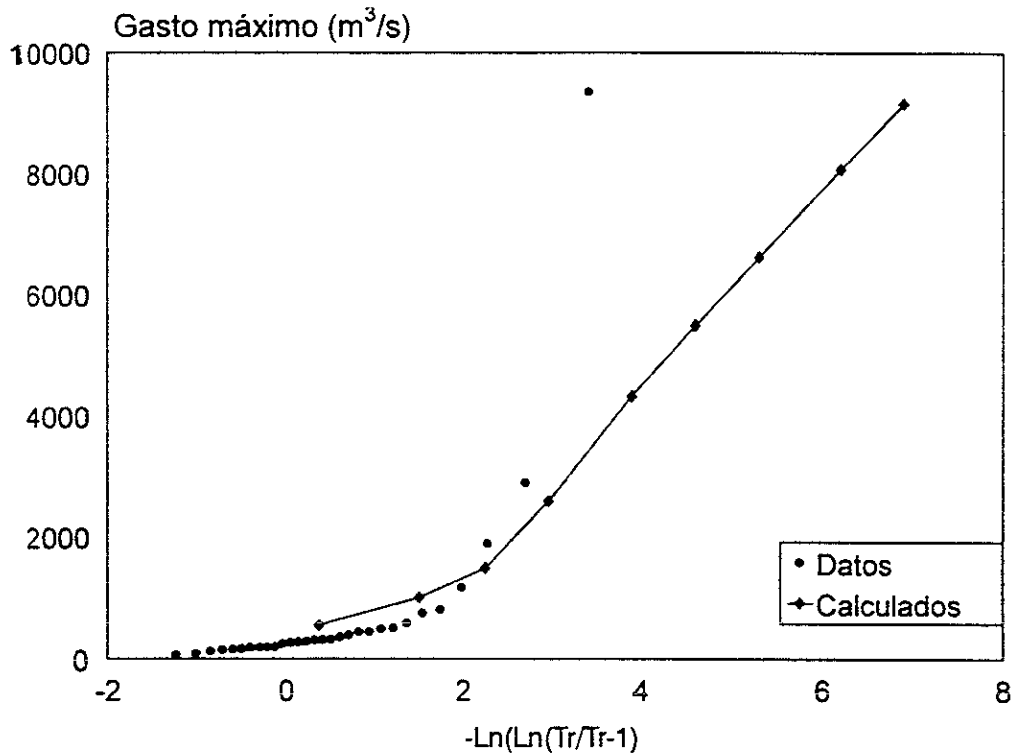


Fig. 5.5 Estación Las Flores.

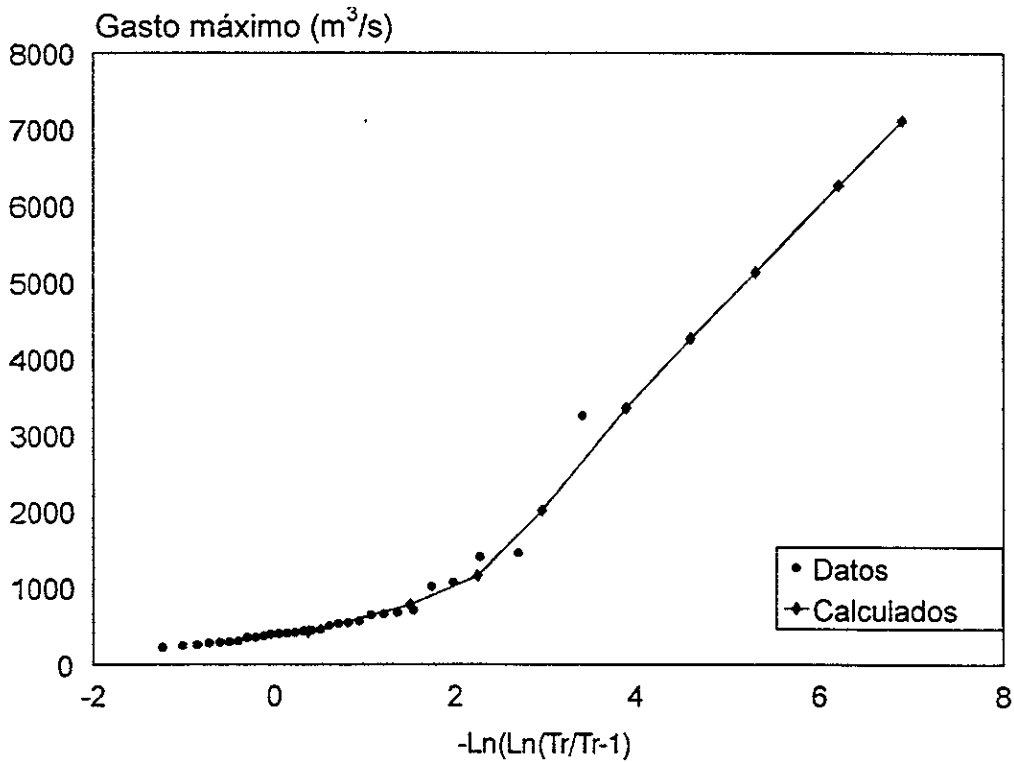


Fig. 5.6 Estación Santa María.

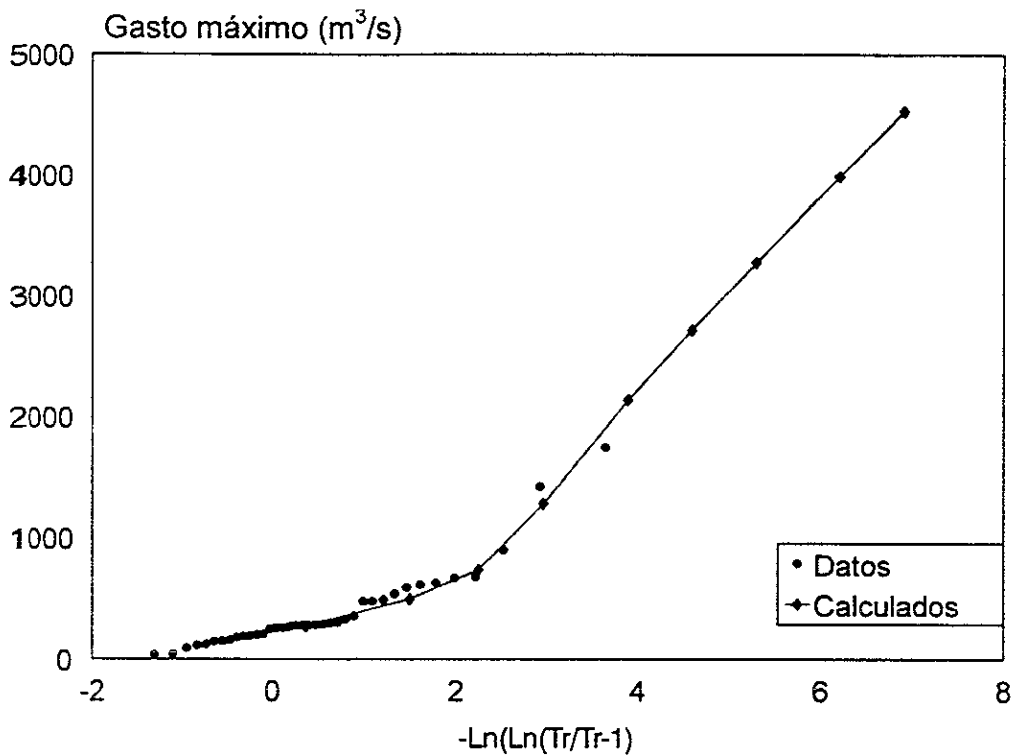


Fig. 5.7 Estación Santo Domingo.

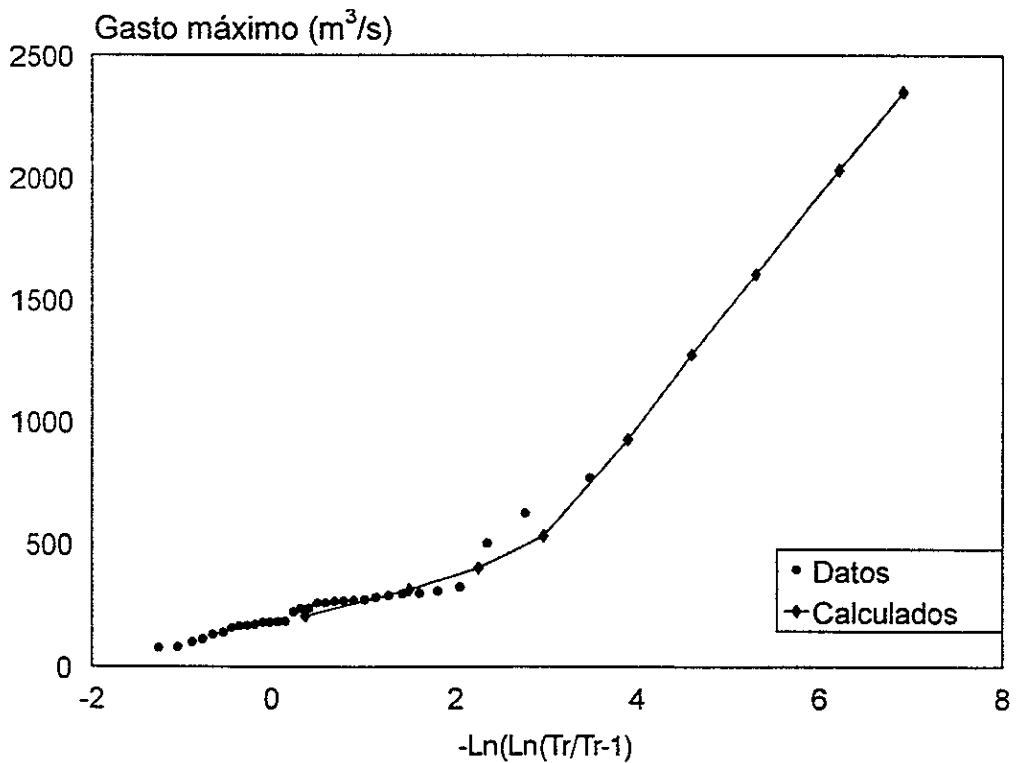


Fig. 5.8 Estación Boquerón.

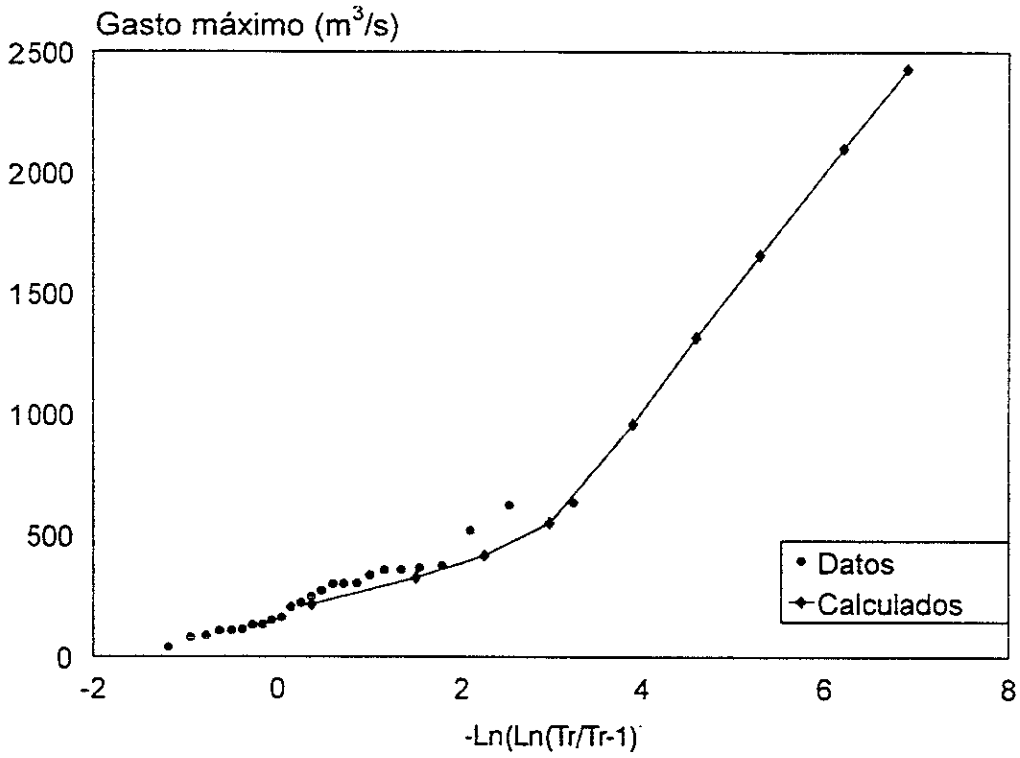


Fig. 5.9 Estación Yamonhó.

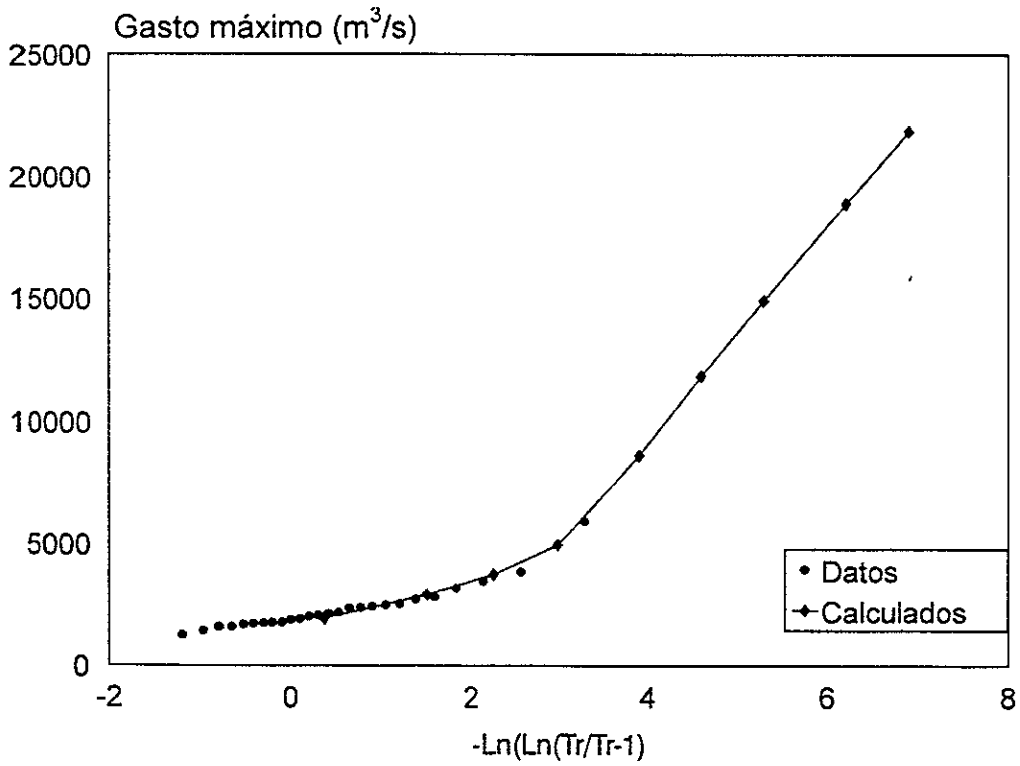


Fig. 5.10 Estación Puente Colgante

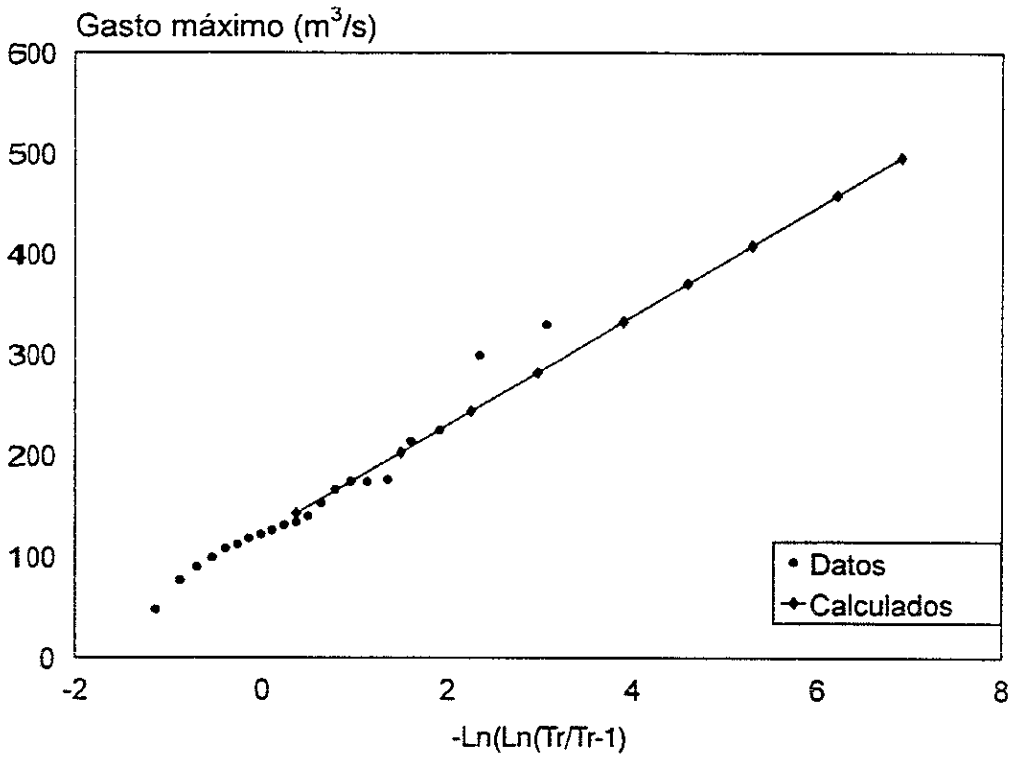


Fig. 5.11 Estación Río Blanco.

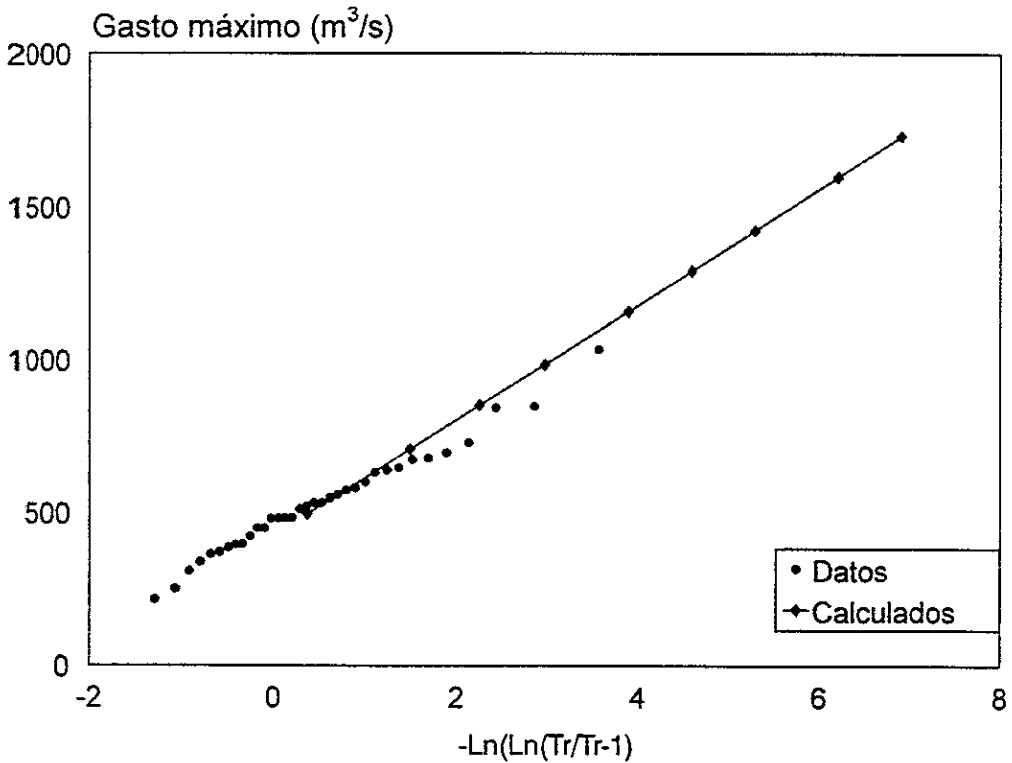


Fig. 5.12 Estación Puente Concordia

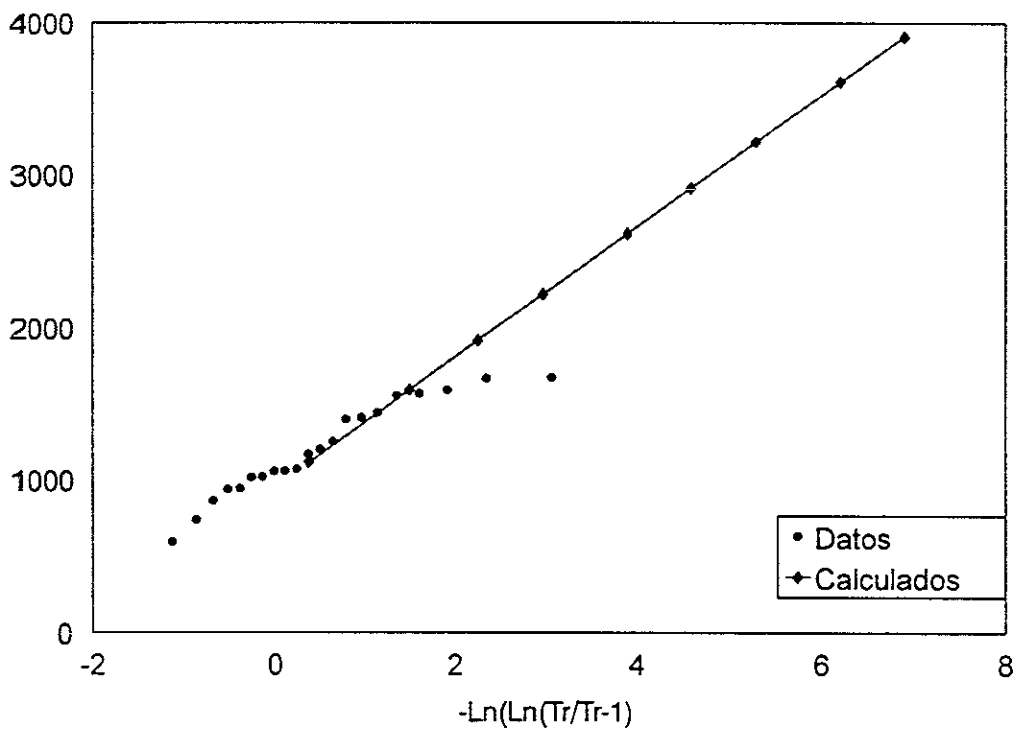


Fig. 5.13 Estación San Miguel.

**Tabla 5.4. Datos requeridos para aplicar la prueba de Fisher.**

Estación	Varianza	No. de datos
Las flores	4.69	35
Santa María	0.98	38
Santo Domingo	0.79	32
Yamonhó	0.37	21
Boquerón	0.33	31
Río Blanco	0.19	21
Puente Colgante	0.16	25
Puente Concordia	0.10	30
San Miguel	0.07	26

Se determinó que podrían formarse cuatro grupos, el primero con la estación Las Flores; el segundo con Santa María, Santo Domingo y Yamonhó; el tercero con Boquerón, Río Blanco y Puente Colgante; y el cuarto con las estaciones Puente Concordia y San Miguel.

Sin embargo, en la estación Las Flores se estimó en 1980 un gasto que sale del rango de los presentados en esta estación en todo su registro histórico, lo que incrementa la varianza de la muestra, y por el contrario, para Boquerón no se cuenta con datos de ese año, lo que seguramente incrementaría la varianza del conjunto de datos de esta estación, por lo que se considera que el análisis mediante el que se obtuvieron las curvas regionales es más representativo de la región en estudio.

Lo anterior refuerza lo anteriormente expresado sobre la necesidad de completar y revisar los datos, especialmente de estas dos estaciones.

### **Relación entre el gasto medio máximo anual y las características fisiográficas de las cuencas.**

Con objeto de obtener relaciones que puedan ser utilizadas en cuencas sin registro hidrométrico para estimar los gastos asociados con distintos períodos de retorno, se trató de correlacionar los gastos medios de las nueve subcuencas con las características fisiográficas (área, longitud y pendiente) de las mismas. En la tabla 5.5 se indican dichas características.

**Tabla 5.5 Características de las cuencas analizadas**

Estación	Gasto medio (m <sup>3</sup> /s)	Área (km <sup>2</sup> )	Longitud (km)	Pendiente
Yamonhó	259	190.3	30	0.0286
Santo Domingo	386	1415.7	81	0.0069
Boquerón	251	1471.8	88	0.0082
Santa María	606	1584.6	80	0.013
Río Blanco	152	1878.8	60	0.0107
Las Flores	781	2404.5	95	0.0042
Pte Concordia	531	3789.1	60	0.0087
San Miguel	1198	4767.5	160	0.009
Pte Colgante	2329	24765.4	340	0.0028

Primeramente se analizó la relación área-gasto medio máximo anual y en la fig 5.14 se observan tanto los datos como la ecuación de ajuste que resultó del tipo:

$$Q_{medio} = 11.163 A^{0.4982} \dots\dots\dots(5.1)$$

El coeficiente de correlación al linealizar la ecuación anterior resultó de 0.9

En la fig. 5.14 se muestra el valor  $L/\sqrt{S}$  correspondiente a cada cuenca, como puede observarse, por arriba de la curva de ajuste se tienen, en general, valores grandes de esta relación (mayores de 1000), mientras que por abajo de la curva se observan valores menores que esta cantidad. Por lo anterior, se decidió hacer un ajuste considerando las tres variables, mediante el que se obtuvo la ecuación:

$$Q_{medio} = 4.6 A^{0.1} (L/\sqrt{S})^{0.58} \dots\dots\dots(5.2)$$

donde:

A, área de la cuenca, en km<sup>2</sup>.

L, longitud del cauce principal, en km.

S, pendiente del cauce principal, adimensional.

Q<sub>medio</sub>, gasto medio (de los máximos anuales), en m<sup>3</sup>/s.

El coeficiente de correlación al linealizar la ecuación 5.2 fue de 0.94.

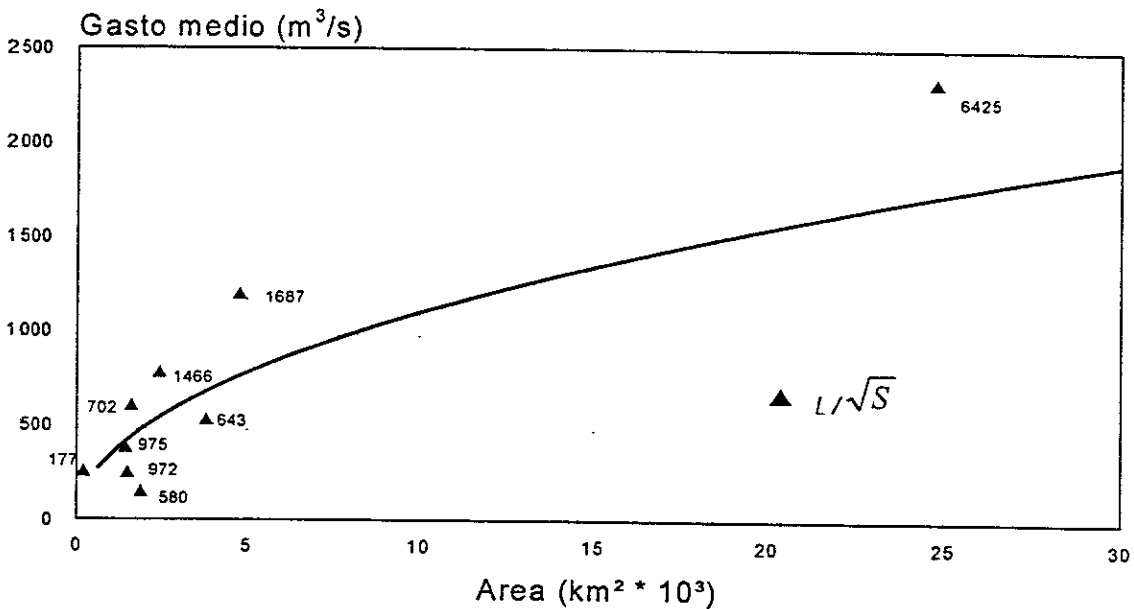


Fig 5.14 Relación área-gasto medio máximo anual.

Al comparar los valores estimados por medio de estas dos ecuaciones con los promedios de los gastos máximos para cada cuenca, se observa que la ecuación 5.1 arroja buenos resultados para áreas menores de 1500 km<sup>2</sup>, mientras que al aplicar la 5.2 los resultados son aceptables para todo el intervalo de áreas analizadas. Por lo anterior, se recomienda que para diseños futuros en la zona y de contar con los parámetros requeridos, se utilice la ecuación 5.2, sin embargo, la ecuación 5.1 puede ser usada para áreas menores a la mencionada.

Finalmente, utilizando las ecuaciones 5.1 o 5.2 y los factores de la tabla 5.3 puede estimarse el gasto de diseño para obras ubicadas en la región estudiada. Para seleccionar el factor de ajuste más conveniente (*a*, *b* ó *c* en la tabla 5.3) se sugiere utilizar las siguientes consideraciones:

- 1) Un valor aproximado que puede utilizarse en cualquier sitio es el correspondiente al renglón *b*.
- 2) Si se tiene evidencia de que los gastos máximos pueden provenir de dos poblaciones (por ejemplo si la cuenca está ubicada en la región comprendida entre las cuencas de Santo Domingo y Las Flores) pueden aplicarse los factores del renglón *a*.
- 3) Por el contrario, si se considera que no hay el efecto de dos poblaciones (por ejemplo para cuencas en la zona de las estaciones San Miguel, Puente Concordia y Río Blanco) pueden aplicarse los factores del renglón *c*.



## 6 CONCLUSIONES

La región del alto Grijalva, por sus características topográficas, se encuentra protegida de la incidencia directa de eventos de origen ciclónico. El trabajo realizado permitió mostrar la posibilidad de aprovechar las bases de datos CLICOM y BANDAS para realizar estudios regionales que sirvan de apoyo a estudios hidrológicos específicos en dicha región. ✖

Los principales resultados obtenidos del estudio respecto al cálculo de tormentas de diseño son:

- a) Se calcularon isolíneas de precipitaciones máximas en 24h para diversos períodos de retorno (figura 4.2, pag.51 y anexo A1, pag.96).
- b) Se obtuvieron factores de reducción por área para la cuenca alta del Grijalva, que pueden aplicarse en cuencas desde 400 hasta 30,000 km<sup>2</sup>, dentro de la región. Con estos resultados se ajustó una curva que permite calcular, en forma rápida y sencilla, el factor correspondiente al área de interés.
- c) Se calcularon factores de ajuste por período de retorno ( $P_t^T/P_t^{10}$ ) para períodos de retorno entre 2 y 1 000 años, con duraciones de una y 24 horas; los resultados muestran que el factor de ajuste por período de retorno no depende de la duración. Se utilizó el período base de 10 años en ambos casos.
- d) Se obtuvieron factores de ajuste por duración ( $P_{24}^T/P_1^T$ ), para duración de 24 horas con respecto a una hora, para períodos de retorno de 5 y 10 años; también en este caso se observó que el factor de ajuste por duración es independiente del período de retorno.

Los resultados anteriores, obtenidos mediante un análisis regional, lo que les da mayor confiabilidad y robustez, son indispensables para calcular la tormenta de diseño en cualquier cuenca de la región.

En cuanto al análisis regional de gastos máximos, se logró construir la tabla 5.3 (pag. 84), que permite el cálculo de gastos máximos de diseño para cualquiera de las nueve cuencas estudiadas. Adicionalmente, con base en las funciones de distribución de los gastos máximos regionalizados, es posible obtener gastos de diseño para otras cuencas de la región, siempre que previamente se calcule el valor medio  $\bar{Q}(j)$  de los gastos máximos anuales registrados en dicha cuenca. Para ello pueden utilizarse las ecuaciones 5.1 y 5.2 que relacionan el gasto medio con las características fisiográficas, lo que permite obtener eventos de diseño en cuencas de la región que no estén aforadas.

Sobre los resultados obtenidos en este trabajo puede comentarse lo siguiente:

### **Factor de reducción por área**

Los resultados obtenidos tanto en este trabajo como en estudios anteriores parecen mostrar que la magnitud del área total de la cuenca estudiada es un índice determinante en los factores de reducción por área calculados, así como las características de la región en análisis, por lo que su utilización en otras cuencas de área y características distintas no es recomendable. Sin embargo, los estudios llevados a cabo sobre estos factores son muy reducidos por lo que es recomendable calcular factores de reducción por área para otras regiones de nuestro país, que por un lado, puedan ser aplicados en áreas específicas y por otro permitan comprobar si los índices mencionados son realmente relevantes.

Asimismo, se observa, que estos factores son aparentemente independientes del período de retorno (por lo menos para la región del alto río Grijalva así sucede).

### **Factor de ajuste por período de retorno**

Para el cálculo de estos factores se utilizó el método de índice de avenida con la hipótesis de las estaciones-año, que permite analizar datos de varias estaciones en forma conjunta. Se estudiaron grupos de 24 y 23 estaciones, y al aplicar la prueba de Fisher para comprobar la homogeneidad de los datos, pudieron formarse tres subgrupos, para el primer caso y dos en el segundo; sin embargo, los resultados obtenidos son muy similares en todos los casos. Asimismo se analizó la información de seis estaciones para duración de una hora.

Los resultados comprueban lo obtenido en estudios anteriores en cuanto a la independencia de estos factores de ajuste con respecto tanto a la ubicación como a la duración, por lo que los factores calculados para la región del alto Grijalva podrían ser utilizados en otras zonas con características semejantes (particularmente en las que no se tenga incidencia directa de huracanes).

### **Factores de ajuste por duración**

Se estudiaron nueve estaciones dentro de la cuenca y cuatro fuera de ella. Para las estaciones dentro de la cuenca se obtuvo un factor de ajuste por duración promedio de 1.6, con valores extremos de 1.14 y 2.3. Se observó un incremento de dicho factor hacia zonas más bajas con incidencia de eventos de origen ciclónico, provenientes del Golfo de México.

De los resultados obtenidos en estudios anteriores es claro que para duraciones menores de dos horas, este factor no varía de una región a otra, sin embargo para duraciones mayores, como es el caso de 24 horas que se analizó para la cuenca del alto Grijalva, sí se encuentran variaciones significativas con respecto a otras

regiones, especialmente en las que el origen de las lluvias es distinto, esto es, para zonas con incidencia ciclónica.

Para comprobar lo anterior será necesario obtener estos factores para diversas regiones del país, tanto en zonas en que las precipitaciones sean de origen convectivo como en las que sean de origen ciclónico.

### **Análisis de gastos máximos anuales**

Para el análisis se utilizó el método de índice de avenida con la hipótesis de las estaciones-año, con lo que se logró distinguir tres regiones dentro de la cuenca del alto río Grijalva: la de las estaciones que tienen un comportamiento de dos poblaciones, como Santo Domingo, Santa María y Las Flores; las que se ajustan claramente a una distribución del tipo Gumbel, como San Miguel, Puente Concordia y Río Blanco; y, por último las que no tuvieron una tendencia muy clara de ajuste para estas dos distribuciones, como Puente Colgante, Yamonhó y Boquerón.

De acuerdo con lo anterior se obtuvieron tres curvas regionales, que podrían ser utilizadas en sitios localizados en la cuenca estudiada, para conocer el gasto de diseño incluso de obras ubicadas en cuencas no aforadas.

En cuanto a las ecuaciones que relacionan el gasto medio con las características fisiográficas, se obtuvieron dos, una en función del área de la cuenca y otra en función del área, longitud del cauce principal y pendiente del mismo. La primera es recomendable para cuencas menores de 1500 km<sup>2</sup> y la segunda para cuencas de cualquier magnitud, hasta 25 000 km<sup>2</sup>.

Finalmente, es necesario realizar más estudios regionales de este tipo, tanto en la cuenca del Grijalva como en otras cuencas de la República Mexicana. Para ello sería muy útil verificar, complementar y mantener actualizadas las bases de datos climatológicos e hidrométricos y fomentar su utilización.

## **ANEXO A.1**

### **Isolíneas de precipitación puntual**

En este anexo se presentan las figuras A.1.1 a A.1.6 que contienen las isolíneas de precipitación puntual, estimadas mediante el programa SURFER con los datos de 60 estaciones climatológicas, para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, respectivamente.

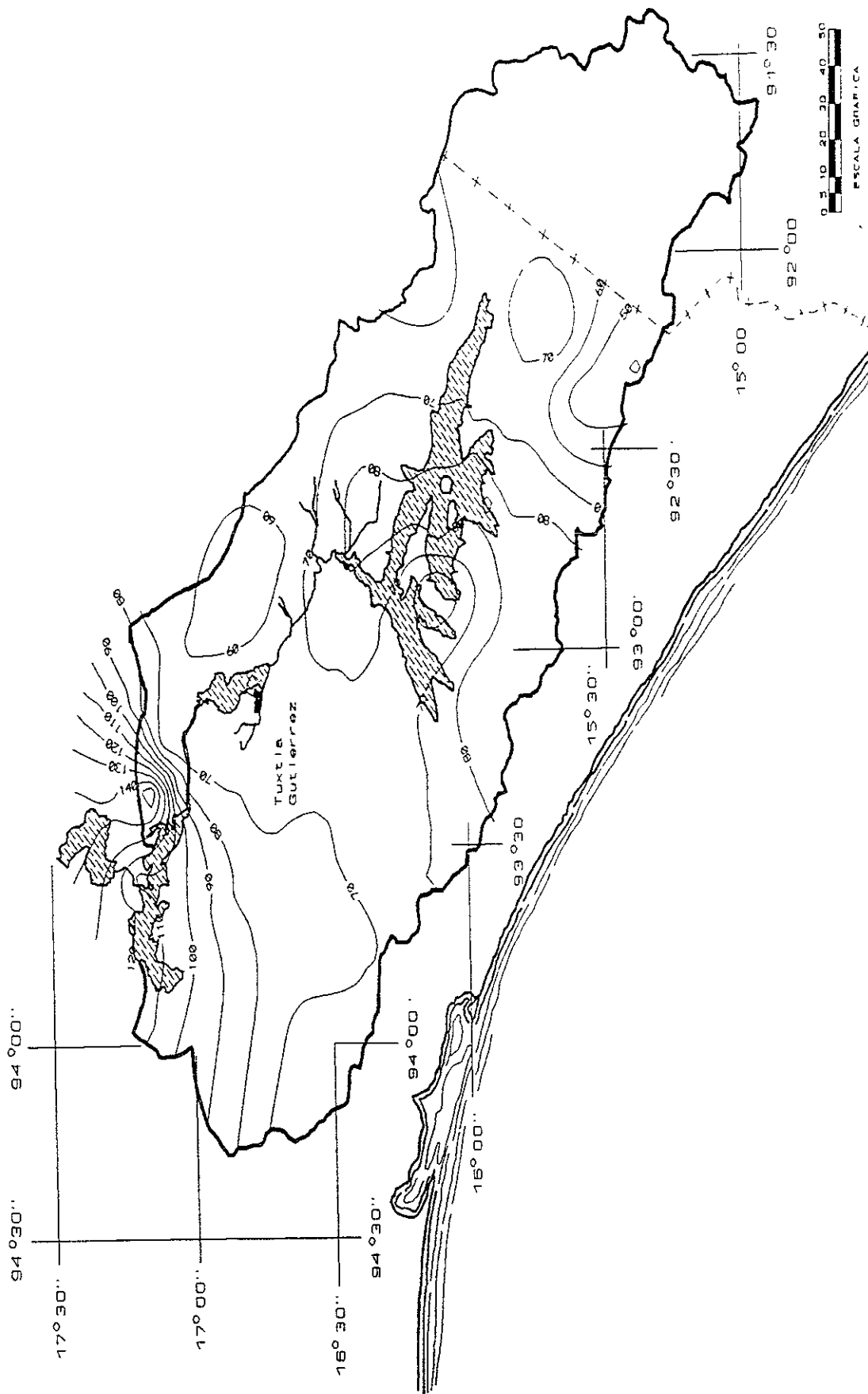


Figura A 1.1

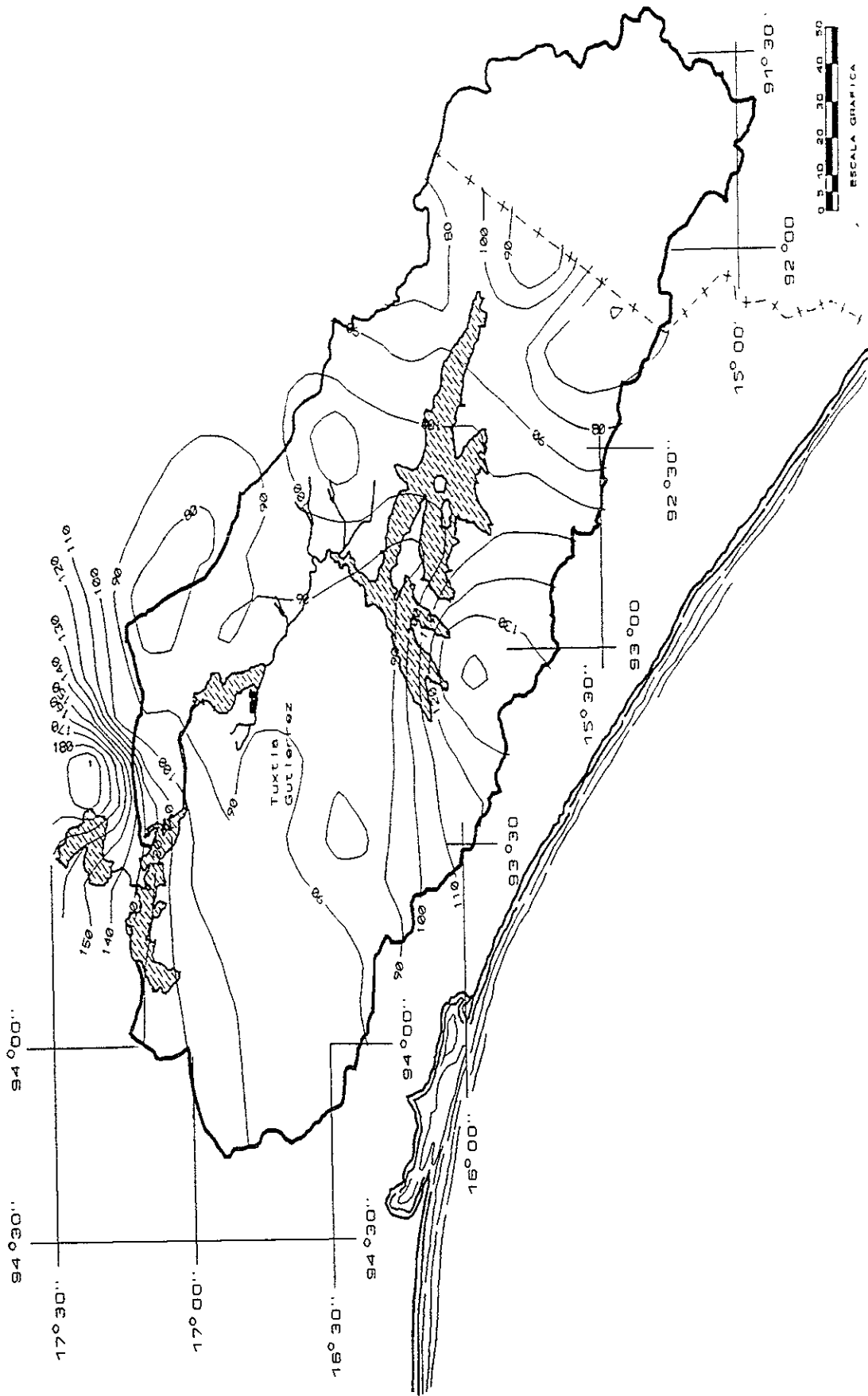


Figura A 1.2

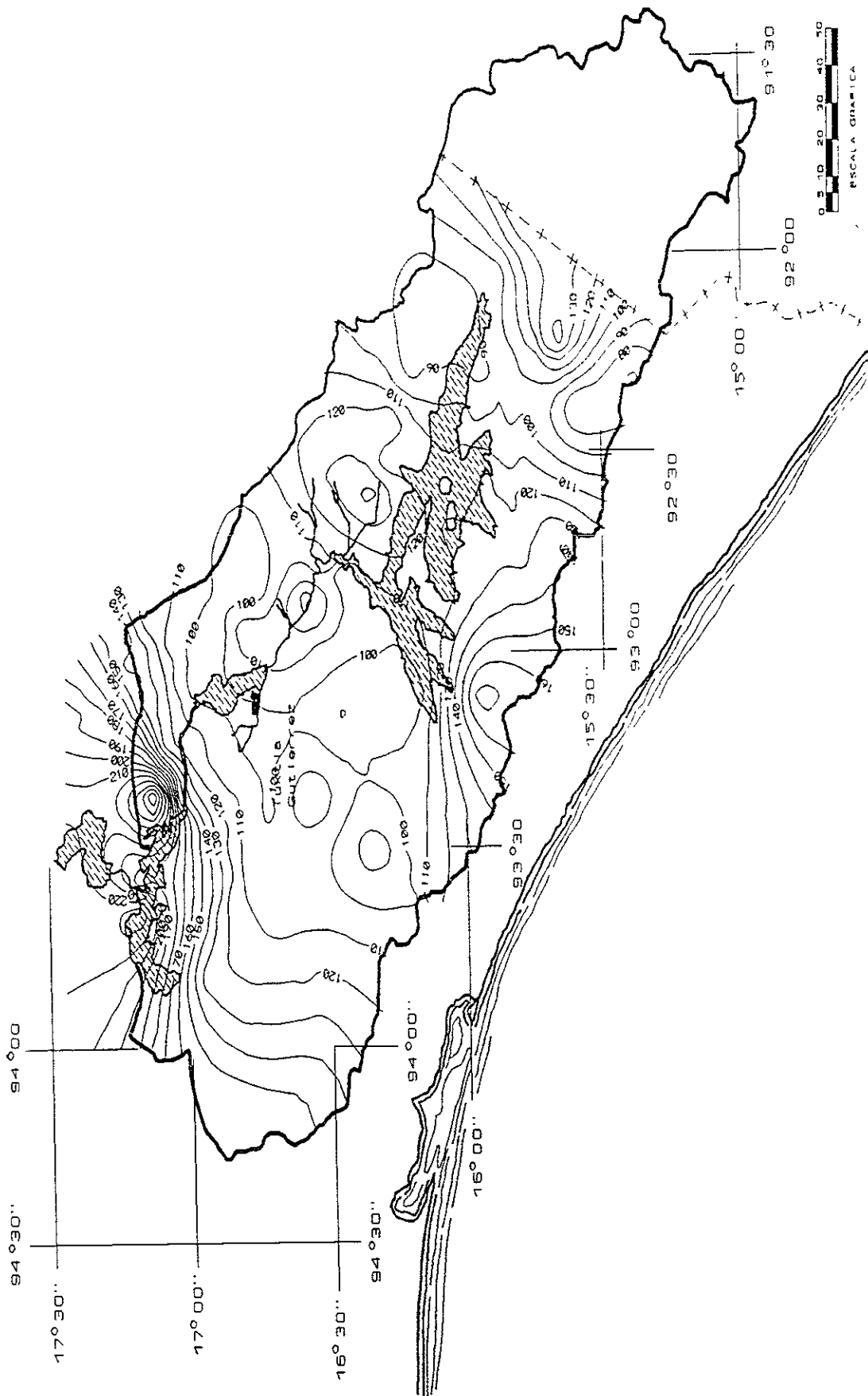


Figura A 1.3

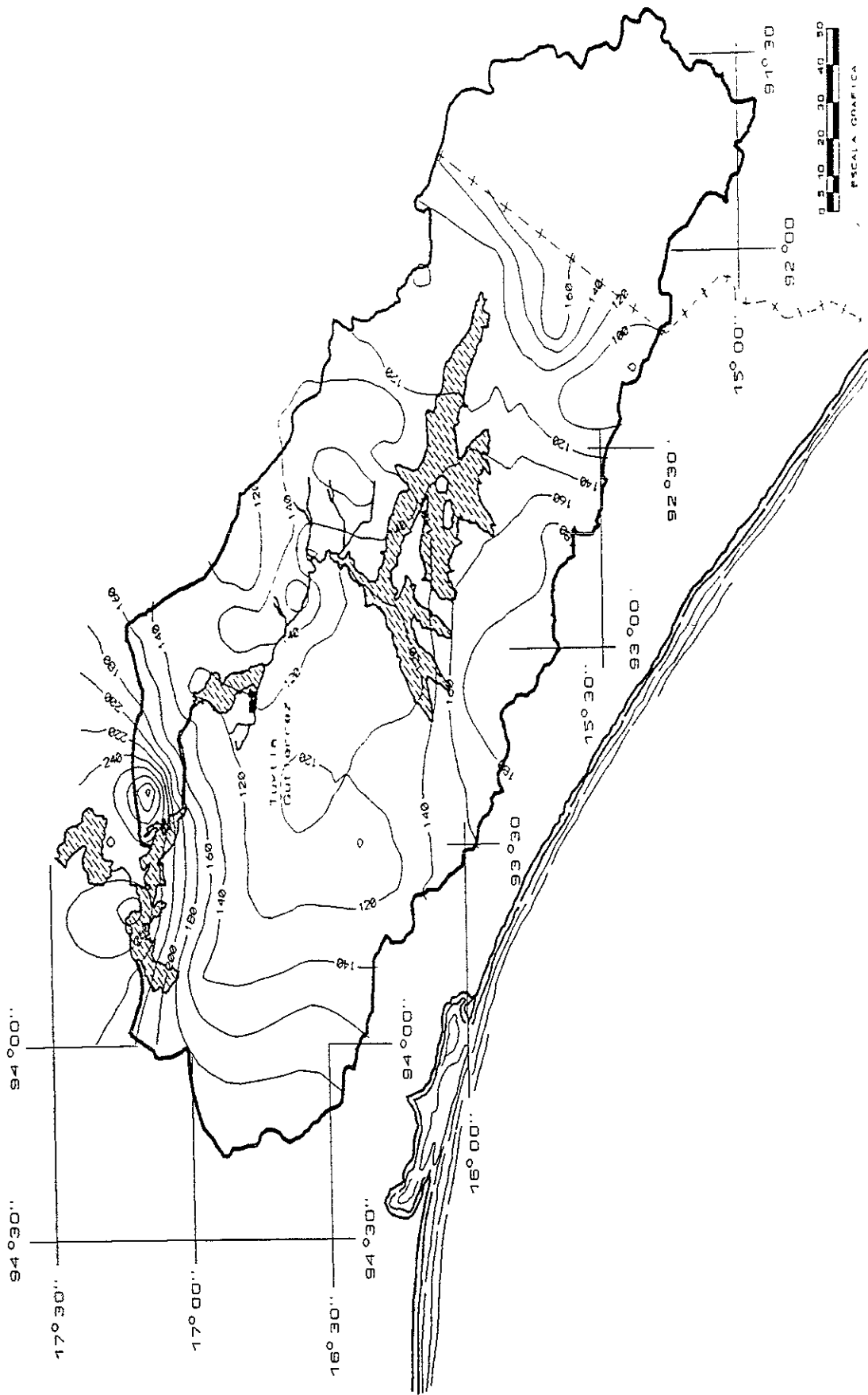


Figura A 1.4



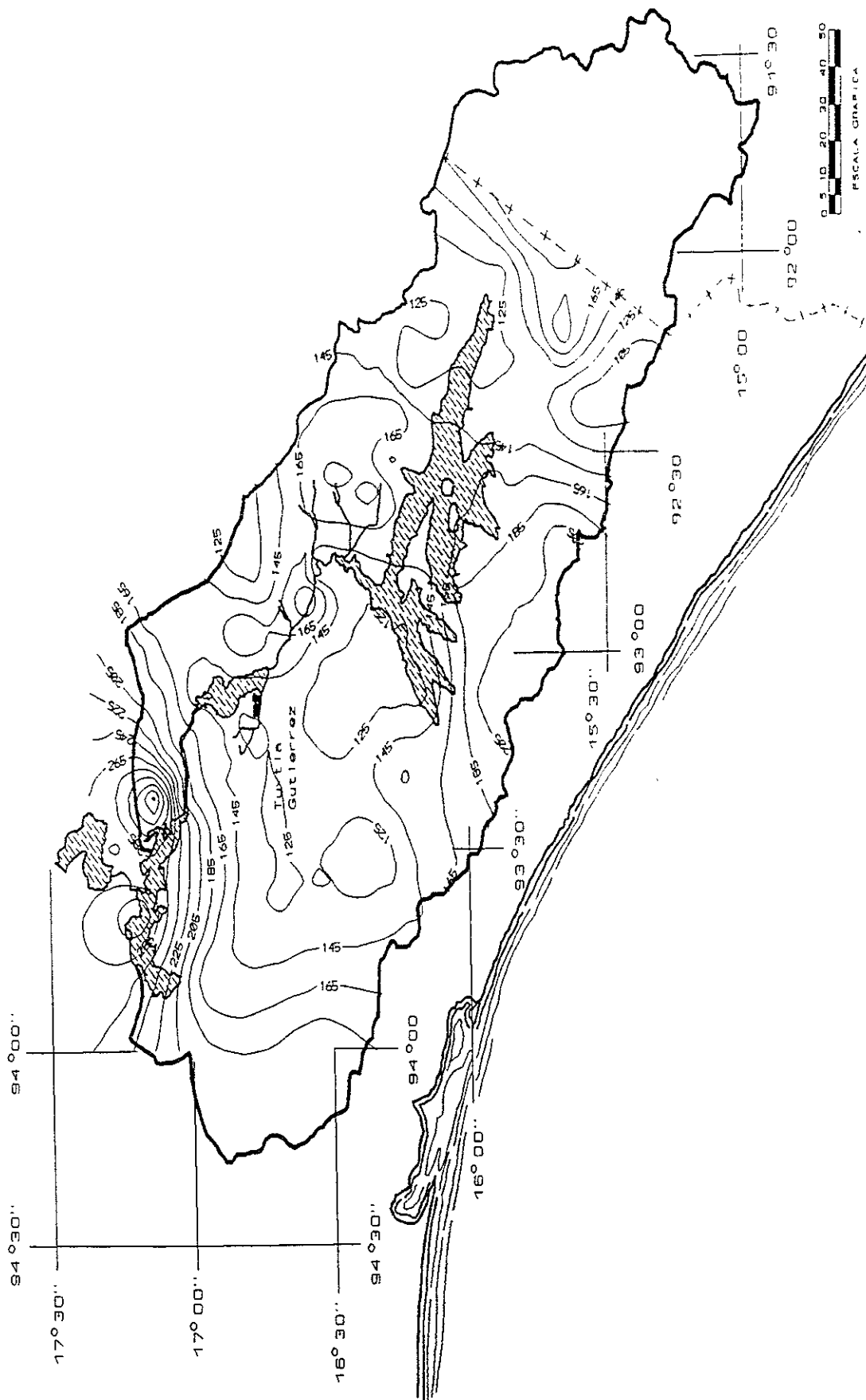


Figura A 1.5

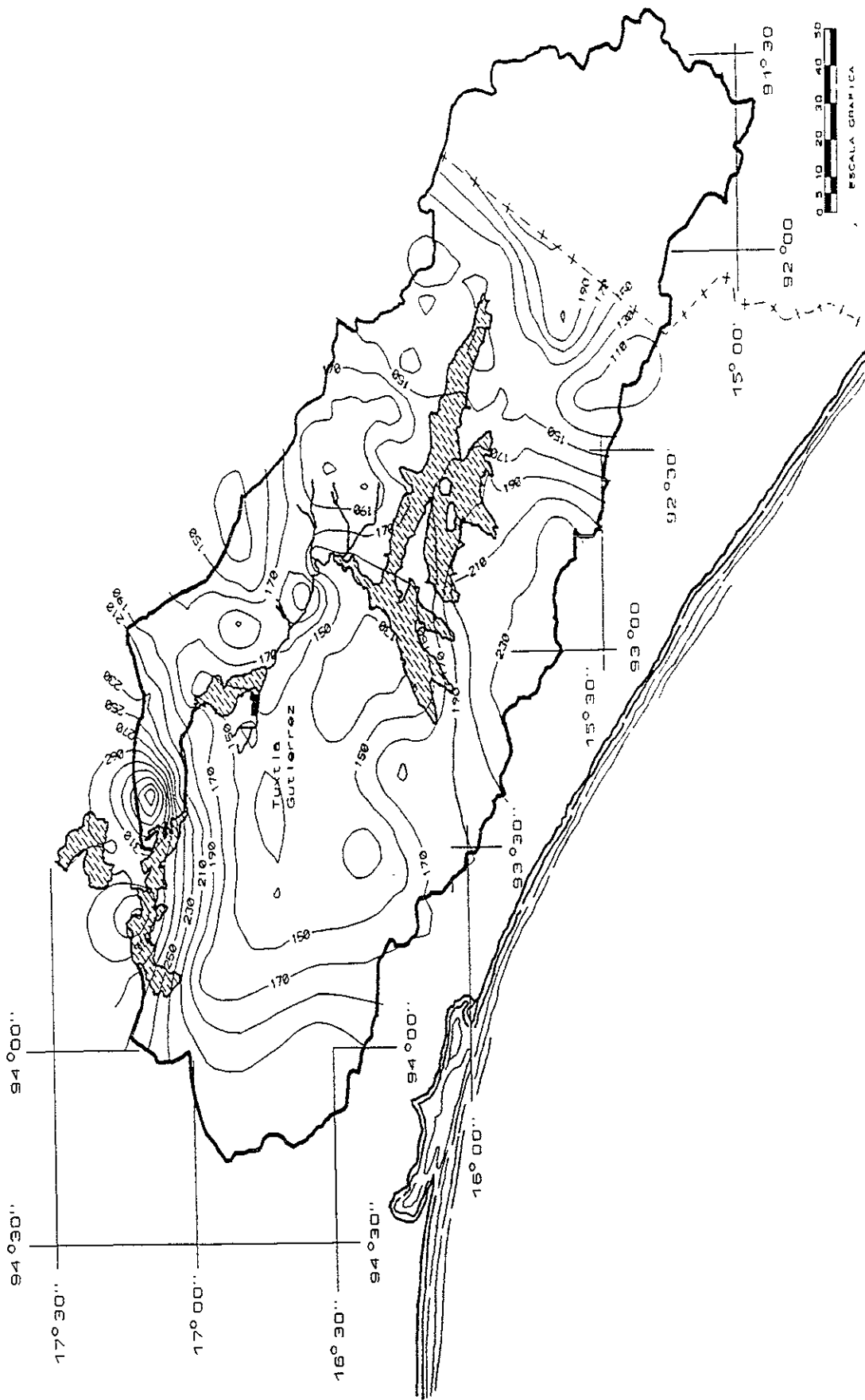


Figura A 1.6

## ANEXO A.2

### **Estaciones excluidas del análisis de precipitaciones puntuales máximas**

Para analizar estadísticamente las precipitaciones máximas puntuales se seleccionaron en primera instancia 71 estaciones climatológicas situadas dentro de la región en estudio o en sus alrededores. Sin embargo, al analizar con detalle la información, se encontró que en algunos casos no es confiable por alguna de las siguientes razones:

- a) Los años de registro confiable son muy pocos (menos de 14) debido a que en varios casos el máximo anual se obtuvo sin que se tuviera información de lluvias diarias en los meses más importantes.
- b) Se encontraron datos de precipitaciones extremadamente altos en relación con los valores típicos de la estación sin que se confirmara con datos de estaciones cercanas. la ocurrencia de una tormenta extraordinaria.
- c) No pudo confirmarse la ubicación geográfica de la estación.
- d) La función de probabilidades ajustada a los datos de precipitaciones máximas anuales mostró un comportamiento extraño caracterizado por una fuerte asimetría negativa.

En seguida se enlistan las estaciones excluidas del análisis.

Estación	Motivo de su exclusión
7021	Solo tiene 10 años de datos confiables.
7050	No se cuenta con las coordenadas de ubicación.
7054	Datos extraños. Asimetría negativa.
7067	Datos extraños. Asimetría negativa.
7074	No se cuenta con las coordenadas de ubicación.
7084	Está ubicada fuera de la cuenca.
7111	Solo cuenta con 12 años de registro.
7121	No se cuenta con las coordenadas de ubicación.
7133	No se cuenta con las coordenadas de ubicación.
7143	Solo tiene 8 años de datos confiables.
7189	Solo cuenta con 9 años de registro.

## ANEXO A.3

### Cálculos del factor de reducción por área

En las tablas A3.1 a A3.10 se muestran los cálculos realizados para distintas áreas ( $A_i$ ) seleccionadas dentro de la región del alto Grijalva.

La primera tabla corresponde al área total de la cuenca y consta de dos páginas; en la primera se indica, para cada estación considerada, el número asignado en el plano de polígonos de Thiessen, el número con el que se accesa a la base de datos CLICOM, el área (en  $\text{km}^2$ ) y el peso relativo del polígono, los valores de precipitación máxima para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años y los coeficientes de la función de distribución Gumbel ajustada. En la segunda hoja se presentan los valores obtenidos al multiplicar la precipitación de cada estación por el porcentaje correspondiente a su polígono asociado.

La suma de los valores mostrados en la segunda página (divididos entre 100) constituyen la precipitación media  $\hat{P}(A_i, T)$  obtenida con el procedimiento tradicional.

Los renglones de la parte baja de la primera hoja fueron construidos de la siguiente forma:

El renglón PRO1 contiene el área total considerada ( $A_i$ ) y la precipitación promedio  $\bar{P}(A_i, T)$  para cada período de retorno, considerando precipitaciones

simultáneas, obtenidas con el programa PMED. El renglón PRO2 contiene los valores  $\hat{P}(A_i, T)$  definidos con el procedimiento tradicional, y el renglón FAJU, contiene los valores del factor de ajuste correspondiente a cada período de retorno.

Para las demás áreas ( $A_i$ ) consideradas, sólo se presenta la primera hoja de los cálculos, dado que la segunda es enteramente similar a la que corresponde a toda la cuenca.



Tabla A3.1 Calculos para toda la cuenca

T2	T5	T10	T25	T50	T100	T500
105.234	150.049	179.792	217.271	245.013	272.622	336.376
190.837	265.226	314.644	377.205	423.468	469.206	575.402
64.461	88.309	104.099	124.121	138.934	153.584	187.606
115.506	152.013	176.157	206.675	229.274	251.680	303.639
375.081	519.255	614.892	735.515	824.833	913.865	1118.925
86.299	116.956	137.181	162.805	181.749	200.601	244.162
24.534	32.090	37.074	43.422	48.095	52.769	63.556
117.227	161.466	190.661	227.602	255.009	282.268	345.127
52.327	63.991	71.686	81.406	88.535	95.744	112.268
230.509	331.528	398.052	482.371	545.063	607.207	750.659
92.960	108.027	117.976	130.627	140.008	149.247	170.710
52.991	67.629	77.279	89.546	98.623	107.618	128.471
389.319	458.399	504.025	562.018	604.660	647.301	745.804
234.039	308.399	357.320	419.548	465.339	511.129	616.799
137.313	261.803	343.817	447.736	524.674	601.345	778.196
132.497	178.100	208.297	246.506	274.854	302.997	368.115
250.300	316.324	360.340	415.524	456.584	497.315	591.260
169.834	201.147	221.884	248.012	267.505	286.790	331.374
63.975	81.496	93.023	107.778	118.613	129.449	154.347
135.195	164.956	184.555	209.416	227.926	246.255	288.718
217.781	283.308	326.534	381.324	421.796	461.993	555.053
278.288	385.704	456.624	546.207	612.980	678.923	831.545
183.732	222.676	248.744	281.094	305.277	329.461	384.737
177.701	295.571	373.674	472.198	545.284	618.013	786.041
217.284	259.534	287.518	322.634	348.698	374.761	434.843
148.224	197.773	230.523	272.026	302.659	333.150	403.733
90.150	115.005	131.396	152.220	167.536	182.852	218.187
126.246	149.787	165.544	185.288	199.906	214.524	248.126
71.977	93.806	108.260	126.451	140.021	153.393	184.465
129.375	154.373	170.974	191.964	207.420	222.876	258.560
255.333	321.170	364.364	419.402	460.158	500.913	594.269
98.704	120.522	134.938	153.120	166.627	180.004	211.044
421.900	553.645	641.476	751.786	833.866	915.423	1103.108
323.989	462.417	554.084	669.502	755.602	840.589	1037.654
503.982	590.217	647.018	719.311	773.014	826.200	949.098
71.915	105.677	127.961	156.209	177.142	197.849	245.905
449.802	612.037	718.569	853.649	953.915	1053.484	1283.955
39.086	50.007	57.263	66.388	73.214	79.968	95.487
82.073	99.770	111.529	126.257	137.303	148.230	173.410
164.847	228.954	271.353	324.945	364.630	403.976	495.218
584.622	727.869	822.755	942.740	1031.505	1119.657	1324.122
7657.448	10056.985	11643.856	13649.819	15137.311	16615.233	20030.074



























## REFERENCIAS

- Acreman, M.C, Sinclair, C. D, *Classification of drainage basins according to their physical characteristics; and application for flood frequency analysis in scotland*, Journal of Hydrology, 1985.
- Barrios, D.J y Domínguez, M. R., *Regionalización de precipitaciones máximas en cuencas donde predominan las tormentas de tipo convectivo*, IX Congreso Nacional de Hidráulica, Querétaro, Qro., 1986.
- Bell, F. C., *Generalized rainfall-duration-frequency relationships*. J. Hydr. Engrg., ASCE, vol. 95, No HY1, january, 1969.
- Bell, F. C, *The areal reduction factor in rainfall frequency estimation*, Institute of Hidrology, No 35, Wallingford, Inglaterra, 1976.
- Campos, A. D. F., *Procedimiento para obtener curvas I-D-Tr a partir de registros pluviométricos*, Ingeniería Hidráulica en México, mayo-agosto, 1990.
- Carrizosa, E.E, *Regionalización de gastos máximos en la cuenca de la vertiente del Pacífico Centro de la República Mexicana*, Tesis de maestría, DEPFI, UNAM, 1997.
- Chen, C.L., *Rainfall intensity-duration-frequency formulas*, J. Hydr. Engrg., ASCE, vol. 109, No 12, december, 1983.
- Cisneros, I.H.L, Domínguez, M.R, *Factores de la regionalización de lluvias en la cuenca del río Papaloapan*, Centro Nacional de Prevención de Desastres, 1996.
- Cisneros, L, *Etude descriptive de la repartition spatio-temporalle des pluies journalieres a Mexico*, Mémoire de DEA, Universite de Montpellier II, 1997.
- Court, A., *Area-depth rainfall formulas*, Journal Geophysical Research, Vol 66, 1961.
- DGCOH, *Manual de Hidráulica Urbana*. Tomo I, Departamento del Distrito Federal, México, 1982.
- Domínguez, M.R, *Análisis regional de tormentas y avenidas de diseño, aplicación a la Cuenca del Papaloapan*, tesis de maestría, DEPFI, UNAM, 1981.
- Domínguez, M.R, *Procedimiento de extrapolación para el cálculo hidrométrico*, informe interno, Instituto de Ingeniería. UNAM, 1989.

- Domínguez M.R., Martínez G.R. y Vázquez C.M.T. *Análisis regional para caracterizar estadísticamente los gastos máximos anuales en zonas sujetas a la incidencia directa de ciclones*. Informe Técnico, CENAPRED, México, 1990.
- Domínguez, M.R. y Ríos, C.A., *Regionalización de las características hidrometeorológicas de la cuenca del río Papaloapan*, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Coordinación de Investigación de Riesgos Hidrometeorológicos, México, 1991.
- Domínguez, M.R, Villalobos, E.J.E, Guichard, R.D, *Regionalización de parámetros hidrológicos en la cuenca del alto río Grijalva*, Facultad de Ingeniería, UNACH, 1998.
- Escobar R.A. *Las cuencas hidrológicas y su función generatriz en el sector eléctrico nacional*. CFE, 1991.
- Ferrer, P. J, *Análisis estadístico de caudales de avenida*, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, 1992.
- Ferrer, P. J, Ardiles, L. L, *Análisis estadístico de las series anuales de máximas lluvias diarias en España*, Revista Ingeniería Civil, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, 1995.
- Fuentes, M.G., *Análisis regional para parametrizar las características estadísticas de gastos máximos ocasionados por ciclones*. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., 1991.
- Franco, C., Tesis de maestría (en proceso), 1997.
- Hosking, J. M et al, *An Appraisal of the regional flood frequency procedure in the Flood Studies Report*, hydrological Sciences Journal, Institute of Hydrology, UK, 1985.
- Jiménez, E.M, *Manual de operación del programa AX*, Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 1992.
- Kothyari, U.C, Garde, R.J, *Rainfall intensity-duration-frequency formulas for India*, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol 118, No. 2, february, 1992.
- Lafragua, C. J, *Curvas Intensidad-duración-período de retorno para la vertiente del Golfo de México*, Tesis de maestría, DEPI, UNAM, 1996.

- Natural Environment Research Council, *Flood Studies Report*, 5 volúmenes, 1975
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), *Isoyetas de intensidad-duración-frecuencia de la República Mexicana*, 1990.
- Tipacamú G., Gómez F. y Domínguez R. *Determinación de factores de reducción por área para el cálculo de la precipitación media de una tormenta de diseño. Aplicación a dos cuencas del río Grijalva*, XII Congreso Nacional de Hidráulica, México, 1992.
- Vázquez, C.M.T, Domínguez, M.R., *Regionalización de los gastos máximos anuales en diversas regiones hidrológicas de la República Mexicana*, Centro Nacional de prevención de Desastres, 1993.
- Viessman, W. Y Lewis, G.L , *Introduction to Hydrology*, Intertec Educ. Public. New York. 1989
- Wallis, J.R y Wood, E.F, *Relative Accuracy of Log Pearson III Procedures*, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, vol 111, No 7, 1985.
- Wilson, E.M, *Engineering Hydrology*, McMillan, fourth edition, 1990.

## RECONOCIMIENTOS

La conclusión de este trabajo obedece a la participación y apoyo de distintas Instituciones y personas, esperando no omitir a nadie, se agradece:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por haber otorgado una Cátedra Patrimonial, por medio de la cual el Dr. Ramón Domínguez Mora pudo participar y asesorar este trabajo y otros que se han realizado al interior de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH); y establecer convenios de colaboración con el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

A la Universidad Autónoma de Chiapas por el apoyo brindado a la suscrita desde el inicio de mis labores docentes en el año de 1991. Y, en particular, por la ayuda otorgada a través del Sistema de Investigación Institucional (SINV-UNACH) y la autorización del año sabático que me permitió trabajar en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en la conclusión de este trabajo. En este sentido agradezco especialmente al M. C Pedro René Bodegas Valera, Rector y al Dr. Roberto Villers Aispuro, Director General de Planeación.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM que me otorgó, además de una beca económica durante mi estancia allí, la posibilidad de convivir y cooperar con personas de gran calidad humana y técnica.

A la División Hidrométrica Sureste de la Comisión Federal de Electricidad y a la Subgerencia Técnica de la Gerencia Regional en Chiapas de la Comisión nacional del Agua, por la información pluviométrica e hidrométrica facilitada.

Al Dr. Ramón Domínguez Mora por aceptar, a pesar de sus múltiples compromisos, apoyar a la Facultad de Ingeniería por medio del Programa de Cátedras Patrimoniales y por proponer este estudio sobre regionalización, que nos ha permitido con su participación y guía, aprender un poco sobre el tema y familiarizarnos con la metodología para realizar este tipo de trabajos.

Al Ing. Juan José Muciño, quien me invitó a formar parte del personal docente de la Facultad de Ingeniería de la UNACH, por sus consejos y respaldo en los proyectos académicos en que he participado.

Al M. C. José Edgar Villalobos Enciso, por su participación y trabajo impetuosos en los proyectos emprendidos a raíz de la Cátedra Patrimonial del CONACyT, incluyendo este estudio.

Al Ing. Robertony Cruz Díaz, exdirector, y al M. C Jorge Ordóñez Ruiz, director actual de la Facultad de Ingeniería, quienes en su momento me han apoyado en los proyectos que he emprendido dentro de la Facultad.

A los revisores y miembros del jurado de esta tesis: M. I. Gilberto Sotelo Avila, Dr. Rolando Springall, Dr. Ramón Domínguez Mora, Dr Oscar Fuentes Mariles y M. I Víctor Franco, por sus comentarios respecto a la misma.

Al M. I Javier Osnaya Romero, compañero de clases y amigo, por su diligencia al efectuar todos los trámites que hicieron posible mi estancia en la DEPMI.

A los ahora exalumnos de la Facultad de Ingeniería de la UNACH, Irán Bañuelos Robles, Josué Hernández Pérez y José de Jesús Rodríguez López, por su ayuda para el procesamiento de la información.

A mis amigos, en particular a Tere Argüello, Ricardo Solorio y Edgar Villalobos, por su solidaridad en momentos especiales.