

01162



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

FACTORES DE REDUCCIÓN POR ÁREA PARA EL CÁLCULO
DE LLUVIAS DE DISEÑO. APLICACIÓN AL ESTADO DE
SINALOA.

TESIS

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN INGENIERÍA
(HIDRÁULICA)

PRESENTA

SUSANA REYNA MENA RIVERA

DIRECTOR DE TESIS

DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES



MÉXICO D.F.

AGOSTO DE 2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

AGRADECIMEINTOS

A la comunidad del Instituto de Ingeniería por el apoyo brindado durante mi estancia en esta Institución.

En especial al Dr. Ramón Domínguez Mora por su tiempo, dedicación y sobre todo por su apoyo incondicional en la realización de este trabajo.

Al Dr. Oscar Fuentes Mariles por dedicarme una parte de su tiempo para dirigir esta tesis.

A Víctor Franco por la oportunidad que me dio para continuar mis estudios y la confianza depositada en mí.

A mis compañeros del edificio cinco: Martín, Alex, Juan Ansberto, Fidel, Enedino, Berna, Alicia, Abraham, Eliseo, Paola, en especial a Rafael Duran por compartir su tiempo y conocimientos; no puedo dejar de mencionar a mis compañeras con las que inicié este proyecto Adriana y Selene, además a todos aquellos que no he mencionado. Gracias.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	i
OBJETIVO.....	iii
1. PRECIPITACIÓN Y ESCURRIMIENTO	1
1.1 Ciclo hidrológico.....	1
1.2 Precipitación.....	3
1.2.1 Precipitación convectiva	3
1.2.2 Precipitación orográfica	3
1.2.3 Precipitación ciclónica	4
1.3 Aparatos de medición.....	4
1.3.1 Pluviómetro	5
1.3.2 Pluviógrafo.....	6
1.3.3 Hietograma y Curva Masa	8
1.4 Precipitación media.....	10
1.5 Escurrimiento	13
1.5.1 Escurrimiento superficial	14
1.5.2 Escurrimiento subsuperficial.....	14
1.5.3 Escurrimiento subterráneo	14
1.6 Relación Lluvia -Esgurrimiento	15
2. CONCEPTOS DE PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA EN HIDROLOGÍA	21
2.1 Estadística	21
2.1.1 Parámetros estadísticos de las muestras.....	24
2.1.2 Medidas de tendencia central.....	24
2.1.3 Medidas de dispersión.....	25
2.1.4 Medidas de asimetría.....	26
2.1.5 Coeficiente de asimetría.....	26
2.1.6 Sesgo.....	27

2.2	Probabilidad	28
2.2.1	Función de densidad de probabilidad	28
2.3	Distribuciones de probabilidad	29
2.3.1	Normal	29
2.3.2	Lognormal.....	30
2.3.3	Exponencial.....	31
2.3.4	Gamma.....	31
2.3.5	Pearson tipo III.....	32
2.3.6	Gumbel.....	33
2.3.7	Doble Gumbel.....	33
2.4	Ajuste a una distribución de probabilidad	36
2.4.1	Método de momentos.....	36
2.4.2	Método de máxima verosimilitud	36
2.4.3	Método de mínimos cuadrados	37
3.	EVENTOS DE DISEÑO	39
3.1	Análisis de los datos.....	39
3.2	Periodo de retorno.....	40
3.3	Periodo de retorno de eventos de diseño.....	41
3.4	Selección de criterios de diseño	42
4.	MÉTODOS PARA CALCULAR EL FACTOR DE REDUCCIÓN POR ÁREA.....	49
4.1	Factor de reducción por área (FRA)	49
4.2	Criterios de cálculo	51
4.2.1	Métodos empíricos.....	52
4.2.1.1	Método del United States Weather Bureau (1958).....	52
4.2.1.2	Método de UK (Nerc, 1975).....	53
4.2.1.3	Método de Bell (1976).....	54
4.2.1.4	Método de Desbordes-Raous-Trévisiol (1984).....	55
4.2.2	Métodos teóricos.....	56
4.2.2.1	Método de Roche (1963)	56

4.2.2.2	Método de Rodríguez Iturbe y Mejía (1974)	58
4.2.2.3	Método de Nguyen – Rousselle – McPherson (1980)	60
4.2.2.4	Método de Asquith – Famiglietti (2000).....	61
4.2.3	Métodos teórico – prácticos	62
4.2.3.1	Myres – Zehr (1980)	62
5.	APLICACIONES	65
5.1	Recopilación de información	65
5.2	Cálculo del FRA para el estado de Sinaloa	68
5.3	Ejemplo	87
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	91
ANEXO A.1	CARACTERÍSTICAS DEL ESTADO DE SINALOA.....	93
A.1.1	Localización geográfica	93
A.1.2	Fisiografía	94
A.1.3	Geomorfología	97
A.1.4	Clima	97
A.1.5	Hidrología Superficial.....	100
A.1.6	División Hidrológica.....	103
ANEXO A.2	105
ANEXO A.3	111
REFERENCIAS	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Ciclo hidrológico	2
Figura 1.2	Pluviómetro	5
Figura 1.3	Pluviógrafo con sifón	7
Figura 1.4	Pluviógrafo de balancín	8
Figura 1.5	Hietogramas de intensidad y precipitación.....	9
Figura 1.6	Curva masa de una tormenta	10
Figura 1.7	Polígonos de Thiessen	12
Figura 1.8	Plano de Isoyetas	13
Figura 1.9	Ciclo del escurrimiento a partir de una tormenta	15
Figura 1.10	Hidrograma Unitario Triangular.....	18
Figura 1.11	Hidrograma Unitario del SCS	19
Figura 2.1	Curvas de frecuencias.....	27
Figura 2.2	Distribución Normal.....	30
Figura 2.3	Distribución Log-Normal	30
Figura 2.4	Función Exponencial	31
Figura 2.5	Función Gamma de un parámetro	32
Figura 2.6	Función de distribución Gumbel	33
Figura 2.7	Función de distribución Doble Gumbel	34
Figura 4.1	Métodos para calcular el FRA.....	52
Figura 4.2	Curvas de igual densidad de probabilidad.....	57
Figura 4.3	Altura de lluvia promedio entre dos puntos en función de la distancia entre ellos y del nivel de probabilidad.....	57
Figura 4.4	Reducción espacial de la intensidad de lluvia puntual para correlación exponencial	59

Figura 4.5 Reducción espacial de la intensidad de lluvia puntual para correlación tipo Bessel	59
Figura 5.1 Localización de las estaciones a lo largo del estado.....	69
Figura 5.2 Polígonos de Thiessen para 1970	72
Figura 5.3 Subcuencas calculadas para un área de 6,049.13 km ²	73
Figura 5.4 Subcuencas calculadas para un área de 14,359.73 km ²	73
Figura 5.5 Subcuencas calculadas para un área de 26,412.10 km ²	74
Figura 5.6 Ajuste con el programa AX a una función de distribución Gumbel para un área de 6,049 km ²	75
Figura 5.7 Ajuste con el programa AX a una función de distribución Gumbel para un área de 7,102.43 km ²	76
Figura 5.8 Factores de reducción por área para Tr de 2,5,10 y 50 años	83
Figura 5.9 Factores de reducción por área para Tr de 100,1000 y 10000 años	84
Figura 5.11 Subcuenca Humaya	87
Figura 1 Localización geográfica del estado de Sinaloa.....	94
Figura 2 Carta Fisiográfica.....	96
Figura 3 Carta Geomorfológica	98
Figura 4 Carta Climatológica.....	99
Figura 5 Corrientes y cuerpos de agua.....	102
Figura 6 Regiones y cuencas hidrológicas.....	104

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Distribuciones de Probabilidad (Estimación por momentos)	35
Tabla 3.1 Probabilidad de que ocurra al menos una vez un evento en determinado periodo de retorno	42
Tabla 3.2 Periodo de retorno para estructuras menores	44
Tabla 3.3 Periodo de retorno en función de la zona	45
Tabla 3.4 Periodo de retorno para embalses pequeños	46
Tabla 3.5 Periodo de retorno de una avenida de diseño en función de la altura de la cortina.	48
Tabla 5.1 Formato de precipitaciones diarias en 24 horas.....	67
Tabla 5.2 Estaciones y años considerados en este estudio.....	70
Tabla 5.3 Nombre, clave y coordenadas de las estaciones en estudio.....	71
Tabla 5.4 Precipitaciones máximas anuales para cada estación en mm	78
Tabla 5.5 Periodos de retorno por estación.....	80
Tabla 5.6 Periodo de retorno por área.....	81
Tabla 5.7 Factores de reducción por área calculados	82
Tabla 5.8 Ecuaciones de Ajuste para cada curva	85
Tabla 5.9 Factores de Reducción	85
Tabla 1 Tipos de climas	97
Tabla 2 Características principales de los recursos hidrológicos superficiales de Sinaloa....	100
Tabla 3 Regiones y cuencas hidrológicas	103

INTRODUCCIÓN

El dimensionamiento de las obras hidráulicas es función del gasto de diseño, el cual puede determinarse mediante modelos lluvia - escurrimiento o bien con información de gastos máximos registrados en una estación hidrométrica cercana a la zona de estudio; éstos modelos se utilizan cuando no es posible contar con la información suficiente.

Los modelos lluvia-escurrimiento involucran el cálculo de tormentas de diseño para determinada duración, periodo de retorno y área de interés; en algunos casos si se desconoce la distribución de frecuencias es común utilizar datos puntuales los cuales pueden sobrestimar la precipitación. Con el fin de evitar lo anterior se pueden aplicar factores de reducción que tomen en cuenta el efecto de simultaneidad de la precipitación.

En este trabajo se presenta un estudio para el cálculo de Factor de Reducción por Área (FRA) como una opción para calcular la precipitación de diseño de una región. Esta clase de factores ya se ha aplicado en Chiapas y el Distrito Federal y aquí se pretende contribuir al cálculo de lluvias de diseño para el noroeste de la República Mexicana.

El capítulo 1 describe el ciclo hidrológico, algunos de sus componentes como la precipitación, escurrimiento, la relación entre ellos, los aparatos y métodos de medición.

En el capítulo 2 se definen los conceptos básicos de probabilidad y estadística aplicables a la Hidrología como son: medidas de tendencia central, funciones de distribución de probabilidad y los métodos para los ajustes a las funciones.

En el capítulo 3 se trata el concepto de periodo de retorno y la manera de seleccionarlo de acuerdo al tipo de obra a diseñar como son: importancia de la obra, magnitud, daños, costos de construcción y mantenimiento, riesgo de pérdidas humanas, etc.

El capítulo 4 define el concepto de Factor de Reducción por Área (FRA) y expone algunos métodos para calcularlo, éstos son: empíricos (USWB, UK, Desbordes-Raous-Trévisiol) teóricos (Roche, Rodríguez Iturbe, Nguyen-Rousselle, Asquith Famiglietti) y teórico prácticos (Myres-Zehr).

El capítulo 5 recapitula los temas anteriores dando paso al punto esencial del trabajo, el cálculo del Factor de Reducción por Área aplicado al estado de Sinaloa, además se incluye un ejemplo de aplicación para el cálculo de la lluvia de diseño en una cuenca de la región.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones de este trabajo y finalmente se incluyen 3 anexos, el primero describe las características fisiográficas del estado de Sinaloa, el segundo muestra los cálculos de los factores para cada área y el tercero contiene los mapas de isoyetas de la zona para periodos de retorno de 2, 5 y 10 años.

OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo es calcular la lluvia de diseño de una región utilizando un método teórico-práctico.

De éste se derivan estos dos objetivos secundarios:

Describir los métodos existentes para calcular el Factor de Reducción por Área.

Aplicar el método de Cálculo del Factor de Reducción por Área a un estado del Pacífico Norte con el fin de conocer su comportamiento, ya que hasta el momento se han realizado estudios en la zona del Golfo de México y Zona Metropolitana.

1. PRECIPITACIÓN Y ESCURRIMIENTO

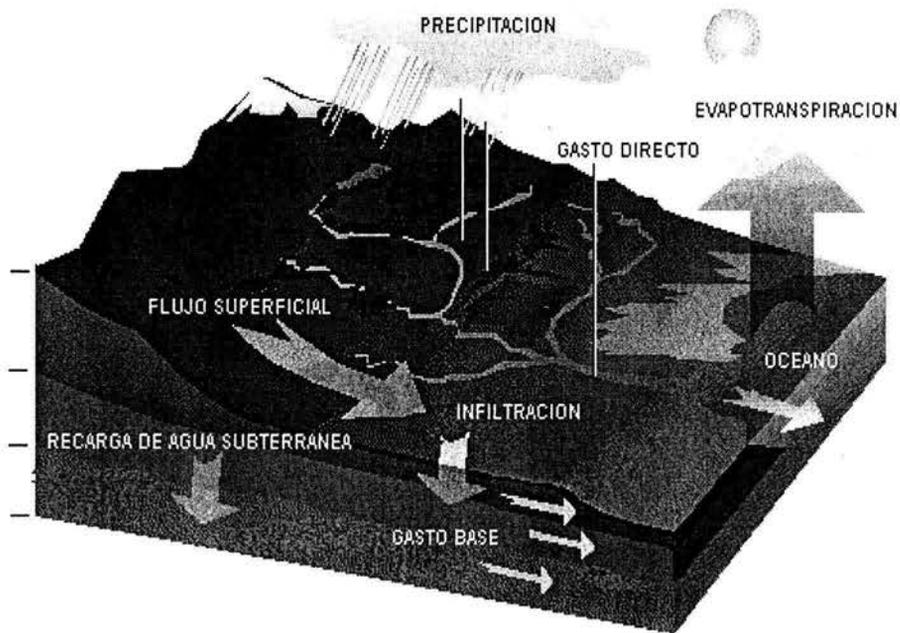
En este capítulo se hace una breve descripción del ciclo hidrológico y de algunos de sus componentes como la precipitación, el escurrimiento y la relación entre ellos. Se define cada uno de estos conceptos y la forma en la que se clasifican.

1.1 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es un movimiento continuo del agua en la tierra que no tiene principio ni fin; puede empezar en cualquier etapa, si ella es la evaporación de los cuerpos de agua (océanos, corrientes, arroyos, etc.) el vapor se eleva y transporta a la atmósfera por las masas de aire en movimiento condensándose y formando nubes las cuales en algunos casos provocan precipitaciones.

Del agua que se precipita una parte es retenida por la superficie del suelo o bien puede quedar atrapada por los árboles y plantas del sitio, también puede escurrir libremente por la superficie o penetrar en el subsuelo. El agua retenida o infiltrada satisface la humedad del subsuelo y recarga los depósitos subterráneos, posteriormente fluye a los ríos y corrientes para después aflorar en otras zonas evaporase y continuar el ciclo. La figura 1.1 muestra las etapas del ciclo hidrológico.

Figura 1.1 Ciclo hidrológico



Fuente: Encarta 2001

Para que se lleve a cabo el proceso de la precipitación deben existir otros factores como son el viento, la temperatura, etc. Estos fenómenos meteorológicos al presentarse en un sitio y en determinado tiempo se conocen como clima.

Los fenómenos meteorológicos varían en función de la dirección de los vientos, la altitud, latitud y localización geográfica, por tanto existe una gran variedad de condiciones en estos fenómenos que cambian respecto al tiempo; por ejemplo, el efecto de la lluvia cambia cada vez que ella se presenta.

1.2 Precipitación

“Precipitación es el agua que recibe la superficie terrestre en cualquier estado físico proveniente de la atmósfera”¹. Es un fenómeno discontinuo, por tanto no se puede hablar de su variación diaria.

Para que llueva es necesario que una parte de la atmósfera que contiene vapor de agua se enfríe hasta que ocurra la condensación. El enfriamiento de la atmósfera se logra por la elevación del aire y de acuerdo a esta condición que provoca la precipitación puede ser convectiva, orográfica y ciclónica.

1.2.1 Precipitación convectiva

Esta precipitación se origina por el levantamiento de masas de aire más ligero y cálido al encontrarse con masas de aire densas y frías, o por la diferencia de temperatura entre la superficie del terreno y la del aire. Las zonas afectadas son principalmente áreas pequeñas del orden de 25 a 50 kilómetros cuadrados, su intensidad varía entre lloviznas ligeras y aguaceros dependiendo de la temperatura y humedad.

Estas tormentas se originan en tiempo cálido y pueden estar acompañadas de vientos, relámpagos, truenos y vientos locales.

1.2.2 Precipitación orográfica

Este tipo de lluvia es propia de las zonas montañosas originada por el enfriamiento y condensación del vapor de agua en las masas de aire que al enfrentar a una ladera ascienden,

¹ Springall-Hidrología primera parte

ello hace que se enfríe y origina precipitaciones en forma de líquida o nieve; estas lluvias son muy irregulares en importancia y localización.

1.2.3 Precipitación ciclónica

La precipitación ciclónica esta asociada al paso de ciclones tropicales. Es producida por el levantamiento del aire por convergencia de la masa de aire en una zona de baja presión, se divide en dos tipos frontal y por convergencia.

La frontal se origina en las superficies de contacto de masas de aire con temperatura y humedad diferentes. Pueden ser de frente cálido o frío, o bien estar originadas por oclusión de un frente.

La precipitación que se produce por un frente frío es intensa y de corta duración, mientras que la de un frente caliente se distribuye sobre un área extensa.

La precipitación por convergencia puede ocurrir donde exista una depresión barométrica y se produce cuando la tendencia del aire húmedo converge al centro del ciclón.

1.3 Aparatos de medición

Los aparatos que se utilizan para medir la precipitación son el pluviómetro y el pluviógrafo. Estos aparatos sirven para conocer la cantidad de precipitación acumulada durante un tiempo. El principio básico de estos aparatos consiste en colocar un recipiente cilíndrico a la intemperie en el que se concentra el agua de lluvia en determinado tiempo y se mide su altura alcanzada.

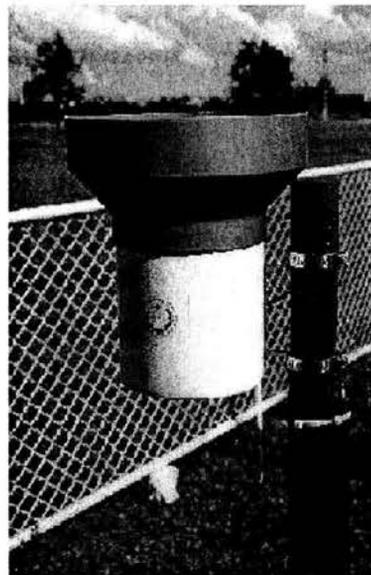
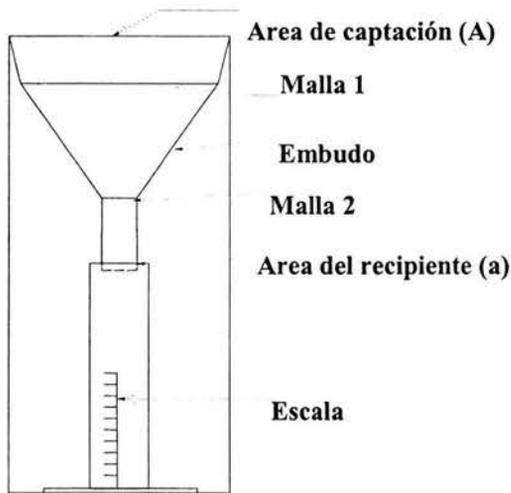
1.3.1 Pluviómetro

La idea base de este dispositivo consiste en que la lluvia se mide por la cantidad de milímetros que alcanzaría el agua en el suelo perfectamente horizontal que no tuviera ningún tipo de infiltración o pérdida.

El pluviómetro está compuesto por un recipiente cilíndrico, un área de captación mayor (A), un embudo y un recipiente cilíndrico de área menor (a). La relación entre las áreas A y a es de 10, esto significa que, al introducir una escala graduada en el recipiente menor se lee la precipitación real en milímetros, es común colocar un par de mallas en el embudo para evitar la entrada de basura u otros objetos (figura 1.2).

La lectura de la altura de precipitación se realiza cada 24 horas, por lo general a partir de las 8 de la mañana de cada día.

Figura 1.2 Pluviómetro



1.3.2 Pluviógrafo

El pluviógrafo es un instrumento que registra de manera continua las cantidades de precipitación. Los registros definen la cantidad de precipitación y el tiempo en el que transcurrió, con estos valores es posible analizar la distribución de la lluvia en el tiempo y calcular su intensidad. Su funcionamiento es similar al del pluviómetro con la diferencia de que tiene un mecanismo que sirve para registrar la altura de lluvia a lo largo del tiempo. En la actualidad existen diferentes tipos de aparatos, aquí se describen los más utilizados en México.

a) Pluviógrafo de flotador con sifón

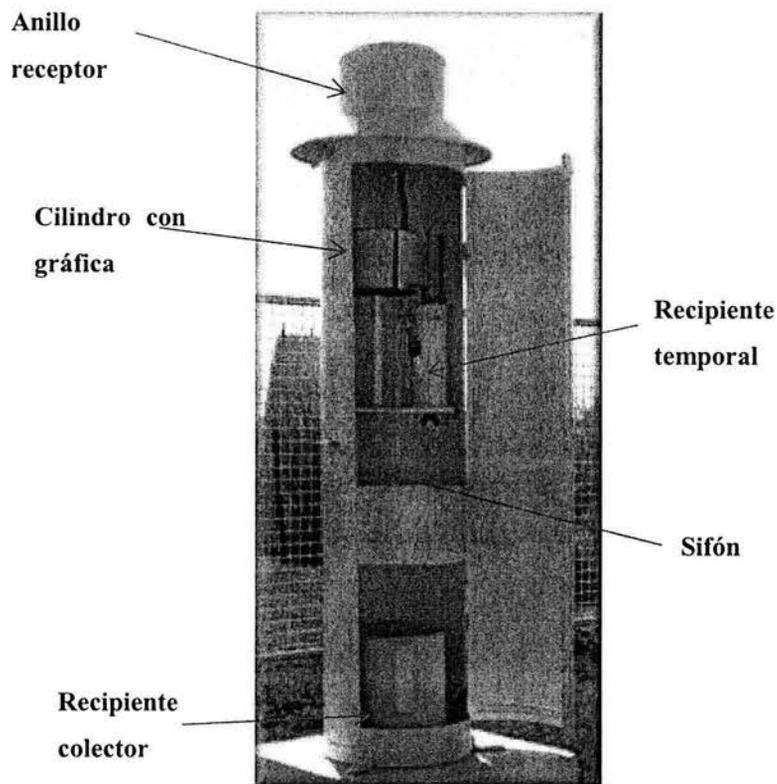
El pluviógrafo de flotador con sifón es un cilindro terminado en su parte superior en una boca circular, con una superficie de 200 cm² delimitada por un anillo debidamente protegido que va unido a la caja cilíndrica de mayor diámetro con altura de 1.10. El agua de lluvia es captada por un embudo y un tubo que se comunica con el mecanismo registrador. Este mecanismo está compuesto por un cilindro y un flotador, el cual se desplaza verticalmente al subir el nivel del agua dentro del cilindro siguiendo una guía que imposibilita el movimiento.

El agua de lluvia cae sobre un embudo que la comunica a otro recipiente con diferentes niveles, cuando alcanza el nivel máximo se activa el mecanismo del sifón que se encuentra en el recipiente por medio del flotador.

Si el sifón es móvil debe colocarse de tal manera que al llegar al máximo nivel el agua del recipiente sea desalojada y continúe con el registro.

El sistema de transmisión es mediante brazos que transmiten el movimiento de flotador a una plumilla, el registro se marca sobre un papel montado en un tambor que gira a velocidad constante (figura 1.3).

Figura 1.3 Pluviógrafo con sifón



b) Pluviógrafo de resorte

Es similar al anterior pero en vez de flotador utiliza un resorte que se deforma por el peso del agua, este aparato es común para medir alturas de nieve.

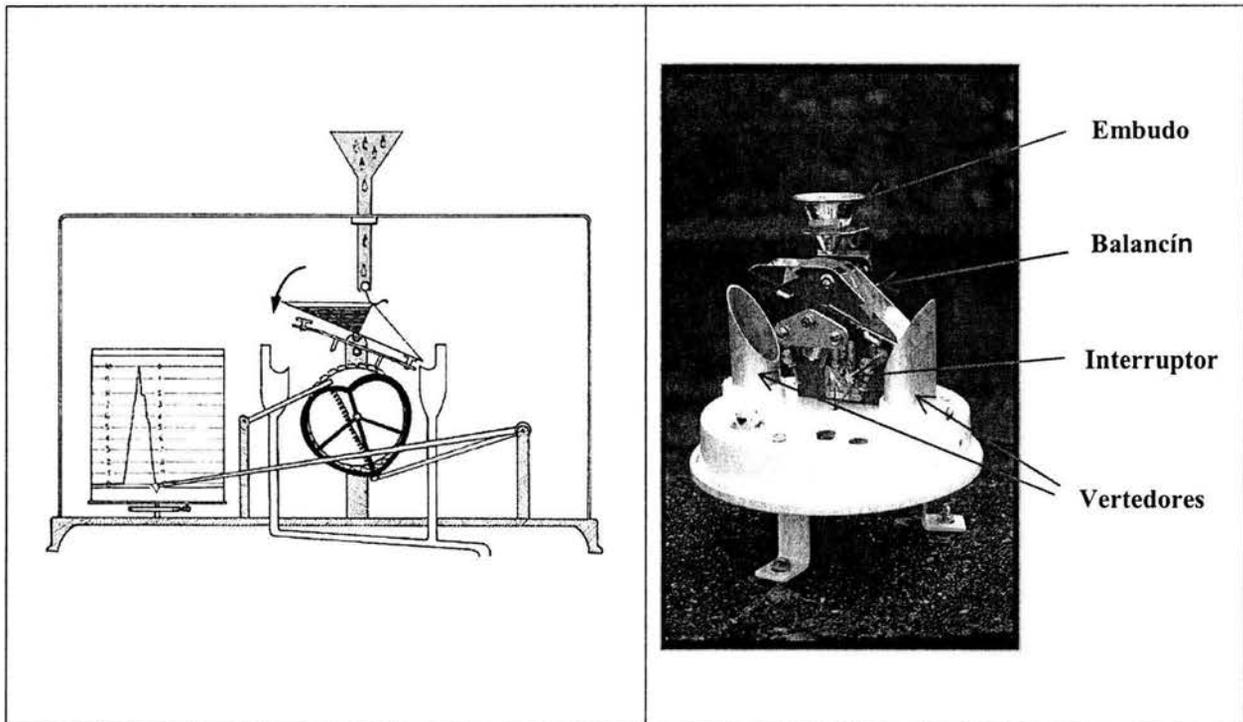
c) Pluviógrafo de balancín

La captación de la lluvia es utilizando este aparato con un embudo y dos recipientes colocados en un balancín; al llenarse un recipiente la balanza se desequilibra y gira vaciando

el recipiente, por tanto, queda el otro recipiente listo para llenarse con lo que se repite el ciclo. La medición se obtiene a través de un impulso eléctrico que se produce al girar la balanza y accionar un contacto. El vaciado del agua es automático al pasar por el balancín. El detalle del mecanismo interior se muestra en la figura 1.4.

El registro se realiza en papel impreso perforado o con cinta magnética, por lo general este aparato se utiliza en redes de telemetría.

Figura 1.4 Pluviógrafo de balancín



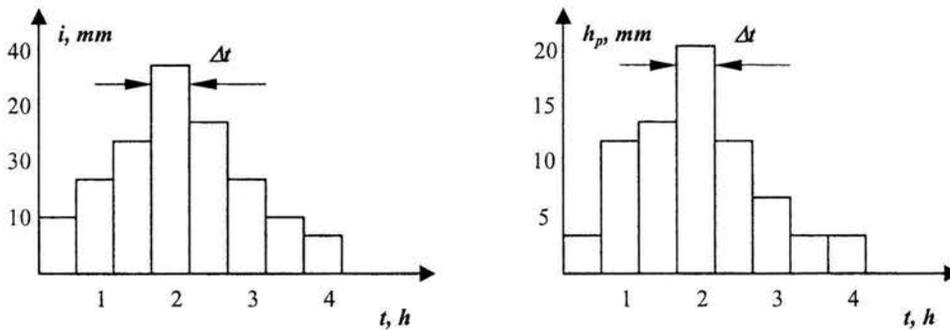
1.3.3 Hietograma y Curva Masa

Con los registros de lluvia con los aparatos antes mencionados es posible obtener la intensidad y duración de las tormentas que pueden presentarse.

Con el uso del pluviógrafo es posible conocer la intensidad de la precipitación i , esta se define como “la altura de la lámina de lluvia entre el tiempo en que esta ocurrió”. De los registros se obtienen gráficas que permiten conocer la intensidad de la lluvia respecto a un intervalo de tiempo, estos diagramas de barras se conocen como hietogramas.

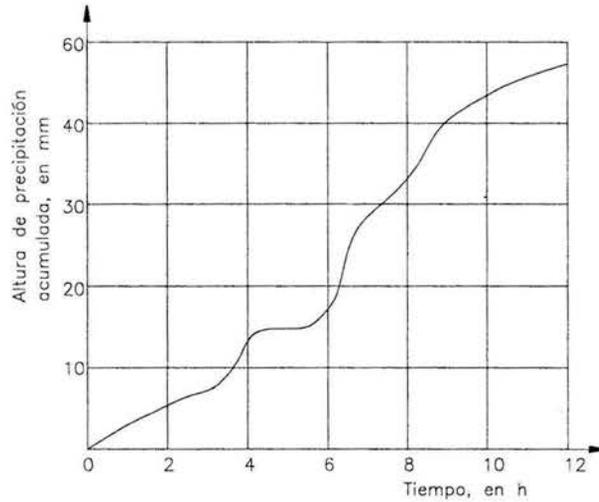
Los hietogramas se construyen al dividir el tiempo que dura la tormenta en n intervalos midiendo la altura de lluvia en cada una de las barras, entre más pequeño es el intervalo de tiempo se aproxima mas a la variación real de la lluvia, en la figura 1.5 se ejemplifican los hietogramas de intensidad y precipitación.

Figura 1.5 Hietogramas de intensidad y precipitación



La curva masa es una relación entre la altura de lluvia acumulada a través del tiempo desde el momento en el que inicia la tormenta hasta que termina. Se obtiene del registro del pluviógrafo. La figura 1.6 muestra la curva masa de una tormenta.

Figura 1.6 Curva masa de una tormenta



1.4 Precipitación media

Generalmente la lluvia que cae en un determinado sitio es diferente de la que ocurre a su alrededor a pesar de que dichos lugares se encuentren relativamente cerca, por lo cual, la lámina de lluvia que se registra en los pluviógrafos o pluviómetros instalados en las estaciones hidrológicas es puntual. Por tal motivo existen varios métodos que permiten conocer la precipitación total en una zona calculando la lluvia media de una manera sencilla.

a) Método aritmético

Este es uno de los métodos más sencillos y considera que cada una de las estaciones tiene la misma influencia en toda la zona.

El procedimiento consiste en sumar las alturas de lluvia de cada estación que se encuentra en el sitio de estudio para un intervalo de tiempo y dividirlo entre la sumatoria total del número de estaciones analizadas.

La precisión de este criterio esta en función del número de estaciones y de la distribución de la lluvia estudiada.

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i) \quad (1)$$

- \bar{P} Precipitación media, en mm
- n Número de estaciones
- P_i Lluvia registrada en la estación i , en mm

b) Método de Thiessen

Este procedimiento supone una variación lineal de la lluvia entre las estaciones, sin tomar en cuenta la influencia de la zona que se analiza.

Para aplicar este método es necesario localizar las estaciones cercanas al sitio en estudio y determinar el área de influencia de cada estación dentro del conjunto.

Para obtener el área de influencia se trazan líneas que unen las estaciones cercanas entre sí y forman triángulos. El siguiente paso es trazar las medianas a cada lado de los triángulos formados y unirlos entre si, el área limitada por éstas líneas forman los polígonos que corresponden a cada estación como se muestra en la figura 1.7.

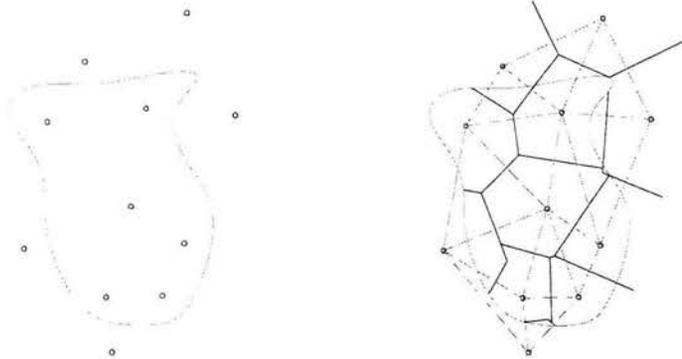
La ecuación para calcular la lluvia media es la siguiente:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i a_i)}{A} \quad (2)$$

donde

- a_i Área del polígono correspondiente a la estación i , en km^2
- P_i Precipitación registrada en la estación i , en mm
- A Área total de la cuenca, en km^2

Figura 1.7 Polígonos de Thiessen



c) Método de Isoyetas

Para aplicar este método se requiere un plano de isoyetas. Las isoyetas son curvas que unen puntos de igual precipitación; el trazo de estas es semejante al que se realiza en topografía para las curvas de nivel del terreno.

Este método es considerado el más exacto para calcular la precipitación media de una cuenca pero requiere un cierto criterio para trazar el plano de isoyetas. Por supuesto, entre mayor sea el número de estaciones dentro de la zona en estudio mayor será la aproximación con la cual se trace el plano de isoyetas (figura 1.8).

Para calcular la altura de precipitación media en determinada zona se utiliza la expresión:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{P}_i A_i)}{A} \quad (3)$$

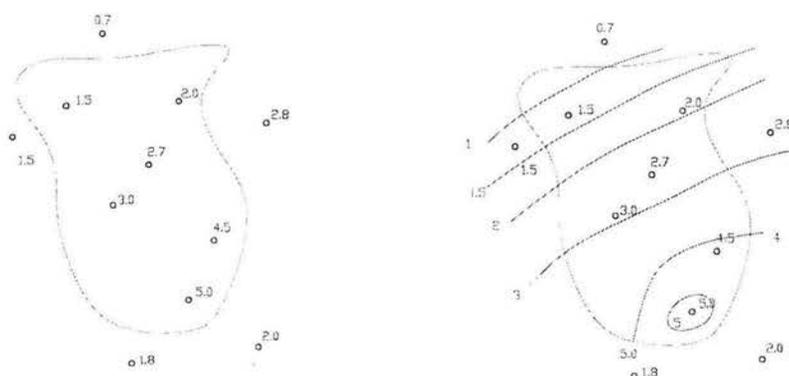
donde

P_i Precipitación promedio entre dos isoyetas, en mm

A_i Área tributaria de la estación i , en km²

A Área total de la zona, en km²

Figura 1.8 Plano de Isoyetas



1.5 Escurrimiento

El escurrimiento es el componente del ciclo hidrológico que considera al agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre. La cantidad de agua de lluvia que queda una vez que ha sido interceptada, infiltrada o evaporada sigue diversos caminos hasta llegar a la salida de la cuenca.

Se divide principalmente en 3 clases: la superficial que se presenta sobre el suelo; la subsuperficial es el agua que escurre por debajo de la superficie del suelo y el subterráneo que se infiltra a los niveles inferiores del nivel freático.

A continuación se describe brevemente cada uno de ellos.

1.5.1 Escurrimiento superficial

El escurrimiento superficial es aquel que proviene de la precipitación y drena hacia las corrientes hasta la salida de la cuenca.

De acuerdo al ciclo hidrológico una vez que la lluvia llega al suelo se infiltra hasta saturar las capas superiores del mismo, aquella que no logra infiltrarse escurre hasta encontrar un cauce definido o incluso tiende a evaporarse, esta precipitación forma parte del escurrimiento directo.

1.5.2 Escurrimiento subsuperficial

Es parte de la lluvia que se infiltra cerca de la superficie del suelo y más o menos paralela a él. Dependiendo de la permeabilidad y las características del suelo el escurrimiento puede ser rápido como el superficial o lento como el subterráneo, por lo cual, en algunas ocasiones logra confundirse con alguno de estos.

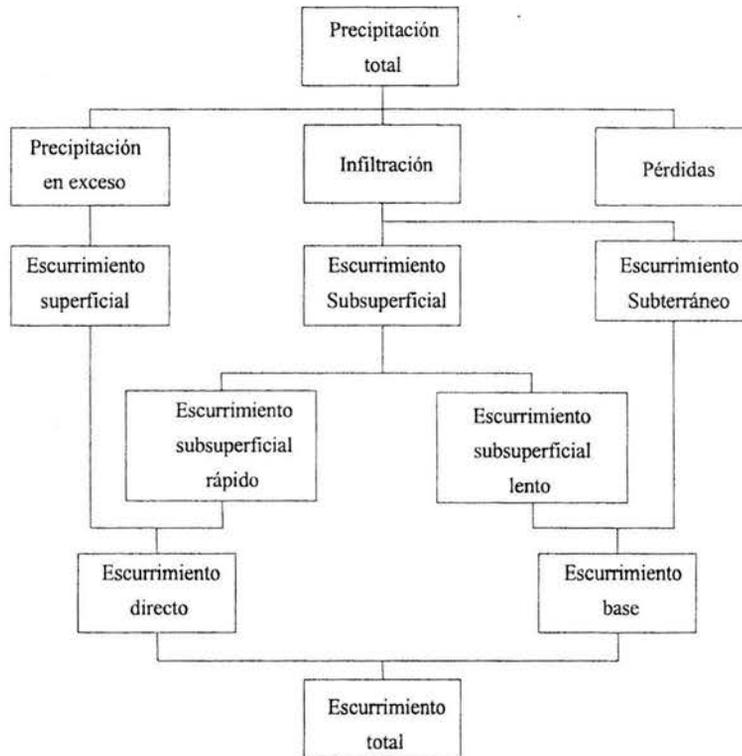
1.5.3 Escurrimiento subterráneo

El escurrimiento subterráneo es aquel que se realiza a través del suelo hasta llegar a los niveles inferiores del nivel freático. Es el único que puede alimentar los ríos cuando no se presenta la lluvia por lo que, forma parte del escurrimiento base.

De las definiciones anteriores se puede analizar el escurrimiento total, compuesto del escurrimiento directo y base. El directo se origina por la lluvia una vez que se ha descontado

la infiltración y la evapotranspiración y el base proviene del agua subterránea. La figura 1.9 muestra el ciclo del esgurrimiento a partir de una tormenta.

Figura 1.9 Ciclo del esgurrimiento a partir de una tormenta



Fuente: Springall R. Hidrología primera parte

1.6 Relación Lluvia -Esgurrimiento

La lluvia y el esgurrimiento son dos partes muy importantes del ciclo hidrológico y que se han analizado de manera independiente pero se pueden relacionar para fines de diseño de las obras hidráulicas como son: drenajes urbanos, las presas, los canales, etc. También se puede conocer la tormenta de diseño y calcular la avenida máxima que se presente.

Desafortunadamente, no es común contar con datos de escurrimiento para un determinado sitio, y como existe una mayor cantidad de registros de lluvia conviene emplear métodos que relacionen la precipitación con el escurrimiento que producen.

Se han propuesto varios modelos de lluvia-escurrimiento, en este trabajo solo se mencionaran algunos de ellos.

Los modelos de lluvia escurrimiento empíricos relacionan las características fisiográficas de la cuenca, condiciones de uso de suelo, pendiente del terreno, longitud o pendiente del cauce principal, intensidad de lluvia, etc. con el valor máximo del escurrimiento (gasto de pico). Algunos de ellos son:

- a) Método de las envolventes de Creager. Este método es uno de los más conocidos. Creager asoció a los gastos más grandes observados en el mundo con el área de la cuenca en la que se presentaron y posteriormente se trazó una envolvente a ellos, a la curva obtenida se le han hecho ajustes de parámetros para representarla con una ecuación.
- b) Fórmula racional. Este método es función de un coeficiente de escurrimiento, de la cuenca e intensidad de lluvia. De éste método se derivan casi todos los métodos empíricos. La fórmula se escribe como:

$$Q_p = 0.278 C i A \quad (4)$$

donde

Q_p Gasto pico, en m^3/s

C Coeficiente de escurrimiento, adimensional

i Intensidad de lluvia para una duración igual al tiempo de concentración, en mm/h

A Área de la cuenca, en km^2 .

Los métodos del hidrograma unitario requieren registros de esguerrimiento y precipitación, con ellos se puede calcular el gasto máximo y la forma de la avenida que puede presentarse.

La definición de hidrograma unitario es la siguiente “Es el hidrograma de esguerrimiento directo, producido por un milímetro de lluvia en exceso que cae con intensidad uniforme sobre toda la cuenca durante un intervalo de tiempo”.

Existen varios tipos de hidrogramas unitarios aquí solo se presentan algunos de ellos.

a) Hidrograma Unitario Tradicional.

Este método supone que las lluvias con una misma duración y distribución producen hidrogramas unitarios semejantes, por lo tanto el área bajo la curva representa el volumen de esguerrimiento directo del hidrograma y será igual al área de la cuenca multiplicada por 1 mm de lluvia efectiva. El método se utiliza en cuencas similares que no cuentan con mediciones simultáneas de gastos y precipitación. En él la altura de lluvia efectiva tiene un valor constante.

b) Hidrograma unitarios sintéticos

Se utilizan cuando no se tienen registros simultáneos de precipitación y esguerrimiento, se puede estimar un hidrograma unitario para una cuenca conociendo sus características fisiográficas. Para esto se recurre a un hidrograma unitario de otro sitio, casi siempre referido a ciertos parámetros del lugar en donde fue calibrado.

b.1) Hidrograma unitario triangular (HUT).

El hidrograma unitario triangular se desarrolló para cuencas pequeñas. Para su uso es necesario conocer las características fisiográficas de la cuenca. Su forma es triangular y el gasto pico se obtiene con la expresión siguiente:

$$q_p = 0.208 \frac{A}{t_p} \quad (5)$$

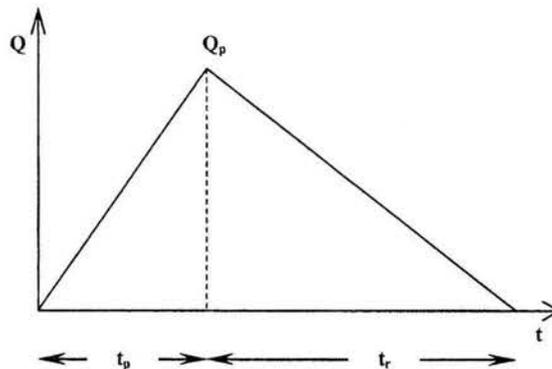
donde

- q_p Gasto pico, en $m^3/s/mm$
- A Área de la cuenca, en km^2 .
- t_p Tiempo pico, en horas
- t_c Tiempo de concentración, en horas
- t_r Tiempo de retorno, en horas

$$t_r = 1.67 t_p \quad (6)$$

$$t_p = \sqrt{t_c} + 0.6t_c \quad (7)$$

Figura 1.10 Hidrograma Unitario Triangular

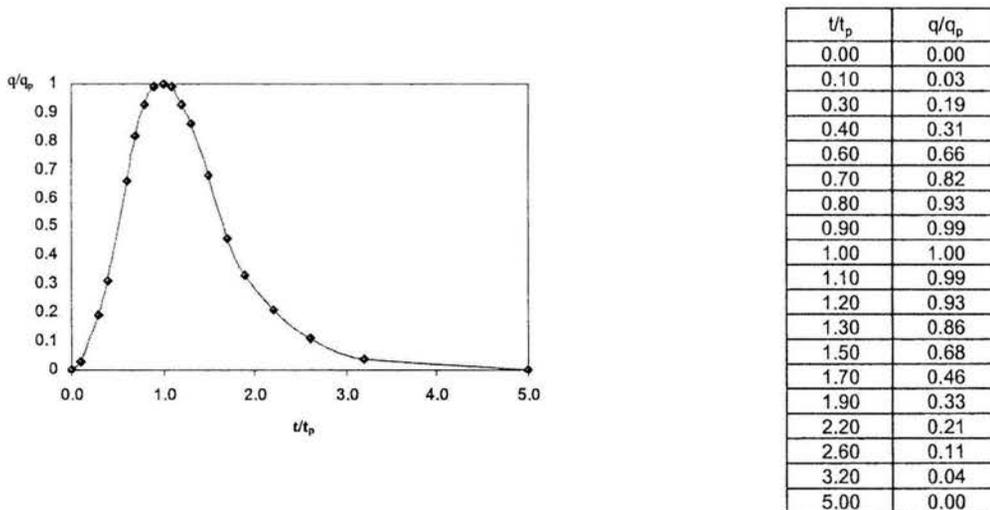


El hidrograma de escurrimiento se calcula multiplicando las ordenadas del HUT por la lluvia efectiva en milímetros.

b.2) Hidrograma Unitario Adimensional del SCS

Para determinar el hidrograma de la cuenca con este procedimiento se calcula el q_p con la expresión anterior; la forma del hidrograma se define al multiplicar el gasto pico y tiempo pico por las ordenadas y abscisas de un hidrograma adimensional propuesto por el Soil Conservation Service (SCS). El hidrograma de escurrimiento se obtiene multiplicando cada una de las ordenadas del hidrograma propuesto por la lluvia efectiva.

Figura 1.11 Hidrograma Unitario del SCS



Con los métodos propuestos que relacionan la lluvia y el escurrimiento es posible conocer el gasto o el hidrograma de diseño el cual proporciona la información necesaria para evaluar por ejemplo el gasto total de un río o la avenida máxima que se presenta en un lugar determinado.

2. CONCEPTOS DE PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA EN HIDROLOGÍA

En áreas de la ingeniería como la Hidrología existe la necesidad de predecir el comportamiento en un futuro de ciertas variables a partir de hechos ocurridos en el pasado. Existen herramientas como la estadística que recolecta y organiza la información hidrológica de manera sintética para facilitar su uso.

En este capítulo se describen las definiciones de algunos conceptos básicos de probabilidad y estadística aplicables a la Hidrología.

2.1 Estadística

Entre las numerosas definiciones de Estadística se cita la siguiente: “La estadística se ocupa de los métodos científicos para recolectar, organizar, resumir, presentar y analizar datos, así como de sacar conclusiones válidas y tomar decisiones con base en este análisis”².

La estadística se divide en las ramas descriptiva y matemática. La descriptiva clasifica los datos recogidos y los ordena; la matemática realiza comparaciones del fenómeno analizado con modelos probabilísticos a fin de obtener información que no resulte evidente al realizar una simple ordenación.

La información hidrológica que se tiene de una o varias estaciones pluviométricas es muy extensa ya que depende de la cantidad de años registrados. La información hidrológica en la mayoría de los casos se encuentra incompleta lo que puede disminuir su confiabilidad.

² (Estadística Spiegel M.)

Para conocer el comportamiento de los valores de las variables hidrológicas es necesario recurrir a métodos probabilísticos, tal es el caso de la lluvia en un sitio en particular, cuando se asocian sus valores máximos anuales con una función de distribución de probabilidad conocida.

En la Estadística se obtienen los datos a partir de una observación de los hechos o sucesos. La lluvia que cae durante un año en un lugar es un suceso del cual se derivan valores como la intensidad máxima instantánea, la cantidad total de lluvia diaria recogida etc. Cuando los sucesos son cuantitativos se asocian a una variable, de tal forma que existen tantas variables como caracteres observados.

Las variables son continuas cuando el carácter observado toma cualquier valor. Son discretas cuando pueden tomar valores fijos dentro de un intervalo. Por ejemplo el número de días que llueve en un mes es entero, por lo que se representa con una variable discreta.

El conjunto de valores de una variable dentro de un intervalo se conoce como población o universo. La población es finita si el número de valores es contable, e infinita si el número de valores es tan grande que no se puede contar. Las variables son reales si son si las variables son únicas; e hipotéticas al considerar el conjunto de todos los modos imaginables en que puede ocurrir un suceso.

Los hechos o eventos son naturales o artificiales. Los naturales o históricos son los recogidos por el fenómeno natural y tienen la particularidad de que solo ocurren una vez. Los artificiales o experimentales pueden obtenerse bajo las condiciones en laboratorio y pueden repetirse. En este estudio se utilizaron los de tipo natural.

La selección de algunos valores de una población se conoce como muestra y al número “n” de individuos o elementos que componen una muestra se denomina tamaño de la muestra.

Una vez obtenidos y relacionados los datos se deben sintetizar para tener una representación clara y facilitar su comprensión; para tal efecto se utilizan distribuciones estadísticas.

Los valores elegidos pueden ordenarse de acuerdo al número total o agrupándolos por intervalos de clase en tablas o diagramas que expresen el número de observaciones, que es conocido como frecuencia absoluta. Al dividir cada una de estas frecuencias entre el número total de observaciones se obtiene la frecuencia relativa.

Si se consideran variables los valores en el eje horizontal y se relacionan con las frecuencias (absolutas o relativas) en un eje vertical se obtiene un histograma, al unir dichos puntos mediante segmentos rectilíneos se tendrá un polígono de frecuencias.

Como los intervalos de un histograma de frecuencias relativas son cada vez mas pequeños las variables pueden transformarse en continuas formando una curva denominada función de densidad de probabilidad $f(x)$, si se acumulan las frecuencias relativas y la longitud de los intervalos de clase tienden a cero entonces se obtiene la función de distribución de probabilidad.

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt \quad (8)$$

De las distribuciones estadísticas se tienen algunos parámetros para asignarles la forma que más se apegue a los histogramas observados.

2.1.1 Parámetros estadísticos de las muestras

Con el fin de caracterizar a los histogramas o a las funciones de densidad de probabilidad se emplean los parámetros estadísticos, estos parámetros estadísticos se obtienen a partir de datos muestrales y se pueden clasificar en medidas de tendencia central, de dispersión y de asimetría.

Para definir los distintos parámetros se usará la siguiente notación:

x_i, x_j, \dots, x_k valores observados.

n_i, n_j, \dots, n_k frecuencias absolutas de los valores observados.

n número total de observaciones o frecuencia total.

n_i/n frecuencia relativa.

$n_i + n_j + \dots + n_k = n$

2.1.2 Medidas de tendencia central

Las más utilizadas son:

- a) Media aritmética. Es la suma de todos los valores observados, dividida por el número total de observaciones.

$$x = x_m = \frac{n_i x_i + n_j x_j + \dots + n_k x_k}{n} \quad (9)$$

- b) Media geométrica. Es la raíz n-esíma (n es el número total de observaciones) del producto de todos los valores observados.

$$x_g = \sqrt[n]{x_i^{n_i} \cdot x_j^{n_j} \cdot \dots \cdot x_k^{n_k}} \quad (10)$$

Tomando los logaritmos

$$\log x_g = \frac{n_i \log x_i + n_j \log x_j + \dots + n_k \log x_k}{n} \quad (11)$$

Así, el logaritmo de la media geométrica es la media aritmética de los logaritmos de los valores observados.

- c) Media armónica. Es el número inverso de la media aritmética de los inversos de los valores observados.

$$x_a = \frac{n}{\frac{n_i}{x_i} + \frac{n_j}{x_j} + \dots + \frac{n_k}{x_k}} \quad (12)$$

- d) Mediana. Es un valor tal que la frecuencia de los valores que la supera es igual a la frecuencia de los valores inferiores a él; es decir, la frecuencia relativa de la mediana es el 50%.

- e) Moda. Es el valor de la variable que tiene mayor frecuencia.

2.1.3 Medidas de dispersión.

Miden el grado de extensión de los valores observados alrededor de un valor fijo.

- a) Desviación media. Es la medida aritmética de las diferencias absolutas entre los valores observados y su media aritmética.

$$D = \frac{n_i |x_i - x_m| + n_j |x_j - x_m| + n_k |x_k - x_m|}{n} \quad (13)$$

- b) Desviación cuadrática general. Es la raíz cuadrada de la suma de diferencias entre valores observados y un valor cualquiera a de la variable previamente fijado, elevadas al cuadrado, dividida por el número total de observaciones.

$$S = \sqrt{\frac{n_i(x_i - a)^2 + n_j(x_j - a)^2 + \dots + n_k(x_k - a)^2}{n}} \quad (14)$$

- c) Desviación estándar. Es la desviación cuadrática respecto a la media aritmética (x_m).

$$\sigma = \sqrt{\frac{n_i(x_i - x_m)^2 + n_j(x_j - x_m)^2 + \dots + n_k(x_k - x_m)^2}{n}} \quad (15)$$

- d) Varianza. Es el cuadrado de la desviación estándar (σ^2).

- e) Coeficiente de variación. Es la relación entre la desviación estándar y la media.

$$C_v = \frac{\sigma}{x_m} \quad (16)$$

2.1.4 Medidas de asimetría

Miden el grado de desviación respecto a la simetría o sesgo de una distribución. Los parámetros de asimetría son:

Asimetría absoluta.

$$\alpha = \frac{n_i(x_i - x_m)^3 + n_j(x_j - x_m)^3 + \dots + n_k(x_k - x_m)^3}{n} \quad (17)$$

2.1.5 Coeficiente de asimetría.

Es la relación de la asimetría absoluta por el cubo de la desviación estándar.

$$Ca = \frac{\alpha}{\sigma^3} \quad (18)$$

Con base en el valor del coeficiente de asimetría se tiene que

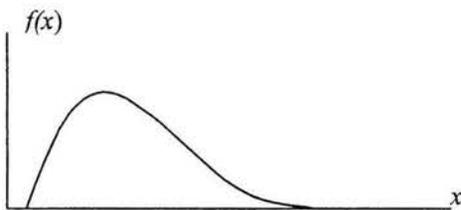
$Ca > 0$ sesgo o asimetría a la derecha

$Ca = 0$ simétrica o sin sesgo

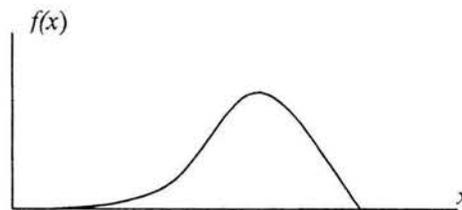
$Ca < 0$ sesgo o asimetría a la izquierda

Figura 2.1 Curvas de frecuencias

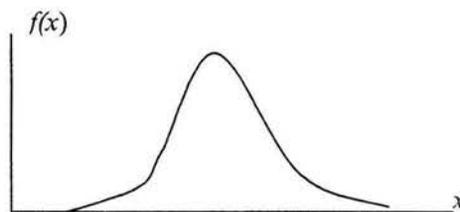
a) Asimétrica a la derecha



b) Asimétrica a la izquierda



c) Simétrica



2.1.6 Sesgo.

Es la diferencia entre la media y la moda entre la desviación estándar.

$$S_k = \frac{x_m - \bar{x}}{\sigma} \quad (19)$$

Si la distribución tiene una rama más larga a la derecha del máximo central que a la izquierda, se dice que tiene sesgo positivo, en caso contrario el sesgo es negativo.

2.2 Probabilidad

Un experimento recibe el nombre de aleatorio cuando no es posible predecir un resultado de entre un número n de posibilidades.

Las variables aleatorias son los resultados de un experimento aleatorio donde éstos representan un espacio de eventos; este fenómeno se conoce como probabilidad de una función P que aplicada a un evento A se le asigna un número real $P(A)$.

En general para un experimento dado, la probabilidad será el cociente entre el número de veces que se obtiene el resultado deseado entre el número de veces que se efectúa el experimento hasta que éste tienda al infinito, así.

$$P(A) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{M(A)}{N} \quad (20)$$

donde

- A Evento
- $P(A)$ probabilidad de que se presente el evento
- $M(A)$ número de veces que se presenta el evento
- N número de veces que se efectúa el experimento

2.2.1 Función de densidad de probabilidad

Si la probabilidad de que la variable X esté comprendida entre los valores x y $x+dx$ se denomina $p(x)dx$, la función $y=p(x)$ se conoce con el nombre de función de densidad de probabilidad. La función de densidad de probabilidad es un modelo matemático de la variable aleatoria continua y sus propiedades son las siguientes:

$$f(x) \geq 0$$

la curva es positiva

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$$

el área bajo la curva es igual a 1

$$\int_a^b f(x) dx = P(a \leq x \leq b) \quad a \text{ y } b \text{ son valores cualquiera de } x \text{ con la condición } a < b$$

2.3 Distribuciones de probabilidad

Las distribuciones de probabilidad son formas teóricas o ideales del límite de distribuciones de frecuencia relativa cuando el número de observaciones realizadas es muy grande; por lo tanto pueden ser distribuciones poblacionales. Estas distribuciones se representan en forma gráfica dibujando $P(x)$ contra x .

Las distribuciones de probabilidad mas utilizadas en hidrología son las que se describen continuación.

2.3.1 Normal

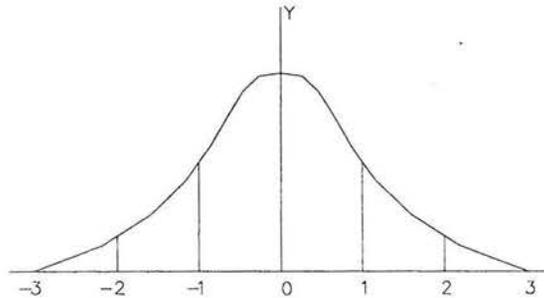
Se deriva del teorema del límite central. Este teorema indica que, si la secuencia de variables aleatorias es independiente y esta distribuida de la misma manera con media μ y varianza σ^2 , a medida que la muestra aumenta la distribución de la suma de n de las variables tiende a la distribución normal con media $n\mu$ y varianza $n\sigma^2$.

Algunas de las desventajas de esta distribución en hidrología son las siguientes:

- La variación es de un rango continuo $(-\infty, \infty)$.

- Es simétrica alrededor de la media (la información en hidrología tiende a ser asimétrica).

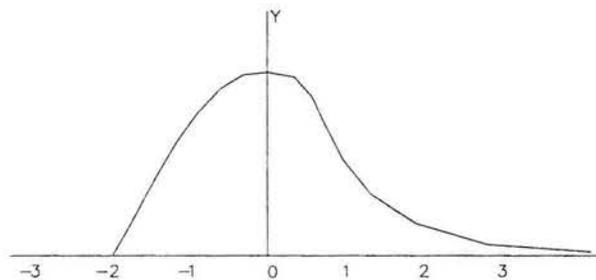
Figura 2.2 Distribución Normal



2.3.2 Lognormal

La distribución Lognormal presenta algunas ventajas con respecto a la normal; la primera es que esta limitada a valores positivos eso es $x > 0$, por otro lado, al aplicar el logaritmo la función tiende a reducir la asimetría positiva, puesto que en los logaritmos los números grandes se reducen en una proporción mayor que los pequeños, esto es muy común en los datos hidrológicos. Las desventajas de la lognormal es que se tienen solamente dos parámetros y requiere que los logaritmos de los datos sean simétricos alrededor de su media.

Figura 2.3 Distribución Log-Normal

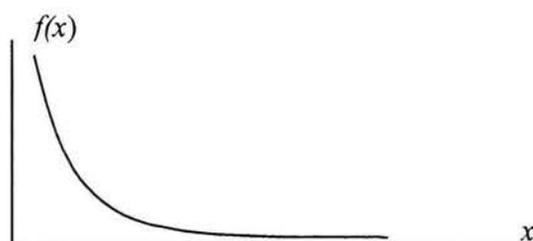


2.3.3 Exponencial

La distribución exponencial se utiliza para describir tiempos de interarribo de choques aleatorios a sistemas hidrológicos; por ejemplo, el volumen de agua contaminada que llega a los ríos por medio del escurrimiento.

La ventaja de esta distribución consiste en que se adapta a estudios teóricos y a la facilidad de estimar el valor λ a partir de la información con que cuenta. La desventaja es que requiere que la ocurrencia de cada evento sea independiente de la vecindad.

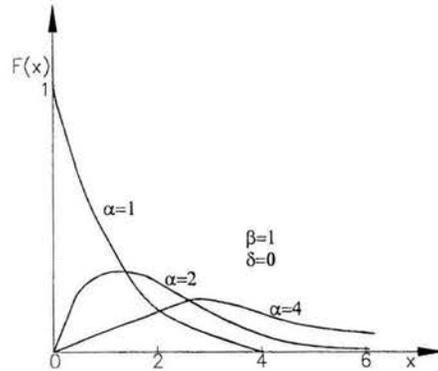
Figura 2.4 Función Exponencial



2.3.4 Gamma

La distribución gamma consiste en la suma de β variables aleatorias independientes e idénticas distribuidas exponencialmente. La forma de esta distribución es similar a la función de densidad de probabilidad típica y es muy útil para la descripción de variables hidrológicas asimétricas sin el uso de la transformación log.

Figura 2.5 Función Gamma de un parámetro



La distribución Gamma de dos parámetros (β y λ) tienen como limite inferior cero, lo cual representa una desventaja para la aplicación en variables hidrológicas que tienen un límite inferior superior a cero.

2.3.5 Pearson tipo III

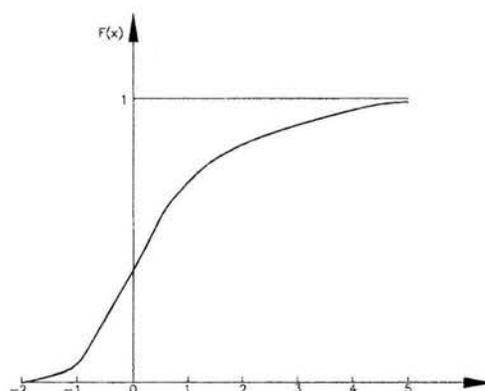
La distribución Pearson tipo III o distribución gamma de tres parámetros introduce como tercer parámetro el límite inferior ε , de tal manera que por el método de los momentos la media, la desviación estándar y el coeficiente de asimetría pueden transformarse en λ , β y ε de la distribución.

Esta distribución puede tomar formas diferentes a medida que λ , β y ε varían de acuerdo al valor que tomen los coeficientes que intervienen en la solución.

2.3.6 Gumbel

La función de distribución Gumbel se utiliza para determinar la probabilidad de que se presenten grandes avenidas, puesto que se ha demostrado teóricamente que se ajusta a los valores máximos. Los parámetros estadísticos de esta función son la media y la variancia, su ecuación representativa se indica en la tabla 2.1.

Figura 2.6 Función de distribución Gumbel



2.3.7 Doble Gumbel

La función de distribución Doble Gumbel se utiliza cuando los gastos máximos anuales de una cuenca pueden ser provocados por causas diferentes de un año a otro, ejemplo de ello son las avenidas ocasionadas por grandes tormentas. Son comunes en cuencas que vierten al Golfo de México y al Océano Pacífico.

Los parámetros estadísticos de las funciones de distribución se resumen en la tabla 2.1.

Figura 2.7 Función de distribución Doble Gumbel

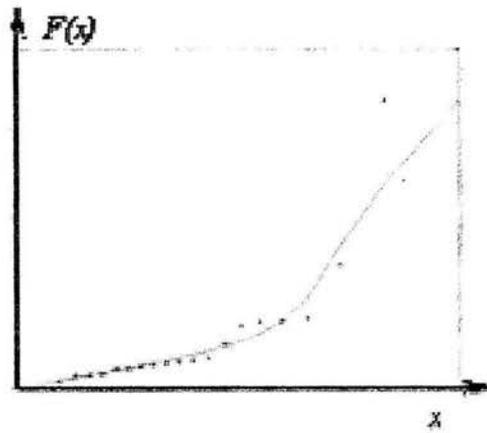


Tabla 2.1 Distribuciones de Probabilidad (Estimación por momentos)

Distribución	Función densidad de probabilidad	Rango	Parámetros de la función
Normal	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$	$-\infty \leq x \leq \infty$	$\mu = \bar{x}, \quad \sigma = s_x$
Lognormal	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right)$; donde $y = \log x$	$x > 0$	$\mu_y = \bar{y}, \quad \sigma_y = s_y$
Exponencial	$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$	$x \geq 0$	$\lambda = \frac{1}{x}$
Gamma	$f(x) = \frac{\lambda^\beta x^{\beta-1} e^{-\lambda x}}{\Gamma(\beta)}$; donde Γ =Función gamma	$x \geq 0$	$\lambda = \frac{\bar{x}}{s_x^2}, \quad \beta = \frac{\bar{x}^2}{s_x^2} = \frac{1}{CV^2}$
Pearson Type III	$f(x) = \frac{\lambda^\beta (x-\varepsilon)^{\beta-1} e^{-\lambda(x-\varepsilon)}}{\Gamma(\beta)}$	$x \geq \varepsilon$	$\lambda = \frac{s_x}{\sqrt{\beta}}, \quad \beta = \left(\frac{2}{C_s}\right)^2, \quad \varepsilon = \bar{x} - s_x \sqrt{\beta}$
Gumbel	$f(x) = \alpha e^{-\alpha(x-\beta)} e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}}$	$x \geq 0$	$\alpha = 0.78\sigma \quad \beta = \bar{x} - 0.5772\alpha$
Doble Gumbel	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-u}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-u}{\alpha}\right)\right]$	$-\infty < x < \infty$	$\alpha = \frac{\sqrt{6}s_x}{\pi}, \quad u = \bar{x} - 0.5772\alpha$

Fuente: Chow Hidrología Aplicada

2.4 Ajuste a una distribución de probabilidad

El ajuste de los parámetros de las distribuciones de probabilidad puede realizarse con varios métodos, tres de ellos son: método de los momentos, máxima verosimilitud y el de mínimos cuadrados.

Los momentos poblacionales se obtienen respecto a la media o al origen; los estadísticos muestrales se obtienen con la media, varianza, coeficiente de asimetría, de curtosis, desviación estándar y coeficiente de variación. En el análisis hidrológico se recomienda utilizar los estadísticos insesgados, ya que el tamaño de la muestra es relativamente pequeño.

2.4.1 Método de momentos

Es uno de los métodos más sencillos que se utilizan para conocer uno o más parámetros de las funciones de distribución de probabilidad o poblacionales. Dependiendo del número de parámetros a conocer se plantea un sistema de ecuaciones en donde se igualan los momentos poblacionales con los muestrales.

2.4.2 Método de máxima verosimilitud

Supone que el mejor juego de parámetros de una función debe ser aquel que maximiza la probabilidad de ocurrencia de la muestra observada.

Una forma de encontrar el mejor ajuste o de medir el parecido ante una función de distribución teórica y un grupo de datos es mediante la función de verosimilitud (L). Mientras mayor sea la función mayor será el ajuste de la función teórica de los datos.

2.4.3 Método de mínimos cuadrados

Consiste en obtener el conjunto de parámetros al minimizar la suma de los cuadrados de los errores entre los valores observados y calculados, en donde los factores $a_i, i=1.2.3\dots m$ de la función $f(x; a_1, a_2, \dots, a_m)$ son los parámetros a considerar.

Como se plantea en el Cálculo Diferencial el valor mínimo se obtiene al calcular la derivada parcial con respecto a cada parámetro e igualando a cero. Con ello se plantea un sistema de ecuaciones y su solución corresponde al valor de los parámetros de la función de distribución de probabilidad.

3. EVENTOS DE DISEÑO

Para diseñar cualquier estructura, es necesario conocer la información con la que se cuenta. En el caso de problemas hidrológicos se debe conocer la fisiografía del lugar y contar con los registros hidrológicos de las estaciones que se encuentren cercanas. Asimismo se debe conocer el intervalo de ocurrencia de los eventos que se presenten a fin de determinar para una obra específica la probabilidad de que el evento sea igualado o excedido.

3.1 Análisis de los datos

La información hidrológica disponible generalmente se presenta en orden cronológico y se utilizan valores de sus extremos para las condiciones críticas, por tal motivo se trabaja con dos tipos de datos, series de valores extremos y series de duración parcial.

La serie de valores extremos incluye solo el valor mas grande o el mas pequeño del registro en un intervalo de tiempo constante. Si el intervalo es un año se conoce como “serie anual”; si contiene los mas grandes se denomina “serie de máximos anuales” y si se refiere a valores menores se llama “serie de mínimos anuales”.

La serie de duración parcial contiene datos seleccionados de tal forma que su magnitud es mayor que un valor base, este se escoge para que el número de valores sea igual al número de años de registro. A este resultado se le denomina “serie de excedentes anuales”.

La selección de este tipo de datos debe usarse en diseño y se basa en las aplicaciones que se le dan al análisis de los datos. De manera habitual los gastos se analizan como máximos anuales y la lluvia como excedentes anuales.

Las características fisiográficas que intervienen son: área de la cuenca, tipo de suelo, pendiente, longitud del cauce principal, topografía y geología de la zona. La información

hidrológica se obtiene de boletines hidrológicos publicados por la Comisión Nacional del Agua y el Servicio Meteorológico Nacional.

Otros factores que influyen para determinar la avenida de diseño de una obra son: el costo de la obra, las zonas o propiedades cercanas al cauce por donde escurre la avenida y el periodo de retorno que depende de la estructura o zona del sitio en estudio. A continuación se define el concepto de periodo de retorno.

3.2 Periodo de retorno

En un análisis de datos hidrológicos, el primer objetivo es determinar el intervalo de recurrencia o periodo de retorno T de un evento hidrológico.

El periodo de retorno se define como el intervalo promedio de tiempo en que un evento de magnitud dada puede ser igualado o excedido por lo menos una vez.

Si un evento igual o mayor a “ y ” ocurre una vez en T años, su probabilidad de recurrencia $P(Y \geq y)$ es igual a $1/T$ en T casos, o sea

$$P(Y \geq y) = \frac{1}{T} \quad (21)$$

de forma análoga

$$T = \frac{1}{P(Y \geq y)} = \frac{1}{1 - P(Y < y)} \quad (22)$$

Una serie de máximos anuales y una de excedentes anuales difieren en el sentido de que un valor máximo anual ocurre exactamente una vez en un año, mientras que un excedente anual ocurre en promedio una vez al año.

El análisis de datos hidrológicos en relación con su periodo de retorno requiere conocer la probabilidad de recurrencia de la distribución observada y la probabilidad de recurrencia correspondiente al evento que se desee obtener ligado a la distribución teórica de mejor ajuste.

Si se tiene “n” observaciones de eventos, estos se ordenan del valor mayor hasta el menor asignándoles a cada uno un número “m” de orden de acuerdo al lugar donde aparece.

Para máximos anuales el periodo de retorno (T_m) será el tiempo en años que el valor mayor de los máximos anuales pueda ser igualado o excedido una vez en promedio.

$$T_m = \frac{n+1}{m} \quad (23)$$

n Número de años de registro

m Número de orden

Esto indica que el periodo de retorno de un máximo anual es igual al número de años de registro máximo dividido entre el número de orden.

Cuando los valores son excedentes anuales el periodo de retorno es igual al número de años de registro dividido entre el número de orden

$$T = \frac{n}{m} \quad (24)$$

3.3 Periodo de retorno de eventos de diseño

La selección de un T_r para una obra se estima de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia de un evento, pero existe la posibilidad de que se presente un evento cuya magnitud sea mayor a la estimada por tanto se dice que existe un riesgo de falla.

Sea P_m la probabilidad de que un valor máximo anual “y” sea igualado o excedido en un año en particular. Análogamente $1 - (1 - P_m)^N$ es la probabilidad de que “y” sea igualado o excedido en N años, por lo tanto

$$P_n = 1 - (1 - P_m)^N \quad (25)$$

En general el periodo de retorno con el que se calcula la avenida de diseño debe considerar la magnitud de la obra y los posibles riesgos que se tengan durante su ejecución.

En la tabla 3.1 se establecen los valores de probabilidad P de que ocurra al menos una vez en n años consecutivos un evento con periodo de retorno T_r .

Tabla 3.1 Probabilidad de que ocurra al menos una vez un evento en determinado periodo de retorno

Tr	Número de años consecutivos						
	1	2	5	10	20	50	100
2	0.5000	0.7500	0.9688	0.9990	1.0000	1.0000	1.0000
5	0.2000	0.3600	0.6723	0.8926	0.9885	1.0000	1.0000
10	0.1000	0.1900	0.4095	0.6513	0.8784	0.9948	1.0000
20	0.0500	0.0975	0.2262	0.4013	0.6415	0.9231	0.9941
50	0.0200	0.0396	0.0961	0.1829	0.3324	0.6358	0.8674
100	0.0100	0.0199	0.0490	0.0956	0.1821	0.3950	0.6340
500	0.0020	0.0040	0.0100	0.0198	0.0392	0.0953	0.1814
1000	0.0010	0.0020	0.0050	0.0100	0.0198	0.0488	0.0952
10000	0.0001	0.0002	0.0005	0.0010	0.0020	0.0050	0.0100

Fuente: Fuentes Mariles Oscar

3.4 Selección de criterios de diseño

Al determinar la avenida de diseño, se toman en cuenta factores que intervienen tanto en el aspecto hidrológico como en el económico, ya que al incrementarse la avenida de diseño

el costo de la obra aumenta y viceversa. En general, deben tomarse en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Importancia de la obra
- Magnitud de la estructura
- Daños a propiedades cercanas
- Costo por mantenimiento
- Costo total de la obra
- Riesgo por pérdidas humanas, etc.

Para definir la avenida de diseño existen diversos métodos, estos pueden clasificarse en mayores y menores de acuerdo al tipo de estructura.

a) Estructuras menores

Dentro de esta clasificación se consideran estructuras como bordes, presas pequeñas, alcantarillas, drenaje urbano, etc. Al definir la avenida de diseño se sigue el siguiente procedimiento.

a.1) Calcular la duración de la tormenta de diseño. En este caso se considera que la duración es igual al tiempo de concentración. Si el tiempo de concentración (t_c) se define como el tiempo que tarda una partícula en viajar desde un punto de la cuenca hasta la salida de la misma. La expresión que se utiliza generalmente para obtenerlo es la propuesta por Kirpich.

$$t_c = 0.0003245 \left[\frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0.77} \quad (26)$$

donde

- t_c Tiempo de concentración, en horas
 L Longitud del cauce principal, en m
 S Pendiente media del cauce principal

a.2) Calcular el T_r para las estructuras con el uso de las tablas 3.2 y 3.3 si se toma en cuenta el tipo de obra y la zona a la que pertenece.

Tabla 3.2 Periodo de retorno para estructuras menores

Tipo de estructura	Periodo de retorno, en años
Drenaje lateral de los pavimentos donde puede tolerarse encharcamiento con lluvia de corta duración	1 a 2
Drenaje de aeropuertos	5
Drenajes urbanos	2 a 10
Alcantarillas sobre caminos secundarios, drenaje de lluvia o contracunetas	5 a 10
Puente sobre carreteras menos importantes o alcantarillas sobre carreteras importantes	25
Bordos	2 a 50
Puente sobre carretera importante donde el remanso puede causar daños excesivos por inundación u ocasionar la falla del puente	50 a 100

Fuente: Fuentes O. "Estudio Hidrológico para obras de protección"

Tabla 3.3 Periodo de retorno en función de la zona

Características de la zona por proteger	Periodo de retorno, en años
Parcelas agrícolas aisladas, sin posibles pérdidas de vidas humanas	5
Distritos de riego, sin riesgo de pérdidas de vidas humanas	25
Zonas agrícolas, poco pobladas	50
Zonas agrícolas, con poblados	100
Zona industrial y urbana	500
Zona densamente poblada	1000
Ciudades	10000

Fuente: Fuentes O. "Estudio Hidrológico para obras de protección"

Considerando los embalses pequeños, el Soil Conservation Service propone la clasificación siguiente:

- Tipo A Aquellas estructuras que se encuentran en zonas rurales o agrícolas, en donde se afecte zonas de cultivo, terrenos o caminos rurales.
- Tipo B Aquellas estructuras que se encuentran en áreas rurales en donde pueden dañar casas aisladas, carreteras o caminos rurales.
- Tipo C Estructuras localizadas en sitios donde la falla ocasione la pérdida de vidas humanas, casas, construcciones industriales, edificios comerciales, carreteras principales y edificios públicos.

La tabla 3.4 muestra los periodos de retorno de acuerdo a esta clasificación para una duración de 6 horas, periodo de retorno de 100 años, y precipitación máxima probable PMP³.

Tabla 3.4 Periodo de retorno para embalses pequeños

Clasificación	Lluvia de diseño para el vertedor
A	P_{100}^4
B	$P_{100}+0.12 (PMP-P_{100})$
C	$P_{100}+0.26 (PMP-P_{100})$

Fuente: Fuentes O. "Estudio Hidrológico para obras de protección"

a.3) Calcular la lluvia de diseño en función de la duración y periodo de retorno. A partir de los registros del pluviógrafo se obtiene la intensidad y duración, con estos valores y para los diferentes periodos de retorno se construyen las curvas. Intensidad – duración - periodo de retorno.

a.4) Calcular la lluvia en exceso (h_e). La lluvia en exceso es la parte de lluvia que se transforma en escurrimiento directo. Para obtenerla se utiliza el coeficiente de escurrimiento C de acuerdo con las características fisiográficas y del tipo y uso de suelo de las cuencas de drenaje.

$$C = V_{ED}/V_{LL} = h_e/h_p \quad (27)$$

donde

C Coeficiente de escurrimiento

V_{ED} Volumen de escurrimiento directo

V_{LL} Volumen llovido

h_e Altura de lluvia en exceso

h_p Altura de precipitación

a.5) Se selecciona un hidrograma unitario (ver capítulo 2).

³ PMP Es la máxima altura de lluvia que puede presentarse en una cuenca por drenar

b) Estructuras mayores

En el caso de grandes presas el cálculo de la avenida de diseño es un poco más complicado, pues se toman en cuenta factores como la capacidad de la obra de excedencias, la altura de la cortina, el volumen de regulación del vaso, el tamaño de los vertedores, etc.

Por otro lado, de la obra se pueden obtener otro tipo de beneficios que deben considerarse como son: abastecimiento de agua potable, riego, generación de energía eléctrica, etc. que influyen en el aspecto económico.

La tabla 3.5 muestra los de periodo de retorno de una avenida de diseño en función de la altura de la cortina.

⁴ *P₁₀₀ Lluvia máxima presentada en un periodo de retorno de 100 años*

Tabla 3.5 Periodo de retorno de una avenida de diseño en función de la altura de la cortina

Categoría	Almacenamiento, en m ³	Altura, en m	Pérdida de vidas	Daños	Avenida de diseño
Grande	Mayor que 60	Mayor que 18	Considerables	Catastróficos	Relación lluvia – escurrimiento usando la precipitación máxima probable
Intermedia	1.2 a 60	12 a 30	Pequeña	5 a 10 veces el costo de la presa	Relación lluvia- escurrimiento basada en la tormenta más severa registrada en el pasado, maximizada por punto de rocío, o periodo de retorno de 1000 años
Pequeña	Menor que 1.2	Menor que 15	Ninguna	Mismo orden de magnitud que el costo de la presa	Periodo de retorno de 50 a 100 años

Fuente: Fuentes O. "Estudio Hidrológico para obras de protección"

En los primeros tres capítulos se definieron los conceptos de ciclo hidrológico, lluvia y escurrimiento en sus diferentes tipos y la relación entre ellos. Por otro lado los conceptos relacionados con la probabilidad y estadística, ramas de la ciencia que nos ayudan a simplificar los fenómenos analizados; aunado a esto se definió el concepto de periodo de retorno y la importancia que tiene en función de la obra hidráulica a diseñar.

Con estos conceptos como base se puede proceder al objetivo del estudio el cual consiste en calcular la lluvia de diseño de una región utilizando un método teórico – práctico denominado Factor de Reducción por Área.

4. MÉTODOS PARA CALCULAR EL FACTOR DE REDUCCIÓN POR ÁREA

Como se vio en el capítulo uno existen varios métodos para determinar tormentas de diseño, pero como todos los métodos éstos tienen algunas desventajas, una de ellas deriva del análisis basado en la información de un sola estación por lo general cercana al sitio en estudio, y otra se refiere a que el diseño depende más del volumen de las avenidas que de su gasto pico.

Los problemas prácticos de hidrología como el control de inundaciones se relacionan con el volumen de lluvia que caen dentro de un área por lo que es necesario conocer la precipitación media que ocurre en ella. Si la lluvia “A” es menor que la precipitación puntual A’ y “a” puede ser obtenida como una parte de A’, para una cierta proporción en que debe modificarse el valor de A’ se calcula un factor de ajuste a un área válido para una duración determinada y que generalmente no varía con el período de retorno.

Para obtener el Factor de Reducción existen diversos criterios, a continuación se describen brevemente algunos de ellos.

4.1 Factor de reducción por área (FRA)

El factor de reducción por área es un coeficiente que sirve para transformar precipitaciones puntuales que se presentan en una zona determinada en precipitaciones medias en un área (Precipitación areal).

Este factor define la magnitud de la altura de lluvia como una función del área donde ocurre, y se utiliza cuando se desea conocer para conocer la precipitación media de la cuenca.

Para calcular las precipitaciones en un área determinada se tiene la ecuación siguiente:

$$P_a = FRA \times P_p \quad (28)$$

P_a precipitación areal en la zona para la duración en estudio

FRA Factor de reducción que se encuentra en función de la duración de la lluvia, área de interés y período de retorno

P_p Precipitación media de los valores puntuales para el área y duración en interés

El concepto del FRA surge en Estados Unidos por Hersfield en 1962 (US Weather Bureau 1958). Hersfield determinó dos tipos de factor de reducción, el de centro de tormenta, y el de área geográfica fija. A continuación se describe brevemente cada uno.

Centro de tormenta (Storm-centered). Si el área de estudio se ubica de modo tal que el valor máximo de lluvia puntual registrado quede en medio de ella, el factor de ajuste se calcula mediante la expresión

$$FRA = \frac{P'}{P} \quad (29)$$

donde

P' Precipitación media máxima en la cuenca para una determinada duración.

P Precipitación máxima puntual para la misma tormenta y duración para la que se calculo P' .

Por otra parte, los estadísticos o de área geográfica fija (fixed-área) se obtienen al utilizar registros de lluvias máximas y generar tormentas de diseño a partir de ellos. La ecuación propuesta es

$$FRA = \frac{P_2}{P_3} \quad (30)$$

donde

P_2 Precipitación máxima para una duración y área dadas

p_3 Precipitación puntual media máxima anual sobre toda el área para la misma duración para la cual se obtuvo p_2 .

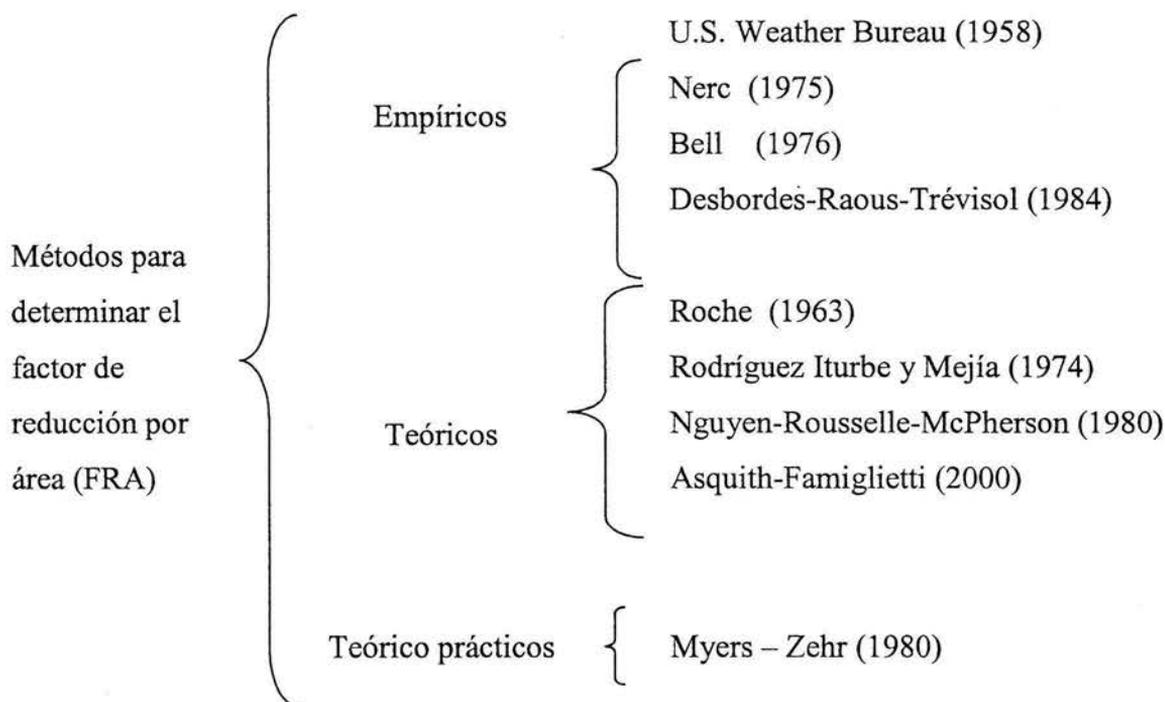
4.2 Criterios de cálculo

A partir de la década de los sesenta se han desarrollado varios criterios para calcular el factor de reducción por área utilizando datos de lluvias puntuales para un área y duración determinada.

Existen los de tipo empíricos, teóricos y teórico – prácticos. Los empíricos relacionan precipitaciones areales con puntuales, los teóricos siguen una ley de probabilidades y se establecen a partir de fundamentos teóricos y finalmente los teórico – prácticos son una combinación de los anteriores.

En la figura 4.1 se enlistan algunos métodos para determinar el Factor de Reducción por Área.

Figura 4.1 Métodos para calcular el FRA



4.2.1 Métodos empíricos

Estos métodos son muy sencillos y carecen de fundamentos teóricos. Algunos de los métodos que pertenecen a esta clasificación son: US Weather Bureau, Nerc, Bell y Desbordes.

4.2.1.1 Método del United States Weather Bureau (1958)

Al aplicar este método se siguen los siguientes pasos:

- Se calcula la precipitación máxima de la tormenta para toda el área y duración de interés utilizando polígonos de Thiessen, de estos valores se selecciona la lluvia máxima para cada año de registro.

- De los resultados de lluvia máxima por año se obtiene el valor promedio, que será el numerador de la ecuación.
- De cada estación analizada se selecciona el día en que ocurrió la precipitación máxima de todo el año P'_{ij} y se calcula la media de toda la zona para cada año registrado.
- Con el valor medio por año j , se calcula la media para toda la zona, que representa el denominador de la ecuación siguiente.

$$FRA_{US} = \frac{\sum_j \sum_i w_i P'_{ij}}{\sum_j \sum_i P_{ij}} \quad (31)$$

donde

P_{ij} Precipitación máxima anual ocurrida en la estación i el año j .

P'_{ij} Precipitación puntual en la estación i el día que ocurrió la máxima precipitación media en la cuenca el año j .

w_j Factor de Thiessen asociado a cada estación

i Número de estaciones

j Número de años

4.2.1.2 Método de UK (Nerc, 1975)

1) Se obtienen las precipitaciones de toda la región para cada año, con el fin de identificar el día en que ocurrió el valor máximo, de dichos valores se eligen las precipitaciones puntuales para cada día (P_{ij}).

2) Se eligen las lluvias máximas de cada estación para cada año (P'_{ij}).

3) Para cada año se calcula la relación P'_{ij}/P_{ij} .

4) El FRA será el promedio para todos los años y estaciones, como lo indica la ecuación siguiente:

$$FRA_{UK} = \frac{1}{ij} \sum_j \sum_i \frac{P'_{ij}}{P_{ij}} \quad (32)$$

4.2.1.3 Método de Bell (1976)

Los pasos a seguir según Bell son los siguientes:

- Obtener la precipitación máxima de la zona en estudio con los polígonos de Thiessen para cada año P' .
- Para cada estación i se elige el valor máximo correspondiente para cada año, de estos valores se calcula la media de los valores de toda el área P .
- Por cada año se calcula el FRA al dividir la precipitación máxima anual en la estación i del año j entre la precipitación media.
- El FRA de toda la cuenca es la media de los factores calculados para todos los años.

La expresión que se utiliza es la siguiente:

$$FRA_{BELL} = \frac{\sum (w_i P'_{ij})}{\sum (w_i P_{ij})} \quad (33)$$

Estos métodos son muy sencillos, y permiten conocer el FRA para la zona de interés, utilizando la información disponible de los registros de lluvia de los años y estaciones correspondientes.

4.2.1.4 Método de Desbordes-Raous-Trévisiol (1984)

De acuerdo con los autores, existen 2 maneras diferentes para calcular los factores de reducción por área (α y αd).

La primera relaciona el valor de la intensidad media en toda la cuenca con la intensidad máxima para una misma duración localizada en el centro de tormenta mediante la expresión:

$$\alpha(A, dt, iM) = \frac{iA(dt)}{iM(dt)} \quad (34)$$

donde

$iA(dt)$	Intensidad media en la cuenca
$iM(dt)$	Intensidad máxima en algún punto de la cuenca
dt	Duración

Otra forma de calcularlo es relacionado la intensidad local con la intensidad máxima a una distancia d del centro de tormenta, como se observa en la ecuación.

$$\alpha d(d, dt, iM) = \frac{i(d, dt)}{iM(dt)} \quad (35)$$

donde

$i(d, dt)$	Intensidad local
$iM(dt)$	Intensidad máxima

ambas expresiones se relacionan de la siguiente manera

$$\alpha(A, dt, iM) = \frac{1}{A} \int_A \alpha d(x, y, dt, iM) dA \quad (36)$$

4.2.2 Métodos teóricos

Estos métodos se han encontrado en la literatura con fundamentos teóricos donde la mayoría de ellos siguen una ley de probabilidad.

A este grupo pertenecen los métodos de Roche (1963), Nyguyen Rousselle (1980) y Asquith Famiglietti (2000).

4.2.2.1 Método de Roche (1963)

Este es el primer método que se reporta en la literatura con bases teóricas. Roche supone que las precipitaciones puntuales siguen una misma ley de probabilidades, considerando un proceso isótropo.

Si se tiene una superficie S , la cual tiene una serie de puntos $1, 2 \dots n$, repartidos de manera homogénea y se encuentran asociados a una altura de precipitación h_1, h_2, \dots, h_n ; donde las alturas son variables aleatorias que siguen la función de probabilidad $\rho(h_1, h_2 \dots h_n)$ se tiene:

$$\int_1 \int_2 \dots \int_n \rho(h_1, h_2, \dots, h_n) dh_1, \dots, dh_n = P \quad (37)$$

donde P es la probabilidad

La integral se debe calcular en toda la región, y la condición es la siguiente:

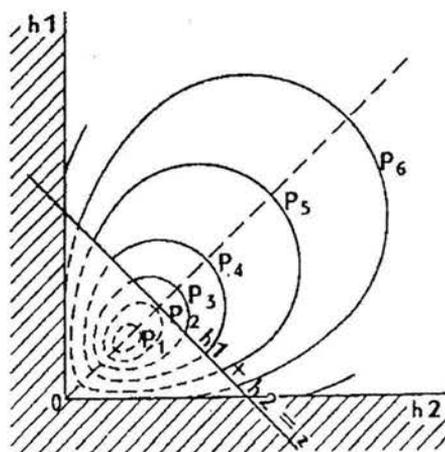
$$\frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{n} \geq h \quad (38)$$

El valor exacto de la probabilidad se obtiene cuando $n \rightarrow \infty$

Roche inició su análisis considerando dos puntos en la superficie, de donde construyó una gráfica como la que se muestra en la figura 4.2 en la que dos curvas representan las líneas

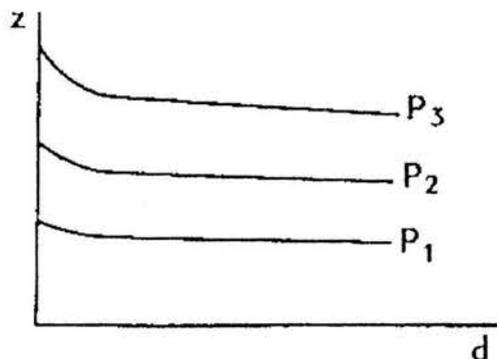
de igual densidad de probabilidad. Repitiendo este procedimiento para muchos valores y variando la distancia entre los puntos, se puede construir la curva de la figura 4.3. Este método lo aplicó para la cuenca Flakoho, ubicada en la costa occidental de África, de donde encontró que los factores de reducción son independientes del período de retorno.

Figura 4.2 Curvas de igual densidad de probabilidad.



Fuente: Guichard R. "Recopilación de métodos y obtención de factores empíricos"

Figura 4.3 Altura de lluvia promedio entre dos puntos en función de la distancia entre ellos y del nivel de probabilidad.



Fuente: Guichard R. "Recopilación de métodos y obtención de factores empíricos"

Del método propuesto se puede decir que es correcto, pero muy laborioso ya que en cada caso es necesario construir gráficas y hacer integraciones gráficas.

4.2.2.2 Método de Rodríguez Iturbe y Mejía (1974)

Los autores suponen que el proceso es estacionario es isótropo y que la función de correlación puede separarse en dos partes, una temporal y otra espacial.

El proceso puntual de lluvia es distribuido con media cero y varianza σ_p^2 , mientras que el proceso total de lluvia tiene media cero y varianza $A^2 \sigma_p^2 \bar{r}(\bar{x}_1 - \bar{x}_2 | A)$. Para un periodo de retorno, la lluvia puntual puede transformarse en lluvia total, al multiplicarlo por la desviación estándar.

El factor de corrección de área fija depende únicamente de las características del área en cuestión.

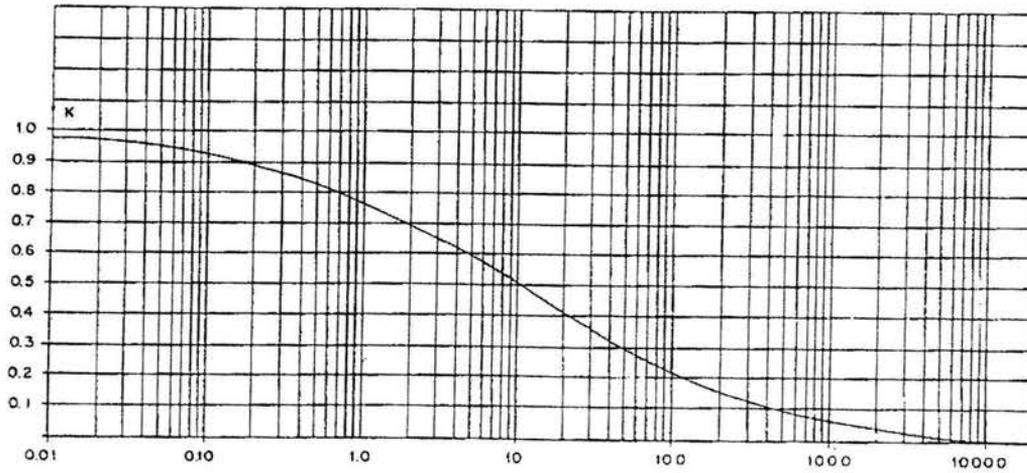
$$K = A^2 (\bar{r}(\bar{x}_1 - \bar{x}_2 | A))^{1/2} \quad (39)$$

donde

K Factor que relaciona alturas de lluvia para el área de interés

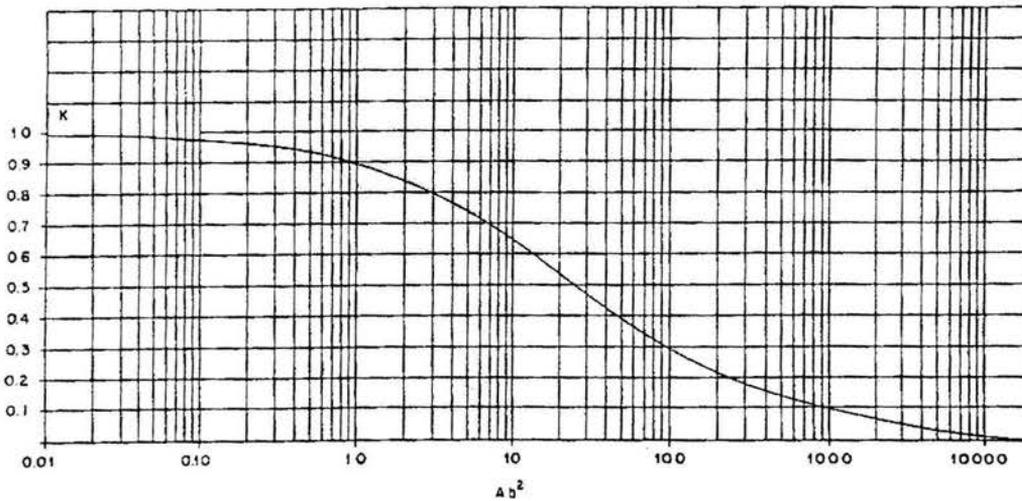
En toda el área, existen 2 tipos de correlación, una exponencial decreciente y tipo Bessel. En las figuras 4.4 y 4.5 se muestra la variación del factor de corrección K para estas funciones, de donde se encontró que para el factor K no importa la forma geométrica del área de interés, excepto cuando se tienen formas muy alargadas.

Figura 4.4 Reducción espacial de la intensidad de lluvia puntual para correlación exponencial



Fuente: Guichard R. "Recopilación de métodos y obtención de factores empíricos"^{Ah²}

Figura 4.5 Reducción espacial de la intensidad de lluvia puntual para correlación tipo Bessel



Fuente: Guichard R. "Recopilación de métodos y obtención de factores empíricos"

4.2.2.3 Método de Nguyen – Rousselle – McPherson (1980)

Los argumentos hipotéticos del método son las siguientes:

- La lluvia es un proceso estocástico, intermitente y positivo
- La distribución de frecuencias de las lluvias puntuales y areales es de tipo exponencial.

Teóricamente los autores consideran que las lluvias en toda la región son variables aleatorias, entonces pueden tomar cualquier valor, incluyendo el cero, por lo tanto, hay una probabilidad finita para la que la altura de lluvia X sea cero, y para valores mayores que cero se puede usar la función de probabilidad $\phi(x)$.

Entonces la probabilidad de que la precipitación sea mayor a cero, se puede expresar por medio de la siguiente ecuación.

$$F(x) = P\{X \leq x\} = F_0 + (1 - F_0)\phi(x) \quad (40)$$

donde

$$F_0 = P\{X = 0\} \text{ y } \phi(x) = P\{X \leq x | X > 0\}$$

Ahora bien, suponiendo que las lluvias siguen una distribución exponencial, la función de probabilidad de excedencia $F_1(x)$ es:

$$F_1(x) = (1 - F_0)e^{-\lambda x} \quad \text{Para } x \geq 0 \quad (41)$$

Por otro lado, el área de influencia de cada estación se determina mediante los polígonos de Thiessen para las lluvias areales, considerando las lluvias aleatorias, independientes y exponencialmente distribuidas, de este proceso se determina la ecuación de excedencia en función de las lluvias media areales.

$$G_1(x) = 1 - G(x) = (1 - G_0)[1 - F_n(x)] \quad (42)$$

donde

- G_0 Probabilidad de que la lluvia areal sea cero, y se puede estimar de los datos históricos de lluvias.
- G_t Probabilidad de excedencia de que las lluvias medias de toda el área sean mayores que x .

El factor de corrección de toda el área se puede determinar para un mismo valor de la probabilidad de excedencia de las lluvias puntuales y areales.

4.2.2.4 Método de Asquith – Famiglietti (2000)

También llamado método de máximo anual centrado (anual máxima- centered), considera solamente la distribución de precipitaciones simultáneas alrededor de la lluvia máxima anual.

Esta metodología es para lugares en donde existe gran cantidad de información de estaciones pluviométricas, por lo que no se requiere inferencia estadística.

Se considera que la lluvia es homogénea en toda la región, y que el volumen potencial de la tormenta de diseño ocurre cuando el centro de tormenta coincide con el centroide de la cuenca.

Los pasos que se siguen para utilizarlo son los siguientes:

1. Con los valores máximos de la base de datos, se determinan las relaciones entre el máximo y el simultáneo que corresponda a las estaciones que se encuentran alrededor de dicho valor. Adicionalmente, se considera en cada relación de datos la distancia entre las estaciones correspondientes.

2. Se eligen las relaciones que cumplan con un período de retorno específico, en donde se busca encontrar una relación preliminar entre los cocientes seleccionados y sus respectivas distancias.
3. Se definen un conjunto de funciones de ajuste entre los cocientes y las distancias seleccionadas en el punto 2. Cuando la distancia es cero, las curvas que se obtienen deben de tener como valor uno.
4. Se calculan los factores de reducción por área para la zona de interés y el criterio de diseño seleccionado integrando espacialmente la función estimada del punto anterior, para ello se proponen áreas de forma circular.

4.2.3 Métodos teórico – prácticos

4.2.3.1 Myres – Zehr (1980)

El método propuesto por estos autores consiste en trabajar primero con cada estación por separado, después con dos, y cinco estaciones.

- a) Para los pares de estaciones. En un plano distancia se representan los primeros y segundos momentos de todas las series de datos anuales, ajustándolas a una ecuación de tipo exponencial.
- b) Se determinan las ecuaciones de ajuste para cinco estadísticos diferentes: primero y segundo momentos para los máximos anuales, del promedio de dos estaciones; primero y segundo momentos de la lluvia que se presentó en la segunda estación de manera simultánea al máximo de la primera; la covarianza entre los máximos de la estación cuando se presentó lluvia simultánea.

- c) Los estadísticos se utilizan en distintas combinaciones para estimar los límites inferior y superior del primer y segundo momentos de las precipitaciones máximas de toda la región.

- d) Por último se obtienen las relaciones precipitación – área mediante el procedimiento del primer y segundo momento de la zona, a través de la ecuación de frecuencia generalizada de Chow.

Los estadísticos se utilizan, obteniendo el cociente entre el valor para un área o distancia determinada y su correspondiente para área o distancia cero.

Este método se aplicó en Estados Unidos en áreas circulares donde las muestras contaban con un valor medio de 20 años.

5. APLICACIONES

Este capítulo recapitula los temas anteriores dando paso al punto esencial del trabajo el cálculo del Factor de Reducción por Área aplicado al estado de Sinaloa, también se incluye un ejemplo de aplicación del FRA asociado a una cuenca de la zona.

5.1 Recopilación de información

Antes de indicar la forma en la que se recopiló la información se mencionan brevemente los programas de cómputo auxiliares para el análisis de los registros de lluvias. Éstos son el AX, Arc View Gis 3.2 y Curve Expert.

El AX es un programa que permite hacer el ajuste de algunas funciones de distribución de probabilidad a muestras de datos calculando el error cuadrático de cada una de ellas respecto de la muestra. Para hacer el ajuste el programa contiene las funciones Normal, Lognormal, Gumbel, Exponencial, Gamma y Doble Gumbel.

En el programa se puede usar cada uno de los ajustes por separado o bien seleccionar la opción de cálculo global, si se elige el cálculo de los ajustes por separado se pueden extrapolar valores para el periodo de retorno deseado. Este paquete de computo se elaboró en el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

El programa Arc View Gis 3.2 es un paquete que entre otras cosas permite calcular los polígonos de Thiessen de una cuenca. Para la aplicación de este paquete se necesita conocer las coordenadas geográficas (latitud y longitud) y estaciones pluviométricas de la zona a estudiar.

Curve Expert 1.3 es un programa sencillo el cual permite modelar ecuaciones utilizando modelos de regresión lineal, no lineal e interpolación. Las curvas se dividen en dos

tipos, el primero contiene las curvas de regresión las cuales se dividen en lineales y no lineales. El segundo grupo interpola los valores de tal forma que la curva pasa exactamente a través de los puntos proporcionados.

Las familias de grupos que contiene pueden ser de tipo: lineal, exponencial, potencia, densidad, interpolación, etc. Este paquete de programación proporciona el mejor ajuste a los datos incorporados, aunque también permite que este se realice manualmente.

Los registros de lluvia para el estado de Sinaloa se determinaron a partir de la base de datos Clicom que opera el Servicio Meteorológico Nacional en el Extracto rápido de información Climatológica (Eric).

La información que se utilizó fue de lluvia con duración de 24 horas en 180 estaciones pluviométricas; de éstas solamente 35 contaban con registros de 20 años ó más. El formato de los registros obtenidos se muestra en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Formato de precipitaciones diarias en 24 horas.

Clave	25025	lat=	26.52	long=	108.6	Año	1974					
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	0	0	0	0	0	0	0.6	0.2	1.1	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	27.1	0	0	0
4	6.5	0	0	0	0	0	0.5	0	0.2	0	0	0
5	28.1	0	0	0	0	0	2.4	0	0	0	3.5	0
6	0	0	0	0	0	0	13.1	1.2	0	0	13	0
7	0	0	0	0	0	0	18.2	0	0	0	28.5	0
8	0	0	0	0	0	0	0.3	66.5	0	0	85.5	0
9	0	0	0	0	0	0	21.5	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	12.1	0	33.7	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	8.3	5.5	0	0	0
12	0	0	0	0	0	18.1	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	2.5	0	2	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0.6	0	0	0	0	0
17	E0	0	0	0	0	0	58.5	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0.4	28.2	0	0	0	0.6
19	0	0	0.5	0	0	0	17	5	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	6	0	24.7	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0.6	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	7.1	0	0.8	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	7	3	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0.6	19.1	0	0	0	23.2
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.6
26	0	0	0	0	0	0	0	1.1	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6
29	0	NO D	0	0	0	0	1.5	20.1	5	0.6	0	0
30	0	NO D	0	0	0	0	0.1	17	3.9	0	0	0
31	0	NO D	0	NO D	0	NO D	9	0	NO D	0	NO D	0

5.2 Cálculo del FRA para el estado de Sinaloa.

El Factor de reducción por área (FRA) se calcula al dividir la precipitación media máxima anual asociada a un periodo de retorno entre la media de los máximos puntuales asociados al mismo periodo de retorno, como se muestran en la expresión:

$$FRA(A, T_r) = \bar{P}(A, T_r) / \hat{P}(A, T_r) \quad (43)$$

donde

$\bar{P}(A, T_r)$ Lluvia media máxima anual asociada a un área y periodo de retorno

$\hat{P}(A, T_r)$ Media areal de la lluvia máxima calculada para cada estación asociada a un área y periodo de retorno

A continuación se describe el procedimiento utilizado para calcular el FRA en el estado de Sinaloa, en donde los primeros seis puntos determinan el numerador de la ecuación y los siguientes dos el denominador.

1. Consultar las estaciones con registros de lluvia simultáneos.
2. De la consulta realizada se eligieron las estaciones pluviométricas con años simultáneos, descartando las que presentaron mayor dispersión de datos. En este caso se seleccionaron 21 estaciones con 15 años simultáneos en total (1965 a 1982).

La figura 5.1 y la tabla 5.2 contienen las estaciones y años considerados, en la tabla 5.3 se incluyen el nombre, clave, coordenadas geográficas y elevación de ellas.

Figura 5.1 Localización de las estaciones a lo largo del estado.

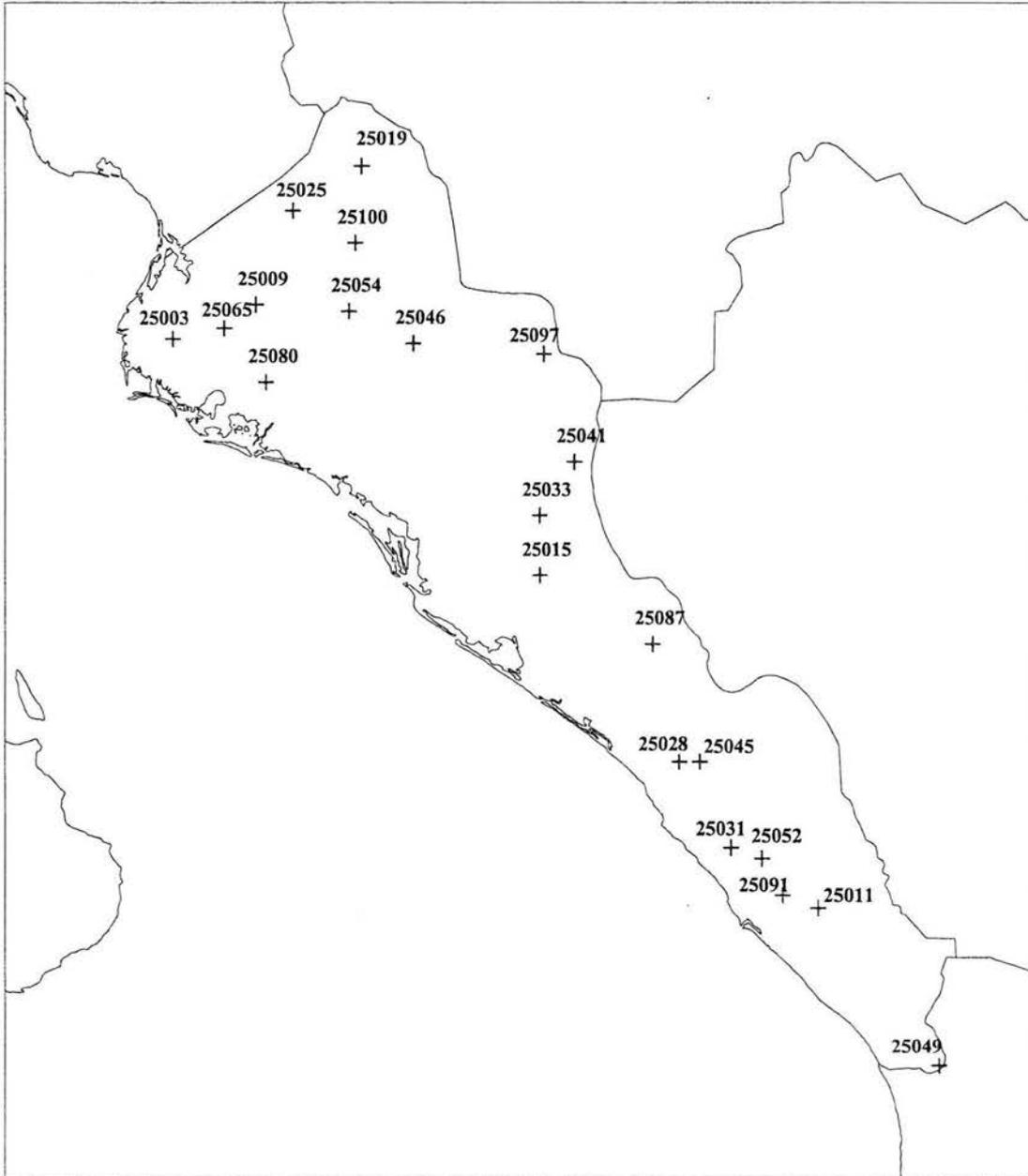


Tabla 5.2 Estaciones y años considerados en este estudio

No.	Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	SUMA
		1965	1966	1967	1968	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1978	1979	1980	1981	1982	
1	25003	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	14
2	25009	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15
3	25011	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14
4	25015	1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13
5	25019	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14
6	25025	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15
7	25028	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15
8	25031	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	14
9	25033	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14
10	25041	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	14
11	25045	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15
12	25046	1	1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13
13	25049	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	13
14	25052	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1		1	1	13
15	25054	1	1	1	1	1	1	1	1	1			1		1	1	12
16	25065				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12
17	25080		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14
18	25087	1	1	1		1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	13
19	25091	1	1	1	1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	13
20	25097		1	1	1	1		1	1	1	1	1	1		1	1	12
21	25100	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1			1	12
	SUMA	18	18	18	16	21	20	21	20	21	16	18	21	16	19	21	

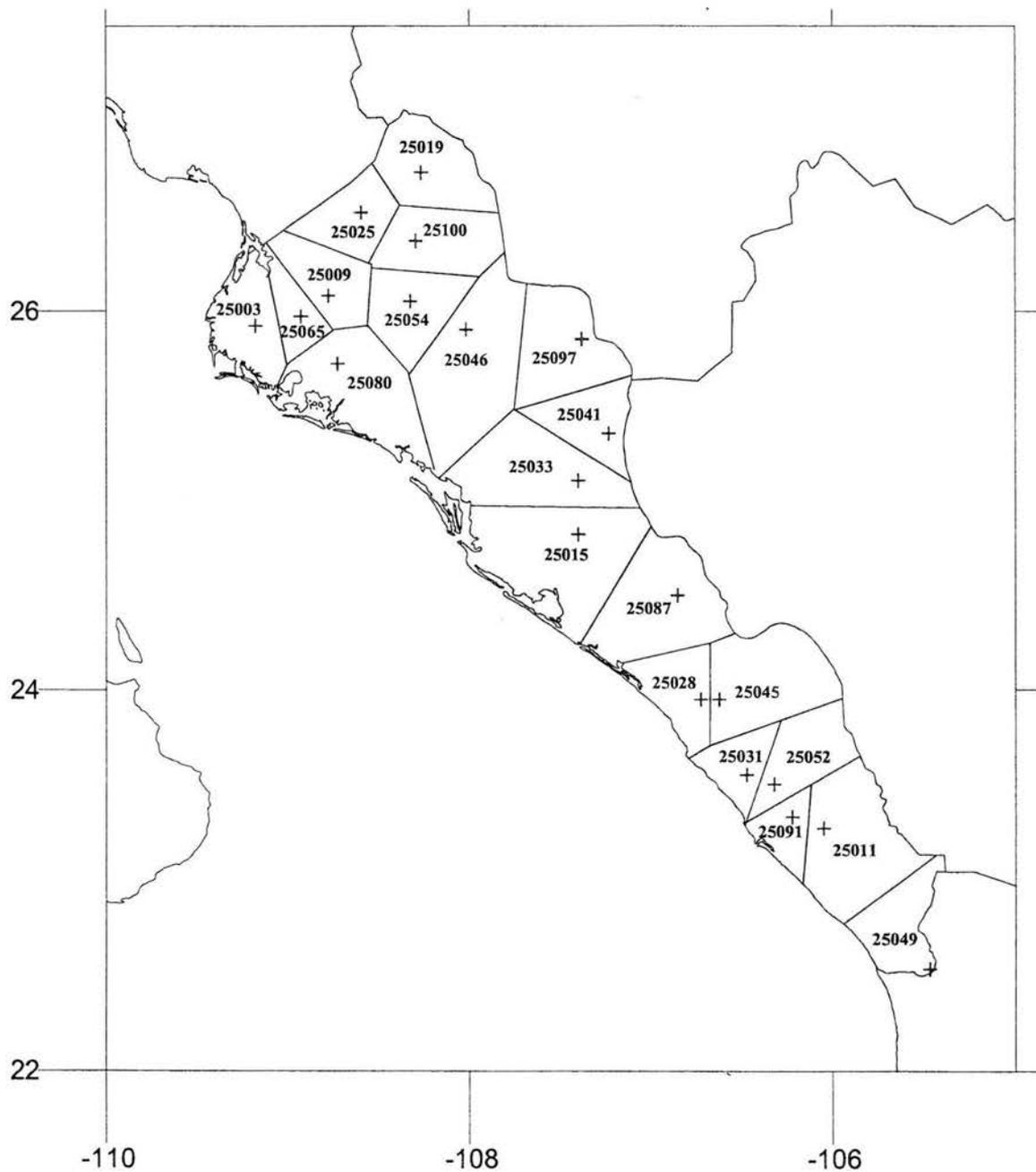
Tabla 5.3 Nombre, clave y coordenadas de las estaciones en estudio

Clave	NOMBRE	Latitud		Longitud		Elevación
		grados	min.	grados	min.	m
25003	Ahome, Ahome	25	55	109	11	80
25009	Boca-Toma Sufragio (DGE)	26	5	108	47	152
25011	Concordia, Concordia	23	16	106	3	178
25015	Culiacán, Culiacán	24	49	107	24	40
25019	Choix, Choix (DGE)	26	44	108	16	225
25025	El Mahome, El Fuerte	26	31	108	36	12
25028	Elota, Elota (CFE)	23	57	106	43	35
25031	El Quelite, Mazatlán	23	33	106	28	60
25033	El Varejonal, Badiraguato	25	6	107	24	122
25041	Guatenipa, Badiraguato	25	21	107	14	290
25045	Ixpalino San Ignacio	23	57	106	37	300
25046	Jaina, Sinaloa (DGE)	25	54	108	1	200
25049	La Concha, Escuinapa	22	32	105	28	20
25052	La Noria, Mazatlán (CFE)	23	30	106	19	89
25054	La Vainilla, Sinaloa	26	3	108	20	185
25065	Mochicahui, el Fuerte	25	58	108	56	22
25080	Ruiz Cortines, Guasave	25	43	108	44	35
25087	Sta. Cruz de Alaya, Cosal	24	30	106	51	2050
25091	Siqueros, Mazatlán(CFE)	23	20	106	13	55
25097	Tecusiapa, (CFE)	25	51	107	23	640
25100	Yecorato, Choix	26	22	108	18	407

3. Tomando el estado de Sinaloa como parteaguas se trazaron los polígonos de Thiessen por año para las 21 estaciones. De la tabla 5.2 se observa que en 10 de los años seleccionados no existieron registros en algunas estaciones por lo que en cada caso se determinaron los porcentajes de los polígonos correspondientes a cada año.

A manera de ejemplo en la figura 5.2 se muestran los polígonos A_i calculados para el año de 1970 el cual involucra a todas las estaciones.

Figura 5.2 Polígonos de Thiessen para 1970



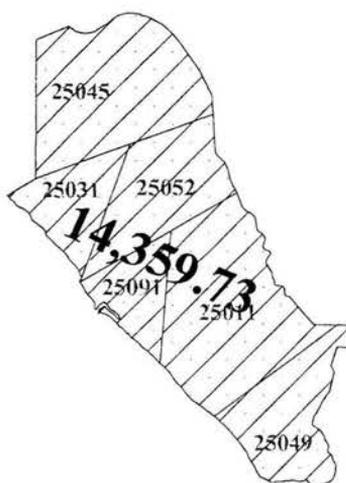
4. Se dividió el estado en pequeñas subcuencas de áreas A_i asociando como mínimo tres estaciones cercanas entre si hasta unir por completo el estado. Las figuras 5.3, 5.4 y 5.5 muestran algunas de las subcuencas calculadas.

Figura 5.3 Subcuencas calculadas para un área de 6,049.13 km².



Estación	Área	%
5019	2,266.56	37.47
25025	1,756.61	29.04
25100	2,025.96	33.49
Área Total	6,049.13 Km²	100.00

Figura 5.4 Subcuencas calculadas para un área de 14,359.73 km².



Estación	Área	%
25011	4,060.67	28.28
25031	1,353.96	9.43
25045	3,562.59	24.81
25049	1,982.51	13.81
25052	2,340.80	16.30
25091	1,059.25	7.38
Área Total	14,359.78 Km²	100.00

Figura 5.5 Subcuencas calculadas para un área de 26,412.10 km².

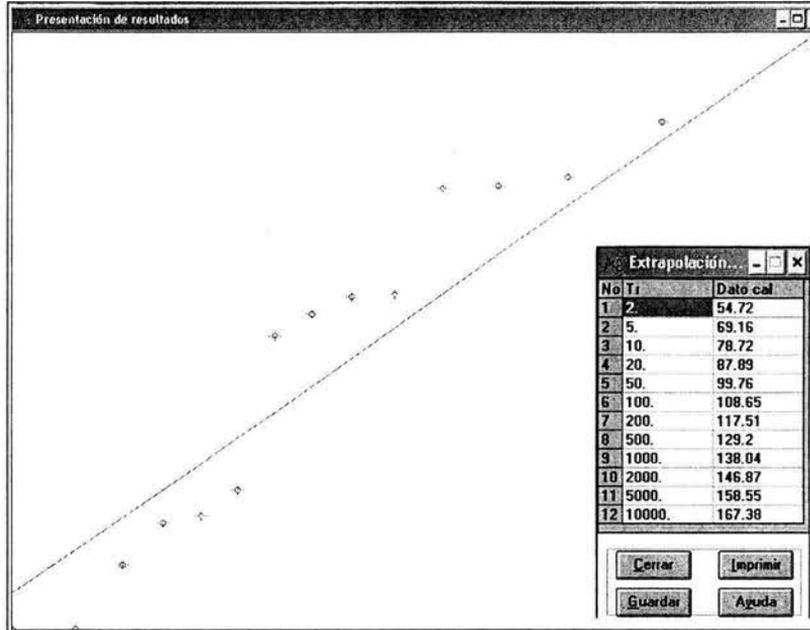


Estación	Área	%
25015	5,313.48	20.12
25028	1,998.10	7.57
25033	4,098.70	15.52
25041	1,827.40	6.92
25046	5,630.42	21.32
25087	4,164.11	15.77
25097	3,379.88	12.80
Área Total	26,412.10 Km²	100.00

5. Para cada año y área seleccionada se obtuvo la lluvia media diaria, este paso se determinó multiplicando la lluvia de cada día del año para cada una de las estaciones por su correspondiente porcentaje de Thiessen. Por lo que para cada día del año se calculó la suma del porcentaje de Thiessen por la lluvia diaria, todo esto entre cien y por el número de estaciones, el resultado representa la lluvia media diaria de cada día del año asociado a un área.

6. Del inciso anterior se obtiene el máximo anual, así como el día y mes en que se presentó. Los datos de lluvia máxima por año se ajustaron a una función de distribución mediante el programa AX. El mejor ajuste para cada grupo de valores analizados fue utilizando la función tipo Gumbel. En las figuras 5.6 y 5.7 se muestran algunos de los valores calculados. En resumen en este punto se obtiene la lluvia media en un área asociada a un periodo de retorno para cada estación que representa el numerador de la ecuación 43.

Figura 5.6 Ajuste con el programa AX a una función de distribución Gumbel para un área de 6,049 km².



i	Tr	Dato	Calculado	Error ²
1	10	83.54	84.96	2.02
2	8	77.29	75.7	2.54
3	5.33	72.54	70.07	6.08
4	4	71.74	65.92	33.87
5	3.2	71.52	62.55	80.39
6	2.67	62.5	59.67	8.03
7	2.29	62.29	57.09	27.04
8	2	60.86	54.72	37.73
9	1.78	59.04	52.47	43.12
10	1.6	45.85	50.3	19.76
11	1.45	43.62	48.12	20.29
12	1.33	43.03	45.89	8.17
13	1.23	39.44	43.49	16.37
14	1.14	33.93	40.72	46.14
15	1.07	33.82	37.06	10.48

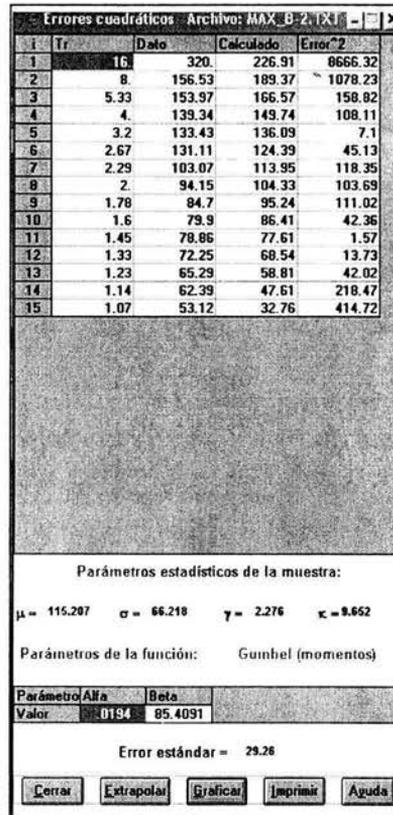
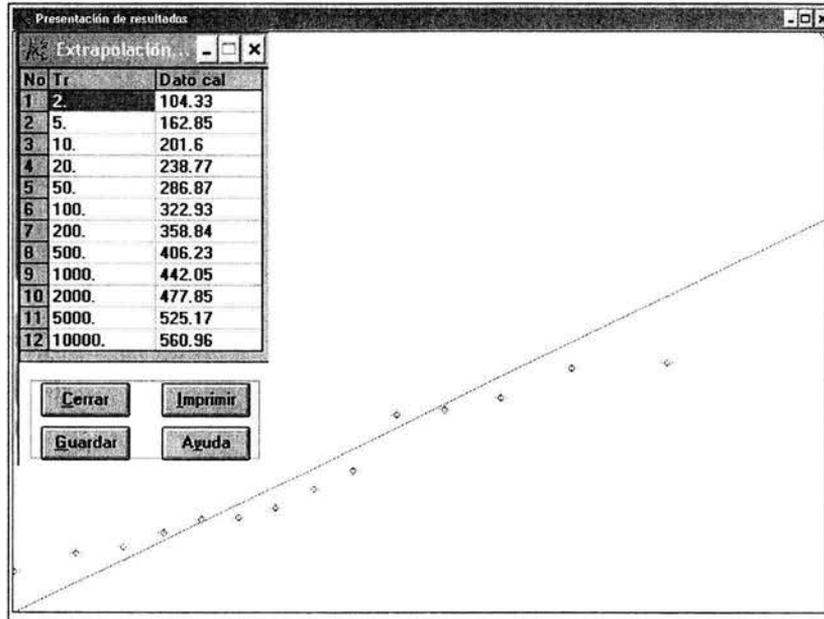
Parámetros estadísticos de la muestra:
 $\mu = 57.401$ $\sigma = 16.338$ $\gamma = -.87$ $\kappa = 2.274$

Parámetros de la función: Gumbel (momentos)

Parámetro	Alfa	Beta
Valor	0.785	50.0487

Error estándar = 6.277

Figura 5.7 Ajuste con el programa AX a una función de distribución Gumbel para un área de 7,102.43 km².



7. Para el denominador se eligió la lluvia máxima por estación (Tabla 5.4). Estos valores se introducen al programa Ax donde se obtiene para cada estación una lluvia asociada a un periodo de retorno, los datos se ajustaron a funciones Gumbel y Doble Gumbel (Tabla 5.5).
8. Con las subcuencas previamente definidas se multiplicó el porcentaje de los polígonos de Thiessen de las estaciones involucradas por la lluvia asociada a los periodos de retorno calculados en el paso anterior; de éste paso se obtuvo para cada área la lluvia máxima asociada a un periodo de retorno; estos resultados se muestran en la tabla 5.6.
9. Finalmente se determinó un valor de lluvias medias máximas anuales (numerador) y uno de lluvias medias por estación (denominador) asociados a un área y periodo de retorno. El Factor de Reducción por Área (FRA) se obtuvo al dividir dichos valores (los cálculos realizados para determinar el FRA se encuentran en el Anexo 2).

Al aplicar el procedimiento a varias áreas comprendidas en la misma región se pueden construir gráficas y tablas para cada periodo de retorno analizado. En algunos casos las diferencias no son significativas pero cuando el área disminuye este factor tiende a aumentar, cabe mencionar que también influyen las características de la región estudiada.

Los factores de reducción por área calculados se muestran en la tabla 5.7.

Tabla 5.4 Precipitaciones máximas anuales para cada estación en mm

25003	25009	25011	25015	25019	25025	25028	25031	25033	25041	25045
32.5	35.5	59	47	34.9	42.5	47.5	48	61.5	47.5	43
34	36.2	74	48.5	38.4	47.5	52	54.5	64	55.5	45.5
40	38.9	83	48.7	42.4	47.5	54	54.5	67	60	50.2
44.5	39	94	49.5	44.9	50	58	55	68	60	53.5
53	40	94	56.2	45.9	51.2	64.5	75	75.8	61.5	58
54.5	42.5	96	58.7	46.7	58.5	68.5	76.4	77.5	64	58.5
55	43.2	113	60	49.2	63.5	75	78	79	64.5	60
56.5	44.4	115	60	54	64.8	80	78.5	80	66.5	61.7
58	45	129	63.5	54	70	88	84	86	71.5	62
64	47.7	132	66	60.5	73.6	93	85	91	72.4	63.7
73	49.5	133	68	62.5	73.9	96.5	86.5	93.6	73.1	66.5
74	50.5	176	68.4	64.4	74.8	98.5	89.1	94	74.5	70
75.4	52.7	223	70.8	64.5	76.8	101	93	94	74.5	71
76	54	240	70.8	64.6	77.8	107	105	96	82	72.1
78	56.7		75	65	79	113	119	98	83.5	75.6
80.5	56.7		83.5	66.5	82.1	116.8	137	99	86	77.3
92	65.5		85	69.5	82.8	124	143	100.1	89.1	78
100.3	66.5		86	72.5	85.5	129.5	151	102	89.5	78.5
125.8	74.5		88	74.5	89.3	140	160	111	92.5	80.5
143	78		88.5	76.4	106	188	168	115.5	93.3	81.6
148	80.5		93	76.8	112.1	223	236	115.5	97	84.3
	84.5		103.5	76.9		228.5		124.5	98.8	90
	87.3		109.6	85.5				125.5	100.6	100
	90.3		112.5	91.3				130	100.6	102.1
	94.5		114.5	112.5				130.8	106	108
	100		120	113.3				134	108.5	115.9
	102		120	114.5				136	116.8	129.3
	105		140	150.8				403	129.8	131.3
			173.3						136	147.6
			175.1						174	181
										237.5
										243

Tabla 5.4 (continuación)

25046	25049	25052	25054	25065	25080	25087	25091	25097	25100
40.5	72.3	46	56.5	24.5	25.5	36	59	39.5	53
45.5	75.5	80	57.5	25.5	41	47.5	61	46.5	58
46	76.4	80	66.8	27.2	43	47.7	64	56.4	58.5
57	79.3	80	81	36.5	45	52.7	70	56.4	60
60.2	82.6	90	87	38	56	54.4	74	56.4	69.5
61	84	100	91.6	38.5	57	54.4	75	56.5	70
62.5	85.5	102.1	94	38.5	59.2	59.7	76	61	78
64	87.5	140	100.9	44.2	67	63	81	65.5	80
65.8	88.5	140	101.5	44.2	68.5	65	91	66	89.5
66.1	95	148.5	117.5	45.2	86.4	66.8	93	67.5	94
67.5	100	160	120	48.5	90	68.5	96	68	106
69.5	107	214	141	48.5	97.5	69	103	69.1	134.6
75.8	107	300		49.7	163.5	69.1	105	69.5	
76.9	108.9			53	231.5	71.5	107	70.5	
78.4	111.5			55.4		75.1	112	71.4	
78.9	111.8			63.5		75.6	113	77.5	
84.5	116			63.5		75.8	116	78.5	
87.3	119.5			63.5		90	125	100.1	
90.5	119.6			70.5		90.5	126	107	
91	120.5			118.5		96.8	156	131	
93.4	124					96.8	190		
97.3	127.5					96.8	320		
100.5	128					100.3			
108	130					115			
117.5	143.3					117.5			
119.3	144					122.5			
122	146.3					122.8			
123	185.3					136.5			
138						165			
141.8						174.5			
141.8						196.5			
144									

Tabla 5.5 Periodos de retorno por estación

Clave	Periodo de retorno (Tr)						
	2	5	10	50	100	1000	10000
25003	64.32	100.15	135.18	165.43	176.64	212.73	247.74
25009	57.98	90.33	98.58	111.82	118.78	150.49	185.93
25011	104.68	163.02	215.01	293.03	322.88	419.25	515.96
25015	76.47	105.56	206.35	222.07	227.80	246.18	264.30
25019	63.07	90.67	115.59	156.56	172.24	222.93	272.85
25025	68.63	89.41	102.04	126.97	137.09	170.17	203.23
25028	90.47	142.62	201.54	264.45	287.77	362.68	436.36
25031	88.26	142.32	159.42	180.36	189.85	232.03	285.34
25033	93.55	127.75	132.07	144.36	155.35	193.22	230.61
25041	81.22	108.16	130.82	178.72	198.02	260.88	323.93
25045	77.17	115.48	175.00	288.18	330.16	464.75	599.10
25046	81.21	124.26	136.63	155.51	164.55	204.11	249.77
25049	105.58	129.61	145.52	180.53	195.33	244.24	293.06
25052	116.54	172.33	209.27	290.57	324.94	438.51	551.88
25054	83.74	106.66	121.84	155.25	169.37	216.04	262.62
25065	45.05	61.63	80.66	157.62	189.56	292.05	395.06
25080	66.83	103.59	168.04	340.97	406.67	617.98	829.28
25087	78.77	121.03	154.83	208.44	229.00	295.57	362.26
25091	91.62	123.73	153.18	224.47	253.72	348.75	442.11
25097	64.73	84.07	109.17	153.68	170.34	223.87	276.92
25100	76.65	99.22	118.31	162.31	180.60	240.45	300.15

Tabla 5.6 Periodo de retorno por área

PERIODO DE RETORNO (TR)							
A (km ²)	2	5	10	50	100	1000	10000
6,049.13	54.72	69.16	78.72	99.76	108.65	138.04	167.38
7,102.43	68.09	97.09	116.29	158.55	176.41	235.44	294.36
7,257.35	85.76	116.78	137.31	182.50	201.60	264.73	327.74
11,271.00	50.65	75.96	92.71	129.58	145.17	196.68	248.09
11,475.69	68.09	97.09	116.29	158.55	176.41	235.44	294.36
14,359.78	82.64	125.49	153.86	216.29	242.69	329.91	416.97
17,320.12	45.02	65.43	78.95	108.69	121.26	162.81	204.29
20,522.00	75.51	109.93	132.72	182.88	204.08	274.15	344.10
25,835.00	69.26	97.55	116.28	157.49	174.92	232.50	289.98
26,412.10	59.66	77.90	89.98	116.55	127.79	164.92	201.98
32,257.00	44.24	71.21	89.07	128.37	144.99	199.89	254.69
37,570.00	46.04	66.76	80.48	110.67	123.44	165.62	207.73
58,092.00	47.79	65.00	76.39	101.47	112.06	147.09	182.05

Tabla 5.7 Factores de reducción por área calculados

Área (km ²)	Periodo de retorno, en años							Promedio
	2	5	10	50	100	1000	10000	
6049.13	0.79	0.74	0.70	0.67	0.66	0.65	0.64	0.69
7102.43	0.66	0.66	0.62	0.63	0.64	0.65	0.66	0.65
7257.35	0.93	0.84	0.75	0.68	0.67	0.64	0.62	0.73
11271.00	0.77	0.78	0.70	0.61	0.59	0.57	0.55	0.65
11475.69	0.85	0.83	0.62	0.71	0.74	0.83	0.89	0.78
14359.78	0.85	0.88	0.83	0.83	0.84	0.85	0.86	0.85
17320.12	0.67	0.68	0.63	0.57	0.56	0.54	0.53	0.60
20522.00	0.81	0.79	0.74	0.73	0.74	0.75	0.76	0.76
25835.00	0.77	0.74	0.63	0.64	0.65	0.68	0.70	0.69
26412.10	0.74	0.67	0.58	0.63	0.64	0.68	0.7	0.66
32257.00	0.60	0.68	0.70	0.74	0.75	0.77	0.78	0.72
37570.00	0.62	0.63	0.57	0.58	0.59	0.6	0.61	0.60
58092.00	0.59	0.56	0.50	0.49	0.49	0.50	0.50	0.52

En las figuras 5.8 y 5.9 se muestran las graficas para los diferentes periodos de retorno calculadas de acuerdo a las ecuaciones de ajuste que son función del área en estudio; por otro lado la tabla 5.8 contiene un resumen de las expresiones para los periodos de retorno utilizados en áreas pequeñas y grandes.

Figura 5.8 Factores de reducción por área para Tr de 2,5,10 y 50 años

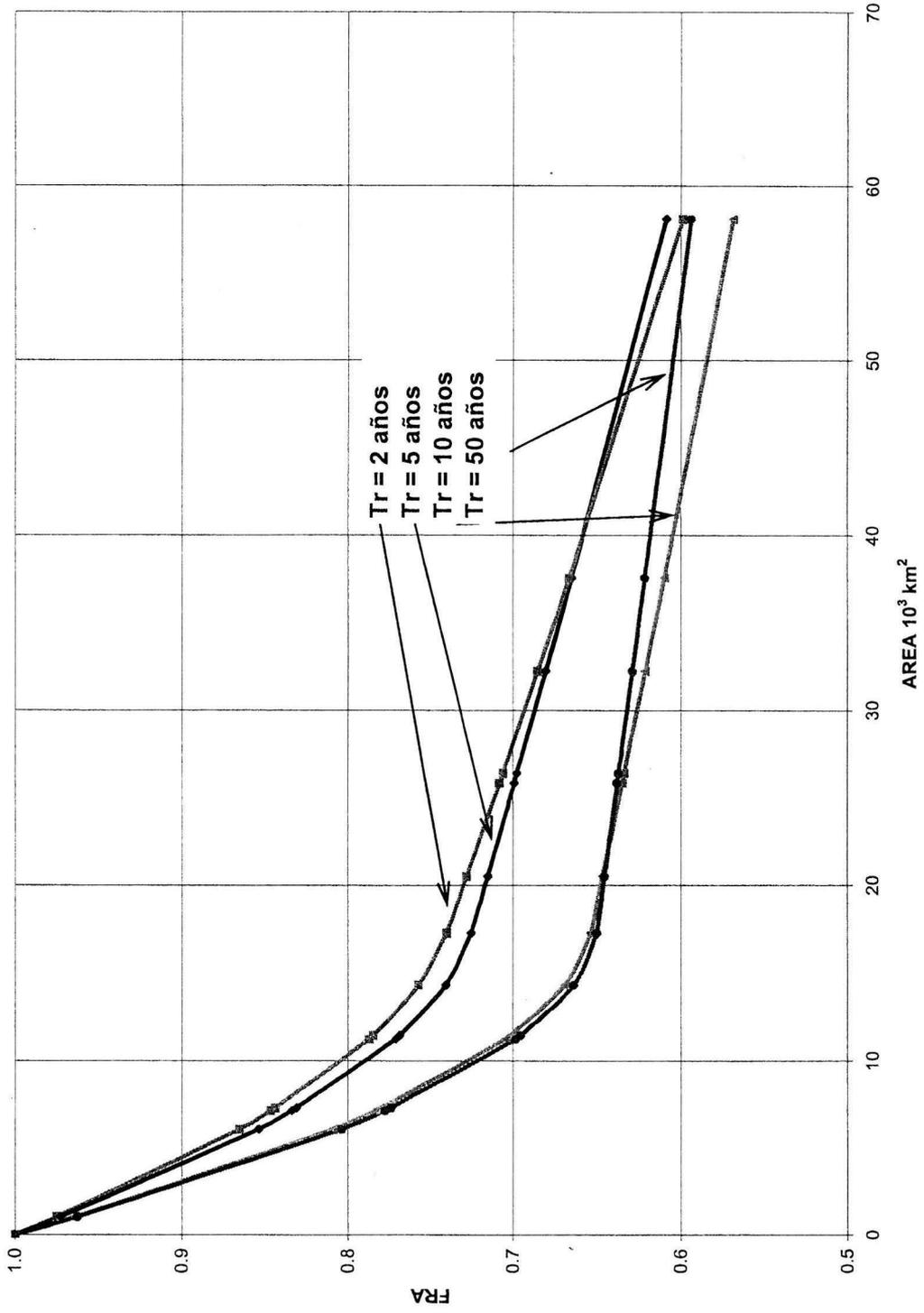


Figura 5.9 Factores de reducción por área para T_r de 100, 1000 y 10000 años

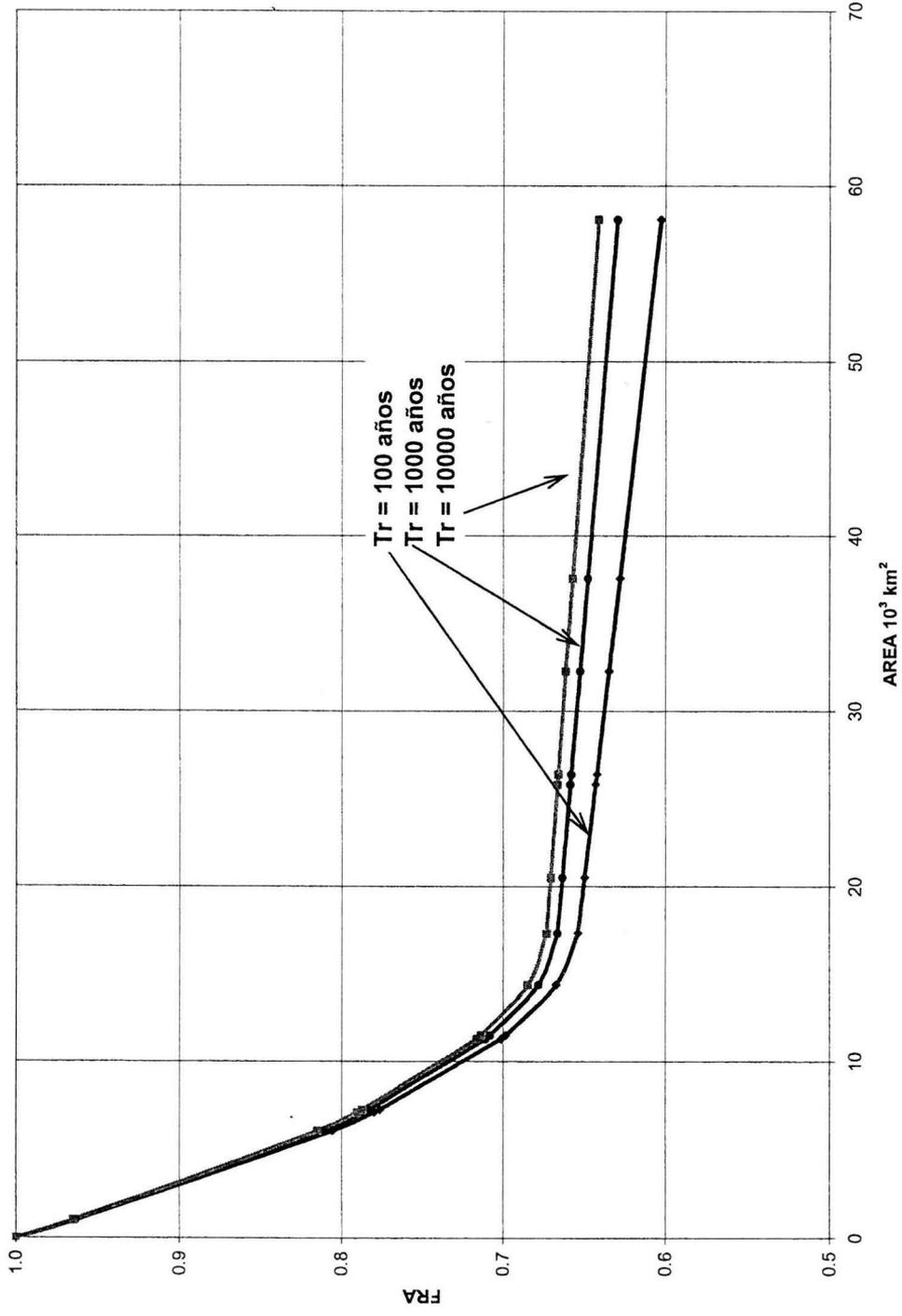


Tabla 5.8 Ecuaciones de Ajuste para cada curva

Ecuaciones		
	A ≤ 17.32	A > 17.32
Tr = 2 años	$F = 0.00064A^2 - 0.02618A + 1$	$F = 0.8097e^{-0.0052A}$
Tr = 5 años	$F = 0.00074A^2 - 0.02864A + 1$	$F = 0.7810e^{-0.0043A}$
Tr = 10 años	$F = 0.00103A^2 - 0.03785A + 1$	$F = 0.6926e^{-0.0034A}$
Tr = 50 años	$F = 0.00109A^2 - 0.03906A + 1$	$F = 0.6746e^{-0.0022A}$
Tr = 100 años	$F = 0.00108A^2 - 0.03869A + 1$	$F = 0.6767e^{-0.0020A}$
Tr = 1000 años	$F = 0.00106A^2 - 0.03762A + 1$	$F = 0.6825e^{-0.0014A}$
Tr = 10000 años	$F = 0.00104A^2 - 0.03694A + 1$	$F = 0.6872e^{-0.0012A}$

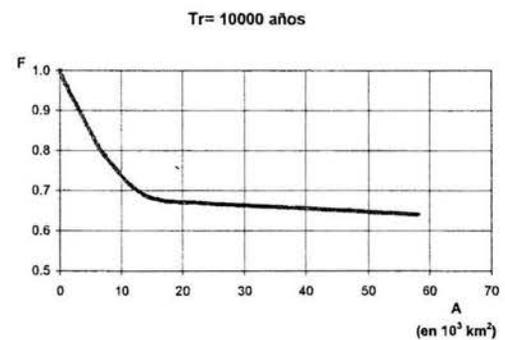
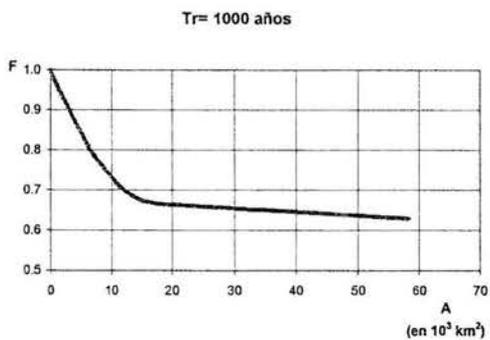
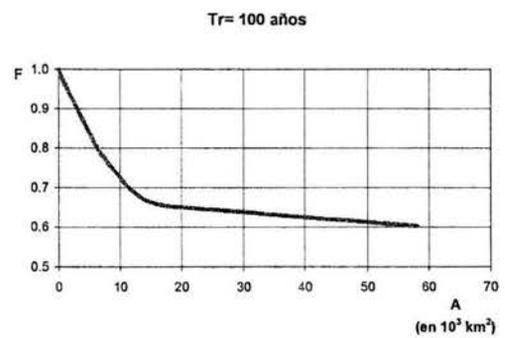
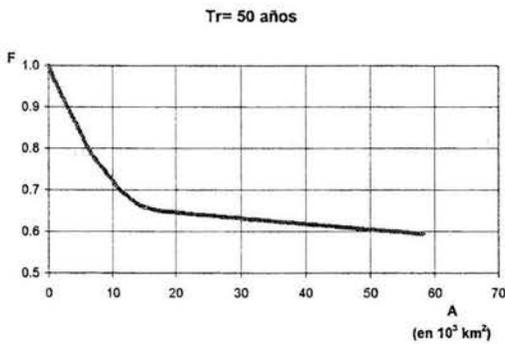
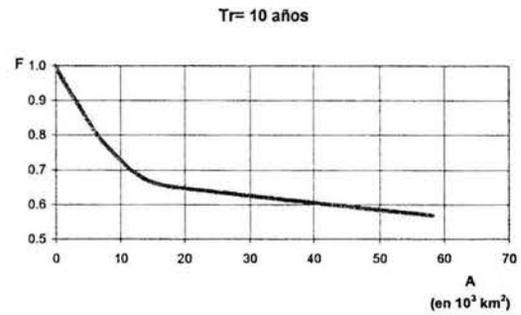
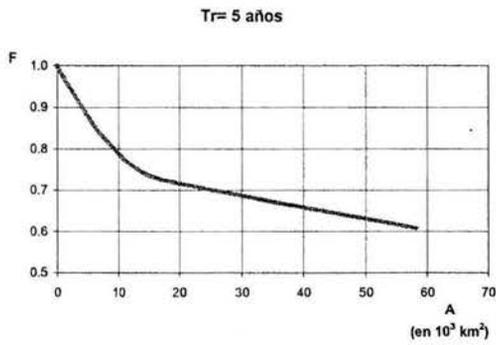
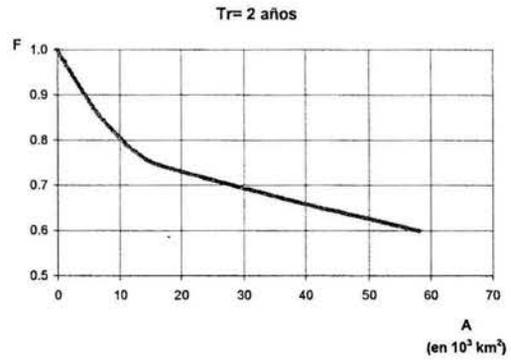
A en 10^3 km^2

Como los factores calculados son para áreas específicas con las ecuaciones de ajuste se elaboró una tabla en donde se puede obtener de manera rápida el Factor de Reducción por Área (FRA) para diferentes periodos de retorno; estos valores se muestran en la tabla 5.9 y de manera gráfica en la figura 5.10.

Tabla 5.9 Factores de Reducción

Área en (1000 km ²)	Tr en años						
	2	5	10	50	100	1000	10000
1	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
5	0.89	0.88	0.84	0.83	0.83	0.84	0.84
10	0.80	0.79	0.72	0.72	0.72	0.73	0.73
20	0.73	0.72	0.65	0.65	0.65	0.66	0.67
30	0.69	0.69	0.63	0.63	0.64	0.65	0.66
40	0.66	0.66	0.60	0.62	0.62	0.65	0.65
50	0.62	0.63	0.58	0.60	0.61	0.64	0.65
60	0.59	0.60	0.56	0.59	0.60	0.63	0.64

Figura 5.10
Gráficos del Factor de Reducción
por Área calculados para el
estado de Sinaloa



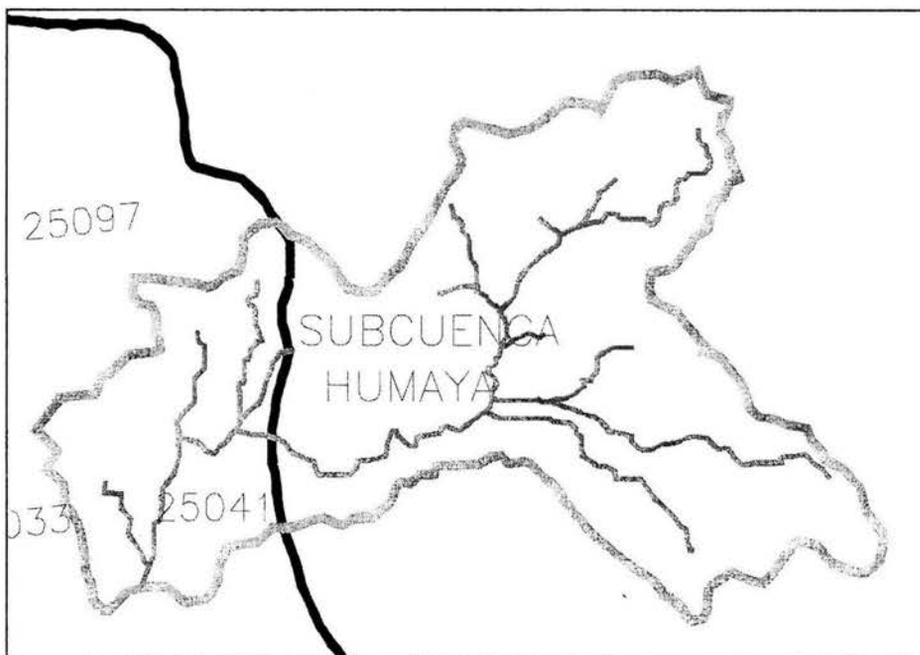
5.3 Ejemplo

Se muestra un ejemplo sobre la aplicación del Factor de Reducción por Área (FRA) a una cuenca perteneciente al estado de Sinaloa.

Encuentre la precipitación media de diseño de la subcuenca Humaya con un área de 10006.79 km^2 mostrada en la figura 5.11 para periodos de retorno de 2, 5 y 10 años.

La subcuenca pertenece a la cuenca C del río Culiacán (Figura5.11).

Figura 5.11 Subcuenca Humaya



Utilizando el método de Isoyetas para la lluvia media

Del mapa de Isoyetas para un Tr de 2, 5 y 10 años respectivamente (Anexo 3).

Tr = 2 años

Isoyetas	hp	A	Ai x hp
mm	mm	km²	
40-60	50	2552	127587
60-80	70	4564	319488
80-100	90	2891	260185

$$\begin{aligned} \Sigma &= 707259 \\ A_{\text{total}} &= \mathbf{10007} \text{ km}^2 \\ \text{hp media} &= \mathbf{70.68} \text{ mm} \end{aligned}$$

Tr = 5 años

Isoyetas	hp	A	Ai x hp
mm	mm	km²	
75	75	1403	105260
75-100	125	3292	411479
100-125	112.5	5235	588921
125-150	137.5	77	10553

$$\begin{aligned} \Sigma &= 1116213 \\ A_{\text{total}} &= \mathbf{10007} \text{ km}^2 \\ \text{hp media} &= \mathbf{111.55} \text{ mm} \end{aligned}$$

Tr = 10 años

Isoyetas	hp	A	Ai x hp
mm	mm	km²	
100-125	112.5	2189	246263
150-175	162.5	4104	666955
175-200	187.5	1014	190214
100.00	100	2699	269897

$$\begin{aligned} \Sigma &= 1373329.6 \\ A_{\text{total}} &= \mathbf{10006.79} \text{ km}^2 \\ \text{hp media} &= \mathbf{137.24} \text{ mm} \end{aligned}$$

Para calcular la lluvia media de diseño se aplicará el Factor de Reducción por Área que se obtuvo para el estado de Sinaloa, por tanto para un área $10\,000\text{ km}^2$ para los periodos de 2 , 5 y 10 años el factor es 0.80, 0.79 y 0.72 (tabla 5.9).

Periodo de retorno	hp (isoyetas)	FRA	hp diseño
años	mm		mm
2	78.68	0.80	62.94
5	111.55	0.79	88.12
10	137.24	0.72	98.81

Nota: La lluvia anual máxima registrada en la estación 25041 cercana a la subcuenca fué de 174 mm.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El Factor de Reducción por área (FRA) puede calcularse de dos formas de acuerdo con la literatura técnica; la primera se estima con base en el centro de tormenta de cada evento de lluvia y la segunda a partir de un área geográfica fija y diferentes eventos, éstos factores son importantes porque consideran el efecto de no simultaneidad de las lluvias máximas en el espacio.

Se han propuesto varios métodos para obtener los factores de tipo teóricos, empíricos y empírico teórico, en este trabajo se utilizó el de área geográfica fija de tipo empírico, en donde se relacionan las lluvias medias máximas anuales contra las lluvias máximas ambas asociadas a un periodo de retorno.

De los resultados que se obtuvieron del cálculo de FRA para el estado de Sinaloa se tiene lo siguiente:

El factor de reducción por área disminuye cuando el área de la cuenca aumenta, cabe aclarar que no lo hace de manera proporcional, ésta diferencia puede derivarse de las características de la zona (tipo de suelo, altitud, topografía, etc.) y la magnitud del área.

De manera gráfica se observó que en áreas menores a 10, 000 km² el factor de ajuste varía de acuerdo al periodo de retorno.

En la figura 5.8 se observa que para 2 y 5 años de periodo de retorno el comportamiento es muy similar (0.89-0.88, 0.80-0.79, 0.73-0.72, 0.69-0.69, 0.66-0.66, 0.62-0.63, 0.59-0.60), pero entre éstos y los valores de 10 y 50 años existe separación significativa (0.84-0.83, 0.72-0.72, 0.65-0.65, 0.63-0.63, 0.60-0.62, 0.58-0.60, 0.56-0.59) por otro lado, para periodos de retorno mayores a 100 años los factores tienen un comportamiento similar de

manera general; por otro lado se observa que los factores son ligeramente mas grandes en periodos de retorno de 10,000 y 1000 contra los de 100 (0.83-0.84-0.84, 0.72-0.73-0.73, 0.65-0.66-0.67, 0.64-0.65-0.66, 0.62-0.65-0.65, 0.61-0.64-0.65, 0.60-0.63-0.64).

Los valores obtenidos en este estudio son aplicables a las cuencas del pacifico Norte, en particular a las de la región hidrológica No. 10 de Sinaloa.

Comparando con los valores obtenidos para la cuenca del alto Grijalva los Factores del estado de Sinaloa son mayores que los del Grijalva, esto se debe a que las características de cada zona son diferentes en cuanto a climatología, geología, hidrología, etc.

Para aplicar este factor en otras zonas se deben revisar las condiciones geográficas climatológicas del sitio y considerarlo como un parámetro de comparación para la determinación de la lluvia de diseño.

COMPARACIÓN DE FACTORES DE AJUSTE POR ÁREA

Área (km ²)	Franco y Domínguez (1982) Ciudad de México	Domínguez et al (1996) Río Grijalva Tr = 2 años	Mena (2004) Sinaloa Tr = 2 años
10	0.98		
20	0.96		
100	0.88		
200	0.82		
500	0.70		
1,000	0.62	0.89	0.97
5,000		0.62	0.89
10,000		0.54	0.80
20,000		0.46	0.73
30,000		0.41	0.69
40,000			0.66
50,000			0.62
60,000			0.59

ANEXO A.1 CARACTERÍSTICAS DEL ESTADO DE SINALOA

En este capítulo se describen las características principales de la región en estudio como son localización, fisiografía, geomorfología, climatología, hidrología y división hidrológica del estado de Sinaloa.

A.1.1 Localización geográfica

El estado de Sinaloa, se localiza al noroeste de la República Mexicana a los 22°29' y 27°02' de Latitud norte y los 105°23' y 109°28' de longitud oeste del meridiano de Greenwich.

Tiene una forma alargada de orientación NW-SE en su extremo norte con 55 km de largo por 200 km de ancho y únicamente 60 km en su extremo sur. Colinda al norte con los estados de Sonora y Chihuahua, al este con Durango, al sur con Nayarit al oeste con el Golfo de California y el Océano Pacífico (Figura 1). La superficie total del estado es de 58,092 km², ocupa el decimoséptimo lugar en el ámbito nacional, lo cual representa el 3% de la superficie de la República Mexicana. Adicionalmente cuenta con 606 km² de superficie insular, 17,751 km² de plataforma continental, 656 km de litoral, 222,600 ha de lagunas litorales y 57,000 ha de aguas continentales.

Figura 1 Localización geográfica del estado de Sinaloa

A.1.2 Fisiografía

Sinaloa, se divide en la Llanura costera del Pacífico y la Sierra Madre Occidental.

La provincia Llanura Costera del Pacífico (VII) es paralela a la costa con orientación NW-SE y limitada al Oeste por el Golfo de California, las elevaciones varían desde el nivel del mar hasta los 450 msnm. Se divide en tres subprovincias.

- a) Llanura costera y Delta de Sonora y Sinaloa (32) ubicada al noroeste del estado.
- b) Costera de Mazatlán (33) es la más extensa y se localiza en la parte central del estado.
- c) Delta del Río Santiago (34) ubicada en la zona sur.

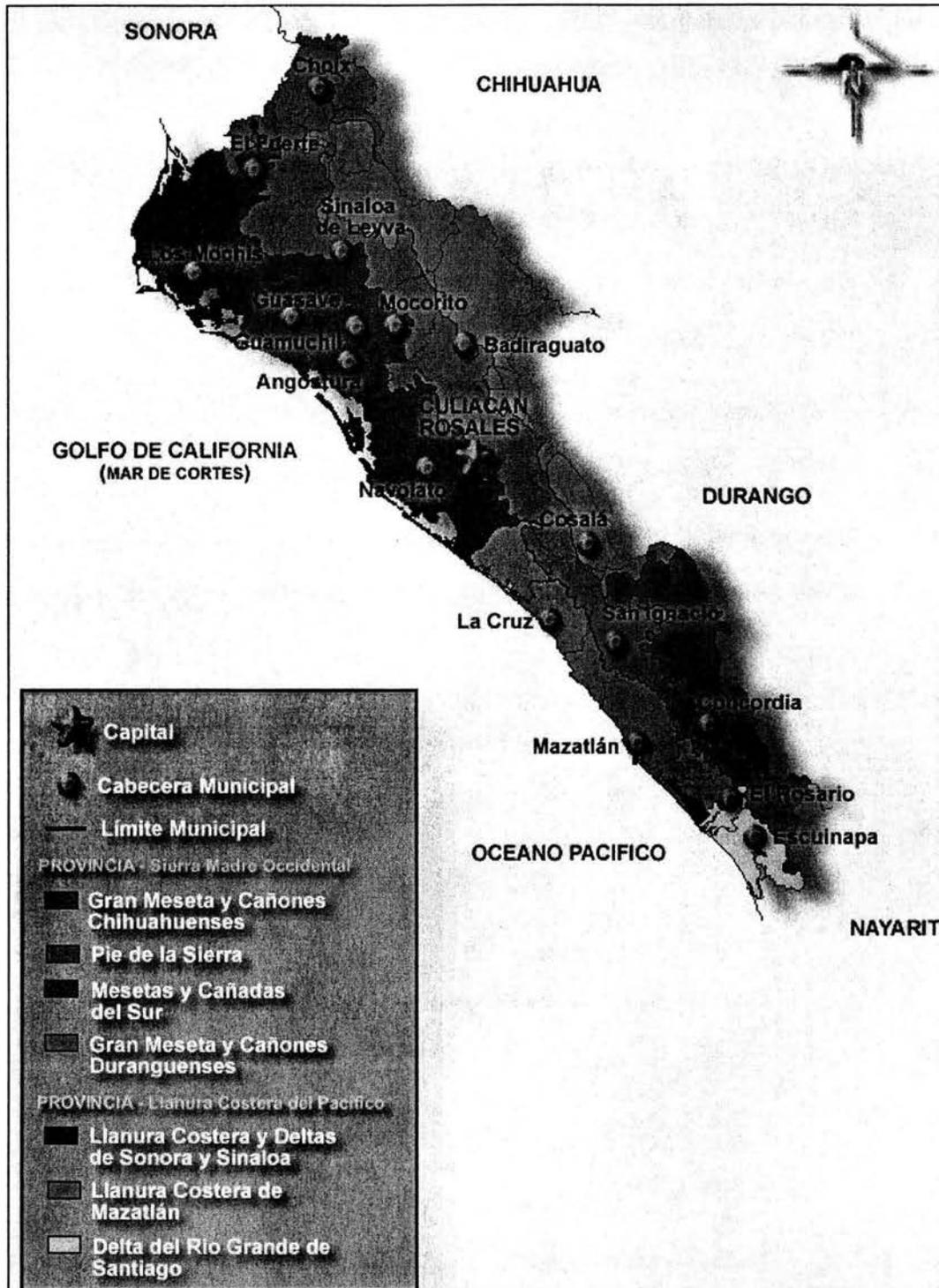
La provincia de la sierra Madre Occidental (III) tiene una orientación NW-SE y colinda con la provincia fisiográfica Llanura Costera del Pacífico. Esta conformada por sierras altas y bajas asociadas con valles y cañones.

Se pueden definir en las sub provincias siguientes:

- Píe de la Sierra (12) forma un cinturón alineado NW-SE atravesando longitudinalmente la entidad.
- Gran Meseta y Cañones Chihuahuenses (13) se aprecia en la región norte en una zona muy pequeña.
- Gran Meseta y Cañones Duranguenses (15) se ubica en el extremo este del estado y; Mesetas y Cañadas del Sur (16) situada en el Sureste del estado.

La figura 2 muestra la carta fisiográfica del estado.

Figura 2 Carta Fisiográfica



Fuente: INEGI. Carta de Fisiográfica, 1:1 000 000

A.1.3 Geomorfología

La geomorfología del estado de Sinaloa es producto de los desprendimientos del eje montañoso que asciende desde la extremidad austral en el sur del estado y que penetra en los límites con Durango y Chihuahua. Las formaciones de un considerable número de serranías desligadas del macizo montañoso que afloran en su topografía crean los extensos valles y la planicie costera del estado. La topografía del estado tiene alturas que van desde la zona de litoral hasta las estribaciones de la sierra con alturas de hasta 2780 msnm.

A.1.4 Clima

El estado cuenta con climas muy variados que dependen de la altitud o región se encuentran repartidos en franjas alargadas paralelas a la sierra madre Occidental.

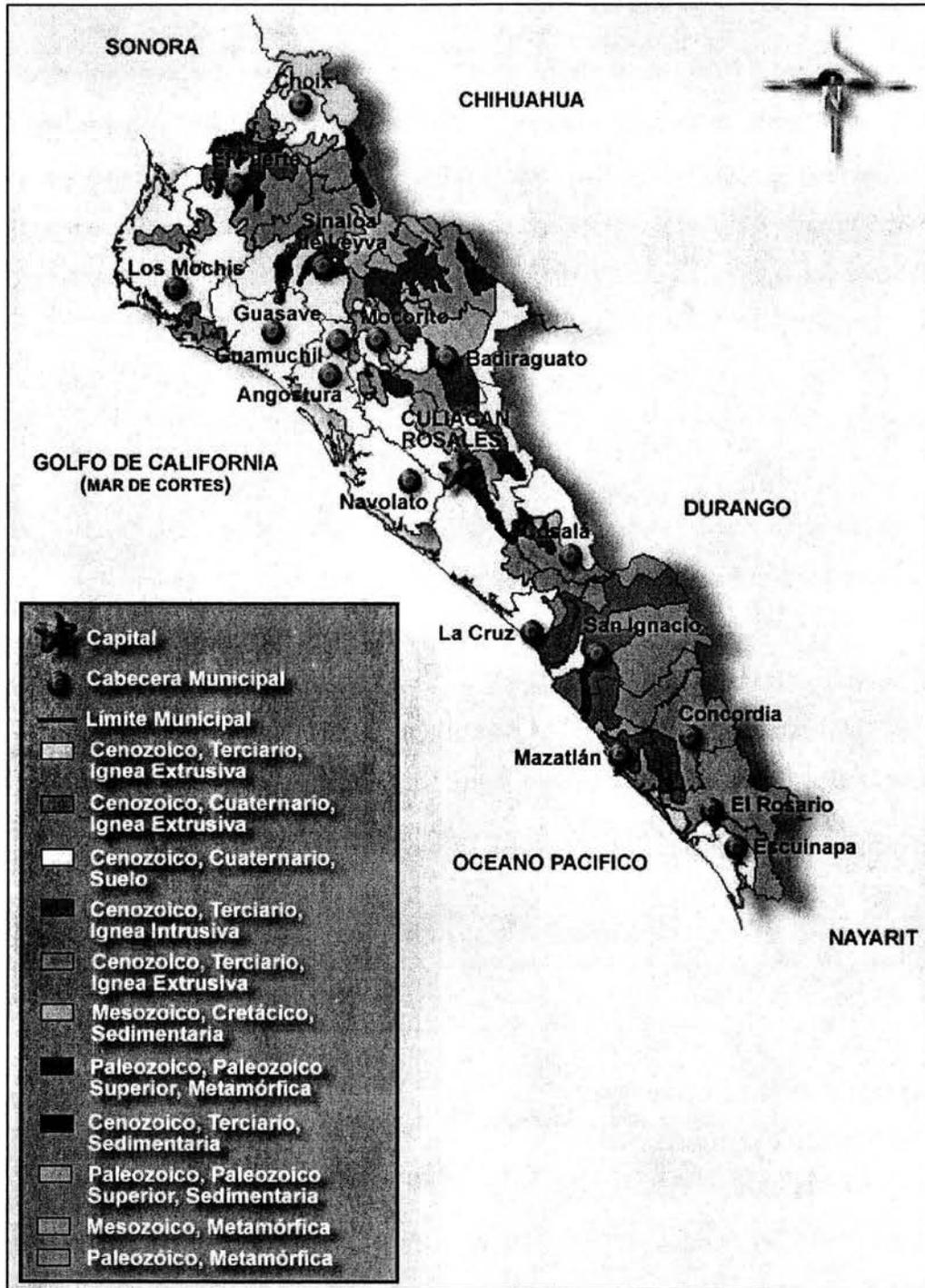
La porción noroeste esta caracterizada por un clima semidesértico y a medida que avanza al sur cambia a un clima más cálido y semihúmedo con temperaturas medias y frías en las partes más altas. La figura 4 y la tabla 1 contienen los tipos de clima y el porcentaje de la superficie estatal en la que comprenden.

Tabla 1 Tipos de climas

Tipo	Símbolo	% de la superficie estatal
Cálido subhúmedo con lluvias en verano	A(w)	36.10
Semicálido subhúmedo con lluvias en verano	ACw	11.43
Templado subhúmedo con lluvias en verano	C(w)	4.12
Semiseco muy cálido y cálido	BS1(h')	20.92
Seco muy cálido y cálido	BS(h')	17.77
Seco semicálido	BSh	0.14
Muy seco muy cálido y cálido	BW(h')	9.52

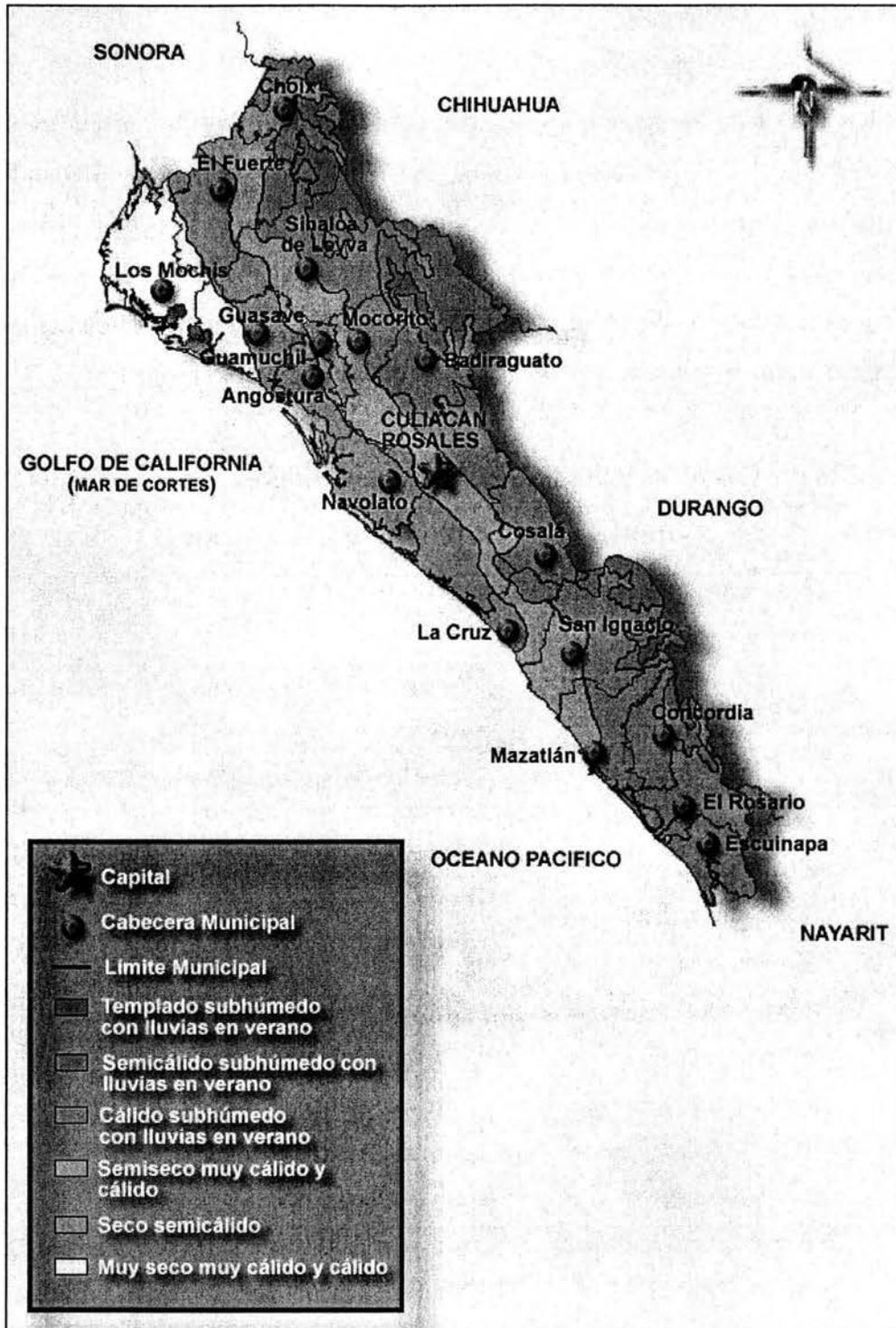
Fuente: CGSNEGI Carta de Climas, 1:1 000 000

Figura 3 Carta Geomorfológica



Fuente: INEGI. Carta Geomorfológica, 1:1 000 000

Figura 4 Carta Climatológica



Fuente: INEGI. Carta de Climas, 1:1 000 000

A.1.5 Hidrología Superficial

Sinaloa está surcado por 11 importantes corrientes hidrológicas, éstas nacen en la sierra madre Occidental en los estados vecinos de Chihuahua y Durango y drenan hacia el golfo de California. Ninguna de estas corrientes es navegable ya que su caudal disminuye en épocas de estiaje (marzo - junio). Cuenta con 9 presas de almacenamiento de donde cinco se aprovechan para generación de energía eléctrica. Las corrientes y cuerpos de agua se muestran en la figura 5 y la tabla 2 contiene las características de las corrientes principales.

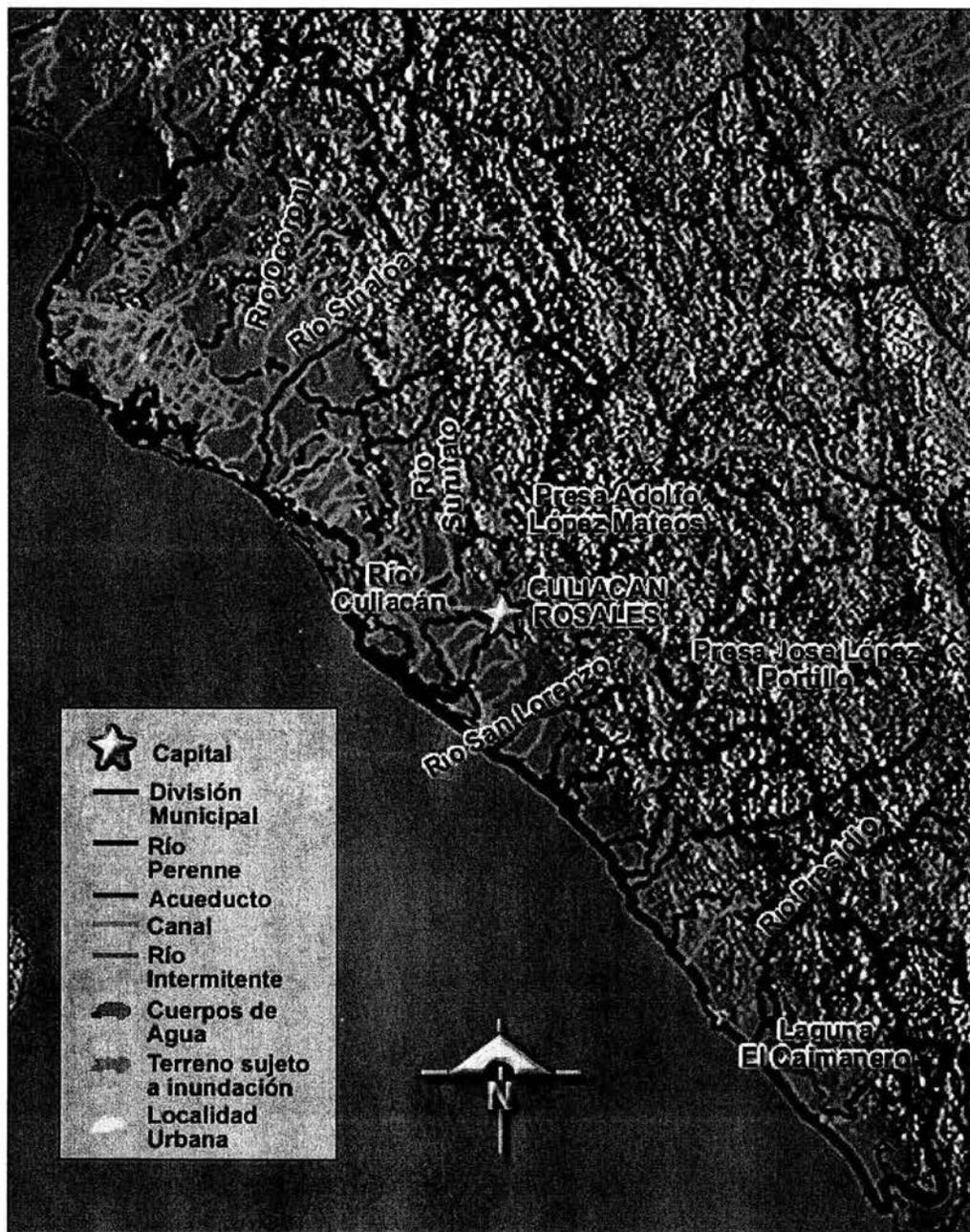
Tabla 2 Características principales de los recursos hidrológicos superficiales de Sinaloa

Corriente	Origen	Afluentes
Río Tamazula	Sierra y Valle de Topia en Durango	Ríos: Sianori y Topia
Río San Lorenzo	Río de los Remedios en el Edo. Durango	Arroyos: Chacala, de las Vegas y Santa Cruz de Alaya Ríos: Presidio, San Gegerorio y San Juan
Río Elota	Sierra Madre Occidental en el Edo. Durango	Arroyo: de Agua Nueva
Río Piaxtla	Municipio de San Dimas en el Edo. Durango	Arroyos: San Ignacio y Ajoya
Río Presidio	Sierra Madre Occidental dentro del Edo. de Durango	Arroyos: Tesgüino, Tauna y el Verde Río: Quelite
Río Humaya	Sierra Madre Occidental cerca del mineral de las Palmas en el Edo. de Durango	Arroyos: San Luis Gonzaga, El Limón, Las Huertas, Atotonilco y las Viboras Río Badiraguato
Río Baluarte	Sierra Madre Occidental en el Edo. de Durango	Arroyos: de Matatan, Pánuco, Plomosas y Tecuán

Tabla 2 Características principales de los recursos hidrológicos superficiales de Sinaloa (continuación)

Corriente	Origen	Afluentes
Río Cañas	Sierra de San Francisco Nayarit	Arroyos: Juan Mecate, Potrero Grande de San Francisco, El Caimán y Pancho Lorenzo
Río Fuerte	Río Verde que nace en el Municipio de Guadalupe y Calvo en Chihuahua	Arroyos: Batopitas, Urique, Septentrión, Chinipas, Chinobampo, Baimena y Alamo Río Choix
Río Sinaloa	Al Suroeste de Chihuahua	Arroyos: Cabrera, Bacubirito, Magdalena y San José de Gracia Río Ocoroni
Río Mocerito	Sierra de Parras	Arroyos: La Ciénega, Palmar de los Leal, del Valle, La Huerta, Comanito y Capirato

Figura 5 Corrientes y cuerpos de agua



Fuente: INEGI Condensado Estatal

A.1.6 División Hidrológica

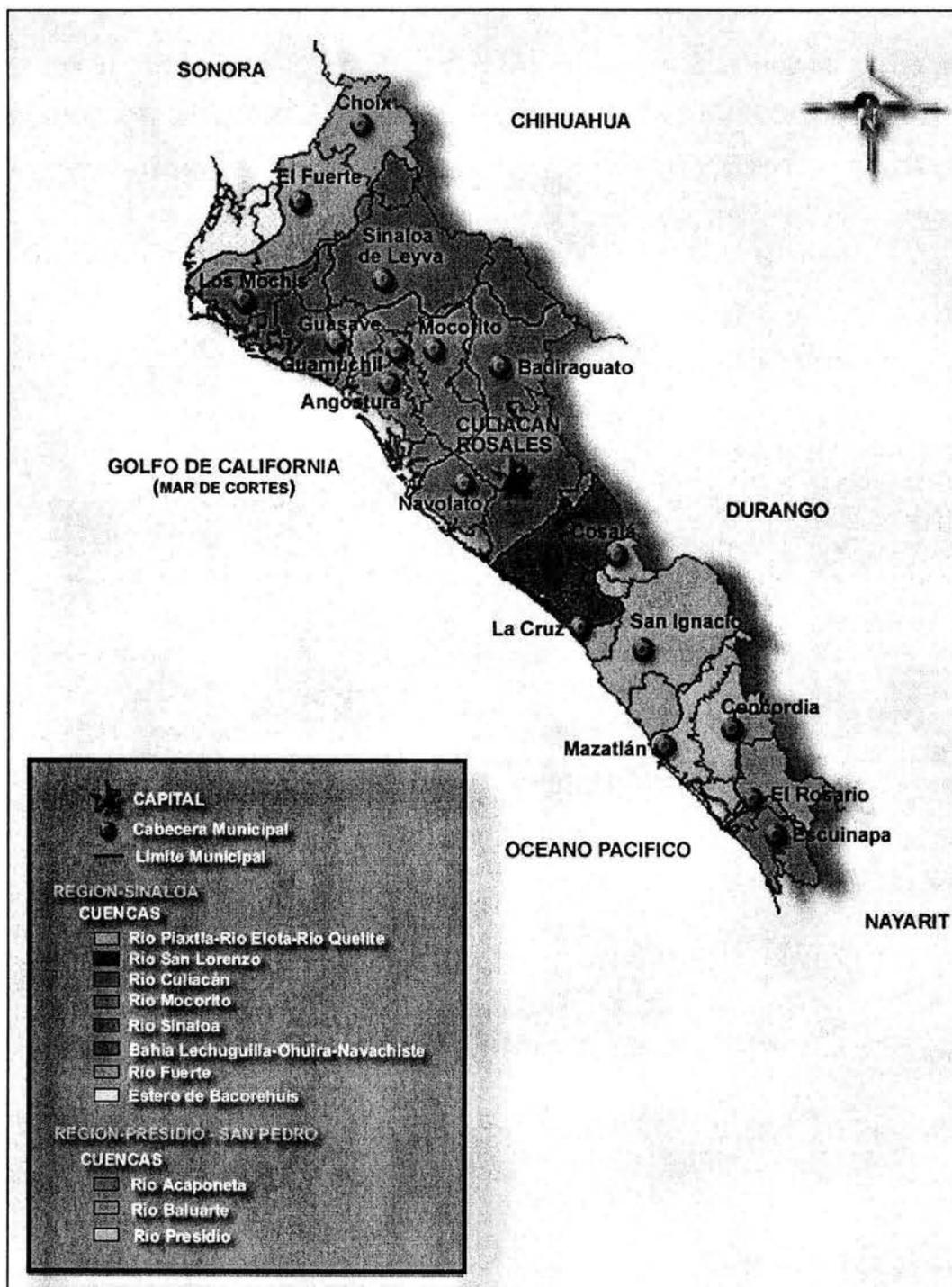
El estado de Sinaloa se encuentra dentro de la región hidrológica No. 10 que abarca una superficie de 102 922.18 km² y representa de acuerdo a su extensión, el sexto lugar del total del país. En la Tabla 3 y Figura 6 se presenta la división hidrológica para la entidad que corresponde a 48, 079.15 km², que ocupa el porcentaje mayor de todas sus cuencas.

Tabla 3 Regiones y cuencas hidrológicas

Región		Cuenca		% de la superficie estatal
Clave	Nombre	Clave	Nombre	
RH10	Sinaloa	A	Río Piaxtla-Río Elota, Río Quelite	13.01
		B	Río San Lorenzo	7.22
		C	Río Culiacán	15.67
		D	Río Mocorito	11.54
		E	Río Sinaloa	14.91
		F	Bahía Lechuguilla- Ohuira Navachiste	6.83
		G	Río Fuerte	12.27
		H	Estero de Bacorehuis	3.31
RH11	Presidio-San Pedro	B	Río Acaponeta	3.15
		C	Río Baluarte	5.01
		D	Río Presidio	7.08

Fuente: CGSNEGI: Carta Hidrológica de Aguas Superficiales 1:1 000 000

Figura 6 Regiones y cuencas hidrológicas



Fuente: INEGI. Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, 1:1 000 000

ANEXO A.2

En la tabla A.2 se muestran los cálculos del Factor de Reducción por Área para las distintas áreas seleccionadas dentro del estado de Sinaloa.

El orden en que se presentan es a partir del área total de la cuenca hasta el área más pequeña en la que intervienen hasta tres estaciones.

Clave	% Thiessen	Periodo de retorno (Tr)						
		2	5	10	50	100	1000	10000
25003	4.176	268.57	418.19	564.46	690.77	737.58	888.28	1034.46
25009	3.233	187.48	292.08	318.76	361.57	384.07	486.60	601.20
25011	6.990	731.72	1139.52	1502.93	2048.30	2256.95	2930.59	3606.59
25015	9.147	699.44	965.52	1887.41	2031.20	2083.61	2251.72	2417.46
25019	3.902	246.08	353.76	450.99	610.85	672.02	869.80	1064.57
25025	3.024	207.53	270.36	308.55	383.94	414.54	514.57	614.54
25028	3.440	311.18	490.55	693.21	909.59	989.80	1247.46	1500.88
25031	2.331	205.71	331.71	371.56	420.37	442.49	540.80	665.05
25033	7.056	660.05	901.34	931.82	1018.54	1096.08	1363.27	1627.08
25041	3.146	255.49	340.24	411.52	562.20	622.91	820.65	1018.99
25045	6.133	473.26	708.20	1073.22	1767.31	2024.76	2850.16	3674.08
25046	9.692	787.11	1204.36	1324.25	1507.24	1594.86	1978.28	2420.83
25049	3.413	360.31	442.32	496.62	616.10	666.61	833.52	1000.13
25052	4.029	469.59	694.40	843.25	1170.84	1309.34	1766.96	2223.78
25054	3.458	289.60	368.86	421.36	536.90	585.73	747.13	908.22
25065	2.007	90.43	123.71	161.91	316.40	380.51	586.25	793.03
25080	6.527	436.22	676.16	1096.84	2225.60	2654.44	4033.71	5412.92
25087	7.168	564.63	867.56	1109.84	1494.13	1641.50	2118.69	2596.73
25091	1.823	167.06	225.61	279.31	409.30	462.63	635.91	806.14
25097	5.818	376.61	489.13	635.17	894.13	991.06	1302.51	1611.16
25100	3.487	267.32	346.03	412.61	566.06	629.84	838.57	1046.77
S =	100	80.55	116.50	152.96	205.41	226.41	296.05	366.45
Distrib Gumbel		47.79	65.0	76.39	101.47	112.06	147.09	182.05
FRA A = 58092 km ²		0.59	0.56	0.50	0.49	0.49	0.50	0.50

Clave	% Thiessen	Periodo de retorno (Tr)						
		2	5	10	50	100	1000	10000
25003	5.897	379.31	590.61	797.19	975.58	1041.69	1254.52	1460.98
25009	4.567	264.77	412.51	450.18	510.64	542.43	687.24	849.08
25015	12.918	987.83	1363.62	2665.61	2868.68	2942.70	3180.13	3414.21
25019	5.510	347.54	499.63	636.94	862.70	949.11	1228.43	1503.50
25025	4.271	293.09	381.84	435.77	542.24	585.46	726.73	867.92
25033	9.965	932.19	1272.98	1316.03	1438.49	1548.00	1925.36	2297.94
25041	4.443	360.84	480.52	581.20	794.00	879.75	1159.01	1439.13
25045	8.661	668.39	1000.20	1515.72	2495.99	2859.59	4025.31	5188.94
25046	13.688	1111.64	1700.93	1870.26	2128.69	2252.44	2793.95	3418.97
25054	4.884	409.00	520.95	595.09	758.27	827.23	1055.18	1282.68
25065	2.835	127.72	174.72	228.67	446.85	537.41	827.97	1120.00
25080	9.219	616.07	954.95	1549.08	3143.24	3748.89	5696.86	7644.73
25097	8.217	531.89	690.81	897.05	1262.79	1399.69	1839.55	2275.46
25100	4.925	377.53	488.70	582.73	799.45	889.53	1184.32	1478.37
S =	100	74.08	105.33	141.22	190.28	210.04	275.85	342.42
Distrib Gumbel		46.04	66.76	80.48	110.67	123.44	165.62	207.73
FRA A = 37570 km ²		0.62	0.63	0.57	0.58	0.59	0.60	0.61

Clave	%	Periodo de retorno (Tr)						
		Thiessen	2	5	10	50	100	1000
25003	7.520	483.69	753.13	1016.55	1244.03	1328.33	1599.73	1863.00
25009	5.823	337.63	526.02	574.06	651.16	691.69	876.34	1082.72
25019	7.027	443.17	637.11	812.21	1100.09	1210.27	1566.45	1917.23
25025	5.446	373.74	486.91	555.69	691.45	746.56	926.70	1106.74
25033	12.707	1188.70	1623.27	1678.16	1834.32	1973.97	2455.17	2930.27
25041	5.665	460.13	612.75	741.12	1012.49	1121.83	1477.94	1835.13
25046	17.455	1417.53	2168.98	2384.90	2714.45	2872.24	3562.77	4359.77
25054	6.228	521.55	664.30	758.84	966.92	1054.87	1345.53	1635.64
25065	3.615	162.86	222.80	291.60	569.82	685.28	1055.80	1428.19
25080	11.755	785.60	1217.72	1975.34	4008.16	4780.48	7264.47	9748.33
25097	10.478	678.25	880.90	1143.90	1610.28	1784.84	2345.74	2901.60
25100	6.281	481.42	623.18	743.08	1019.43	1134.31	1510.21	1885.17
S =	100	73.34	104.17	126.75	174.23	193.85	259.87	326.94
Distrib Gumbel		44.24	71.21	89.07	128.37	144.99	199.89	254.69
FRA A =32257 km ²		0.60	0.68	0.70	0.74	0.75	0.77	0.78

Clave	%	Periodo de retorno (Tr)						
		Thiessen	2	5	10	50	100	1000
25015	20.118	1538.39	2123.61	4151.26	4467.51	4582.78	4952.55	5317.08
25028	7.565	684.42	1078.94	1524.67	2000.59	2177.01	2743.71	3301.11
25033	15.518	1451.73	1982.46	2049.50	2240.22	2410.76	2998.44	3578.67
25041	6.919	561.95	748.34	905.12	1236.53	1370.06	1804.98	2241.21
25046	21.318	1731.20	2648.92	2912.62	3315.10	3507.81	4351.13	5324.49
25087	15.766	1241.88	1908.15	2441.04	3286.25	3610.40	4659.94	5711.37
25097	12.797	828.33	1075.82	1397.02	1966.60	2179.79	2864.80	3543.67
S =	100	80.38	115.66	153.81	185.13	198.39	243.76	290.18
Distrib Gumbel		59.66	77.9	89.98	116.55	127.79	164.92	201.98
FRA A =26412.10 km ²		0.74	0.67	0.58	0.63	0.64	0.68	0.70

Clave	%	Periodo de retorno (Tr)						
		Thiessen	2	5	10	50	100	1000
25011	15.717	1645.30	2562.25	3379.40	4605.68	5074.84	6589.53	8109.56
25015	20.567	1572.73	2171.01	4243.92	4567.22	4685.07	5063.08	5435.75
25028	7.734	699.69	1103.02	1558.70	2045.24	2225.60	2804.95	3374.79
25031	5.241	462.54	745.86	835.47	945.21	994.95	1216.00	1495.38
25045	13.790	1064.14	1592.41	2413.17	3973.87	4552.75	6408.68	8261.31
25049	7.674	810.18	994.58	1116.66	1385.32	1498.89	1874.20	2248.83
25052	9.060	1055.90	1561.38	1896.07	2632.68	2944.09	3973.08	5000.26
25087	16.118	1269.60	1950.74	2495.52	3359.60	3690.98	4763.94	5838.84
25091	4.100	375.64	507.29	628.03	920.32	1040.24	1429.86	1812.64
S =	100	89.56	131.89	185.67	244.35	267.07	341.23	415.77
Distrib Gumbel		69.26	97.55	116.28	157.49	174.92	232.5	289.98
FRA A =25835 km ²		0.77	0.74	0.63	0.64	0.65	0.68	0.70

Clave	%	Periodo de retorno (Tr)						
		Thiessen	2	5	10	50	100	1000
25011	19.787	2071.29	3225.66	4254.38	5798.16	6388.80	8295.66	10209.26
25028	9.736	880.85	1388.61	1962.27	2574.79	2801.84	3531.20	4248.58
25031	6.598	582.30	938.97	1051.79	1189.94	1252.55	1530.84	1882.56
25045	17.360	1339.66	2004.72	3037.98	5002.76	5731.53	8067.99	10400.29
25049	9.660	1019.95	1252.09	1405.79	1744.00	1886.97	2359.46	2831.09
25052	11.406	1329.29	1965.65	2387.00	3314.33	3706.36	5001.78	6294.91
25087	20.291	1598.32	2455.82	3141.65	4229.45	4646.64	5997.41	7350.61
25091	5.162	472.90	638.63	790.64	1158.61	1309.58	1800.08	2281.96
S =	100	92.95	138.70	180.31	250.12	277.24	365.84	454.99
Distrib Gumbel		75.51	109.93	132.72	182.88	204.08	274.15	344.1
FRA A =20522 km ²		0.81	0.79	0.74	0.73	0.74	0.75	0.76

Clave	%	Periodo de retorno (Tr)						
		Thiessen	2	5	10	50	100	1000
25003	14.005	900.80	1402.61	1893.20	2316.85	2473.85	2979.29	3469.61
25009	10.845	628.80	979.64	1069.11	1212.70	1288.18	1632.08	2016.43
25019	13.086	825.35	1186.53	1512.64	2048.79	2253.98	2917.32	3570.59
25025	10.142	696.05	906.80	1034.89	1287.73	1390.37	1725.87	2061.17
25054	11.599	971.32	1237.17	1413.24	1800.77	1964.55	2505.89	3046.18
25065	6.733	303.31	414.94	543.06	1061.21	1276.25	1966.29	2659.83
25080	21.893	1463.08	2267.85	3678.82	7464.70	8903.03	13529.14	18155.04
25100	11.697	896.58	1160.59	1383.89	1898.56	2112.50	2812.57	3510.89
S =	100	66.85	95.56	125.29	190.91	216.63	300.68	384.90
Distrib Gumbel		45.02	65.43	78.95	108.69	121.26	162.81	204.29
FRA A =17320.12 km ²		0.67	0.68	0.63	0.57	0.56	0.54	0.53

Clave	%	Periodo de retorno (Tr)						
		Thiessen	2	5	10	50	100	1000
25011	28.278	2960.15	4609.89	6080.07	8286.33	9130.43	11855.59	14590.36
25031	9.429	832.19	1341.91	1503.14	1700.58	1790.06	2187.77	2690.42
25045	24.810	1914.55	2865.00	4341.66	7149.60	8191.11	11530.22	14863.37
25049	13.806	1457.64	1789.40	2009.05	2492.40	2696.73	3371.98	4045.99
25052	16.301	1899.73	2809.17	3411.33	4736.61	5296.88	7148.19	8996.24
25091	7.376	675.83	912.69	1129.93	1655.80	1871.56	2572.55	3261.22
S =	100	97.40	143.28	184.75	260.21	289.77	386.66	484.48
Distrib Gumbel		82.64	125.49	153.86	216.29	242.69	329.91	416.97
FRA A =14359.78 km ²		0.85	0.88	0.83	0.83	0.84	0.85	0.86

Clave	%	Periodo de retorno (Tr)						
		Thiessen	2	5	10	50	100	1000
25015	46.302	3540.71	4887.64	9554.42	10282.28	10547.60	11398.63	12237.62
25028	17.412	1575.23	2483.24	3509.14	4604.50	5010.54	6314.84	7597.73
25087	36.286	2858.28	4391.74	5618.22	7563.53	8309.58	10725.17	13145.11
S =	100	79.74	117.63	186.82	224.50	238.68	284.39	329.80
Distrib Gumbel		68.09	97.09	116.29	158.55	176.41	235.44	294.36
FRA A =11475.69 km ²		0.85	0.83	0.62	0.71	0.74	0.83	0.89

Clave	%	Periodo de retorno (Tr)						
	Thiessen	2	5	10	50	100	1000	10000
25003	21.522	1384.27	2155.38	2909.28	3560.31	3801.56	4578.28	5331.74
25009	16.666	966.27	1505.41	1642.90	1863.55	1979.55	2508.01	3098.65
25054	17.824	1492.62	1901.16	2171.73	2767.24	3018.93	3850.79	4681.06
25065	10.346	466.09	637.63	834.52	1630.76	1961.22	3021.59	4087.35
25080	33.642	2248.31	3485.00	5653.24	11470.99	13681.28	20790.22	27898.82
S =	100	65.58	96.85	132.12	212.93	244.43	347.49	450.98
Distrib Gumbel		50.65	75.96	92.71	129.58	145.17	196.68	248.09
FRA A =11271.00 km ²		0.77	0.78	0.70	0.61	0.59	0.57	0.55

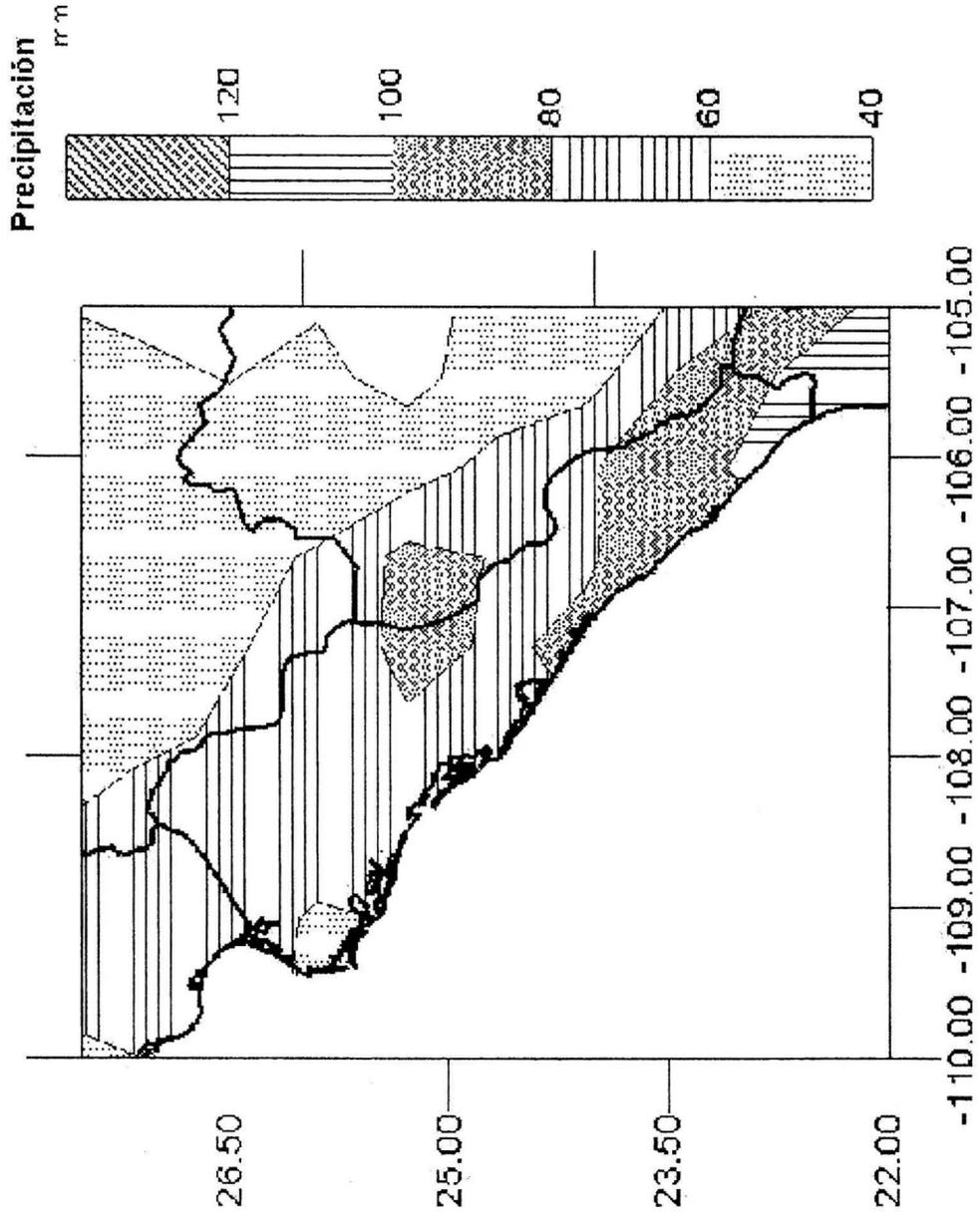
Clave	%	Periodo de retorno (Tr)						
	Thiessen	2	5	10	50	100	1000	10000
25031	18.656	1646.61	2655.17	2974.20	3364.86	3541.91	4328.84	5323.41
25045	49.089	3788.23	5668.85	8590.65	14146.59	16207.36	22814.31	29409.47
25052	32.254	3758.91	5558.37	6749.84	9372.11	10480.68	14143.79	17800.45
S =	100	91.94	138.82	183.15	268.84	302.30	412.87	525.33
Distrib Gumbel		85.76	116.78	137.31	182.5	201.6	264.73	327.74
FRA A =7257.354 km ²		0.93	0.84	0.75	0.68	0.67	0.64	0.62

Clave	%	Periodo de retorno (Tr)						
	Thiessen	2	5	10	50	100	1000	10000
25011	57.173	5984.87	9320.34	12292.76	16753.39	18460.00	23969.76	29498.96
25049	27.913	2947.07	3617.83	4061.93	5039.17	5452.28	6817.52	8180.24
25091	14.914	1366.41	1845.29	2284.51	3347.72	3783.95	5201.21	6593.57
S =	100	102.98	147.83	186.39	251.40	276.96	359.88	442.73
Distrib Gumbel		68.09	97.09	116.29	158.55	176.41	235.44	294.36
FRA A =7102.43 km ²		0.66	0.66	0.62	0.63	0.64	0.65	0.66

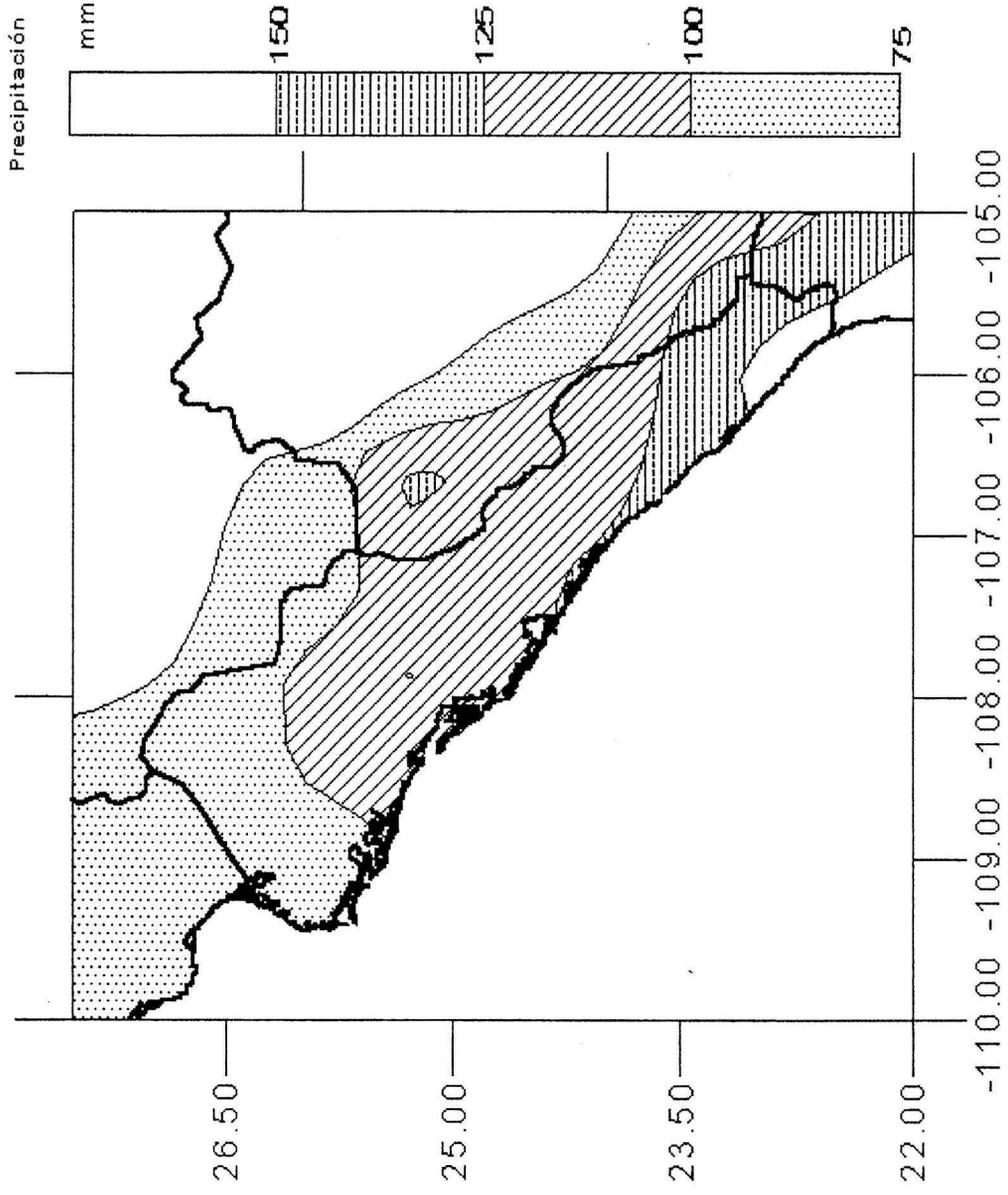
Clave	%	Periodo de retorno (Tr)						
	Thiessen	2	5	10	50	100	1000	10000
25019	37.469	2363.18	3397.33	4331.06	5866.18	6453.69	8353.01	10223.47
25025	29.039	1992.95	2596.39	2963.15	3687.10	3980.97	4941.59	5901.62
25100	33.492	2567.14	3323.05	3962.40	5436.04	6048.60	8053.08	10052.53
S =	100	69.23	93.17	112.57	149.89	164.83	213.48	261.78
Distrib Gumbel		54.72	69.16	78.72	99.76	108.65	138.04	167.38
FRA A =6049.13 km ²		0.79	0.74	0.70	0.67	0.66	0.65	0.64

ANEXO A.3

Isoyetas para periodos de retorno de 2, 5 y 10 años.



MAPA DE ISOYETAS PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 2 AÑOS



MAPA DE ISOYETAS PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS

REFERENCIAS

- 1.- Anuario Estadístico del Estado de Sinaloa”, INEGI, (2000)
- 2.- Aparicio F. (1992) “Fundamentos de Hidrología de superficie” Ed. Limusa
- 3.- Campos A. (1978) “Procesos del ciclo hidrológico”; Universidad Autónoma de S.L.P.
- 4.- Chow Ven Te, (1994) “Hidrología Aplicada”, Ed. Mc Graw Hill
- 5.- Custodio E. (1976) “Hidrología Subterránea”. Tomo 1, Ed Omega S.A.
- 6.- Domínguez R., Franco C. (2002) “Análisis regional para la obtención de precipitaciones de diseño asociadas a duraciones menores que dos horas”, XVII Congreso Nacional de Hidráulica”, Monterrey N.L.
- 7.- Franco C. (1998) “Análisis regional de lluvias convectivas. Aplicación al valle de México”, Tesis de Maestría, UNAM
- 8.- Fuentes M., Franco V. (1999) “Estudio Hidrológico para obras de protección”, Series del Instituto de Ingeniería
- 9.- García C. (2001) “Estudio de la región Hidrológico No. 10 con base en precipitaciones” Tesis de Maestría, UNAM
- 10.- García F. (1998) “Análisis de Frecuencia de sequías para el estado de Sinaloa” Tesis de Maestría, UNAM
- 11.- Guichard D. (1998) “Regionalización de lluvias y escurrimientos en la cuenca del alto río Grijalva” Tesis de Maestría, UNAM
- 12.- Guichard D. (2002) “Factores de Reducción Areal: Recopilación de Métodos y Obtención de Factores Empíricos para Episodios Convectivos en la Comunidad de Valencia”
- 13.- Jiménez E. (1992) “Manual de operación del programa Ax.EXE”; Cenapred, México D.F.
- 14.- Manual de C.F.E. "Análisis Estadístico" Capítulo 6. Tema Hidrología Sección Hidrotecnia
- 15.- Núñez .F. (2002) “Mapa de curvas Isoyetas de precipitación máxima en 24 horas para la República Mexicana”

- 16.- Spiegel M, Stephens L. (2003) "Estadística", Serie Schaums Tercera Edición, Ed. Mac Graw Hill
- 17.- Springall R. (1967) "Escurrimiento en Cuencas Grandes", Series del Instituto de Ingeniería No. 146
- 18.- Springall R. (1969) "Drenaje en Cuencas Pequeñas", Series del Instituto de Ingeniería No. 143
- 19.- Springall R. (1970) "Hidrología primera parte", Series del Instituto de Ingeniería
- 20.- Springall R. "Análisis estadístico y probabilístico de datos hidrológicos", Hidrología Superficial (Capítulo 8) Ed. Facultad de Ingeniería