

01162

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

SECCION DE HIDRAULICA

**REGIONALIZACION DE PRECIPITACIONES MAXIMAS EN CUENCAS DONDE
PREDOMINAN LAS LLUVIAS DE TIPO CONVECTIVO**

Tesis que presenta el Ingeniero Civil

José Natividad Barrios Domínguez

**Para obtener el grado de
MAESTRO EN INGENIERIA HIDRAULICA**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCION	1
2. METODOLOGIA	4
3. MODELOS DE RELACION LLUVIA-ESCURRIMIENTO	10
3.1 Características principales de los diferentes modelos lluvia-escurrimiento	11
3.1.a Modelos empíricos o directos	11
3.1 b Modelos Hidrológicos	12
3.1 c Modelos de simulación	13
3.2 Descripción de algunos métodos de relación lluvia-escurrimiento	13
3.2.1 Método racional	14
3.2.2 Método del hidrograma unitario	15
3.2.3 Métodos que se basan en hidrogramas unitarios aproximados	19

4. ANALISIS DE LOS METODOS EXISTENTES PARA DETERMINAR LLUVIAS DE DISEÑO EN CUENCAS PEQUEÑAS	20
4.1 Presentación de la información	21
4.2 Método intensidad- periodo de retorno	23
4.3 Método de correlación lineal múltiple	33
5. REGIONALIZACION DE LLUVIAS MAXIMAS	35
5.1 Análisis probabilístico de la información	39
5.2 Análisis regional de la información	45
5.2.1 Construcción de planos base	49
5.2.2 Análisis de resultados	52
5.3 Factores de ajuste	56
5.3.1 Factores de ajuste por duración	57
5.3.2 Factores de ajuste por periodo de retorno	59
5.3.3 Comparación con otros resultados	62
5.3.4 Factores de ajuste por área	65
5.4 Procedimiento para calcular la tormenta de diseño para la cuenca alta del Río Lerma	68

6. CONCLUSIONES

69

7. RECONOCIMIENTOS

74

8. REFERENCIAS

75

1. INTRODUCCION

La estimación de la lluvia máxima para propósitos de diseño es, sin lugar a dudas, esencial para la aplicación de criterios que buscan obtener el gasto máximo a partir de su causa principal, la lluvia.

Particularmente en cuencas pequeñas, entendiendo como tales aquellas cuya área de drenaje sea menor de 100 Km^2 , la estimación del gasto de diseño para determinada obra depende en forma directa de la magnitud de la lluvia de diseño, cuyo valor está asociado a un determinado riesgo de falla.

El propósito de esta tesis es estudiar la conveniencia de realizar estudios hidrológicos para fines de diseño, con base en un análisis regional de lluvias, evitando de esta manera el uso de información inconsistente o poco congruente en sitios aislados.

Para su desarrollo se han propuesto cinco capítulos, siendo el capítulo 2 donde se describe la metodología que se propone seguir para realizar estudios regionales enfocados al manejo de lluvias máximas, predominantemente, convectivas.

Para tener una idea de la utilización de la lluvia de diseño, en el capítulo 3 se describen algunos de los modelos de relación lluvia-escorrentía más utilizados para la obtención de avenidas de diseño a partir de las lluvias.

En el capítulo 4 se describen, en forma sucinta, dos de los principales métodos para obtener las curvas intensidad-duración-periodo de retorno útiles para calcular una tormenta de diseño.

El capítulo 5 constituye la parte esencial de este trabajo, ya que está dedicado a desarrollar el método de regionalización que se propone utilizar para la estimación de la lluvia de diseño en lugar de los criterios tradicionales; también se discute la bondad de este método mediante la verificación de las hipótesis planteadas.

Los criterios tradicionales, que se describen en el capítulo 4, y el propuesto en el 5, se aplicarán a la cuenca alta del Río Lerma con fines comparativos. Los resultados se dan al final del

capítulo 5.

En el capítulo 6 se discuten las ventajas y desventajas del análisis regional de lluvias máximas y sus resultados, se hace un análisis de las principales regiones de México, donde es posible una regionalización de lluvias máximas y, finalmente, se dan las conclusiones y recomendaciones producto del presente trabajo.

2. METODOLOGIA

Mediante la metodología que aquí se presenta se pretende lograr que el cálculo de la lluvia de diseño en una subregión cualquiera dentro de una cuenca en estudio, sea consistente con los resultados de otra ubicada en la misma. Esto es importante porque elimina la posibilidad de utilizar información incongruente entre estaciones dentro de la misma zona y por consiguiente la de calcular lluvias de diseño con información dudosa o incompleta.

Para lograr lo anterior la recopilación de información y su análisis constituye la primera actividad, misma que puede dividirse en dos grupos:

- a) Información climatológica. La forman los datos de intensidades de lluvia, información de precipitaciones medias anuales, precipitaciones máximas en 24 horas, etc.

b) **Datos generales.** La constituye la información que puede ayudar a conocer con más detalle la cuenca de interés como puede ser, por ejemplo, las tormentas severas, las trayectorias de ciclones, etc..

El objetivo principal de la metodología que se propone es obtener la lluvia de diseño; sin embargo, es conveniente comentar dónde y cómo se hace su aplicación. Debido a esto se presenta una descripción de algunos métodos donde la lluvia de diseño tiene una aplicación directa. Los principales de ellos son:

- a) **Modelos empíricos o directos**
- b) **Modelos hidrológicos**

Modelos empíricos o directos. Se apoyan en experiencias obtenidas en otros lugares, donde se han obtenido relaciones entre las características fisiográficas y climatológicas de la cuenca con los gastos de pico presentados.

La mayor parte de estos han sido calibrados en cuencas específicas, y su uso se ha extrapolado a otros lugares donde no se cuenta con información de escurrimientos o bien con fines comparativos entre los resultados de aplicar diferentes métodos.

Modelos hidrológicos. La aplicación de estos modelos requiere

del análisis simultáneo de la información hidrométrica y climatológica. Esto permite determinar la forma en que la lluvia es regulada por la cuenca hasta producir las avenidas.

Para mayor precisión en el cálculo de la lluvia de diseño es conveniente calcular la distribución espacial y temporal de las tormentas más importantes, misma que se sintetiza en las curvas altura de precipitación-área-duración (A-A-D).

Con el fin de tener una idea clara de los criterios existentes para estimar la lluvia de diseño y su aplicación, los métodos se han dividido en los grupos siguientes:

- a) Métodos de relación intensidad-periodo de retorno.
- b) Métodos de correlación lineal múltiple.
- c) Métodos de regionalización.

Métodos de relación intensidad-periodo de retorno. Consisten en analizar estadísticamente la información de intensidades máximas a las que se ajusta una función de distribución. Para el registro de intensidades correspondiente a una cierta duración se obtienen los parámetros de una o varias funciones de distribución eligiendo la que mejor represente la muestra. El análisis se hace para cada estación dentro de la cuenca y las duraciones para las que se cuente con intensidades máximas.

Lo anterior implica que se harán tantos ajustes como duraciones se tenga y para las funciones de distribución que se desee, por lo que para hacer más expedito el cálculo se requiere de programas de cómputo.

Métodos de correlación lineal múltiple. Se han utilizado con frecuencia por su fácil aplicación, ya que sólo requieren correlacionar los datos de intensidades de lluvia y su duración con el periodo de retorno a través de parámetros de ajuste. Se les considera como los menos precisos sobre todo cuando existe información de dudosa calidad o poco confiable en una estación.

El análisis se hace en forma puntual para cada estación dentro de la cuenca. Los resultados se sintetizan en las curvas intensidad-duración-periodo de retorno ($I-d-Tr$).

Métodos de regionalización. Los criterios anteriores constituyen una buena base para el cálculo de lluvias de diseño cuando se cuenta con información confiable y con muchos años de registro; sin embargo, es común que se presente la necesidad de calcular la lluvia de diseño en puntos donde la información existente es dudosa o inconsistente con la general de la zona, y como consecuencia estos criterios dejan de ser confiables. Debido a esto se han desarrollado métodos, como el que aquí se propone, donde se analiza la información total existente en la zona, en

forma regional.

La regionalización de lluvias máximas se apoya en hipótesis susceptibles de ser comprobadas, donde los resultados finales muestran la variación de la lluvia dentro de la región de interés que puede ser extrapolada a las condiciones necesarias para diseño.

En este sentido, regionalizar las lluvias máximas implica caracterizar las condiciones meteorológicas de las subregiones o subcuencas y expresarlas a través de planos donde las condiciones climatológicas sean consistentes en toda la región en estudio. Lo anterior se logra mediante el análisis global de la información existente donde es posible eliminar aquella que sea incongruente dentro de la zona. De esta manera la lluvia de diseño en un punto, dependerá de las características climatológicas de la subregión donde este ubicado y de los factores de ajuste necesarios para extrapolarla a la duración y frecuencia deseada.

El análisis de la información en forma regional ofrece las ventajas siguientes:

- Mediante la regionalización climatológica, donde se ha eliminado toda información dudosa, es posible obtener la lluvia de diseño en aquellos sitios donde no hay información

amplia y confiable. En estos casos la estimación por algún método tradicional ocasionaría un diseño inadecuado o inconsistente con respecto a otro dentro de la misma zona.

- Permite tomar en cuenta la distribución de la lluvia respecto al tiempo, para utilizarla en aquellos casos en que se desea obtener un hidrograma de diseño.
- Su aplicación es rápida y sencilla, ya que sólo es necesario obtener la lluvia en el punto de interés, de un plano de la cuenca regionalizada, y mediante factores de ajuste se obtiene la lluvia de diseño para cualquier duración y periodo de retorno.

Finalmente, un método de relación lluvia-escorrentía, una vez calculada la lluvia máxima, permitirá estimar el gasto de diseño deseado y establecer las conclusiones que se deriven del estudio.

Cabe señalar que la metodología descrita no implica que los resultados no sean complementados y afinados de acuerdo con los problemas específicos de cada caso particular.

3. MODELOS DE RELACION LLUVIA-ESCURRIMIENTO

El objetivo de este capítulo es mostrar algunos métodos de relación lluvia-escurrimiento y su aplicación a problemas de diseño (para obras de drenaje o control de avenidas), cuando se esta en posibilidad de obtener la tormenta de diseño por algún método como los que se describen en los capítulos 4 y 5.

Estos métodos son muy utilizados debido a que se apoyan fundamentalmente en registros de precipitación, y estos generalmente son más antiguos que los de escurrimiento, resultando más confiable, por lo mismo, su análisis probabilístico.

Cabe aclarar que la descripción de los métodos que en este capítulo se mencionan, no se hace en forma detallada debido a que esta no es la parte esencial de la tesis, solamente se incluyen

para dar un enfoque más objetivo al método descrito en el capítulo 5 (regionalización de lluvias máximas), y su aplicación en los modelos lluvia-escorrentía, mediante el cálculo de la lluvia de diseño.

Una descripción más amplia de los modelos aquí mencionados puede consultarse en la bibliografía especializada o bien en las refs 5 y 6.

3.1 Características principales de los diferentes modelos lluvia-escorrentía.

Tomando en cuenta la información que requieren los métodos para calcular escorrentías se han clasificado en los tipos siguientes (ref 7).

- a) Modelos empíricos o directos
- b) Modelos hidrológicos
- c) Modelos de simulación

Sus principales características se describen a continuación:

3.1.a Modelos empíricos o directos

Estos modelos sólo requieren información de las características

físicas de la cuenca como son: área, pendiente media del cauce, etc., e información climatológica para su aplicación. Es común su uso en cuencas de escasa información hidrológica.

En México se han usado los métodos empíricos, particularmente el método racional, debido a su fácil aplicación y a la escasa información meteorológica de que se dispone. También se usan los métodos de envolventes de gastos máximos y fórmulas empíricas como la de Creager, como último recurso, cuando se dispone únicamente de las características fisiográficas de la cuenca. Si se desea conocer la forma del hidrograma aplicando los modelos empíricos, generalmente, se recurre al uso del modelo de Snyder, o bien, al del Hidrograma Unitario Triangular, para calcular el hidrograma unitario de la cuenca, y de ahí, el hidrograma de diseño. (ref 6).

3.1.b Modelos Hidrológicos

A diferencia de los modelos empíricos, los hidrológicos requieren de mediciones simultáneas de precipitación y escurrimiento. Los de uso común consideran que existe una relación lineal entre estos dos fenómenos.

Dentro de este tipo de modelos están el del hidrograma unitario y otros, mediante los cuales se pueden calcular los escurrimientos y su variación en el tiempo. Generalmente requieren de mucha

información para su calibración cuando se desea aplicarlos a estudios importantes.

3.1.c Modelos de simulación

Estos modelos se apoyan en el manejo de gran cantidad de información tanto hidrometeorológica como fisiográfica de la cuenca, misma que es procesada por medio de programas de cómputo.

Este tipo de modelos, son los que tratan de representar al ciclo hidrológico, en lo que respecta al escurrimiento, de una manera más rigurosa, ya que consideran al escurrimiento superficial, subsuperficial y subterráneo; además de que toman en cuenta el almacenamiento en depresiones. El análisis de una cuenca se hace por partes, analizando cada subcuenca por separado y los resultados se integran posteriormente al punto de interés (salida de la cuenca estudiada). Ejemplos típicos de estos modelos son el de Stanford y el de U.S.G.S. (Departamento de Estudios Geológicos de Estados Unidos).

3.2 Descripción de algunos métodos de relación lluvia-escurrimiento

En lo que sigue se describen algunos métodos para calcular el

gasto de diseño en función de la lluvia de diseño y de las características fisiográficas y climatológicas de la cuenca.

3.2.1 Método racional

Desde hace mucho tiempo, se ha intentado encontrar una buena representación mediante fórmulas sencillas, de la relación entre la lluvia y el escurrimiento. En la actualidad existen diferentes métodos de este tipo, de los cuales el método racional puede considerarse como representativo, ya que de él se han derivado otros que pretenden explicar mejor la relación entre lo que llueve y el escurrimiento que se produce.

La fórmula racional esta definida por

$$Q_p = 2.78 C i A \quad (3.1)$$

- donde
- Q_p gasto máximo de la avenida, en m^3/s .
 - C coeficiente de escurrimiento.
 - i intensidad promedio de la lluvia correspondiente a una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, en cm/h .
 - A área de la cuenca en km^2 .
- 2.78** constante que toma en cuenta las unidades del sistema métrico.

La hipótesis fundamental del método es que si la duración de la lluvia es igual o mayor al tiempo de concentración se llega a una condición de equilibrio entre la intensidad de la lluvia y el gasto que escurre.

Existen muchos criterios para estimar el tiempo de concentración de la cuenca, t_c , el más utilizado en el medio nacional es el dado por la fórmula de Kirpich.

$$t_c = \left[\frac{0.87L^2}{H} \right]^{0.385} \quad (3.2)$$

donde H desnivel en el cauce principal entre el inicio y punto de interés, en m.

L longitud del cauce principal, en km.

t_c tiempo de concentración en h.

3.2.2 Método del hidrograma unitario

El método del hidrograma unitario es, dentro de los métodos de relación lluvia-escorrimento, el que ha alcanzado mayor aceptación cuando se dispone de información confiable de precipitación y escorrimento producidos por una tormenta.

Las principales hipótesis en las que basa el método son:

- a) La lluvia efectiva se distribuye uniformemente en toda la cuenca y en el tiempo.
- b) Se cumple el principio de linealidad (superposición de causas y efectos).

De estas hipótesis, probablemente la que resulta más difícil de cumplir es la que se refiere a la distribución espacial y temporal de la lluvia, que puede considerarse uniforme en cuencas de área pequeña y lluvias de corta duración, donde se puede aceptar que la intensidad pudiera permanecer constante. Sin embargo, en la práctica estos casos difícilmente se presentan por lo que en la aplicación del método en su versión original, deben tomarse en cuenta las siguientes limitaciones.

- 1) Solamente se conoce el hidrograma unitario para lluvias que tengan la misma duración que la que se utiliza en la calibración
- 2) No toma en cuenta las variaciones de la intensidad de la lluvia dentro de la duración de la tormenta

Estas limitaciones se han resuelto sustancialmente mediante métodos que toman en cuenta la distribución temporal de la lluvia, y se han desarrollado con base en los principios básicos del hidrograma unitario. Uno de los principales métodos es el

del Hidrograma Unitario Instantáneo que se describe a continuación.

Si se considera que una lluvia efectiva uniforme de un milímetro en una duración pequeña, $d=\Delta t$, produce un hidrograma unitario con ordenadas $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$, a intervalos de la misma duración, Δt , entonces, de acuerdo con los principios de linealidad y superposición, se obtiene que un hidrograma de lluvia efectiva con valores de $P_1, P_2, P_3, \dots, P_m$, a intervalos Δt , provocará un hidrograma cuyas ordenadas estarán dadas por

$$Q_t = \sum_{k=1}^m P_k U_{t-k\Delta t} \quad (3.3)$$

Desarrollando la ecuación 3.3 se obtiene

$$Q_1 = U_1 P_1$$

$$Q_2 = U_1 P_2 + U_2 P_1$$

$$Q_3 = U_1 P_3 + U_2 P_2 + U_3 P_1$$

⋮

$$Q_k = U_1 P_k + U_2 P_{k-1} + \dots + U_k P_1$$

Mediante el sistema de ecuaciones 3.3 puede calcularse el hidrograma de escurrimiento directo, si se conoce el hidrograma unitario, o bien, puede resolverse para conocer las ordenadas del hidrograma unitario si se conocen los valores de lluvias P_i y

escurrimientos Q_1 durante una tormenta.

Para resolverse, bastaría despejar a U_1 de la primera ecuación, sustituyendo U_1 en la segunda, despejar U_2 , etc. Sin embargo, los valores así obtenidos presentan, en general, errores dando valores positivos y negativos, en algunos casos ilógicos; esto puede deberse a que las mediciones tanto de lluvias como de escurrimientos contienen cierto error, a errores propios del método y los que se cometen al separar el escurrimiento base del total, etc.

Este problema se ha resuelto en gran parte, aplicando al sistema 3.3 el criterio de mínimos cuadrados para minimizar la suma del cuadrado de los errores entre los valores medidos y los calculados, (ref B).

El método del hidrograma unitario se ha aplicado, entre otras, a la cuenca del Papaloapan y del Papagayo (ref 7), haciendo calibraciones para varias tormentas. Se puede observar que el método da resultados confiables cuando se tiene buena información pluviográfica e hidrométrica.

La aplicación de métodos como el descrito en este inciso, proporcionan un hidrograma de diseño, útil en el diseño de presas, de alcantarillas o puentes, donde es posible una

regularización del escurrimiento aguas arriba. En obras de drenaje pequeñas, existe el problema de que normalmente no existen registros simultáneos de lluvias y escurrimientos, lo que hace imposible su aplicación.

3.2.3 Métodos que se basan en hidrogramas unitarios aproximados

Para calcular el hidrograma de diseño en cuencas donde no se dispone de registros de lluvias y escurrimientos, se han diseñado métodos simplificados que tratan de simular el hidrograma que puede ocurrir en una cuenca. Se basan en obtener un hidrograma unitario aproximado llamado *sintético*, en función de las características fisiográficas de la cuenca. Entre los principales se encuentran el de Snyder, (ref 9), el del Hidrograma Unitario Triangular propuesto por la USBR, (ref 10), y el Hidrograma Unitario Adimensional propuesto por el Soil Conservation Service, (ref 6).

4. ANALISIS DE LOS METODOS EXISTENTES PARA DETERMINAR LLUVIAS DE DISEÑO EN CUENCAS PEQUEÑAS

En este subcapítulo se describen en forma sucinta los métodos tradicionales para analizar estadísticamente la precipitación cuando se desea diseñar una obra de drenaje. Como se verá en el capítulo 5, estos métodos tienen la principal desventaja de que se apoyan exclusivamente en la información de una sola estación (la más cercana), sin tomar en cuenta la recabada en la región. Esto conduce frecuentemente a errores debido a que, como es común, las estaciones cuentan con pocos años de registro donde la muestra podría no ser representativa de la población, o bien los registros no han sido adecuadamente tomados y por lo tanto su uso puede conducir a estimaciones equivocadas de lluvias y consecuentemente de escurrimientos.

Esto se subsana, al menos parcialmente, cuando se analiza la información a nivel regional, lo que permite detectar alguna inconsistencia entre los registros de las estaciones de la zona.

Los métodos tradicionales se basan en sintetizar la información de la precipitación a través de las curvas $i-d-Tr$, para cada estación y después, para una obra determinada, escoger las curvas que representen a la estación más cercana al sitio en estudio.

Para calcular la relación $(i-d-Tr)$, existen básicamente dos métodos:

- a) Intensidad- periodo de retorno
- b) Correlación lineal múltiple

4.1 Presentación de la información

En la tabla 4.1 se muestra la forma en que debe ordenarse la información para calcular las curvas $i-d-Tr$. Para la fórmula se sigue el siguiente procedimiento:

1. Se define una duración de la lluvia
2. De cada tormenta registrada se obtiene la más alta intensidad de la lluvia para la duración definida en 1.

3. Para cada año de registro, se obtiene el más alto valor escogido en 2.

4. Para cualquier otra duración, se regresa al punto 1

TABLA 4.1 INTENSIDADES MAXIMAS DE LLUVIA EN mm/h PARA LA ESTACION COINTZIO, GTO.

AÑO	D U R A C I O N E S E N M I N.									
	5	10	15	20	30	45	60	80	100	120.
1952	45.60	32.40	28.00	24.00	23.00	46.67	14.63	11.16	9.00	7.50
1953	85.00	71.28	61.40	52.80	40.00	31.33	24.17	18.38	14.90	12.50
1954	70.00	66.00	64.00	57.00	46.00	30.74	23.11	17.39	13.92	11.60
1957	85.71	76.88	70.00	61.50	47.75	35.33	31.82	24.86	20.01	16.10
1958	88.29	87.00	78.00	69.00	55.00	40.00	33.53	23.28	21.80	18.52
1958	120.00	90.00	79.00	73.50	53.40	38.40	30.21	23.28	19.13	16.25
1962	120.00	78.00	64.00	52.00	40.00	27.83	21.75	17.17	14.40	12.57
1963	120.00	82.50	70.00	60.22	48.33	40.00	31.81	23.88	19.12	15.95
1964	120.00	79.50	66.00	57.00	45.00	30.83	24.75	19.88	15.90	13.25
1965	60.00	46.80	40.44	37.50	30.00	24.00	21.00	18.35	16.32	13.83
1968	100.00	81.33	73.33	68.67	58.83	45.08	33.10	30.98	25.92	22.82
1969	96.00	78.00	59.14	49.56	39.30	30.42	25.12	20.92	17.28	14.95
1970	60.00	45.00	38.50	34.50	26.27	18.57	14.03	10.56	9.86	8.93
1971	60.00	57.00	45.00	39.00	31.00	24.87	20.03	15.11	12.16	10.19

4.2 Método intensidad-periodo de retorno

Este método consiste en ajustar una función de distribución a una muestra de intensidades máximas, en los N años de registro y para una duración determinada.

Consiste básicamente en los pasos siguientes :

1. Se escoge una duración de la lluvia, $d=d_1$
2. Se ordena la información pluviográfica de mayor a menor y se calcula su periodo de retorno.
3. Se ajusta una o más funciones de distribución a las intensidades máximas para la duración del paso 1, $d=d_1$
4. Se propone otra duración y se repite el procedimiento.

Así, por ejemplo, si se desea ajustar las intensidades a la distribución Gumbel, se tendrá una función ajustada para cada duración, esto es:

$$I_1 = B_1 - \frac{1}{A_1} \text{Ln Ln } \frac{T}{T-1} \quad \text{para } d=d_1$$

$$I_2 = B_2 - \frac{1}{A_2} \text{Ln Ln } \frac{T}{T-1} \quad \text{para } d=d_2$$

en general

$$I_n = B_n - \frac{1}{A_n} \text{Ln Ln } \frac{T}{T-1} \quad \text{Para } d=d_n$$

y si las intensidades se ajustan a una función de distribución normal se tendrá también una función para cada duración, de la forma:

$$I_1 = a_1 + b_1 Z_1 \quad \text{para } d=d_1$$

$$I_2 = a_2 + b_2 Z_2 \quad \text{para } d=d_2$$

y en general
$$I_n = a_n + b_n Z_n \quad \text{para } d=d_n$$

Donde $Z = f[F(x)]$, y $F(x) = 1 - 1/T$ siendo T el periodo de retorno.

La variable Z se obtiene de tablas estandarizadas, o bien de las fórmulas aproximadas que se proponen en la ref 14.

De esta manera cada función ajustada estará apoyada en una duración y por lo tanto se podrán definir las curvas intensidad-duración-periodo de retorno.

Las constantes A y B de la función Gumbel y las a y b de la Normal, pueden calcularse fácilmente por un análisis de regresión lineal simple, ref 16. Aquí se muestran algunos resultados finales de los ajustes realizados.

Como puede observarse, este procedimiento deberá aplicarse para cada duración y para las funciones de distribución que se desee, seleccionando después la que mejor represente la información de

que se parte, esto es, la que resulte de mejor ajuste. La gran cantidad de información que se maneja hace necesario y conveniente utilizar un programa de cómputo ya que de otra manera resulta muy laboriosa su aplicación.

Con la finalidad de analizar estadísticamente la información pluviográfica en forma puntual para cada estación de la cuenca alta del Río Lerma, se aplicó este método a las 17 estaciones pluviográficas existentes, y se encontró que para las funciones de distribución Gumbel y Normal se logra el mejor ajuste. En la tabla 4.2 se dan los resultados del ajuste a los datos de intensidades para duraciones de 30, 60 y 240 min para las estaciones Cointzio, Atlacomulco y Corrales, y en las figs 4.1.a, 4.1.b, 4.2.a, 4.2.b, 4.3.a y 4.3.b se muestran las rectas de mejor ajuste. No se incluyen los resultados de las 17 estaciones ya que su comportamiento es similar.

TABLA 4.2 RESUMEN DE RESULTADOS DEL AJUSTE A LAS FUNCIONES DE DISTRIBUCION GUMBEL Y NORMAL EN TRES ESTACIONES

a) Función de distribución Gumbel

ESTACION	DURACIONES		
	30 min	60 min	240 min
COINTZIO	A= 0.109078 B=36.102993	0.18751 22.15205	0.546390 6.472370
ATLACOMULCO	A= 0.083620 B=47.536700	0.14047 28.36810	0.424480 8.649930
CORRALES	A= 0.061400 B=33.666700	0.10461 21.56940	0.405770 7.811150

b) Función de distribución Normal

ESTACION	DURACIONES		
	30 min	60 min	240 min
COINTZIO	a=40.94565 b=11.51630	24.9700 6.5700	7.3956 2.1674
ATLACOMULCO	a=58.83660 b=15.26910	32.1182 8.8199	9.8910 2.8323
CORRALES	a=42.09560 b=19.83160	26.4856 11.7760	9.0812 3.1051

PAPEL GUMBEL

FIG. 4.1.a. Función de distribución Gumbel.
ESTACION : "PRESA COINTZIO"

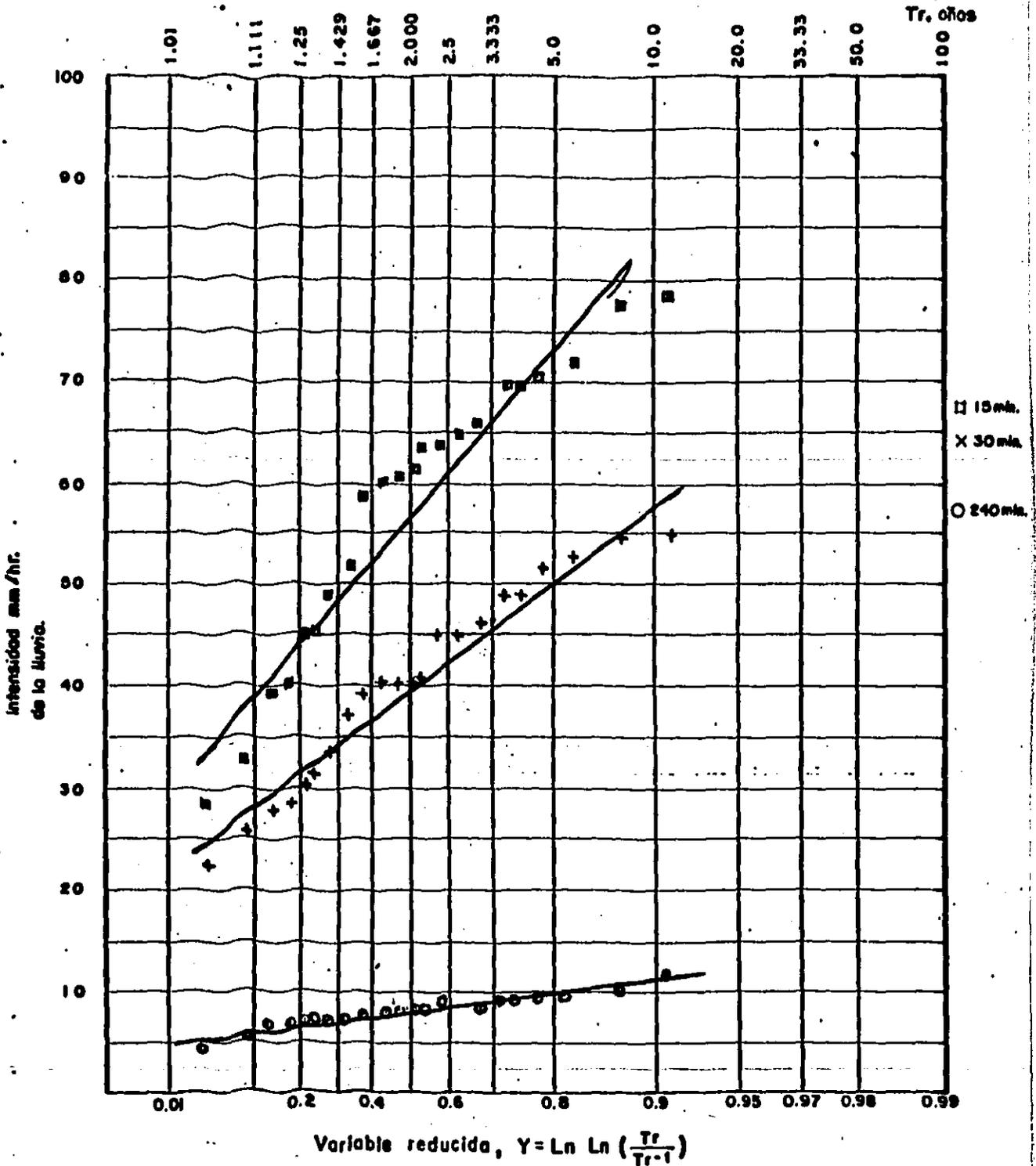
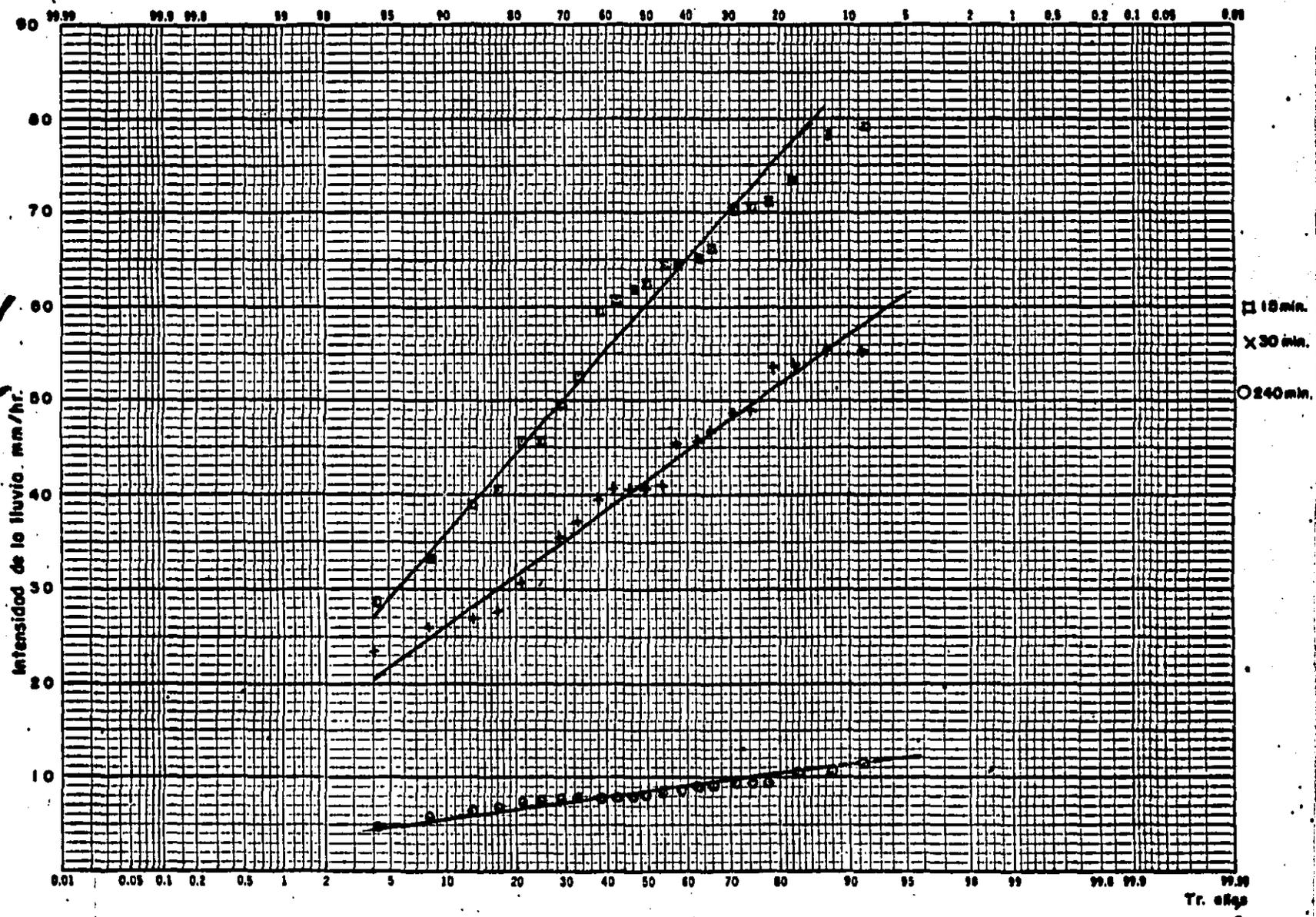
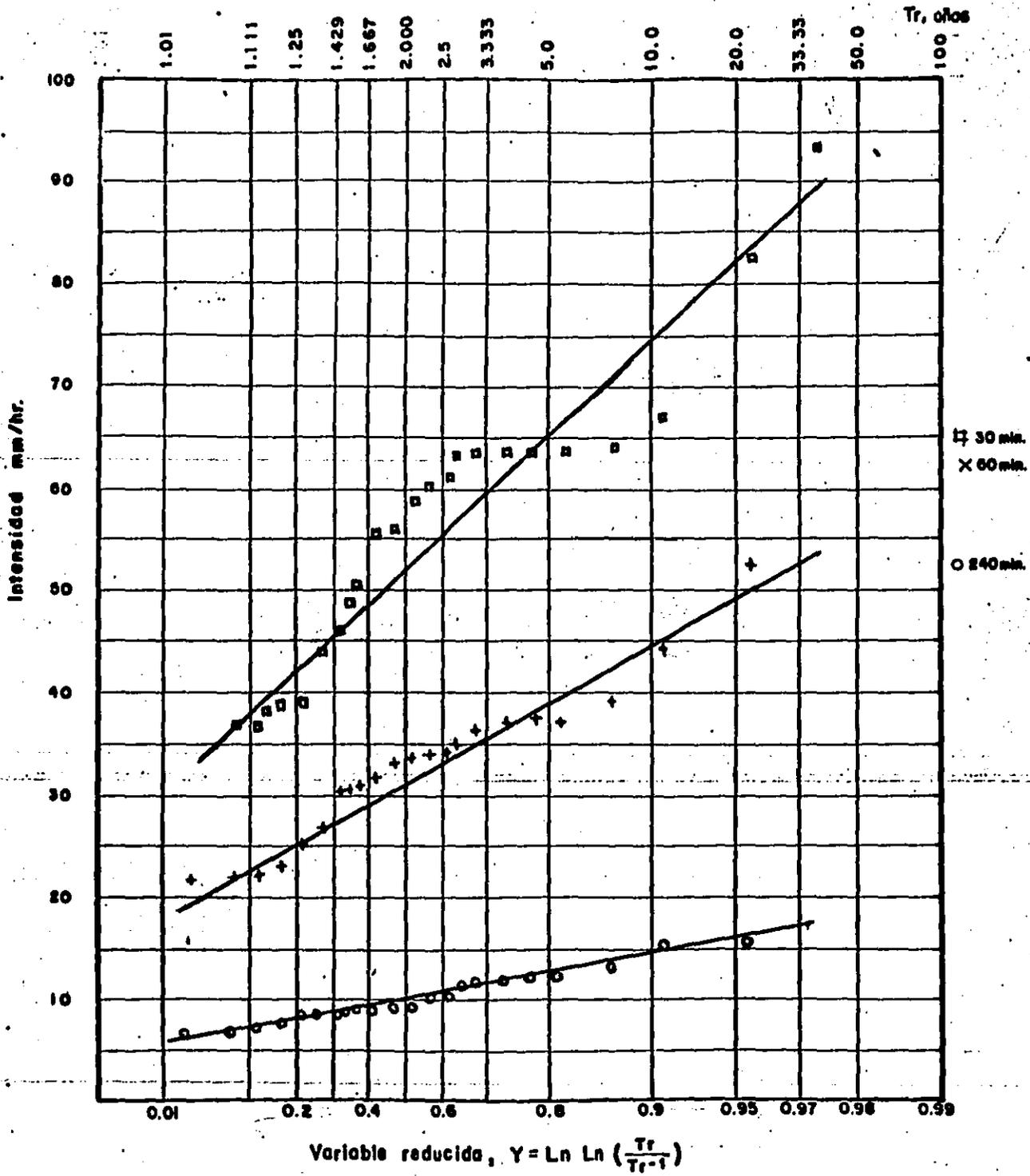


FIG. 4.1.b. Función de distribución normal.
"ESTACION COINTZIO."

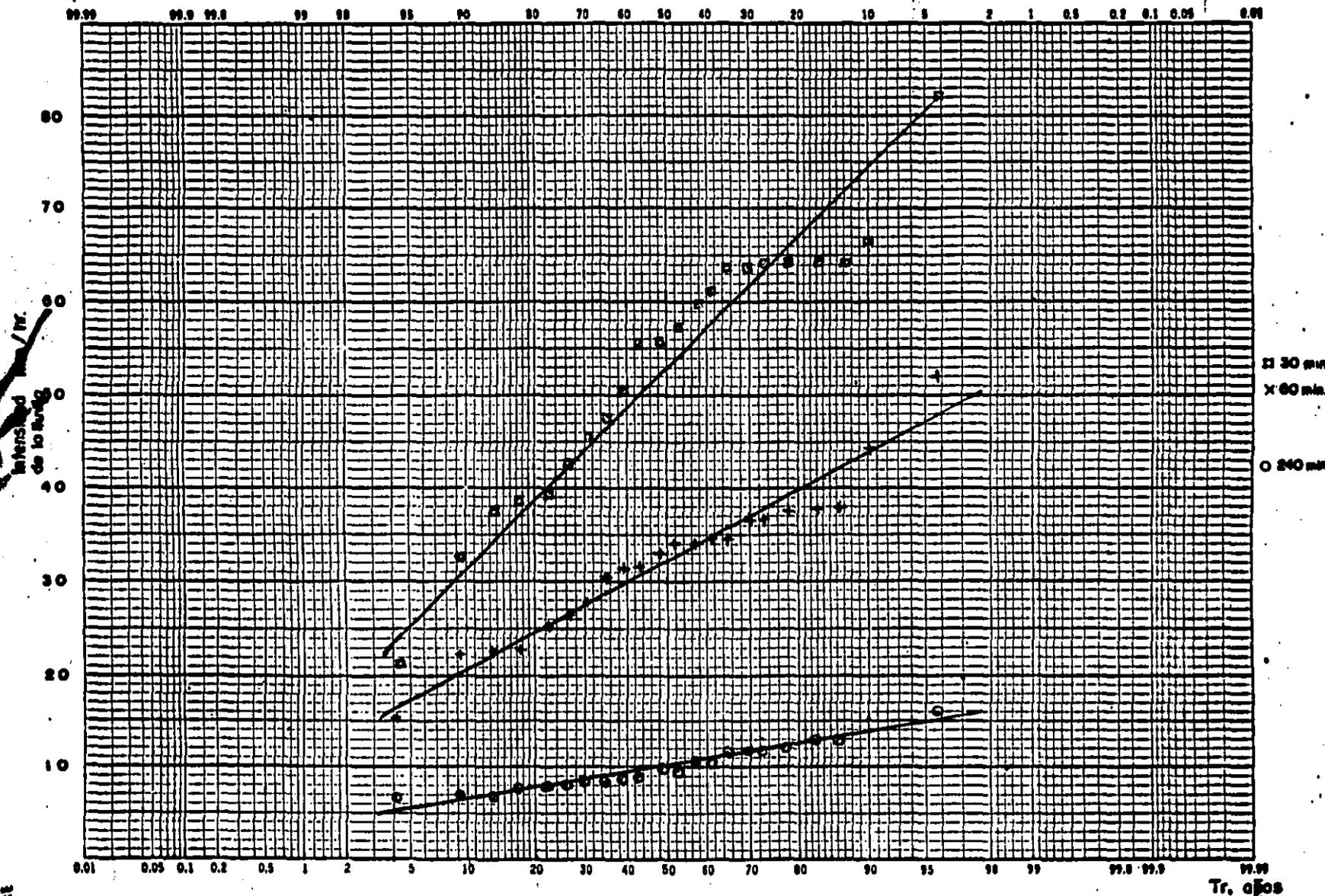


PAPEL GUMBEL

4.2.o. FUNCION DE DISTRIBUCION GUMBEL
ESTACION ATLACOMULCO.



4.2.b. FUNCION DE DISTRIBUCION NORMAL.
ESTACION ATLACOMULCO.



PAPEL GUMBEL

FIG. 4.3.a. FUNCION DE DISTRIBUCION GUMBEL
ESTACION CORRALES.

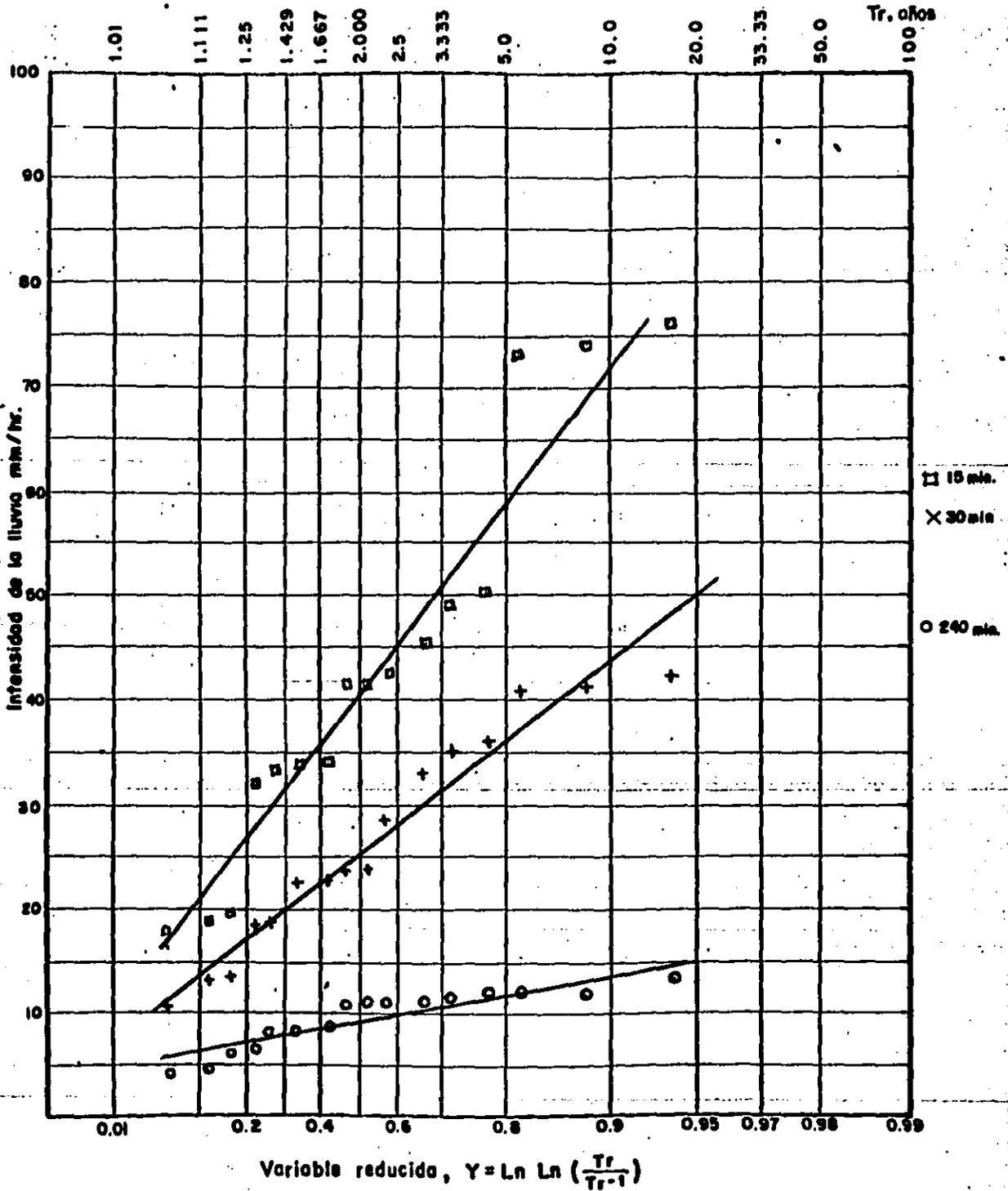
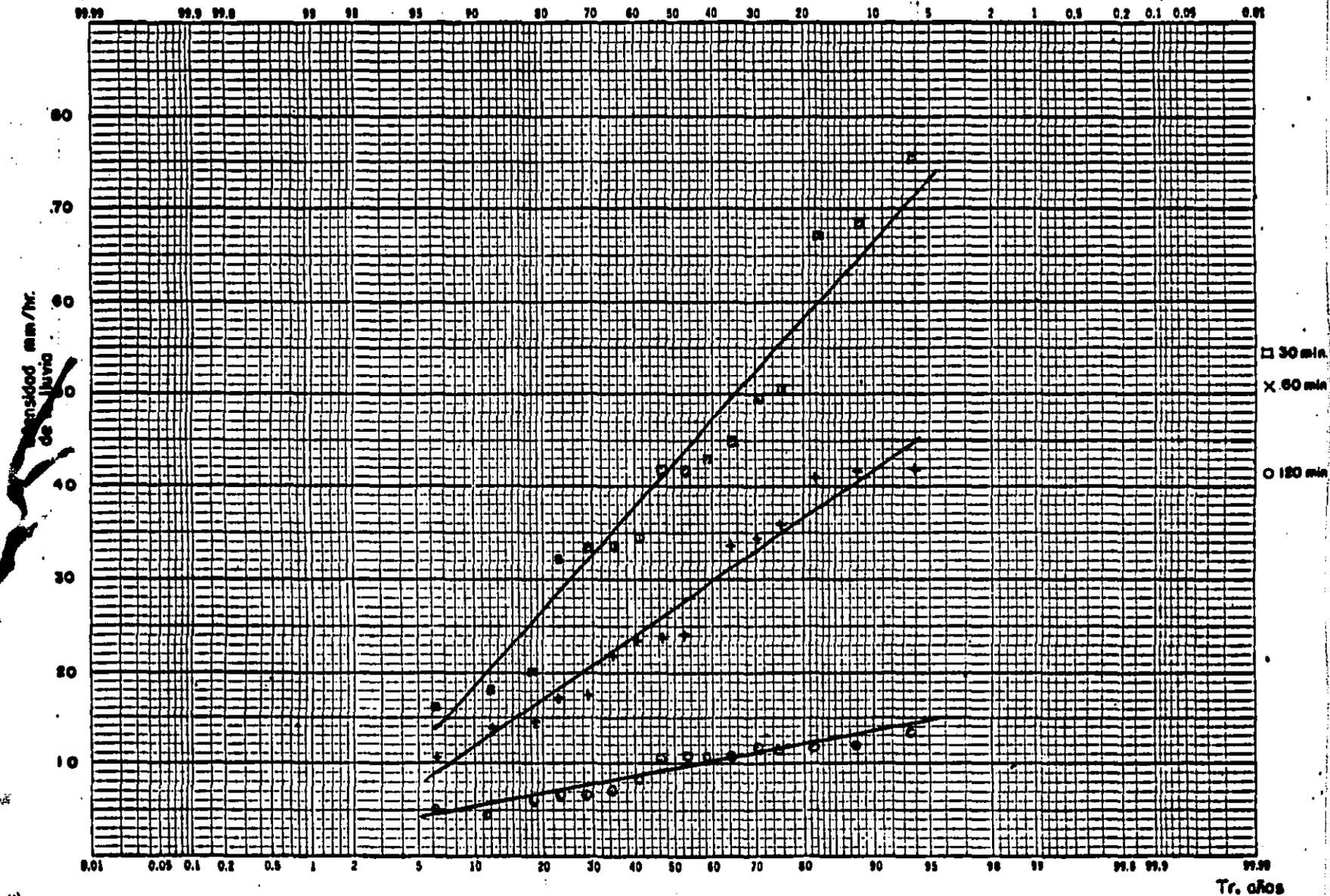


FIG. 4.3.b. FUNCION DE DISTRIBUCION NORMAL.
ESTACION CORRALES.



4.3 Método de correlación lineal múltiple

El análisis estadístico para calcular la relación $i-d-Tr$ también puede realizarse ajustando a los datos de intensidades que se muestran en la tabla 4.1, una función del tipo

$$i = \frac{k \cdot Tr^m}{d^n} \quad (4.1)$$

donde i intensidad de la lluvia en mm/hr
 Tr periodo de retorno en años
 k, m y n parámetros de la función que se calculan mediante el ajuste a los datos registrados
 d duración de la lluvia, en h

Tomando logaritmos a ambos lados de la ec 4.1, ésta se transforma en una ecuación lineal del tipo:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad (4.2)$$

donde $y = \ln i$, $x_1 = \ln Tr$, $x_2 = \ln d$
 $a_0 = \ln k$, $a_1 = m$ y $a_2 = -n$

Las constantes de la ec 4.2, a_0 , a_1 y a_2 , se pueden obtener resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones, que se obtiene de un análisis de regresión lineal múltiple.

$$\begin{aligned} \Sigma y_i &= n a_0 + a_1 \Sigma x_i + a_2 \Sigma x_i^2 \\ \Sigma x_i y_i &= a_0 \Sigma x_i + a_1 \Sigma x_i^2 + a_2 \Sigma x_i x_i^2 \\ \Sigma x_i^2 y_i &= a_0 \Sigma x_i^2 + a_1 \Sigma x_i x_i^2 + a_2 \Sigma (x_i^3)^2 \end{aligned}$$

Así por ejemplo, para ajustar los datos de la tabla 4.1, de la estación Cointzio, a la función 4.1, sólo basta ordenar los datos de mayor a menor y calcular las sumas del sistema anterior para finalmente resolverlo para a_0 , a_1 y a_2 .

Para este caso resultó que $a_0=5.94176$, $a_1=0.282275$ y $a_2=0.754902$ y consecuentemente $k=380.604$, $m=0.282275$ y $n=0.754902$.

Reemplazando valores, la ec 4.1 queda

$$i = 380.604 Tr^{0.282275} d^{-0.754902} \quad (4.3)$$

En la ec anterior quedan sintetizadas las tres variables de interés i , d y Tr , en la que, definiendo un periodo de retorno, Tr , se puede obtener una tormenta de cualquier duración e intensidad.

5. REGIONALIZACION DE LLUVIAS MAXIMAS

En este capítulo se describe un método para calcular la lluvia de diseño con base en un análisis de la información meteorológica en forma regional. El método es particularmente útil para aquellas regiones donde no hay información homogénea, esto es, registros lo suficientemente amplios y confiables, cuyo uso permita obtener estimaciones consistentes (de lluvias) en una misma región. En cuencas donde existen pocas estaciones pluviográficas también puede ser conveniente su aplicación, ya que parte de una hipótesis que considera la información climatológica disponible en la región; es común, por ejemplo, que la información pluviométrica cubra un número suficiente de años, de tal manera que los registros de lluvias máximas en 24 horas y de medias anuales resulten confiables. Las estaciones pluviográficas, en cambio, normalmente son escasas, y en algunos casos sus registros no son confiables.

La principal condición que se debe cumplir en una cuenca para realizar estudios de regionalización, es que sea meteorológicamente homogénea, lo cual significa que las causas que originan la precipitación, deben ser similares en cualquier punto de la región. Un ejemplo de esto es la cuenca alta del río Lerma, ya que en ella las lluvias son predominantemente convectivas debido a que se encuentra ubicada en una zona de escasa influencia ciclónica. ver fig 5.1.

En relación con los métodos tradicionales descritos en el capítulo 4, el cálculo de la lluvia de diseño mediante métodos de regionalización ofrece la siguiente ventaja principal:

Para regionalizar una cuenca homogénea se considera toda la información recabada, haciendo posible definir en forma precisa las variaciones de precipitación de un punto respecto a otro de la cuenca. Esto se refleja, por ejemplo, en un plano de isoyetas medias anuales. Un análisis de este tipo permite detectar las incoherencias, en la información recabada, entre estaciones, como puede ser registros "disparados", resultados ilógicos debido al análisis en estaciones con pocos años de registro, etc., donde resulta difícil creer la existencia de microclimas. Los métodos tradicionales, en cambio, consideran la información puntual, sin tomar en cuenta la posible incongruencia respecto a otras estaciones dentro de la misma zona. Además, cuando existen pocas



Fig.-5.1 Ubicación de la cuenca alta del Río Lerma.

estaciones pluviográficas, frecuentemente se recurre a una de ellas (la más cercana), para estimar la tormenta de diseño, sin considerar las diferencias de precipitación que pueden existir dentro de la cuenca y que se pueden observar, como ya se mencionó, analizando toda la información disponible.

En resumen, calcular la tormenta de diseño en términos de la regionalización de la cuenca, implica agrupar toda la información disponible, seleccionando aquella que resulte congruente con todas las estaciones de la región y filtrando la que presente características dudosas.

Para lograr lo anterior, el análisis se inicia partiendo de la hipótesis de que en una región cualquiera, donde predominen las lluvias convectivas, las diferencias que caracterizan una subregión de otra pueden sintetizarse en un plano que muestre las características climatológicas de la región, el cual puede ser de isoyetas medias anuales, de isoyetas medias para precipitaciones máximas en 24 horas o cualquier otra que indique las características climatológicas de la región. Esto significa que en una región meteorológicamente homogénea, las isoyetas medias de altura de precipitación, tienen la misma forma para cualquier duración de la tormenta cambiando solamente su valor.

Si lo anterior se cumple, entonces es posible apoyarse en un

plano de isoyetas medias anuales para caracterizar la cuenca (planos base) y, mediante la información pluviográfica (precipitación para otras duraciones), construir planos de isoyetas para otra duración cualquiera, solamente multiplicando por un factor. Esta hipótesis ha sido probada tanto en México (ref 6) como en otros lugares (ref 4).

Considerando la hipótesis de partida, para construir los planos base, es necesario analizar la información pluviométrica en forma aislada para cada estación, y a partir de ésta hacer el estudio regional.

5.1 Análisis probabilístico de la información

Para considerar estrictamente las lluvias de tipo convectivo caracterizadas por su corta duración, el análisis de la información se hizo para duraciones menores o iguales a 4 horas.

En la tabla 5.1 se muestran las estaciones pluviográficas existentes en la cuenca alta de río Lerma, donde se incluye también el número de años de registro y sus coordenadas geográficas.

Obsérvese que la estación Querétaro es una de las que tienen menos años de registro y se ubica en la parte más seca de la

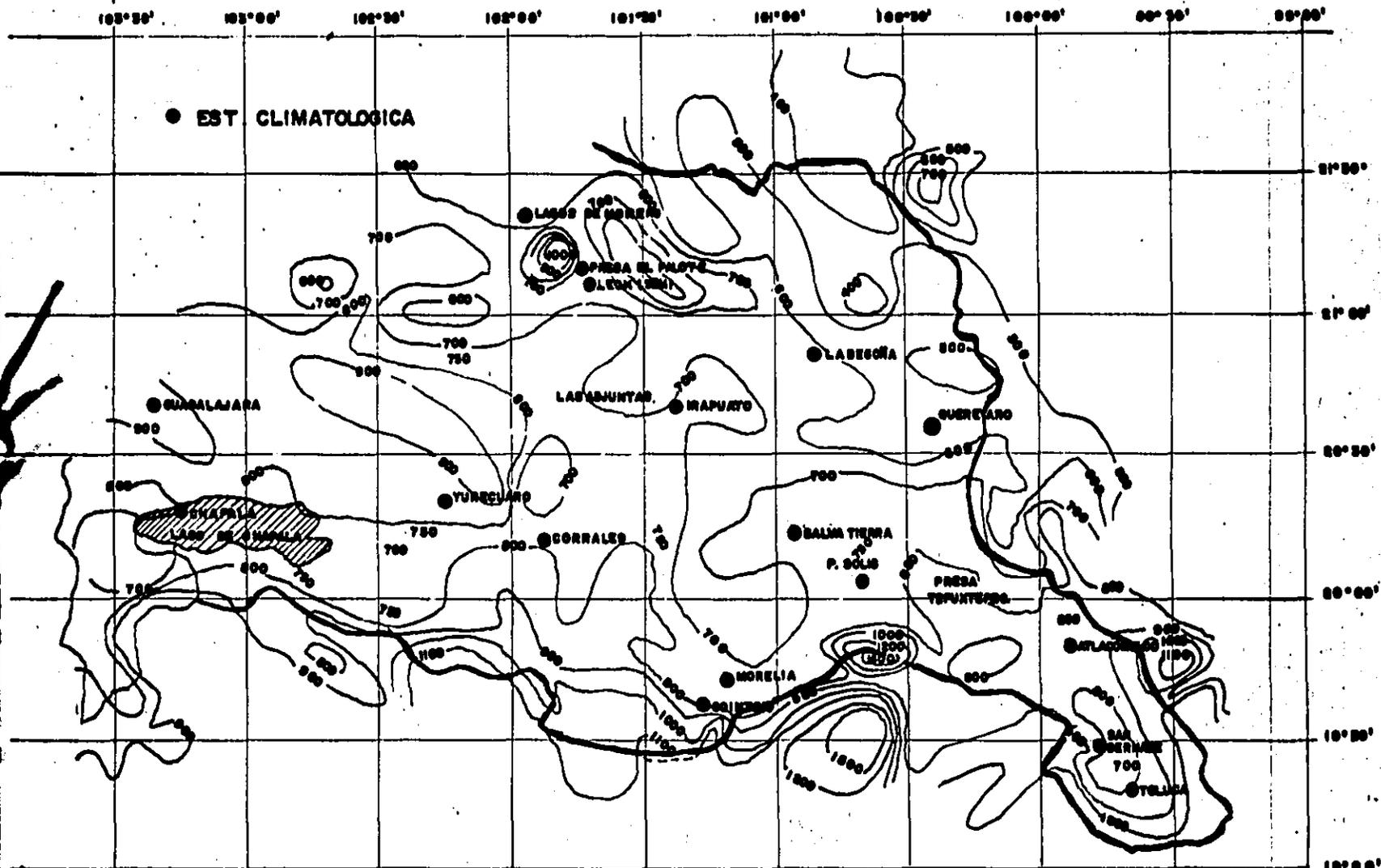


Fig.5.2 Isoyetas Medias Anuales en la Cuenca Alta del RIO LERMA.

TABLA 5.1 ESTACIONES PLUVIOGRAFICAS EN LA CUENCA ALTA DEL RIO LERMA

No	ESTACION	ESTADO	COORDENADAS		AÑOS DE REGISTRO
			NORTE	OESTE	
1	Hacienda la Y	Méx	19 28	99 42	17
2	San Bernabe	Méx	19 28	99 42	9
3	Atlacomulco	Méx	19 14	99 36	22
4	Presa Solis	Gto	20 03	100 40	32
5	Querétaro	Gro	20 36	100 23	11
6	Salvatierra	Gto	20 13	100 53	17
7	Tepuxtepec	Gto	20 00	100 14	19
8	Presa Coitzio	Mich	19 37	101 17	22
9	Corrales	Mich	20 22	101 52	14
10	Yurécuaro	Mich	20 21	102 16	20
11	Las Adjuntas	Mich	20 41	101 51	14
12	Guadalajara	Jal	20 41	103 30	16
13	Lagos de Moreno	Jal	21 22	101 56	16
14	La Begoña	Gto	20 51	100 49	11
15	León	Gto	21 07	101 41	19
16	El palote	Gto	21 10	101 42	19
17	Chapala	Jal	20 14	103 11	8

cuenca, fig 5.2.

Se hizo el análisis estadístico a las 17 estaciones pluviográficas de la cuenca, ajustando a cada una de ellas y para duraciones de 15, 20, 30, 60, 80, 100, 180 y 240 min las funciones Gumbel, Normal, Lognormal, Gamma y Exponencial. Se encontró que las de mejor ajuste a los datos de intensidades fueron 5 estaciones para la función Normal y 12 para la función Gumbel. En las figs 5.3, 5.4 y 5.5 se muestran las curvas de probabilidad acumulada para las estaciones Coitzio, Atlacomulco y Corrales de las funciones Gumbel y Normal ajustadas a los datos de intensidades para una duración de 30 min; en ellas se observa

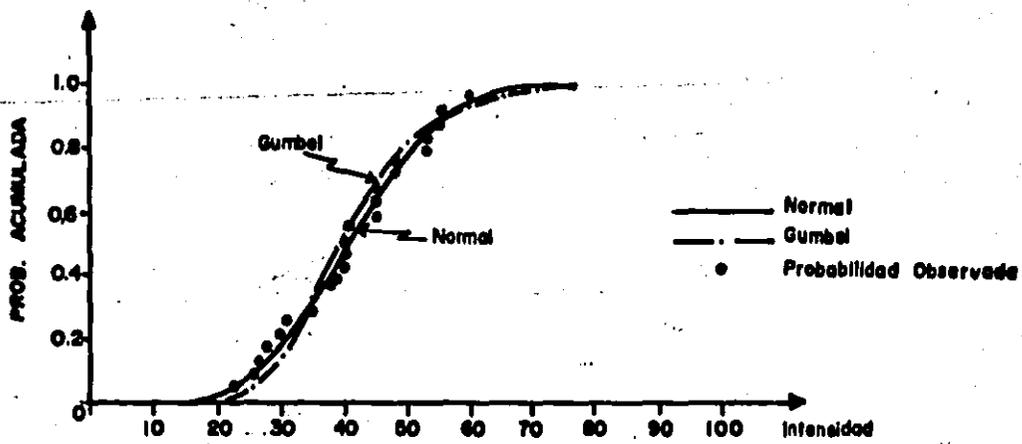


Fig. 53 Funciones de distribución acumulada para una duración de 30 min. est. Coitzio, Mich.

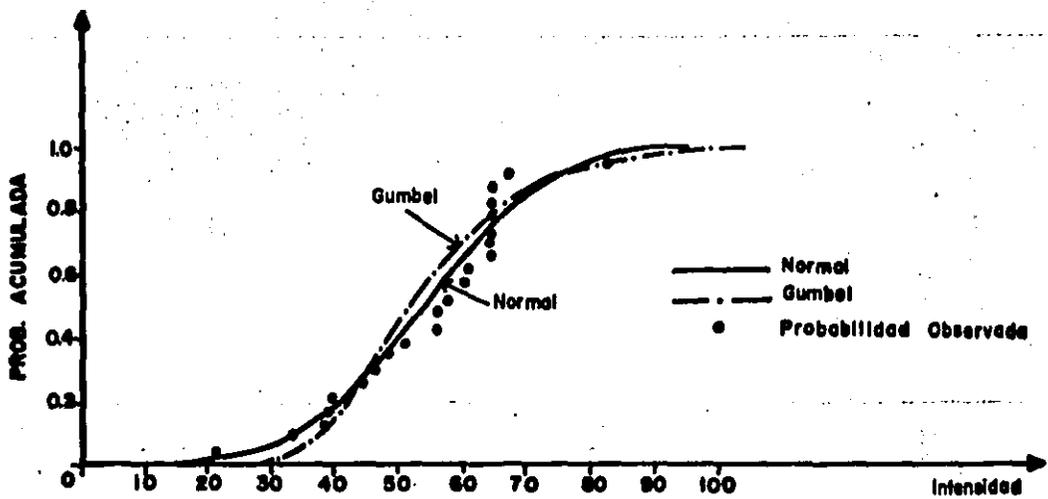


Fig. 5.4 Funciones de distribución acumulada est. Atzacmulco, Mex. est.

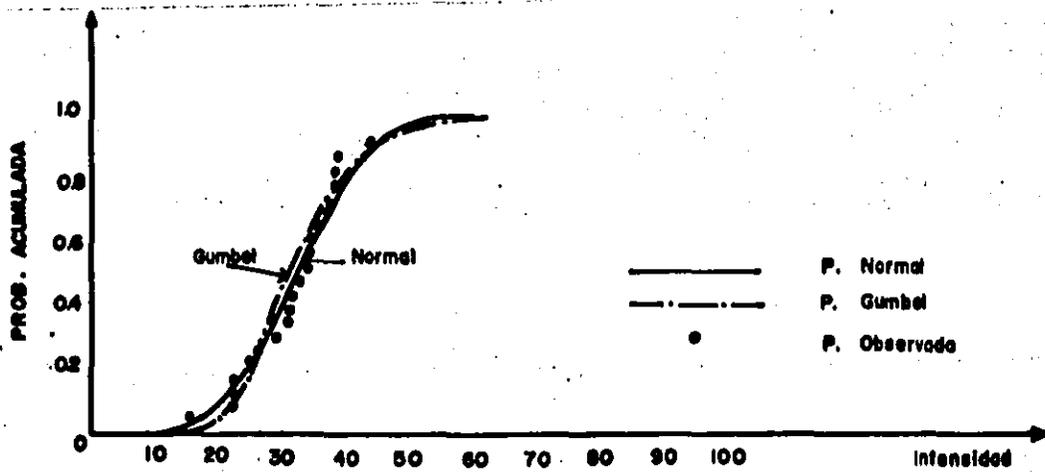


Fig. 5.5 Funciones de distribución, acumulada para una duración de 30 min. est. Corrales, Mex.

que las curvas de probabilidades de ambas funciones es semejante, pudiendo usar indistintamente cualquiera de las dos. En la tabla 5.2 se muestran los resultados del ajuste de las funciones de distribución Gumbel y Normal a los datos de intensidades máximas para una duración de 30 min y un periodo de retorno de 10 años, obtenido después de calcular los parámetros de la función. Se muestra también la comparación entre los resultados de las dos funciones de distribución, donde se observa que sólo en una estación se tienen diferencias mayores de 10%, el resto de estaciones presentan diferencias menores del 8%, lo que permite usar indistintamente cualquiera de estas dos funciones de distribución. Sin embargo, dado que la función Gumbel resultó mejor en la mayoría de los casos (12 de las 17 estaciones), se decidió tomarla como representativa de todas las estaciones de la cuenca.

5.2 Análisis regional de la información

Con el objeto de construir los planos de apoyo para cambiar a cualquier duración y periodo de retorno, se hizo un análisis de la información en forma regional.

Tomando en cuenta que las tormentas convectivas, que generan los gastos de pico más importantes tienen una duración menor de 2 horas, se escogió una duración de 30 min para construir el plano

base. Se tomó, también, como referencia un periodo de retorno de 10 años debido a que la mayoría de las estaciones tienen entre 10 y 25 años registro, lo que permite detectar más fácilmente las

TABLA 5.2 INTENSIDADES MAXIMAS DE PRECIPITACION (mm/h) PARA UNA DURACION DE 30 MIN Y UN PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS

No	ESTACION	FUNCION DE DISTRIBUCION (1)	F. NORMAL	F. GUMBEL	COMP
			(2)	(3)	(2)/(3)
1	Hacienda la Y	Gumbel	66.88	68.81	0.96
2	San Bernabe	Normal	62.99	54.86	1.14
3	Atzacmulco	Normal	73.38	74.45	0.99
4	Presa Solis	Gumbel	60.50	62.87	0.97
5	Querétaro	Gumbel	36.58	38.09	0.96
6	Salvatierra	Gumbel	59.62	61.68	0.97
7	Tepuxtepec	Normal	80.62	85.33	0.94
8	Presa Coitzaco	Gumbel	55.68	56.73	0.98
9	Corrales	Normal	64.84	70.47	0.92
10	Yurécuaro	Gumbel	77.39	80.77	0.96
11	Las Adjuntas	Gumbel	85.27	89.90	0.95
12	Guadalajara	Gumbel	96.80	100.56	0.96
13	Lagos de Moreno	Gumbel	54.84	58.30	0.94
14	La Begonia	Gumbel	65.63	69.15	0.95
15	León	Gumbel	74.02	77.84	0.95
16	El Palote	Normal	68.06	69.38	0.98
17	Chapala	Gumbel	95.66	101.89	0.94

inconsistencias (si existen) de unas estaciones respecto a las demás.

Apoyándose en la forma de las isoyetas medias anuales de la cuenca, tomadas de la ref 2, se intentó trazar las curvas de isoyetas medias para la precipitación de 30 min de duración y 10 años de periodo de retorno; sin embargo, esto no fue posible debido a que la forma de las isoyetas medias anuales no

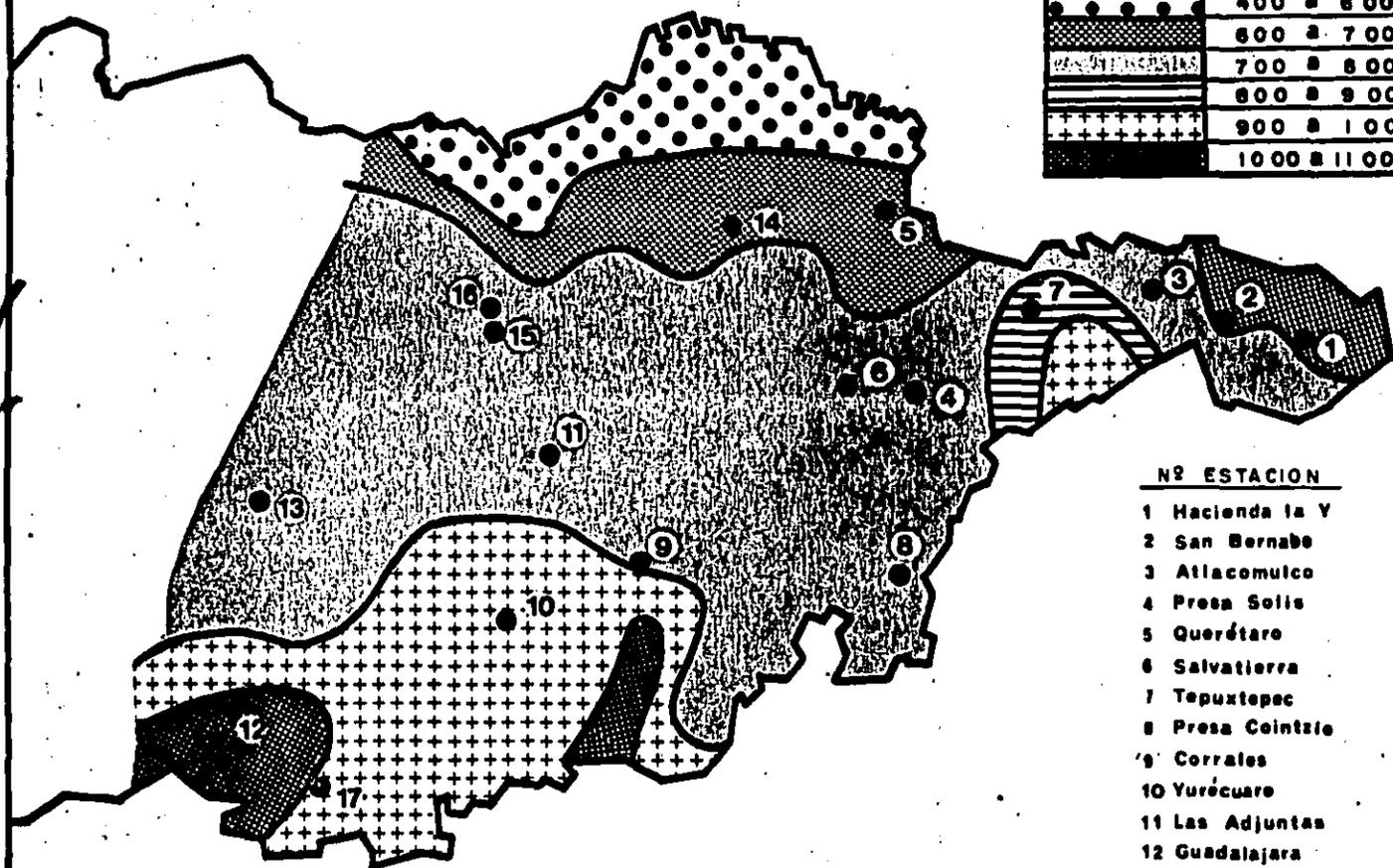
corresponde claramente a la tendencia de las precipitaciones calculadas para la duración y periodo de retorno mencionadas.

Al analizar la forma de las isoyetas medias anuales se observó que la diferencia se debe posiblemente a que estas fueron construidas con curvaturas muy cerradas, lo que resulta incongruente con lo escaso de la información utilizada para trazarlas.

Debido a lo anterior las isoyetas de precipitación media anual no permitieron comprobar la hipótesis planteada; sin embargo, al poner los valores de la precipitación en el plano climatológico de la fig 5.6 (ref 3), se observó que estos siguen, en general, la misma tendencia, ya que aumentan hacia el suroeste (Guadalajara y Chapala) y bajan hacia el norte. En esta zona de baja precipitación se ubica la estación, en la que se obtuvieron los resultados de precipitación más bajos de la cuenca (Querétaro). La comparación entre la tendencia del plano climatológico de la fig 5.6 y la de las precipitaciones máximas para una duración de 30 min y 10 años de periodo de retorno, comprueba parcialmente la hipótesis de partida, por lo que fue necesario analizar otra información para reforzar dicha comprobación. Para esto se utilizó la información de lluvias máximas en 24 horas registradas en las estaciones donde existe pluviógrafo. En la tabla 5.3 se puede ver que las estaciones cuentan con un mínimo de 31 años de

PRECIPITACIONES MEDIAS ANUALES (m.m.)

	400 a 600
	600 a 700
	700 a 800
	800 a 900
	900 a 1000
	1000 a 11000



Nº ESTACION

- 1 Hacienda la Y
- 2 San Bernabé
- 3 Atlacomulco
- 4 Presa Solís
- 5 Querétaro
- 6 Salvatierra
- 7 Tepuxtepec
- 8 Presa Coahuila
- 9 Corrales
- 10 Yurécuaro
- 11 Las Adjuntas
- 12 Guadalajara
- 13 Lagos de Moreno
- 14 La Begoña
- 15 León
- 16 El Palote
- 17 Chapala

Fig-5.6 CARACTERISTICAS CLIMATOLÓGICAS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO LERMA (precipitación media anual)

registro, salvo San Bernabe que cuenta con 13 años, por lo que se consideraron lo suficientemente amplios como para hacer estimaciones confiables.

La fig 5.7 permite ver la relación entre la *P de 24 horas* y la calculada para una duración de 30 min y un *Tr de 10 años*. En ella se observa que, en general, mientras más grande es la *P de 24 horas*, la *P de 30 min, 10 años*, también lo es, siendo suficiente multiplicar la primera por un factor para obtener la segunda. Como puede observarse el análisis global de la información existente (lluvias máximas de 24 horas y plano climatológico), hecha anteriormente, confirma la hipótesis planteada.

5.2.1 Construcción del plano base

Dado que no fue posible construir los planos base a partir de las isoyetas medias que caracterizan a la cuenca alta del río Lerma, para construirlo se utilizó el plano de la figura 5.6 y los datos de la tabla 5.3. Para esto se pusieron las parejas de valores de *P 30 min, 10 años*, de la columna (3) y (4) en un plano de la cuenca y siguiendo al tendencia general de la variación de la lluvia (fig 5.6), se regionalizó la cuenca para precipitaciones máximas de 30 min de duración y periodo de retorno de 10 años. Mediante este procedimiento se definieron zonas con un rango de precipitación probable cuyo mínimo y máximo se definen en el plano base regionalizado que se muestra en la fig 5.8.

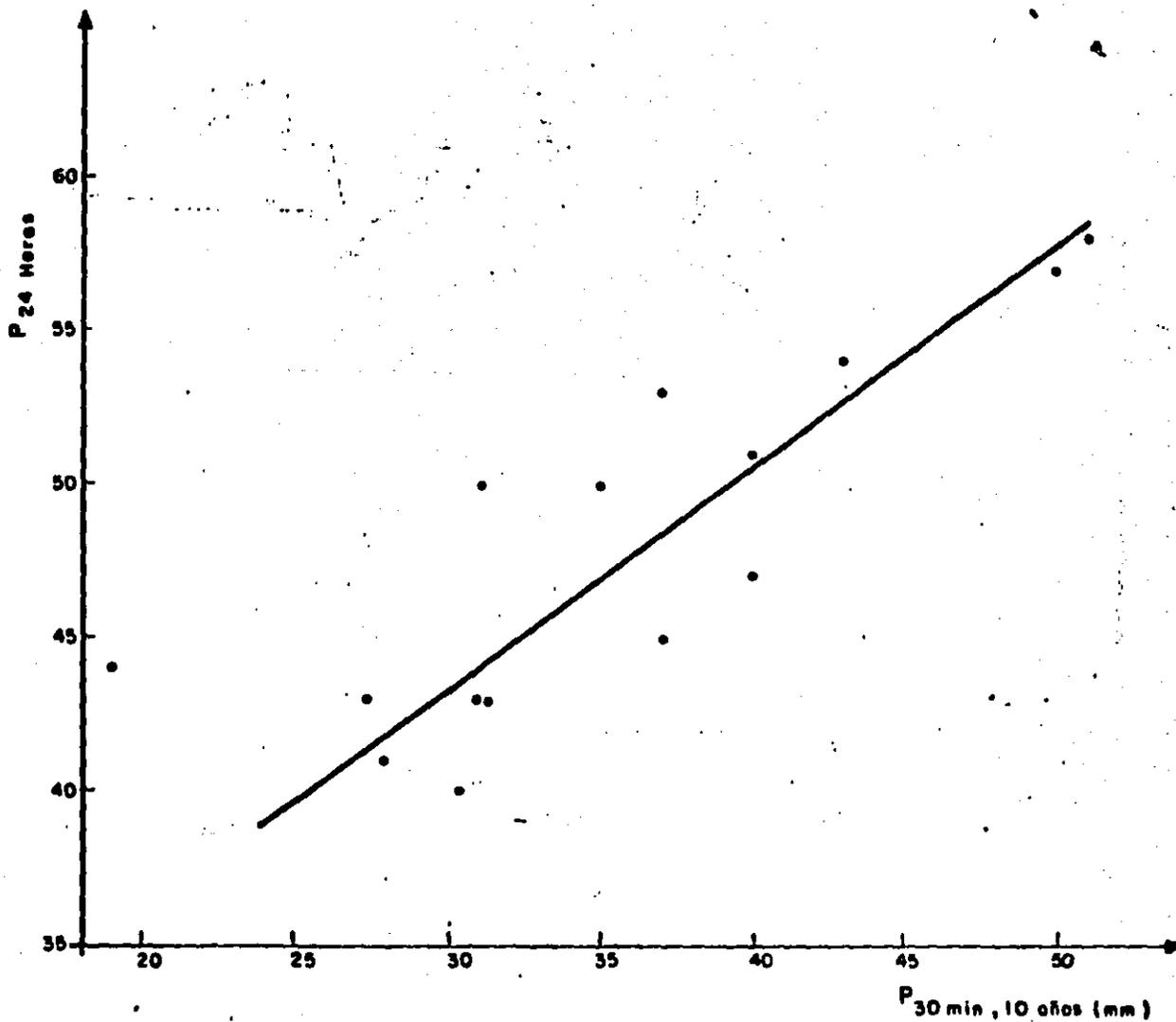


FIG.- 5.7 RELACION ENTRE P_{24 HORAS} Y P_{30 MIN, 10 AÑOS}

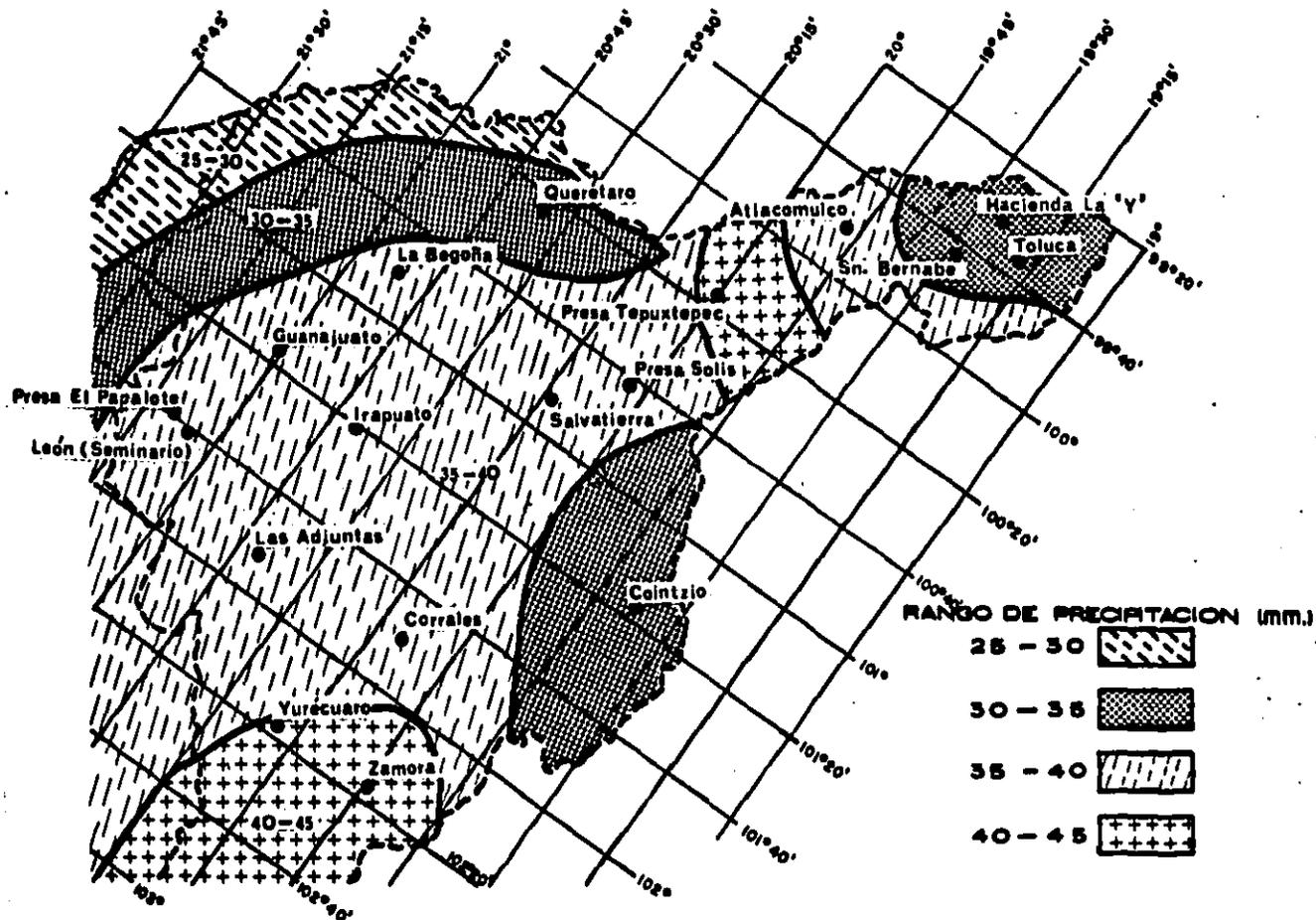


Fig. 5.8 ZONAS DE IGUAL RANGO DE PRECIPITACION PARA UNA DURACION DE 30 min. Y 10 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.

5.2.2 Análisis de resultados

Con el fin de verificar totalmente la hipótesis de partida a continuación se hace un análisis de los resultados obtenidos.

En la tabla 5.4 se muestran los resultados comparativos entre los valores producto de un análisis puntual y los obtenidos por regionalización. Considerando que una diferencia mayor de 10 por ciento es importante para la regionalización, en esta tabla

TABLA 5.3 RELACION ENTRE P24 horas y P30 mín, 10 años

No	ESTACION	(1) P24 mm	(2) AÑOS DE REG.	(3) P30,10 c/Gumbel	(4) P30,10 p/Regre	(5) COMP. (3)/(4)
1	Hacienda la Y	40	31	34.4	29.8	1.15
2	San Bernabe	43	13	27.4	32.3	0.85
3	Atacomulco	45	32	37.2	30.0	1.24
4	Presa solis	43	35	31.4	32.4	0.97
5	Querétato	44	51	19.0	33.2	0.57
6	Salvatierra	50	50	30.8	39.9	0.77
7	Tepuxtepec	54	33	42.7	41.6	1.03
8	Presa Coitzio	41	33	28.3	30.7	0.92
9	Corrales	50	33	35.2	38.3	0.92
10	Yurécuaro	51	49	40.4	39.0	1.03
11	Las Adjuntas	47	31	40.0	35.7	1.12
12	Guadalajara	57	54	50.3	44.1	0.88
13	Lagos de moreno	43	45	31.3	32.3	0.97
14	La Begoña	52	34	34.5	39.9	0.86
15	León	53	48	36.7	40.7	1.11
16	El Palote			34.7	30.6	1.13
17	Chapala	58	40	51.0	45.0	1.13

(3) Obtenida con la función Gumbel

(4) Obtenida por correlación entre los valores de las columnas (1) y (3).

(5) Comparación de las P30,10, obtenidas por correlación entre P30,10 c/Gumbel y la P24 horas y la calculada c/Gumbel.

se observan las siguientes diferencias:

Querétaro	41 por ciento
San Bernabe	19 por ciento
Presa Solís	19 por ciento
Salvatierra	14 por ciento

Haciendo un análisis particular para cada estación se observó que:

-La diferencia máxima (41 por ciento) que resultó en la estación Querétaro, se debe posiblemente a que ella cuenta con pocos años de registro (11 años) y a que estos, según un análisis de la información pluviográfica, tienen valores ilógicos en varios años de registro, lo que origina que el ajuste de la función de distribución sea equivocado. Las grandes precipitaciones registradas en los últimos años confirman esta hipótesis.

-La estación San Bernabe, cuyos resultados presentan diferencias de 19 por ciento, cuenta con sólo 9 años de información pluviográfica y 13 de pluviométrica. En cambio, la estación más cercana a esta (hacienda la Y) cuenta con 17 años de información pluviográfica y 31 años de información pluviométrica. Lo anterior implica que puede ser, en un momento dado, más confiable la información de hacienda la Y y, por otro lado, la tendencia

del plano 5.6 presenta alturas de lluvia semejantes para ambas estaciones, queriendo decir con esto que posiblemente las dos estaciones corresponden a la misma subregión climatológica. Debido a esto, se consideró que los resultados de Hacienda la Y son los más confiables y que la estación San Bernabe corresponde a la misma región (observese el plano de la fig 5.6).

-La estación Presa Solís, con diferencias en los resultados de 19 por ciento, cuenta con 35 años de información pluviométrica y con 32 años de información pluviográfica, lo que hace que los resultados sean confiables; sin embargo, al analizar la fig 5.6, se observó que esta queda dentro de la misma región donde se localizan las estaciones Salvatierra, La Begoffa, Corrales, Las Adjuntas y León, las cuales tienen aproximadamente el mismo rango de precipitación. Debido a esto, la estación Presa Solís se incluyó en el rango de precipitación de 35 a 40 mm que corresponde a la región centro de la cuenca donde se localizan las estaciones mencionadas.

-La estación Salvatierra cuenta con 17 años de información pluviográfica y 50 de información pluviométrica. Considerando la tendencia del plano climatológico del plano 5.6, esta queda dentro de la misma región donde queda la Presa Solís, analizada anteriormente, lo cual es aceptable ya que estas estaciones están muy cercanas entre sí y las precipitaciones obtenidas en ellas

TABLA 5.4 COMPARACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA REGIONALIZACION DE LAS LLUVIAS MAXIMAS PARA UNA DURACION DE 30 MIN Y UN PERIODO DE ROTORNO DE 10 AÑOS Y LOS DEL ANALISIS INDEPENDIENTE.

No	ESTACION	AÑOS DE REGIST.	ANALISIS INDEP.	ANALISIS REGIONAL	COMP.
1	Hacienda la Y	17	34.4	32.0	1.07
2	San Bernabe	9	27.4	34.0	0.81
3	Atlacomulco	22	37.2	38.0	0.98
4	Presa Solis	32	31.4	39.0	0.81
5	Querétaro	11	19.0	32.0	0.59
6	Salvatierra	17	30.8	36.0	0.86
7	Tepuxtepec	19	42.7	44.0	0.97
8	Presa Cointzio	22	28.3	31.0	0.91
9	Corrales	14	35.2	38.0	0.93
10	Yurécuaro	20	40.4	40.0	1.01
11	Las Adjuntas	14	40.0	37.0	1.08
12	Guadalajara	16	50.3	48.0	1.04
13	Lagos de Moreno	16	31.3	33.0	0.94
14	La Begoña	11	34.5	36.0	0.96
15	León	19	36.7	36.0	0.98
16	El Palote	19	34.7	35.5	0.98
17	Chapala	8	51.0	48.0	1.06

para una duración de 30 min y 10 años de periodo de retorno son iguales. Por lo anterior la estación Salvatierra se incluyó en la región cuyo rango fue de 35 a 40 mm.

Con base en el análisis hecho anteriormente para cada estación, puede considerarse que las diferencias obtenidas en las estaciones San Bernabe, Presa Solis y Salvatierra no son significativas para rechazar la hipótesis de partida, ya que los resultados de las estaciones vecinas a ellas confirman la distribución de la lluvia media anual que muestra la fig 5.6. La estación Querétaro, en cambio, presenta resultados ilógicos, ya

que la diferencia entre los resultados de la regionalización y los del análisis de cada estación por separado, es significativa (41 por ciento), razón por la cual, finalmente, esta estación fue eliminada.

Eliminando la estación Querétaro, quedan 16, tres de las cuales muestran diferencias mayores de 10 por ciento. Estas tres estaciones representan el 19 por ciento del total existente en la cuenca, el 81 por ciento restante, ver tabla 5.4, muestran diferencias menores de 10 por ciento, lo que implica que, en general, se cumple el hecho de que la variación de precipitación en un punto respecto a otro de la cuenca se ve reflejada en un plano que muestre las características climatológicas de ésta.

Una vez comprobada la hipótesis se concluye que el plano regionalizado de la fig 5.8 constituye una buena base para calcular tormentas de diseño, particularmente para tormentas con duraciones menores a 4 horas y en áreas no mayores de 100 Km².

5.3 Factores de ajuste

La figura 5.8 permite calcular la lluvia para una duración de 30 min y un periodo de retorno de 10 años; para calcular la precipitación para otra duración (menor de 4 horas) y periodo de retorno, es necesario calcular los factores de ajuste correspondientes.

5.3.1 Factores de ajuste por duración

Para calcular los factores de ajuste se siguió el proceso siguiente:

- 1) Para cada duración de la lluvia y para cada estación de la cuenca, se calcula la precipitación para periodos de retorno (T_r) de 5, 10, 25, 50 y 100 años.
- 2) Se escoge una duración base, a la que se referirán las alturas de lluvia de otras duraciones, generalmente se escoge la del plano base. Para el caso $d=30$ min, se usan los valores calculados en 1) para esta duración, como se muestra en la tabla A.
- 3) Se escoge otra duración de la lluvia, por ejemplo 15 min, y las alturas de lluvia para diferentes duraciones y periodos de retorno, calculados en 1) se ordenan como en 2).
- 4) Se dividen los valores calculados en 3) entre los ordenados en 2), esto es, se calculan H_{ps}/H_{p30} para cada estación y periodo de retorno, resultando la tabla B.
- 5) Se repiten los pasos 3) y 4) para obtener los factores de ajuste para pasar de la precipitación correspondiente a 30 min a precipitaciones de 20, 45, 60, 80, 100, 120, 180 y 240 min.

TABLA A. INTENSIDADES MAXIMAS PARA UNA DURACION DE 30 MIN
Y DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

ESTACION	Tr, A N O S				
	5	10	25	50	100
Hacienda la Y	28.95	34.40	41.31	46.43	51.52
San bernabe	23.31	27.43	32.63	36.50	40.30
Atacomulco	32.73	37.22	72.75	47.10	51.27
Presa Solis	25.43	31.43	38.44	43.65	48.81
Salvatierra	26.02	30.84	36.94	41.66	45.95
Tepuxtepec	36.59	42.66	50.34	56.03	61.68
Presa Cointzio	24.93	28.36	32.71	35.94	39.11
Corrales	29.10	35.24	42.99	48.74	54.45
Yurécuaro	34.33	40.38	48.02	53.70	59.33
Las Adjuntas	37.80	44.90	54.30	61.26	68.17
Guadalajara	43.22	50.28	59.21	65.83	72.40
Lagos de moreno	23.88	29.15	35.80	40.70	45.60
La Begoña	29.70	34.57	40.73	45.31	49.85
León	32.23	38.92	47.37	51.80	59.88
El Palote	29.00	34.19	41.87	47.20	52.48
Chapala	41.47	50.95	62.92	71.81	80.61

TABLA B. RELACION ENTRE H_{ms} Y H_{100} PARA LAS 16 ESTACIONES
Y DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO.

ESTACION	Tr, A N O S				
	5	10	25	50	100
Hacienda la Y	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
San bernabe	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
Atacomulco	0.74	0.74	0.75	0.75	0.75
Presa Solis	0.78	0.78	0.78	0.77	0.77
Salvatierra	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
Tepuxtepec	0.67	0.67	0.67	0.66	0.66
Presa Cointzio	0.74	0.74	0.74	0.74	0.75
Corrales	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
Yurécuaro	0.76	0.78	0.79	0.79	0.79
Las Adjuntas	0.73	0.74	0.75	0.75	0.75
Guadalajara	0.72	0.71	0.71	0.71	0.71
Lagos de Moreno	0.71	0.72	0.72	0.72	0.72
La Begoña	0.64	0.65	0.65	0.65	0.65
León	0.75	0.76	0.76	0.76	0.76
El Palote	0.71	0.72	0.71	0.71	0.71
Chapala	0.74	0.75	0.75	0.75	0.75
MEDIA	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71

Los resultados obtenidos mostraron que estos no dependen de la ubicación ni del periodo de retorno, esto es, los factores son iguales para cualquier punto de la cuenca. Los factores de ajuste obtenidos para la cuenca alta del Río Lerma se resumen en la tabla 5.5 y están dibujados en la fig 5.9.

TABLA 5.5 RELACION PROMEDIO ENTRE LAS PRECIPITACIONES DE DIFERENTES DURACIONES Y LA DE 30 MIN, PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO (FACTORES DE AJUSTE POR DURACION)

DURACION min	Tr. A N O S				
	5	10	25	50	100
15 y 30	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
20 y 30	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
30 y 30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
45 y 30	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
60 y 30	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23
80 y 30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
100 y 30	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35

5.3.2 Factores de ajuste por periodo de retorno

Así como en el inciso anterior (inciso 5.3.1) se demostró que los factores de ajuste por duración no dependen de la ubicación de la estación, para verificar la hipótesis de partida, se consideró también, que los factores por periodo de retorno son independientes de la estación. Para calcularlos se siguió el procedimiento siguiente:

a) Se escoge una duración de la lluvia, d^*d

- b) Para la duración de la lluvia escogida en i) y para todas las estaciones de la cuenca, se calculan los valores de precipitación para periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años, con la función de distribución de mejor ajuste.
- c) Se escoge un periodo de retorno base. En este caso se tomó un T_r de 10 años debido a que se utilizó este para construir los planos base.
- d) Se calculan los factores de ajuste dividiendo los valores de precipitación de cada estación y T_r (paso b).), entre los correspondientes a un periodo de retorno 10 años (paso c.) y para cada duración considerada, como se muestra en la tabla I.
- e) Se repiten los pasos del a) al d) para calcular los factores por otras duraciones.
- f) Se comparan los factores de ajuste obtenidos en d) para comprobar la no dependencia de la ubicación. Si son similares se aceptan, en caso contrario se divide ahora en subregiones.

Los resultados mostraron ser semejantes, por lo que se consideraron factores únicos en toda la cuenca. La tabla 5.6 muestra el resumen de los factores de ajuste por periodo de retorno; en ella se observa que no dependen de la duración de la

**TABLA I FACTORES DE AJUSTE POR PERIODO DE RETORNO PARA
UNA DURACION DE 30 MIN (TABLA A)**

ESTACION	T r. A Ñ O S				
	5	10	25	50	100
Hacienda la Y	0.84	1.0	1.20	1.35	1.50
San Bernabe	0.85	1.0	1.19	1.33	1.47
Atiacomulco	0.87	1.0	1.15	1.27	1.39
Presa Solis	0.83	1.0	1.22	1.39	1.55
Salvatierra	0.84	1.0	1.20	1.34	1.50
Tepuxtepec	0.85	1.0	1.18	1.31	1.45
Presa Cointzio	0.88	1.0	1.15	1.27	1.38
Corrales	0.83	1.0	1.22	1.38	1.54
Yurácuaro	0.85	1.0	1.19	1.33	1.47
Las Adjuntas	0.83	1.0	1.21	1.36	1.52
Guadalajara	0.86	1.0	1.18	1.31	1.44
Lagos de Moreno	0.82	1.0	1.23	1.39	1.56
La Begoña	0.86	1.0	1.18	1.31	1.44
León	0.83	1.0	1.22	1.33	1.54
El Palote	0.84	1.0	1.21	1.36	1.51
Chapala	0.81	1.0	1.23	1.40	1.58
MEDIA	0.85	1.0	1.19	1.34	1.48
DESV. ESTANDAR	0.02	0.0	0.03	0.04	0.06

**TABLA 5.6 RESUMEN DE LOS F. DE A. POR PERIODO DE RETORNO
PROMEDIOS PARA DIFERENTES DURACIONES**

DURA CION nin	M E D I A T r. A Ñ O S					D E S V. E S T A D A R T r. A Ñ O S				
	5	10	25	50	100	5	10	25	50	100
15	0.85	1.0	1.20	1.35	1.49	0.02	0.0	0.03	0.05	0.07
20	0.85	1.0	1.19	1.34	1.47	0.02	0.0	0.03	0.05	0.07
30	0.85	1.0	1.19	1.34	1.48	0.02	0.0	0.03	0.04	0.06
45	0.85	1.0	1.19	1.34	1.48	0.02	0.0	0.03	0.05	0.07
60	0.85	1.0	1.19	1.34	1.48	0.02	0.0	0.03	0.04	0.06
80	0.85	1.0	1.19	1.34	1.47	0.02	0.0	0.03	0.04	0.06
100	0.85	1.0	1.19	1.33	1.47	0.02	0.0	0.03	0.05	0.07
120	0.85	1.0	1.19	1.31	1.47	0.02	0.0	0.03	0.05	0.07
180	0.85	1.0	1.19	1.33	1.47	0.02	0.0	0.03	0.04	0.06
240	0.85	1.0	1.19	1.33	1.47	0.02	0.0	0.03	0.04	0.06
MEDIA	0.85	1.0	1.19	1.34	1.47	0.02	0.0	0.03	0.05	0.06

lluvia ni de la ubicación de la estación, lo cual comprueba la hipótesis planteada.

En resumen, mediante los factores de ajuste por duración, tabla 5.5 o fig 5.9, y con los factores de ajuste por periodo de retorno, tabla 5.6 o fig 5.10, se podrá pasar del valor de la precipitación para una duración de 30 min y un periodo de retorno de 10 años, obtenida del plano base, fig 5.8, a otra de cualquier duración y periodo de retorno.

5.3.3 Comparación con otros resultados

Se han realizado estudios de regionalización de precipitaciones máximas en otros lugares, mismos que han dado resultados similares. Particularmente el método de regionalización se aplicó a la cuenca del valle de México en el que a diferencia del estudio realizado para la cuenca alta del río Lerma, en el Valle de México fue posible apoyarse en un plano de isoyetas medias anuales y en un plano de isoyetas medias de precipitaciones en 24 horas, cuya forma resultó semejante, para caracterizar la variación climatológica de la cuenca.

Mediante el análisis de la información pluviográfica existente se pudo demostrar la hipótesis de partida ya que un plano de isoyetas medias para cualquier duración y periodo de retorno,

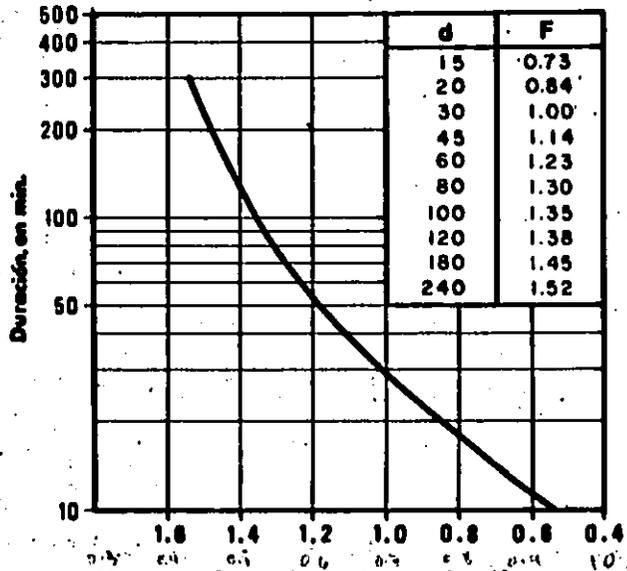


Fig. 5.9 Factor de ajuste por duración.

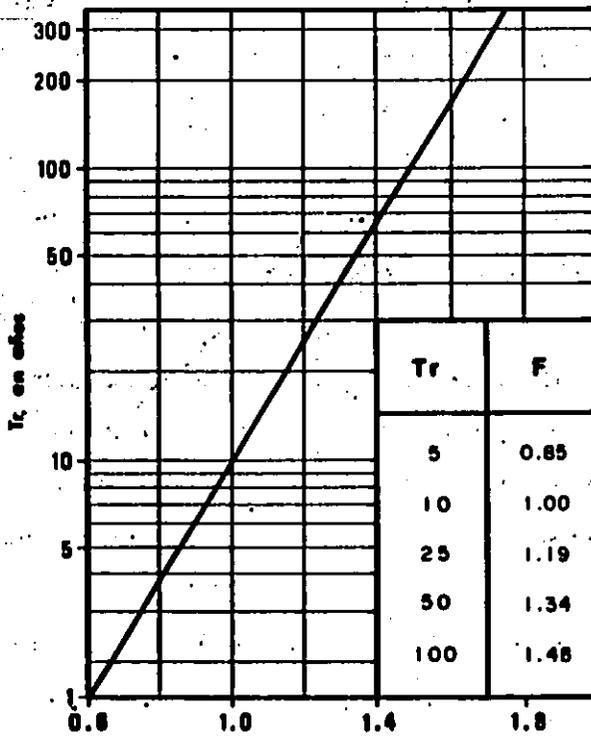


Fig. 5.10 Factor de ajuste por periodo de retorno.

resultó semejante al de P de 24 horas y al de lluvias medias anuales. Lo anterior implica pues, que la variación puntual de la lluvia dentro de la cuenca, se ve reflejada en un plano de isoyetas, ya sean medias anuales, de P en 24 horas o cualquier otra.

En la tabla 5.7 se muestran los factores de ajuste obtenidos para el Distrito Federal, (ref 6), se muestran también los propuestos por Bell (ref 4) para una región y, con fines comparativos, se muestran los obtenidos en este estudio para la cuenca alta del río Lerma.

En la misma tabla se observa que los factores de ajuste por duración, obtenidos para el Distrito Federal y la cuenca del Lerma son muy semejantes entre sí, lo cual implica que el origen de la lluvia en ambas regiones es similar; los propuestos por Bell, en cambio, difieren significativamente para duraciones mayores de una hora. Esto se debe, posiblemente, a que las tormentas que él analizó no son del todo de origen convectivo.

Respecto a los factores de ajuste por periodo de retorno, en la tabla 5.7 se observa que los obtenidos en la cuenca del Lerma, y en el valle de México son prácticamente semejantes por lo que aún con las pequeñas diferencias obtenidas, estos forman una buena base para extrapolar valores de precipitación para cualquier

**TABLA 5.7 F de A PARA EL DISTRITO FEDERAL Y PARA LA CUENCA
ALTA DEL RIO LERMA**

a) F de A por duración

DURACION (min)	15	20	30	45	60	80	100	120	180	240
Río Lerma	0.73	0.84	1.0	1.14	1.23	1.30	1.35	1.38	1.45	1.52
V. de México	0.75	0.87	1.0	1.15	1.20	1.28	1.30	1.33	-	-
P. por Bell	0.73	0.85	1.0	1.19	1.32	1.45	1.50	-	-	-

b) F de A por periodo de retorno

PERIODO DE RETORNO (años)	5	10	25	50	200
Río Lerma	0.85	1.0	1.19	1.34	1.48
Valle de México	0.85	1.0	1.20	1.35	1.51

duración y periodo de retorno en cualquier punto de la cuenca y con base en la semejanza entre los resultados de los diferentes estudios realizados se pueden extrapolar precipitaciones en cualquier parte del mundo mediante estos factores, sólo es necesario caracterizar la cuenca mediante planos base, como los mostrados, en la fig 5.8 de este trabajo y en la fig 5.6 de la ref 6.

5.3.4 Factores de ajuste por área

En el estudio de determinada cuenca, no sólo interesa conocer el valor de la precipitación en un punto, sino que es necesario

conocer también la precipitación media sobre esta para posteriormente transformarla a escurrimiento.

La relación que existe entre la precipitación media de un cierta área y la precipitación máxima en un punto dentro de la misma, depende del área del sitio de interés y toma valores menores que 1 (fig 5.11).

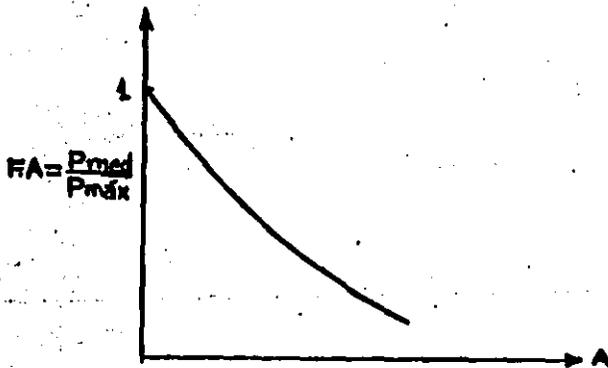


Fig 5.11 Relación entre el factor de ajuste $\frac{P_{med}}{P_{max}}$ y el área

Para conocer esta relación es necesario que en la cuenca exista un número tal de estaciones que se pueda medir en forma precisa la distribución de la lluvia. Esto implica que entre menos estaciones existan en la cuenca, más difícil resulta cuantificar dicha distribución. Este problema se acentúa cuando se desea

estudiar una subregión; donde posiblemente no exista ninguna estación climatológica que indique la cantidad de lluvia que se precipitó en ella, en la duración de la tormenta.

La escasa información disponible impidió calcular los factores de ajuste por área en la cuenca alta del Lerma; sin embargo, para propósitos de diseño, se recomienda utilizar los calculados en el Instituto de Ingeniería para el D. F. (fig 5.12), considerando que, así como resultaron semejantes los factores de ajuste por duración y periodo de retorno, también lo son para los factores de reducción por área.

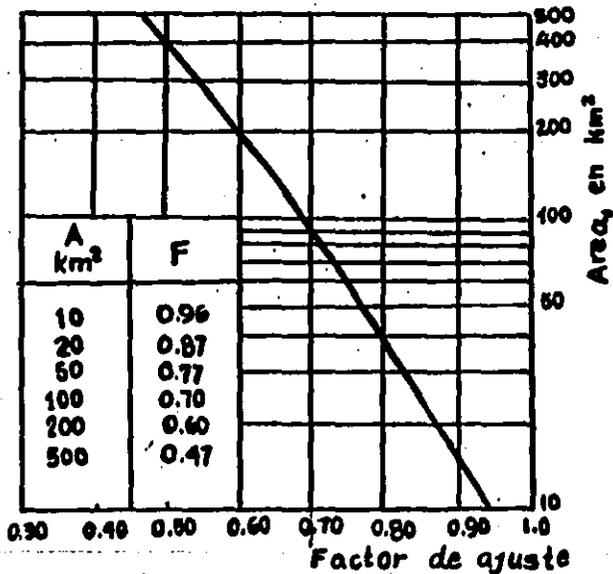


Fig 5.12 Factores de ajuste por área

5.4 Procedimiento para calcular la tormenta de diseño para la cuenca del Río Lerma

- 1) Con la fig 5.8 se determina la precipitación base, la cual corresponde a una duración de 30 min y un periodo de retorno de 10 años.
- 2) La precipitación obtenida en 1) se ajusta a la duración que se desee (menor de 4 horas) mediante un factor de ajuste, F_1 , obtenido de la fig 5.9 .
- 3) Con la fig 5.10 se obtiene el factor F_2 para pasar de la precipitación de un T_r de 10 años obtenida en 1), a la del periodo de retorno deseado.
- 4) Si la precipitación obtenida para la duración y T_r deseados, debe transformarse a la media de la cuenca de interés, esta se multiplicará por el factor F_3 , obtenido de la fig 5.12.
- 5) Si se desea conocer la distribución de la lluvia en el tiempo, deberá diseñarse un hietograma, con los métodos que pueden consultarse, por ejemplo, en la ref 11.

6. CONCLUSIONES

Los estudios de regionalización hechos en la zona urbana del D.F. (ref 6), los realizados por Bell (ref 4) y el que aquí se presenta para la cuenca alta del río Lerma, forman unabase para establecer un nuevo enfoque del cálculo de lluvias máximas para diseño.

Apoyándose en lluvias convectivas, caracterizadas por su alta intensidad y corta duración, se ha comprobado que las características climatológicas de una cuenca se ven reflejadas en un plano que muestre la variación de la lluvia de un punto respecto a otro de la misma cuenca.

Esta comprobación es importante debido a que es relativamente fácil contar con planos de isoyetas medias anuales, de precipitaciones máximas en 24 horas o cualquier otro en el que se

pueda ver la variación climatológica dentro de la cuenca.

Una vez caracterizada la región en estudio con los llamados planos base, es fácil detectar las estaciones climatológicas que cuentan con información dudosa o incongruente respecto a las demás, mediante un análisis similar al desarrollado en el inciso 5.2.2.

En este estudio, por ejemplo, para caracterizar la cuenca se utilizó un plano de isoyetas medias anuales (fig 5.2), registros de precipitaciones máximas en 24 horas y el plano de la fig 5.6, que muestra las características climatológicas de la cuenca por rangos (ref 2). A diferencia de la regionalización hecha en el Valle de México, en la del Lerma no fue posible usar el plano de isoyetas medias anuales (fig 5.2), debido a que éstas tienen curvaturas muy cerradas, como si indicaran microclimas, que en la realidad difícilmente suceden; por lo anterior este plano fue eliminado.

Posteriormente se utilizó el plano climatológico de la fig 5.6, los registros de P de 24 horas y las P de 30 min y 10 años de Tr. Estudiando la interdependencia entre las dos últimas y comparando la tendencia con el plano de la fig 5.6, se pudo caracterizar la cuenca en el plano regionalizado de la fig 5.8 (Plano base).

Puede decirse que esta etapa del estudio de regionalización es la que presenta mayor cuidado ya que el plano base es el que debe representar lo mejor posible, la variación climatológica de un punto respecto a otro dentro de la cuenca.

Por lo demás, una vez elaborado el plano base, resulta sencillo si se desea obtener los factores de ajuste para extrapolar a precipitaciones de cualquier duración y periodo de retorno; si nó, se podrán usar los obtenidos en este trabajo, mismos que resultaron semejantes a los obtenidos en las refs 4 y 6.

Los estudios de regionalización son de especial importancia cuando se desea obtener el gasto de diseño en obras pequeñas o de drenaje menor donde el área por drenar sea menor de 100 Km², y donde la variación espacial de la lluvia puede calcularse con relativa precisión. En zonas, por ejemplo, donde se desea revisar o proyectar el sistema de drenaje de una vía terrestre o un sistema de drenaje en el que se dimensionarán puentes o colectores de drenaje pluvial, pueden realizarse estudios de este tipo para estimar la lluvia de diseño.

En México pueden hacerse estudios de regionalización de lluvias máximas en todas aquellas regiones que tengan escasa influencia ciclónica como son las partes centro y centro norte de la República.

En resumen, un estudio de regionalización requiere de cinco etapas principales.

- 1) Análisis de la información regional
- 2) Análisis estadístico de la información puntual
- 3) Construcción de planos base
- 4) Análisis comparativo entre los resultados obtenidos en forma puntual y los del estudio regional.
- 5) Cálculo de los parámetros de ajuste para extrapolar a lluvias de cualquier duración y periodo de retorno.

Las etapas del 1) al 4) constituyen la parte esencial del estudio, ya que es ahí donde se llega a establecer las características de la cuenca, a través de los planos base.

La etapa 5) ya ha sido probada en los diferentes estudios realizados, por lo que puede prescindirse de ella y utilizar los factores de ajuste obtenidos en este trabajo o los presentados en la ref 6.

Finalmente, realizar estudios de regionalización ofrece dos ventajas principales.

- a) La posible inconsistencia a la que conducen los métodos tradicionales cuando se calcula la lluvia de diseño tomando la

estación más cercana del punto de interés, se elimina cuando se analiza el comportamiento climatológico a nivel regional.

- b) Su aplicación es muy sencilla, ya que sólo se requiere definir la lluvia para la duración y T_r del plano regionalizado (plano base), y de ahí extrapolarla a cualquier duración y periodo de retorno (figs 5.9 y 5.10) sin realizar más cálculos que el producto de la precipitación base multiplicada por los factores de ajuste.

Una posible desventaja es que requiere de un análisis detallado y exhaustivo de la información existente, ya que se maneja demasiada información pluviográfica y pluviométrica para construir el plano base; sin embargo, esta desventaja se ve justificada, cuando la regionalización cubre extensiones importantes, debido a que se realiza una sola vez.

7. RECONOCIMIENTOS

Se agradece profundamente al M en I Ramón Domínguez Mora, investigador del Instituto de Ingeniería, por su acertada dirección y su paciencia durante el desarrollo de este trabajo.

7. REFERENCIAS

1. Dirección General de Servicios Técnicos, SOP, Isoyetas de la cuenca alta del Río Lerma. 1974
2. Secretaría de Recursos Hidráulicos, Lluvias medias anuales por cuencas, regiones hidrológicas y estados de la República. 1970.
3. Comisión del Lerma, Atlas General de la cuenca de los ríos Lerma y Santiago. 1960.
4. Bell, F. C., The areal reduction factor in rainfall frequency estimation, Institute of Hydrology, No 35, Willingford, Inglaterra, 1976.
5. Springall, G, Drenaje en Cuencas Pequeñas, Instituto de Ingeniería.
6. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Manual de Hidráulica Urbana. Tomo I, México D.F. 1982.
7. Domínguez, Mora R, Análisis Regional de Tormentas y Avenidas de de Diseño. Instituto de Ingeniería. 1981.

9.

9. Wilson, E, Engineering Hydrology. Mac Millan, Pres.

10. Department of The Interior Bureau of Reclamation. Design of Small Dams. United States .

11. Franco, V. Integración de Estudios de Hidrología Urbana. Tesis de maestría, DEEFI.

12. Gumbel, E. J. The return period of flood flow, An Math. Statist. Vol 12, No 2. 1941.

13. Comisión Federal de Electricidad, Manual de diseño de Obras Civiles. Capítulo A.1.7. Tormenta de Diseño. 1981.

14. Abramowitz. M. et Al. Handbook of Mathematical Functions, Dover Publications, New York, 1972.

15. Comisión Federal de Electricidad. Manual de Diseño de Obras Civiles. Capítulo A.1.6. Análisis Estadístico. 1981.

16. Springall G.R Hidrología, Cap. 8. Facultad de Ingeniería, UNAM. 1967.