

2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE DE LLUVIAS OCURRIDAS EN LA ZONA DE ESTUDIO

Los estudios hidrológicos previos al diseño de una presa incluyen la determinación de las tormentas y avenidas de diseño, para lo cual la International Commission of Large Dams (ICOLD, 1992, en Marengo, 2007) recomienda recabar todos los datos posibles de las cuencas en estudio.

Entre la información a recabar se encuentran los datos registrados por las estaciones climatológicas ubicadas dentro y en las inmediaciones de las cuencas en estudio, así como los de las estaciones hidrométricas localizadas en las corrientes. El registro de los eventos pasados permite obtener una interpretación de eventos probabilísticos a futuro, por ejemplo, la estimación de gastos máximos mediante un procedimiento conocido como análisis de frecuencia (Ruiz, 2002).

De lo anterior, se puede deducir que la confiabilidad y continuidad del registro de las estaciones juega un papel importante en la calidad de los estudios hidrológicos. Por lo tanto, en el presente estudio se manejarán datos obtenidos de las bases de datos de carácter oficial en el país, correspondientes a aquellas estaciones que no sólo se encuentren en el área de estudio, sino que también cuenten con el registro histórico más largo y la menor ausencia de datos posibles.

Aparicio (2007) menciona que es común que los registros de precipitación sean más abundantes que los de escurrimiento. Por otro lado, estos últimos se ven afectados por diversos cambios en la cuenca, como construcción de obras de almacenamiento y derivación, talas, urbanización, etc.; por ello es frecuente que el cálculo del escurrimiento se efectúe con base en información pluviométrica.

Los ríos San Francisco y Santo Domingo cuentan con una estación hidrométrica aguas arriba de su incorporación al río de La Compañía; sin embargo, la estación ubicada en el río Santo Domingo mide el caudal conjunto de este río y el San Rafael, pues se encuentra aguas abajo de la confluencia de ambos. Como se mencionó en la sección 1.3.4, el comportamiento hidrológico de la cuenca del Santo Domingo se asemeja más a la cuenca del San Francisco que al del San Rafael, por lo que la información proporcionada por tal estación no es útil para el cumplimiento de los objetivos de este estudio.

2.1. Tipos de bases de datos para estaciones meteorológicas e hidrométricas

2.1.1. Base de Datos Climatológica Nacional

La Base de Datos Climatológica Nacional (BDCN) recopila la información de más de 3500 estaciones climatológicas distribuidas por todo el territorio nacional (Miranda, et. al.), y es administrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el cual es una dependencia de la Comisión Nacional del Agua (CNA).

Para operar la BDCN se cuenta con el sistema Clicom (Clima Computarizado), por medio del cual se maneja la información registrada en la red de estaciones climatológicas (Vázquez, 2006).

El Clicom es una cooperación voluntaria de los Estados Unidos de América a la Organización Meteorológica Mundial (OMM), en apoyo a la base mundial de datos climatológicos. Fue programado en el National Climatic Data Center, en Ashville, North Carolina, y en el National Weather Service en Silver spring, Maryland, en 1992 (Salinas, 1998).

2.1.2. Base de datos Bandas

El Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (Bandas) fue creado por la CNA, para concentrar la información disponible de ríos y presas en México.

En el Bandas se almacena la información asociada a cada una de las estaciones hidrométricas del país, como nombre, ubicación, gastos y profundidades de los principales ríos. Actualmente existen 1218 estaciones hidrométricas, distribuidas en 957 corrientes. El Bandas contiene también la información de 118 presas (Préstamo, 2004).

2.2. Estaciones meteorológicas e hidrométricas ubicadas en la zona de estudio

2.2.1. Estaciones meteorológicas

La figura 2.1 muestra las estaciones climatológicas ubicadas dentro y cerca de las cuencas San Francisco, San Rafael y La Compañía.

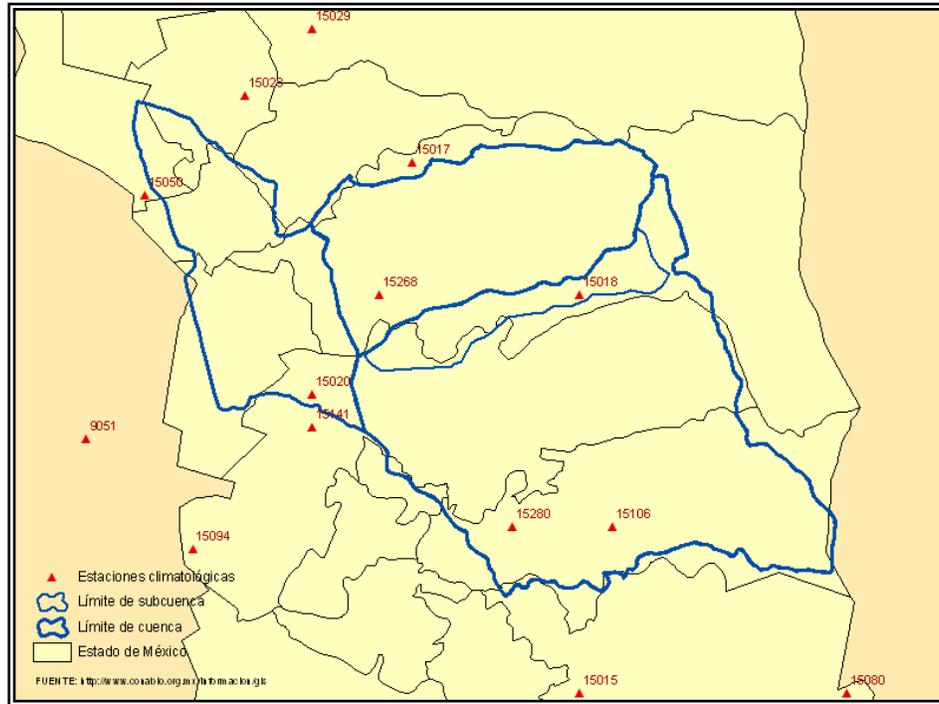


Figura 2.1. Estaciones climatológicas ubicadas en la zona de estudio

Las coordenadas geográficas de las estaciones que se observan en la figura 2.1, se indican en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Ubicación geográfica de las estaciones climatológicas

CLAVE	NOMBRE	UBICACIÓN	
		Latitud (N)	Longitud (O)
9051	Tláhuac	19° 15'	99° 00'
15015	Amecameca	19° 07'	98° 46'
15017	Coatepec de los Olivos	19° 23'	98° 50'
15018	Manuel A. Camacho	19° 19'	98° 45'
15020	Chalco	19° 15'	98° 53'
15023	Chimalhuacán	19° 25'	98° 56'
15029	El Tejocote (Atlacomulco)	19° 27'	98° 54'
15050	Los Reyes La Paz	19° 22'	98° 59'
15080	Atlautla, Repetidora T.V.	19° 06'	98° 37'
15094	San Luis Ameca II	19° 11'	98° 57'
15106	San Rafael, Tlalmanalco	19° 12'	98° 45'
15141	T. Agrop. 32 Tlalpitzahuc	19° 15'	98° 54'
15268	Ixtapaluca	19° 19'	98° 52'
15280	Tlalmanalco	19° 12'	98° 48'

2.2.2. Estaciones hidrométricas

Dentro de las cuencas en estudio se ubican las estaciones San Marcos, en el río San Francisco, y San Lucas, en la confluencia de los ríos Santo Domingo y San Rafael. Sin embargo, como se explicó en la sección 1.3.4, el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Santo Domingo es similar al de la cuenca del San Francisco y no al de la cuenca del San Rafael.

Por lo anterior, los valores proporcionados por la estación San Lucas carecen de interés para el objetivo de este trabajo, pues la estación mide el caudal conjunto de los ríos San Rafael y Santo Domingo. Esto hace necesario contar con información de estaciones hidrométricas de cuencas cercanas a la zona de estudio, cuyo comportamiento sea similar al de las cuencas de interés. Por lo tanto, además de la información de estación San Marcos, se analizará la de las estaciones: Garcés, El Tejocote, San Mateo, Chapingo, Texcoco, San Andrés, Atenco y La Grande. La figura 2.2 muestra la localización de las estaciones hidrométricas.

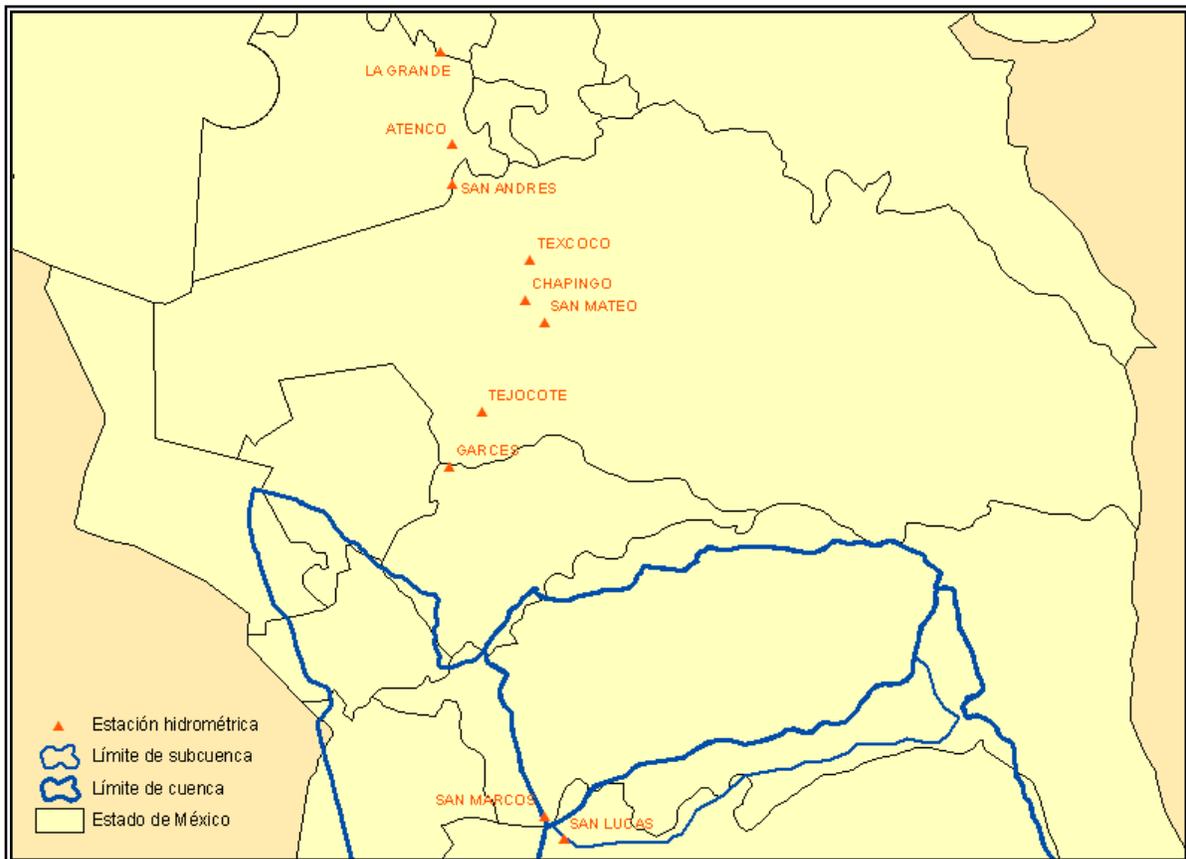


Figura 2.2. Localización de las estaciones hidrométricas

En la tabla 2.2 se resumen las características de cada una de estas estaciones: clave, área de aportación, coordenadas geográficas, corriente en la que se encuentra y una breve descripción de su localización sobre ella.

Al observar las áreas de aportación de cada una de las estaciones, resalta que el área de las estaciones Texcoco, Chapingo y San Mateo, son muy pequeñas en relación a las áreas de las demás cuencas, razón por la cual fueron descartadas del análisis que se desarrollará más adelante.

Tabla 2.2. Características de las estaciones hidrométricas

CLAVE	ESTACIÓN	ÁREA (km ²)	COORD. GEOG.	UBICACIÓN
26071	Texcoco	31.2	19° 30' 02" N 98° 52' 59" O	Río Texcoco, 24 m aguas arriba del cruce de la corriente con la carretera México-Texcoco.
26178	Atenco	54.0	19° 32' 38" N 98° 54' 44" O	Río Xalapango, 100 m aguas abajo del cruce de la carretera Texcoco-Venta de Carpio con la corriente, 2 km al norte del poblado de San Andrés.
26183	Chapingo	17.5	19° 29' 07" N 98° 53' 05" O	Río Chapingo, a la altura del km 37.5 de la carretera federal México-Texcoco.
26184	San Andrés	64.8	19° 31' 45" N 98° 54' 45" O	Río Coxcacoco, en el poblado San Andrés, 100 m aguas abajo del cruce de la corriente con el camino que une a los pueblos de la Magdalena Panoaya y San Andrés.
26193	La Grande	202.6	19° 34' 45" N 98° 55' 00" O	Río Papalotla, 10 m aguas arriba del cruce de esta corriente con el puente carretero del camino Texcoco-Tepepan y aprox. 2 km al sur del poblado Tezayuca.
26195	Tejocote	55.2	19° 26' 35" N 98° 54' 05" O	Río Santa Mónica, 250 m aguas arriba del cruce de la carretera México-Texcoco con la corriente y 8 km al sur de la ciudad de Texcoco.
26274	San Mateo	16.9	19° 28' 37" N 98° 52' 40" O	Río San Bernardino, a la altura del km 36.8 de la carretera México-Texcoco, 3.5 km al sur de la ciudad de Texcoco.
26276	San Marcos	131.42	19° 17' 30" N 98° 52' 10" O	En el río San Francisco, 400 m aguas arriba de su confluencia con el río de La Compañía y unos 4 km al noreste de la población de Chalco.
26445	Garcés	No disponible	19° 25' 20 " N 98° 54' 49" O	Río Coatepec, a la altura del km 30 de la carretera México-Texcoco y a 1.6 km al suroeste de la población Santiago Cuatlalpan.

Referencia: Serie Boletín Hidrológico, Comisión Nacional del Agua (1992)

2.3. Datos disponibles de lluvias y escurrimientos

2.3.1. Datos disponibles de lluvias

Como se puede observar en la figura 2.1, existen 14 estaciones que, por su localización cercana a la zona de estudio, podrían utilizarse para analizar la precipitación y revisar los factores de ajuste de dicha área. Una de las estaciones se ubica en el Distrito Federal y 13 en el estado de México. En la tabla 2.1 se presentan la clave y el nombre de cada una de ellas.

Sin embargo, es importante recordar que el registro de datos debe ser lo más extenso y continuo posible. Para garantizar la condición anterior, utilizando el programa Clicom, se extrajo la información de lluvias correspondiente a cada una de las estaciones anteriores, después de lo cual se determinó la longitud del registro y el porcentaje de datos faltantes para cada una de las estaciones.

La tabla 2.3 incluye la clave y el nombre de cada una de las 14 estaciones, así como el lapso del registro y el porcentaje de datos faltantes.

Tabla 2.3. Datos disponibles de las estaciones climatológicas

CLAVE	NOMBRE	REGISTRO	% DATOS FALTANTES
9051	Tláhuac	1961-2007	22.37
15015	Amecameca	1944-2007	19.89
15017	Coatepec de los Olivos	1961-2007	17.26
15018	Manuel A. Camacho	1961-2007	17.30
15020	Chalco	1961-2007	12.76
15023	Chimalhuacán	1969-1988	3.63
15029	El Tejocote (Atlacomulco)	1969-2007	3.84
15050	Los Reyes La Paz	1961-2007	29.24
15080	Atlautla, Repetidora T.V.	1961-1987	35.43
15094	San Luis Ameca II	1961-2007	19.36
15106	San Rafael, Tlalmanalco	1961-2007	35.31
15141	T. Agrop. 32 Tlalpitzahuc	1961-1987	21.67
15268	Ixtapaluca	1961-1987	54.39
15280	Tlalmanalco	1961-1987	38.43

En la tabla 2.2 se exhibe que el porcentaje de datos faltantes suele ser alto, entre 17 y el 36 %, excepto en las estaciones Chalco, Chimalhuacán y el Tejocote. Esto se debe a que, en los registros de casi todas las estaciones, faltan prácticamente todos los datos de 1988 a 1995, e incluso de 1988 a 2000, en el caso de las estaciones San Rafael Tlalmanalco e Ixtapaluca.

Por lo tanto, para continuar con el presente estudio, se eligieron las estaciones cuyo porcentaje de datos es menor al 20 % y su periodo de registro igual o mayor a 38 años: Amecameca, Coatepec de los Olivos, Chalco, El Tejocote y San Luis Ameca II.

Se excluyó la estación Manuel A. Camacho debido a que el Dr. Ramón Domínguez, Investigador del Instituto de Ingeniería, realizó una visita de inspección a tal estación, y encontró que la estación carecía del mantenimiento adecuado, por tanto, sus mediciones son poco fiables.

La estación San Rafael, a pesar de tener tan alto porcentaje de datos no disponibles, se considerará, dado que es una de las pocas estaciones ubicadas dentro de alguna de las cuencas de la zona de estudio (cuenca San Rafael).

En el caso de la estación Chimalhuacán, la longitud de su registro es de sólo 19 años, mucho menor respecto al de las otras estaciones; razón por la cual, aun cuando su porcentaje de datos faltantes es el más pequeño, no se tomará en cuenta para los cálculos siguientes.

Las estaciones Atlautla, Tlapitzahuc, Ixtapaluca y Tlalmanalco, además de disponer de un periodo de tan sólo 26 años, cuentan con un porcentaje de datos faltantes que oscila entre el 21 y el 55 %, por lo tanto, fueron descartadas.

2.3.2. Datos disponibles de escurrimiento

Se obtuvo la información de gastos medios diarios de cada una de las estaciones hidrométricas mencionadas en la sección 2.2.2, para observar cuál es el periodo de registro de cada una y cuál el porcentaje de datos faltantes, con el fin de verificar si todas cuentan con los suficientes datos para analizarlos estadísticamente.

En la tabla 2.4, que muestra el periodo de registro y el porcentaje de datos faltantes de cada estación. Se puede observar que en el caso de las estaciones hidrométricas la ausencia de datos es mucho menos frecuente que en las climatológicas, pues el mayor

porcentaje es el de la estación San Marcos, de 9.71. Por lo tanto, ninguna estación se descartará por falta de continuidad en los datos.

En cuanto a la extensión del periodo de registro con que cuenta cada una de las estaciones, todas las estaciones poseen un registro igual o mayor a 36 años, excepto la estación Garcés, cuyo registro es de sólo 12 años. Nótese que el número de años de registro es similar al de las estaciones climatológicas, aun cuando la antigüedad de las estaciones hidrométricas sea mayor, sólo se encuentran disponibles los datos registrados hasta 1999, en la estación San Marcos, y hasta 1995 o 1998, en la mayoría de las otras estaciones.

Por los pocos años de registro con los que cuenta, la estación Garcés no se considerará en lo sucesivo.

Tabla 2.4. Datos disponibles de las estaciones hidrométricas

CLAVE	NOMBRE	REGISTRO	% DATOS FALTANTES
26178	Atenco	1944-1995	0.07
26184	San Andrés	1944-1998	3.56
26193	La Grande	1945-1995	1.20
26195	Tejocote	1945-1995	0.34
26276	San Marcos	1963-1999	9.71
26445	Garcés	1978-1990	2.08

2.4. Análisis de la información

2.4.1. Análisis estadístico de datos hidrológicos

Por la complejidad de los procesos físicos que dan lugar a los diversos eventos meteorológicos, como la lluvia, no suele ser factible realizar una estimación de tales eventos mediante métodos basados en las leyes de la física; bien porque estos métodos son insuficientes, o bien porque el modelo matemático resultante sería demasiado grande, complicado y difícil de manejar (Aparicio, 2007). La hidrología utiliza métodos probabilísticos y estadísticos para facilitar la interpretación y evaluación de los datos disponibles.

En estadística, se considera a un registro de datos hidrológicos como una muestra del comportamiento del fenómeno en estudio, mientras que el conjunto de todos los posibles registros bajo ciertas condiciones se denomina población o universo. El proceso de observación o de registro se conoce como experimento, y las respuestas obtenidas de éste, resultados. En hidrología, estos resultados tienen una descripción numérica y se denominan variables aleatorias, las cuales pueden ser discretas o continuas. Las alturas de lluvia son variables aleatorias continuas (Springall, 1986).

Springall (1986) se basa en lo anterior para afirmar que cualquier registro de datos hidrológicos representa sólo una muestra de estos, y nunca es posible contar con la población de datos, pues están ligados a fenómenos naturales cuyos resultados varían continuamente.

Por lo tanto, con frecuencia es necesario extrapolar los datos disponibles, a fin de obtener los valores correspondientes a un determinado periodo de retorno. Tal periodo de retorno puede llegar a ser mucho mayor que el número de años de registro, debido a lo cual se emplean funciones de distribución de probabilidad para determinar su valor asociado.

En otras palabras, al graficar los datos disponibles respecto a sus correspondientes periodos de retorno, se puede observar que siguen una tendencia, la cual es necesario extender hasta el periodo de retorno deseado. Esto se logra con una confiabilidad aceptable mediante un análisis de frecuencia, es decir, la aplicación de funciones de distribución de probabilidad.

Mediante las distribuciones de probabilidad se puede representar la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria. Al ajustar un conjunto de datos hidrológicos a una distribución, una gran cantidad de información probabilística en la muestra puede resumirse en forma compacta en la función y en sus parámetros asociados (Chow, 1994).

En estadística existe un gran número de funciones de distribución de probabilidad teóricas; sin embargo, no es posible probar cada una de ellas al analizar un registro de datos hidrológicos, por lo que es necesario escoger las que mejor se adapten al problema bajo análisis.

Algunas de las funciones de probabilidad utilizadas en hidrología son:

- Normal
- Lognormal de dos parámetros
- Lognormal de tres parámetros

- Exponencial
- Gamma de dos parámetros
- Gamma de tres parámetros (Pearson tipo III)
- General de Valores Extremos I (Gumbel)
- Gumbel de dos poblaciones

Aparicio (2007) indica que las funciones Normal y Lognormal, en general, son apropiadas para variables aleatorias que cubren todo el rango de valores de los resultados posibles del experimento. Las funciones Gumbel se desarrollaron para el análisis de los valores extremos de dichos resultados, es decir, para evaluar mínimos y máximos de un experimento. Las funciones Gamma ocupan un lugar intermedio entre las primeras y éstas últimas.

Es posible que en algunos lugares los gastos máximos anuales pertenezcan a dos poblaciones diferentes: una producida por las precipitaciones generadas por los fenómenos meteorológicos dominantes en la región, y otra derivada de las precipitaciones ciclónicas; los valores de la segunda población suelen ser mayores que los primeros. En estos casos, se suele utilizar la función Doble Gumbel.

De las distintas funciones de distribución de probabilidad mencionadas, se eligió para el desarrollo del presente estudio la función Gumbel, pues se trata del análisis de los máximos anuales de precipitación registrados en estaciones hidrológicas ubicadas en el Valle de México. Es decir, es un análisis de valores extremos, presentados en una zona que no se ve afectada de forma directa por eventos ciclónicos.

Ruiz (2002) señala que se requiere un método de estimación de parámetros que permita relacionar la información muestral con la poblacional, o sea, una muestra de registro hidrométrico con una distribución de probabilidad. Los principales métodos de estimación de parámetros son:

- Momentos. Iguala momentos poblacionales con muestrales.
- Máxima verosimilitud. Supone que el mejor parámetro de una función debe ser aquel que maximiza la probabilidad de ocurrencia de la muestra observada.

2.4.2. Distribución Gumbel

Supóngase que se tienen N muestras, cada una de las cuales incluye n eventos. Si se selecciona el máximo x de los n eventos de cada muestra, es posible demostrar que la función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \alpha e^{-\alpha(x-\beta)} e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (\text{ec. 2.1})$$

Donde α y β son los parámetros de escala y forma de la función, respectivamente, y se determinan por las ecuaciones (Kite, 1977, en Aparicio, 2007):

$$\alpha = \frac{1.2825}{s} \quad (\text{ec. 2.2})$$

$$\beta = \bar{x} - 0.5772 s \quad (\text{ec. 2.3})$$

Donde \bar{x} representa la media de la muestra y se evalúa con la ecuación 2.5, mientras que s es la desviación estándar, calculada con la ecuación 2.4.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{ec. 2.4})$$

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (\text{ec. 2.5})$$

Dado que el periodo de retorno, T_r , es el tiempo esperado promedio en el que la magnitud de un evento puede igualarse o superarse (Springall, 1986), el periodo de retorno es igual al inverso de la probabilidad de que la magnitud del evento se iguale o supere:

$$T_r = \frac{1}{P(X \geq x)} = \frac{1}{1 - P(X \leq x)} \quad (\text{ec. 2.6})$$

Por lo tanto:

$$P(x) = P(X \leq x) = \frac{T_r - 1}{T_r} \quad (\text{ec. 2.7})$$

Desarrollando la ec. 2.1 y sustituyendo la ec. 2.7, se obtiene:

$$x = \beta - \frac{1}{\alpha} \ln \ln \left(\frac{T_r - 1}{T_r} \right) \quad (\text{ec. 2.8})$$

2.4.3. Análisis de los datos de precipitación

Como se mencionó en la sección 2.3.1., el análisis de datos se realizó únicamente para las estaciones: Amecameca, Coatepec de los Olivos, Chalco, El Tejocote, San Luis Ameca II y San Rafael.

Del registro de datos de cada estación se obtuvieron los máximos anuales de precipitación, para después realizar su análisis estadístico empleando el programa AX, elaborado en el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

El AX es un programa que permite ajustar a una muestra de datos las funciones de probabilidad: Normal, Lognormal (de 2 y 3 parámetros), Exponencial, Gamma (de 2 y 3 parámetros) y Doble Gumbel. Los parámetros, para cualquiera de estas funciones, se pueden estimar mediante el método de momento o el de máxima verosimilitud. Asimismo, al realizar el ajuste de las funciones, el programa indica cual es el error cuadrático generado.

Después de introducir los datos, se puede elegir cualquiera de las siguientes opciones:

- *Cálculo global.* Ajusta a la muestra de datos a todas las funciones de probabilidad mencionadas y muestra una tabla con el error cuadrático de cada una, resaltando el error mínimo y la función de probabilidad que lo genera.
- *Cálculo individual.* Permite ajustar una determinada función de probabilidad, muestra los resultados en una tabla, y los datos se pueden interpolar y extrapolar para cualquier periodo de retorno deseado.

La información sobre el funcionamiento del programa se puede consultar en el manual de operación, elaborado por Jiménez (1992).

Aun cuando ya se había decidido emplear la función Gumbel para todas las estaciones, previo a ese análisis, se corrió el programa mediante la opción *cálculo global*, con el objetivo de observar los errores cuadráticos correspondientes a cada función.

En la tabla 2.5 se resumieron los resultados de este análisis, mostrando sólo la función que genera el error cuadrático mínimo y el valor de este error, así como el error que se obtiene con la función Gumbel, al utilizar los dos métodos de estimación de parámetros.

Tabla 2.5. Resultados del análisis de datos de precipitación en AX, utilizando la opción cálculo global.

ESTACIÓN		CÁLCULO GLOBAL		GUMBEL	
		Función	Error	Momentos	Máx. ver.
15015	Amecameca	Gumbel	2.169	2.345	2.169
15017	Coatepec de los Olivos	Gamma	2.683	3.202	4.032
15020	Chalco	Gumbel	2.469	2.699	2.469
15029	El Tejocote (Atlacomulco)	Lognormal	1.565	2.097	1.765
15094	San Luis Ameca II	Gumbel	1.839	2.111	1.839
15106	San Rafael, Tlalmanalco	Normal	2.498	4.241	5.004

En la tabla anterior se puede observar que para la mitad de las estaciones la función que se ajusta mejor a los datos disponibles es la función Gumbel, en los casos que esto no ocurre, el error producido por la función Gumbel no es mucho mayor al error mínimo. Por las razones antes expuestas y los resultados obtenidos en este análisis, los cálculos posteriores se realizaron únicamente con la función Gumbel, calculando sus parámetros con el método de estimación que generó un menor error cuadrático.

La tabla 2.6 muestra las alturas de precipitación obtenidas al ajustar la función Gumbel al registro de datos, para diferentes periodos de retorno. Para visualizar con mayor facilidad la línea de tendencia generada a partir de los datos disponibles, en el Anexo A se pueden observar las gráficas correspondientes (figuras A.1 a A.6).

Tabla 2.6. Valores obtenidos para diferentes periodos de retorno

Tr (años)	h _p (mm)					
	15015	15017	15020	15029	15094	15106
2	43.59	41.03	36.05	46.00	37.75	50.99
5	56.72	54.43	48.69	57.99	48.99	63.79
10	65.42	63.31	57.06	65.94	56.43	72.26
20	73.76	71.83	65.09	73.56	63.57	80.38
50	84.56	82.85	75.49	83.42	72.81	90.9
100	92.65	91.11	83.27	90.81	79.74	98.78
500	111.34	110.19	101.27	107.89	95.74	116.99
1000	119.38	118.40	109.01	115.23	102.62	124.82

En la tabla anterior se puede notar que las alturas de precipitación calculadas son similares para todas las estaciones analizadas, en cada uno de los periodos de retorno de interés.

2.4.4. Análisis de los datos de escurrimiento

Los datos de gastos medidos por las estaciones hidrométricas fueron analizados de la misma forma en que lo fueron los datos de precipitación de las estaciones climatológicas. Es decir, mediante el programa AX se analizaron los máximos anuales de cada una de las estaciones.

En primer lugar, se eligió la opción *cálculo global* para observar los errores producidos al ajustar la muestra de datos a las distintas funciones de probabilidad permitidas por el programa, en especial, la función Gumbel. Los resultados se concentran en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Resultados del análisis de gastos en AX, mediante la opción cálculo global.

ESTACIÓN		CÁLCULO GLOBAL		GUMBEL	
		Función	Error	Momentos	Máy. ver.
26178	Atenco	Doble gumbel	1.948	2.901	2.966
26184	San Andrés	Gamma	0.291	0.329	0.38
26193	La Grande	Lognormal	1.294	1.427	1.529
26195	Tejocote	Lognormal	0.277	0.308	0.352
26276	San Marcos	Lognormal	0.183	0.248	0.275

Los errores cuadráticos mínimos obtenidos al analizar la información de las estaciones hidrométricas son muy pequeños, menores a 1 en casi todos los casos.

Por las razones expuestas al describir las distintas funciones de probabilidad, se decidió nuevamente ajustar la muestra a la función Gumbel, aplicando en cada estación el método de estimación de parámetros que arrojó el menor error al realizar el cálculo global.

Los resultados obtenidos para diferentes periodos de retorno se muestran en la tabla 2.8. En el Anexo A, las figuras A.7 a A.11 corresponden a las gráficas de la función Gumbel.

Tabla 2.8. Valores obtenidos para diferentes periodos de retorno

Tr (años)	Q (m ³ /s)				
	26178	26184	26193	26195	26276
2	1.59	2.65	6.26	2.10	2.07
5	4.84	4.27	10.25	3.53	3.18
10	6.98	5.34	12.88	4.48	3.92
20	9.04	6.36	15.41	5.38	4.63
50	11.71	7.70	18.69	6.56	5.54
100	13.71	8.69	21.14	7.44	6.23
500	18.32	11.00	26.81	9.47	7.82
1000	20.31	11.99	29.25	10.34	8.50

La información sobre gastos máximos instantáneos fue analizada en el estudio elaborado en el 2000 (Domínguez, et. al.), a través de ella se determinaron los gastos pico para las estaciones: Atenco, San Andrés, La Grande y San Marcos (presentados en la tabla 4.5).

Dado que los registros de estaciones hidrométricas con los que se cuenta sólo abarcan hasta 1998, los resultados obtenidos en el estudio mencionado se utilizarán para el presente. Sin embargo, la estación hidrométrica Tejocote no fue analizada en aquella ocasión, por lo que en la tabla 2.9 se presentan los gastos pico determinados mediante la función de distribución Gumbel y el método de máxima verosimilitud (que es el que arrojó el menor error).

Tabla 2.9. Gastos pico de la estación Tejocote, calculados mediante la función Gumbel

T_r (años)	2	5	10	20	50	100	500	1000
Q_p (m^3/s)	20.73	36.88	47.58	57.83	71.11	81.06	104.06	113.94