

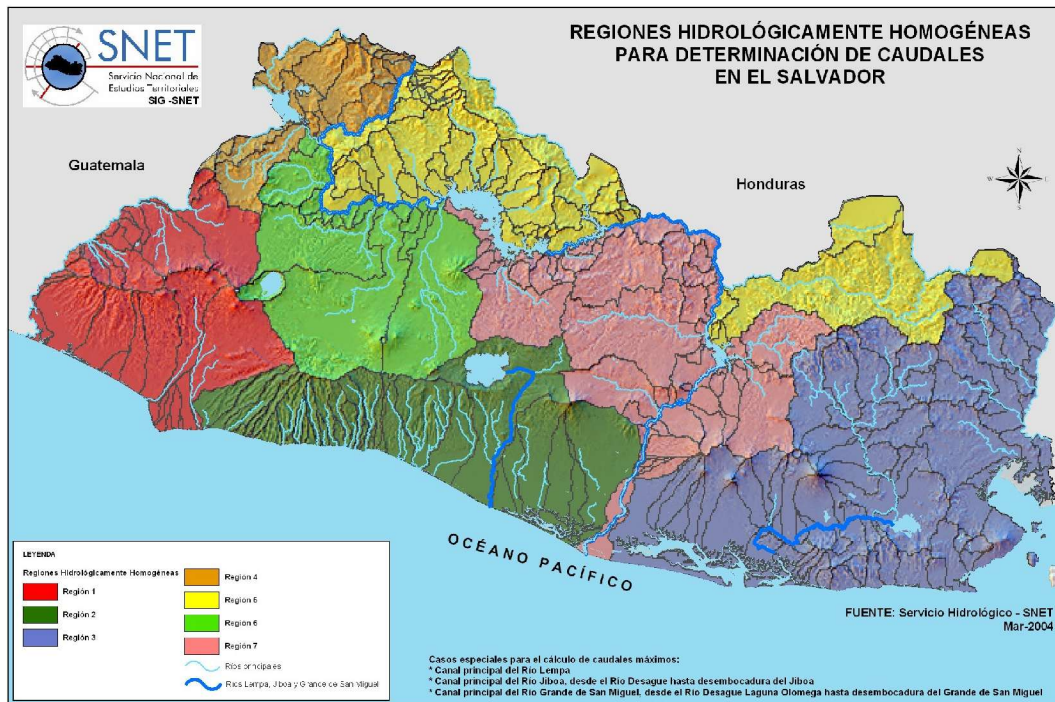


Ministerio de Medio Ambiente
y Recursos Naturales

SERVICIO NACIONAL DE ESTUDIOS TERRITORIALES



SERVICIO HIDROLÓGICO NACIONAL



REGIONALIZACION DE CAUDALES MÁXIMOS Y MEDIOS EN EL SALVADOR

ING. ADRIANA MARIA ERAZO CH.

2004

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN
 2. ESTACIONES HIDROMÉTRICAS ANALIZADAS
 3. REGIONALIZACION DE CAUDALES MÁXIMOS
 - 3.1 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN
 - 3.1.1 ANALISIS DE DATOS DUDOSOS (OUTLIERS)
 - 3.1.2 RELACION AREA – CAUDAL MÁXIMO
 - 3.2 DELIMITACION DE REGIONES HIDROLÓGICAMENTE HOMOGÉNEAS
 - 3.2.1 TEST DE HOMOGENEIDAD DE GUMBEL
 - 3.3 FUNCION DE DISTRIBUCION DE MEJOR AJUSTE A LOS DATOS HIDROLÓGICOS DE CAUDALES MAXIMOS
 - 3.4 RELACION ENTRE EL VALOR MEDIO DE LOS CAUDALES MÁXIMOS Y LAS CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS DE LAS CUENCAS
 - 3.5 APLICACION DE LA REGIONALIZACION DE CAUDALES MÁXIMOS - METODO REGIONAL DE INDICE DE CRECIENTE
 4. REGIONALIZACION DE CAUDALES MEDIOS
 - 4.1 RELACION ENTRE EL CAUDAL MEDIO Y LAS CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS DE LAS CUENCAS
 - 4.2 DISTRIBUCION MENSUAL DE LOS CAUDALES MEDIOS ANUALES
 - 4.3 APLICACION DE LA REGIONALIZACION DE CAUDALES MEDIOS
-

REGIONALIZACION DE CAUDALES MÁXIMOS Y MEDIOS EN EL SALVADOR

1. INTRODUCCIÓN

Las estaciones hidrométricas registran los caudales mínimos, medios y máximos que fluyen por un punto determinado de una cuenca. Esta información hidrológica medida, permite cuantificar la oferta hídrica de la cuenca, y estimar los caudales máximos para diferentes periodos de retorno para el diseño de obras hidráulicas. La estimación de estos valores de caudal en cuencas que no poseen medición directa a través de una estación hidrométrica, puede realizarse a través de metodologías estadísticas, hidrometeorológicas o de regionalización.

En este documento, se presenta la metodología y los resultados de la regionalización de caudales máximos y medios en el país, llevada a cabo con base en los datos registrados en las estaciones hidrométricas históricas.

La regionalización de caudales máximos desarrollada, permite la estimación de los caudales en cualquier parte del país para los periodos de retorno de 5, 10, 15, 20, 25, 50 y 100 años y la regionalización de caudales medios permite la estimación de los caudales medios anuales y mensuales igualmente para cualquier cuenca. Estas regionalizaciones consisten en una serie de ecuaciones y factores de ajuste, que de una forma sencilla permiten estimar los caudales tanto máximos como medios.

Para establecer las ecuaciones y factores de ajuste en la regionalización de caudales máximos, en primer lugar se evaluó la confiabilidad de la información de caudales máximos, a través de la prueba de datos dudosos OUTLIERS y de la relación área – caudal máximo. Posteriormente, se determinaron regiones hidrológicamente homogéneas, a partir de información de tipos de suelos, geología e Isolíneas de asimetría de caudales, tomando como base preliminar las regiones hidrográficas definidas para el país. Una vez definidas las regiones hidrológicamente homogéneas, estas fueron evaluadas a través del Test de Homogeneidad de Gumbel para verificar su homogeneidad. Las series hidrológicas de caudales máximos adimensionales constituidas para cada región hidrológicamente homogénea fueron ajustadas a las funciones de distribución Gumbel, Log Pearson III, Log Normal II y Log Normal III, y evaluadas con las pruebas de χ^2 y de Smirnov Kolmogorov y ajuste gráfico, para determinar la función de mejor ajuste a las series. Posteriormente, se determinó el factor de ajuste para cada periodo de retorno en cada región hidrológicamente homogénea y por ultimo se evaluó la relación entre las características fisiográficas de las cuencas y los caudales máximos promedios.

Para la regionalización de caudales medios, igualmente se determinó la relación entre los caudales medios anuales y las características fisiográficas de las cuencas, y la distribución mensual de los caudales anuales en cada región hidrológicamente homogénea.

2. ESTACIONES HIDROMÉTRICAS ANALIZADAS

En la **Tabla 1** se presentan las estaciones hidrométricas históricas cuya información fue utilizada para la regionalización de caudales máximos y medios.

N o	Cuenca	Nombre de Estación	Río	Longitud	Latitud	Altitud	Area
1	Paz	Hachadura	Paz	90° 05'17.1"	13° 51'34.3"	30.159	1991
2	Paz	San Lorenzo	Pampe	89°47'	14°02'	502.64	351
3	Sunza	Puente Litoral	Sunza	89°51'	13°38'		114.22
4	San Pedro	Atalaya	San Pedro	89°50'	13°37'	3.2	102.2
5	Gde.Sonsonate	Sensunapan	Gde.Sonsonate	89°50'	13°36'	1.77	219
6	Bandera	Santa Beatriz	Bandera	89°44'	13°36'	24.03	422
7	Bandera	Conacaste Herrado	Ceniza	89°44'	13°40'	148.87	167.7
8	Chilama	La Libertad	Chilama	89°20'	13°29'	7.78	76.5
9	Huiza	Puente Litoral	Huiza	89°13'	13°29'	8.46	133
10	Comalapa	San Luis Talpa	Comalapa	89°05'	13°28'	27.25	65.4
11	Jiboa	Montecristo	Jiboa	88°59.3'	13°31.6'	86.508	429.1
12	Jiboa	San Ramon	Jiboa	88°54.9'	13°40'	468.33	54.4
13	Jiboa	Santa Cruz Chacastal	Jiboa	88°59.3'	13°34.3'	150.86	392.7
14	Jalponga	La Ceiba	Jalponga	88°57'	13°31'	98.343	58
15	La Bolsa	Los Tihuilotes	La Bolsa	88°44'	13°27'	15.358	109.6
16	Lempa	San Marcos	Lempa	88°42'	13°26'	4.882	18176.3
17	Lempa	Colima	Lempa	89°08'	14°04'	218.58	7342.9
18	Lempa	Cuscatlan	Lempa	88°34'	13°37'	15.456	17529.6
19	Lempa	El Silencio	Lempa	88°56'	13°56'	183.03	8584.5
20	Lempa	Paso del oso	Lempa	89°25'	14°05.5'	294.594	4531.4
21	Lempa	EL Zapotillo	Lempa	89°24.9'	14°10.7'	328.78	3246
22	Lempa	Citala	Lempa	89°12.9'	14°22.1'	701.636	914
23	Lempa	San Andres	Sucio	89°24'	13°48'	1440.05 5	379.2
24	Lempa	Ateos	Talnique	89°26'	13°45'		108.93
25	Lempa	Desembocadura	Sucio	89°16'	14°02'	686.35	843
26	Lempa	San Andres,ENA	Agua Caliente	89°24'	13°49'	445.017	112.6
27	Lempa	El Jocote	Sucio	89°18'	13°55'	324.734	724
28	Lempa	Sitio del Niño	Sucio	89°22'	13°48'	438.132	499
29	Lempa	Armenia	Copapayo	89°28.5'	13°45.3'	480	48.3
30	Lempa	Angue	Los Puentes	89°33'	14°20'	427.207	587.4
31	Lempa	Tacachico	Suquiapa	89°20'	13°59'	288.238	308
32	Lempa	Las Pavas	Suquiapa	89°18'	14°02'	264.574	435
33	Lempa	San Francisco	Guajojo	89°30'	14°02'	393.879	199.7
34	Lempa	Singuil	Guajojo	89°36'	14°07'	615.365	114.5
35	Lempa	Guajojo	Laguna Guija	89°29'	14°15'	415.94	44
36	Lempa	Puent.Mocho,Desem.	Acelhuate	89°09'	14°03'	224.26	713
37	Lempa	Desem.,San Diego	Acelhuate	89°09'	13°59'	247.28	583.2
38	Lempa	Guazapa	Acelhuate	89°12'	13°53'	320.836	366
39	Lempa	Arenales	Tomayate	89°10'	13°44'	549.977	35.2
40	Lempa	Osicala	Torola	88°09'	13°50'	277.395	908
41	Lempa	El Pedregal,obrajuelo	Acahuapa	88°39.7'	13°37.2'		225
42	Lempa	Obrajuelo	Acahuapa	88°39.7'	13°37.2'	21.661	225
43	Lempa	Santa María	Ismataco	88°45.1'	13°41'	495.979	13.1
44	Lempa	Metapan	San Jose	89°27'	14°20'	476.506	26.9
45	Lempa	Vado Garcia	Titihuapa	88°33'	13°45'	41.018	559
46	Lempa	Metayate	Metayate	89°12'	14°06'	250.78	185.2
47	Lempa	Miralempa	Jiotique	88°28'	13°41.6'	28.117	561

48	Lempa	Las Flores	Sumpul	88°48.5'	14°02.7'	174.331	980
49	Lempa	Suchitoto	Quezalapa	89°00'	13°56'	198.92	406.8
50	Lempa	Nueva Concepción	Mojaflares	89°18'	14°05.5'	281.92	47
51	Lempa	El Paraiso	Gde Chalatenango	89°04.7'	14°05'	227.68	116
52	Lempa	El Guayabo	Copinolapa	88°48.5'	13°58.7'	131.515	298
53	Lempa	La Sierpe	Tamulasco	88°56.5'	14°01.7'	344.182	74
54	Lempa	El Rosario	Tahuilapa	89°23.7'	14°15.8'	0	126.8
55	Gde San Miguel	Moscoso	Gde San Miguel	88°09'	13°26'	76.017	1074
56	Gde San Miguel	Vado Marin	Gde San Miguel	88°17'	13°18'	19.782	1900
57	Gde San Miguel	El Delirio,La Canoa	Gde San Miguel	88°09'	13°20'	0	1637
58	Gde San Miguel	Las Conchas	Gde San Miguel	88°25'	13°17'	7.465	2238
59	Gde San Miguel	Villeras	Gde San Miguel	88°11'	13°31'	87.427	910
60	Gde San Miguel	Hato Nuevo	Taisihuat	88°09'	13°29'	96.06	102
61	Sirama	Siramita	Sirama	87°52'	13°29'	3.904	328.7
62	Goascoran	El Amatillo	Goascoran	87°46'	13°36'		
63	Goascoran	Pasaquina	Pasquina	87°50'	13°35'	34.67	243
64	Goascoran	El Sauce	El Sauce	87°48'	13°40'	71.797	319.5

3. REGIONALIZACION DE CAUDALES MÁXIMOS

La estimación de caudales máximos para diferentes periodos de retorno, es uno de los principales procedimientos en Hidrología, que tiene como fin la determinación del caudal de diseño para una determinada estructura hidráulica o para el trazado de mapas de inundación.

La metodología más común para la determinación de estos caudales máximos, es la metodología estadística, la cual ajusta los datos registrados en una estación hidrométrica a una función de distribución y determina los valores para diferentes periodos de retorno. Uno de los inconvenientes de esta metodología es que se basa en la serie de caudales de una estación en particular, la cual es generalmente corta, lo cual crea una gran incertidumbre para el cálculo de caudales con periodo de retorno alto. Otro inconveniente que presenta esta metodología, es que solo permite calcular los caudales máximos para diferentes periodos de retorno en el sitio de ubicación de la estación hidrométrica, lo cual limita el alcance de los caudales calculados. Otra metodología utilizada para el cálculo de caudales máximos, es la hidrometeorológica, la cual permite generar caudales máximos a partir de información de precipitación, a través de fórmulas empíricas o hidrogramas unitarios de las cuencas; Esta metodología es mas compleja que la anterior y tiene limitantes de áreas para las cuencas, dependiendo del método hidrometeorológico a utilizar.

La metodología de regionalización de caudales máximos permite superar estos inconvenientes, ya que se basa en el uso simultáneo de los datos registrados en todas

las estaciones hidrométricas ubicadas dentro de una zona considerada hidrológicamente homogénea, con lo que la serie resultante es mucho más larga que la de una estación en particular, además de que permite el cálculo de caudales máximos en cualquier cuenca que no tenga estación hidrométrica, ya que establece relaciones entre las características fisiográficas de las cuencas y los caudales máximos.

La regionalización de caudales máximos que se llevó a cabo en El Salvador, fue a través del método de índice de creciente (Flood Index) el cual supone que los máximos anuales dentro de la región hidrológicamente homogénea siguen una misma función de distribución y lo que varía es un factor de escala de acuerdo a las cuencas ubicada en dicha región.

La regionalización de caudales máximos se realizó para los periodos de retorno de 5, 10, 15, 20, 25, 50 y 100 años. Los pasos que se llevaron a cabo fueron los siguientes:

- a. Análisis de Información, para establecer la confiabilidad de la información de caudales máximos registrados en las estaciones hidrométricas analizadas
- b. Delimitación de regiones hidrológicamente homogéneas, las cuales se establecieron con base en los mapas de uso de suelo, geología, y respuesta hídrica de las cuencas.
- c. Función de distribución de mejor ajuste a la serie de caudales máximos adimensionales de cada región homogénea y determinación de factores para el cálculo de caudales para cada periodo de retorno
- d. Determinación de relaciones entre características fisiográficas de las cuencas y caudales máximos.

A continuación se detalla cada uno de los pasos seguidos para la regionalización de caudales máximos.

3.1 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

La información de caudales máximos registrados en las estaciones hidrométricas del país, fue analizada para evaluar su confiabilidad; esta evaluación se llevó a cabo a través de análisis de datos dudosos (outliers) y por medio de la relación entre área de la cuenca y el promedio de los caudales máximos.

3.1.1 ANALISIS DE DATOS DUDOSOS (OUTLIERS)

Los outliers son datos que se alejan significativamente de la tendencia de la información y que afectan de una manera considerable la magnitud de los parámetros

estadísticos de la serie, especialmente en muestras pequeñas. Para detectar los datos dudosos, se calcularon umbrales superiores e inferiores para cada serie de datos de caudales máximos de las estaciones analizadas, de acuerdo a las siguientes ecuaciones de frecuencia, recomendadas por Ven Te Chow:

$$Y_H = y + K_n * S_y$$

$$Y_L = y - K_n * S_y$$

En donde:

- Y_H umbral superior para datos dudosos en unidades logarítmicas
- Y_L umbral inferior para datos dudosos en unidades logarítmicas.
- y media de los logaritmos de los caudales
- S_y desviación estándar de los logaritmos de los caudales
- K_n valor tabulado para una muestra de tamaño n (tomado del libro de Hidrología Aplicada de Ven Te Chow) (**Tabla 2**)

Tabla 2. VALORES DE K_n PARA PRUEBA DE DATOS DUDOSOS (REF. Hidrología Aplicada VEN TE CHOW)

Tamaño muestra n	K_n	Tamaño muestra n	K_n	Tamaño muestra n	K_n	Tamaño muestra n	K_n
10	2.036	18	2.335	26	2.502	34	2.616
11	2.088	19	2.361	27	2.519	35	2.628
12	2.134	20	2.385	28	2.534	36	2.639
13	2.175	21	2.408	29	2.549	37	2.650
14	2.213	22	2.429	30	2.563	38	2.661
15	2.247	23	2.448	31	2.577	39	2.671
16	2.279	24	2.467	32	2.591	40	2.682
17	2.309	25	2.486	33	2.604		

Con esta metodología solo se pueden determinar los outlier en estaciones que tienen mas de 10 registros, por lo que no se pudieron analizar todas las estaciones con las que se contaba para la regionalización, ya que varias de ellas tenían menos de 10 datos.

Para las estaciones que contaban con mas de 10 datos de registro, los valores que se encontraron fuera de los umbrales, fueron analizados, para verificar si en la fecha de registro existió algún evento meteorológico que pudiera haber afectado la respuesta

hídrica de la cuenca, tal como huracán, tormenta particular, o en caso contrario, años Niño, que pudieran dar una explicación del porque el dato se encontraba fuera del rango de los umbrales. En caso de encontrar explicación lógica, el dato fue considerado como válido, y en caso contrario el dato era descartado. En la **Tabla 3** se presentan los resultados de los umbrales y los outliers registrados para las estaciones analizadas, así como el comentario explicativo de cada situación particular.

Como puede observarse en la Tabla 3, en algunas estaciones existen datos fuera del rango de los umbrales, sin embargo en la mayoría existe una explicación del porque esos datos están fuera del rango, excepto en la estación Amates Montecristo, con el dato de 2406 m³/s, el cual fue descartado.

Tabla 3 Outliers en series históricas de caudales máximos

ESTACION	UMBRAL INFERIOR	UMBRAL SUPERIOR	DATO OUTLIER	FECHA	OBSERVACION
SAN ANDRES / E.N.A. LOS PUENTES ANGUE	12.46	54.29	34.62	16 Sept. 1959	Aunque no fue un año niño, las lluvias de la cuenca estuvieron 30% por debajo del promedio normal, por lo que es el dato de 34.62 es válido.
SANTA BEATRIZ	69.39	1142.74	1222	14 Oct. 1970	Para esta fecha, se presentaron lluvias fuertes en la zona (59.2 mm en Fca el Sunza), por lo que se considera válido el dato.
CONACASTE HERRADO	29.27	311.20	325	14 Oct. 1970	Para esta fecha, se presentaron lluvias fuertes en la zona (59.2 mm en Fca el Sunza), por lo que se considera válido el dato.
LA LIBERTAD / LA PRESA CHILAMA	12.88	409.51			
DESAGUE DE ILOPANGO	1.46	8.55			
MOSCOSO	180.43	2399.36	2784.88	4 Sept. 1969	Huracán Francelia, dato válido.

VILLERIAS	293.71	1504.73	289.03	26 Sept. 1976	Año Niño, dato válido.
VADO MARIN	32.17	968.69	1599.33	2 Nov. 1998	Huracán Mitch, dato válido.
SENSUNAPAN	30.29	1214.17			
SAN FRANCISCO GUAJOYO	51.87	515.50			
SINGUIL	45.44	401.65			
AMATES/MONTECRISTO	50.85	1040.31	2406	10 Sept. 1967	Dato dudoso, descartado
COLIMA	484.27	6170.19			
SAN MARCOS	724.52	14515.22			
PASO DEL OSO	305.28	2760.80			
NUEVA CONCEPCION MOJAFLORES	5.63	516.91			
SAN LORENZO	12.52	2380.32			
PASAQUINA	217.62	621.33			
HACHADURA	103.69	9485.36			
LA ATALAYA	44.22	596.07			
SAN RAMON	15.42	113.39	14.6	05-Jul- 73	Año Niño, dato válido.
DELIRIO/LA CANOA	69.17	919.53			
EL SAUCE	291.29	2181.91			
SIRAMITA	34.79	11530.33			
CITALA	206.09	1459.28			
DESEMBOCADURA SUCIO	121.38	546.00			
EL JOCOTE	64.42	299.18			
SITIO DEL NIÑO	45.77	631.89			
SAN ANDRES	25.28	481.72	577	18 Oct. 1968	Lluvias fuertes en la zona: Estación San Andres: 55.8 mm y 45.2 mm los días 17 y 18 de Oct. Dato válido.
TACACHICO	44.31	577.27			
LAS PAVAS	117.09	890.58			
LA SIERPE	57.35	268.71			
VADO GARCIA	201.21	1443.68	1850	4 Sept. 1969	Huracán Francelia, dato válido.
OSICALA	527.88	4651.78			

3.1.2 RELACION AREA – CAUDAL MÁXIMO

La segunda metodología usada para determinar la confiabilidad de los datos de caudales máximos, fue a través de la relación área – caudal máximo. Con base en los datos de caudales máximos de las estaciones analizadas, se determinó para cada estación el

promedio de dichos caudales, y este valor se relacionó con el área de la cuenca; estos valores se presentan en la **Figura 1**.

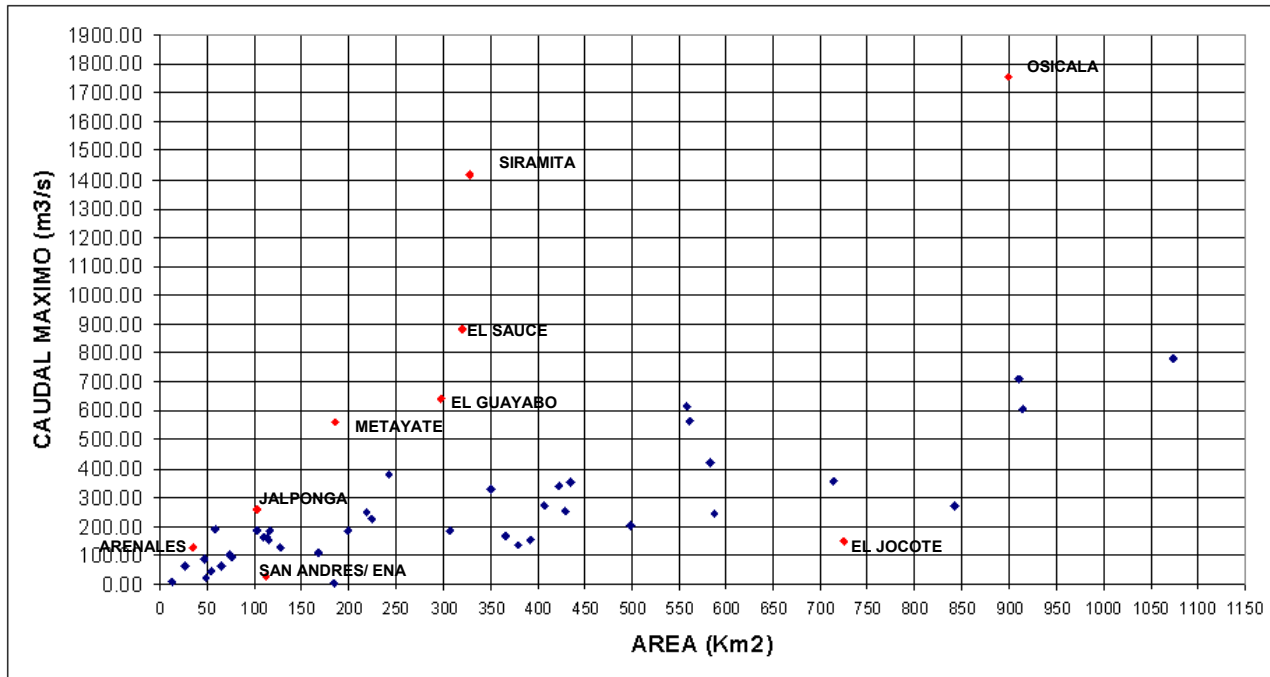


Figura 1. Relación entre Caudal Máximos y Área de la Cuenca

La tendencia en general de la relación es la de una función logarítmica, sin embargo, existen algunas estaciones que se salen notoriamente de este comportamiento y que dada su gran dispersión, crean duda de sus registros, estas estaciones se presentan en color rojo en la **Figura 1** y corresponden a las siguientes estaciones: Siramita, Osicala, El Sauce, El Guayabo, Metayate, Jalponga, Arenales, San Andrés Ena y El Jocote. Para estas estaciones, se analizaron los datos de aforos y se determinó si los caudales máximos calculados a partir de las curvas de descargas eran posibles con los aforos existentes.

En la estación Siramita, existe un nivel medido de 7.30 metros en 1970 con un caudal calculado de acuerdo a la curva de descarga de 1728 m³/s; para el año 1971 existe un aforo con nivel de 7.67 metros y un caudal de 217.96 m³/s, por lo que el caudal calculado de 1728 m³/s no sería posible. Para las otras estaciones no existen datos de aforos tan altos como los registrados en los caudales máximos, por lo que no se pudo establecer una comparación directa como en el caso de la estación Siramita, sin embargo con los niveles de los aforos existentes se puede estimar que los caudales máximos calculados están sobreestimados en el caso de las estaciones Sauce, Guayabo, Jalponga, Metayate y Arenales, y pueden estar subestimados en El Jocote y San Andrés ENA, por lo que se recomienda la revisión de las curvas de descarga de estas estaciones en especial. En el

Anexo 1 se presentan los caudales máximos para estas estaciones y los valores de aforos máximos con lo que se verificó lo anterior. Debido al anterior análisis, las estaciones mencionadas no fueron tenidas en cuenta para la regionalización.

3.2 DELIMITACION DE REGIONES HIDROLÓGICAMENTE HOMOGENEAS

La delimitación preliminar de las regiones hidrológicamente homogéneas, se realizó a partir del análisis de los mapas de Clasificación General de Suelos, Mapa Geológico de El Salvador e Isolíneas de Asimetría de caudales máximos, los cuales se presentan en el **Anexo 2**, tomando como base las regiones hidrográficas definidas para el país. La homogeneidad de las regiones hidrológicas delimitadas fue evaluada por medio del Test de homogeneidad de Gumbel.

3.2.1 TEST DE HOMOGENEIDAD DE GUMBEL

El test de homogeneidad de Gumbel evalúa si la curva de frecuencia puntual (en cada estación) no se aleja de la curva de frecuencia regional compuesta por **m** estaciones existentes en la región propuesta. El test es evaluado para un periodo de retorno de 10 años y para su desarrollo se siguen los siguientes pasos:

1. Determinar los límites de confianza:

En la distribución Gumbel los límites del intervalo de confianza para la variable reducida Y_t se expresan como:

$$Y_i = Y_t - t_\alpha \left\{ e^{Y_t} / \sqrt{N(T-1)} \right\}$$

$$Y_s = Y_t + t_\alpha \left\{ e^{Y_t} / \sqrt{N(T-1)} \right\}$$

y los límites del intervalo de confianza para T son:

$$T_i = 1 / \left\{ 1 - e^{-e^{-Y_i}} \right\}$$

$$T_s = 1 / \left\{ 1 - e^{-e^{-Y_s}} \right\}$$

Donde:

$$Y_t = -\ln \left\{ -\ln \left\{ 1 - (1/T) \right\} \right\}$$

t_α Valor de la variable aleatoria con una distribución normal estándar.

- α Nivel de confianza del intervalo
- N Numero de años de registro
- T Periodo de retorno

Debido a que el test de homogeneidad esta basado en la consideración de un periodo de retorno de 10 años y teniendo en cuenta un nivel de significancia de 95% ($\alpha = 0.95$), para el cual $t_{\alpha} = 1.96$, los limites del intervalo de confianza son:

$$Y_i = 2.25 - \{ 6.199 / \sqrt{N} \}$$

$$Y_s = 2.25 + \{ 6.199 / \sqrt{N} \}$$

2. Establecer la curva de frecuencia puntual para cada estación, ajustando los datos muestrales a la distribución Gumbel.
3. Evaluar los valores de $Q_{2.33}$ y Q_{10} (caudales para periodo de retorno de 2.33 años y 10 años respectivamente) de la curva de frecuencia puntual para cada estación y calcular un factor de uniformidad para la región, definido como:

$$K = (1/m) * \sum_1^m (Q_{10} / Q_{2.33})$$

4. Determinar caudales uniformes:

$$Q_K = K * Q_{2.33}$$

5. Para cada estación se determina el valor del periodo de retorno Tr , correspondiente a Q_K , a partir de su curva de frecuencia.
 6. Dibujar sobre un gráfico de probabilidades donde previamente se han trazado los limites de confianza, los pares de valores (Tr , N), donde N es la longitud de registro de la estación.
 7. Determinar si la región propuesta es homogénea: sí los puntos graficados se ubican dentro de los limites de confianza, la región es aceptada como homogénea, en caso contrario se replantean las regiones y se repite el proceso.
-

Siguiendo la metodología expuesta, se evaluó la homogeneidad de las regiones planteadas preliminarmente, dando como resultado las regiones hidrológicamente homogéneas que se presentan en la **Tabla 4**.

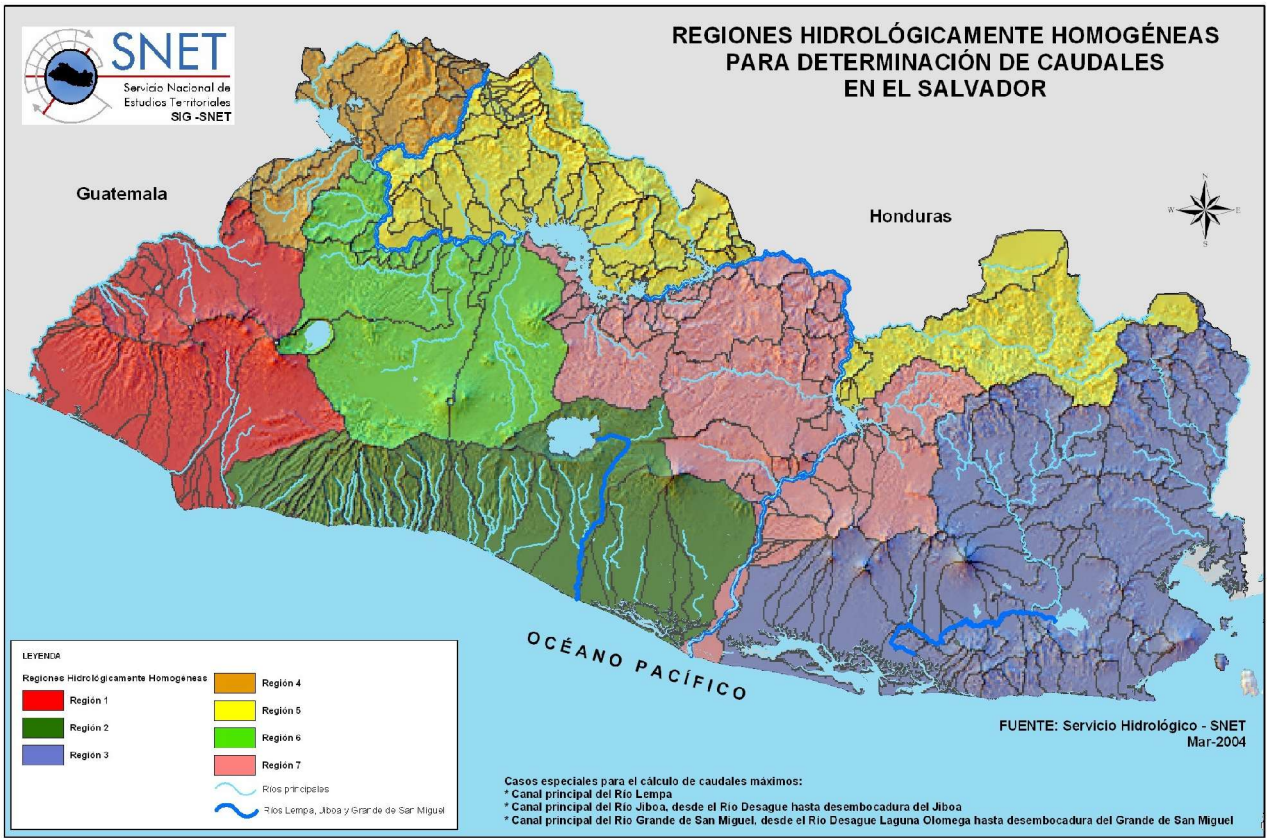
En el **Anexo 3** se presentan los resultados gráficos del Test de homogeneidad de Gumbel para cada una de las regiones hidrológicamente homogéneas.

Tabla 4. REGIONES HIDROLÓGICAMENTE HOMOGÉNEAS DELIMITADAS.

Región Hidrológicamente Homogénea	Región Hidrográfica o Cuencas
1	Cuenca río Paz, Región Hidrográfica Cara Sucia – San Pedro, Región Hidrográfica Sonsonate – San Pedro
2	Región Hidrográfica Comalapa – Mandinga, Región Hidrográfica Jiboa
2b	Canal Principal del río Jiboa
3	Río Grande de San Miguel, Goascorán, Sirama
3b	Canal principal del río Grande de San Miguel aguas abajo de la Laguna de Olomega
4	Cuencas de Metapán, Angue, Guajoyo
5	Cuencas de Mojaflares, Metayate, Tamulasco, Grande de Chalatenango, Sumpul, Torola
6	Cuencas de los ríos Sucio, Suquiapa y Acelhuate
7	Cuencas de los ríos Quezalapa, Copinolapa, Titihuapa, Acahuapa, Jiotique
8	Canal principal del río Lempa

Es de destacar que los caudales máximos de los ríos Jiboa y Grande de San Miguel se ven afectados por el amortiguamiento que ejercen el Lago de Ilopango y la Laguna de Olomega respectivamente, por lo que los caudales en el cauce aguas abajo de dichos cuerpos de agua, presentan un comportamiento particular dentro de cada región homogénea.

En el mapa Anexo se presentan las regiones hidrológicamente homogéneas definidas:



3.3 FUNCION DE DISTRIBUCION DE MEJOR AJUSTE A LOS DATOS HIDROLÓGICOS DE CAUDALES MAXIMOS

El método de regionalización de Índice de Creciente, con la hipótesis “estación – año”, asume una única muestra hidrológica por región, para lo cual los datos de caudal máximos de cada estación dentro de la región son divididos por su valor de caudal medio (el promedio de los caudales máximos), y se juntan todo los datos de las estaciones de la región como la muestra hidrológica.

Una vez determinadas las muestras hidrológicas de cada región, estas fueron ajustadas a las funciones de distribución Gumbel, Log Pearson III, Log Normal II y Log Normal III, para determinar la función de mejor ajuste a las series, para lo cual se realizaron pruebas de Chi 2 y de Smirnov Kolmogorov y ajuste gráfico. De las funciones que eran **ACEPTADAS** una vez pasadas las pruebas, se escogió la de mejor ajuste como aquella que presentara menor valor calculado en las dos pruebas estadísticas.

En el **Anexo 4**, se presentan los resultados del ajuste a las funciones de distribución y las pruebas estadísticas y grafica. En la **Tabla 5** se presenta el resumen de los resultados, los cuales representan el factor de ajuste para el cálculo de caudales máximos para diferentes periodos de retorno.

Es importante mencionar, que la función de distribución que mejor se ajustó a los datos analizados de caudal máximo, fue la distribución Log Normal, en su mayoría la de II parámetros y en dos casos (regiones 3b y 6) la de III parámetros.

Tabla 5. FACTOR DE AJUSTE PARA EL CALCULO DE CAUDALES MAXIMOS

PERIODO DE RETORNO	REGION									
	1	2	2b	3	3b	4	5	6	7	8
5	1.64	1.50	1.39	1.40	1.54	1.50	1.51	1.42	1.38	1.40
10	2.28	1.96	1.73	1.74	2.05	1.96	1.99	1.79	1.71	1.75
15	2.68	2.24	1.93	1.94	2.36	2.24	2.28	2.01	1.90	1.96
20	2.98	2.45	2.07	2.09	2.60	2.44	2.49	2.17	2.04	2.11
25	3.23	2.61	2.18	2.20	2.79	2.61	2.66	2.30	2.15	2.22
50	4.05	3.14	2.54	2.57	3.41	3.13	3.22	2.71	2.49	2.59
100	4.96	3.71	2.90	2.94	4.08	3.70	3.81	3.14	2.84	2.98

3.4 RELACION ENTRE EL VALOR MEDIO DE LOS CAUDALES MÁXIMOS Y LAS CARACTERÍSTICAS FISIGRÁFICAS DE LAS CUENCAS

Para determinar las relaciones existentes entre el valor promedio de los caudales máximos ($Q_{2.33}$) y las características fisiográficas de área, longitud y pendiente del cauce, se realizaron correlaciones múltiples con el programa estadístico SPSS, dando como resultado que la característica que mejor se relaciona con los caudales máximos es el área de la cuenca. Para cada región se determinó la línea de mejor tendencia al ajuste su ecuación, las cuales se presentan en la **Tabla 6**, en la cual se indica el rango de área de las cuencas en que estas ecuaciones fueron establecidas.

En el **Anexo 5** se presentan los resultados gráficos de las relaciones entre el valor promedio de los caudales máximos ($Q_{2.33}$) y las áreas de las cuencas.

Tabla 6. ECUACIONES DE RELACION ENTRE EL VALOR MEDIO DE LOS CAUDALES MÁXIMOS $Q_{2.33}$ Y EL AREA DE LA CUENCA

REGION	ECUACION	R ²	RANGO DE AREA (Km ²)
1	$Q_{2.33} = 0.6839 * A + 72.986$	0.9925	100 - 1991
2	$Q_{2.33} = 2.1408 * A - 71.75$	0.9946	55 - 110
2b	$Q_{2.33} = 0.9257 * A - 172.78$	0.9275	187 - 430
3	$Q_{2.33} = 0.5871 * A + 198.91$	0.9931	100 - 1930
3b	$Q_{2.33} = 0.0701 * A + 122.32$	0.7167	1640 - 2240
4	$Q_{2.33} = 0.6758 * A + 53.357$	0.9197	25 - 200
5	$Q_{2.33} = -0.0008 * A^2 + 1.6108 * A + 4.2165$	0.991	45 - 120
6	$Q_{2.33} = 0.3519 * A + 53.544$	0.6362	45 - 845
7	$Q_{2.33} = 0.4868 * A^{1.107}$	0.9882	13 - 560
8	$Q_{2.33} = -5E-06 * A^2 + 0.3154 * A + 205.28$	0.9702	915 - 18200

3.5 APLICACION DE LA REGIONALIZACION DE CAUDALES MÁXIMOS - METODO REGIONAL DE INDICE DE CRECIENTE.

Para aplicar el método regional de Índice de Creciente, para la estimación de caudales máximos en cualquier punto del país, se sigue la siguiente metodología:

1. Se ubica la región hidrológicamente homogénea a la cual pertenece la cuenca a la que se le van a estimar los caudales máximos para diferentes periodos de retorno (Mapa de regiones hidrológicamente homogéneas).
2. Se determina el caudal correspondiente al promedio de los caudales máximos ($Q_{2.33}$) con base en el área de la cuenca y a la región hidrológicamente homogénea a la que pertenece (Tabla 6).
3. El $Q_{2.33}$ se multiplica por los factores de ajuste para los diferentes periodos de retorno (Tabla 5)

Ejemplo de aplicación:

Calcular los caudales para los periodos de retorno de 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años en una cuenca ubicada en la parte alta del río Grande de San Miguel con un área de 350 Km².

Solución:

1. La región hidrológicamente homogénea a la que pertenece es la región 3 (Ver mapa de regiones hidrológicamente homogéneas).
2. De la Tabla 6, con el área de 350 Km², se calcula el Q2.33:

$$Q_{2.33} = 0.5871 * (350) + 198.91 = 404.40 \text{ m}^3/\text{s}$$

3. Con los factores de ajuste de la Tabla 5, para la región 3, se calculan los caudales para los diferentes periodos de retorno:

Tabla 7. CÁLCULO DE CAUDALES MÁXIMOS PARA CUENCA UBICADA EN LA PARTE ALTA DEL RÍO GRANDE DE SAN MIGUEL.

Periodo de Retorno (años)	Factor de Ajuste	Caudal Máximo estimado (m ³ /s)
5	1.40	566.16
10	1.74	703.65
15	1.94	794.54
20	2.09	845.20
25	2.20	889.68
50	2.57	1039.31
100	2.94	1188.94

4. REGIONALIZACION DE CAUDALES MEDIOS

A partir de las regiones hidrológicamente homogéneas determinadas para la Regionalización de Caudales Máximos, se regionalizaron los caudales medios, igualmente con el fin de poder estimar en cualquier punto del país el caudal medio, aunque no existan registros hidrométricos.

El proceso fue similar al desarrollado para la regionalización de caudales máximos, pues consistió en determinar las relaciones entre el área de las cuencas que tenían registro y sus caudales medios anuales, y la distribución de los caudales medios anuales en mensuales para cada región.

4.1 RELACION ENTRE EL CAUDAL MEDIO Y LAS CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS DE LAS CUENCAS

Se analizó gráficamente la relación entre el área de las cuencas y sus caudales medios anuales registrados en las estaciones hidrométricas, para cada región hidrológicamente homogénea y se trazó la línea de tendencia de mejor ajuste, a partir de la cual se determinó la ecuación que relaciona las dos variables para cada una de las regiones hidrológicamente homogéneas. En la Tabla 8 se presentan las ecuaciones y los rangos de área en que estas ecuaciones fueron establecidas para la estimación del caudal medio anual.

Es importante mencionar que las regiones hidrológicamente homogéneas fueron las mismas que para la regionalización de caudales máximos, excepto que en la regionalización de caudales medios, no existen las regiones 2b y 3b, que correspondían al cauce principal de los ríos Jiboa y Grande de San Miguel aguas abajo de los cuerpos de agua del Lago de Ilopango y Laguna de Olomega respectivamente, que dado el amortiguamiento que producían en la creciente generaban relaciones distintas al resto de la cuenca para los caudales máximos, lo cual no ocurre para los caudales medios.

Tabla 8. ECUACIONES DE RELACION ENTRE CAUDALES MEDIOS ANUALES Y EL AREA DE LA CUENCA

REGION	ECUACION	R ²	RANGO DE AREA (Km ²)
1	$Q = 0.0127 * A + 1.4954$	0.9842	100 - 1991
2	$Q = 0.0103 * A + 0.4433$	0.9055	55 - 430
3	$Q = 0.0151 * A + 0.4752$	0.964	100 - 2240
4	$Q = 0.0109 * A + 0.545$	0.9647	25 - 587
5	$Q = 0.0304 * A - 0.3231$	0.8621	45 - 185
6	$Q = 2E-06 * A^2 + 0.0156 * A + 0.0944$	0.9626	35 - 845
7	$Q = -1E-05 * A^2 + 0.0214 * A - 0.2529$	0.8932	13 - 560
8	$Q = 0.0176 * A - 10.123$	0.9465	915 - 18200

En el **Anexo 6** se presentan los resultados gráficos de las relaciones entre los caudales medios y las áreas de las cuencas.

4.2 DISTRIBUCION MENSUAL DE LOS CAUDALES MEDIOS ANUALES

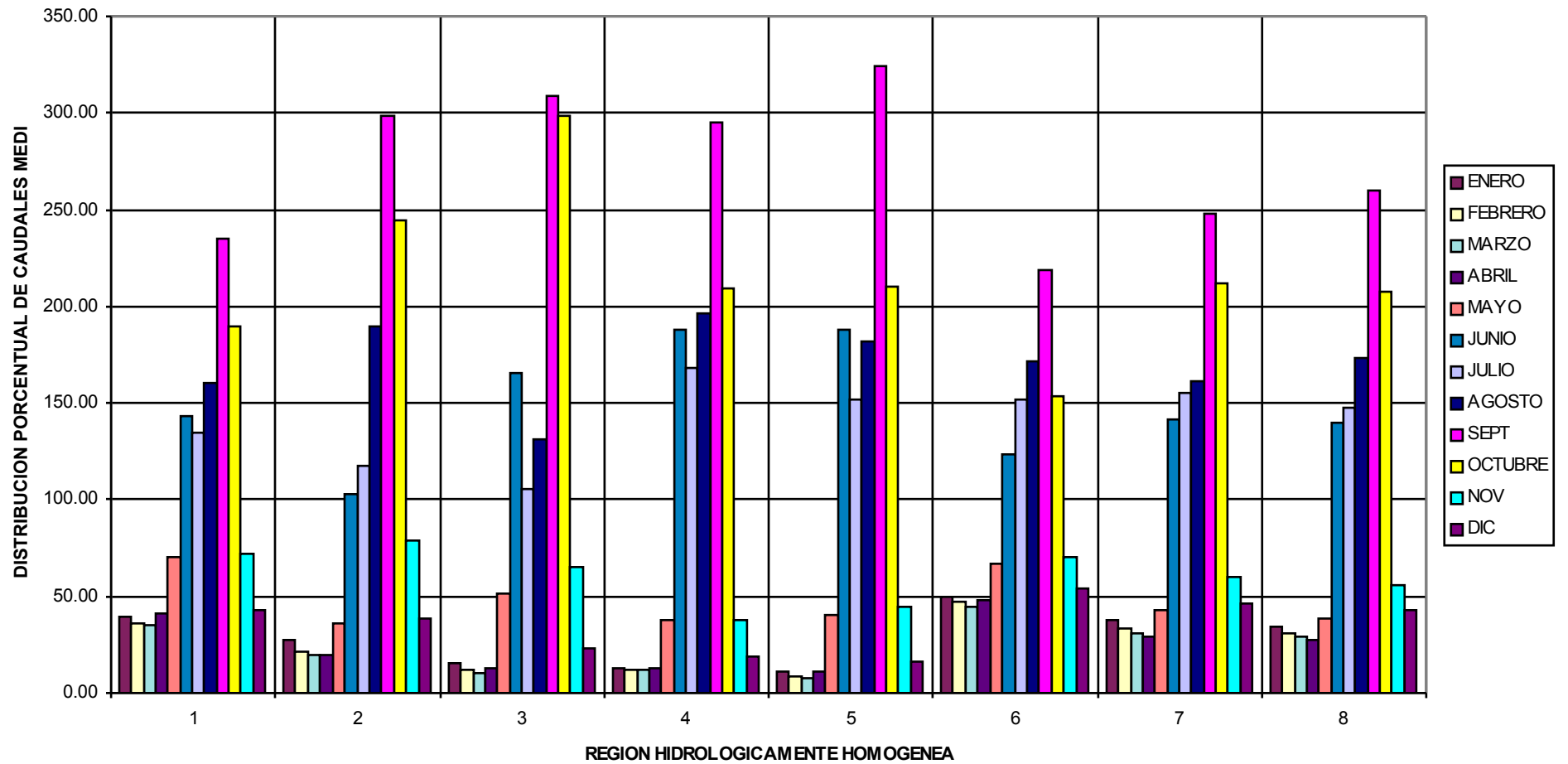
Para cada región hidrológicamente homogénea se distribuyó el caudal medio anual en caudales mensuales, determinando el porcentaje correspondiente de cada mes con respecto al anual, como promedio de las estaciones hidrométricas existentes en cada región. Esta distribución se presenta en la Tabla 9, y en el Anexo 6.

Tabla 9. DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LOS CAUDALES MEDIOS ANUALES (%)

REGION	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPT	OCTUBRE	NOV	DIC
1	39.70	36.07	35.19	41.08	70.13	143.57	134.66	160.26	235.02	189.34	72.12	42.86
2	27.83	21.63	19.70	19.57	36.30	103.05	117.51	189.77	298.52	244.10	78.82	38.88
3	15.60	11.72	10.37	13.04	51.07	165.84	105.23	131.49	308.94	298.19	65.10	23.43
4	12.71	12.05	11.62	12.93	37.37	187.87	167.96	196.26	295.08	209.56	37.34	19.24
5	11.33	8.41	7.91	11.48	39.99	187.45	151.65	181.47	323.98	210.04	44.41	16.62
6	49.55	46.97	44.99	47.87	67.07	123.54	151.70	171.84	218.65	153.68	70.02	54.11
7	27.35	23.68	22.55	25.14	42.06	147.12	130.26	164.56	297.01	220.13	67.01	33.14
8	38.13	33.35	31.15	29.11	42.93	141.82	154.92	161.50	248.26	212.05	60.13	46.64

En la figura 2 se presenta la distribución porcentual por región hidrológicamente homogénea, en la cual se puede observar la diferencia pronunciada que existe entre los caudales mensuales de la época lluviosa y la época seca en la zona norte del país regiones 4 y 5 (cuencas de los ríos Metapán, Angue, Guajoyo, Mojaflares, Metayate, Tamulasco, Grande de Chalatenango, Sumpul y Torola), en comparación con las demás cuencas.

DISTRIBUCION PORCENTUAL DE CAUDALES MEDIOS



4.3 APLICACION DE LA REGIONALIZACION DE CAUDALES MEDIOS

Para estimar los caudales medios mensuales en cualquier punto del país, a través de la regionalización, se sigue la siguiente metodología:

1. Se ubica la región hidrológicamente homogénea a la cual pertenece la cuenca a la cual se le va a estimar los caudales medios (Mapa de regiones hidrológicamente homogéneas).
2. Se determina el caudal medio anual con base en el área de la cuenca y a la región hidrológicamente homogénea a la que pertenece (Tabla 8).
3. Se determinan los caudales mensuales a partir del caudal medio anual y de la distribución mensual presentada en la Tabla 9.

Ejemplo de aplicación:

Calcular el caudal medio anual y mensual en una cuenca de 350 Km² ubicada en la parte alta del río Grande de San Miguel.

Solución:

1. La región hidrológicamente homogénea a la que pertenece es la región 3.
2. De la Tabla 8, con el área de 350 Km², el caudal medio anual es:

$$Q = 0.0151 * (350) + 0.4752 = 5.76 \text{ m}^3/\text{s}$$

3. Con los porcentajes de distribución del caudal mensual con respecto del anual de la Tabla 9, para la región 3, se calculan los caudales mensuales:

Tabla 10. CÁLCULO DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES PARA CUENCA UBICADA EN LA PARTE ALTA DEL RÍO GRANDE DE SAN MIGUEL.

mes	Distribución Porcentual mensual	Caudal Medio Mensual estimado (m ³ /s)
ENERO	15.60	0.90
FEBRERO	11.72	0.68
MARZO	10.37	0.60
ABRIL	13.04	0.75
MAYO	51.07	2.94
JUNIO	165.84	9.55
JULIO	105.23	6.06
AGOSTO	131.49	7.57
SEPTIEMBRE	308.94	17.79
OCTUBRE	298.19	17.18
NOVIEMBRE	65.10	3.75
DICIEMBRE	23.43	1.35