



PLA

FLU 590

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS
~~DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS Y PLANIFICACION~~

~~ANALISIS DE EVENTOS HIDROMETEOROLOGICOS~~
~~EXTREMOS EN EL PAIS~~
CAUDALES MAXIMOS Y MINIMOS

MANUAL DE PROCEDIMIENTOS

ABRIL 1995

AC INGENIEROS CONSULTORES
AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS LTDA
INGENIEROS CONSULTORES

PROPIEDAD DEL ESTADO DE CHILE
PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL
LEY N° 17.336

INDICE MATERIAS

1.	DESCRIPCION GENERAL DEL MANUAL	
1.1	GENERALIDADES	1-1
1.2	OBJETIVOS Y ALCANCES DEL MANUAL	1-1
1.3	ESTRUCTURA Y USO DEL MANUAL	1-2
2.	NOCIONES BASICAS DE HIDROLOGIA	
2.1	DEFINICIONES	2-1
2.2	NOCIONES DE PROBABILIDADES Y ESTADISTICA	2-2
2.3	METODOS DE ESTIMACION DE CAUDALES DE DISEÑO	2-4
3.	DATOS BASICOS PARA EL EMPLEO DEL MANUAL	
3.1	INTRODUCCION	3-1
3.2	PARAMETROS MORFOMETRICOS DE LAS CUENCAS	3-1
3.3	AREA APORTANTE PLUVIAL	3-2
3.4	AREA NIVAL	3-2
3.5	TIEMPO DE CONCENTRACION	3-2
3.6	PRECIPITACION DIARIA MAXIMA DE PERIODO DE RETORNO 10 AÑOS	3-4
3.7	PRECIPITACION MEDIA ANUAL	3-4
3.8	CURVA INTENSIDAD - DURACION - FRECUENCIA	3-4
4.	METODOS DE ESTIMACION DE CAUDALES MAXIMOS EN PERIODO PLUVIAL	
4.1	ESTIMACION DE CAUDALES INSTANTANEOS MAXIMOS	4-1
4.1.1	Método DGA-AC para Crecidas Pluviales	4-1
4.1.2	Método de Verni y King Modificado	4-13
4.1.3	Fórmula Racional	4-17
4.1.4	Recomendación de Uso de los Métodos	4-19
4.1.5	Ejemplos de Aplicación	4-19
4.2	ESTIMACION DE HIDROGRAMAS DE CRECIDAS	4-38
4.2.1	Hidrograma Unitario Sintético Tipo Linsley	4-38
4.2.2	Hidrograma Unitario Sintético Tipo Gray	4-41
4.2.3	Determinación de la Precipitación Efectiva por el Método de la Curva Número	4-45
4.2.4	Recomendaciones de Uso de los Métodos	4-46
4.2.5	Ejemplos de Aplicación	4-46

5.	METODOS DE ESTIMACION DE CAUDALES INSTANTANEOS MAXIMOS EN PERIODO DE DESHIELO	
5.1	METODO DGA-AC	5-1
5.1.1	Descripción del Método	5-1
5.1.2	Determinación del Caudal Medio Diario Máximo de Período de Retorno 10 Años	5-2
5.1.3	Determinación de Curva de Frecuencia Regional	5-2
5.1.4	Determinación de la Curva de Frecuencia del Caudal Instantáneo Máximo	5-7
5.2	METODO DE PEÑA-ESCOBAR-VIDAL (CRECIDAS DE DESHIELO MAXIMAS PROBABLES)	5-7
5.3	RECOMENDACIONES DE USO DE LOS METODOS	5-10
5.4	EJEMPLO DE APLICACION	5-10
6.	METODOS DE ESTIMACION DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS MINIMOS EN 30, 7 Y 1 DIA CONSECUTIVOS	
6.1	METODO DGA-AC PARA CAUDALES MINIMOS	6-1
6.1.1	Descripción del Método	6-1
6.1.2	Determinación del Caudal Diario Mínimo en 30 días Consecutivos y con Probabilidad de Excedencia de 50%	6-2
6.1.3	Determinación de Curva de Frecuencia Regional	6-2
6.1.4	Determinación de la Curva de Frecuencias de Caudal Medio Diario Mínimo en 7 días consecutivos	6-6
6.1.5	Determinación de Curva de Frecuencias del Caudal Medio Diario Mínimo	6-7
6.2	RECOMENDACIONES DE USO DE LOS METODOS	6-7
6.3	EJEMPLOS DE APLICACION	6-8
7.	COMENTARIOS FINALES	7-1
7.1	OBJETIVOS Y ALCANCES DEL MANUAL	7-1
7.2	ESTIMACION DE CAUDALES MAXIMOS EN PERIODO PLUVIAL	7-1
7.3	ESTIMACION DE CAUDALES MAXIMOS EN PERIODO DE DESHIELO	7-2
7.4	ESTIMACION DE CAUDALES MINIMOS	7-3

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Línea de Nieves Promedio	3-3
Tabla 3.2	Coeficientes de Duración para Localidades Chilenas	3-4
Tabla 3.3	Coeficientes de Duración y Frecuencia para las diferentes Zonas Homogeneas	3-6
Tabla 4.1	Zona Homogénea Dp Pluvial-Gumbel-Exorreicas Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	4-4
Tabla 4.2	Zona Homogénea Ep Pluvial-LogPearson3-Altiplánicas Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	4-4
Tabla 4.3	Zona Homogénea Fp Pluvial-LogPearson3-C.Salado/Salar Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	4-4
Tabla 4.4	Zona Homogénea Gp Pluvial-Gumbel-C.Loa Controlada Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	4-5
Tabla 4.5	Zona Homogénea Hp Pluvial-LogPearson3-C.San Pedro Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	4-5
Tabla 4.6	Zona Homogénea Ip Pluvial-LogNormal-Latitud 27°-30° Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	4-5
Tabla 4.7	Zona Homogénea Jp Pluvial-LogNormal-C.Limarí S/Regul Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	4-6
Tabla 4.8	Zona Homogénea Kp Pluvial-LogNormal-C.Choapa Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	4-6
Tabla 4.9	Zona Homogénea Lp Pluvial-LogNormal-Latitud 32°-35° Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	4-6

Tabla 4.10	Zona Homogénea Mp Pluvial-LogNormal-Latitud 32°-35° Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	4-7
Tabla 4.11	Zona Homogénea Np Pluvial-LogNormal-Latitud 32°-35° Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	4-7
Tabla 4.12	Zona Homogénea Op Pluvial-LogNormal-Latitud 32°-35° Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	4-7
Tabla 4.13	Zona Homogénea Pp Pluvial-LogNormal-Latitud 32°-35° Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	4-8
Tabla 4.14	Zona Homogénea Qp Pluvial-Gumbel-VII Región-C.Mataquito Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	4-8
Tabla 4.15	Zona Homogénea Rp Pluvial-Gumbel-VII Región-C.Maule Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	4-8
Tabla 4.16	Zona Homogénea Sp Pluvial-Gumbel-VIII Región-C.Itata Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	4-9
Tabla 4.17	Zona Homogénea Tp Pluvial-Gumbel-VIII Región-C.Biobío Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	4-9
Tabla 4.18	Zona Homogénea Up Pluvial-Gumbel-VIII Región-C.Costeras Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	4-9
Tabla 4.19	Zona Homogénea Vp Pluvial-Gumbel-IX Región-C.Imperial Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Máximos Diarios	4-10
Tabla 4.20	Zona Homogénea Wp Pluvial-Gumbel-IX Región-C.Toltén Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Máximos Diarios	4-10

Tabla 4.21	Zona Homogénea Xp Pluvial-Gumbel-X Región Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Máximos Diarios	4-10
Tabla 4.22	Zona Homogénea Yp Pluvial-Gumbel-XI Región Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Máximos Diarios	4-11
Tabla 4.23	Zona Homogénea Zp Pluvial-Gumbel-XII Región Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Máximos Diarios	4-11
Tabla 4.24	Factores de Conversión del Caudal Medio Diario Máximo a Caudal Instantáneo Máximo	4-13
Tabla 4.25	Coeficiente C(T=10 Años) Fórmula de Verni y King Modificada ...	4-15
Tabla 4.26	Coeficientes de Fórmulas Empíricas	4-16
Tabla 4.27	Coeficiente C(T=10). Fórmula Racional	4-18
Tabla 4.28	Curva de Frecuencias Caudal Medio Diario Máximo Cuenca Manflas en Vertedero. Método DGA-AC	4-22
Tabla 4.29	Curva de Frecuencias Caudal Instantáneo Máximo Curva Manflas en Vertedero. Método DGA-AC	4-23
Tabla 4.30	Cálculo de Caudales Instantáneos Máximos Manflas en Vertedero. Método Verni y King Modificado	4-23
Tabla 4.31	Cálculo de Caudales Instantáneos Máximos. Cuenca Manflas en Vertedero Fórmula Racional	4-24
Tabla 4.32	Comparación de Resultados de Estimación de Crecidas	4-26
Tabla 4.33	Curva de Frecuencias de Caudal Medio Diario Máximo Cuenca Pocuro en el Sifón. Método DGA-AC	4-29
Tabla 4.34	Curvas de Frecuencias Caudal Instantáneo Máximo. Cuenca Pocuro en el Sifón Método DGA-AC	4-29
Tabla 4.35	Cálculo de Caudales Instantáneos Máximos. Cuenca Pocuro en el Sifón. Método Verni y King Modificado	4-30
Tabla 4.36	Cálculo de Caudales Instantáneos Máximos. Cuenca Pocuro en el Sifón. Fórmula Racional	4-31

Tabla 4.37	Comparación de Resultados de Estimación de Crecidas	4-32
Tabla 4.38	Curva de Frecuencias Caudal Medio Diario Máximo. Cuenca Chillán en Esperanza. Método DGA-AC	4-35
Tabla 4.39	Curva de Frecuencias Caudal Instantáneos Máximos. Cuenca Chillán en Esperanza. Método DGA-AC	4-35
Tabla 4.40	Cálculo de Caudales Instantáneos Máximos. Cuenca Chillán en Esperanza. Método Verni King Modificado	4-36
Tabla 4.41	Cálculo de Caudales Instantáneos Máximos. Cuenca Chillán en Esperanza. Fórmula Racional	4-37
Tabla 4.42	Comparación de Resultados de Estimación de Crecidas	4-38
Tabla 4.43	Coeficientes de Distribución para el Hidrograma Unitario Sintético	4-41
Tabla 4.44	Hidrograma Adimensional Q_{vtp} para Diferentes Valores del Parámetro γ	4-44
Tabla 4.45	Hidrograma Unitario Sintético e Hidrograma Escorrentía Directa en Manflas en Vertedero. Método Tipo Linsley	4-48
Tabla 4.46	Hidrograma Unitario Sintético e Hidrograma de Escorrentía Directa en Manflas en Vertedero. Método Tipo Gray	4-50
Tabla 4.47	Hidrograma Unitario Sintético e Hidrograma de Escorrentía Directa en Pocuro en el Sifón. Método Tipo Linsley	4-52
Tabla 4.48	Hidrograma Unitario Sintético e Hidrograma de Escorrentía Directa en Estero Pocuro en el Sifón. Método Tipo Gray	4-53
Tabla 4.49	Hidrograma Unitario Sintético e Hidrograma de Escorrentía Directa en Chillán en Esperanza. Método Tipo Linsley	4-55
Tabla 4.50	Hidrograma Unitario Sintético e Hidrograma de Escorrentía Directa Río Chillán en Esperanza	4-56
Tabla 5.1	Zona Homogénea Q_n Nival-LogNormal-C. Copiapó Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	5-3

Tabla 5.2	Zona Homogénea Rn Nival-LogNormal-Latitud 28°-31° Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	5-4
Tabla 5.3	Zona Homogénea Sn Nival-LogNormal-C.Choapa Alto Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	5-4
Tabla 5.4	Zona Homogénea Tn Nival-LogNormal-C.Choapa Medio Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	5-4
Tabla 5.5	Zona Homogénea Un Nival-Gamma-Latitud 32°00'-32°45' Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	5-5
Tabla 5.6	Zona Homogénea Vn Nival-Gamma-Latitud 32°45'-33°15' Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	5-5
Tabla 5.7	Zona Homogénea Wn Nival-Gamma-Latitud 33°15'-35°00' Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	5-5
Tabla 5.8	Zona Homogénea Xn Nival-Gamma-Latitud 35°00'-35°30' Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	5-6
Tabla 5.9	Zona Homogénea Yn Nival-Gamma-Latitud 35°30'-38°00' Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos	5-6
Tabla 5.10	Factor de Conversión de Caudal Medio Diario Máximo a Caudal Instantáneo Máximo	5-7
Tabla 5.11	Cálculo de Caudales Instantáneos Máximos Período. Período de Deshielo. Cuenca Manflas en Vertedero	5-11
Tabla 5.12	Cálculo de Caudales Instantáneos Máximos Período de Deshielo. Cuenca Pocuro en el Sifón	5-12
Tabla 5.13	Cálculo de Caudales Instantáneos Máximos Período de Deshielo Cuenca Chillán en Esperanza	5-13
Tabla 5.14	Comparación de Resultados del Método DGA-AC con Análisis de Frecuencias Manflas en Vertedero	5-13

Tabla 6.1	Zona Homogénea A Pluvial-Log Normal-III Y IV. Región Curva de Frecuencia Regional Caudales Mínimos Medios Mensuales	6-4
Tabla 6.2	Zona Homogénea B Pluvial-Gumbel - V Región Curva de Frecuencia Regional Caudales Mínimos Medios Mensuales	6-4
Tabla 6.3	Zona Homogénea C Pluvial-Gumbel-VI Región Curva de Frecuencia Regional Caudales Mínimos Medios Mensuales	6-4
Tabla 6.4	Zona Homogénea D Pluvial-Gumbel-VII Región. Curva de Frecuencia Regional Caudales Mínimos Medios Mensuales	6-5
Tabla 6.5	Zona Homogénea E Pluvial-Gumbel-VIII Región Curva de Frecuencia Regional Caudales Mínimos Medios Mensuales	6-5
Tabla 6.6	Zona Homogénea F Pluvial-Gumbel-IX Y X Región Curva de Frecuencia Regional Caudales Mínimos Medios Mensuales	6-5
Tabla 6.7	Factor Regional Q_7/Q_{30}	6-6
Tabla 6.8	Factor Regional Q_1/Q_{30}	6-7
Tabla 6.9	Caudales Medios Mínimos en 30 días Consecutivos Cuenca Manflas en Vertedero	6-9
Tabla 6.10	Caudales Medios Mínimos en 30 días Consecutivos Cuenca Pocuro en el Sifón	6-10
Tabla 6.11	Caudales Medios Mínimos en 30 días Consecutivos Cuenca Pocuro en el Sifón	6-10
Tabla 6.12	Caudales Medios Mínimos en 30 días Consecutivos Cuenca Chillán en Esperanza	6-11
Tabla 6.13	Caudales Medios Mínimos en 7 y 1 día Consecutivos Cuenca Chillán en Esperanza	6-12
Tabla 6.14	Comparación de Resultados del Método DGA-AC con Inferencia Análisis de Frecuencia	6-12

INDICE DE FIGURAS

Figura. 4.1	Esquema de Cálculo del Método DGA-AC para Caudales Instantáneos Máximos Pluviales	4-2
Figura. 4.2	Definición de Zonas Homogéneas Pluviales	4-2
Figura. 4.3	Esquema de Cálculo del Método de Verni-King Modificado	4-15
Figura. 4.4	Esquema de Cálculo de la Fórmula Racional	4-18
Figura. 4.5	Cuenca Río Manflas en Vertedero	4-21
Figura. 4.6	Cuenca Río Pocuro en Sifón	4-27
Figura. 4.7	Cuenca Río Chillán en Esperanza	4-33
Figura. 4.8	Esquema de Cálculo de Hidrogramas Unitarios Sintéticos	4-39
Figura. 4.9	Metodología de Cálculo Hidrograma Unitario Sintético Tipo Linsley. Cuenca Manflas en Vertedero	4-49
Figura. 4.10	Comparación de Hidrogramas de Escorrentía Directa. Cuenca Pocuro en Sifón	4-57
Figura. 5.1	Esquema de Cálculo Método DGA-AC para Caudales Instantáneos Máximos de Deshielo	5-1
Figura. 5.2	Definición de Zonas Homogéneas para el Período de Deshielo	5-2
Figura. 6.1	Esquema de Cálculo de Método DGA-AC para Estimar Caudales Mínimos	6-1
Figura. 6.2	Relación para Estimar Q30 (50%) en Cuencas con Aporte de Napas Subterráneas	6-3
Figura. 6.3	Definición de Zonas Homogéneas para Caudales Mínimos	6-3



1. DESCRIPCION GENERAL DEL MANUAL

1.1 GENERALIDADES

Para el diseño de obras hidráulicas de pequeña y mediana envergadura en cuencas sin información fluviométrica, no existen a la fecha estudios globales a nivel nacional que permitan realizar estimaciones de caudales máximos y mínimos en forma sencilla y sistemática. Para satisfacer esta necesidad la Dirección General de Aguas con financiamiento del Banco Interamericano de Desarrollo, promovió el desarrollo del presente Manual de Procedimientos para el cálculo de caudales máximos y mínimos en Chile.

Para llevar a cabo este proyecto, dicha entidad cuenta en la actualidad con abundante información hidrológica proveniente de los registros de unas 650 estaciones hidrométricas distribuidas en todo el país y con dos estudios que abarcan una parte importante del territorio nacional denominados "Balance Hídrico Nacional" y "Precipitaciones Máximas en 1, 2 y 3 días". Dichos estudios dieron origen a sendos mapas de curvas isoyetas de las precipitaciones medias anuales y de las precipitaciones máximas diarias de período de retorno 10 años. Por otro lado, hay que reconocer que la hidrología chilena cuenta ya con vasta experiencia en la aplicación de diversos métodos de estimación de crecidas que con la base de datos hidrométricos disponibles, pueden ser verificados y sistematizados para recomendar su uso en el diseño hidrológico.

Situándose en este marco de referencia, el presente Manual de Procedimientos para el cálculo de caudales máximos y mínimos en Chile, pretende ser una herramienta útil para lograr un mejoramiento de los diseños hidráulicos de obras de pequeña y mediana envergadura, con el consiguiente ahorro y economía para el país.

1.2 OBJETIVOS Y ALCANCES DEL MANUAL

El principal objetivo del Manual es presentar métodos para el cálculo sistemático de caudales máximos y mínimos, en cuencas naturales con nula o escasa información fluviométrica, con el fin de ser utilizados en el diseño de obras hidráulicas de pequeña a mediana importancia.

Los métodos de estimación de caudales de crecidas aquí propuestos son válidos para períodos de retorno inferiores a 100 años, valor que corresponde a los requerimientos usuales para el diseño de este tipo de obras. En el caso de los caudales mínimos se ha limitado su validez a probabilidades de excedencia inferiores al 95%.

Estos métodos han sido validados para una gran parte del territorio nacional, territorio que abarca desde la IIIª a Xª Región. Sin embargo, la mayor parte de la información fluviométrica disponible, de calidad, representatividad y longitud de registro considerados aceptables para fines de este estudio, se concentra principalmente

entre la IIIª y la IXª Región. Por tal motivo muchos de los métodos propuestos en este Manual de Procedimientos han debido restringirse a esta zona del país.

1.3 ESTRUCTURA Y USO DEL MANUAL

A nivel general, el Manual se ha dividido en dos grandes áreas temáticas. A saber, métodos de estimación de caudales instantáneos máximos y métodos de estimación de caudales mínimos.

La primera área abarca aquellos métodos que se aplican a la estimación de caudales en períodos hidrológicos pluviales y aquellos métodos orientados a la estimación de caudales de los períodos de deshielo.

El Manual se ha organizado con la siguiente estructura.

En primer lugar se entregan nociones básicas relativas a los temas de probabilidades, hidrología y métodos de estimación de caudales con el objetivo de introducir al usuario en los conocimientos mínimos requeridos para abordar un estudio de este tipo.

Se indican a continuación datos básicos requeridos para aplicar estos métodos utilizando el Manual y la forma de obtenerlos o calcularlos.

Posteriormente se describen los métodos de estimación de caudales máximos pluviales estudiados y propuestos en el Manual, los que corresponden al método DGA-AC para crecidas de origen pluvial, el método de Verni y King Modificado, la Fórmula Racional y el método del hidrograma unitario sintético tipo Linsley y tipo Gray.

A continuación de lo anterior, se presenta el método DGA-AC para crecidas de origen de deshielo y el método Peña, Vidal y Escobar para estimar caudales máximos en cuencas netamente nivales.

Seguidamente, se presenta el método DGA-AC para caudales mínimos para la estimación de caudales medios diarios mínimos de 30, 7 y 1 día consecutivos.

Para que el usuario tenga mayor claridad acerca de la metodología de cálculo de cada uno de los métodos presentados, se incluyen ejemplos de aplicación en tres cuencas del país, correspondientes a la zona norte, centro y sur de Chile.

Al término del Manual se incluyen las conclusiones, alcances y recomendaciones finales a tener presente en su uso.



2. NOCIONES BASICAS DE HIDROLOGIA

2.1 DEFINICIONES

Regímenes Hidrológicos. El régimen de caudales de un río puede clasificarse según el origen de los gastos de crecida y de acuerdo con la forma que presenta el hidrograma de gastos medios mensuales durante un año hidrológico. Entre los regímenes simples, definidos como aquellos que presentan un único máximo en el año hidrológico, se distinguen los ríos de régimen glacial, nival y pluvial. Los dos primeros tipos presentan pequeños caudales en invierno y crecidas de importancia en primavera y verano, diferenciándose sólo en la mayor regularidad interanual de los primeros debido al respaldo de los glaciares que ellos poseen. Por otra parte, las características del hidrograma de régimen pluvial dependen del régimen de precipitaciones por lo que se pueden distinguir ríos de régimen pluvial oceánicos con sus máximos en invierno, y ríos de régimen pluvial tropical que presentan los gastos máximos durante el verano.

Los regímenes complejos, se definen como aquellos en que el hidrograma de gastos medios mensuales presenta más de un máximo a lo largo del año hidrológico. Se pueden encontrar ríos de régimen pluvio-nival o nivo-pluvial, donde en general, el régimen dominante se indica en primer lugar.

Es conveniente hacer notar que en diferentes puntos de un cauce, el régimen de la cuenca que se define puede ser de distintos tipos.

Línea de Nieves. En general se define como aquella cota o elevación a partir de la cual la cuenca está cubierta por nieve. En estudios de crecida, sin embargo, este concepto se utiliza también para definir la cota a la cual se produce el cambio de precipitación líquida a sólida, generalmente asociada a la isoterma 0°C o a un valor cercano a 0°C previamente definido.

Area Aportante Pluvial. Corresponde al área de la cuenca en la cual ocurre sólo precipitación líquida. Queda establecida según la posición de la línea de nieves, de acuerdo a la definición dada anteriormente.

Area Nival. Corresponde al área de la cuenca en la cual la precipitación es sólida, es decir, es el área cubierta por nieve y hielo.

Precipitación Media Anual. Corresponde al valor promedio de los montos anuales de precipitación registrados en una estación pluviométrica o pluviográfica determinada.

Precipitación Media Anual de una Cuenca o Región. Es el valor medio calculado en base a las precipitaciones medias anuales ponderadas de las distintas estaciones de la cuenca o región. Esta ponderación se realiza comúnmente a través de métodos como el de los Polígonos de Thiessen o Mapas de Isoyetas.

Parámetros Morfométricos de las Cuencas. Para el estudio de caudales máximos y mínimos, se consideran de interés todas aquellas características geométricas o topográficas de las cuencas que determinan la escorrentía superficial y que pueden determinarse en base a cartografía. De estas características destacan el tamaño de la cuenca y su forma, la pendiente, la orientación, la elevación y su densidad de drenaje.

Para caracterizar la forma de la cuenca se usan en general como parámetros la longitud del cauce principal y la distancia entre la sección de salida de la cuenca y su centro de gravedad.

La pendiente puede referirse a la media de la cuenca o a la media del cauce principal, las que pueden estimarse de diversas formas.

La densidad de drenaje se define como la razón entre la longitud de todos los cauces de la cuenca y el área de ésta.

Tiempo de Concentración. Corresponde al tiempo en que toda la cuenca empieza a contribuir a la escorrentía; en consecuencia, es el tiempo que demora en alcanzar la salida de la cuenca, la partícula de agua que cae en el punto más alejado de ella.

2.2 NOCIONES DE PROBABILIDADES Y ESTADISTICA

Procesos Aleatorios. Los eventos hidrológicos extremos, tales como crecidas o sequías, pueden considerarse como procesos aleatorios (asociados a probabilidades) en que las observaciones no presentan correlación entre sí y en que las propiedades estadísticas de todas las muestras posibles de extraer de una población, son iguales.

Los métodos estadísticos a través de los cuales se aborda el estudio de los procesos aleatorios, ponen énfasis en las observaciones mismas más que en los procesos físicos que las producen.

Función Densidad de Probabilidades. Una variable aleatoria queda descrita por una función densidad de probabilidades o modelo probabilístico. Para ello, se considera que un conjunto de observaciones conforman una muestra representativa de la población, la cual puede ser caracterizada con medidas de la tendencia central y la dispersión de los valores muestrales, tales como la media y la desviación estándar.

Tipos de Función Densidad de Probabilidades. Las funciones densidad de probabilidades más usadas corresponden a la Normal, Logarítmica-Normal, Gumbel, Gamma, Pearson y Log-Pearson. Estas funciones representan la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria.

Métodos de Ajuste de Distribuciones. Para ajustar una distribución al conjunto de datos muestrales puede emplearse el método de los momentos, o bien, el método de máxima verosimilitud. En el primer caso se considera que los parámetros de la distribución son aquellos que se obtienen cuando se igualan los momentos (con respecto al origen, para el orden 1, y los centrados, para las órdenes 2 y 3) de la función densidad de probabilidades con los correspondientes momentos de los datos muestrales. El método de máxima verosimilitud considera que los parámetros de la distribución son aquellos que maximizan la probabilidad conjunta de ocurrencia de las observaciones muestrales.

Pruebas de Bondad del Ajuste. El grado de ajuste del modelo probabilístico a los datos muestrales puede verificarse comparando las frecuencias relativas a la función de frecuencias acumulada teórica con los valores muestrales, usando métodos tales como las pruebas χ^2 o Kolmogorov-Smirnov.

Análisis de Frecuencias. Los modelos probabilísticos ajustados a los datos muestrales se usan para relacionar la magnitud de un evento extremo con su frecuencia de ocurrencia. El procedimiento que se usa para estos efectos, se denomina análisis de frecuencias.

Probabilidad de Excedencia. Se define como tal la probabilidad de que un evento de magnitud dada sea igualado o superado.

Período de Retorno. Para un evento de magnitud dada se define como el intervalo promedio de tiempo entre eventos que igualen o excedan dicha magnitud.

De acuerdo con estas definiciones la probabilidad de excedencia de un evento $P(X \geq X_T)$ es el inverso de su período de retorno (T), es decir:

$$P(X \geq X_T) = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

Serie de Duración Completa. Frecuentemente los datos hidrológicos se presentan en orden cronológico a intervalos de tiempo equiespaciados lo que constituye una serie de duración completa.

Serie de Duración Parcial. Es una serie de datos seleccionados de manera que su magnitud sea mayor que un valor base preespecificado.

Serie de Excedencias Anuales. Si el valor anterior se selecciona de manera que el número de valores en la serie sea igual al número de años de registro, la serie se denomina serie de excedencias anuales.

Serie de Valores Extremos. Es aquella serie que incluye los mayores o menores valores que ocurren en períodos de tiempo equiespaciados del registro.

Serie Anual. Si el período anterior se toma como el año hidrológico, la serie se denomina como serie anual.

Serie Anual de Precipitaciones Diarias Máximas. Corresponde a una serie formada por los máximos valores de precipitación diaria registrados en cada año.

Serie Anual de Caudales Medios Diarios Máximos y Serie Caudales Instantáneos Máximos. Son aquellas que contienen los máximos valores de caudal medio diario y de caudal instantáneo, respectivamente, registradas en cada año.

Series Anuales de Caudales Medios Diarios Mínimos, de Caudales Medios en 7 Días Consecutivos Mínimos y de Caudales Medios en 30 Días Consecutivos Mínimos. Son aquellas que contienen los mínimos valores registrados cada año del caudal medio diario, del caudal medio en 7 días consecutivos y del caudal medio en 30 días consecutivos, respectivamente.

Debido a la posible dependencia que puede existir entre los valores de una serie de excedencias anuales, en general para el análisis de eventos extremos, se prefiere usar las series anuales de máximos. Cuando la serie que se está analizando contiene valores heterogéneos, es decir, que no provienen de la misma población, pueden producirse inconsistencias en los resultados. Esto sucede generalmente, cuando los datos pertenecen a cuencas de régimen complejo donde los máximos valores anuales pueden provenir de períodos estacionales distintos ya sea con orígenes pluviales o de deshielo. En estos casos conviene efectuar los análisis separadamente en cada período, definiendo la series de máximos estacionales correspondientes.

Curva de Intensidad-Duración-Frecuencia (Curva IDF). Representa en una estación pluviométrica, la relación entre la intensidad de la lluvia y su duración para distintas frecuencias o probabilidades de excedencia. Estas relaciones se expresan como curvas gráficas o fórmulas, o por medio de mapas en que se muestra para una determinada frecuencia y duración la variación geográfica de las intensidades medias máximas. También pueden estimarse mediante coeficientes generalizados de aplicación regional.

2.3 METODOS DE ESTIMACION DE CAUDALES DE DISEÑO

Si en la cuenca en estudio, existe información fluviométrica y en especial cuando son de registro continuo (limnigráficos) éstos pueden usarse para estimar caudales de diseño a través de las técnicas usuales de análisis de frecuencias.

Cuando la cuenca no es controlada fluviométricamente puede recurrirse a otras metodologías para estimar caudales de diseño asociados a un cierto período de retorno.

Fórmulas Empíricas. En la literatura especializada se pueden encontrar un sinnúmero de fórmulas empíricas para la estimación de caudales máximos, basadas en características morfológicas de las cuencas. Sin embargo, éstas son de validez limitada y no permiten estimar la probabilidad asociada a la magnitud del evento, salvo excepciones

Análisis de Frecuencias Regional. Otros métodos se basan en la información fluviométrica registrada en otras cuencas de características hidrológicas similares a las de la cuenca en estudio. Estos métodos, denominados como análisis de frecuencias regional, ajustan una curva de frecuencias única a todas las curvas de frecuencias de las estaciones de la región, adimensionalizadas con respecto a un valor de referencia representativo de cada estación.

Zona Homogénea. Se define como un conjunto de cuencas con características meteorológicas y fisiográficas similares, donde la respuesta hidrológica a determinadas entradas es similar. Por lo tanto, sus curvas de frecuencias adimensionales son semejantes. De acuerdo con lo anterior, la dispersión en torno a la curva única de frecuencias ajustada en una zona homogénea debiera ser menor que la que se observa al incluir otras estaciones.

Debe cumplirse también que la clasificación de zonas hidrológicamente homogéneas sea tal que, una cuenca sin control pueda identificarse como parte de una de las zonas homogéneas. Adicionalmente se debe relacionar el valor de referencia usado para adimensionalizar, con algunas características físicas y meteorológicas de las cuencas, de manera de obtener el caudal de diseño en la cuenca en estudio.

Relaciones Precipitación-Escorrentía. Otras metodologías para estimar caudales de diseño se basan en la aplicación de relaciones precipitación-escorrentía, en las cuales se considera que el período de retorno de la precipitación escogida para el diseño es igual al período de retorno del caudal de diseño.

Ejemplos de Relaciones Precipitación-Escorrentía. Como relaciones precipitación-escorrentía pueden mencionarse el hidrograma unitario y fórmulas empíricas tales como la fórmula racional y la de Verni y King.

Hidrograma Unitario. Corresponde al hidrograma de escorrentía directa que produce una lluvia efectiva unitaria espacialmente uniforme, que cae sobre la cuenca con una intensidad constante durante una duración especificada. Corresponde por lo tanto a una relación entre precipitación efectiva y escorrentía directa. Para estimar el caudal máximo

es necesario por una parte estimar un valor de las abstracciones de la lluvia de diseño y, por otra, estimar un valor del flujo base en el momento de la crecida.

Hidrograma Unitario Sintético. Para derivar el hidrograma unitario en cuencas sin control fluviométrico se han formulado los llamados hidrogramas unitarios sintéticos, cuyos parámetros se estiman en base a las características morfológicas de las cuencas.

Estimación de Caudales Medios Diarios Mínimos o en Otros Intervalos Temporales. Hay que tener en cuenta que estos dependen de las características de la cuenca y del origen del recurso. De acuerdo a la bibliografía disponible (UNESCO, 1982) las cuencas pequeñas se caracterizan principalmente por condiciones locales, mientras que en las más grandes predominan efectos regionales.

Métodos de Estimación de Caudales Mínimos. Como métodos de estimación puede citarse el análisis de frecuencias regional, el que generalmente se recomienda efectuarlo para los valores medios de los mayores intervalos temporales de interés, para luego derivar los correspondientes a menores intervalos temporales usando relaciones lineales del tipo:

$$Q_{mín\ t_1}^T = K_{t1} Q_{mín\ t_2}^T \quad (2.2)$$

donde:

$Q_{mín\ t_2}^T$: es el caudal medio mínimo en el intervalo de tiempo t_2 asociado al período de retorno T .

$Q_{mín\ t_1}^T$: es el caudal mínimo medio en el intervalo de tiempo t_1 asociado al período de retorno T , siendo $t_1 > t_2$.

K_{t1} : parámetro característico de la región y del intervalo temporal, cuyo valor es menor que uno.



3. DATOS BASICOS PARA EL EMPLEO DEL MANUAL

3.1 INTRODUCCION

En este capítulo se presentan los datos básicos necesarios para el uso del Manual, indicándose la metodología de cálculo o el procedimiento de obtención de cada uno de ellos.

3.2 PARAMETROS MORFOMETRICOS DE LAS CUENCAS

Para obtener los parámetros morfométricos de una cuenca se debe disponer de cartografía de la zona de interés a una escala adecuada, que permita una buena definición de la cuenca.

Los parámetros relevantes son los siguientes:

- Longitud del cauce principal (L). Se obtiene de la medición directa de la longitud del cauce principal de la cuenca a lo largo de su trayectoria.
- Longitud desde el centro de gravedad hasta el punto de salida (Lg). Para su determinación se identifica el centro de gravedad de la cuenca y luego se mide la longitud del recorrido de una partícula imaginaria de agua, desde este punto hasta la salida de la cuenca.
- Desnivel máximo de la cuenca (H). Corresponde a la diferencia entre la cota del punto de la divisoria de las aguas de la cuenca más alto y alejado de su salida y la cota del punto de término del cauce principal.
- Pendiente media de la cuenca (S). Se obtiene a partir de la expresión de Mociornita.

$$S = \frac{\Delta h}{A} \cdot \left(\frac{l_o}{2} + \sum l_i + \frac{l_n}{2} \right) \quad (3.1)$$

donde:

- Δh : Densivel entre curvas de nivel adyacentes, en m.
- A : Area aportante de la cuenca, en m².
- l_i : Longitud de la curva de nivel i, en m.
- n : Número total de curvas de nivel consideradas.

Es conveniente hacer notar que para el cálculo de caudales máximos de origen pluvial, estos parámetros deben determinarse para la cuenca definida por el área pluvial aportante.

3.3

AREA APORTANTE PLUVIAL

Para calcular el área aportante pluvial es necesario definir en primer lugar la ubicación de la línea de nieves, entendiendo que en este caso corresponde a la cota promedio durante eventos de tormentas, donde se produce la interfase lluvia-nieve.

En la Tabla 3.1 se presenta la variación latitudinal de la línea de nieves promedio consignada por Peña y Vidal (1993) que en este Manual se propone como base para estimar el área pluvial desde la IIIª hasta el término de la VIª Región del país. Desde el inicio de la VIIª Región al sur se consideran como base para el cálculo, los antecedentes consignados por Escobar y Vidal (1992), aunque el período de registro sobre el que se fundamenta este método incluye sólo parte de los meses de interés. Dichos valores se incluyen también en la Tabla 3.1.

3.4

AREA NIVAL

La línea de nieves que define el área nival de una cuenca, también presenta variaciones temporales durante el año hidrológico, por lo que se hace necesario definir una línea de nieves promedio. En el estudio realizado para la elaboración de este Manual, se concluyó que la línea de nieves promedio consignada por Peña y Vidal (1993) define apropiadamente esta variable.

3.5

TIEMPO DE CONCENTRACION

Este parámetro puede estimarse a través de variadas fórmulas que entregan resultados en un amplio rango. En el estudio básico conducente a la elaboración del presente Manual se adoptó la fórmula del California Highways and Public Works de EE.UU.:

$$t_c = 0,95 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (3.2)$$

donde:

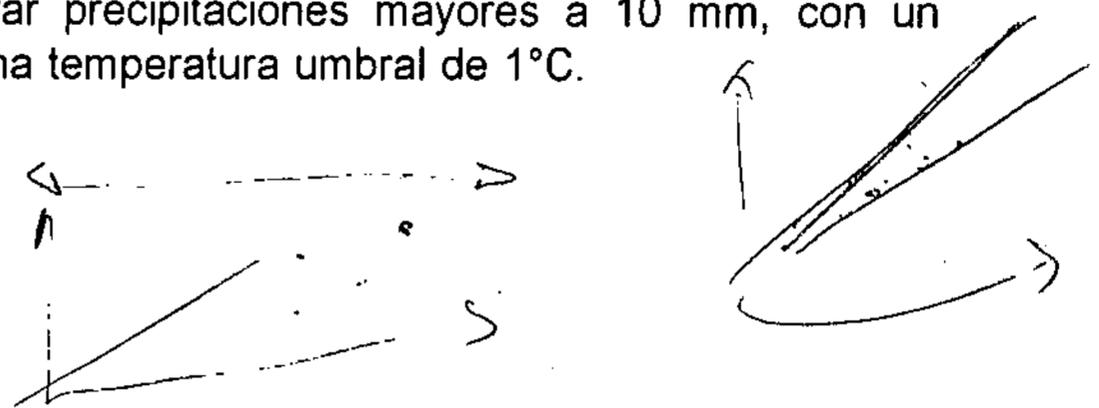
- t_c : Tiempo de concentración de la cuenca, expresado en horas
- L : Longitud del cauce principal, expresada en km.
- H : Desnivel máximo de la cuenca, expresado en m.

Tabla 3.1 Línea de Nieves Promedio

Latitud (grados)	Peña - Vidal (* (m.s.n.m)	Escobar - Vidal	
		Promedio Junio-Octubre (m.s.n.m.)	
27,5	2690		
28,0	2620		
28,5	2550		
29,0	2490		
29,5	2420		
30,0	2350		
30,5	2280	Area Pluvial y Nival	
31,0	2210		
31,5	2150		
32,0	2080		
32,5	2010		
33,0	1940		
33,5	1870		
34,0	1780		
34,5	1640		
35,0	1470		1980
35,5	1300		1820
36,0	1150		1680
36,5	1000		1510
37,0	920	Area Nival	1420
37,5	880		1390
38,0	850		1360
38,5	800		1330
39,0	770		1300

Porque?

(*) estimada en base a considerar precipitaciones mayores a 10 mm, con un gradiente de $-0,5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ y una temperatura umbral de 1°C .



Peña y Vidal. 1993 "Estimación Estadística de la Línea de Nieves durante los Eventos de Precipitación entre las latitudes 28 y 38 grados Sur". XI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, 1993.

Escobar y Vidal. 1992 "Experiencia Sobre la Determinación de la Línea de Nieves en Cuencas de Chile Central". Revista de la Soc. Chilena de Ingeniería Hidráulica, 1992.

3.6 PRECIPITACION DIARIA MAXIMA DE PERIODO DE RETORNO 10 AÑOS (P_{24}^{10})

La precipitación diaria máxima de período de retorno 10 años, corresponde al valor representativo de la cuenca aportante analizada y se estima en base a los planos de isoyetas, escala 1:500.000, del estudio "Precipitaciones Máximas en 1, 2 y 3 días" de la DGA.

3.7 PRECIPITACION MEDIA ANUAL (Pma)

Para determinar esta variable se debe considerar un valor representativo de la cuenca aportante analizada, el cual se estima en base a los planos de isoyetas, escala 1:500.000, del estudio "Balance Hídrico de Chile" de la DGA.

3.8 CURVA INTENSIDAD - DURACION - FRECUENCIA

Para estimar la precipitación asociada a una duración menor de 24 horas para un período de retorno dado, teniendo como antecedente disponible la precipitación diaria, se recomienda utilizar los valores de coeficientes de duración generalizados propuestos por Varas y Sánchez (1983) que se consignan en la Tabla 3.2 para localidades chilenas entre la IV y X Región.

Tabla 3.2 Coeficientes de Duración para Localidades Chilenas

ESTACION FLUVIOMETRICA	REGION	D U R A C I O N (Horas)									
		1	2	4	6	8	10	12	14	18	24
Embalse La Paloma	IV	0,156	0,266	0,441	0,597	0,667	0,780	0,823	0,866	0,919	1,000
Santiago Qta. Normal	RM	0,161	0,261	0,425	0,556	0,645	0,712	0,774	0,847	0,944	1,000
Rapel	VI	0,147	0,233	0,337	0,465	0,558	0,640	0,709	0,787	0,907	1,000
San Fernando	VI	0,127	0,213	0,346	0,428	0,510	0,587	0,659	0,734	0,830	1,000
Colbún-Colorado	VII	0,123	0,194	0,294	0,407	0,521	0,590	0,680	0,728	0,826	1,000
Chillán	VIII	0,174	0,245	0,365	0,443	0,521	0,608	0,677	0,729	0,891	1,000
Concepción	VIII	0,197	0,307	0,385	0,479	0,569	0,642	0,708	0,778	0,891	1,000
Quilaco	VIII	0,164	0,264	0,390	0,472	0,553	0,621	0,670	0,737	0,877	1,000
Polcura	VIII	0,123	0,193	0,325	0,433	0,524	0,608	0,683	0,741	0,869	1,000
Temuco	IX	0,193	0,317	0,477	0,583	0,657	0,718	0,792	0,826	0,917	1,000
Pullinque	X	0,125	0,205	0,330	0,427	0,497	0,576	0,655	0,711	0,832	1,000
Ensenada	X	0,166	0,233	0,349	0,468	0,543	0,610	0,676	0,735	0,861	1,000
Promedio		0,155	0,244	0,372	0,481	0,564	0,641	0,708	0,768	0,880	1,000

Varas y Sánchez, 1983 "Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia Generalizadas"
 DGA-MOP. 1991. "Precipitaciones en 1, 2 y 3 días"
 DGA-MOP. 1987. "Balance Hídrico de Chile"

La relación que liga la precipitación de período de retorno T y duración 24 hr con aquella del mismo período de retorno pero de duración t hr es:

$$P_t^T = CD_t \cdot P_{24}^T \quad (3.3)$$

donde:

P_t^T : Precipitación de período de retorno T, asociada a una duración de t horas, en mm.
 CD_t : Coeficiente de duración para t horas.

Para la III Región, en donde no se dispone en la actualidad de valores para el coeficiente de duración, se recomienda aplicar la fórmula de Grunsky, que corresponde a la siguiente expresión:

$$I_t^T = I_{24}^T \sqrt{\frac{24}{t}} \quad (3.4)$$

donde:

I_t^T : Intensidad media de período de retorno T y duración t, en mm/hr.
t: duración en horas.

Por otra parte si se requiere conocer la precipitación asociada a un período de retorno distinto a 10 años (entre 2 y 100 años) para una duración de 1 día, se recomienda utilizar los coeficientes de frecuencia (CF_T), recomendados en el estudio "Precipitaciones Máximas en 1, 2 y 3 días" de la DGA y que se presentan en la Tabla 3.3. La forma de cálculo es la siguiente:

$$P_{24}^T = CF_T \cdot P_{24}^{10} \quad (3.5)$$

donde:

CF_T : Coeficiente de Frecuencia para T años de período de retorno.

Finalmente ligando las ecuaciones (3.3) y (3.5), se obtiene que dada la precipitación máxima diaria de 10 años de período de retorno, la precipitación de cualquier duración y período de retorno es:

$$P_t^T = CD_t \cdot CF_T \cdot P_{24}^{10} \quad (3.6)$$

Tabla 3.3
Coefficientes de Duración y Frecuencia para las Diferentes Zonas Homogéneas

Nombre zona Homogénea	Duración	Coeficiente de Duración	Coeficientes de Frecuencia				
			T = 2 Años	T = 5 Años	T = 20 Años	T = 50 Años	T = 100 Años
Río Lluta	1 día	1.000	0.548	0.819	1.172	1.392	1.556
	2 días	1.410	0.539	0.816	1.174	1.396	1.561
	3 días	1.691	0.543	0.817	1.174	1.397	1.562
Parinacota	1 día	1.000	0.697	0.897	1.083	1.172	1.231
	2 días	1.396	0.720	0.907	1.073	1.150	1.199
	3 días	1.787	0.707	0.901	1.079	1.163	1.231
Chapiquiña	1 día	1.000	0.520	0.801	1.199	1.470	1.685
	2 días	1.346	0.557	0.831	1.156	1.354	1.504
	3 días	1.632	0.541	0.820	1.168	1.380	1.535
Collahuasi	1 día	1.000	0.533	0.831	1.144	1.310	1.421
	2 días	1.220	0.552	0.838	1.141	1.305	1.418
	3 días	1.546	0.508	0.814	1.168	1.373	1.519
Salar de Ascotán	1 día	1.000	0.518	0.808	1.185	1.423	1.602
	2 días	1.325	0.522	0.810	1.183	1.420	1.597
	3 días	1.450	0.532	0.814	1.179	1.410	1.584
Río Salado	1 día	1.000	0.584	0.854	1.124	1.266	1.363
	2 días	1.465	0.550	0.837	1.142	1.309	1.426
	3 días	1.854	0.513	0.819	1.162	1.357	1.496
San Pedro	1 día	1.000	0.362	0.733	1.264	1.612	1.876
	2 días	1.113	0.417	0.766	1.223	1.507	1.719
	3 días	1.228	0.439	0.782	1.202	1.455	1.639
Salar de Atacama	1 día	1.000	0.482	0.798	1.188	1.425	1.598
	2 días	1.358	0.451	0.783	1.205	1.466	1.659
	3 días	1.549	0.446	0.783	1.203	1.458	1.646
Quebrada Salado	1 día	1.000	0.235	0.656	1.359	1.810	2.156
	2 días	1.248	0.185	0.651	1.310	1.654	1.845
	3 días	1.450	0.185	0.651	1.310	1.654	1.845
Copiapó	1 día	1.000	0.273	0.694	1.304	1.705	2.010
	2 días	1.022	0.287	0.703	1.292	1.675	1.964
	3 días	1.022	0.287	0.703	1.292	1.675	1.964
Los Loros	1 día	1.000	0.352	0.738	1.252	1.575	1.817
	2 días	1.058	0.371	0.749	1.237	1.539	1.762
	3 días	1.060	0.372	0.750	1.236	1.537	1.758
Río Cachitos	1 día	1.000	0.457	0.795	1.184	1.409	1.569
	2 días	1.169	0.429	0.779	1.204	1.457	1.641
	3 días	1.188	0.429	0.780	1.203	1.455	1.639
Freirina	1 día	1.000	0.377	0.752	1.238	1.546	1.777
	2 días	1.063	0.377	0.752	1.239	1.547	1.778
	3 días	1.079	0.376	0.752	1.239	1.547	1.779

Tabla 3.3
Coefficientes de Duración y Frecuencia para las Diferentes Zonas Homogéneas
 (Continuación)

Nombre zona Homogénea	Duración	Coeficiente de Duración	Coeficientes de Frecuencia				
			T = 2 Años	T = 5 Años	T = 20 Años	T = 50 Años	T = 100 Años
Río Turbio	1 día	1.000	0.361	0.705	1.336	1.853	2.305
	2 días	1.304	0.330	0.683	1.371	1.958	2.483
	3 días	1.419	0.316	0.637	1.388	2.008	2.570
Fray Jorge	1 día	1.000	0.485	0.795	1.192	1.436	1.615
	2 días	1.249	0.461	0.785	1.203	1.462	1.653
	3 días	1.381	0.433	0.770	1.222	1.508	1.723
Río Hurtado	1 día	1.000	0.422	0.749	1.279	1.686	2.028
	2 días	1.319	0.391	0.735	1.307	1.768	2.164
	3 días	1.442	0.376	0.720	1.322	1.810	2.234
Río Grande	1 día	1.000	0.476	0.774	1.236	1.568	1.838
	2 días	1.347	0.433	0.759	1.268	1.658	1.982
	3 días	1.527	0.407	0.746	1.291	1.730	2.086
Río Illapel	1 día	1.000	0.527	0.802	1.200	1.473	1.689
	2 días	1.424	0.500	0.788	1.217	1.518	1.759
	3 días	1.627	0.470	0.775	1.238	1.575	1.849
Laguna del Pelado	1 día	1.000	0.485	0.780	1.218	1.517	1.753
	2 días	1.504	0.447	0.765	1.243	1.584	1.861
	3 días	1.777	0.411	0.745	1.270	1.660	1.983
Río Quilimarí	1 día	1.000	0.530	0.803	1.199	1.470	1.685
	2 días	1.317	0.477	0.776	1.234	1.564	1.838
	3 días	1.461	0.468	0.770	1.242	1.588	1.867
Río Petorca	1 día	1.000	0.553	0.816	1.184	1.431	1.625
	2 días	1.370	0.511	0.794	1.210	1.501	1.732
	3 días	1.545	0.490	0.783	1.225	1.539	1.793
Río La Ligua	1 día	1.000	0.628	0.865	1.116	1.248	1.337
	2 días	1.486	0.543	0.819	1.172	1.393	1.557
	3 días	1.741	0.502	0.792	1.208	1.490	1.711
Precordillera	1 día	1.000	0.609	0.843	1.153	1.354	1.507
	2 días	1.614	0.548	0.812	1.188	1.443	1.644
	3 días	2.055	0.498	0.787	1.220	1.525	1.771
Valle Aconcagua Interior	1 día	1.000	0.555	0.817	1.181	1.425	1.614
	2 días	1.425	0.516	0.797	1.206	1.492	1.719
	3 días	1.704	0.483	0.780	1.230	1.553	1.814
Valle del Maipo	1 día	1.000	0.553	0.816	1.184	1.431	1.625
	2 días	1.370	0.511	0.794	1.210	1.501	1.732
	3 días	1.545	0.490	0.783	1.225	1.539	1.793
Litoral	1 día	1.000	0.577	0.829	1.166	1.387	1.555
	2 días	1.364	0.563	0.813	1.186	1.437	1.634
	3 días	1.561	0.536	0.807	1.194	1.457	1.664

Tabla 3.3
Coefficientes de Duración y Frecuencia para las Diferentes Zonas Homogéneas
 (Continuación)

Nombre zona Homogénea	Duración	Coeficiente de Duración	Coeficientes de Frecuencia				
			T = 2 Años	T = 5 Años	T = 20 Años	T = 50 Años	T = 100 Años
Río Coya	1 día	1.000	0.639	0.857	1.136	1.313	1.446
	2 días	1.537	0.592	0.835	1.161	1.375	1.539
	3 días	1.896	0.555	0.817	1.183	1.429	1.621
Río Cachapoal	1 día	1.000	0.644	0.859	1.133	1.305	1.434
	2 días	1.512	0.596	0.837	1.158	1.367	1.527
	3 días	1.847	0.570	0.824	1.174	1.406	1.586
Estero Nilahue	1 día	1.000	0.613	0.845	1.150	1.346	1.495
	2 días	1.471	0.576	0.827	1.170	1.395	1.569
	3 días	1.777	0.561	0.820	1.178	1.418	1.604
Región del Maule	1 día	1.000	0.624	0.850	1.144	1.331	1.475
	2 días	1.440	0.610	0.843	1.151	1.350	1.506
	3 días	1.767	0.588	0.833	1.164	1.379	1.546
Maule Medio-Melado	1 día	1.000	0.638	0.859	1.132	1.299	1.423
	2 días	1.575	0.610	0.844	1.150	1.348	1.506
	3 días	2.004	0.588	0.833	1.163	1.386	1.554
Itata	1 día	1.000	0.654	0.864	1.128	1.293	1.417
	2 días	1.379	0.649	0.862	1.131	1.299	1.422
	3 días	1.666	0.641	0.855	1.135	1.308	1.438
Bio-Bío	1 día	1.000	0.692	0.880	1.111	1.248	1.354
	2 días	1.491	0.678	0.678	1.117	1.266	1.377
	3 días	1.846	0.671	0.873	1.121	1.273	1.387
Litoral Norte	1 día	1.000	0.632	0.854	1.140	1.322	1.460
	2 días	1.320	0.637	0.856	1.138	1.316	1.451
	3 días	1.564	0.636	0.856	1.138	1.316	1.451
Arauco	1 día	1.000	0.725	0.895	1.096	1.215	1.302
	2 días	1.508	0.691	0.881	1.106	1.250	1.353
	3 días	1.923	0.675	0.874	1.117	1.266	1.377
Araucanía Central	1 día	1.000	0.672	0.872	1.120	1.273	1.388
	2 días	1.360	0.697	0.876	1.116	1.263	1.372
	3 días	1.600	0.684	0.877	1.116	1.262	1.376
Zona Oriental	1 día	1.000	0.710	0.889	1.104	1.231	1.326
	2 días	1.488	0.715	0.891	1.101	1.233	1.317
	3 días	1.815	0.725	0.898	1.097	1.216	1.303
Valdivia	1 día	1.000	0.703	0.886	1.106	1.236	1.335
	2 días	1.514	0.694	0.882	1.110	1.247	1.348
	3 días	1.849	0.682	0.876	1.115	1.261	1.368
Los Lagos	1 día	1.000	0.721	0.894	1.098	1.220	1.309
	2 días	1.384	0.743	0.901	1.090	1.211	1.281
	3 días	1.634	0.725	0.906	1.085	1.191	1.266

Tabla 3.3
Coefficientes de Duración y Frecuencia para las Diferentes Zonas Homogéneas
 (Continuación)

Nombre zona Homogénea	Duración	Coeficiente de Duración	Coeficientes de Frecuencia				
			T = 2 Años	T = 5 Años	T = 20 Años	T = 50 Años	T = 100 Años
Petrohué	1 día	1.000	0.719	0.893	1.099	1.215	1.312
	2 días	1.443	0.721	0.894	1.098	1.219	1.308
	3 días	1.696	0.729	0.897	1.094	1.211	1.296

**4. METODOS DE ESTIMACION DE CAUDALES MAXIMOS
EN PERIODO PLUVIAL**

4.1 ESTIMACION DE CAUDALES INSTANTANEOS MAXIMOS

4.1.1 Método DGA-AC para Crecidas Pluviales

a) Descripción del Método

El método DGA-AC para crecidas pluviales, corresponde a un análisis regional de crecidas de origen pluvial, basado en series de máximos anuales generadas a partir de la información de caudales medios diarios máximos e instantáneos máximos del período pluvial, de 234 estaciones de control fluviométrico.

Este método, que abarca estaciones desde la IIIª a la IXª Región, es válido para cuencas pluviales o pluvionivales sin información fluviométrica y con áreas comprendidas entre 20 y 10.000 km². Su uso está restringido a períodos de retorno inferiores a 100 años.

El método consiste básicamente en determinar una curva de frecuencias para el caudal instantáneo máximo de la cuenca, en base al procedimiento esquematizado en el diagrama presentado en la Figura 4.1.

De acuerdo con dicho diagrama, en primer lugar debe definirse la zona homogénea a la que pertenece la cuenca en estudio. Luego se determina la curva de frecuencias de la cuenca para la variable caudal medio diario máximo. Finalmente dicha curva se convierte a la correspondiente a caudales instantáneos máximos, a través de la determinación de un factor de conversión apropiado.

b) Determinación de Zona Homogénea

La ubicación de la zona homogénea a la cual pertenece la cuenca, se determina en base al diagrama, presentado en la Figura 4.2, en el cual se identifican cuatro agrupaciones principales de cuencas diferenciadas según su latitud.

En caso que la cuenca pertenezca a un interfluvio se recomienda considerar las dos zonas homogéneas adyacentes.

c) Determinación de Curva de Frecuencias Regional

Una vez identificada la zona homogénea, se ubica la curva de frecuencia adimensional correspondiente. Las curvas a utilizar son las que se presentan en las Tablas 4.1 a la 4.23. En estas tablas se consignan además de la curva de frecuencia regional, las curvas envolventes superior e inferior que representan los máximos y mínimos valores encontrados en cada zona homogénea.

Fig. 4.1. Esquema de Cálculo del Método DGA-AC para Caudales Instantáneos Máximos Pluviales

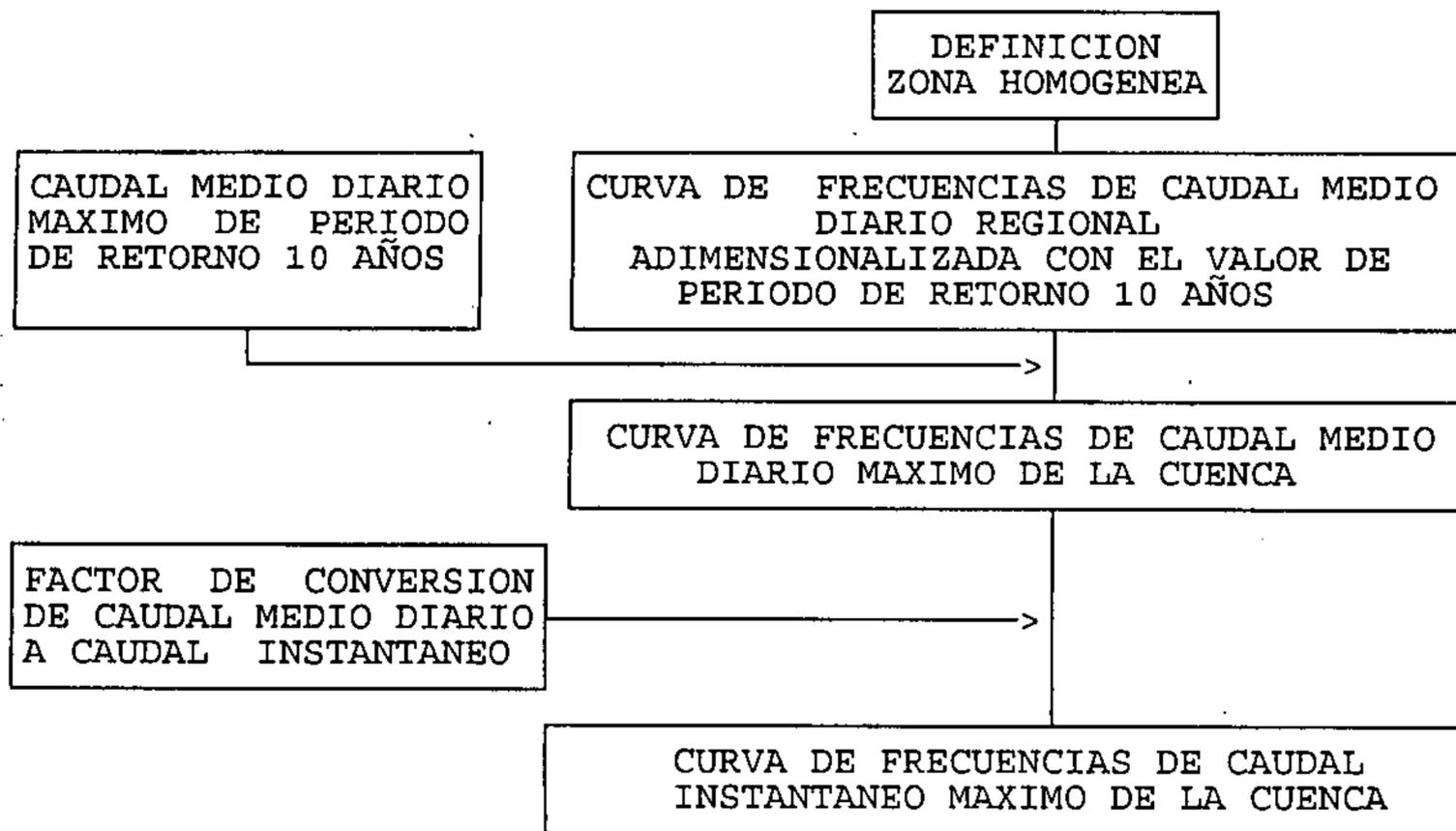
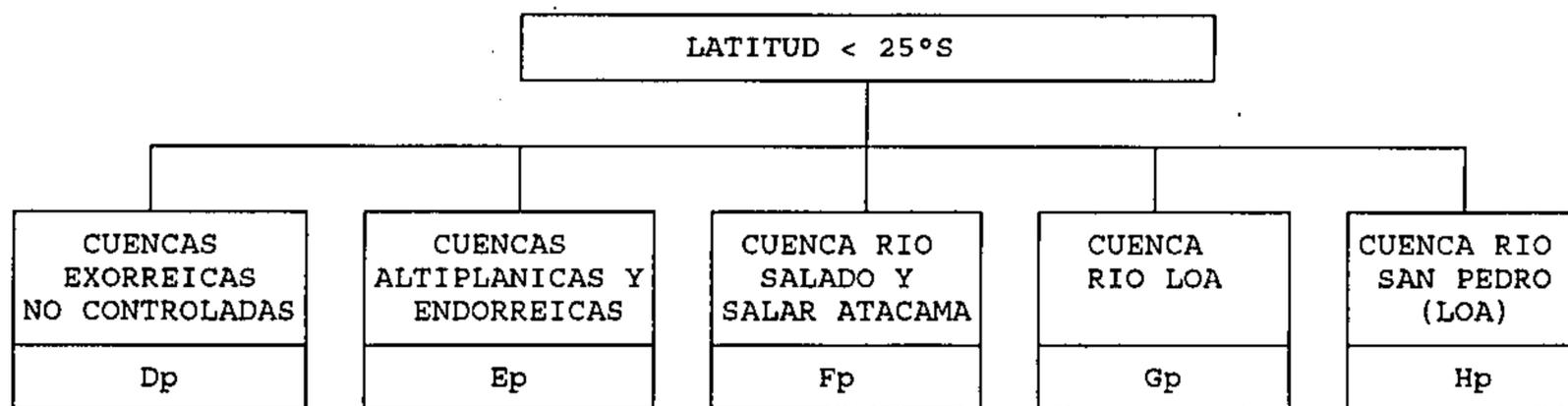


Fig. 4.2 Definición de Zonas Homogéneas Pluviales

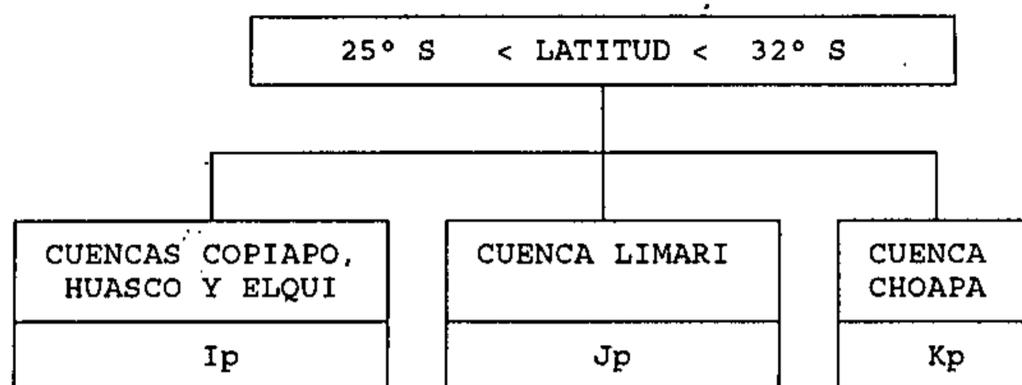
Cuencas Ubicadas al Norte de la Lat 25°S



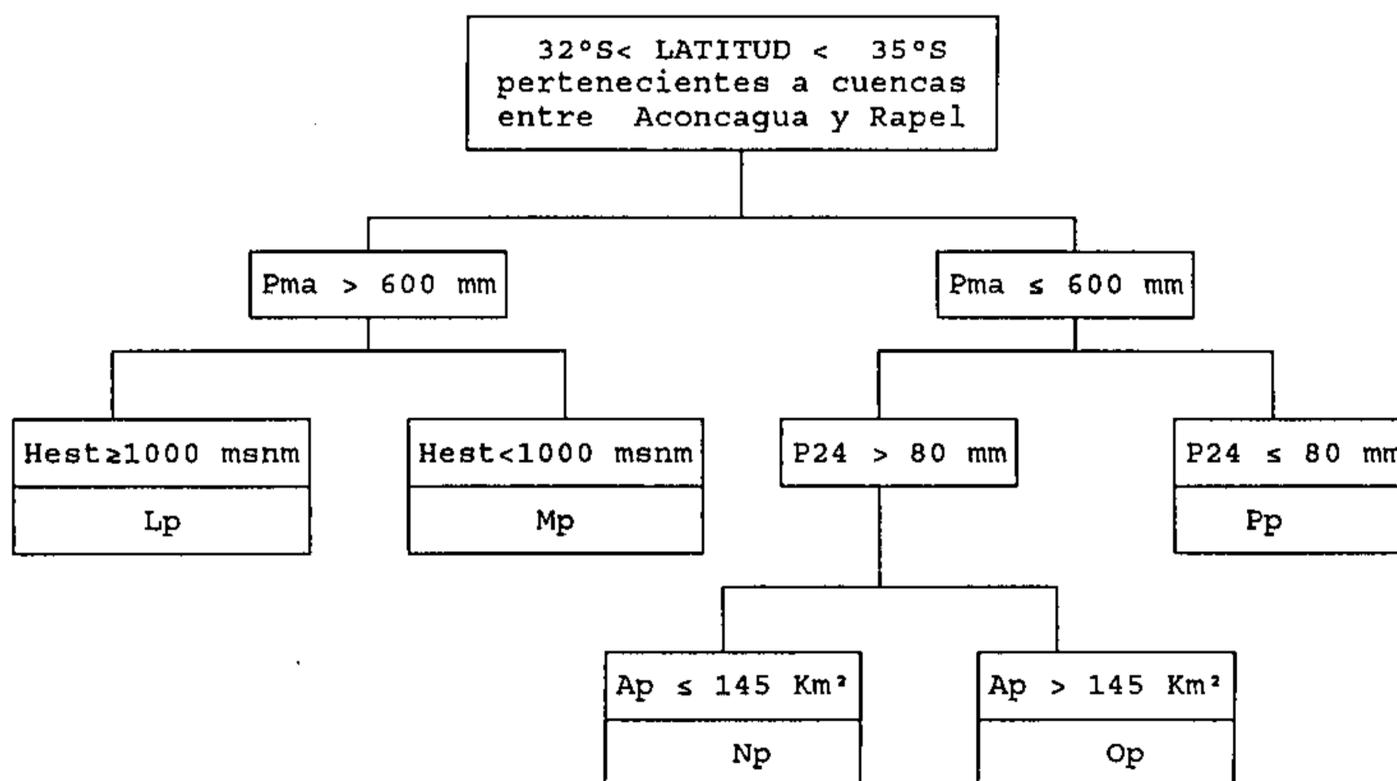
Donde:

Dp, Ep, Fp, ... , Xp, Yp, Zp corresponden a la denominación de zonas homogéneas.

Cuencas Ubicadas Entre Lat 25°S y Lat 32°S



Cuencas Ubicadas Entre Lat 32°S y Lat 35°S



Donde:

P_{ma} : Precipitación media anual, mm

P_{24} : Precipitación máxima en 24 horas y período de retorno 10 años, mm

H_{est} : Cota de la estación, msnm

A_p : Area pluvial, km^2

Cuencas Ubicadas Al Sur de la Lat 35°S

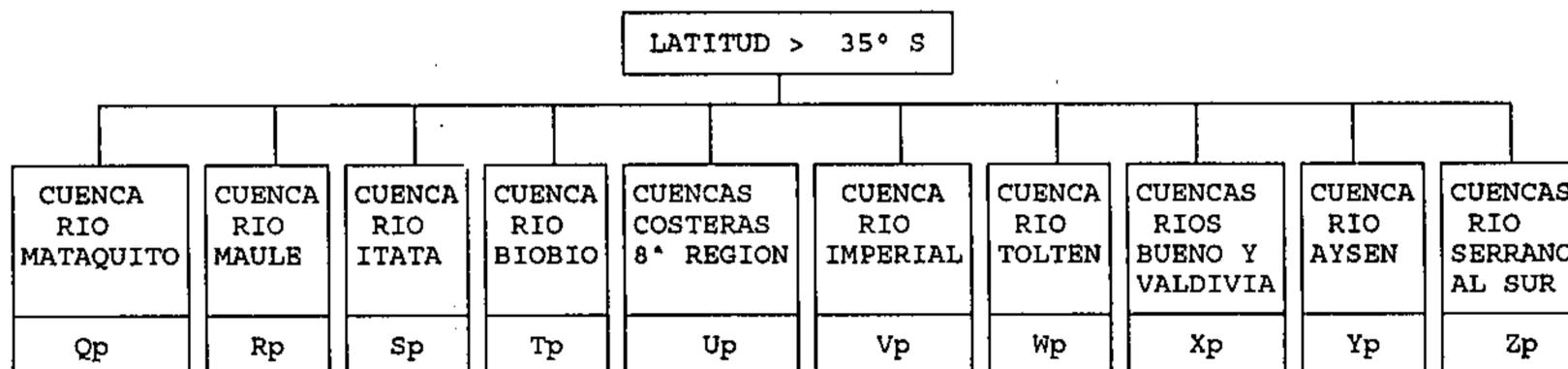


Tabla 4.1 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Dp Pluvial-Gumbel-Exorreicas

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q(T)/Q(10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,50	0,56	0,44
5	0,80	0,83	0,78
10	1,00	1,00	1,00
20	1,19	1,21	1,17
25	1,25	1,28	1,22
50	1,44	1,49	1,38
75	1,54	1,61	1,48
100	1,62	1,70	1,54

Tabla 4.2 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Ep Pluvial-LogPearson3-Altiplánicas

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q(T)/Q(10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,55	0,61	0,50
5	0,83	0,84	0,82
10	1,00	1,00	1,00
20	1,16	1,17	1,16
25	1,20	1,21	1,19
50	1,37	1,41	1,33
75	1,45	1,51	1,39
100	1,52	1,60	1,44

Tabla 4.3 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Fp Pluvial-LogPearson3-C.Salado/Salar

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q(T)/Q(10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,18	0,19	0,16
5	0,52	0,54	0,51
10	1,00	1,00	1,00
20	1,77	1,78	1,76
25	2,06	2,07	2,05
50	3,52	3,53	3,51
75	4,61	4,67	4,56
100	5,70	5,80	5,61

Tabla 4.4 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Gp Pluvial-Gumbel-C.Loa Controlada

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q (T) / Q (10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,62	0,65	0,55
5	0,85	0,86	0,82
10	1,00	1,00	1,00
20	1,15	1,17	1,13
25	1,19	1,23	1,17
50	1,33	1,40	1,30
75	1,42	1,49	1,38
100	1,48	1,56	1,43

Tabla 4.5 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Hp Pluvial-LogPearson3-C.San Pedro

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q (T) / Q (10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,81	0,85	0,77
5	0,92	0,94	0,91
10	1,00	1,00	1,00
20	1,08	1,09	1,06
25	1,10	1,11	1,07
50	1,17	1,21	1,14
75	1,21	1,26	1,17
100	1,25	1,30	1,20

Tabla 4.6 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Ip Pluvial-LogNormal-Latitud 27°-30°

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q (T) / Q (10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,43	0,52	0,35
5	0,74	0,80	0,63
10	1,00	1,00	1,00
20	1,27	1,34	1,21
25	1,36	1,46	1,27
50	1,66	1,87	1,49
75	1,86	2,13	1,62
100	2,00	2,33	1,71

Tabla 4.7

Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Jp Pluvial-LogNormal-C.Limarí S/Regul.

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q (T) / Q (10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,24	0,30	0,19
5	0,61	0,66	0,56
10	1,00	1,00	1,00
20	1,51	1,61	1,40
25	1,71	1,85	1,55
50	2,41	2,76	2,06
75	2,91	3,42	2,40
100	3,30	3,94	2,66

Tabla 4.8

Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Kp Pluvial-LogNormal-C.Choapa

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q (T) / Q (10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,24	0,48	0,13
5	0,60	0,78	0,50
10	1,00	1,00	1,00
20	1,61	1,77	1,49
25	1,82	1,96	1,67
50	2,61	3,03	2,33
75	3,19	3,82	2,66
100	3,67	4,47	2,81

Tabla 4.9

Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Lp Pluvial-LogNormal-Latitud 32°-35°

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q (T) / Q (10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,16	0,18	0,13
5	0,52	0,55	0,50
10	1,00	1,00	1,00
20	1,69	1,78	1,61
25	1,97	2,10	1,85
50	3,08	3,39	2,77
75	3,91	4,39	3,44
100	4,59	5,21	3,97

Tabla 4.10 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Mp Pluvial-LogNormal-Latitud 32°-35°

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q (T) / Q (10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,43	0,51	0,27
5	0,74	0,80	0,64
10	1,00	1,00	1,00
20	1,28	1,45	1,21
25	1,38	1,61	1,28
50	1,71	2,19	1,49
75	1,92	2,59	1,63
100	2,08	2,90	1,72

Tabla 4.11 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Np Pluvial-LogNormal-Latitud 32°-35°

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q (T) / Q (10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,18	0,20	0,16
5	0,56	0,57	0,54
10	1,00	1,00	1,00
20	1,61	1,67	1,59
25	1,86	1,94	1,81
50	2,77	2,98	2,66
75	3,44	3,76	3,28
100	3,97	4,38	3,76

Tabla 4.12 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Op Pluvial-LogNormal-Latitud 32°-35°

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q (T) / Q (10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,30	0,46	0,21
5	0,64	0,72	0,59
10	1,00	1,00	1,00
20	1,48	1,55	1,39
25	1,67	1,76	1,55
50	2,35	2,53	2,16
75	2,85	3,08	2,62
100	3,24	3,51	3,00

Tabla 4.13 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Pp Pluvial-LogNormal-Latitud 32°-35°

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q (T) / Q (10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,42	0,57	0,31
5	0,74	0,82	0,67
10	1,00	1,00	1,00
20	1,29	1,40	1,17
25	1,39	1,54	1,23
50	1,72	2,04	1,40
75	1,94	2,37	1,51
100	2,10	2,62	1,58

Tabla 4.14 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Qp Pluvial-Gumbel-VII Región-C.Mataquito

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q (T) / Q (10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,50	0,63	0,43
5	0,80	0,85	0,77
10	1,00	1,00	1,00
20	1,19	1,22	1,14
25	1,25	1,28	1,18
50	1,43	1,50	1,32
75	1,54	1,62	1,40
100	1,62	1,71	1,46

Tabla 4.15 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Rp Pluvial-Gumbel-VII Región-C.Maule

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q (T) / Q (10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,49	0,52	0,44
5	0,80	0,81	0,78
10	1,00	1,00	1,00
20	1,19	1,21	1,19
25	1,26	1,28	1,24
50	1,45	1,49	1,42
75	1,56	1,61	1,53
100	1,64	1,70	1,60

Tabla 4.16 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Sp Pluvial-Gumbel-VIII Región-C.Itata

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q(T) / Q(10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,54	0,58	0,46
5	0,82	0,83	0,78
10	1,00	1,00	1,00
20	1,18	1,21	1,16
25	1,23	1,27	1,21
50	1,41	1,48	1,37
75	1,51	1,60	1,46
100	1,58	1,68	1,52

Tabla 4.17 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Tp Pluvial-Gumbel-VIII Región-C.Biobío

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q(T) / Q(10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,60	0,65	0,52
5	0,84	0,86	0,81
10	1,00	1,00	1,00
20	1,15	1,18	1,13
25	1,20	1,24	1,18
50	1,35	1,42	1,31
75	1,44	1,53	1,38
100	1,50	1,60	1,44

Tabla 4.18 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Up Pluvial-Gumbel-VIII Región-C.Costeras

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q(T) / Q(10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,57	0,63	0,50
5	0,83	0,85	0,80
10	1,00	1,00	1,00
20	1,16	1,19	1,14
25	1,22	1,25	1,19
50	1,38	1,44	1,33
75	1,47	1,55	1,41
100	1,54	1,63	1,46

Tabla 4.19 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Máximos Diarios
Zona Homogénea Vp Pluvial-Gumbel-IX Región-C.Imperial

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q(T) / Q(10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,59	0,65	0,49
5	0,84	0,86	0,80
10	1,00	1,00	1,00
20	1,16	1,20	1,13
25	1,21	1,26	1,18
50	1,36	1,45	1,31
75	1,45	1,56	1,38
100	1,51	1,64	1,44

Tabla 4.20 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Máximos Diarios
Zona Homogénea Wp Pluvial-Gumbel-IX Región-C.Toltén

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q(T) / Q(10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,68	0,71	0,63
5	0,87	0,89	0,85
10	1,00	1,00	1,00
20	1,12	1,14	1,11
25	1,16	1,19	1,14
50	1,28	1,32	1,25
75	1,35	1,40	1,31
100	1,40	1,46	1,36

Tabla 4.21 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Máximos Diarios
Zona Homogénea Xp Pluvial-Gumbel-X Región

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q(T) / Q(10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,66	0,69	0,64
5	0,87	0,88	0,86
10	1,00	1,00	1,00
20	1,13	1,14	1,12
25	1,17	1,18	1,16
50	1,29	1,32	1,27
75	1,37	1,40	1,34
100	1,42	1,45	1,39

Tabla 4.22 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Máximos Diarios
Zona Homogénea Yp Pluvial-Gumbel-XI Región

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q (T) / Q (10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,64	0,76	0,51
5	0,86	0,90	0,80
10	1,00	1,00	1,00
20	1,14	1,19	1,09
25	1,18	1,25	1,12
50	1,32	1,43	1,21
75	1,39	1,54	1,27
100	1,45	1,62	1,30

Tabla 4.23 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Máximos Diarios
Zona Homogénea Zp Pluvial-Gumbel-XII Región

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q (T) / Q (10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,60	0,72	0,41
5	0,84	0,89	0,76
10	1,00	1,00	1,00
20	1,15	1,23	1,11
25	1,20	1,30	1,14
50	1,35	1,52	1,25
75	1,44	1,65	1,31
100	1,50	1,74	1,35

- d) Determinación del Caudal Medio Diario Máximo de Período de Retorno 10 años

El caudal medio diario máximo de período de retorno 10 años (Q_{10}), es la variable usada para adimensionalizar las curvas de frecuencias regionales del método.

Para su determinación se plantean las siguientes relaciones, las cuales dependen de la región en que se ubique la cuenca a analizar.

$$\text{III y IV Región} \quad Q_{10} = 1,94 \times 10^{-7} A_p^{0,778} (P_{24}^{10})^{3,108} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (4.1)$$

$$\text{V - RM- VI Región} \quad Q_{10} = 5,42 \times 10^{-8} A_p^{0,915} (P_{24}^{10})^{3,432} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (4.2)$$

$$\text{VII a IX Región} \quad Q_{10} = 2 \times 10^{-3} A_p^{0,973} (P_{24}^{10})^{1,224} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (4.3)$$

donde:

Q_{10} : Caudal medio diario máximo de período de retorno 10 años, expresado en m³/s.

A_p : Area pluvial de la cuenca, expresada en km²

P_{24}^{10} : Precipitación diaria máxima de período de retorno 10 años, expresada en mm.

Con estas relaciones es posible calcular la curva de frecuencias de caudal medio diario máximo de la cuenca, multiplicando los valores de la curva de frecuencia regional adimensional, obtenida en las tablas 4.1 a 4.23, por el caudal medio diario máximo de período de retorno 10 años.

e) Determinación de la Curva de Frecuencia del Caudal Instantáneo Máximo

El factor de conversión (α) de caudal medio diario máximo a caudal instantáneo máximo, se determina en función de la zona homogénea a la cual pertenece la cuenca. Los valores de estos factores para cada zona homogénea se presentan en la Tabla 4.24.

Tabla 4.24 Factores de Conversión del Caudal Medio Diario Máximo a Caudal Instantáneo Máximo

ZONA HOMOGÉNEA	α
Dp	2,19
Ep	1,13
Fp	3,07
Gp	1,40
Hp	1,13
Ip	1,25
Jp	2,14
Kp	1,59
Lp	1,67
Mp	1,48
Np	1,87
Op	1,76
Pp	1,43
Qp	1,51
Rp	1,45
Sp	1,37
Tp	1,28
Up	1,2-1,5 (*)
Vp	1,16
Wp	1,19
Xp	1,22
Yp	1,27
Zp	1,24

* En la zona homogénea Up se entrega un rango para los valores del factor α .

Finalmente, la curva de frecuencias de caudal instantáneo máximo de la cuenca se determina multiplicando la curva de frecuencias de caudal medio diario máximo por el factor de conversión α correspondiente a la zona homogénea a la cual pertenece la cuenca.

4.1.2 Método de Verni y King Modificado

a) Descripción del Método

Este método está basado en la fórmula de Verni y King, que relaciona el caudal instantáneo máximo de una crecida con la precipitación diaria máxima y el área pluvial a través de una relación de potencias.

A la fórmula original, establecida para períodos de retorno mayores que 30 años, se le ha agregado un coeficiente empírico variable con el período de retorno, que es producto de un proceso de ajuste y calibración a los resultados de los análisis de frecuencias realizados a un total de 130 estaciones limnigráficas ubicadas entre las regiones III^a y IX^a del país, inclusive.

La fórmula de Verni y King Modificada tiene la siguiente forma:

$$Q = C(T) \cdot 0,00618 \cdot P_{24}^{1,24} \cdot A_p^{0,88} \quad (4.4)$$

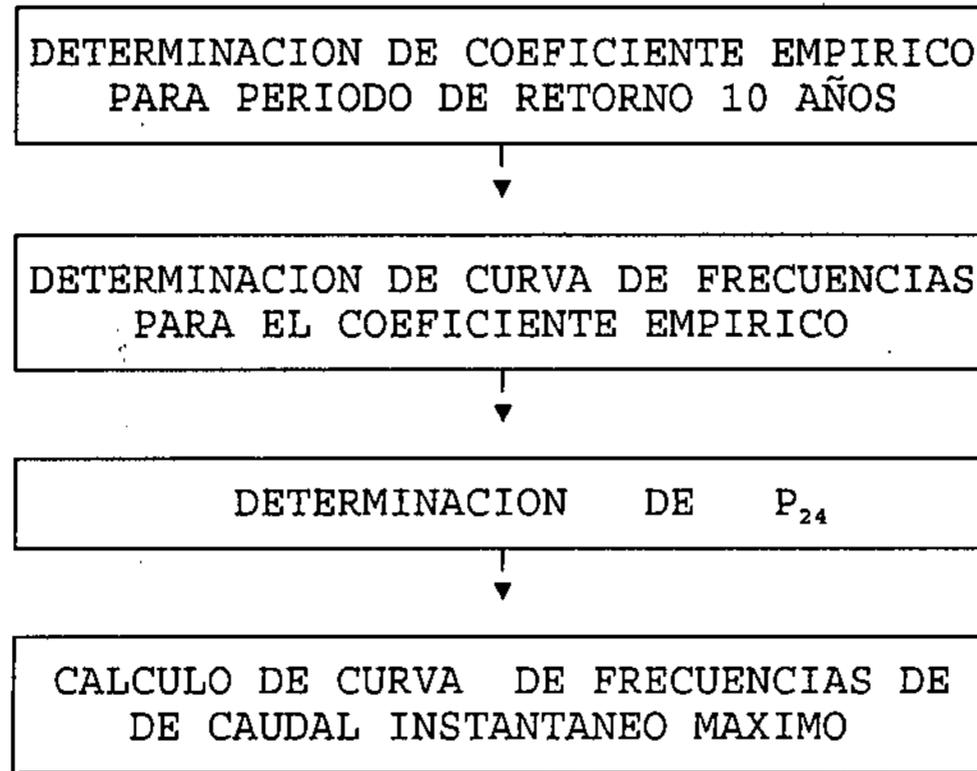
donde:

- Q : Caudal instantáneo máximo asociado al período de retorno T años, expresado en m³/s.
- C(T) : Coeficiente empírico de período de retorno T años.
- P₂₄ : Precipitación diaria máxima asociada al período de retorno de T años, expresada en mm.
- A_p : Area pluvial de la cuenca, expresada en km².

El método presentado tiene validez para cuencas sin control fluviométrico, de régimen pluvial o nivopluvial, con áreas comprendidas entre 20 y 10.000 km² y ubicadas entre las regiones anteriormente mencionadas. Su uso se limita a estimaciones de caudales de períodos de retorno menores a 100 años.

El procedimiento de cálculo consiste en determinar el coeficiente empírico del ajuste y calibración antes mencionado, el cual resulta ser función del período de retorno. Luego se aplica la fórmula directamente. En el diagrama presentado en la Figura 4.3 se esquematizan los pasos involucrados.

Fig. 4.3 Esquema de Cálculo del Método de Verni-King Modificado



b) **Determinación del Coeficiente Empírico de Período de Retorno 10 Años**

El coeficiente empírico de período de retorno T años se obtiene a base del correspondiente coeficiente asociado a un período de retorno T = 10 años C(T=10). Este último coeficiente es variable de acuerdo a la región en que se encuentra la cuenca analizada, como se indica en la Tabla 4.25.

Tabla 4.25 Coeficiente C(T=10 Años) Fórmula de Verni y King Modificada

Región	C (T=10)
III	0,027
IV - Cuenca Elqui	0,057
IV - Cuenca Limarí	0,180
IV - Cuenca Choapa	0,200
V	0,290
VI	0,680
VII	0,710
VIII	0,790
IX	0,890

c) Determinación de la Curva de Frecuencia del Coeficiente Empírico

El coeficiente empírico $C(T)$ es función del período de retorno. Para su determinación se debe calcular primeramente el valor del factor de frecuencia $C(T)/C(T=10)$ y luego se debe multiplicar éste por el coeficiente asociado al período de retorno de 10 años obtenido de la Tabla 4.25.

En la Tabla 4.26 se presentan los valores del factor de frecuencia que depende también de la ubicación geográfica de la cuenca así como del período de retorno T de la crecida que se desea calcular.

Tabla 4.26 Coeficientes de Fórmulas Empíricas

PERIODO RETORNO T(años)	C(T)/C(T=10)								
	III Región	IV Elqui	IV Limarí	IV Choapa	V Región	VI Región	VII Región	VIII Región	IX Región
2	0,90	0,87	0,44	0,33	0,38	0,63	0,86	0,91	1,03
5	0,95	0,93	0,75	0,68	0,84	0,85	0,95	0,99	1,02
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
20	1,10	1,06	1,26	1,38	1,15	1,15	1,03	1,01	0,98
25	1,14	1,10	1,36	1,54	1,22	1,20	1,04	1,02	0,98
50	1,23	1,15	1,62	2,00	1,38	1,33	1,04	1,02	0,97
100	1,32	1,20	1,91	2,56	1,59	1,55	1,04	1,03	0,93

d) Determinación de la Precipitación Diaria Máxima.

Se estima para el período de retorno de interés T según lo indicado en el acápite 3.8 del presente Manual.

e) Determinación del Caudal Instantáneo Máximo de Período de Retorno T .

Determinadas todas las variables que definen la ecuación (4.4) se calcula el caudal asociado al período de retorno T que se desea.

REPUBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS
DEPTO. ESTUDIOS Y PLANIFICACION
UNIDAD TECNICA MANEJO DE CUENCAS

ORD. N° 427,

ANT.: - Estudio Análisis Eventos Hidrometeorológicos Extremos - Caudales Máximos y Mínimos.

- Carta Secretaria Ejec. N°09 del 12/05/95.

MAT.: Solicita financiamiento que se indica.

INC.: Presupuesto de AC Ingenieros Consultores.

SANTIAGO, 8 JUN 1995

DE : DIRECTOR GENERAL DE AGUAS

A : SEÑOR EUGENIO RIVERA
SECRETARIO EJECUTIVO
PROGRAMA PRE-INVERSION MIDEPLAN-BID

Tengo el agrado de dirigirme a Ud., y en relación al Estudio Análisis de Eventos Hidrometeorológicos Extremos. Caudales Máximos y Mínimos vengo en someter a su consideración lo siguiente:

- 1.- El estudio mencionado, financiado por el crédito BID, se encuentra terminado y actualmente se realizan las tareas correspondientes a la edición final del Manual de Cálculo.
- 2.- Para la Dirección General de Aguas, la realización de dicho estudio ha significado una meta muy importante y constituye un aporte extremadamente significativo para la ingeniería hidráulica de diseño en el país.

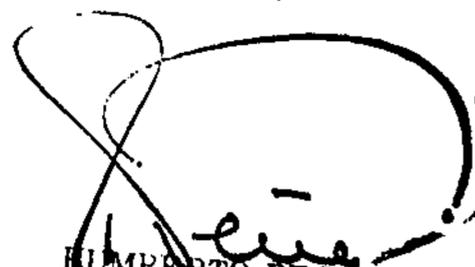


8 JUN 1995



- 3.- Por tales razones la Dirección General de Aguas solicitó un financiamiento para realizar una divulgación del Manual de Cálculo, como una forma de dar a conocer al país el trabajo y resultados obtenidos en el estudio. Lamentablemente y según carta indicada en los antecedentes, esta solicitud no fue acogida por el Comité de Administración del Programa de Pre-Inversión.
- 4.- Reiterando la importancia que tiene para la Dirección General de Aguas la divulgación del Manual de Cálculo, me permito reiterar nuestra solicitud. Para ello se ha pedido un nuevo presupuesto a la firma Consultora que ha realizado el estudio, y el cual asciende a la suma de \$8.454.000.- (ocho millones cuatrocientos cincuenta y cuatro mil pesos).
- 5.- Aún si el presupuesto es considerado alto, podríamos pensar en realizar lo solicitado sólo en Santiago; para lo cual el presupuesto asciende a \$2.730.000.- (dos millones setecientos treinta mil pesos).

Agradeciendo su gestión ante el Comité de Administración, le saluda atentamente,


HUMBERTO PEÑA TORREALBA
INGENIERO CIVIL
DIRECTOR GENERAL DE AGUAS

FVJ/ssn

DISTRIBUCION :

- Sr. Eugenio Rivera
Secretario Ejecutivo MIDEPLAN-BID
Agustinas N°785 - Of. 560
- Sr. Director General de Aguas
- Ing. Jefe Depto. Estudios y Planificación DGA.
- Sr. Inspector Fiscal
- Srta. Marcia Varela, Sec. Ejec. MIDEPLAN-BID
- Unidad Técnica Manejo de Cuencas
- Oficina de Partes DGA.

4.1.3 Fórmula Racional

a) Descripción del Método

La Fórmula Racional es un método ampliamente conocido en Hidrología. En este Manual se recomienda su uso sobre la base del empleo de coeficientes de escorrentía que mejor se ajustan a los resultados de los análisis de frecuencias efectuados en el estudio desarrollado para su elaboración. Estos análisis incluyen información de 130 estaciones limnigráficas ubicadas entre la III^a y IX^a Regiones de Chile.

La expresión que permite determinar el caudal instantáneo máximo de período de retorno T es:

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6} \quad (4.5)$$

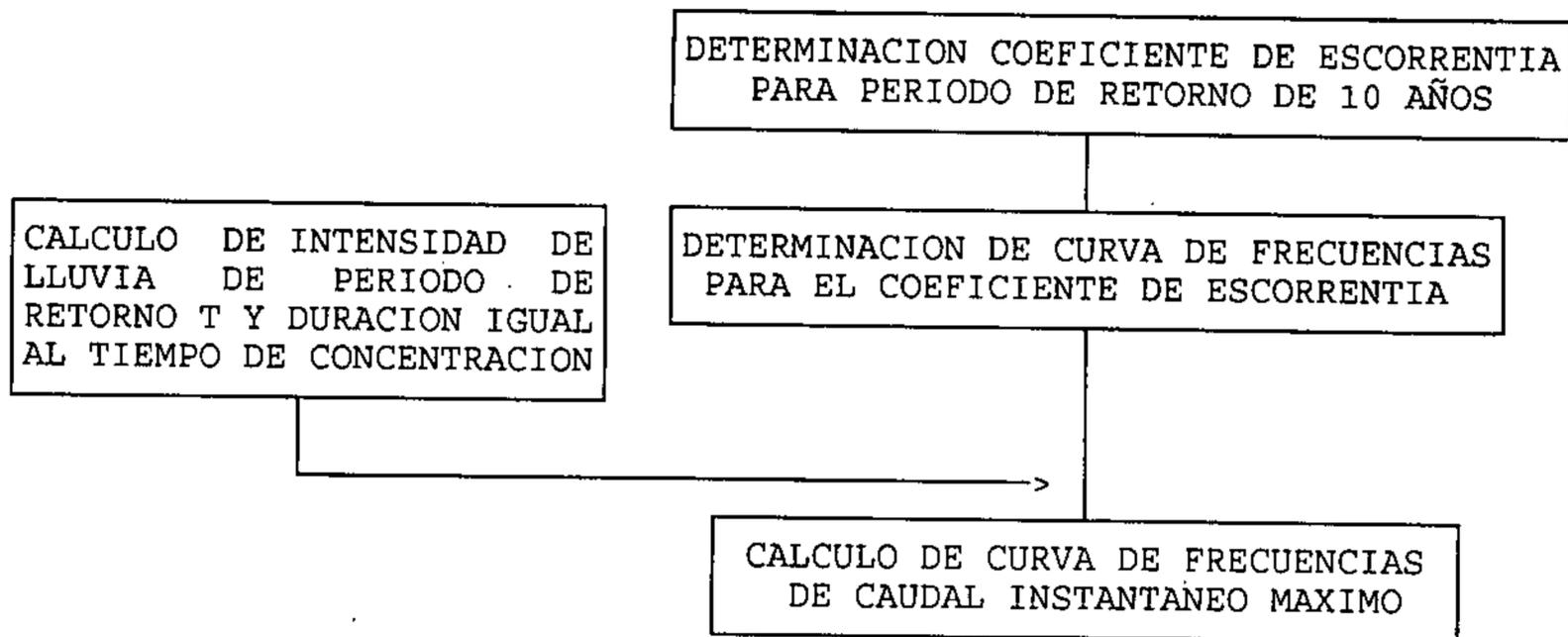
donde:

- Q : Caudal instantáneo máximo de período de retorno T, expresado en m³/s.
- C : Coeficiente de escorrentía asociado al período de retorno T.
- i : Intensidad media de lluvia asociada al período de retorno T y a una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca pluvial, expresada en mm/hr.
- A : Area pluvial aportante expresada en km².

Por tratarse de una fórmula empírica, su rango de aplicación es el de los datos que la validan. En el presente caso ello corresponde a cuencas sin control fluviométrico, con áreas pluviales comprendidas entre 20 y 10.000 km², de régimen hidrológico pluvial o pluvio-nival y ubicadas entre las regiones III^a y IX^a del país. Además al igual que los anteriores métodos, es aplicable para períodos de retorno menores a 100 años.

El procedimiento de cálculo consiste básicamente en determinar el coeficiente de escorrentía que es función del período de retorno, de la ubicación geográfica de la cuenca y de la intensidad de la lluvia de diseño. En el diagrama presentado en la Figura 4.4 se ilustra este procedimiento.

Fig. 4.4 Esquema de Cálculo de la Fórmula Racional



b) **Determinación del Coeficiente de Escorrentía de Período de Retorno 10 Años**

El coeficiente de escorrentía asociado al período de retorno de 10 años $C(T=10)$ es variable según la ubicación geográfica de la cuenca. En la Tabla 4.27 se presentan los valores que corresponde utilizar según la región o cuenca donde se realiza el cálculo.

Cabe destacar que estos coeficientes son aplicables sólo en cuencas naturales. Para cuencas urbanizadas se recomienda utilizar los coeficientes de escorrentía usuales.

Tabla 4.27 Coeficiente $C(T=10)$. Fórmula Racional

Región	$C(T=10)$
III	0,009
IV - Cuenca Elqui	0,025
IV - Cuenca Limarí	0,078
IV - Cuenca Choapa	0,080
V	0,080
VI	0,310
VII	0,390
VIII	0,360
IX	0,280

c) **Determinación de la Curva de Frecuencia del Coeficiente de Escorrentía.**

Para determinar el valor del coeficiente de escorrentía correspondiente a cualquier período de retorno comprendido entre 2 y 100 años, se debe multiplicar el valor del coeficiente asociado al período de retorno de 10 años por la razón $C(T)/C(T=10)$. Se ha demostrado en el estudio desarrollado para elaborar el Manual, que este factor de frecuencias es igual al del método de Verni y King modificado. Por lo tanto para su estimación se debe hacer uso de la Tabla 4.26.

d) **Determinación de la Intensidad de Lluvia**

Se estima para el período de retorno y duración especificada según lo indicado en el acápite 3.8 del Manual.

e) **Determinación del Caudal Instantáneo Máximo de Período de Retorno T.**

Determinadas todas las variables de la ecuación (4.5), se estima el caudal instantáneo máximo asociado al período de retorno de interés.

4.1.4 Recomendación de Uso de los Métodos

Se recomienda el uso de los tres métodos descritos en los Puntos 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3 en cuencas pluviales o pluvionivales sin control fluviométrico, ubicadas entre las regiones III^a y IX^a de Chile. El período de retorno máximo no debe exceder a 100 años.

En general para estimar crecidas pluviales, es preferible usar el método DGA-AC en primer lugar y luego comparar los resultados con la fórmula de Verni y King Modificada y/o la Fórmula Racional.

4.1.5 Ejemplos de Aplicación

Como forma de ilustrar la aplicación de los métodos se presentan a continuación ejemplos de aplicación para cuencas de la zona norte, centro y sur del país. Estas cuencas han sido definidas respectivamente por las estaciones fluviométricas Manflas en Vertedero (III^a Región), Pocuro en el Sifón (V^a Región) y Chillán en Esperanza (VIII^a Región).

a) Río Manflas en Vertedero

La cuenca definida por la estación Manflas en Vertedero se presenta en la Figura 4.5. La estación se ubica a los 28°4' de latitud sur a una altitud de 1550 msnm.

a1) Datos Básicos

Area Aportante Pluvial

Latitud	=	28°4'
Línea de Nieves	=	2600 msnm (Según Peña y Vidal, Tabla 3.1)
Area (Ap)	=	221 km ² (Bajo Línea de Nieves)

Area Aportante Nival

Línea de Nieves	=	2600 msnm (Según Peña y Vidal, Tabla 3.1)
Area (An)	=	958 km ² (Sobre Línea de Nieves)

Parámetros Morfométricos: Obtenidos de cartas IGM, para el área pluvial definida.

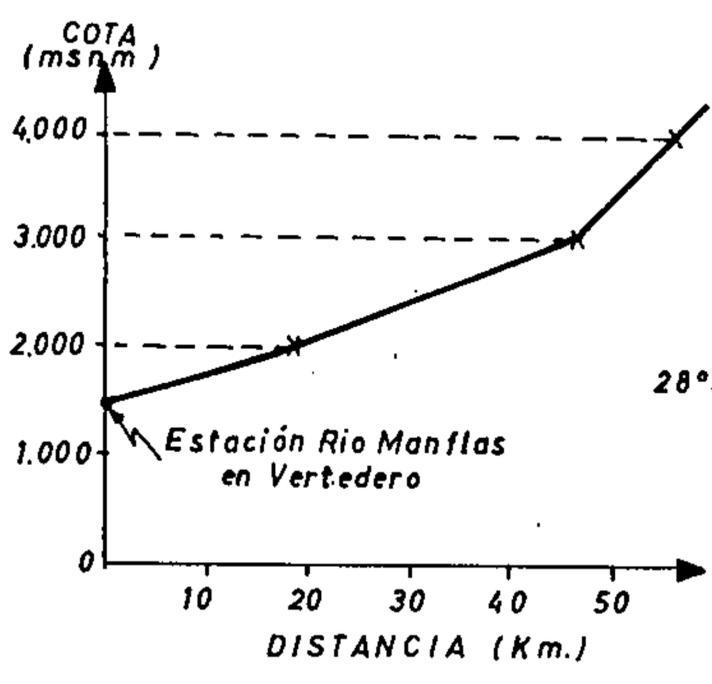
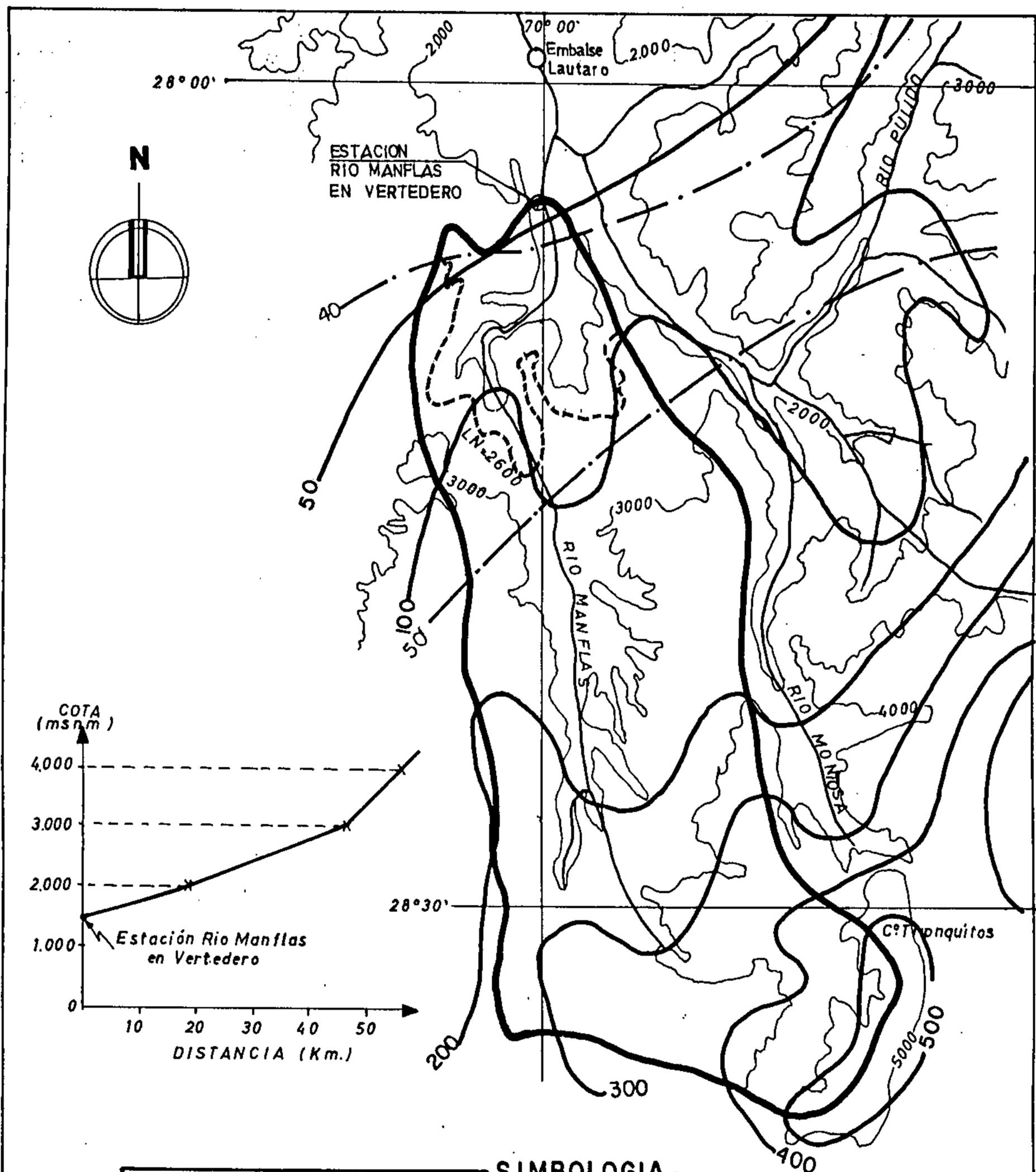
L	=	45 km
Lg	=	15 km
H	=	1050 m
S	=	0,49 %

Datos Pluviométricos: Obtenidos de planos de isoyetas de acuerdo a lo indicado en los acápites 3.6 y 3.7.

P_{24}^{10}	=	45 mm
PMA	=	200 mm

Tiempo de Concentración: Estimado según se indica en el acápite 3.5 para la cuenca pluvial.

$$t_c = 0,95 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} = 5,3 \text{ hrs}$$



SIMBOLOGIA

	LIMITE DE LA CUENCA
	LINEA DE NIEVES PLUVIAL Y NIVAL
	ISOLINEAS DE PRECIPITACION MEDIA ANUAL (mm/año)
	ISOLINEAS DE PRECIPITACION MAXIMA DIARIA PARA PERIODOS DE RETORNO DE 10 AÑOS (mm.)
	CURVA DE NIVEL

AC INGENIEROS CONSULTORES	PROYECTO: ANALISIS DE EVENTOS HIDROMETEOROLOGICOS EXTREMOS EN EL PAIS	
	CAUDALES MAXIMOS Y MINIMOS	
PLANO: CUENCA RIO MANFLAS EN VERTEDERO	FECHA: MARZO /95	ESCALA: S/E
		FIGURA N° 4.5

a2) Aplicación del Método DGA-AC

La cuenca pertenece a la cuenca del río Copiapó, en la III región, por lo tanto el caudal medio diario máximo de período de retorno 10 años, se calcula con la ecuación (4.1):

$$Q_0 = 1,94 \cdot 10^{-7} A p^{0,776} (P_{24}^{10})^{3,108} = 1,76 \text{ m}^3/\text{s}$$

Por otro lado, por pertenecer a la cuenca del río Copiapó, la zona homogénea correspondiente es la Ip. En la Tabla 4.28 se presenta la curva de frecuencias regional adimensional definida para esta zona (Tabla 4.6) y la curva de frecuencias del caudal medio diario máximo.

Tabla 4.28 Curva de Frecuencias Caudal Medio Diario Máximo
Cuenca Manflas en Vertedero. Método DGA-AC

T (años)	CURVA FRECUENCIAS REGIONAL ADIMENSIONAL Q_T/Q_{10} (adim)	CURVA DE FRECUENCIAS CAUDAL MEDIO DIARIO MAXIMO $Q_T = (Q_T/Q_{10})^* Q_{10}$ (m ³ /s)
2	0,43	0,8
5	0,74	1,3
10	1,00	1,8
20	1,27	2,2
25	1,36	2,4
50	1,66	2,9
75	1,86	3,3
100	2,00	3,5

El valor del factor de conversión (α) de caudales medios diarios a caudales instantáneos máximos que corresponde a esta zona homogénea, es 1,25 (Tabla 4.24). En la Tabla 4.29 se presenta el cálculo de caudales instantáneos máximos.

Tabla 4.29

Curva de Frecuencias Caudal Instantáneo Máximo
Cuenca Manflas en Vertedero. Método DGA-AC

T (años)	CURVA DE FRECUENCIAS CAUDAL INSTANTANEO MAXIMO $\alpha * Q_T$ (m ³ /s)
2	1,0
5	1,6
10	2,2
20	2,8
25	3,0
50	3,7
75	4,1
100	4,4

a3) Aplicación del Método de Verni y King Modificado

En la Tabla 4.30 se resume el cálculo de caudales instantáneos máximos por este método.

Tabla 4.30

Cálculo de Caudales Instantáneos Máximos
Cuenca Manflas en Vertedero. Método Verni y King Modificado

T (años) (1)	C(10) (2)	C(T)/C(10) (3)	C(T) (4)	P_{24}^{10} (mm) (5)	CF_T (6)	P_{24}^T (mm) (7)	Q (m ³ /s) (8)
2	0,027	0,90	0,024	45	0,377	17,0	0,6
5	0,027	0,95	0,026	45	0,752	33,8	1,4
10	0,027	1,00	0,027	45	1,000	45,0	2,2
20	0,027	1,10	0,030	45	1,238	55,7	3,1
25	0,027	1,14	0,031	45	1,315	59,2	3,5
50	0,027	1,23	0,033	45	1,546	69,6	4,6
100	0,027	1,32	0,036	45	1,777	80,0	5,8

donde:

- Columna 1: Período de retorno
- Columna 2: Valor del coeficiente empírico de período de retorno 10 años, obtenido de Tabla 4.25.
- Columna 3: Curva de frecuencias de coeficiente empírico referido al valor de período de retorno 10 años, obtenida de Tabla 4.26.
- Columna 4: Curva de frecuencias de coeficiente empírico (Columna 2 * Columna 3).
- Columna 5: Precipitación diaria máxima de período de retorno 10 años, obtenida de los planos de isoyetas.
- Columna 6: Coeficiente de frecuencia de la cuenca, obtenido de estudio "Precipitaciones Máximas en 1, 2 y 3 días".
- Columna 7: Precipitación diaria máxima de período de retorno T (Columna 5 * Columna 6).
- Columna 8: Curva de frecuencias de caudal instantáneo máximo, calculada para cada período de retorno con ecuación (4.4).

a4) Aplicación de la Fórmula Racional

En la Tabla 4.31 se presenta el cálculo de caudales instantáneos máximos por este método.

Tabla 4.31 Cálculo de Caudales Instantáneos Máximos
Cuenca Manflas en Vertedero Fórmula Racional

T (años) (1)	C(10) (2)	C(T)/C(10) (3)	C(T) (4)	P_{24}^{10} (mm) (5)	CF_T (6)	P_{24}^T (mm) (7)	t_c (hr) (8)	CD_{t_c} (9)	$I_{t_c}^T$ (mm/hr) (10)	$Q=C*I*A/3,6$ (m ³ /s) (11)
2	0,009	0,90	0,008	45	0,377	17,0	5,3	0,470	1,5	0,7
5	0,009	0,95	0,009	45	0,752	33,8	5,3	0,470	3,0	1,6
10	0,009	1,00	0,009	45	1,000	45,0	5,3	0,470	4,0	2,2
20	0,009	1,10	0,010	45	1,238	55,7	5,3	0,470	4,9	3,0
25	0,009	1,14	0,010	45	1,315	59,2	5,3	0,470	5,2	3,3
50	0,009	1,23	0,011	45	1,546	69,6	5,3	0,470	6,2	4,2
100	0,009	1,32	0,012	45	1,777	80,0	5,3	0,470	7,1	5,2

donde:

- Columna 1: Período de retorno
- Columna 2: Coeficiente empírico de período de retorno 10 años, obtenido de la Tabla 4.27.
- Columna 3: Curva de frecuencias de coeficiente empírico referido al valor de período de retorno 10 años, obtenida de Tabla 4.26.
- Columna 4: Coeficiente empírico de período de retorno T años (Columna 2 * Columna 3).
- Columna 5: Precipitación diaria máxima de período de retorno 10 años, obtenida de los planos de isoyetas.
- Columna 6: Coeficiente de frecuencia de la cuenca obtenido del estudio "Precipitaciones Máximas en 1, 2 y 3 Días".
- Columna 7: Curva de frecuencias de precipitación diaria máxima (Columna 6 * Columna 5).
- Columna 8: Tiempo de concentración de la cuenca, obtenido como se indica al principio de este ejemplo.
- Columna 9: Coeficiente de duración para el tiempo de concentración de la cuenca, obtenido según se indica en acápite 3.8.
- Columna 10: Intensidad media de precipitación para una duración igual al tiempo de concentración y para un período de retorno T (Columna 7 * Columna 9/Columna 8).
- Columna 11: Curva de frecuencias de caudal instantáneo máximo, obtenida con ecuación (4.5) para cada T.

a5) Comentario

Los valores inferidos con los tres métodos resultan del mismo orden de magnitud para períodos de retorno de hasta 10 años. Sin embargo se presentan diferencias de hasta 50% para los mayores períodos de retorno.

Al comparar estos valores con los que resultan del análisis de frecuencias de los valores registrados en la estación, se obtiene que las diferencias con el método DGA-AC presentan errores menores (~10%) para períodos de retorno iguales o superiores a 10 años.

En la Tabla 4.32 se presenta la comparación entre los caudales inferidos del análisis de frecuencias con los obtenidos en la aplicación de estos tres métodos.

Tabla 4.32 Comparación de Resultados de Estimación de Crecidas

Período Retorno (años)	Caudal Análisis Frecuencias (m ³ /s)	Caudal Fórmula Racional (m ³ /s)	Caudal Fórmula Verni y King (m ³ /s)	Caudal Método DGA-AC (m ³ /s)
5	1,4	1,6	1,4	1,6
10	1,9	2,2	2,2	2,2
20	2,5	3,0	3,1	2,8
50	3,4	4,2	4,6	3,7
100	4,2	5,2	5,8	4,4

b) Pocuro en el Sifón

La cuenca definida por la estación Pocuro en el Sifón se presenta en la Figura 4.6. La estación se ubica a los 32°54' de latitud Sur a la cota 1000 msnm.

b1) Datos Básicos

Area Aportante Pluvial

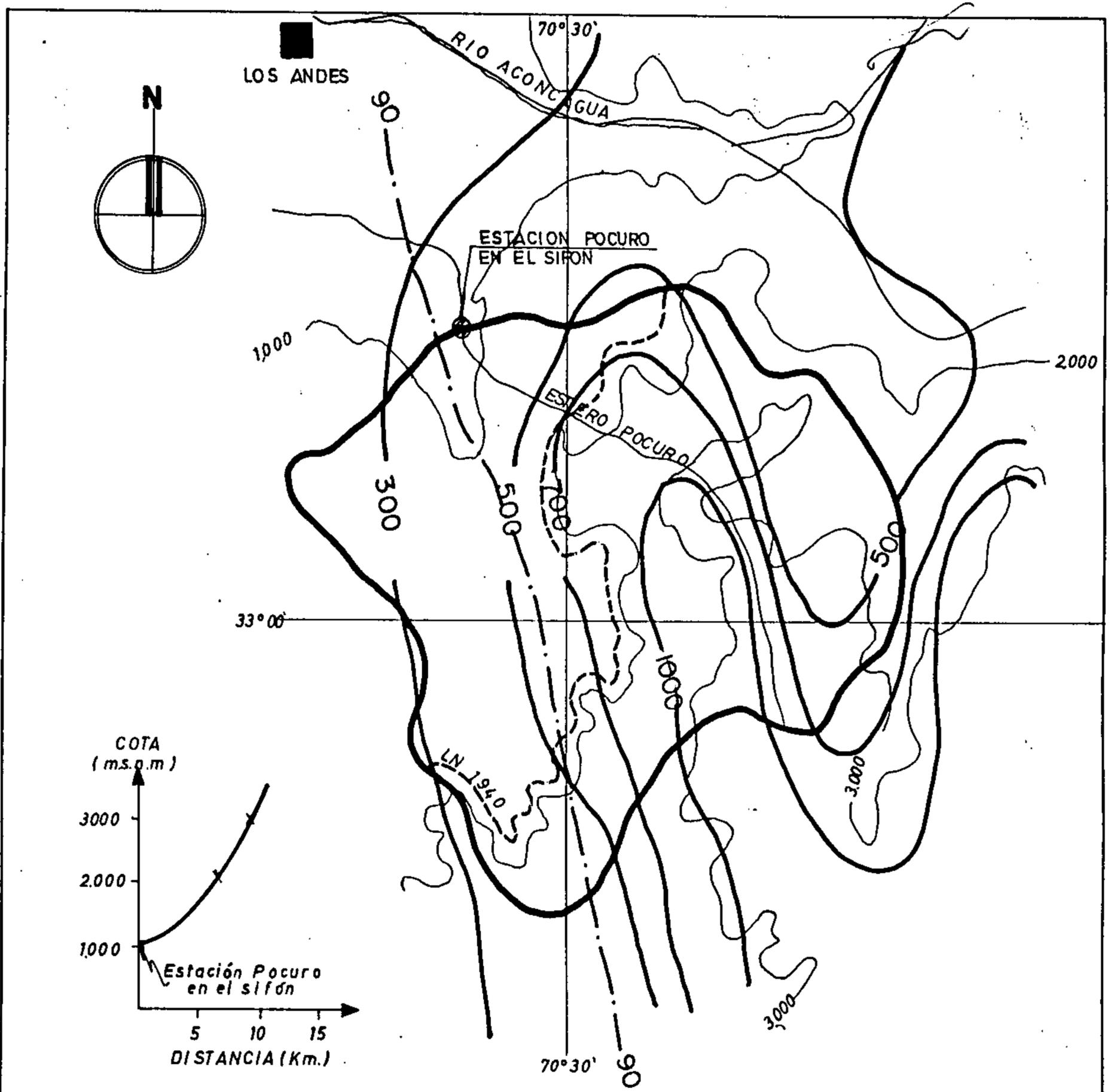
Latitud = 32°54'
 Línea de Nieves = 1940 msnm (Según Peña y Vidal, de Tabla 3.1)
 Area (Ap) = 134 km² (Bajo Línea de Nieves)

Area Aportante Nival

Línea de Nieves = 1940 msnm (Según Peña y Vidal, de Tabla 3.1)
 Area (An) = 39 km² (Sobre Línea de Nieves)

Parámetros Morfométricos: Obtenidos de carta IGM para el área pluvial definida.

L = 15 km
 Lg = 10 km
 H = 940 m
 S = 0,41 %



SIMBOLOGIA	
	LIMITE DE LA CUENCA
	LINEA DE NIEVES PLUVIAL Y NIVAL
	ISOLINEAS DE PRECIPITACION MEDIA ANUAL (mm/año)
	ISOLINEAS DE PRECIPITACION MAXIMA DIARIA PARA PERIODOS DE RETORNO DE 10 AÑOS (mm.)
	CURVA DE NIVEL.

AC INGENIEROS CONSULTORES	PROYECTO: ANALISIS DE EVENTOS HIDROMETEOROLOGICOS EXTREMOS EN EL PAIS CAUDALES MAXIMOS Y MINIMOS		
	PLANO: CUENCA ESTERO POCURO EN EL SIFON	FECHA: MARZO/95	ESCALA: S/E

Datos Pluviométricos: Obtenidos de planos de isoyetas de acuerdo a lo indicado en los acápites 3.6 y 3.7.

Cota del punto de salida: 1000 msnm.

$P_{24}^{10} = 90 \text{ mm}$
 $PMA = 800 \text{ mm}$

Tiempo de Concentración: Estimado según se indica en acápite 3.5 para la cuenca pluvial.

$$tc = 0,95 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} = 1,55 \text{ hrs.}$$

b2) Aplicación del Método DGA-AC

La cuenca pertenece a la cuenca del río Aconcagua, en la V región, por la tanto el caudal medio diario máximo de período de retorno 10 años, se calcula con la ecuación (4.2):

$$Q_{10} = 5,42 \cdot 10^{-8} Ap^{0,915} (P_{24}^{10})^{3,432} = 24,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

Por otro lado, por pertenecer a la cuenca del río Aconcagua, tener una precipitación media anual mayor que 600 mm y ubicarse la estación a una cota igual o superior a 1000 msnm, la zona homogénea que le corresponde es la Lp. En la Tabla 4.33 se presenta la curva de frecuencias regional adimensional definida para esta zona (Tabla 4.9) y la curva de frecuencias de caudal medio diario máximo:

Tabla 4.33 Curva de Frecuencias de Caudal Medio Diario Máximo
Cuenca Pocuro en el Sifón. Método DGA-AC

T (años)	CURVA FRECUENCIAS REGIONAL ADIMENSIONAL Q_T/Q_{10} (adim)	CURVA DE FRECUENCIAS CAUDAL MEDIO DIARIO MAXIMO $Q_T = (Q_T/Q_{10}) * Q_{10}$ (m ³ /s)
2	0,16	3,9
5	0,52	12,7
10	1,00	24,4
20	1,69	41,2
25	1,97	48,1
50	3,08	75,2
75	3,91	95,4
100	4,59	112,0

El valor del factor de conversión (α) de caudales medios diarios a caudales instantáneos máximos que corresponde a esta zona homogénea es 1,67 (Tabla 4.24). En la Tabla 4.34 se presenta el cálculo de caudales instantáneos máximos.

Tabla 4.34 Curvas de Frecuencias Caudal Instantáneo Máximo
Cuenca Pocuro en el Sifón Método DGA-AC

T (años)	CURVA DE FRECUENCIAS CAUDAL INSTANTANEO MAXIMO $\alpha * Q_T$ (m ³ /s)
2	6,5
5	21,2
10	40,7
20	68,8
25	80,3
50	125,5
75	159,3
100	187,0

b3) Aplicación del Método de Verni y King Modificado

En la Tabla 4.35 se resume el cálculo de caudales instantáneos máximos por este método.

Tabla 4.35 Cálculo de Caudales Instantáneos Máximos
Cuenca Pocuro en el Sifón. Método Verni y King Modificado

T (años) (1)	C(10) (2)	C(T)/C(10) (3)	C(T) (4)	P_{24}^{10} (mm) (5)	CF_T (6)	P_{24}^T (mm) (7)	Q (m ³ /s) (8)
2	0,29	0,43	0,12	90	0,555	50,0	7,3
5	0,29	0,85	0,25	90	0,817	73,5	23,4
10	0,29	1,00	0,29	90	1,000	90,0	35,4
20	0,29	1,16	0,34	90	1,181	106,3	50,4
25	0,29	1,25	0,36	90	1,243	111,9	57,9
50	0,29	1,43	0,41	90	1,425	128,3	78,5
100	0,29	1,66	0,48	90	1,614	145,3	106,3

donde:

- Columna 1: Período de retorno
- Columna 2: Valor del coeficiente empírico de período de retorno 10 años obtenido de Tabla 4.25.
- Columna 3: Curva de frecuencias de coeficiente empírico referido al valor de período de retorno 10 años obtenido de Tabla 4.26.
- Columna 4: Curva de frecuencias de coeficiente empírico (Columna 2 * Columna 3).
- Columna 5: Precipitación diaria máxima de período de retorno 10 años, obtenida del Plano de isoyetas.
- Columna 6: Coeficiente de frecuencia de la cuenca, obtenido de estudio "Precipitaciones Máximas en 1, 2 y 3 Días", la cuenca se ubica en el Valle Aconcagua Interior.
- Columna 7: Precipitación diaria máxima de período de retorno T (Columna 5 * Columna 6)
- Columna 8: Curva de frecuencias de caudal instantáneo máximo, calculado para cada período de retorno con la ecuación (4.4).

b4) Aplicación de la Fórmula Racional

En la Tabla 4.36 se presenta el cálculo de caudales instantáneos máximos por este método.

Tabla 4.36 Cálculo de Caudales Instantáneos Máximos
Cuenca Pocuro en el Sifón. Fórmula Racional

T. (años) (1)	C(10) (2)	C(T)/C(10) (3)	C(T) (4)	P_{24}^{10} (mm) (5)	CF_T (6)	P_{24}^T (mm) (7)	t_c (hr) (8)	CD_{t_c} (9)	$I_{t_c}^T$ (mm/hr) (10)	$Q=C*I*A/3,6$ (m ³ /s) (11)
2	0,08	0,38	0,03	90	0,555	50,0	1,55	0,216	7,0	7,8
5	0,08	0,84	0,07	90	0,817	73,5	1,55	0,216	10,2	26,6
10	0,08	1,00	0,08	90	1,000	90,0	1,55	0,216	12,5	37,2
20	0,08	1,15	0,09	90	1,181	106,3	1,55	0,216	14,3	47,9
25	0,08	1,22	0,10	90	1,243	111,9	1,55	0,216	15,6	58,1
50	0,08	1,38	0,11	90	1,425	128,3	1,55	0,216	17,9	73,3
100	0,08	1,59	0,13	90	1,614	145,3	1,55	0,216	20,2	97,7

donde:

- Columna 1: Período de retorno
- Columna 2: Coeficiente empírico de período de retorno 10 años, obtenido de Tabla 4.27.
- Columna 3: Curva de frecuencias de coeficiente empírico referido al valor de período de retorno 10 años, obtenido de Tabla 4.26.
- Columna 4: Coeficiente empírico de período de retorno T años (Columna 2 * Columna 3).
- Columna 5: Precipitación diaria máxima de período de retorno 10 años, obtenido de los planos de isoyetas.
- Columna 6: Coeficiente de frecuencia de la cuenca, obtenido del estudio "Precipitaciones en 1, 2 y 3 Días".
- Columna 7: Curva de frecuencias de precipitación diaria máxima (Columna 5 * Columna 6).
- Columna 8: Tiempo de concentración de la cuenca.
- Columna 9: Coeficiente de duración para el tiempo de concentración de la cuenca, obtenido según se indica en acápite 38.
- Columna 10: Intensidad media de precipitación para una duración igual al tiempo de concentración y para un período de retorno T (Columna 7 * Columna 9)
- Columna 11: Curva de frecuencias de caudal instantáneo máximo, obtenida con ecuación (4.5) para cada período de retorno.

b5) Comentario

En este caso los resultados que se obtienen con el método DGA-AC son del mismo orden de magnitud que aquellas inferencias obtenidas con los otros métodos, hasta $T \approx 20$ años. Para períodos de retorno mayores se presentan diferencias más importantes entre ellos, aunque es el método DGA-AC el que entrega siempre valores más cercanos a los del análisis de frecuencia de la estación. En este caso sin embargo, las mejores estimaciones tienen errores del orden del 20%.

En la Tabla 4.37 se presenta una comparación de resultados entre los caudales obtenidos del análisis de frecuencias y los calculados con los 3 métodos expuestos.

Tabla 4.37 Comparación de Resultados de Estimación de Crecidas

Período Retorno (años)	Caudal Análisis Frecuencias (m ³ /s)	Caudal Fórmula Racional (m ³ /s)	Caudal Fórmula Verni y King (m ³ /s)	Caudal Método DGA-AC (m ³ /s)
5	40,1	26,6	23,4	21,2
10	64,4	37,2	35,4	40,7
20	89,8	47,9	50,4	68,8
50	128,1	73,3	78,5	125,5
100	152,0	97,7	106,3	187,0

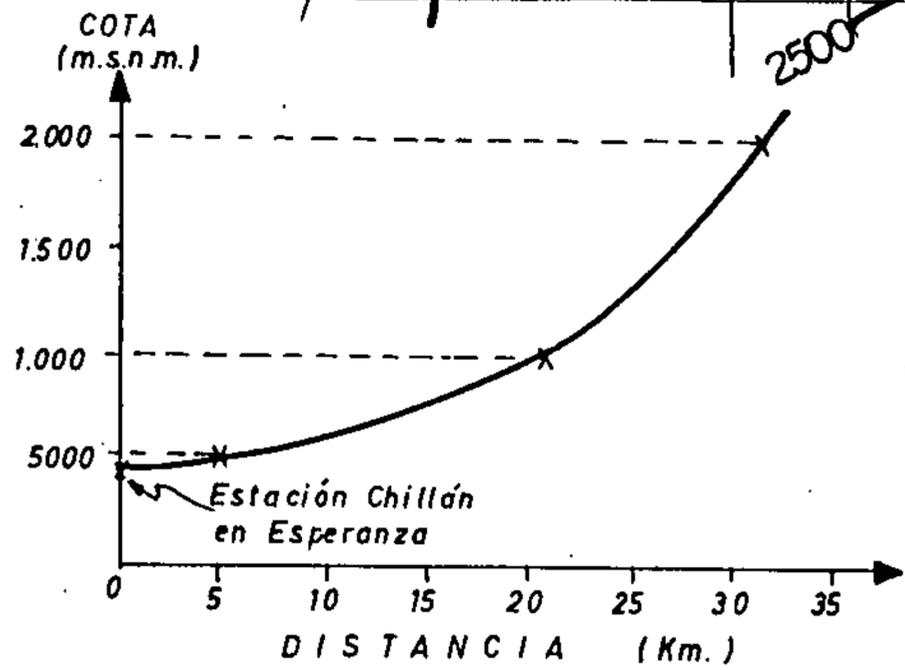
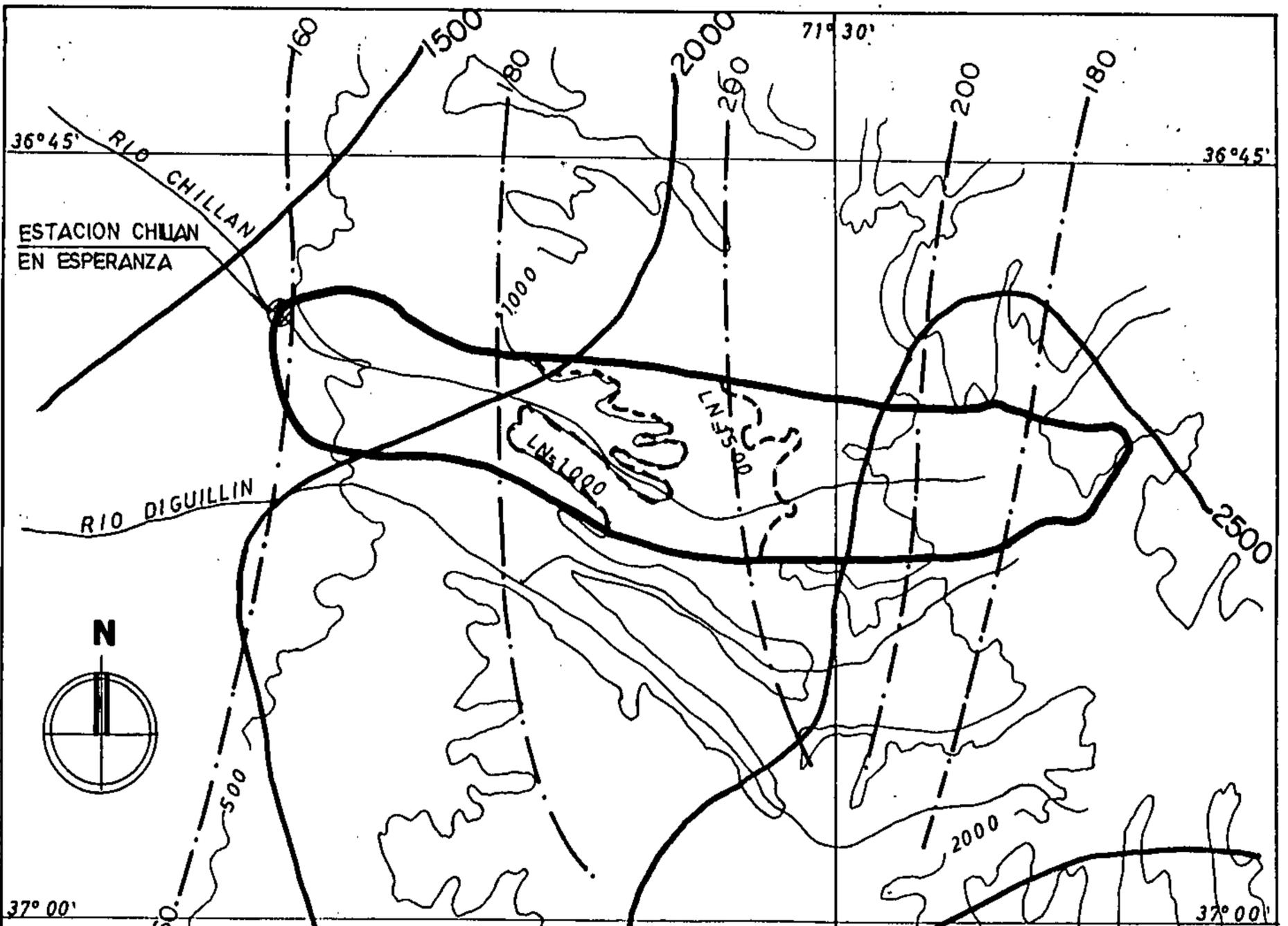
c) Chillán en Esperanza

La cuenca definida por la estación Chillán en Esperanza se presenta en la Figura 4.7. Esta situación se encuentra ubicada en los 36°47' de latitud sur a una altitud de 435 msnm.

c1) Datos Básicos

Area Aportante Pluvial

Latitud = 36°78'
 Línea de Nieves = 1500 msnm (Según Escobar y Vidal, de Tabla 3.1)
 Area (Ap) = 224 km² (Bajo Línea de Nieves)



SIMBOLOGIA

	LIMITE DE LA CUENCA
	LINEA DE NIEVES PLUVIAL Y NIVAL
	ISOLINEAS DE PRECIPITACION MEDIA ANUAL (mm./año)
	ISOLINEAS DE PRECIPITACION MAXIMA DIARIA PARA PERIODOS DE RETORNO DE 10 AÑOS (mm.)
	CURVA DE NIVEL

AC INGENIEROS CONSULTORES	PROYECTO: ANALISIS DE EVENTOS HIDROMETEOROLOGICOS EXTREMOS EN EL PAIS		
PLANO: CUENCA RIO CHILLAN EN ESPERANZA	CAUDALES MAXIMOS Y MINIMOS		
	FECHA: MARZO/95	ESCALA: S/E	FIGURA N° 4.7

Area Aportante Nival

Línea de Nieves = 1000 msnm (Según Peña y Vidal, de Tabla 3.1)
Area (An) = 161 km² (Sobre Línea de Nieves)

Parámetros Morfométricos. Obtenidos de carta IGM, para el área pluvial definida.

L = 32 km
Lg = 19 km
H = 1065 m
S = 0,10 %

Datos Pluviométricos. Obtenidos de planos de isoyetas de acuerdo a lo indicado en los acápites 3.6 y 3.7.

P₂₄¹⁰ = 175 mm
PMA = 2200 mm

Tiempo de Concentración. Estimado según se indica en el acápite 3.5 para la cuenca pluvial.

$$tc = 0,95 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} = 3,55 \text{ hrs.}$$

c2) Aplicación del Método DGA-AC

La cuenca pertenece a la cuenca del río Itata, en la VIII Región, por lo tanto el caudal medio diario máximo de período de retorno 10 años, se calcula con la ecuación (4.3):

$$Q_0 = 2 \cdot 10^{-3} Ap^{0,973} (P_{24}^{10})^{1,224} = 215,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

Por otro lado, por pertenecer a la cuenca del río Itata la zona homogénea que le corresponde es la Sp (Tabla 4.16). En la Tabla 4.38 se presenta la curva de frecuencias regional adimensional definida para esta zona (Tabla 4.16) y la curva de frecuencias de caudal medio diario máximo:

Tabla 4.38

Curva de Frecuencias Caudal Medio Diario Máximo
Cuenca Chillán en Esperanza. Método DGA-AC

T (años)	CURVA FRECUENCIAS REGIONAL ADIMENSIONAL Q_T/Q_{10} (adim)	CURVA DE FRECUENCIAS CAUDAL MEDIO DIARIO MAXIMO $Q_T = (Q_T/Q_{10}) * Q_{10}$ (m ³ /s)
2	0,54	116,3
5	0,82	176,6
10	1,00	215,4
20	1,18	254,2
25	1,23	264,9
50	1,41	303,7
75	1,51	325,3
100	1,58	340,3

El valor del factor de conversión (α) de caudales medios diarios máximos a caudales instantáneos máximos que corresponde a esta zona homogénea es 1,37 (Tabla 4.24). En la Tabla 4.39 se presenta el cálculo de caudales instantáneos máximos.

Tabla 4.39

Curva de Frecuencias Caudal Instantáneos Máximos
Cuenca Chillán en Esperanza. Método DGA-AC

T (años)	CURVA DE FRECUENCIAS CAUDAL INSTANTANEO MAXIMO $\alpha * Q_T$ (m ³ /s)
2	159,4
5	242,0
10	295,1
20	348,3
25	363,0
50	416,1
75	445,7
100	466,3

c3) Aplicación del Método de Verni y King Modificado

En la Tabla 4.40 se resume el cálculo de caudales instantáneos máximos por este método.

Tabla 4.40 Cálculo de Caudales Instantáneos Máximos
Cuenca Chillán en Esperanza. Método Verni y King Modificado

T (años) (1)	C(10) (2)	C(T)/C(10) (3)	C(T) (4)	P_{24}^{10} (mm) (5)	CF_T (6)	P_{24}^T (mm) (7)	Q (m ³ /s) (8)
2	0,79	0,92	0,73	175	0,654	114,5	187,6
5	0,79	0,98	0,77	175	0,864	151,2	282,3
10	0,79	1,00	0,79	175	1,000	175,0	345,3
20	0,79	1,00	0,79	175	1,128	197,4	400,9
25	0,79	1,00	0,79	175	1,169	204,6	419,1
50	0,79	1,01	0,80	175	1,293	226,3	479,6
100	0,79	1,01	0,80	175	1,417	248,0	537,3

donde:

- Columna 1: Período de retorno
- Columna 2: Valor del coeficiente empírico de período de retorno 10 años, obtenido de Tabla 4.25.
- Columna 3: Curva de frecuencias de coeficiente empírico referido al valor de período de retorno 10 años, obtenida de Tabla 4.26.
- Columna 4: Curva de frecuencias de coeficiente empírico (Columna 2 * Columna 3).
- Columna 5: Precipitación diaria máxima de período de retorno 10 años, obtenida de los planos de isoyetas.
- Columna 6: Coeficiente de frecuencia de la cuenca, obtenido de estudio "Precipitaciones Máximas en 1, 2 y 3 días".
- Columna 7: Precipitación diaria máxima de período de retorno T (Columna 5 * Columna 6)
- Columna 8: Curva de frecuencias de caudal instantáneo máximo, calculado para cada período de retorno con ecuación (4.4).

c4) Aplicación de la Fórmula Racional

En la Tabla 4.41 se presenta el cálculo de caudales instantáneos máximos por este método.

Tabla 4.41

Cálculo de Caudales Instantáneos Máximos
Cuenca Chillán en Esperanza. Fórmula Racional

T (años) (1)	C(10) (2)	C(T)/C(10) (3)	C(T) (4)	P ₂₄ ¹⁰ (mm) (5)	CF _T (6)	P ₂₄ ^T (mm) (7)	t _c (hr) (8)	CD _{t_c} (9)	I _{t_c} ^T (mm/hr) (10)	Q=C*I*A/3,6 (m ³ /s) (11)
2	0,36	0,91	0,33	175	0,654	114,5	3,55	0,338	10,9	223,8
5	0,36	0,99	0,36	175	0,864	151,2	3,55	0,338	14,4	322,6
10	0,36	1,00	0,36	175	1,000	175,0	3,55	0,338	16,7	374,1
20	0,36	1,01	0,36	175	1,128	197,4	3,55	0,338	18,8	421,1
25	0,36	1,02	0,37	175	1,169	204,6	3,55	0,338	19,5	448,9
50	0,36	1,02	0,37	175	1,293	226,3	3,55	0,338	21,5	495,0
100	0,36	1,03	0,37	175	1,417	248,0	3,55	0,338	23,6	543,3

donde:

- Columna 1: Período de retorno
- Columna 2: Coeficiente empírico de período de retorno 10 años, obtenido de la Tabla 4.27.
- Columna 3: Curva de frecuencias de coeficiente empírico referido al valor de período de retorno 10 años, obtenido de Tabla 4.26.
- Columna 4: Coeficiente empírico de período de retorno T años (Columna 2 * Columna 3).
- Columna 5: Precipitación diaria máxima de período de retorno 10 años, obtenida de planos de isoyetas.
- Columna 6: Coeficiente de frecuencia de la cuenca, obtenido del estudio precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días".
- Columna 7: Curva de frecuencias de precipitación diaria máxima (Columna 5 * Columna 6).
- Columna 8: Tiempo de concentración de la cuenca
- Columna 9: Coeficiente de duración para el tiempo de concentración de la cuenca, obtenido según se indica en acápite 3.8.
- Columna 10: Intensidad media de precipitación para una duración igual al tiempo de concentración y para un período de retorno T (Columna 7 * Columna 9/Columna 8)
- Columna 11: Curva de frecuencias de caudal instantáneo máximo, obtenida con ecuación (4.5) para cada período de retorno.

c5) Comentario

Para períodos de retorno inferiores a 10 años con el método de Verni y King modificado se obtienen inferencias, que al compararse con las del análisis de frecuencias de los registros, resultan con menores errores. Sin embargo, al aumentar

el período de retorno, las diferencias hechas con el método DGA-AC resultan con menores errores en comparación con los otros métodos. Estos errores disminuyen a medida que aumenta el período de retorno.

En la Tabla 4.42 se presenta una comparación de resultados entre los caudales obtenidos del análisis de frecuencias y los calculados con los 3 métodos expuestos.

Tabla 4.42 Comparación de Resultados de Estimación de Crecidas

Período Retorno (años)	Caudal Análisis Frecuencias (m ³ /s)	Caudal Fórmula Racional (m ³ /s)	Caudal Fórmula Verni y King (m ³ /s)	Caudal Método DGA-AC (m ³ /s)
5	311,5	322,6	282,3	242,0
10	353,2	374,1	345,3	295,1
20	387,6	421,1	400,9	348,3
50	426,3	495,0	479,6	416,1
100	452,1	543,3	537,3	466,3

4.2 ESTIMACION DE HIDROGRAMAS DE CRECIDAS

4.2.1 Hidrograma Unitario Sintético Tipo Linsley

a) Descripción del Método

De las relaciones precipitación-escorrentía existentes para estimar hidrogramas de crecidas en cuencas sin control, uno de los procedimientos más utilizado en nuestro país es el hidrograma unitario sintético.

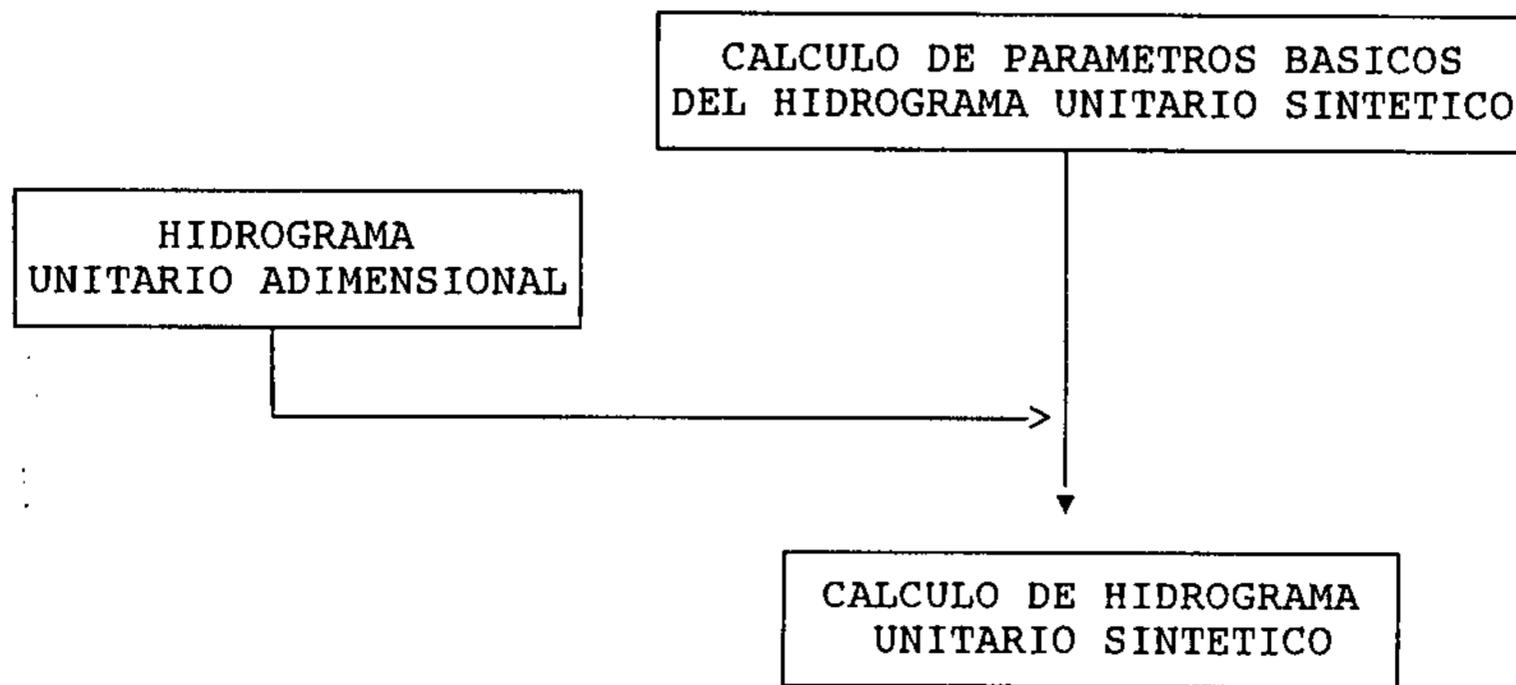
Benítez y Arteaga en 1985, basándose en el método de Linsley, propusieron las relaciones básicas que permiten estimar los parámetros que determinan un hidrograma unitario sintético, para cuencas ubicadas entre las hoyas del Aconcagua y el Chamiza.

En el estudio desarrollado para elaborar el presente Manual, se amplió la base de datos de dichos autores a un total de 61 estaciones ubicadas entre las Regiones III^a y X^a, determinándose nuevas relaciones para el cálculo de hidrogramas unitarios sintéticos.

La metodología planteada sobre la base del estudio indicado, es válida para cuencas pluviales o pluvio-nivales sin control fluviométrico, ubicadas entre la IIIª y Xª Región del país y con áreas comprendidas entre 10 y 4.500 km².

El procedimiento de cálculo se ilustra en el diagrama presentado en la Figura 4.8.

Fig. 4.8 Esquema de Cálculo de Hidrogramas Unitarios Sintéticos



b) **Determinación de Parámetros Básicos**

El método del hidrograma unitario sintético tipo Linsley, definido para una precipitación efectiva de duración igual a 0,18 veces el tiempo al peak, ($t_u = t_p/5,5$) y magnitud igual a 1 mm, se basa en la determinación de los parámetros tiempo al peak (t_p), caudal peak (q_p) y tiempo base (t_b) del hidrograma unitario de la cuenca.

Cuando el valor de t_u obtenido no sea un valor conveniente puede ser modificado tomando en cuenta las siguientes recomendaciones:

- 1º La corrección del valor de t_u , o sea t_R , no deberá ser superior al 50% de t_u .
- 2º Si el valor corregido queda dentro del intervalo

$$t_u - 10\% < t_R < t_u + 10\%$$

el hidrograma unitario no se modifica.

3° Si el valor corregido queda fuera del intervalo anterior, se modifica t_p en la forma:

$$t_{pR} = t_p + 0,25 (t_R - t_U)$$

Para el cálculo de estos parámetros, el país se ha dividido en 3 grandes zonas ; la Zona I que incluye desde la IIIª a la VIª Región, la Zona II que corresponde a la VII Región y la Zona III que abarca desde la VIIIª a la Xª Región.

Las relaciones que permiten calcular estos parámetros son las siguientes.

- Zona I (Regiones IIIª a VIª)

$$t_p = 0,323 (L \cdot Lg / S^{1/2})^{0,422} \quad (hr) \quad (4.6)$$

$$t_B = 5,377 t_p^{0,805} \quad (hr) \quad (4.7)$$

$$q_p = 144,141 t_p^{-0,796} \quad (lt / s / mm / km^2) \quad (4.8)$$

- Zona II (VII Región)

$$t_p = 0,584 (L \cdot Lg / S^{1/2})^{0,327} \quad (hr) \quad (4.9)$$

$$t_B = 1,822 t_p^{1,412} \quad (hr) \quad (4.10)$$

$$q_p = 522,514 t_p^{-1,511} \quad (lt / s / mm / km^2) \quad (4.11)$$

- Zona III (Regiones VIIIª a Xª)

$$t_p = 1,351 (L \cdot Lg / S^{1/2})^{0,237} \quad (hr) \quad (4.12)$$

$$t_B = 5,428 t_p^{0,717} \quad (hr) \quad (4.13)$$

$$q_p = 172,775 t_p^{-0,835} \quad (lt / s / mm / km^2) \quad (4.14)$$

Se observa que la Zona I definida por Benítez y Arteaga (1985) se ha separado en dos por lo que los parámetros resultan distintos a los obtenidos por estos autores. Las expresiones para las Regiones VIII^a, IX^a y X^a son semejantes a la Zona II señalada por Benítez y Arteaga.

c) **Determinación de Hidrograma Unitario Sintético**

Para definir la forma del hidrograma unitario se recomienda el uso de un hidrograma unitario adimensional de la Tabla 4.43. En dicha tabla se indican los valores del caudal en función del tiempo, referidos al caudal peak y al tiempo al peak, respectivamente. El hidrograma así determinado debe verificarse que corresponda a un hidrograma de volumen unitario. Si esto no ocurre, se sugiere corregir los valores en forma proporcional a la diferencia de volúmenes detectados.

Tabla 4.43 Coeficientes de Distribución para el Hidrograma Unitario Sintético

Razón t/t_p	Razón q/q_p
0	0
0,30	0,2
0,50	0,4
0,60	0,6
0,75	0,8
1,00	1,0
1,30	0,8
1,50	0,6
1,80	0,4
2,30	0,2
2,70	0,1

4.2.2 Hidrograma Unitario Sintético Tipo Gray

a) **Descripción del Método**

Esta metodología corresponde a la propuesta por Gray (Bras, 1990), ajustada a valores de hidrogramas unitarios obtenidos en el país para 61 estaciones ubicadas entre la III^a y X^a Región, al igual que el hidrograma unitario sintético tipo Linsley descrito precedentemente.

Su campo de aplicación abarca cuencas sin control fluviométrico de régimen hidrológico pluvial o pluvio-nival, con áreas pluviales entre 10 y 4.500 km² y ubicadas entre la III^a y X^a Región de Chile.

El método de Gray supone que el hidrograma unitario sintético tiene la forma de la función de densidad de probabilidades tipo Gamma que conceptualmente proviene de suponer n embalses lineales en serie según lo indicado por Nash (Chow, 1964), la cual se ha parametrizado en función del tiempo al peak (tp) del hidrograma unitario. Dicho tiempo a su vez depende de las características morfométricas de la cuenca. La ecuación básica del método de Gray, establece que el parámetro adimensional tp/γ depende del tiempo al peak, expresado en minutos, según lo siguiente:

$$\frac{tp}{\gamma} = \frac{1}{\frac{2,676}{tp} + 0,0139} \quad (4.15)$$

Para la determinación del hidrograma unitario sólo es necesario calcular el tiempo al peak, ya que su forma queda completamente definida por el conjunto de relaciones que plantea el autor del método.

b) Determinación de Parámetros Básicos

El parámetro básico a determinar es el tiempo al peak, para lo cual se utiliza la siguiente expresión derivada para cuencas ubicadas entre la III^a y X^a Región del país.

$$\frac{tp}{\gamma} = 24,48 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,155} \quad (4.16)$$

donde:

- tp : tiempo al peak del hidrograma unitario, expresado en minutos
- γ : parámetro
- L : Longitud del cauce principal, en km
- S : Pendiente media de la cuenca, en o/1

El tiempo al peak se obtiene de resolver simultáneamente las ecuaciones (4.15) y (4.16). De este sistema se obtiene además al valor del parámetro γ . Las ecuaciones resultantes son las siguientes:

$$t_p = \frac{192,5}{2,94 \cdot (\sqrt{S} / L)^{0,155} - 1} \quad (4.17)$$

$$\gamma = \frac{2,68}{1 - 0,34 \cdot (L / \sqrt{S})^{0,155}} \quad (4.18)$$

c) Determinación del Hidrograma Unitario Sintético

En este método se considera que el caudal se distribuye según una distribución Gamma, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q_{t/tp} = \frac{25 \gamma^q e^{-\gamma \frac{t}{tp}} \left(\frac{t}{tp} \right)^{q-1}}{\Gamma(q)} \quad (4.19)$$

$$q = \gamma + 1 \quad (4.20)$$

$$\Gamma(q) = \int_0^{\infty} e^{-u} u^{q-1} du \quad (4.21)$$

$$\Gamma(q) = (q-1)! \quad q \text{ entero}$$

donde:

- q : Parámetro adimensional
- $\Gamma(q)$: Función Gamma evaluada para el valor de q
- $Q_{t/tp}$: Ordenada del hidrograma unitario expresada como porcentaje de volumen del hidrograma para un intervalo de tiempo igual a $0,25t_p$ y correspondiente al instante t/tp .

Alternativamente a la resolución de la anterior ecuación, el hidrograma unitario puede determinarse calculando el valor de $Q_{t/tp}$ de la Tabla 4.44, en donde, a modo de referencia, se presenta tabulada la ecuación (4.19) para valores de γ menores o iguales a 10.

Tabla 4.44 Hidrograma Adimensional $Q_{t/tp}$ para Diferentes Valores del Parámetro γ

t/tp	$\gamma=2.0$	$\gamma=2.5$	$\gamma=3.0$	$\gamma=3.5$	$\gamma=4.0$	$\gamma=4.5$	$\gamma=5.0$	$\gamma=5.5$	$\gamma=6.0$	$\gamma=7.0$	$\gamma=8.0$	$\gamma=9.0$	$\gamma=10.0$
0,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,125	1,2	0,8	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
0,375	6,6	6,3	5,8	5,2	4,7	4,2	3,7	3,2	2,8	2,2	1,6	1,2	0,9
0,625	11,2	12,0	12,6	13,0	13,3	13,6	13,6	13,6	13,5	13,4	13,1	12,6	12,1
0,875	13,3	14,9	16,4	17,7	18,9	20,0	21,0	22,0	22,9	24,6	26,1	27,5	28,7
1,000	(13,5)	(15,3)	(16,8)	(18,2)	(19,5)	(20,8)	(21,9)	(23,0)	(24,1)	(26,1)	(27,9)	(29,6)	(31,3)
1,125	13,4	15,0	16,5	17,8	19,0	20,1	21,1	22,1	23,1	24,8	26,4	27,8	29,1
1,375	12,1	13,3	14,2	14,9	15,6	16,1	16,6	16,9	17,2	17,6	17,8	17,8	17,8
1,625	10,3	10,7	11,1	11,2	11,2	11,1	10,9	10,7	10,5	9,8	9,1	8,4	7,8
1,875	8,3	8,2	8,0	7,7	7,3	6,8	6,4	6,0	5,5	4,6	3,9	3,2	2,7
2,125	6,5	6,0	5,5	5,0	4,4	3,9	3,4	3,0	2,6	1,9	1,4	1,0	0,8
2,375	4,9	4,3	3,6	3,1	2,5	2,1	1,7	1,4	1,1	0,7	0,5	0,3	0,2
2,625	3,6	2,9	2,3	1,8	1,4	1,0	0,8	0,6	0,5	0,3	0,1	0,1	
2,875	2,6	2,0	1,4	1,0	0,8	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1			
3,125	1,9	1,3	0,9	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1					
3,375	1,3	0,9	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1						
3,625	1,0	0,6	0,3	0,2	0,1								
3,875	0,6	0,3	0,2	0,1									
4,125	0,4	0,2	0,1	0,1									
4,375	0,3	0,1	0,1										
4,625	0,2	0,1											
4,875	0,1	0,1											
5,125	0,1												
5,375	0,1												
Suma	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

* Suma : No considera valor de $t/tp = 1,000$

Finalmente, las ordenadas del hidrograma unitario definido para un tiempo unitario igual a $t_p/5,5$ se obtiene resolviendo la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{Q_{t/tp} \cdot P_{ef} \cdot A}{360 \cdot 0,25 \cdot t_p} \quad (4.22)$$

donde:

- tp : tiempo al peak en horas
- A : Area de la cuenca en km²
- P_{ef} : Precipitación efectiva unitaria en mm (1 mm)
- Q : Caudal del hidrograma unitario, en m³/s

4.2.3 Determinación del Monto de la Precipitación Efectiva por el Método de la Curva Número

Una de las variables básicas que interviene en el método del hidrograma unitario es la precipitación efectiva.

Para estimar el monto de esta precipitación en el presente Manual se ha desarrollado el método de la curva número de la manera que se explica a continuación, sin perjuicio que se apliquen otros métodos que puedan considerarse complementarios o alternativos como es el caso del índice Φ , el análisis regional de Vargas y Peluchonneau (1990), curvas de infiltración u otros.

Este método consiste en determinar en primer lugar, el valor de la curva número correspondiente a la cuenca, de acuerdo a las siguientes expresiones que dependen de la latitud del centro de gravedad de la cuenca (Lat , expresada en grados):

$$CN = 11,9 + 73,7 \log(Lat - 25^\circ) \quad \textit{tendencia media superior} \quad (4.23)$$

$$CN = 29,9 + 73,7 \log(Lat - 25^\circ) \quad \textit{envolvente superior} \quad (4.24)$$

La curva envolvente se refiere a la que maximiza los montos de precipitación efectiva. En este caso se recomienda limitar superiormente el valor de la curva número a $CN = 98$.

El monto de precipitación efectiva se obtiene a partir de la siguiente relación:

$$P_{efectiva} = (P - 0,2S)^2 / (P + 0,8S) \quad P_{ef} \text{ en mm} \quad (4.25)$$

donde P es la precipitación media que cae sobre la cuenca y S corresponde a la retención potencial máxima que se obtiene a base de la curva número seleccionada según la expresión siguiente:

$$CN = \frac{25 \cdot 400}{254 + S} \quad S \text{ en mm} \quad (4.26)$$

4.2.4 Recomendaciones de Uso de los Métodos

De acuerdo con lo señalado anteriormente, los métodos presentados para la determinación de hidrogramas unitarios sintéticos son aplicables a cuencas sin control fluviométrico ubicadas entre la III^a y X^a Región, con áreas pluviales comprendidas entre 10 y 4500 km², sin lagos u obras de regulación que puedan alterar significativamente la onda de la crecida y con sólo un cauce principal.

Como regla general, se recomienda el uso de ambos métodos con el fin de poder contrastar y comparar los resultados obtenidos antes de decidir la elección del hidrograma de diseño.

Para la determinación de la precipitación efectiva que interviene como dato de entrada en ambos métodos, hay que señalar que existen varias alternativas en la literatura, por ejemplo el método del índice Φ , el método de Horton, el método HEC y el de Linsley y Crawford (Peña 1987). La elección de cualquiera de ellas y su distribución temporal dependerá en definitiva de la experiencia del ingeniero especialista.

En el caso de utilizar el método de la Curva Número presentada en el Manual, para estimar la precipitación efectiva de la tormenta de diseño se recomienda el uso de la curva envolvente que corresponde a un escenario más desfavorable y por lo tanto entrega resultados conservadores desde el punto de vista de los máximos caudales a esperar.

4.2.5 Ejemplos de Aplicación

Se presenta a continuación la aplicación de estos métodos para las cuencas de las estaciones Manflas en Vertedero, Pocuro en el Sifón y Chillán en Esperanza.

- a) Manflas en Vertedero
- a1) Hidrograma Unitario Tipo Linsley

La cuenca Río Manflas en Vertedero, está ubicada en la III^a Región a una latitud de 28°04' sur, por lo que se deben utilizar los parámetros del hidrograma unitario sintético deducidos para la Zona I. Estos parámetros corresponden a los indicados en 4.1.5.

Peluchonneau Oscar, 1990 "Determinación de la precipitación efectiva de una tormenta usando información regional" Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

Peña H. 1987. "El Papel de la Infiltración en el Cálculo de Crecidas". Revista de La Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica Vol 2, N°1.

En este ejemplo se considera una lluvia de diseño con período de retorno 50 años, de intensidad constante y duración igual al tiempo de concentración de la cuenca. Bajo estos supuestos y según lo indicado en los acápites 3.6 y 3.8 se obtienen las siguientes variables de entrada básicas:

$$\begin{aligned}
 P_{24}^{50} &= 69.6 \text{ (mm)} \\
 CD &= 0.47 \\
 t_c &= 5.3 \text{ (hr)} \\
 i &= 6.2 \text{ (mm/hr)}
 \end{aligned}$$

$$P_{5.3}^{50} = 32.2$$

Para el cálculo de la precipitación efectiva se utiliza el método de la Curva Número desarrollado para el país, utilizando la envolvente superior, de acuerdo a lo señalado en el acápite 4.2.3. De acuerdo con ello se obtienen los siguientes resultados:

$$\begin{aligned}
 CN &= 66 \\
 S &= 132.2 \text{ (mm)} \rightarrow 130.8 \\
 0.2S &= 26.4 \text{ (mm)} \rightarrow 26.2 \\
 P_{5.3}^{50} &= 32.7 \text{ (mm)} \quad \checkmark \\
 P_{\text{efectiva}} &= 0.3 \text{ (mm)} \quad 0.31 \\
 i_{\text{efectiva}} &= 0.057 \text{ (mm/hr)} \rightarrow 0.58
 \end{aligned}$$

Ocupando las relaciones desarrolladas para la Zona I, según lo indicado en el Punto 4.2.1, resultan los siguientes valores para los parámetros que definen el hidrograma unitario sintético:

$$\begin{aligned}
 t_p &= 6.7 \text{ (hr)} \\
 t_B &= 25.0 \text{ (hr)} \\
 q_p &= 31.6 \text{ (l/s/km}^2\text{/mm)}
 \end{aligned}$$

Considerando lo anterior, el tiempo unitario del hidrograma ($t_u = t_p/5.5$) resulta igual a 1.2 horas. Por otro lado, el tiempo de duración la lluvia de diseño es igual a 5.3 horas. Luego para evaluar la crecida asociada a esta tormenta es necesario superponer cuatro hidrogramas unitarios de tiempo unitario 1.33 hrs ($5.3 \text{ hrs}/4$), desfasados en este mismo tiempo. Considerando que los hidrogramas unitarios de $t_u \pm 10\%$ no varían significativamente, se acepta que el hidrograma de $t_u = 1.2$ horas es el mismo que el de 1.33 hrs. Por lo tanto, la crecida de diseño resulta de la superposición de cuatro hidrogramas de 1.2 horas desfasados en 1.33 hrs, multiplicados por el monto de precipitación efectiva en cada intervalo ($0.3 \text{ mm}/4 = 0.075 \text{ mm}$).

Las ordenadas del hidrograma unitario se corrigen previamente multiplicando por la razón entre el volumen unitario y el volumen obtenido.

Finalmente, ponderando los resultados por el área de la cuenca se obtiene el hidrograma de escorrentía directa, tal como se muestra en la Tabla 4.45.

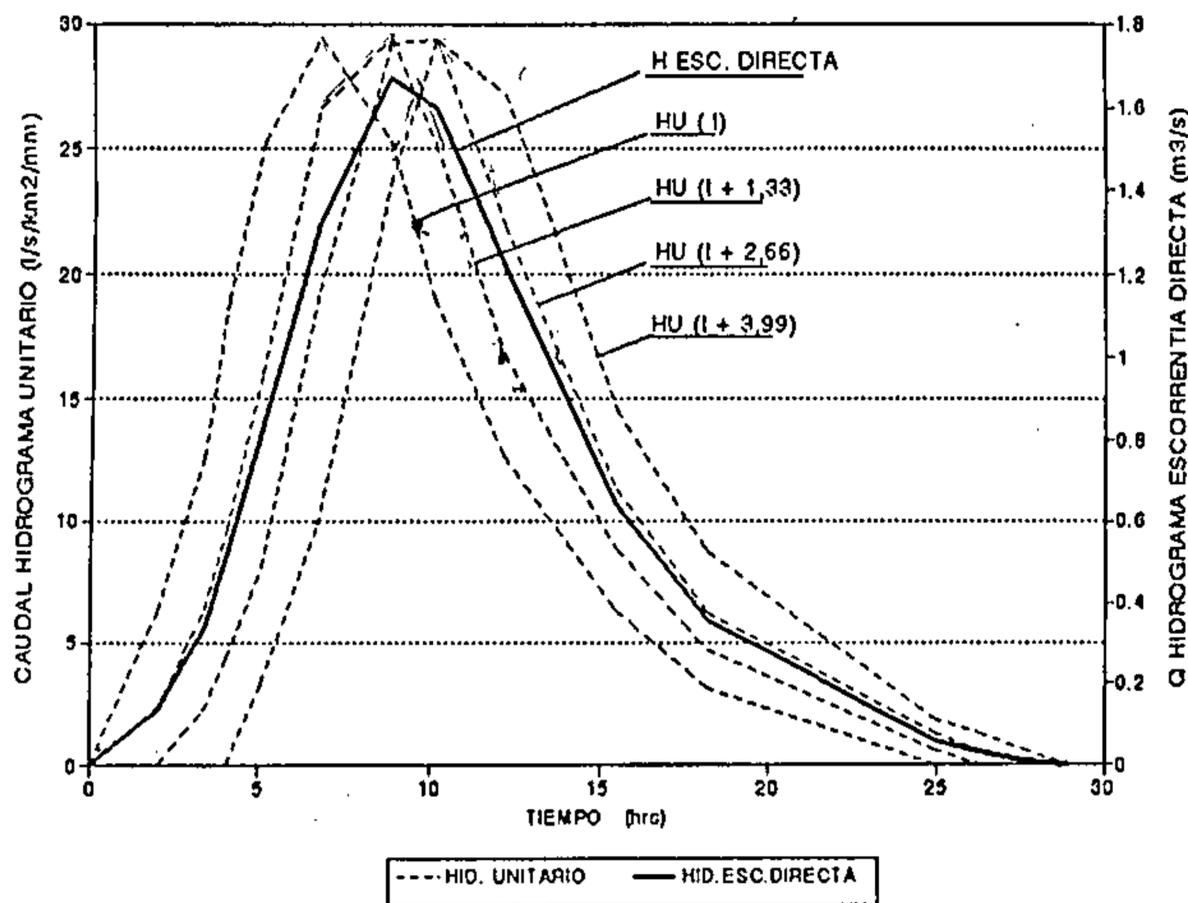
Tabla 4.45 Hidrograma Unitario Sintético e Hidrograma Escorrentía Directa en Manflas en Vertedero. Método Tipo Linsley

t (hr)	q (l/s/km ² /mm)	q _c (l/s/km ² /mm)	Q (m ³ /s)
0,0	0,00	0,00	0,00
2,0	6,32	6,39 [†]	0,13
3,4	12,64	12,79	0,33
4,0	18,95	19,18	0,51
5,0	25,27	25,58	0,82
6,7	31,59	31,97	1,36
8,8	25,27	25,57	1,67
10,1	19,95	19,18	1,60
12,1	12,64	12,79	1,22
15,5	6,32	6,39	0,64
18,2	3,16	3,19	0,36
25,0	0,00	0,00	0,06
26,3			0,03
27,6			0,01
28,9			0,00
Volumen	0,98	1,00	

Nota: El volumen corresponde a la integral del hidrograma unitario q(t) por lo que debe resultar igual a 1,00. En caso contrario las ordenadas deben corregirse dividiéndolas por el volumen resultante, lo que da origen a las ordenadas del hidrograma unitario corregido q_c(t).

En la Figura 4.9 se esquematiza la metodología de cálculo, en donde se indican con línea punteada los cuatro hidrogramas unitarios sintéticos de duración 1,2 horas, desfasados en 1,33 horas expresados en l/s/km²/mm y con línea continua el hidrograma de escorrentía directa resultante expresado en m³/s.

FIG 4.9 CALCULO HIDROGRAMA ESCORRENTIA DIRECTA
METODO LINSLEY. MANFLAS EN VERTEDERO



a2) Hidrograma Unitario Tipo Gray

En base a las relaciones propuestas en el acápite 4.2.2 y a los valores de los parámetros morfométricos consignados en 4.1.5, se obtienen los siguientes valores para los parámetros que definen el hidrograma unitario sintético tipo Gray:

$$\begin{aligned}
 t_p/\gamma &= 46,7 \\
 t_p &= 355,6 \text{ (min)} \\
 t_p &= 5,9 \text{ (hr)} \\
 \gamma &= 7,6
 \end{aligned}$$

De t_p , se obtiene el tiempo unitario $t_u=1,07$ (hr). Para el cálculo de la crecida asociada a la lluvia de diseño de duración 5,3 hrs se considera la superposición de cinco hidrogramas, calculados según la distribución de Q_{vtp} correspondiente al valor de γ . Aceptando que el hidrograma unitario de 1,07 horas es el mismo que el de 1,06 hrs (5,3 hrs/5), el hidrograma de escorrentía directa se determina desfasando los hidrogramas de $t_u = 1,07$ hrs en un tiempo de 1,06 hr y luego multiplicando por el producto entre el área de la cuenca (221 km²) y el monto de la precipitación efectiva en dicho intervalo, (0.3 mm/5 = 0,06 mm). Los resultados obtenidos aparecen resumidos en la Tabla 4.46.

Tabla 4.46 Hidrograma Unitario Sintético e Hidrograma de Escorrentía Directa en Manflas en Vertedero. Método Tipo Gray

t/t_p	Q_{vtp} $\gamma=7,6$	t (hr)	Q (m ³ /s)
0,000	0,0	0,0	0,00
0,125	0,0	0,7	0,00
0,375	1,8	2,2	0,11
0,625	13,2	3,7	0,88
0,875	25,5	5,2	2,20
1,000	27,2	5,9	2,83
1,125	25,7	6,7	3,14
1,375	17,7	8,1	3,20
1,625	9,4	9,6	2,86
1,875	4,2	11,1	1,88
2,125	1,6	12,6	1,02
2,375	0,0	14,1	0,47
		15,1	0,20
		16,2	0,09
		17,3	0,03
		18,3	0,00

a3) Comentario

Ambos hidrogramas tienen tiempos al peak similares, pero difieren en el caudal peak. Al comparar estos valores con el obtenido del análisis de frecuencias de la estación, para el período de retorno de 50 años que resultó igual a 3,4 m³/s, se concluye que ambos métodos entregan resultados razonables. Esta conclusión se basa también en las siguientes consideraciones: 1º- a estos valores se les debe sumar el caudal base; 2º- el caudal de período de retorno de 50 años no necesariamente coincide con el asociado a una precipitación del mismo período de retorno, aunque en la práctica cuando se usan relaciones precipitación-escorrentía este supuesto se da por un hecho.

b) Pocuro en el Sifón

b1) Hidrograma Unitario Tipo Linsley

La cuenca Estero Pocuro en Sifón, está ubicada en la Vª Región a una latitud de 32° 54' sur, por lo que se recomienda utilizar los parámetros del hidrograma

unitario sintético deducidos para la Zona II. Estos parámetros corresponden a los indicados en 4.1.5.

En este ejemplo se considera una lluvia de diseño con período de retorno 50 años, de intensidad constante y duración igual al tiempo de concentración de la cuenca. Bajo estos supuestos y según lo indicado en los acápites 3.6 y 3.8, se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} P_{24}^{50} &= 128,3 \text{ (mm)} \\ CD &= 0,216 \\ t_c &= 1,55 \text{ (hr)} \\ i &= 17,9 \text{ (mm/hr)} \end{aligned}$$

Para el cálculo de la precipitación efectiva se utiliza el método de la Curva Número desarrollado para el país, utilizando la envolvente superior de acuerdo a lo señalado en el acápite 4.2.3. Así se obtienen los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} CN &= 96 \\ S &= 10,6 \text{ (mm)} \\ 0,2S &= 2,1 \text{ (mm)} \\ P_{1,55}^{50} &= 27,7 \text{ (mm)} \\ P_{\text{efectiva}} &= 18,1 \text{ (mm)} \\ i_{\text{efectiva}} &= 11,7 \text{ (mm/hr)} \end{aligned}$$

Ocupando las relaciones desarrolladas para la Zona II según lo indicado en el punto 4.2.1 se obtienen los siguientes valores para los parámetros que definen el hidrograma unitario sintético:

$$\begin{aligned} t_p &= 3,6 \text{ (hr)} \\ t_B &= 15,0 \text{ (hr)} \\ q_p &= 52,3 \text{ (l/s/km}^2\text{/mm)} \end{aligned}$$

Considerando lo anterior, resulta un tiempo unitario ($t_u = t_p/5,5$) igual a 0,7 horas. Por otro lado, el tiempo de duración de la lluvia de diseño es igual a 1,55 horas. Luego para evaluar la crecida asociada a esta tormenta es necesario superponer dos hidrogramas unitarios de tiempo unitario 0,78 hrs (1,55 hrs/2) desfasados en este mismo tiempo. Considerando que los hidrogramas unitarios de $t_u \pm 10\%$ no varían significativamente, se acepta que el hidrograma de $t_u = 0,7$ horas es el mismo que el de 0,78 hrs. Por lo tanto, la crecida de diseño resulta de la superposición de dos hidrogramas de 0,7 horas desfasados en 0,78 hrs, y multiplicados por el monto de precipitación efectiva en dicho intervalo (18,1 mm/2 = 9,05 mm).

Las ordenadas del hidrograma unitario se corrigen previamente multiplicándolas por la razón entre el volumen unitario y el volumen obtenido.

Finalmente, ponderando los resultados por el área de la cuenca se obtiene el hidrograma de escorrentía directa, que se resume en la Tabla 4.47:

Tabla 4.47 Hidrograma Unitario Sintético e Hidrograma de Escorrentía Directa en Pocuro en el Sifón. Método Tipo Linsley

t (hr)	q (l/s/km ² /mm)	q _ε (l/s/km ² /mm)	Q (m ³ /s)
0,0	0,00	0,00	0,0
1,1	11,10	11,83	9,3
1,8	22,10	23,65	28,3
2,1	33,20	35,48	49,8
2,7	44,30	47,30	63,8
3,6	55,30	59,13	120,1
4,6	44,30	47,30	134,1
5,4	33,20	35,48	115,1
6,4	22,10	23,65	76,7
8,2	11,10	11,82	40,3
9,6	5,50	5,91	21,6
15,0	0,00	0,00	2,0
15,5			0,0
Volumen	0,89	1,00	

b2) Hidrograma Unitario Tipo Gray

En base a las relaciones propuestas en el acápite 4.2.2 y a los valores de los parámetros morfométricos consignados en 4.1.5 se obtienen los siguientes valores para los parámetros que definen el hidrograma unitario sintético tipo Gray:

$$\begin{aligned}
 t_p/\gamma &= 39,9 \\
 t_p &= 238,1 \text{ (min)} \\
 t_p &= 4,0 \text{ (hr)} \\
 \gamma &= 6,0
 \end{aligned}$$

A partir del valor de t_p , se obtiene el tiempo unitario $t_u = 0,73$ (hr). Para el cálculo de la crecida asociada a la lluvia de diseño se considera la superposición de

dos hidrogramas, calculados según la distribución de Q_{vtp} correspondiente al valor de γ . Aceptando que el hidrograma unitario de 0,73 hrs es el mismo que el de 0,78 hrs (1,55 hrs/2), el hidrograma de escorrentía directa se determina desfasando los hidrogramas de $t_u = 0,73$ hrs en un tiempo de 0,78 hr y multiplicando por el producto entre el área de la cuenca (134 km²) y el monto de la precipitación efectiva en dicho intervalo (18.1 mm/2 = 9,05 mm). Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 4.48.

Tabla 4.48 Hidrograma Unitario Sintético e Hidrograma de Escorrentía Directa en Estero Pocuro en el Sifón. Método Tipo Gray

t/t_p	Q_{vtp}	t (hr)	Q (m ³ /s)
0,000	0,0	0,0	0,0
0,125	0,0	0,5	0,0
0,375	2,8	1,5	11,5
0,625	13,6	2,5	62,9
0,875	22,9	3,5	128,6
1,000	24,1	4,0	148,1
1,125	23,1	4,5	154,9
1,375	17,2	5,5	129,6
1,625	10,4	6,5	86,6
1,875	5,5	7,6	49,2
2,125	2,6	8,6	24,7
2,375	0,5	9,6	11,2
2,625	0,2	10,6	4,9
2,875	0,1	11,6	2,1
3,125	0,0	12,6	0,9
		13,4	0,3

b3) Comentario

Los hidrogramas obtenidos por ambos métodos son similares en cuanto al tiempo al peak y al caudal peak.

Al comparar el caudal peak con el obtenido del análisis de frecuencias de la estación para un período de retorno de 50 años (128,1 m³/s), se concluye que ambos métodos entregan resultados razonables aunque más conservadores en el caso del método Tipo Gray. Considerando que a los caudales sintetizados se le debe agregar el flujo base y además que el caudal de período de retorno 50 años no debe coincidir

necesariamente con el caudal correspondiente a una precipitación del mismo período de retorno, en la práctica estos resultados pueden considerarse satisfactorios.

c) Chillán en Esperanza

c1) Hidrograma Unitario Tipo Linsley

La cuenca Chillán en Esperanza, está ubicada en la VIIIª Región a una latitud de 36° 47' sur, por lo que se recomienda utilizar los parámetros del hidrograma unitario sintético deducidos para la Zona III. Estos parámetros corresponden a los indicados en 4.1.5.

En este ejemplo se considera una lluvia de diseño con período de retorno 50 años, de intensidad constante y duración igual al tiempo de concentración de la cuenca. Bajo estos supuestos y según lo indicado en los acápites 3.6 y 3.8 se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} P_{24}^{50} &= 226,3 \text{ (mm)} \\ CD &= 0,338 \\ t_c &= 3,55 \text{ (hr)} \\ i &= 21,5 \text{ (mm/hr)} \end{aligned}$$

Para el cálculo de la precipitación efectiva se utiliza el método de la Curva Número desarrollado para el país. Utilizando la envolvente superior de acuerdo a lo señalado en el acápite 4.2.3, se obtienen los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} CN &= 98,0 \\ S &= 5,2 \text{ (mm)} \\ 0,2S &= 1,0 \text{ (mm)} \\ P_{3,5}^{50} &= 76,5 \text{ (mm)} \\ P_{\text{efectiva}} &= 70,6 \text{ (mm)} \\ i_{\text{efectiva}} &= 19,9 \text{ (mm/hr)} \end{aligned}$$

Ocupando las relaciones desarrolladas para la Zona II, según lo indicado en el punto 4.2.1 se obtienen los siguientes valores para los parámetros que definen el hidrograma unitario sintético:

$$\begin{aligned} t_p &= 7,4 \text{ (hr)} \\ t_B &= 22,8 \text{ (hr)} \\ q_p &= 31,3 \text{ (l/s/Km}^2\text{/mm)} \end{aligned}$$

Considerando lo anterior, resulta un tiempo unitario ($t_u = t_p/5,5$) igual a 1,3 horas. Por otro lado el tiempo de duración de la lluvia de diseño es igual a 3,6 horas. Luego, para evaluar la crecida asociada a esta tormenta es necesario superponer tres hidrogramas unitarios de tiempo unitario 1,2 hrs ($3,6 \text{ hrs}/3$) desfasados en este mismo tiempo. Considerando que los hidrogramas unitarios de $t_u \pm 10\%$ no varían significativamente, se acepta que el hidrograma de $t_u = 1,3$ horas es el mismo que el de 1,2 hrs. Por lo tanto, la crecida de diseño resulta de la superposición de tres hidrogramas de 1,3 horas desfasados en 1,2 hrs, y multiplicados por el monto de precipitación efectiva en dicho intervalo ($70,6 \text{ mm}/3 = 23,5 \text{ mm}$).

Las ordenadas del hidrograma unitario se corrigen previamente multiplicando por la razón entre el volumen unitario y el volumen obtenido.

Finalmente, ponderando por el área de la cuenca se obtiene el hidrograma de escorrentía directa, tal como se muestra en la Tabla 4.49.

Tabla 4.49 Hidrograma Unitario Sintético e Hidrograma de Escorrentía Directa en Chillán en Esperanza. Método Tipo Linsley

t (hr)	q (l/s/km ² /mm)	q _c (l/s/km ² /mm)	Q (m ³ /s)
0,0	0,00	0,00	0,0
2,2	6,26	5,95	46,1
3,7	12,52	11,91	119,1
4,4	18,77	17,86	175,6
5,6	25,04	23,82	268,2
7,4	31,30	29,77	404,4
9,6	25,04	23,82	422,0
11,1	18,78	17,86	358,0
13,3	12,52	11,91	239,8
17,0	6,26	5,95	124,4
20,0	3,13	2,98	66,0
22,8	0,00	0,00	19,9
24,1			6,7
Volumen	1,05	1,00	

c2) Hidrograma Unitario Tipo Gray

En base a las relaciones propuestas en el acápite 4.2.2 y a los parámetros morfométricos consignados en el 4.1.5 se obtienen los siguientes valores para los parámetros que definen el hidrograma unitario sintético tipo Gray:

$$t_p/\gamma = 50,1$$

$$t_p = 440,8 \text{ (min)}$$

$$\begin{aligned}
 t_p &= 7,3 \text{ (hr)} \\
 \gamma &= 8,8
 \end{aligned}$$

De t_p , se obtiene el tiempo unitario $t_u=1,33$ (hr). Para el cálculo de la crecida asociada a la lluvia de diseño se considera la superposición de tres hidrogramas, calculados según la distribución de Q_{vtp} correspondiente al valor de γ . Aceptando que el hidrograma unitario de 1,33 hrs es el mismo que el de 1,18 hrs (3,55 hrs/3), la crecida se determina desfasando en un tiempo de 1,3 hrs y multiplicando por el producto entre el área de la cuenca (224 km²) y el monto de la precipitación en dicho intervalo (70,6 mm/3 = 23,5 mm), con el objetivo de obtener el hidrograma de escorrentía directa, tal como se muestra en la Tabla 4.50.

Tabla 4.50 Hidrograma Unitario Sintético e Hidrograma de Escorrentía Directa
Río Chillán en Esperanza

t/t_p	Q_{vtp}	t (hr)	Q (m ³ /s)
0,000	0,0	0,0	0,0
0,125	0,0	0,9	0,0
0,375	1,3	2,8	13,8
0,625	12,8	4,6	149,8
0,875	27,4	6,4	429,5
1,000	29,5	7,3	553,2
1,125	27,7	8,3	624,5
1,375	18,0	10,1	556,9
1,625	8,6	11,9	346,1
1,875	3,4	13,8	169,0
2,125	1,1	15,6	67,7
2,375	0,3	17,4	22,7
2,625	0,1	19,3	6,8
2,875	0,0	21,1	1,8
		22,4	0,0

c3) Comentario

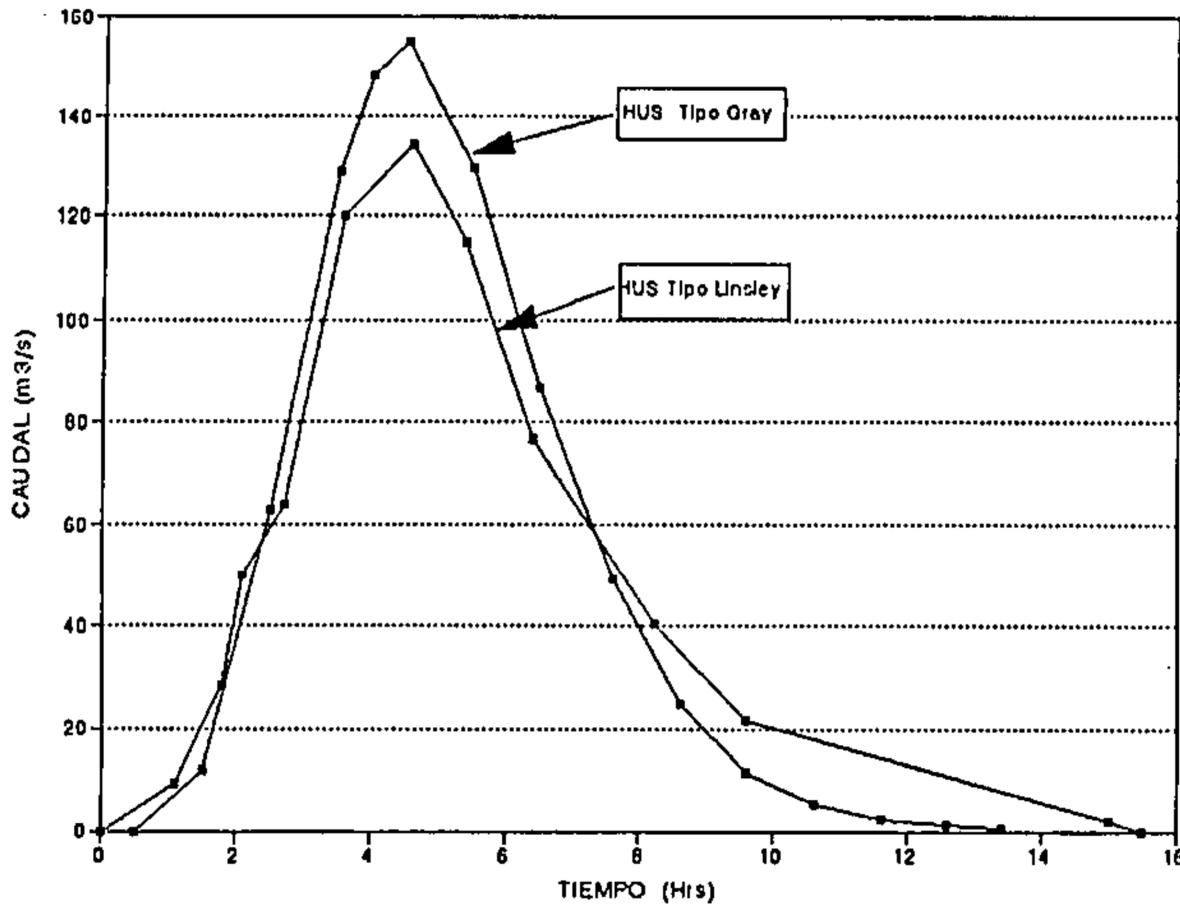
Al igual que en los casos anteriores se observa que el tiempo al peak entre ambos hidrogramas es similar. Sin embargo, se presentan diferencias más significativas en la estimación del caudal peak.

Si se comparan los caudales peak de los hidrogramas con el obtenido del análisis de frecuencias de la estación para un período de retorno de 50 años, que resultó igual a 426,3 m³/s, se concluye que el método que entrega resultados más parecidos con este valor es el del Hidrograma Unitario Tipo Linsley. El Hidrograma Unitario Tipo Gray, en este caso sobre estima en alrededor de un 50% el caudal peak comparado con el de análisis frecuencia.

d) Comentarios Generales

En la figura 4.10 se presenta a modo de ejemplo la comparación de los hidrogramas de escorrentía directa obtenidas para la cuenca del estero Pocuro en el Sifón. Se observa que el instante en que se produce el caudal máximo es en ambos casos muy semejante (lo mismo sucede en los otros ejemplos) aunque la magnitud del caudal máximo difiere en ~15%.

FIG 4.10 COMPARACION DE HIDROGRAMAS DE ESCORRENTIA DIRECTA. POCURO EN EL SIFON



5.

**METODOS DE ESTIMACION DE
CAUDALES INSTANTANEOS MAXIMOS
EN PERIODO DE DESHIELO**

5.1 METODO DGA-AC PARA CRECIDAS DE DESHIELO

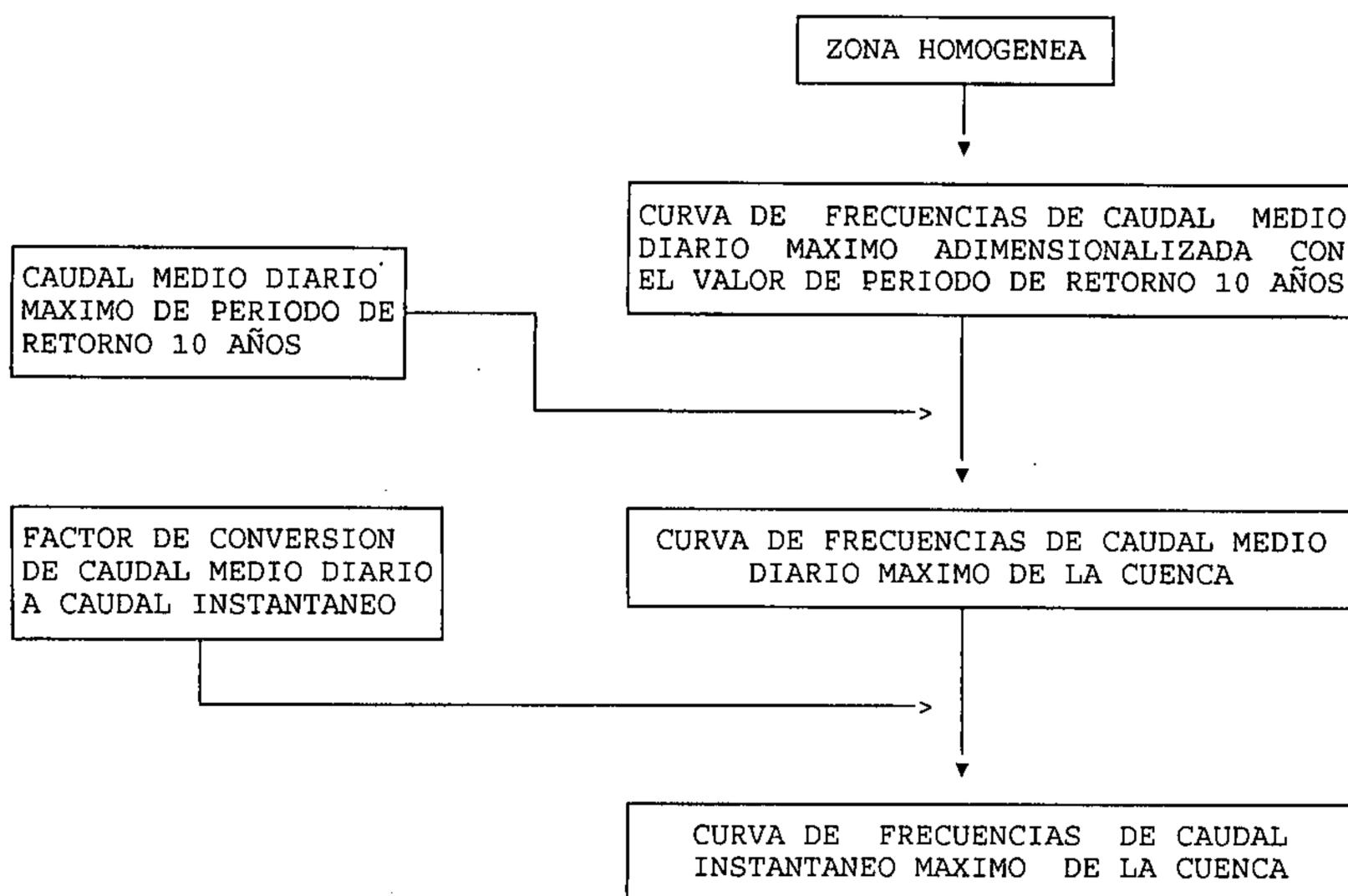
5.1.1 Descripción del Método

El método denominado DGA-AC para crecidas de deshielo, corresponde a un análisis regional de crecidas del período de deshielo, desarrollado en base a los análisis de frecuencias efectuados a las series de excedencia para el período nival de caudales medios diarios máximos y caudales instantáneos máximos, correspondientes a 234 estaciones de control existente en el país.

El método es aplicable en cuencas nivales o nivopluviales sin control fluviométrico, con áreas nivales comprendidas entre 50 y 6.000 km² y ubicadas entre la III^a y la VIII^a región del país. Es utilizable para estimar crecidas de deshielo de período de retorno no mayor a 100 años.

La metodología de cálculo se ilustra en el siguiente diagrama presentado en la Figura 5.1.

Fig. 5.1 Esquema de Cálculo Método DGA-AC para Caudales Instantáneos Máximos de Deshielo



5.1.2 Determinación del Caudal Medio Diario Máximo de Período de Retorno 10 Años

Para estimar el valor del caudal medio diario asociado al período de retorno de 10 años, se utiliza la siguiente ecuación.

$$Q_{10} = 1,81 \cdot 10^{-4} \cdot A_n (Lat - 26,2)^{3,392} \tag{5.1}$$

donde:

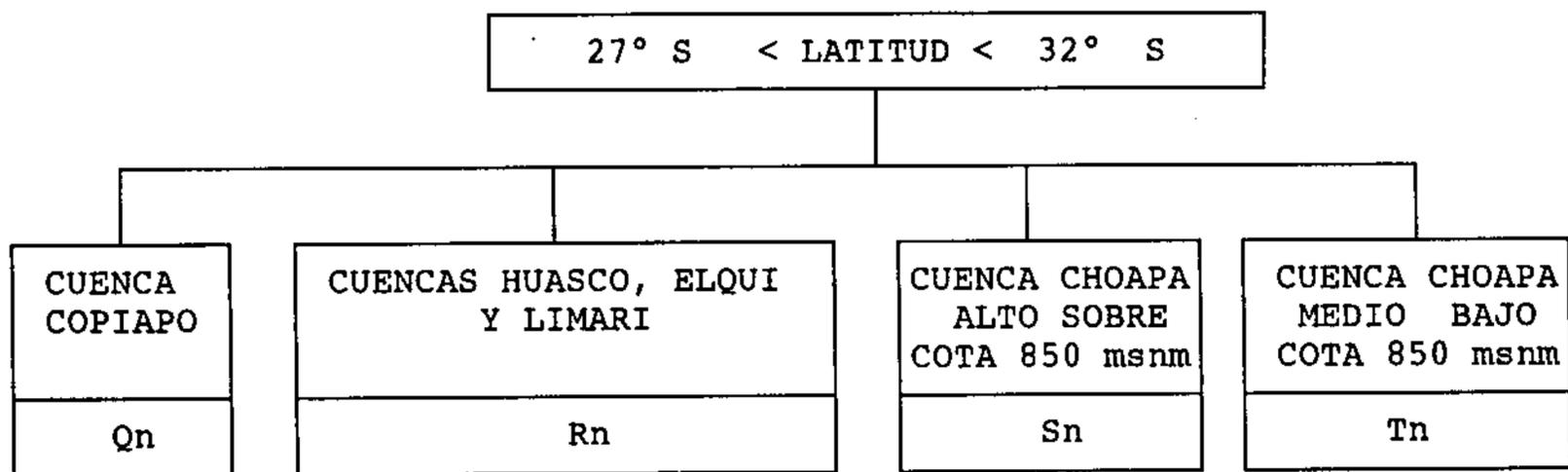
- Q_{10} : Caudal medio diario de período de retorno 10 años, en m³/s
- A_n : Area nival de la cuenca, en km²
- Lat : Latitud media de la cuenca, en grados

5.1.3 Determinación de Curva de Frecuencia Regional

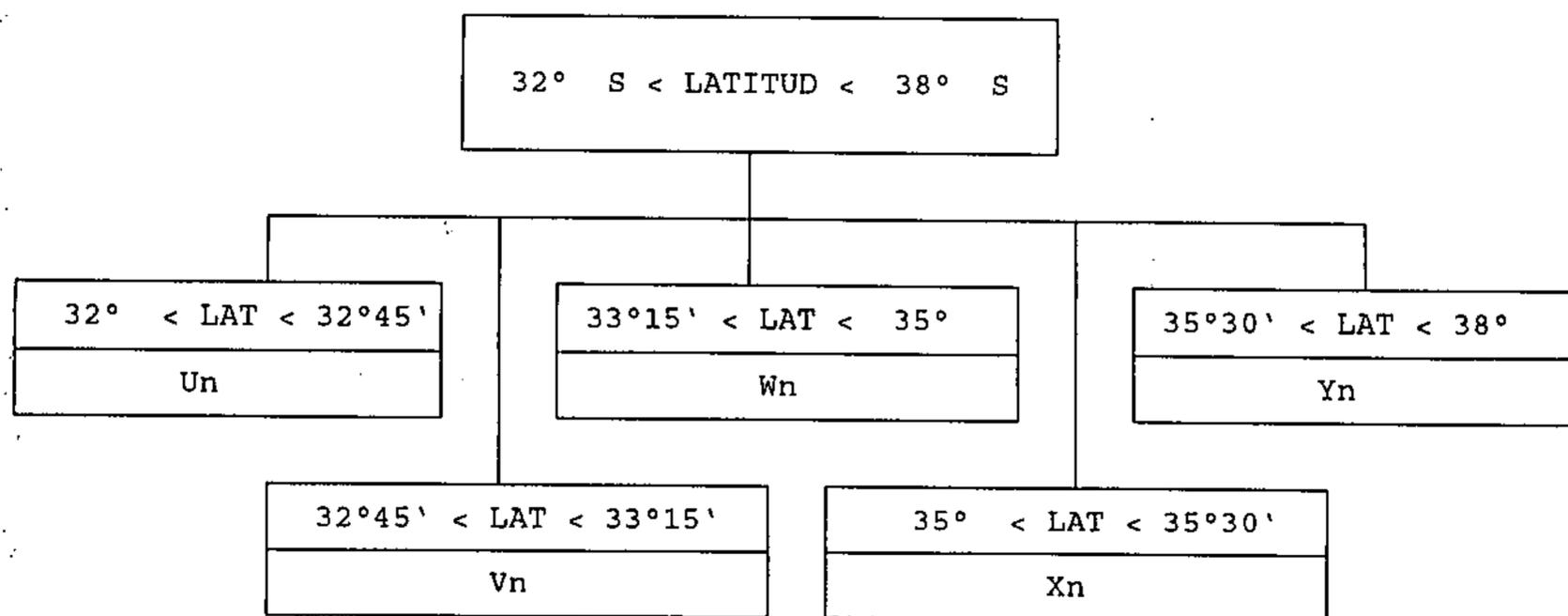
En primer lugar se debe ubicar la zona homogénea a la cual pertenece la cuenca en estudio, lo cual se puede realizar a partir del diagrama presentado en la Figura 5.2.

Fig. 5.2 Definición de Zonas Homogéneas para el Período de Deshielo

Cuencas Ubicadas Entre Lat 27°S y Lat 32°S



Cuencas Ubicadas Entre Lat 32°S y Lat 38°S



Una vez conocida la zona homogénea, a la que pertenece la cuenca, se debe seleccionar la curva de frecuencias adimensional de caudal medio diario máximo, referida al valor de período de retorno 10 años, Q_T/Q_{10} .

En las Tablas 5.1 a la 5.9 se presentan estas curvas de frecuencia adimensionales correspondientes a cada zona homogénea, consignándose además las envolventes superior e inferior de dichas curvas de frecuencia.

Tabla 5.1 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Qn Nival-LogNormal-C.Copiapó

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q (T) / Q (10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,41	0,50	0,33
5	0,73	0,79	0,68
10	1,00	1,00	1,00
20	1,29	1,37	1,21
25	1,40	1,50	1,29
50	1,73	1,94	1,51
75	1,95	2,23	1,65
100	2,11	2,45	1,75

Tabla 5.2 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Rn Nival-LogNormal-Latitud 28°-31°

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q (T) / Q (10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,24	0,38	0,16
5	0,61	0,72	0,53
10	1,00	1,00	1,00
20	1,51	1,69	1,31
25	1,70	1,97	1,42
50	2,41	3,05	1,79
75	2,91	3,86	2,02
100	3,30	4,52	2,20

Tabla 5.3 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Sn Nival-LogNormal-C.Choapa Alto

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q (T) / Q (10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,39	0,41	0,37
5	0,72	0,74	0,71
10	1,00	1,00	1,00
20	1,31	1,33	1,29
25	1,41	1,44	1,38
50	1,77	1,83	1,71
75	1,99	2,08	1,91
100	2,16	2,26	2,06

Tabla 5.4 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Tn Nival-LogNormal-C.Choapa Medio

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q (T) / Q (10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,21	0,23	0,19
5	0,59	0,60	0,57
10	1,00	1,00	1,00
20	1,55	1,59	1,52
25	1,76	1,83	1,71
50	2,54	2,69	2,43
75	3,09	3,32	2,93
100	3,52	3,82	3,32

Tabla 5.5 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Un Nival-Gamma-Latitud 32°00'-32°45'

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q(T) / Q(10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,30	0,37	0,25
5	0,70	0,74	0,66
10	1,00	1,00	1,00
20	1,30	1,34	1,26
25	1,42	1,48	1,36
50	1,74	1,84	1,62
75	1,92	2,06	1,76
100	2,01	2,17	1,84

Tabla 5.6 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Vn Nival-Gamma-Latitud 32°45'-33°15'

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q(T) / Q(10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,57	0,67	0,40
5	0,84	0,88	0,75
10	1,00	1,00	1,00
20	1,15	1,24	1,11
25	1,21	1,33	1,15
50	1,36	1,57	1,25
75	1,44	1,70	1,31
100	1,48	1,77	1,34

Tabla 5.7 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Wn Nival-Gamma-Latitud 33°15'-35°00'

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q(T) / Q(10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,65	0,77	0,57
5	0,87	0,92	0,83
10	1,00	1,00	1,00
20	1,12	1,15	1,07
25	1,16	1,20	1,10
50	1,27	1,35	1,16
75	1,33	1,43	1,20
100	1,36	1,47	1,21

Tabla 5.8 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Xn Nival-Gamma-Latitud 35°00'-35°30'

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q(T) / Q(10) :		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,56	0,67	0,48
5	0,83	0,88	0,79
10	1,00	1,00	1,00
20	1,16	1,20	1,11
25	1,22	1,27	1,15
50	1,37	1,46	1,25
75	1,45	1,57	1,31
100	1,50	1,62	1,33

Tabla 5.9 Curva de Frecuencia Regional Caudales Medios Diarios Máximos
Zona Homogénea Yn Nival-Gamma-Latitud 35°30'-38°00'

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q(T) / Q(10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,45	0,55	0,30
5	0,78	0,82	0,70
10	1,00	1,00	1,00
20	1,22	1,30	1,16
25	1,30	1,42	1,22
50	1,51	1,74	1,37
75	1,63	1,92	1,46
100	1,69	2,01	1,50

Para obtener el caudal medio diario máximo de deshielo asociado a cualquier período de retorno que se desee, se debe multiplicar el valor de $Q(T)/Q(10)$ consignado en la Tabla que corresponde a la zona homogénea a la cual pertenece la cuenca en estudio, por el caudal medio diario máximo de período de retorno 10 años, calculado en base a la ecuación 5.1.

5.1.4 Determinación de la Curva de Frecuencia del Caudal Instantáneo Máximo

El factor de conversión β que permite pasar del caudal medio diario máximo al caudal instantáneo máximo es variable según la zona homogénea en que se ubique la cuenca.

En la Tabla 5.10 se presentan los valores de β para cada una de las zonas homogéneas. Una vez obtenido el caudal medio diario máximo según el procedimiento explicado en el acápite precedente, este caudal se multiplica por el factor β correspondiente para obtener el caudal máximo instantáneo.

Tabla 5.10 Factor de Conversión de Caudal Medio Diario Máximo a Caudal Instantáneo Máximo

ZONA HOMOGENEA	β
Qn	1,12
Rn	1,11
Sn	1,26
Tn	1,16
Un	1,20
Vn	1,17
Wn	1,18
Xn	1,39
Yn	1,39

5.2 METODO DE PEÑA-ESCOBAR-VIDAL (CRECIDAS DE DESHIELO MAXIMAS PROBABLES)

Este método propuesto por Peña et al (1985a, 1989), permite estimar el caudal máximo probable de deshielo en cuencas de montaña, netamente nivales ubicadas entre los 27° y 35° de latitud sur, zona que abarca las cuencas del río Copiapó hasta la del río Rapel.

El método supone que se cumplen las siguientes hipótesis básicas para su aplicación:

- La crecida se origina exclusivamente en el derretimiento de nieves y no tiene componente pluvial.

- Se supone conocida la línea de nieves y ésta no experimenta modificaciones durante la crecida.
- No se consideran pérdidas por evapotranspiración ni por percolación hacia acuíferos profundos. No se toman en cuenta los posibles cambios en el contenido de humedad del suelo.
- El manto nival se supone isoterma, a 0°C, y no hay proceso de almacenamiento de agua de fusión en la nieve. No se puede aplicar el método a zonas con nieve fresca.

El método consta básicamente de ciertas relaciones que permiten estimar la tasa de derretimiento y de una expresión mediante la cual se genera el caudal máximo diario a partir de la tasa de derretimiento y del caudal máximo del día anterior. La ecuación para el cálculo de la esorrentía es la siguiente:

$$QP_x = C_1 (C_2^n C_0 / C_1 + (1 - C_2^n) / (1 - C_2)) QF_x \quad (5.2)$$

con:

$$C_1 = \frac{2K}{2 + K(1 - tm)} \quad (5.3)$$

$$C_2 = 0,495 + 0,041 \text{ Ln } A_n \quad \text{Tendencia media} \quad (5.4)$$

$$C_2 = 0,372 + 0,050 \text{ Ln } A_n \quad \text{Envolvente inferior} \quad (5.5)$$

$$C_2 = e^{-k} \quad (5.6)$$

$$C_0 = QP_0 / QF_x \quad (5.7)$$

en que:

QP_x Caudal máximo instantáneo de crecida (m^3/s)

QF_x Caudal de fusión correspondiente a la tasa de derretimiento máxima de diseño (m^3/s)

QP_0 Caudal máximo diario inicial (m^3/s)

A_n Area nival de la cuenca (km^2)

n, k, t_m parámetros del modelo

Para el cálculo del caudal de fusión (QF_x) se recomienda dividir la cuenca en bandas de altura media constante, aplicándose la siguiente expresión:

$$QF_x = \frac{1}{86,4} \sum_{i=1}^m M_i S_i \quad (m^3/s) \quad (5.8)$$

Mi : derretimiento máximo de diseño correspondiente a la banda i (mm/día)
 Si : superficie de la banda i (km²)

Para fines de diseño, la tasa de derretimiento (Hi) es posible estimarla siguiendo dos metodologías de cálculo. La primera consiste en estimarla a partir de la curva envolvente superior de la tasa de derretimiento registrado a una elevación de 3750 msnm. y el gradiente del derretimiento con la elevación (Peña et al, 1985a), estimados en 40 mm/día y -1,5 mm/100 m, respectivamente.

El segundo método para estimar la tasa de derretimiento corresponde a la fórmula empírica para la alta cordillera de la zona central, recomendada por Peña y Vidal (1989), cuya expresión es:

$$M = 0,0768 \text{ BNET} + 1,10 \text{ Ta} + 9,49 \quad (5.9)$$

$$\text{BNET} = (1 - \delta) \text{ ROCI} + 0,59 \sigma (\text{Ta} + 273)^4 - \sigma (\text{Tn} + 273)^4 \quad (5.10)$$

BNET : balance radioactivo neto (Ly/día)
 Ta : Temperatura media del aire (°C)
 δ : Albedo
 ROCI : Radiación de Onda Corta Incidente (Ly/día)
 σ : Constante de Stefan-Boltzman (1,19*10⁻⁷ Ly/día/°K⁴)
 Tn : Temperatura superficial media de la nieve (°C)

Estas expresiones pueden ser ocupadas considerando los siguientes valores (Peña et al, 1985b) para el cálculo de las crecidas de diseño.

- gradiente de temperatura -0,72 °C/100 m
- gradiente de radiación solar global 4,4 Ly/100 m
- albedo:

$$\delta = 0,88 - 0,086 \text{ Ln} (t)$$

en que Ln (t) es el logaritmo natural de la edad de la nieve a partir de la última nevazón importante (t en días)

Se debe tomar el máximo entre un albedo mínimo a estimar que puede ser 0,45 y el de la expresión anterior para δ.

- Temperatura superficial media de la nieve : -2°C a -3°C
- Temperatura media del aire: Se considera el valor medio más alto de la estadística durante el período de verano.

Para establecer los valores de los parámetros n, tm y K, Peña et al (1985) recomiendan considerar los siguientes valores para determinar el valor de la crecida de diseño:

$$\begin{aligned} t_m &= 0,67 \text{ (días)} \\ n &= 3 \text{ a } 5 \text{ días} \\ C_o &= 0,6 \end{aligned}$$

Peña, Vidal y Escobar. 1985a
 Peña, Vidal y Escobar. 1985b
 Peña, Vidal, 1989

"Procedimiento Para la Estimación de Crecidas en Cuencas Nivales" VII Congreso Nac. de Ingeniería Hidráulica.
 "Estimación de Tasas de Derretimiento de Nieve". VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica.
 "Estimación de Crecidas de Deshielo. Análisis de las Crecidas de noviembre/diciembre de 1987". IX Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica.

5.3

RECOMENDACIONES DE USO DE LOS METODOS

El método DGA-AC para caudales de deshielo, es aplicable en cuencas sin información fluviométrica, de régimen hidrológico nivo-pluvial o nival, con áreas nivales comprendidas entre 50 y 6.000 km² y ubicadas entre la III y IX región del país. Su uso está restringido a la estimación de caudales asociados a períodos de retorno inferiores o iguales a 100 años.

El método Peña-Escobar y Vidal, en cambio, está inserto en un esquema determinístico para estimar caudales máximos de deshielo en cuencas netamente nivales ubicadas entre las hoyas de los ríos Copiapó y Rapel. Estos autores indican que el caudal peak que se estima está limitado superiormente por los factores hidrológicos y meteorológicos que desencadenan las crecidas de deshielo y por lo tanto, no depende de un período de retorno.

En resumen, ambos métodos están orientados al cálculo de caudales máximos de deshielo, pero en escenarios diferentes lo que redundaría en que sus resultados no sean comparables entre sí.

5.4

EJEMPLO DE APLICACION

Para el método DGA-AC se presentan 3 ejemplos de aplicación para las cuencas Manflas en Vertedero, Pocuro en el Sifón y Chillán en Esperanza, en cambio, para el método de Peña-Escobar y Vidal se presenta un ejemplo correspondiente al caso de la cuenca río Juncal en Juncal.

a) Método DGA-AC para Caudales de Deshielo

a1) Manflas en Vertedero

La cuenca Manflas en Vertedero, que está ubicada en la III^a Región, pertenece a la zona homogénea Qn según la Figura 5.2. Por lo tanto, el factor de conversión de caudal medio diario máximo a caudal instantáneo máximo (β) es igual a 1,12, de acuerdo a lo indicado en la Tabla 5.10.

Según la ecuación 5.1, el valor del caudal medio diario máximo asociado al período de retorno de 10 años es para la latitud 28°4' sur:

$$Q_{10} = 1,81 \cdot 10^{-4} \cdot An \cdot (Lat - 26,2)^{3,392} = 1,44 \text{ m}^3/\text{s}$$

En la Tabla 5.11 se resumen los cálculos para estimar la curva de frecuencias del caudal instantáneo máximo. Esta tabla se ha generado como se explica a continuación: la curva adimensional obtenida de la Tabla 5.1 (Columna 2) se multiplica por el valor de Q_{10} (Columna 3) y luego por el factor β (Columna 4).

Tabla 5.11 Cálculo de Caudales Instantáneos Máximos. Período de Deshielo
Cuenca Manflas en Vertedero

T (años)	CURVAS DE FRECUENCIAS		
	CURVA ADIMENSIONAL Q_T/Q_{10} (adim)	CAUDAL MEDIO DIARIO MAXIMO $Q_T = (Q_T/Q_{10}) \cdot Q_{10}$ (m ³ /s)	CAUDAL INSTANTANEO MAXIMO βQ_T (m ³ /s)
2	0,41	0,6	0,7
5	0,73	1,1	1,2
10	1,00	1,4	1,6
20	1,29	1,9	2,1
25	1,40	2,0	2,3
50	1,73	2,5	2,8
75	1,95	2,8	3,2
100	2,11	3,0	3,4

a2) Pocuro en el Sifón

La cuenca Pocuro en el Sifón está ubicada en la V^a Región; en consecuencia, según la Figura 5.2 pertenece a la zona homogénea Vn y por lo tanto, de acuerdo a la Tabla 5.10, el factor de conversión de caudal medio diario máximo a caudal instantáneo máximo (β) es igual a 1,17.

El valor del caudal medio diario máximo asociado al período de retorno de 10 años y a la latitud 32°51' sur, que se obtiene con la ecuación 5.1, es:

$$Q_0 = 1,81 \cdot 10^{-4} \cdot An \cdot (Lat - 26,2)^{3,392} = 4,47 \text{ m}^3/\text{s}$$

En la Tabla 5.12 se resumen los cálculos para estimar la curva de frecuencias de caudal instantáneo máximo, en base a la curva adimensional obtenida de la Tabla 5.6.

Tabla 5.12 Cálculo de Caudales Instantáneos Máximos. Período de Deshielo.
Cuenca Pocuro en el Sifón

T (años)	CURVAS DE FRECUENCIAS		
	CURVA ADIMENSIONAL Q_T/Q_{10} (adim)	CAUDAL MEDIO DIARIO MAXIMO $Q_T = (Q_T/Q_{10}) * Q_{10}$ (m ³ /s)	CAUDAL INSTANTANEO MAXIMO βQ_T (m ³ /s)
2	0,59	2,64	3,09
5	0,84	3,76	4,40
10	1,00	4,47	5,24
20	1,16	5,19	6,07
25	1,21	5,41	6,34
50	1,36	6,09	7,12
75	1,45	6,49	7,59
100	1,51	6,76	7,91

a3) Chillán en Esperanza

La cuenca Chillán en Esperanza está ubicada en la VIIIª Región, por lo que pertenece a la zona homogénea Yn de acuerdo a la Figura 5.2. El factor de conversión de caudal medio diario máximo a caudal instantáneo máximo (β) es igual a 1,39, según la Tabla 5.10.

De la ecuación 5.1 se obtiene que el valor del caudal medio diario máximo asociado al período de retorno de 10 años y a una latitud 36°47' es:

$$Q_0 = 1,81 \cdot 10^{-4} \cdot An \cdot (Lat - 26,2)^{3,392} = 87,10 \text{ m}^3/\text{s}$$

En la Tabla 5.13 se resumen los cálculos para estimar la curva de frecuencias de caudal instantáneo máximo, en base a la curva adimensional presentada en la Tabla 5.9.

Tabla 5.13 Cálculo de Caudales Instantáneos Máximos Período de Deshielo Cuenca Chillán en Esperanza

T (años)	CURVAS DE FRECUENCIAS		
	CURVA ADIMENSIONAL Q_T/Q_{10} (adim)	CAUDAL MEDIO DIARIO MÁXIMO $Q_T = (Q_T/Q_{10}) * Q_{10}$ (m ³ /s)	CAUDAL INSTANTANEO MÁXIMO βQ_T (m ³ /s)
2	0,45	39,2	54,5
5	0,78	67,9	94,4
10	1,00	87,1	121,1
20	1,22	106,3	147,7
25	1,30	113,2	157,4
50	1,51	131,5	182,8
75	1,63	142,0	197,4
100	1,69	147,2	204,6

a4) Comentario

Para la estación Manflas en Vertedero, que es la única de estas tres que tiene un régimen hidrológico pluvionival o nival, es posible comparar el resultado del método DGA-AC con los valores obtenidos del análisis de frecuencias de la estación.

En la Tabla 5.14 se puede observar que existe concordancia entre ambos resultados, ya que se obtienen errores crecientes con el período de retorno que varían entre un 14% y un 33%.

Tabla 5.14 Comparación de Resultados del Método DGA-AC con Análisis de Frecuencias Manflas en Vertedero

PERIODO DE RETORNO	MANFLAS VERTEDERO	
	ANALISIS FRECUENCIA	METODO DGA-AC
5	1,4	1,2
10	2,1	1,6
25	3,1	2,3
50	4,0	2,8
100	5,1	3,4

caudales?

b) Método Peña-Vidal-Escobar

Para la cuenca Río Juncal en Juncal que se puede considerar como netamente nival, se consideran los siguientes valores de diseño para los parámetros de acuerdo a lo indicado en el Punto 5.2.

An	=	233	km ²
n	=	3	días
tm	=	0,67	días
Co	=	0,6	
Ta	=	2	°C
Tn	=	-3	°C
δ	=	0,47	(t= 120 días)
ROCI	=	700	Ly/día
σ	=	1,19*10 ⁻⁷	Ly/día/°K ⁴

— ?

aplicación
insuficiente

Con estos valores se obtienen los siguientes resultados:

De la ecuación (5.5):

$$C_2 = 0,645 \text{ (envolvente inferior)}$$

De la ecuación (5.6):

$$K = 0,44$$

Reemplazando en la ecuación (5.3):

$$C_1 = 0,41$$

Para estimar la tasa de derretimiento, se emplea la curva envolvente superior propuesta. La cuenca tiene una altura media de 2500 msnm, por lo tanto si se considera una tasa de derretimiento de 40 mm/día en la cota 3750 msnm. y un gradiente de -1,5 mm/100m, se obtiene como resultado una tasa de 21 mm.

El caudal de fusión correspondiente a la tasa de derretimiento máxima se obtiene en base a la ecuación (5.8) y resulta:

$$QF_x = 57 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

y luego reemplazando en la ecuación (5.2), se llega a que el caudal máximo instantáneo de crecida es:

$$QP_x = 57 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Por otro lado, al aplicar la segunda metodología propuesta para el cálculo de la tasa de derretimiento, se obtiene que:

De la ecuación (5.10)

$$BNET = 140 \text{ Ly/día}$$

y reemplazando este valor en la ecuación (5.9) resulta:

$$M = 18 \text{ mm/día}$$

El caudal de fusión calculado con la ecuación (5.8) es:

$$QF_x = 49 \text{ m}^3/\text{s}$$

Finalmente, el caudal máximo instantáneo de la crecida resulta ser de:

$$QP_x = 49 \text{ m}^3/\text{s}$$

b1) Comentario

Aunque no son directamente comparables, es posible contrastar este valor con el obtenido del análisis de frecuencias de la estación para el período de deshielo y para los períodos de retorno de 100 años y 1000 años que alcanzan valores de 37,4 y 45 m³/s, respectivamente. La conclusión que se obtiene es que este método efectivamente calcula la crecida máxima probable de deshielo, con una precisión adecuada para los fines del Manual de Procedimientos.

6.

**METODOS DE ESTIMACION DE
CAUDALES MEDIOS DIARIOS MINIMOS
EN 30, 7 Y 1 DIA CONSECUTIVOS**

6.1 METODO DGA-AC PARA CAUDALES MINIMOS

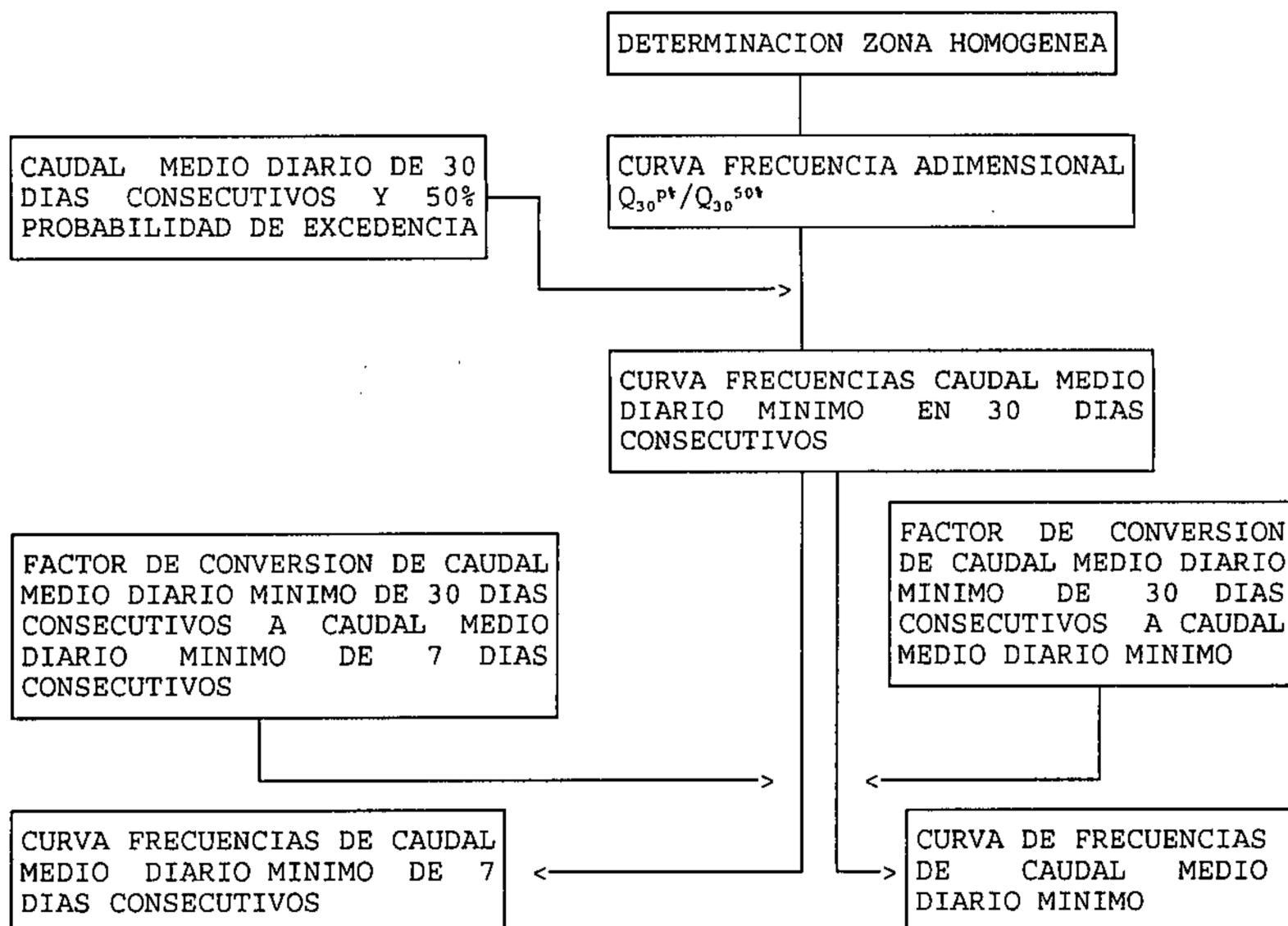
6.1.1 Descripción del Método

El método DGA-AC para caudales mínimos corresponde a un análisis regional de caudales medios diarios mínimos de 30, 7 y 1 día consecutivos, el cual está basado en las series anuales de caudales mínimos correspondientes a 89 estaciones fluviométricas ubicadas entre la IIIª y IXª región. Este método distingue dos situaciones dependiendo de la naturaleza de la fuente que entrega el recurso agua durante la época de estiaje de las cuencas; la primera se refiere al caso de recursos provenientes del deshielo de nieves y la segunda al caso de recursos provenientes de napas subterráneas.

Su campo de aplicación está orientado a cuencas en régimen natural sin control fluviométrico, con áreas nivales comprendidas entre 50 y 6.000 km² y ubicadas entre la IIIª y IXª Región del país. Se ha limitado su uso para estimar caudales con probabilidad de excedencia menor o igual a 95%.

El procedimiento de cálculo se esquematiza en la Figura 6.1.

Fig. 6.1 Esquema de Cálculo de Método DGA-AC para Estimar Caudales Mínimos



6.1.2 Determinación del Caudal Diario Mínimo en 30 días consecutivos y con Probabilidad de Excedencia de 50%

Para determinar esta variable se consideran dos situaciones posibles, las que dependen de la fuente dominante de suministro del recurso agua (deshielo o napa).

a) Fuente Deshielo

En este caso se ajustó la siguiente ecuación en base a los datos disponibles:

$$Q_{30}^{50\%} \text{ mín} = 5,54 \cdot 10^{-8} A_n^{0,914} \cdot P_{ma}^{1,735} \quad (m^3/s) \quad (6.1)$$

donde:

A_n es el área nival expresada en km^2

P_{ma} es la precipitación media anual, expresada en mm

b) Fuente Napa

Cuando la fuente de suministro proviene parcialmente del aporte de napas subterráneas, se plantea una relación gráfica que tiene la finalidad de entregar al ingeniero una primera aproximación a un valor de diseño. Esto se debe a que la cantidad de información disponible no permite derivar en la actualidad una relación analítica precisa.

En la Figura 6.2 se presenta esta relación

6.1.3 Determinación de Curva de Frecuencia Regional

La zona homogénea correspondiente a la cuenca en estudio, se determina en base al diagrama presentado en la Figura 6.3.

Para la zona homogénea identificada se selecciona la curva de frecuencia regional de caudales medios diarios mínimos de 30 días consecutivos adimensionalizada con el valor asociado a una probabilidad de excedencia de 50%. Esto se realiza en base a las Tablas 6.1 a 6.5. En estas tablas se consignan los valores medio, máximo y mínimo (envolvente) de la razón entre el caudal medio diario mínimo de 30 días asociado a una probabilidad de excedencia $P(\%)$ y el correspondiente caudal de probabilidad de excedencia 50%.

Fig. 6.2 Caudal Medio Diario Mínimo en 30 Días Consecutivos de Probabilidad de Excedencia 50%

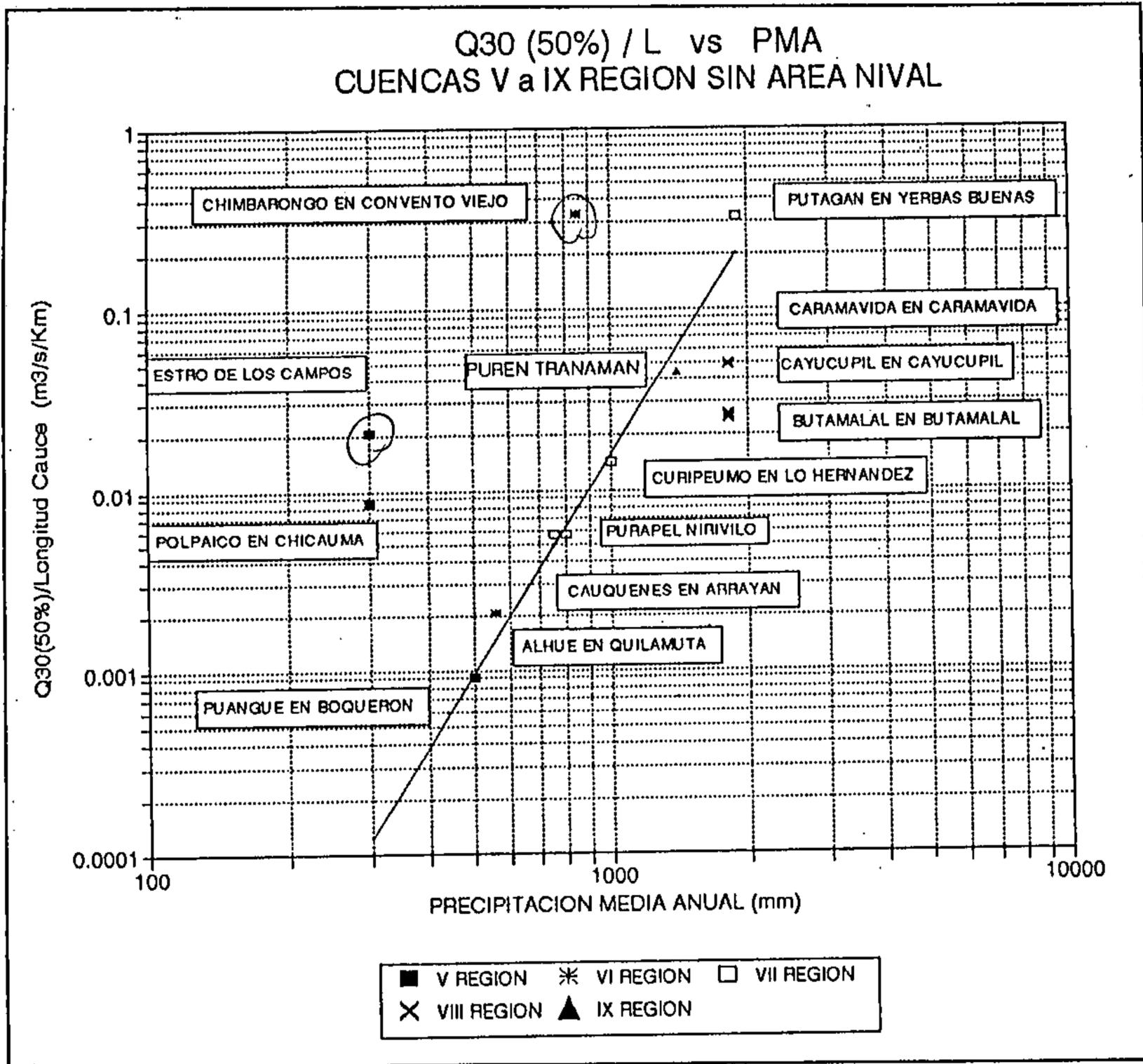


Fig. 6.3 Definición de Zonas Homogéneas para Caudales Mínimos

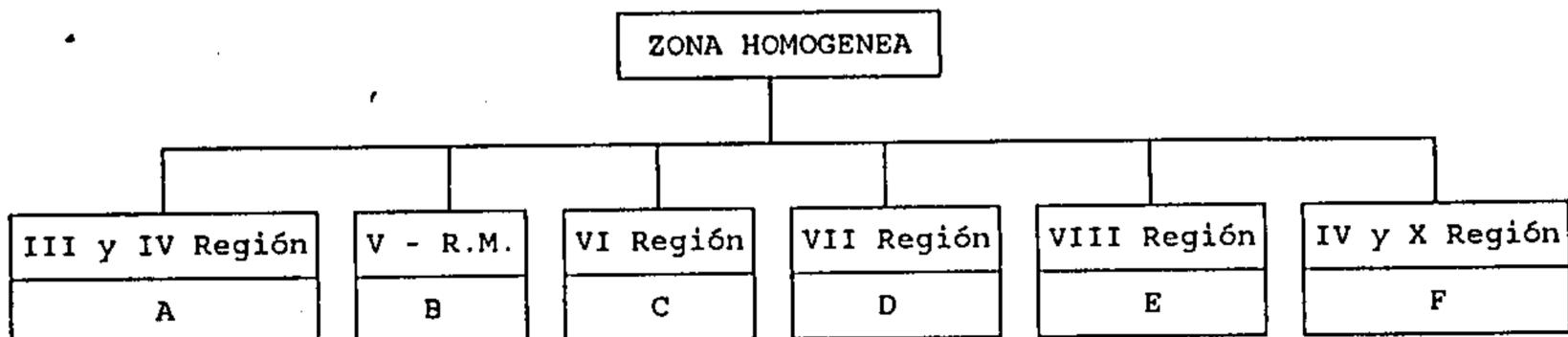


Tabla 6.1 Curva de Frecuencia Regional Caudales Mínimos Medios Mensuales
Zona Homogénea A (Pluvial) Log Normal-III Y IV Región

PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA (%)	Q30 (P%) / Q30 (50%)		
	MEDIA	MAX	MIN
20	1,66	1,98	1,44
50	1,00	1,00	1,00
80	0,60	0,70	0,50
90	0,43	0,57	0,31
95	0,28	0,49	0,00

Tabla 6.2 Curva de Frecuencia Regional Caudales Mínimos Medios Mensuales
Zona Homogénea B Pluvial-Gumbel - V Región

PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA (%)	Q30 (P%) / Q30 (50%)		
	MEDIA	MAX	MIN
20	1,41	1,57	1,25
50	1,00	1,00	1,00
80	0,69	0,82	0,57
90	0,56	0,74	0,39
95	0,46	0,68	0,26

Tabla 6.3 Curva de Frecuencia Regional Caudales Mínimos Medios Mensuales
Zona Homogénea C Pluvial-Gumbel-VI Región

PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA (%)	Q30 (P%) / Q30 (50%)		
	MEDIA	MAX	MIN
20	1,36	1,47	1,30
50	1,00	1,00	1,00
80	0,73	0,78	0,65
90	0,62	0,68	0,51
95	0,54	0,62	0,40

Tabla 6.4 Curva de Frecuencia Regional Caudales Mínimos Medios Mensuales
Zona Homogénea D Pluvial-Gumbel-VII Región

PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA (%)	Q30 (P%) / Q30 (50%)		
	MEDIA	MAX	MIN
20	1,49	1,81	1,18
50	1,00	1,00	1,00
80	0,63	0,87	0,36
90	0,46	0,81	0,02
95	0,36	0,77	0,00

Tabla 6.5 Curva de Frecuencia Regional Caudales Mínimos Medios Mensuales
Zona Homogénea E Pluvial-Gumbel-VIII Región

PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA (%)	Q30 (P%) / Q30 (50%)		
	MEDIA	MAX	MIN
20	1,35	1,60	1,18
50	1,00	1,00	1,00
80	0,74	0,86	0,56
90	0,63	0,81	0,37
95	0,54	0,76	0,23

Tabla 6.6 Curva de Frecuencia Regional Caudales Mínimos Medios Mensuales
Zona Homogénea F Pluvial-Gumbel-IX Y X Región

PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA (%)	Q30 (P%) / Q30 (50%)		
	MEDIA	MAX	MIN
20	1,23	1,35	1,13
50	1,00	1,00	1,00
80	0,83	0,91	0,74
90	0,76	0,86	0,63
95	0,70	0,84	0,55

Para determinar la curva de frecuencia de caudales medios diarios mínimos en 30 días consecutivos de la cuenca, basta con multiplicar la curva de frecuencia regional dada en las tablas precedentes, por el valor del caudal medio diario mínimo asociado a la probabilidad de excedencia 50% obtenido en el punto 6.1.2.

6.1.4 Determinación de la Curva de Frecuencias de Caudal Medio Diario Mínimo en 7 días consecutivos

El factor de conversión de caudales medios diarios mínimos en 30 días consecutivos a caudales medios diarios mínimos en 7 días, es variable según la región en que se ubique la cuenca.

En atención a ello, para obtener la curva frecuencias de los caudales medios diarios mínimos en 7 días consecutivos, se debe multiplicar por este factor la curva de frecuencias de caudales medios diarios mínimos en 30 días consecutivos.

Estos factores regionales de conversión de 30 a 7 días para las regiones Vª a la Xª, se presentan en la Tabla 6.7, de acuerdo a la cuenca a la que pertenece la subcuenca en estudio.

Tabla 6.7 Factor Regional Q_7/Q_{30}

Región	Cuenca	Q_7/Q_{30}
V	Ligua-Petorca-Aconcagua	0,946
	Maipo	0,905
VI	Rapel	0,865
VII	Mataquito	0,913
	Maule	0,863
VIII	Itata	0,904
	Bio Bío	0,810
	Paicavi	0,877
IX	Imperial	0,884
	Toltén	0,887
X	Valdivia-Bueno	0,747

6.1.5 Determinación de Curva de Frecuencias del Caudal Medio Diario Mínimo

En forma análoga al caso anterior, se han determinado los factores de conversión de caudal medio diario mínimo en 30 días consecutivos a caudal medio diario mínimo (1 día). En la Tabla 6.8 se presentan los valores correspondientes a cada cuenca, para las regiones V^a a la X^a.

El procedimiento para obtener el caudal medio diario mínimo asociado a una probabilidad de excedencia dada, es análogo al explicado para obtener el caudal medio diario mínimo de 7 días consecutivos.

Tabla 6.8 Factor Regional Q_1/Q_{30}

Región	Cuenca	Q_1/Q_{30}
V	Ligua-Petorca-Aconcagua	0,923
	Maipo	0,881
VI	Rapel	0,826
VII	Mataquito	0,903
	Maule	0,808
VIII	Itata	0,866
	Bio Bío	0,792
	Paicavi	0,845
IX	Imperial	0,829
	Toltén	0,867
X	Valdivia-Bueno	0,644

6.2 RECOMENDACIONES DE USO DE LOS METODOS

El método de estimación de caudales mínimos se recomienda aplicarlo en cuencas sin información de tipo fluviométrico y que no presentan alteraciones, tales como embalses o extracciones, que afecten en forma significativa su régimen natural.

El campo de validez abarca geográficamente las cuencas ubicadas entre la III^a y la X^a Región, y con áreas nivales entre 50 y 6000 km².

La probabilidad de excedencia de los caudales estimados no debe ser mayor a 95%.

En general este método es una herramienta eficiente que permite determinar con facilidad y buena aproximación los caudales mínimos asociados a una cierta probabilidad de excedencia en una cuenca determinada. Además es necesario tener presente la posibilidad de disminuir la incertidumbre de estas estimaciones realizando aforos durante la época de estiaje de la cuenca.

6.3 EJEMPLOS DE APLICACION

Se presentan 3 ejemplos de aplicación, los cuales corresponden a las cuencas definidas por las estaciones fluviométricas Manflas en Vertedero, Pocuro en el Sifón y Chillán en Esperanza.

a) Manflas en Vertedero

La cuenca Manflas en Vertedero está ubicada en la IIIª Región, por lo que pertenece a la zona homogénea A según lo indicado por la clasificación de la Figura 6.3.

La principal fuente de suministro de agua durante la época de estiaje es en este caso el aporte nival. Por tal motivo el caudal medio mínimo en 30 días consecutivos y con probabilidad 50% se debe estimar con la ecuación (6.1).

$$Q_{30}^{50\%} = 5,54 \cdot 10^{-8} \cdot An^{0,914} \cdot P_{ma}^{1,735} = 0,29 \text{ m}^3 / \text{s}$$

La curva de frecuencias regional adimensional, indicada en la Tabla 6.1, multiplicada por este valor determina la curva de frecuencias de caudales medios mínimos en 30 días consecutivos que se presenta en la Tabla 6.9.

Tabla 6.9 Caudales Medios Mínimos en 30 días Consecutivos
Cuenca Manflas en Vertedero

Probabilidad Excedencia (%)	$Q_{30}^{P\%}/Q_{30}^{50\%}$ (adimensional)	$Q_{30}^{P\%}$ (m ³ /s)
20	1,66	0,48
50	1,00	0,29
80	0,60	0,17
90	0,43	0,12
95	0,28	0,08

En este ejemplo no se presentan los valores de $Q_7^{p\%}$ y $Q_1^{p\%}$, ya que para las Regiones III^a y IV^a no se disponen de factores regionales de conversión.

b) Pocuro en el Sifón

La cuenca Pocuro en el Sifón está ubicada en la V^a Región, y por lo tanto, según la clasificación de la Figura 6.3, pertenece a la zona homogénea B.

La principal fuente de suministro de agua durante la época de estiaje es en este caso también el aporte nival. En consecuencia, el caudal medio mínimo en 30 días consecutivos y con probabilidad 50% se debe estimar con ecuación 6.1:

$$Q_{30}^{50\%} = 5,54 \cdot 10^{-8} \cdot An^{0,914} \cdot Pma^{1,735} = 0,17 \text{ m}^3/\text{s}$$

En base a este valor y a la curva de frecuencias regional adimensional (Tabla 6.2), se calcula la curva de frecuencias de caudales medios mínimos en 30 días consecutivos, según se detalla en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10 Caudales Medios Mínimos en 30 días Consecutivos
Cuenca Pocuro en el Sifón

Probabilidad Excedencia (%)	$Q_{30}^{P\%}/Q_{30}^{50\%}$ (adimensional)	$Q_{30}^{P\%}$ (m ³ /s)
20	1,41	0,24
50	1,00	0,17
80	0,69	0,12
90	0,56	0,10
95	0,46	0,08

Para estimar los caudales medios mínimos de 7 y 1 día consecutivos, se multiplica el caudal medio mínimo de 30 días consecutivos por el factor de conversión correspondiente. En la Tabla 6.11 se consigna el valor de estos factores y los resultados del cálculo.

Tabla 6.11 Caudales Medios Mínimos en 7 y 1 días Consecutivos
Cuenca Pocuro en el Sifón

Probabilidad Excedencia (%)	$Q_{30}^{P\%}$ (m ³ /s)	$Q_7/Q_{30}=0,946$ $Q_7^{P\%}$ (m ³ /s)	$Q_1/Q_{30}=0,923$ $Q_1^{P\%}$ (m ³ /s)
20	0,24	0,23	0,22
50	0,17	0,16	0,16
80	0,12	0,11	0,11
90	0,10	0,09	0,09
95	0,08	0,07	0,07

c) Chillán en Esperanza

La cuenca Chillán en Esperanza está ubicada en la VIIIª Región, por lo que según la clasificación de la Figura 6.3, pertenece a la zona homogénea E.

La principal fuente de suministro de agua durante la época de estiaje es también el aporte nival. Por tal motivo el caudal medio mínimo en 30 días consecutivos y con probabilidad 50% se debe estimar en base a la ecuación (6.1):

$$Q_{30}^{50\%} = 5.54 \cdot 10^{-8} \cdot An^{0,914} \cdot Pma^{1,735} = 3,63 \text{ m}^3 / s$$

La curva de frecuencias de caudales medios mínimos en 30 días consecutivos se calcula multiplicando la curva de frecuencias regional adimensional indicada en la Tabla 6.5 por el valor de $Q_{30}^{50\%}$. En la Tabla 6.12 se presenta el detalle de cálculo.

Tabla 6.12 Caudales Medios Mínimos en 30 días Consecutivos Cuenca Chillán en Esperanza

Probabilidad Excedencia (%)	$Q_{30}^{P\%}/Q_{30}^{50\%}$ (adimensional)	$Q_{30}^{P\%}$ (m ³ /s)
20	1,35	4,90
50	1,00	3,63
80	0,74	2,68
90	0,63	2,29
95	0,54	1,96

Para establecer los caudales medios mínimos de 7 y 1 día consecutivos, se multiplica el caudal medio mínimo de 30 días consecutivos por el factor de conversión correspondiente obtenido de las Tablas 6.7 y 6.8. En la Tabla 6.13 se presenta el valor de estos factores y los resultados de este cálculo.

Tabla 6.13 Caudales Medios Mínimos en 7 y 1 días Consecutivos
Cuenca Chillán en Esperanza

Probabilidad Excedencia (%)	$Q_{30}^{P\%}$ (m ³ /s)	$Q_7/Q_{30}=0,904$ $Q_7^{P\%}$ (m ³ /s)	$Q_1/Q_{30}=0,866$ $Q_1^{P\%}$ (m ³ /s)
20	4,90	4,43	4,24
50	3,63	3,28	3,14
80	2,68	2,43	2,32
90	2,29	2,07	1,98
95	1,96	1,77	1,70

d) Comentario

Al comparar los resultados de los tres casos presentados como ejemplos de aplicación, con los obtenidos de los análisis de frecuencias de cada estación, se concluye que el Método DGA-AC permite estimar con una precisión aceptable los caudales medios diarios mínimos en 30 días consecutivos.

En la Tabla 6.14 se presenta la comparación entre estos resultados que permite confirmar esta conclusión.

Tabla 6.14 Comparación de Resultados del Método DGA-AC con Inferencia de
Análisis de Frecuencias

PROBABILIDAD EXCEDENCIA (%)	MANFLAS VERTEDERO		POCURO SIFON		CHILLAN ESPERANZA	
	ANALISIS FRECUENCIA (m ³ /s)	METODO DGA-AC (m ³ /s)	ANALISIS FRECUENCIA (m ³ /s)	METODO DGA-AC (m ³ /s)	ANALISIS FRECUENCIA (m ³ /s)	METODO DGA-AC (m ³ /s)
20	0,21	0,48	0,21	0,24	5,3	4,9
50	0,14	0,29	0,14	0,17	4,4	3,6
80	0,06	0,17	0,09	0,12	3,7	2,7
90	0,02	0,12	0,07	0,10	3,4	2,3
95	0,00	0,08	0,06	0,08	3,2	2,0

7. COMENTARIOS FINALES

7.1 OBJETIVOS Y ALCANCES DEL MANUAL

El Manual de Procedimientos ha sido concebido como una herramienta de fácil uso para el cálculo de caudales en cuencas del país con escasa información fluviométrica, con el fin de ser utilizados para el diseño de obras hidráulicas de pequeña a mediana envergadura.

Basándose en esta idea se han calibrado y validado diversos métodos de uso habitual para el cálculo de caudales extremos en el país y además se han generado nuevas expresiones, en base a la información disponible de 234 estaciones fluviométricas para el caso de caudales máximos y 89 estaciones para caudales mínimos, que en ambos casos abarcan una gran parte del territorio nacional y además poseen una longitud de registro mínima de 20 años.

Las expresiones de cálculo se han agrupado en tres categorías: métodos para la estimación de caudales máximos pluviales, métodos para la estimación de caudales máximos de deshielo y métodos para la estimación de caudales mínimos.

7.2 ESTIMACION DE CAUDALES MAXIMOS EN PERIODO PLUVIAL

Para la estimación de caudales máximos pluviales se proponen dos enfoques, uno de los cuales hace uso de fórmulas empíricas que estiman directamente el caudal instantáneo máximo asociado a un cierto período de retorno en tanto el otro emplea hidrogramas unitarios sintéticos que permiten además definir el hidrograma completo de la crecida.

Dentro del primer grupo se encuentran la Fórmula Racional y la fórmula de Verni y King, que han sido calibradas en base a la información fluviométrica del país entre las Regiones III^a a la IX^a y también el Método DGA-AC para Crecidas Pluviales que ha sido desarrollado en el estudio que dió origen al presente Manual de Procedimientos. En el campo de los hidrogramas unitarios se proponen los métodos de Linsley y de Gray, que han sido adecuados a la realidad hidrológica del país, validándolos con datos medidos en cuencas localizadas entre las Regiones III^a a la X^a.

Cabe destacar que para el uso de estas expresiones hay que tener presente las limitaciones siguientes: (1) período de retorno inferior a 100 años y (2) superficies de cuencas inferiores a 10.000 km².

Entre los principales aspectos a tener presente para el uso de las relaciones propuestas en este Manual de Procedimientos para crecidas de origen pluvial, pueden destacarse las siguientes:

- En el Método DGA-AC para Crecidas Pluviales se establecen para el país relaciones destinadas a estimar el caudal medio diario máximo asociado al período de retorno 10 años y coeficientes de frecuencia para estimar caudales de otros períodos de retorno. Igualmente, se derivan valores para el factor de conversión (α) que posibilitan calcular el caudal instantáneo máximo a partir del caudal medio diario máximo.
- Para el uso de la fórmula de Verni y King Modificada, que constituye una versión generalizada de la fórmula original propuesta en este Manual, se determina un coeficiente de corrección dependiente también del período de retorno.
- Para el uso de la Fórmula Racional se plantean coeficientes de escorrentía asociados al período de retorno 10 años, estableciéndose los coeficientes de frecuencia respectivos para estimar esta variable para otros valores del período de retorno.
- Para el método del hidrograma unitario sintético (HUS) se establecen los valores de sus parámetros en distintas regiones del país, empleando relaciones del tipo Linsley y del tipo Gray.

7.3 ESTIMACION DE CAUDALES MAXIMOS EN PERIODO DE DESHIELO

Para la estimación de caudales máximos de deshielo se proponen dos métodos, el primero de los cuales se ha denominado Método DGA-AC para Caudales de Deshielo y que corresponde a un análisis regional de crecidas similar al desarrollado para los caudales máximos pluviales, en tanto el segundo corresponde al método de Peña, Vidal y Escobar que permite calcular crecidas máximas probables de deshielo en cuencas netamente nivales.

Al igual que en el caso anterior, para el método DGA-AC para Caudales de Deshielo, se ha limitado el cálculo a caudales asociados a períodos de retorno inferiores a 100 años. En el segundo método no se tiene esta restricción, ya que al tratarse de caudales máximos probables ellos son independientes de su probabilidad de excedencia o se pueden interpretar como valores asociados a muy altas probabilidades de excedencia.

El método DGA-AC para caudales de deshielo tiene validez entre la IIIª y la IXª Región, en cambio el método de Peña, Vidal y Escobar se restringe a las Regiones IIIª a la VIª.

A través del método DGA-AC para Caudales de Deshielo se establecen para el país las relaciones destinadas a estimar el caudal medio diario asociado al período de retorno 10 años y los correspondientes coeficientes de frecuencia. Igualmente se proponen valores para el factor de conversión (β) que permite calcular el caudal instantáneo a partir del caudal medio diario.

Para el método de Peña, Vidal y Escobar, se proponen dos metodologías para el cálculo de la tasa de derretimiento máximo que origina el caudal máximo probable de deshielo.

7.4 ESTIMACION DE CAUDALES MINIMOS

Para realizar estimaciones de caudales mínimos, en este Manual de Procedimientos se propone una metodología desarrollada en base a un análisis regional de caudales medios diarios mínimos promedio en 30 días consecutivos y la posterior estimación de caudales medios diarios de 7 y 1 día consecutivos a través de factores de conversión regionales.

Esta metodología, que constituye el primer método en donde se sistematiza el cálculo de caudales mínimos a nivel nacional, ha demostrado ser una técnica satisfactoria para abordar el problema, ya que se obtienen resultados que pueden ser considerados realistas.

El uso de este método está restringido a probabilidades de excedencia inferiores a 95% y su empleo se recomienda en cualquier cuenca ubicada entre las Regiones IIIª a la Xª, cuyo régimen hidrológico mínimo no se encuentre sensiblemente alterado.