

# **SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA**

## **XX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA**

### **INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA PMP EN LA DETERMINACIÓN DE LA CRECIDA MÁXIMA PROBABLE**

**SOLANGE DUSSAUBAT.<sup>1</sup>  
JAVIER GONZÁLEZ.<sup>2</sup>**

#### **RESUMEN**

En el presente trabajo se detalla el estudio de la Crecida Máxima Probable (CMP) para una cuenca particular de la IX Región. La estimación de la CMP se ha realizado a partir de la determinación de la Precipitación Máxima Probable (PMP), analizando para ello la influencia en la distribución temporal de la precipitación y, posteriormente, la aplicación de un Hidrograma Unitario Sintético.

Para la determinación de la PMP se analizaron registros de precipitación diaria de 8 estaciones pluviométricas ubicadas en la zona de estudio y se construyó una relación Precipitación – Altura para determinar la precipitación promedio máxima diaria asociada a la elevación media de la cuenca en análisis. Posteriormente, se aplicó el método de Stöwhas (1983).

Para distribuir el valor total de la PMP en el tiempo se utilizaron 4 metodologías diferentes, a partir de las cuales se obtuvo un total de 31 distribuciones. El caudal máximo asociado a las crecidas resultantes varió en un rango aproximado del 80%. El análisis de las diferentes crecidas se basó en la probabilidad de ocurrencia asociada a cada tipo de distribución temporal de la PMP y en la magnitud de intensidades de lluvia de cada tormenta. Con estos argumentos se seleccionó la distribución de Varas Tipo III con un 90% de probabilidad de ocurrencia para estimar la CMP. Un análisis de sensibilidad se realizó considerando el valor del parámetro CN, obteniéndose que este parámetro es de una importancia despreciable frente a aquella asociada a la distribución de la tormenta.

---

<sup>1</sup>Ingeniero Civil Hidráulico, Golder Associates S. A. – mail: sdussaubat@golder.cl

<sup>2</sup>Ingeniero Civil Hidráulico, Golder Associates S. A. – mail: jegonzalez@golder.cl

## 1. INTRODUCCION

El presente trabajo tiene como principal objetivo analizar la influencia de la distribución temporal de la Precipitación Máxima probable (PMP) para la obtención de la Crecida Máxima Probable (CMP) en una cuenca particular de la IX Región, ubicada a 45 km al sureste de Pucón (ver Figura 1).

Para la determinación de la PMP, el análisis realizado consideró los registros de precipitación diaria de 8 estaciones pluviométricas ubicadas en la zona de estudio. Mediante análisis de consistencia y procedimientos de corrección, relleno y selección de datos, se construyeron series de máximos anuales y una relación Precipitación – Altura para determinar la precipitación promedio máxima diaria asociada a la elevación media de la cuenca en análisis. Posteriormente, se seleccionó el método de Stöwhas (1983) para determinar la PMP.

Para analizar la distribución temporal de la precipitación se utilizaron las distribuciones propuestas por Benítez y Verni (1985), Varas (1985), Seguel y Stöwhas (1979) y la distribución de Chicago para diferentes valores del parámetro  $r$ .

Finalmente, se realizó un análisis de sensibilidad al valor de la Curva Número y al tipo de Hidrograma Unitario Sintético utilizado.

## 2. INFORMACIÓN UTILIZADA

La información utilizada en el presente estudio consistió en series de precipitaciones máximas diarias anuales de 8 estaciones pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA) ubicadas en la IX Región del país. La información de dichas estaciones se presenta en la Tabla 1 y Figura 1.

**Tabla 1: Estadísticas de precipitaciones máximas diarias utilizadas**

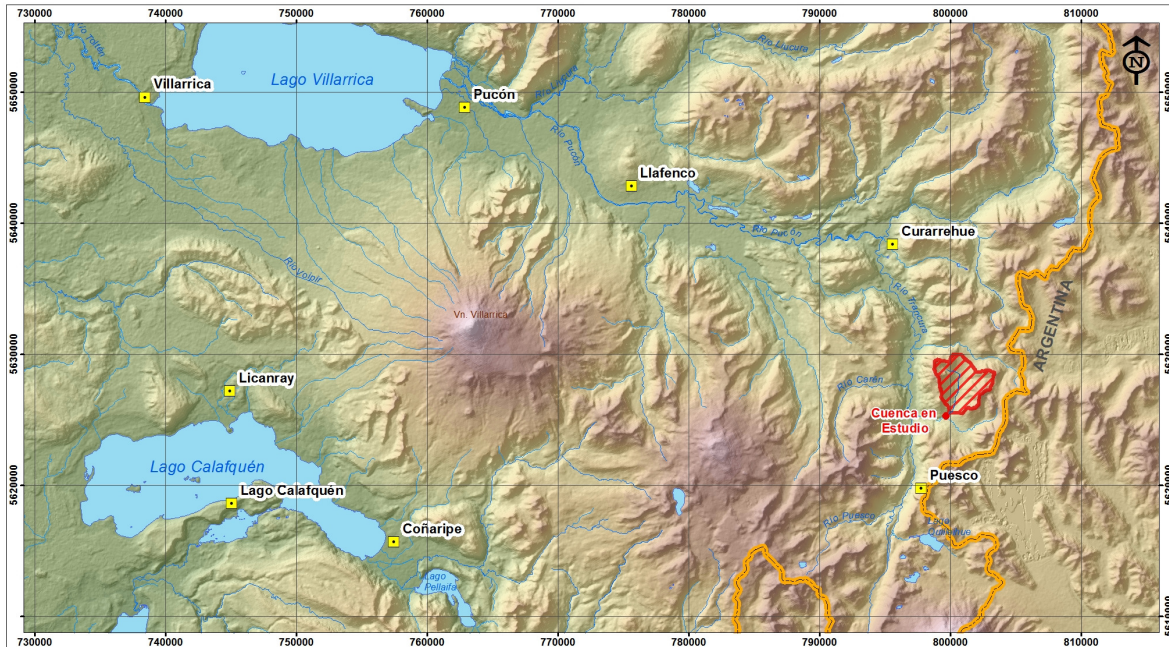
Estación	Lat.	Long.	UTM Norte [m]	UTM Este [m]	Elevación [m s.n.m]	Inicio Registro	Final Registro considerado
Villarrica	39° 16'	72° 14'	5649981	738687	235	01-01-1977	29-Feb-2008
Pucón	39° 16'	71° 57'	5649195	763136	233	01-Jul-1984	29-Feb-2008
Llafenco	39° 19'	71° 48'	5643197	775883	385	01-Ene-1977	29-Feb-2008
Curarrehue	39° 21'	71° 34'	5638758	795863	98	01-Ene-1977	29-Feb-2008
Licanray	39° 28'	72° 09'	5627557	745177	276	01-May-1996	29-Feb-2008
Lago Calafquén	39° 32'	72° 09'	5620157	744942	209	01-Jul-1986	29-Feb-2008
Puesco	39° 31'	71° 32'	5620145	798024	690	01-Sep-1987	29-Feb-2008
Coñaripe	39° 34'	72° 00'	5616037	757713	220	01-Ene-1997	29-Feb-2008

## 3. METODOLOGÍA

La estimación de la CMP está directamente relacionada a la estimación de la Precipitación Máxima Probable (PMP). Para estimar la PMP la Organización Meteorológica Mundial

recomienda el uso del método hidrometeorológico (W.M.O. (1986)), el cual corresponde a un método de base física, que requiere datos meteorológicos como temperatura del punto de rocío, velocidad del viento y humedad.

**Figura 1: Estaciones pluviométricas del área de estudio y cuenca en análisis**



Dado que los únicos parámetros de este tipo disponibles para la zona de estudio, corresponden a registros de temperatura diaria en la estación Pucón, en este trabajo se utilizarán métodos de enfoque estadístico como el propuesto por Herschfield (1965) y en particular su adaptación para las condiciones nacionales desarrollada por Stöwhas (1983). Una vez determinada la PMP, es posible estimar la CMP a partir de la aplicación del método del Hidrograma Unitario Sintético (HUS) que se construye utilizando parámetros característicos de morfología de la cuenca como el largo y la pendiente media. En la determinación del caudal máximo de crecida, uno de los factores que más influye corresponde a la distribución en el tiempo de la PMP. Por esta razón se han analizado cuatro metodologías diferentes con un total de 31 distribuciones posibles para la PMP, seleccionando finalmente aquella distribución que entrega los resultados más consistentes a la vez que maximiza los caudales de la crecida. La metodología utilizada para desarrollar el presente trabajo se desglosa en los siguientes puntos:

- Análisis de información pluviométrica
- Determinación de la Precipitación Máxima Probable
- Construcción de hidrogramas unitarios sintéticos
- Distribución temporal de la Precipitación Máxima Probable
- Determinación de la Crecida Máxima Probable

## 4. DETERMINACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MÁXIMA PROBABLE

### 4.1. Relación Precipitación – Altura

Las series de precipitación máxima diaria obtenidas de las estaciones presentadas en la sección 2 corresponden a la información básica a partir de la cual se pretende obtener la precipitación máxima diaria promedio asociada a la elevación media de la cuenca en análisis. Estas series se rellenaron entre los años hidrológicos 1987-1988 y 2007-2008, obteniendo así series uniformes de 21 años de longitud.

En general, debido a que los efectos orográficos son importantes en las precipitaciones que ocurren en Chile, se busca relacionar los valores con la elevación del lugar del registro. La Tabla 2 muestra un resumen de los parámetros estadísticos asociados a la serie de precipitaciones máximas diarias para cada estación en análisis.

**Tabla 2: Parámetros estadísticos de las series de precipitación máxima diaria**

Estación	Elevación [msnm]	Pmax diaria promedio [mm]	Desv. Estándar [mm]	Coef. Variación [ ]
Villarrica	235	91,9	31,8	0,35
Pucón	233	79,4	18,1	0,23
Llafenco	385	133,6	33,6	0,25
Curarrehue	402	104,7	37,6	0,36
Licanray	276	93	20	0,21
Lago Calafquén	209	76,5	13,1	0,17
Puesco	690	148,3	51,5	0,35
Coñaripe	220	76,2	13,4	0,18

La Figura 2 muestra en un gráfico el valor promedio de la precipitación máxima diaria en función de la altura de cada estación. Aún cuando existe una dispersión importante, es apreciable una tendencia de aumento del promedio a medida que aumenta la altura de la estación.

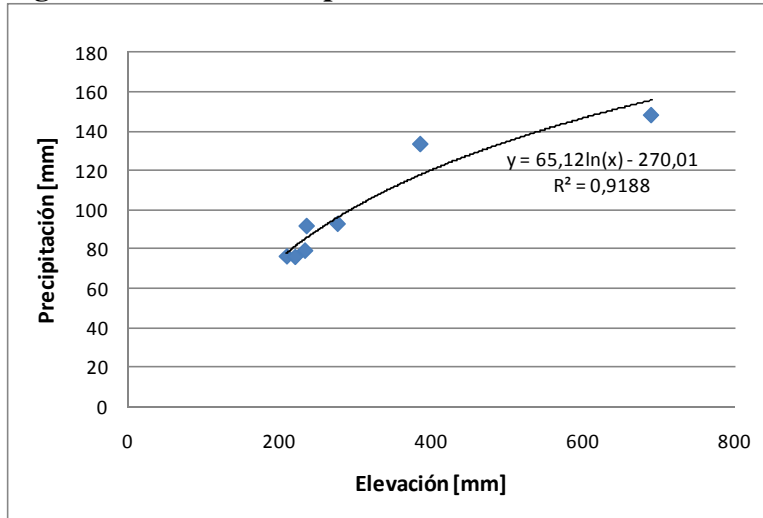
Un análisis de los valores estadísticos de la Tabla 2 para cada estación, permite notar que la estación Curarrehue, aún cuando se ubica en la misma cuenca asociada a las estaciones Puesco y Llafenco, presenta un valor de precipitación máxima diaria promedio notablemente bajo para su elevación. Al mismo tiempo, el valor del coeficiente de variación de esta estación es el mayor de todo el conjunto. Todo esto podría ser causado por el efecto de eventuales acumulaciones de nieve que alteren las lecturas pluviales en la estación. Debido a estas razones se decidió no considerar la estación Curarrehue en la construcción de la relación Precipitación - Altura.

Finalmente, se decidió utilizar un ajuste de tipo logarítmico para describir la variación de la precipitación máxima promedio en función de la altura. La Figura 2 muestra el ajuste logarítmico trazado para el grupo de estaciones. La relación adoptada corresponde a:

$$\bar{P}_{\text{máx}}_{\text{DIARIA}} = 65,12\text{Ln}(Z) - 270 \quad (1)$$

Donde Z corresponde a la elevación del lugar.

**Figura 2: Relación Precipitación - Altura**



## 4.2. Precipitación Máxima Probable

### 4.2.1. Métodos de estimación de la PMP

La Precipitación Máxima Probable (PMP) se define como la máxima altura de lluvia que tiene posibilidad de ocurrir cuando se reúnen las condiciones más desfavorables, tanto meteorológicas como de contenido de humedad en la atmósfera. La Organización Meteorológica Mundial (W.M.O. (1986)) propone un método con base física para determinar este evento, conocido como Método Hidrometeorológico, el cual estima la PMP mediante la construcción de curvas maximizadas precipitación-duración-área. Para su aplicación se requiere contar con información de precipitación, temperatura, humedad y velocidad de viento, en lo posible a nivel horario.

Para este estudio los únicos datos de temperatura con los que se cuenta corresponden a los de la estación Pucón, a nivel diario. Además de representar características meteorológicas diferentes, se estima que la extensión y el detalle de dicho registro no permiten la aplicación del método hidrometeorológico.

Otro tipo de métodos que permiten estimar la PMP en cuencas donde la información hidrometeorológica es escasa, corresponde a aquellos que utilizan enfoques estadísticos, siendo uno de los más utilizados aquel propuesto por Herschfield (1965). Este establece una curva envolvente superior para describir la relación entre la PMP y el promedio de la precipitación máxima mediante la definición de factores de frecuencia según la siguiente ecuación:

$$\text{PMP} = \bar{P}_{\text{máx}} + K_m \sigma \quad (2)$$

Donde  $\bar{P}_{\text{máx}}$  es la precipitación promedio máxima,  $\sigma$  la desviación estándar y  $K_m$  es el factor de frecuencia máximo que se obtiene a partir de las relaciones gráficas determinadas por el autor en función de  $\bar{P}_{\text{máx}}$ , y que generalmente toma un valor entre 14 y 20. Stöwhas (1983) realizó una revisión de esta metodología utilizando registros pluviométricos en Chile, y determinó que el factor de frecuencia  $K_m$  presenta correlaciones con el coeficiente de variación (Cv) no consideradas en el método original. Sus resultados indican que el método de Herschfield sobreestima el factor de frecuencia para valores altos de Cv y lo subestima para los valores bajos.

Stöwhas (1983) propuso como alternativa, el uso de una curva envolvente construida a partir de las estadísticas chilenas, la cual incorpora la dependencia de  $K_m$  respecto de Cv, y que entrega resultados menos conservadores que los de Herschfield cuando Cv es mayor que 0,35.

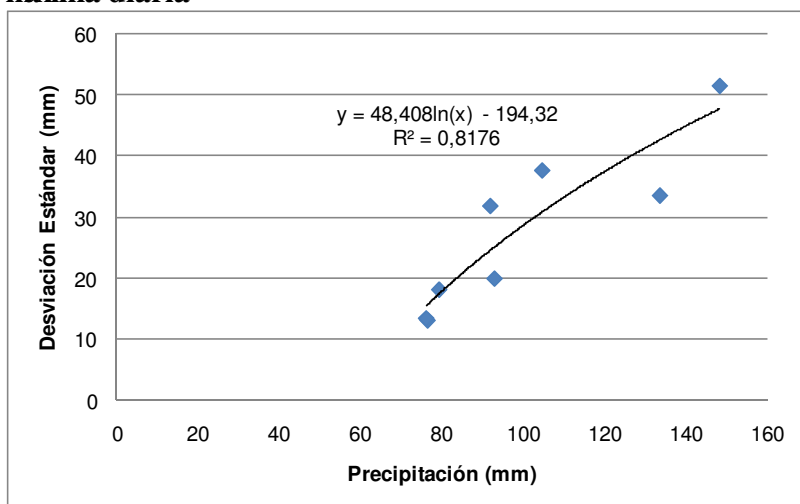
#### 4.2.2. Cálculo por Métodos Estadísticos

Para aplicar tanto el método de Herschfield como el método de Stöwhas, es necesario estimar la desviación estándar asociada al valor de  $\bar{P}_{\text{máx}}$  determinado en la sección 4.1. Al graficar los valores de la desviación estándar versus el promedio para las estaciones del área de estudio se puede establecer la relación presentada en la Figura 3, observándose una correlación aceptable entre ambos parámetros para el rango de precipitaciones de interés. De esta forma, utilizando el ajuste logarítmico de la Figura 3 se obtienen los valores presentados en la Tabla 3 para la elevación media de la cuenca en análisis.

**Tabla 3: Desviación estándar de la  $\bar{P}_{\text{máx}_{24}}$  para la cuenca en análisis**

$\bar{P}_{\text{máx}_c}$ [mm]	$\sigma_c$ [mm]	Cv [ ]
183,9	58	0,32

**Figura 3: Relación entre la desviación estándar y el promedio de la serie de precipitación máxima diaria**



Para aplicar el método de Herschfield se deben calcular los parámetros  $\bar{P}_{m\acute{a}x_{n-1}}/\bar{P}_{m\acute{a}x_n}$  y  $\sigma_{n-1}/\sigma_n$  para corregir los valores de  $\bar{P}_{m\acute{a}x}$  y  $\sigma$  asociados a cada cuenca. La Tabla 4 presenta los valores calculados para cada estación analizada. En el caso de  $\bar{P}_{m\acute{a}x_{n-1}}/\bar{P}_{m\acute{a}x_n}$  se puede observar que existe una dispersión menor por lo que se consideró razonable adoptar el valor promedio, mientras que para el parámetro  $\sigma_{n-1}/\sigma_n$  el rango de variación es más alto por lo que se utilizó el valor mayor, correspondiente al más desfavorable.

**Tabla 4: Factores de corrección para cada estación.**

Estación	$\bar{P}_{m\acute{a}x_n}$ [mm]	$\sigma_n$ [mm]	$\bar{P}_{m\acute{a}x_{n-1}}$ [mm]	$\sigma_{n-1}$ [mm]	$\bar{P}_{m\acute{a}x_{n-1}}/\bar{P}_{m\acute{a}x_n}$	$\sigma_{n-1}/\sigma_n$
Puesco	148,3	51,5	142,3	44,9	0,96	0,87
Llafenco	133,6	33,6	129,9	29,6	0,97	0,88
Pucon	79,4	18,1	76,8	14,3	0,97	0,79
Villarrica	91,9	31,8	88,3	27,8	0,96	0,87
Lago Calafquén	76,5	13,1	75,0	11,3	0,98	0,86
Licanray	93,0	20,0	91,2	18,8	0,98	0,94
Coñaripe	76,2	13,4	74,4	10,9	0,98	0,81
Curarrehue	104,7	37,6	101,5	35,6	0,97	0,95
				Promedios	0,97	0,87

Los factores de corrección para la media y la desviación se obtienen a partir de las relaciones gráficas de Herschfield (1965). Para la longitud de la serie se ha considerado que éstas poseen 21 años, con lo cual los valores corregidos se presentan en la Tabla 5:

**Tabla 5: Valores corregidos para el promedio y la desviación**

$\bar{P}_{m\acute{a}x_c}$ [mm]	$\sigma_c$ [mm]	Cv [ ]
189,7	68	0,36

Utilizando los parámetros corregidos de la Tabla 5,  $\bar{P}_{m\acute{a}x_c}$  y  $\sigma_c$ , y aplicando el método de Herschfield y el método propuesto por Stöwahas (1983), se obtienen los resultados presentados en la Tabla 6.

**Tabla 6: Valores de la PMP según el método de Herschfield (1965) y Stöwahas (1983)**

$\bar{P}_{m\acute{a}x_c}$ [mm]	PMP Stöwahas [mm]	PMP Herschfield [mm]
189,7	808	1.182

#### 4.2.3. Análisis de Resultados

Para analizar los resultados obtenidos en la Tabla 6 resulta importante considerar los resultados del trabajo de Stöwahas respecto de la correlación que presentan los factores máximos de frecuencia con el coeficiente de variación. Tanto la Tabla 3 como la Tabla 5 muestran que en el caso de la cuenca en estudio el coeficiente de variación es mayor a 0,3, lo cual resulta de las características de las series obtenidas para las estaciones a partir de las cuales se construyó la relación precipitación – altura. En estas condiciones, el método de Herschfield sobrestima el valor de los factores de frecuencia por lo cual es esperable que los valores de la PMP, determinados a partir del método de Stöwahas, resulten menores.

## 5. DETERMINACIÓN CRECIDA MÁXIMA PROBABLE

### 5.1. Hidrograma Unitario

Para estimar la Crecida Máxima Probable (CMP) a partir de los valores de la PMP obtenidos en el Capítulo 4, es necesario adoptar una distribución temporal para la tormenta de la PMP y calcular la escorrentía generada mediante algún modelo precipitación-escorrentía. Debido a que no se cuenta con registros fluviométricos de crecidas en la cuenca analizada, que permitan construir el hidrograma unitario asociado, se utilizará el método del Hidrograma Unitario Sintético (HUS) de Linsley modificado de acuerdo al estudio de Benítez y Arteaga (1986), según lo recomendado por la DGA (1995). Este método determina el hidrograma unitario a partir de parámetros característicos de la morfología de la cuenca (ver Tabla 7).

**Tabla 7: Parámetros morfológicos de la cuenca y parámetros del HUS**

Área [Km <sup>2</sup> ]	L [Km]	L <sub>g</sub> [Km]	S	t <sub>p</sub> [hr]	t <sub>b</sub> [hr]	q <sub>p</sub> [l/s/mm/km <sup>2</sup> ]	t <sub>u</sub> [hr]
12,9	4,8	2,7	0,34	2,8	11,0	72,8	0,5

Donde L es el largo del cauce principal, L<sub>g</sub> es la distancia desde centro de gravedad a la salida de la cuenca, S corresponde a la pendiente media de la cuenca obtenida mediante la Fórmula Mociornita y los parámetros del hidrograma unitario dados por el tiempo al peak (t<sub>p</sub>), caudal peak (q<sub>p</sub>), tiempo base (t<sub>b</sub>) y t<sub>u</sub>=t<sub>p</sub>/5,5.

### 5.2. Distribución Temporal de la Precipitación

La distribución en el tiempo del total de precipitación es uno de los factores que más influye para la determinación de cualquier hidrograma. Por este motivo se han analizado cuatro metodologías diferentes de distribución temporal de las tormentas. Estas corresponden a las propuestas por Benítez y Verni (1985), Varas (1985), Seguel y Stöwhas (1979) y la distribución de Chicago para diferentes valores del parámetro r.

Benítez y Verni (1985) definen tres tipos de distribuciones típicas (D2, D3 y D4) de acuerdo al momento de la tormenta donde ocurre la intensidad máxima (comienzo, parte central o final) y dos distribuciones envolventes D1 y D5, en todas las cuales se relacionan el porcentaje de tiempo transcurrido y el porcentaje de precipitación. De la misma forma, Varas (1985) define cuatro tipos de distribuciones dependiendo de la ubicación de la intensidad máxima de la tormenta respecto a la duración total. Para cada grupo clasifica las distribuciones de acuerdo a su probabilidad de ocurrencia.

En el caso de la metodología de la tormenta de Chicago se establece una relación entre la intensidad de la tormenta y el tiempo de acuerdo a la ecuación 3:

$$i = \frac{a}{(b + t)^c} \quad (3)$$

Donde los parámetros a, b y c pueden ajustarse a partir de curvas intensidad duración. Para esto se han utilizando los coeficientes de duración determinados por Varas y Sánchez (1984) para la ciudad de Valdivia. Estos coeficientes han sido determinados mediante el



análisis de varias tormentas de diferentes duraciones y calculando la intensidad promedio máxima para cada periodo de tiempo menor a 24 hrs. Estos coeficientes son relativamente constantes en Chile, y no existen diferencias significativas desde la ciudad de Concepción a Valdivia, por lo que se considera razonable adoptarlos como válidos para la zona de estudio. La Tabla 8 presenta el valor de los coeficientes de duración y las intensidades resultantes. También se adjunta el valor de los parámetros a, b y c ajustados.

La distribución de Chicago queda determinada además por el parámetro r, que indica la razón entre el tiempo en que ocurre la intensidad máxima de la tormenta y la duración total de ésta. Para hacer comparables estas distribuciones a las de Varas (1985) se han seleccionado valores de r de 0,125, 0,325, 0,625 y 0,825.

Seguel y Stöwhas (1979) desarrollan un método para determinar la distribución temporal de la precipitación que entrega el máximo caudal de crecida asociado a un hidrograma unitario conocido. Para determinar los pulsos de precipitación se han utilizado los coeficientes de duración de la Tabla 8 y alternativamente la Fórmula de Grunsky.

De esta forma se ha obtenido un total de 31 distribuciones diferentes para las tormentas asociadas a la PMP. Estas distribuciones se presentan en forma gráfica en la Figura 4.

**Tabla 8: Coeficientes de duración y parámetros de la distribución de Chicago**

Coeficientes de Duración		Cuenca en Análisis		Parámetros Distribución de Chicago		
Hrs	CD	Pp. [mm]	i(t) [mm/hr]	a	b	c
0,5	0,12	98,5	197,1	133,99	0,0	0,44
1	0,16	129,2	129,2			
2	0,23	185,7	92,9			
4	0,34	274,6	68,6			
6	0,46	371,5	61,9			
8	0,54	436,1	54,5			
10	0,61	492,6	49,3			
12	0,67	541,1	45,1			
14	0,73	589,5	42,1			
18	0,86	694,5	38,6			
24	1	807,6	33,7			

### 5.3. Cálculo de Crecidas

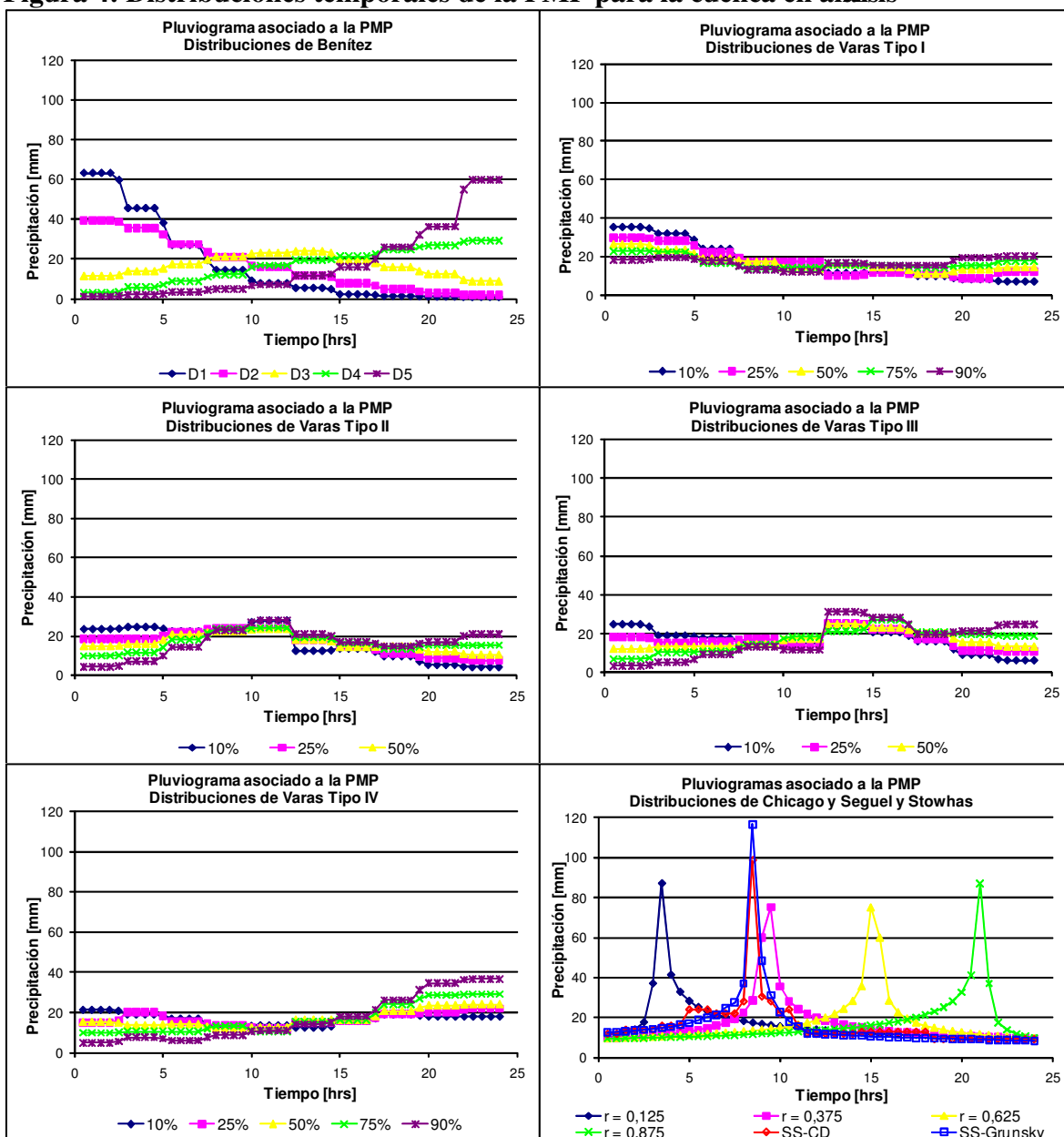
Para determinar la crecida asociada a cada una de las tormentas definidas en la sección 5.2, se calculó la correspondiente precipitación efectiva utilizando el método de la curva número. Se adoptó un número de curva igual a 70 correspondiente a un uso de suelo de bosques con buena cubierta, con un tipo suelo se correspondiente al grupo C (suelos con bajo contenido orgánico).

En general, el registro de las estaciones de la zona muestra que los eventos de precipitación máxima ocurren como parte de una tormenta de varios días de duración. Esto se debe a que las tormentas más comunes en la zona sur son aquellas de tipo ciclónico-frontales que comienzan con precipitaciones de baja intensidad, aumentando a medida que el frente se

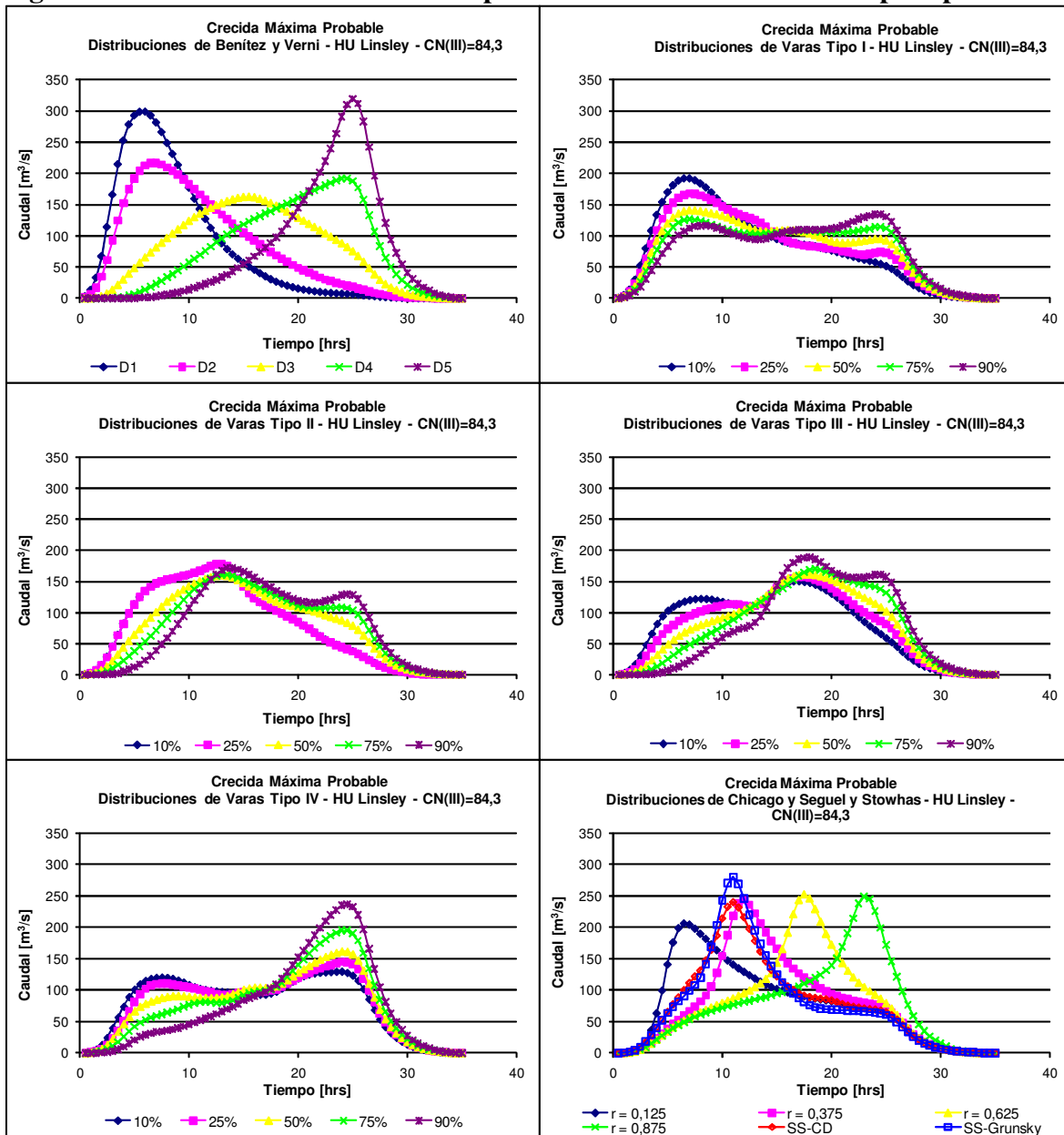
desplaza por la zona y disminuyendo a medida que éste se aleja. Por ésta razón resulta apropiado considerar que el evento asociado a la PMP se presentará bajo condiciones de humedad antecedente tipo III, donde la lluvia acumulada en los cinco días anteriores alcanza aproximadamente 50 mm. De acuerdo a esto, el valor resultante para la CN es 84,3.

Finalmente, con los valores de la precipitación efectiva se aplica el hidrograma unitario determinado en la sección 5.1 a cada una de las 31 distribuciones temporales de la PMP determinadas en la sección 5.2, obteniéndose las crecidas correspondientes que se presentan en la Figura 5. La Figura 6 muestra las crecidas con los mayores caudales máximos para cada grupo de distribuciones temporales de la PMP en la cuenca en análisis, mientras que la Tabla 9 entrega los caudales máximos para cada una de estas crecidas.

**Figura 4: Distribuciones temporales de la PMP para la cuenca en análisis**



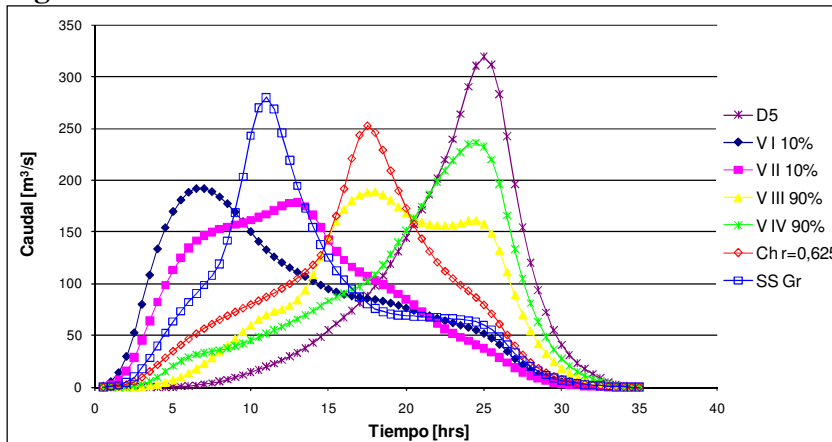
**Figura 5: Crecidas Máximas Probables para distintas distribuciones de precipitaci3n**



**Tabla 9: Caudales Máximos de Crecida**

Tipo de Distribuci3n	CMP [m³/s]
Benítez y Verni, D5	320
Varas Tipo I 10%	192
Varas Tipo II 10%	178
Varas Tipo III 90%	189
Varas Tipo IV 10%	236
Chicago r = 0,625	253
Seguel y St3wahas (Grunsky)	280

**Figura 6: Crecidas Máximas Probables - distribuciones máximas - CN(III)=84,3**



### 5.3. Análisis de Resultados

Los resultados anteriores muestran que la distribución temporal de la PMP determina un rango de variación del caudal máximo de aproximadamente el 80%. En efecto, los caudales máximos varían entre 178 m<sup>3</sup>/s para la distribución de Varas Tipo II con 10% de probabilidad de ocurrencia y 320 m<sup>3</sup>/s para la distribución de Benítez y Verni tipo D5. Respecto a la probabilidad de ocurrencia asociada a cada tipo de distribución temporal de la PMP, Varas (1985) indica que para duraciones de 12 hrs. y más, las tormentas Tipo I y IV son menos probables que las tormentas Tipo II y III. De esta forma las tormentas Tipo I 10% y Tipo IV 10% tienen una probabilidad total de ocurrencia menor por lo que no se consideran apropiadas para representar una CMP.

Respecto de las intensidades de lluvia en cada distribución temporal de la PMP, es conveniente analizar los valores presentados en la Tabla 8 donde se puede observar que para la cuenca, las intensidades máximas en 1, 2 y 4 hrs. corresponden respectivamente a 129 mm, 93 mm y 69 mm. La Figura 4 muestra que la distribución de Benítez y Verni tipo D5 alcanza en dos horas consecutivas intensidades cercanas a 120 mm/hr, lo cual no es consistente con el promedio máximo en 2 hrs. La misma situación ocurre para la distribución de Seguel y Stöwhas que utiliza la fórmula de Grunsky. En este caso la intensidad máxima en 1 hr alcanza cerca de 165 mm/hr, superando el máximo de 129 mm/hr indicado por los coeficientes de duración. Ambas distribuciones se consideran demasiado extremas para ser representativas de una CMP. Por otro lado, tanto la distribución de Chicago con un valor de  $r = 0,625$  como la restante distribución de Seguel y Stöwhas, incorporan en su construcción información asociada a los coeficientes de duración. Los gráficos de la tormenta asociada a estas distribuciones muestran que la magnitud de las precipitaciones en cada hora es consistente con los valores indicados por la Tabla 8. Estas tormentas generan crecidas con caudales máximos similares, sin embargo, el hecho de asumir que la distribución temporal que adopte la PMP será aquella que maximice las intensidades se considera un escenario demasiado conservador.

Finalmente, si se analiza la tormenta asociada a la distribución de Varas Tipo III con 90% de probabilidad de ocurrencia, se puede observar que la intensidad máxima alcanza aproximadamente 62 mm/hr por un periodo de 4 hrs. Estos valores son ligeramente

menores a las intensidades máximas definidas por los coeficientes de duración para este intervalo de tiempo. Por esto, y dado que la probabilidad de la distribución dentro del grupo alcanza el 90% y que el Tipo III corresponde a aquellas tormentas más probables, se considera razonable asociar esta distribución para definir finalmente a la CMP, resultando valores para el caudal máximo de 189 m<sup>3</sup>/s para la cuenca en análisis.

Para obtener un indicador de la sensibilidad de los resultados al tipo de HUS adoptado, se calculó la crecida asociada a la distribución de tormenta de Varas Tipo III 90%, utilizando el HUS tipo Gray y el de tipo triangular propuesto por el Soil Conservation Service (SCS) de los EE.UU, obteniéndose caudales máximos de 200 y 218 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, que corresponden a aumentos del 6% y 15%. Para ambos tipos de hidrograma unitario los valores de caudal máximo son mayores que los obtenidos al aplicar el hidrograma tipo Linsley, encontrándose dentro del rango de variación determinado por el tipo de distribución de la tormenta. De esta forma, se concluye que el tipo de hidrograma unitario adoptado en este estudio es coherente con el objetivo de evitar un escenario que es físicamente imposible, donde los valores para el caudal máximo de la CMP sean extremadamente conservadores. Adicionalmente se analizó la sensibilidad de los resultados al valor utilizado para el número de curva CN, aumentándolo en un 10%, lo que equivale a una disminución de la abstracción total del 29% (desde 45 mm a 32 mm). Con esta disminución, el valor total del caudal máximo obtenido al utilizar la distribución de Varas Tipo III con un 90% de probabilidad, corresponde a 190 m<sup>3</sup>/s, lo que equivale a un aumento de menos del 1%. Esta variación se explica por el hecho de que la abstracción tiene una mayor influencia en el inicio de la tormenta y al mismo tiempo las distribuciones que finalmente maximizan las crecidas poseen intensidades crecientes. Mientras mayores son las intensidades al final de la tormenta menor es el efecto del valor de CN. Se puede concluir entonces que la sensibilidad del valor del caudal máximo de crecida al valor del parámetro CN es despreciable respecto a la distribución temporal de la tormenta.

## **6. CONCLUSIONES**

En el presente estudio se ha estimado la Crecida Máxima Probable (CMP) para una cuenca ubicada en la IX Región de Chile, a aproximadamente 45 Km al sureste de Pucón. Básicamente, la metodología aplicada para determinar la CMP consistió en la estimación de la Precipitación Máxima Probable (PMP) y la aplicación del Hidrograma Unitario Sintético para determinar la escorrentía generada por dicho evento. Los valores obtenidos para la PMP corresponden a 808 mm para la cuenca de estudio. Para distribuir el valor total de la PMP en el tiempo se utilizaron 4 metodologías diferentes, a partir de las cuales se obtuvo un total de 31 distribuciones. La precipitación efectiva asociada a la PMP se determinó utilizando el método de la CN y posteriormente se aplicó un HUS tipo Linsley modificado de acuerdo al estudio de Benítez y Arteaga (1986).

El caudal máximo asociado a las crecidas resultantes varió en un rango de aproximadamente el 80%. El análisis de las diferentes crecidas se basó en la probabilidad de ocurrencia asociada a cada tipo de distribución temporal de la PMP y en la magnitud de intensidades de lluvia de cada tormenta. Se descartó la utilización de las distribuciones de Varas Tipo I 10% y Tipo IV 10% por estar asociadas a probabilidades de ocurrencia comparativamente bajas respecto de las otras distribuciones. La distribución de Benítez y

Verni Tipo D5 y la de Seguel y Stöwhas que utiliza la fórmula de Grunsky, se descartaron debido a que ambas presentan intensidades en el periodo de una hora demasiado altas para la zona. En cuanto a las distribuciones de Chicago y la Seguel y Stöwhas que se construyen utilizando los coeficientes de duración, se descartaron por considerar que un escenario en que la PMP se distribuya con las máximas intensidades de lluvia posibles para cada intervalo de tiempo, resulta demasiado conservador. Con estos argumentos se seleccionó la distribución de Varas Tipo III con un 90% de probabilidad de ocurrencia para estimar la CMP, resultando valores del caudal máximo de  $189 \text{ m}^3/\text{s}$  para la cuenca en análisis.

Adicionalmente, se realizó un análisis de sensibilidad al tipo de HUS utilizado, resultando dentro del rango de variación determinado por el tipo de distribución de la tormenta. Así, se concluye que el tipo de hidrograma unitario adoptado en este estudio es coherente con el objetivo de evitar un escenario que es físicamente imposible, donde los valores para el caudal máximo de la CMP sean extremadamente conservadores. Además, se analizó la sensibilidad de los resultados al número de curva, concluyéndose que el parámetro CN es despreciable en comparación a la sensibilidad de la distribución temporal de la tormenta.

## REFERENCIAS

Benítez, A. y Arteaga, F. (1986), “Método para la Determinación de Hidrogramas Unitarios Sintéticos en Chile”, Rev. Sochid, Vol 1, N°1.

Benítez, A. y Verni, F., (1985). “Distribución Porcentual de las Precipitaciones de una Duración  $t$ , para  $12 \text{ h} < t < 72 \text{ h}$ ”. VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.

Cuevas, V. y Stöwhas, L. (1999). “Influencia de la Distribución Temporal de la Precipitación en el Caudal Máximo de Crecidas”. IV Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.

DGA (1995). “Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica”. MOP, DGA.

Herschfield, D. (1965). “Method for Estimating Probable Maximum Rainfall”. Journal of Water Works Assoc. Vol 57.

Seguel, R. y Stöwhas, L. (1979). “Método Sintético para Maximización de Crecidas”. IV Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.

Stöwhas, L. (1983). “Precipitaciones Máximas en Chile”. VI Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.

Varas, E. (1985). “Hietogramas de Tormentas de Diseño”. VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.

W.M.O. (1986) “Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation”, 2nd edition, Operational Hydrology Report No. 1, WMO - No. 332, Geneva, ISBN 92 - 63 - 11332 - 2