

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERA HIDRÁULICA

XIX CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

ESTIMACIÓN DE CRECIDAS MÁXIMAS PROBABLES DE ORIGEN HIDROMETEOROLÓGICO

**HARRY KING F.¹
RAUL TAPIA G.²**

RESUMEN

Para determinar los caudales de diseño de las obras de evacuación de crecidas en presas de embalses, en la práctica corriente se utilizan dos métodos: uno consiste en determinar una crecida de una recurrencia específica basada en un análisis de frecuencia (Q_{mi} vs Tr) y el otro, en utilizar la Crecida Máxima Probable (CMP).

El cálculo de la CMP es altamente problemático y laborioso, ya que depende de factores complejos e inciertos, lo que puede llevar a obtener crecidas de diseño muy sobrestimadas o subestimadas.

En el presente trabajo se expone un método simple para determinar la CMP, en el que se asocia ésta a un período de retorno, obtenido extrapolando el análisis de frecuencia. Se determina además, el coeficiente “K”, que relaciona el peak de la CMP con el caudal máximo instantáneo obtenido en el análisis de frecuencia para $Tr = 10.000$ años ($Q_{peak\ CMP} / Q_{mi}(10.000\ años)$).

El método está basado en los resultados obtenidos en estudios realizados en diversas obras de embalses en el país, en las que se ha calculado la CMP. Se ha tomado en cuenta además, antecedentes de la experiencia internacional sobre este tema

¹Jefe Grupo Estudios Hidrológicos, Ingendesa, -mail: hkf@ingendesa.cl

²Ingeniero de Proyecto, Especialidad Hidráulica, Ingendesa - mail: rtg@ingendesa.cl

1. INTRODUCCIÓN

La seguridad operacional de las presas de embalses queda condicionada en buena medida por la capacidad de sus obras de evacuación de crecidas. La definición de los caudales de diseño se refiere, en primer término, a establecer los estándares de seguridad que deberán cumplirse, es decir, qué crecida se evacuará (máxima probable, milenaria, etc.), y, en segundo término, a determinar los hidrogramas que cumplen esos estándares. Cabe señalar que no existen criterios universalmente aceptados para determinar los estándares de seguridad a aplicar.

En un estudio realizado en Ingendesa (Araya, R., 2006), en el que se revisaron y establecieron los conceptos básicos que se deben tener en cuenta para definir los caudales de diseño de las obras de evacuación de crecidas de las presas asociadas al Proyecto Hidroeléctrico Aysén, se concluyó, producto de la experiencia de Ingendesa y de la detallada revisión de publicaciones técnicas internacionales, que para diseñar las obras de evacuación de los embalses del proyecto mencionado, es necesario considerar la Crecida Máxima Probable (CMP) provocada por fenómenos hidrometeorológicos para verificar que las obras sean capaces de afrontar adecuadamente un evento tan extremo como este, no obstante la muy reducida probabilidad que ocurra durante la etapa de operación de las centrales.

El presente trabajo se originó del estudio que se realizó en Ingendesa, con el objeto de determinar los caudales de diseño de las obras de evacuación de crecidas de las presas asociadas al Proyecto Hidroeléctrico Aysén, en el que de acuerdo a las conclusiones del estudio anterior, fue necesario determinar las CMP en las zonas de las presas de las centrales estudiadas en los Ríos Baker y Pascua.

2. EXPERIENCIA INTERNACIONAL EN EL CÁLCULO DE LA CMP

En la práctica corriente, la determinación del estándar de seguridad para establecer la crecida de diseño de las obras de evacuación de presas importantes se efectúa mediante dos métodos o procedimientos: uno consiste en utilizar una crecida de una recurrencia específica, basada en un análisis de frecuencia o riesgo (Tr vs Q_{mi}) y el otro es utilizar la CMP.

El U.S. Army Corps of Engineers define la CMP como una crecida que puede esperarse de la más severa combinación de las condiciones meteorológicas e hidrológicas que son razonablemente posibles en una región. Normalmente, esta crecida es la respuesta que se espera en la cuenca afluyente al embalse, debido a una precipitación extrema que se conoce con el nombre de Precipitación Máxima Probable (PMP).

La determinación de la CMP es altamente problemática, ya que depende de factores muy inciertos (PMP, escorrentía base, fusión de la nieve producto de la lluvia sobre ella, ubicación de la línea de nieve, gradiente térmico, etc.), lo que puede llevar a obtener crecidas muy sobrestimadas o subestimadas. El problema se complica más aún, dependiendo de las características climáticas de la zona en estudio, cuando las crecidas mayores no sólo dependen de las precipitaciones sino que de otros factores como el derretimiento de hielos y nieves, existencia de glaciares, lagos importantes (regulación de crecidas), etc.

Lo recién señalado ocurre con las principales crecidas en los ríos Baker y Pascua, los que tienen régimen nivo-pluvial con aportes importantes de glaciales. En el río Baker, se registran crecidas importantes en casi todos los meses del año (salvo septiembre y Octubre), en tanto que en el Pascua, éstas se presentan en el período enero-abril, que corresponde al de mayores temperaturas y menores precipitaciones.

En este tipo de zonas climáticas, el estudio de la CMP de origen hidrometeorológico se efectúa mediante complicados modelos, los que requieren disponer de numerosa información de precipitaciones, temperaturas máximas y mínimas horarias y diarias, cobertura de nieve en la cuenca, agua equivalente a la profundidad de la nieve, etc. Esta información es muy escasa en la región de Aysén.

De acuerdo a la experiencia internacional, en países que cuentan con más estaciones de medición y estadísticas más largas que en la zona de Aysén, las estimaciones de la CMP han conducido a resultados inciertos. Es así como por ejemplo en Noruega, en que los ríos generalmente se caracterizan por tener crecidas asociadas al derretimiento de nieves, han adaptado un modelo desarrollado en Suecia y como resultado, las crecidas calculadas son eventos muy extremos, cuya exactitud no puede verificarse ni empírica ni matemáticamente. Por tal motivo, se indica que los juicios subjetivos emitidos por ingenieros o hidrólogos experimentados deben ser siempre escuchados.

En las guías de crecidas de diseño en Australia se hace notar que la filosofía asociada al cálculo de la CMP debe llevar a valores razonables de ésta. Es decir, los meteorólogos e hidrólogos deben cuidarse de dar las mejores estimaciones de los parámetros involucrados, sin incrementar los márgenes de seguridad combinando eventos de muy baja probabilidad de ocurrencia.

Para mejorar la confiabilidad de las estimaciones de las crecidas, cuando existen valores observados, se suele compararlos con las estimaciones de las PMP y las CMP. Es así como en la mayoría de las regiones de Noruega, las precipitaciones máximas observadas corresponden a cifras del orden de un 40 a 60% de los valores de la PMP. En Suiza puede suponerse, como base de cálculo, que el peak de la CMP es un 50% superior que el de la crecida milenaria.

Por último, en China normalmente comparan la PMP y la CMP con los valores de un temporal con período de retorno de 10.000 años, obtenido por análisis de frecuencia. Basándose en las cantidades involucradas, en la representatividad y precisión de la información y en los probables errores de cálculo, se decide razonablemente cuál es la crecida de diseño que finalmente se adoptará.

3. METODOLOGÍA

La metodología que se expone, desarrollada para estimar las CMP de origen hidrometeorológico en los lugares donde se estudian presas de embalses, se determinó tomando en cuenta las consideraciones y análisis efectuados en los puntos anteriores, la información meteorológica disponible en las cuencas de los ríos Baker y Pascua, los estudios de crecidas efectuados en ambos ríos mediante análisis de frecuencia de caudales máximos instantáneos (Q_{mi} vs T_r) y por

último, antecedentes de estudios de crecidas, incluida la CMP, realizados en distintas regiones de Chile.

La estimación de los peak de las CMP de origen hidrometeorológico se efectuó a partir de los análisis de frecuencia de caudales máximos instantáneos, determinando cuocientes “K” entre los Qmi y las crecidas decamilenarias, es decir,

$$K = Q_{mi} / Q_{mi}(Tr=10.000 \text{ años}) \quad (1)$$

Por lo tanto, el peak de la CMP queda dado por la expresión:

$$Q_{mi}(CMP) = K * Q_{mi}(Tr=10.000 \text{ años}) \quad (2)$$

Existen varias grandes presas construidas en Chile, en las que durante los estudios básicos previos al diseño, se estudiaron las crecidas en función del período de retorno y también las Crecidas Máximas Probables. Entre éstas se pueden mencionar:

- Presa Puclaro, embalse para riego en el río Elqui, IV Región (Consortio Ingendesa-EDIC LTDA., 1994)
- Presa Melado, de la central hidroeléctrica Pehuenche, en el río Melado, afluente al río Maule, VII Región (MN Ingenieros, 1981)
- Presa Ralco, de la central hidroeléctrica Ralco, en el río Biobío, VIII Región (Ingendesa, 1999 e Ingendesa, 2001)
- Presa Pangué, de la central hidroeléctrica Pangué, en el río Biobío, VIII Región (Endesa, 1988 y Endesa, 1989)

De los informes recién citados se extrajeron los caudales máximos instantáneos (Qmi) para períodos de retorno (Tr) de 50, 100, 1.000 y 10.000 años, además de los Qmi estimados para las CMP. En el Tabla N° 1 se muestran estos caudales y los valores referidos al caudal con Tr=10.000, es decir, los cuocientes (Qmi / Q10.000).

Tabla N° 1
Resultados de estudios de crecidas en Chile que incluyen la CMP

| Embalse | Caudal | Tr (años) | | | | CMP |
|---------------------|-------------|-----------|-------|-------|--------|--------|
| | | 50 | 100 | 1.000 | 10.000 | |
| Puclaro | Qmi | 825 | 1.020 | 1.750 | 2.500 | 3.800 |
| | Qmi/Q10.000 | 0,33 | 0,41 | 0,70 | 1,00 | 1,52 |
| C. Pehuenche | Qmi | 2.030 | 2.410 | 3.620 | 4.880 | 6.950 |
| | Qmi/Q10.000 | 0,42 | 0,49 | 0,74 | 1,00 | 1,42 |
| C. Ralco | Qmi | 3.730 | 4.320 | 6.700 | 9.080 | 14.660 |
| | Qmi/Q10.000 | 0,41 | 0,48 | 0,74 | 1,00 | 1,61 |
| C. Pangué | Qmi | 4.750 | 5.450 | 8.000 | 10.600 | 14.400 |
| | Qmi/Q10.000 | 0,45 | 0,51 | 0,75 | 1,00 | 1,36 |

En la Figura N° 1 se han representado en papel doble logarítmico los cuocientes ($Q_{mi} / Q_{10.000}$) en función de Tr , hasta $Tr = 10.000$ años. A los puntos obtenidos en cada uno de los cuatro embalses considerados, se les ajustaron curvas, las que se extrapolaron hasta $Tr = 1.000.000$ años.

A continuación se dibujaron sobre las curvas, los valores correspondientes a los cuocientes (CMP / $Q_{10.000}$), determinándose que en los embalses Puclaro, Melado y Pangué, a la CMP le corresponde un Tr de alrededor de 300.000 años y en Ralco un Tr de 1.000.000 años.

Al observar los valores de la Tabla N° 1 se puede apreciar que la CMP estimada en Ralco estaría sobrestimada, ya que es mayor que la de Pangué, que se encuentra aguas abajo, por lo tanto, el Tr estimado también estaría sobrestimado.

De acuerdo a los análisis realizados, para estimar las CMP de origen hidrometeorológico se estimó razonable asumir que a éstas les corresponde un Tr de 300.000 años.

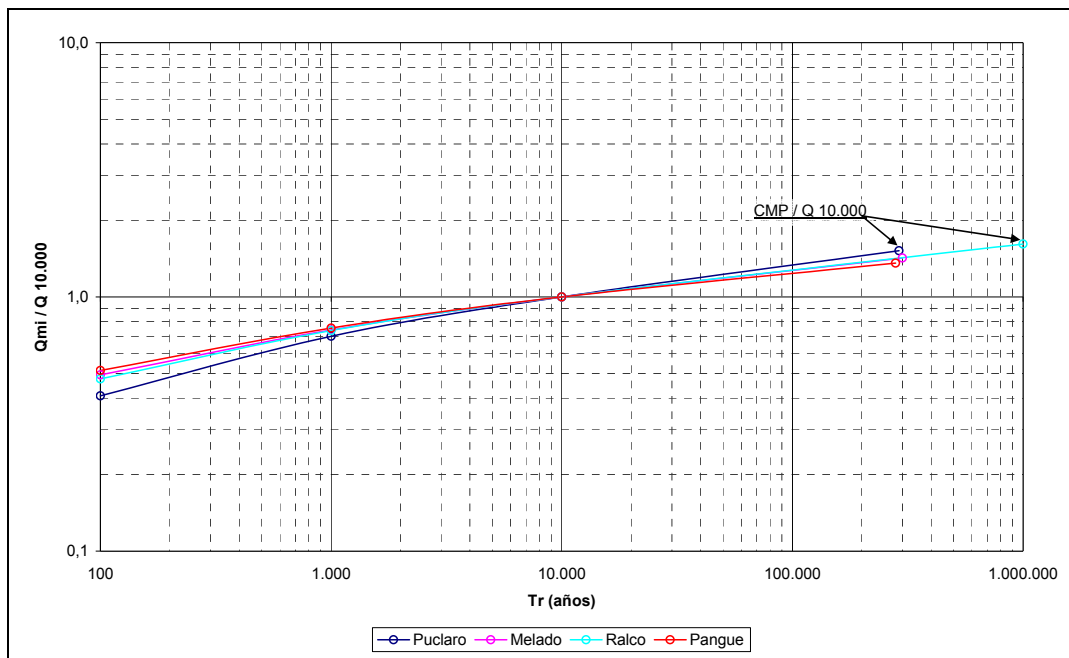


Figura N° 1 Análisis de frecuencia de Q_{mi} y CMP en diversos ríos de Chile

4. APLICACIÓN DEL MÉTODO EN RÍOS DE LA REGIÓN DE AYSÉN

4.1 Cálculo de los peak de las CMP en las centrales en el río Baker

En el Tabla N° 2 se incluyen los caudales máximos instantáneos para períodos de retorno 100, 1.000 y 10.000 años en los lugares de las presas en estudio, obtenidos en el Estudio Hidrológico (Ingendesa, 2007). Se muestran además, los cuocientes $K = (Q_{mi} / Q_{10.000})$.

Tabla N° 2
Análisis de frecuencia de Q_{mi} en centrales en el río Baker

| Central | Caudal | Tr (años) | | |
|----------------|---------------------|-----------|-------|--------|
| | | 100 | 1.000 | 10.000 |
| Baker 1 | Q_{mi} | 2.520 | 3.370 | 4.280 |
| | $Q_{mi}/Q_{10.000}$ | 0,59 | 0,79 | 1,00 |
| Baker 2 | Q_{mi} | 4.540 | 6.080 | 7.700 |
| | $Q_{mi}/Q_{10.000}$ | 0,59 | 0,79 | 1,00 |

En la Figura N° 2 se han representado en papel doble logarítmico, los cuocientes “K” correspondientes a cada central en función de Tr, hasta Tr = 10.000 años. A los puntos obtenidos en cada central se les ajustaron curvas, las que se extrapolaron hasta Tr = 300.000 años.

De estas curvas se obtienen los valores de “K” para Tr = 300.000 años que se indican a continuación y aplicando en cada caso la ecuación (2), los correspondientes peak de las CMP:

$$\begin{array}{ll} \text{C. Baker 1} & K = 1,30 & Q_{mi} \text{ (CMP)} = 5.500 \text{ m}^3/\text{s} \\ \text{C. Baker 2} & K = 1,30 & Q_{mi} \text{ (CMP)} = 10.000 \text{ m}^3/\text{s} \end{array}$$

Al comparar estos coeficientes con los obtenidos en otras regiones del país (Tabla N° 1), se puede apreciar que resultan valores levemente inferiores, lo que se puede explicar porque parte importante de las cuencas aportantes a estas centrales están reguladas por el lago General Carrera. Por otra parte, al determinar los cuocientes referidos a las crecidas milenarias (CMP / $Q_{1.000}$), se obtienen valores del orden de 1,64, levemente superiores a los determinados en Suiza, donde lo han estimado en 1,5 (Araya, R. 2006).

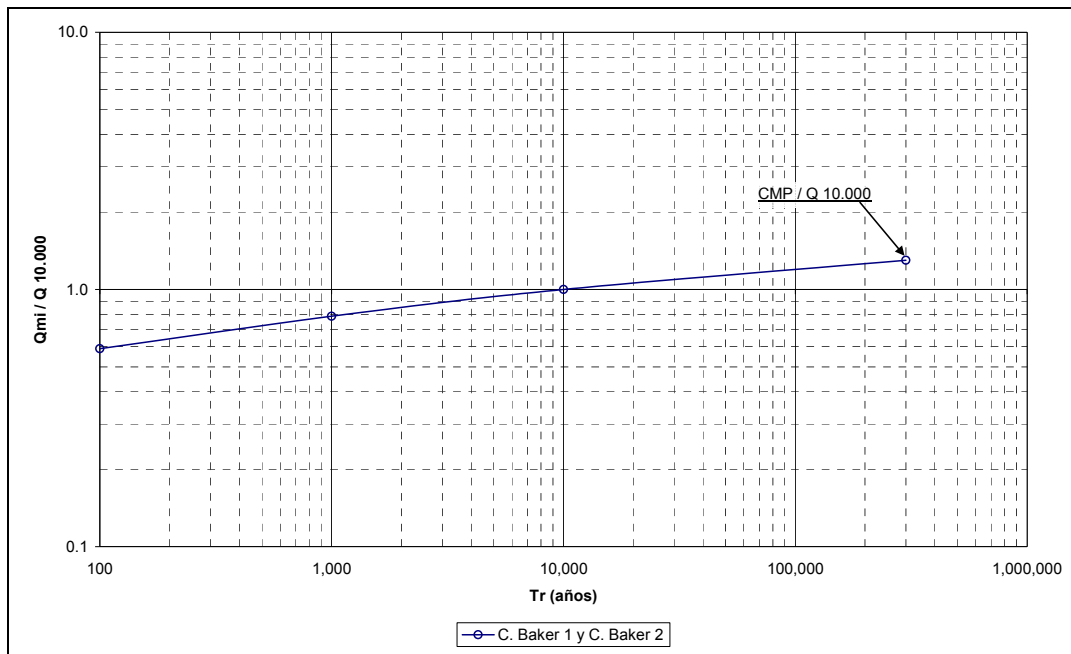


Figura N° 2 Centrales del río Baker. Análisis de frecuencia de Qmi (Qmi/Q 10.000)

4.2 Cálculo de los peak de las CMP en las centrales en el río Pascua

El procedimiento es el mismo que se utilizó en las centrales en el río Baker.

En la Tabla N° 3 se incluyen los caudales máximos instantáneos para períodos de retorno 100, 1.000 y 10.000 años en los lugares de las presas en estudio, obtenidos en el Estudio Hidrológico (Ingendesa, 2007). Se muestran además, los cuocientes $K = (Q_{mi} / Q_{10.000})$.

Tabla N° 3
Análisis de frecuencia de Qmi en centrales en el río Pascua

| Central | Caudal | Tr (años) | | |
|-------------------|-------------|-----------|-------|--------|
| | | 100 | 1.000 | 10.000 |
| Pascua 1 | Qmi | 1.380 | 1.600 | 1.820 |
| | Qmi/Q10.000 | 0,76 | 0,88 | 1,00 |
| Pascua 2.1 | Qmi | 1.960 | 2.310 | 2.660 |
| Pascua 2.2 | Qmi/Q10.000 | 0,74 | 0,87 | 1,00 |

En la Figura N° 3 se han representado en papel doble logarítmico, los cuocientes “K” correspondientes a cada central en función de Tr, hasta Tr = 10.000 años. A los puntos obtenidos en cada central se les ajustaron curvas, las que se extrapolaron hasta Tr = 300.000 años.

De estas curvas se obtienen los valores de “K” para $Tr = 300.000$ años que se indican a continuación y aplicando en cada caso la ecuación (2), los correspondientes peak de las CMP:

| | | |
|---------------|------------|---|
| C. Pascua 1 | $K = 1,20$ | $Q_{mi} (CMP) = 2.200 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| C. Pascua 2.1 | $K = 1,24$ | $Q_{mi} (CMP) = 3.300 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| C. Pascua 2.2 | $K = 1,24$ | $Q_{mi} (CMP) = 3.300 \text{ m}^3/\text{s}$ |

Estos coeficientes resultan inferiores a los obtenidos en el río Baker y en otras regiones del país, lo que se explica porque gran parte de las cuencas aportantes a estas centrales están reguladas por el lago O'Higgins, produciéndose un importante efecto de amortiguación de las crecidas. Además, éstas ocurren en el período de deshielo, es decir, son de evolución lenta y duran varios días.

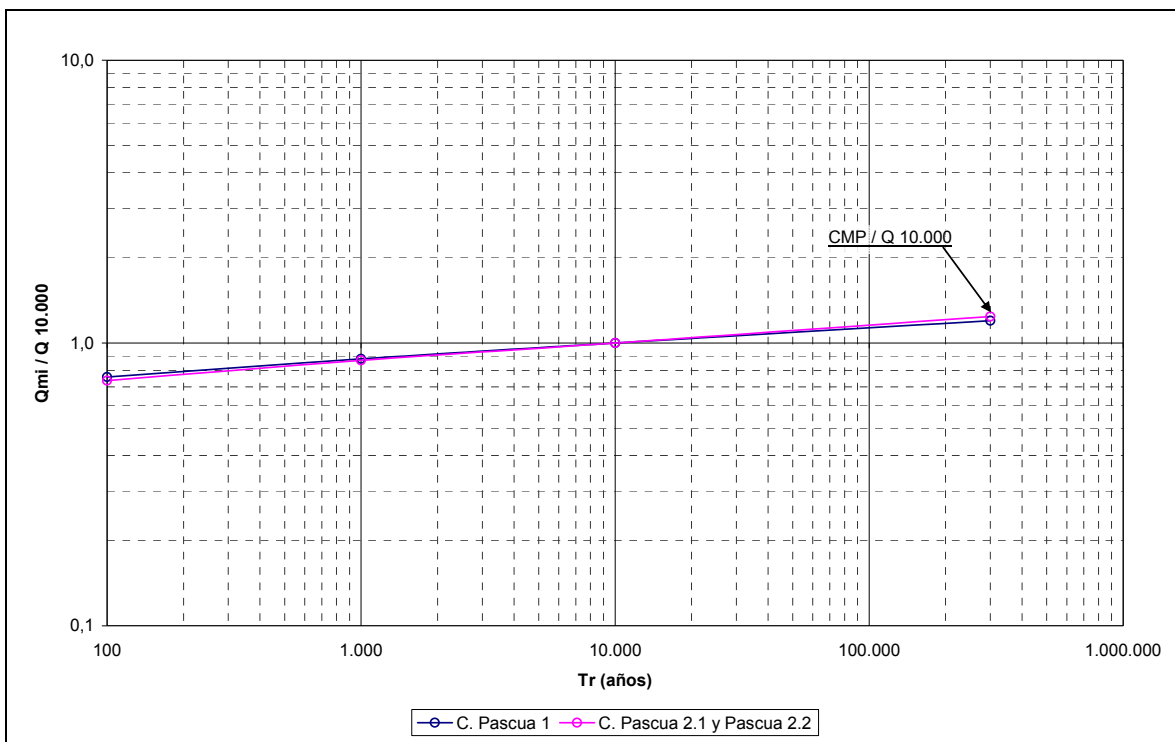


Figura N° 3 Centrales del río Pascua. Análisis de frecuencia de Q_{mi} ($Q_{mi}/Q_{10.000}$)

5. CONCLUSIONES

El método expuesto es de simple aplicación y permite obtener resultados confiables y razonables de la CMP de origen hidrometeorológico.

Se ha asociado la CMP al análisis de frecuencia de caudales máximos instantáneos (Q_{mi} vs Tr), obteniéndose para el peak de ésta, un período de retorno $Tr = 300.000$ años.

En el método se determina el coeficiente “K”, que relaciona el peak de la CMP con el caudal máximo instantáneo obtenido en el análisis de frecuencia para $Tr = 10.000$ años ($Q_{peak\ CMP} / Q_{mi}$ (10.000 años)) y se compara con los obtenidos en estudios realizados en diversos ríos de Chile.

Se ha aplicado el método en los ríos Baker y Pascua, en los lugares donde se estudian centrales de embalses del Proyecto Hidroeléctrico Aysén, obteniéndose valores del coeficiente “K” consistentes con los determinados en otros lugares del país.

Al analizar y asignar el valor del coeficiente “K” en un determinado río es necesario tomar en cuenta diversos factores, como la zona del país en que se ubica, características hidrometeorológicas en la cuenca (pluvial, nivo-pluvial, etc.) y existencia de regulaciones del caudal (lagos, embalses).

Tomando en cuenta los estudios de crecidas realizados a partir de las estadísticas existentes en las cuencas de los ríos Baker y Pascua; los análisis efectuados a partir de estudios de crecidas que incluyen el cálculo de la CMP, existentes en otras regiones de Chile; y los análisis de estudios de la CMP en otros países, se puede afirmar que los resultados obtenidos en este estudio presentan un buen grado de confiabilidad y el método puede ser aplicado en distintas regiones del país.

Las estimaciones de la CMP que se basen en la metodología expuesta podrán ir siendo más precisas en la medida que se incorporen al análisis nuevos estudios de la CMP que existan o se realicen en el país.

REFERENCIAS

Araya, R, 2006. Proyecto Hidroeléctrico Aysén. Evacuadores de Crecidas de las Presas – Conceptos Básicos para definir los Caudales de Diseño.

Consorcio de Ingeniería Ingendesa - EDIC LTDA., 1994. Proyecto Embalse Puclaro. Estudios Hidrológicos – Estudios Sísmicos, Volumen VII.

Endesa, 1988. Central Pangué. Estudio de los Recursos Hídricos. División Estudios Hidrológicos.

Endesa, 1989. Central Pangué. Determinación de la Crecida Máxima Probable por Métodos Hidrometeorológicos. División Estudios Hidrológicos.

Ingendesa, 1999. Proyecto Ralco. Determinación de la Crecida Máxima Probable por Métodos Hidrometeorológicos en la zona de la Presa.

Ingendesa, 2001. Proyecto Ralco. Estudio de los Recursos Hídricos.

Ingendesa, 2007. Proyecto Hidroeléctrico Aysén. Centrales en los ríos Baker y Pascua. Estudio Hidrológico – Actualización a marzo 2007.

MN Ingenieros, HARZA Engineering CO, 1981. Central Pehuenche. Estudio Hidrológico Presa Melado.