

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**DISEÑO HIDROLÓGICO EN CUENCAS DE RÉGIMEN MIXTO, INCERTIDUMBRE Y
CAMBIO CLIMÁTICO: EL CASO DEL EMBALSE PUCLARO**

MIGUEL LAGOS Z.¹
XIMENA VARGAS M.²

RESUMEN

En este estudio se contrastan los efectos de considerar distintas combinaciones de periodos de retorno de elevación de la línea de nieves y de precipitación en la generación de crecidas afluentes al embalse Puclaro respecto al diseño con el que se concibió del embalse. Del mismo modo se contesta la pregunta si tendría el cambio climático efectos en la determinación de las crecidas milenarias, deca-milenarias y la CMP para los escenarios climáticos A2 y B1 en el periodo 2045-2065.

Los resultados muestran que para el embalse Puclaro se proyectan los incrementos más severos de 85% y 81% en las crecidas de 1 000 y 10 000 años, mientras que la CMP proyecta incrementos de hasta 175.5% para el escenario A2 en el mismo embalse. Todos estos resultados, que además incluyen un análisis de incertidumbre estadística, permiten concluir que existe una vulnerabilidad en el diseño original del embalse Puclaro, dando luces de cómo enfocar futuros diseños hidrológicos de grandes obras hidráulicas como se ha comenzado a realizar en otras partes del mundo, de forma especial en cuencas de régimen hidrológico mixto que presentan una mayor complejidad en su análisis.

¹ Ingeniero Civil, MSc., Advanced Mining Technology Center, U. de Chile - miguel.lagos@amtc.uchile.cl

² Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, U. de Chile - xvargas@ing.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

La seguridad en las obras hidráulicas es un tema de interés fundamental, puesto que estudios muestran que durante los años 1963-1992 el mayor porcentaje a nivel mundial de personas afectadas frente a algún desastre natural así como de daños materiales y pérdidas humanas fue producto de inundaciones WMO (1994), de modo que la correcta aplicación de las metodologías para un adecuado diseño y construcción así como el monitoreo de la seguridad hidrológica de grandes obras en el tiempo, es un tópico de interés mundial.

En la actualidad, para el estudio de crecidas en cuencas de régimen hidrológico mixto, la determinación del área pluvial aportante está dada por el supuesto de una elevación de línea de nieve promedio, o dada por la construcción de Hidrogramas Unitarios (HU) en base a registros de lluvia y escorrentía. Los supuestos implicados en estas metodologías, no consideran la dinámica de las crecidas de origen pluvial en cuencas mixtas dados por la magnitud de los eventos de precipitación y su temperatura de ocurrencia; que pueden determinar por ejemplo, que lluvias de bajo periodo de retorno con condiciones térmicas cálidas, puedan generar crecidas más severas que aquellas obtenidas de tormentas de alto periodo de retorno pero con temperaturas bajas. De este modo, para determinar los efectos de una tormenta en estas cuencas, importa tanto la frecuencia de los eventos de precipitación así como las temperaturas de ocurrencia de estas que determinará, entre otros factores, la elevación de la línea de nieves.

La climatología histórica chilena ha sido estudiada con amplios registros a diferentes latitudes del territorio central de Chile por Carrasco et al. (2005) quienes muestran una disminución en la precipitación media anual y un aumento en las temperaturas máximas y mínimas que se coinciden con el estudio de Rösenbluth et al. (1997) quienes encontraron evidencia de tasas de calentamiento en Santiago de $+2.8^{\circ}\text{C}$ por siglo. Estas tasas se dan tanto en la alta cordillera como en el valle central donde el calentamiento medio es de $+1.8^{\circ}\text{C}$ por siglo (Falvey y Garreaud, 2009). Todo lo anterior trae como consecuencias un incremento en la elevación de la isoterma cero (Carrasco et al. 2008) y reducción de las superficies glaciares (Cassasa, 1995). Todo lo anterior se traduce en crecidas pluviales de mayor magnitud debido a una mayor área aportante.

El estudio IPCC (2007) señala que las intensidades de precipitación diarias podrían ser mayores que los históricos en zonas en las que incluso proyectan disminución en los montos anuales de lluvia. Del mismo modo estudios como Kharin et al. (2007) y Sugiyama et al. (2010) muestran que para eventos de baja probabilidad de excedencia existe un incremento de las intensidades de precipitación diaria. Dichos efectos combinados tendrán importantes efectos en el diseño hidrológico de obras, de modo que la cuantificación de estos efectos es un motivo importante a considerar en el desarrollo de este artículo.

En el presente artículo se determinan las crecidas de origen pluvial afluentes al embalse Puclaro milenarios y deca-milenarios así como la Crecida Máxima Probable (CMP) definida como respuesta de la Precipitación Máxima Probable (PMP), determinada según métodos estadísticos e hidrometeorológicos. Se evalúan además los posibles efectos del cambio climático en la magnitud de estas crecidas, comparando los caudales de diseño del embalse con las crecidas generadas en este estudio.

El objetivo general de este artículo, corresponde a contrastar las crecidas de diseño del embalse Puclaro con aquellas generadas bajo distintas combinaciones de periodo de retorno de precipitación (Pp) y temperatura y la CMP incluyendo un análisis de incertidumbre estadística y estudiando los potenciales efectos del cambio climático sirviendo como un llamado de alerta temprana sobre la importancia en la realización de estos estudios y su repercusión en la vulnerabilidad de obras hidráulicas en Chile tanto en el diseño hidrológico clásico como bajo potenciales escenarios climáticos futuros.

2. ZONA DE ESTUDIO

En la región de Coquimbo uno de los embalses principal corresponde al embalse Puclaro, ubicado en el río Elqui, de caudal medio anual 9,5 [m³/s] y de 31,2 [m³/s] promedio en el período de deshielo; este embalse tiene una capacidad de 200 millones de metros cúbicos y una capacidad de evacuar crecidas de 2.500 [m³/s]. Su clima concentra lluvias de promedio anual de 100 [mm] y temperaturas medias mensuales oscilan entre 14.5 y 20.1 [°C] en la estación Rivadavia (820 msnm); concentrándose el 80% de la lluvia entre mayo y agosto (Khalhoff et al. 2002).

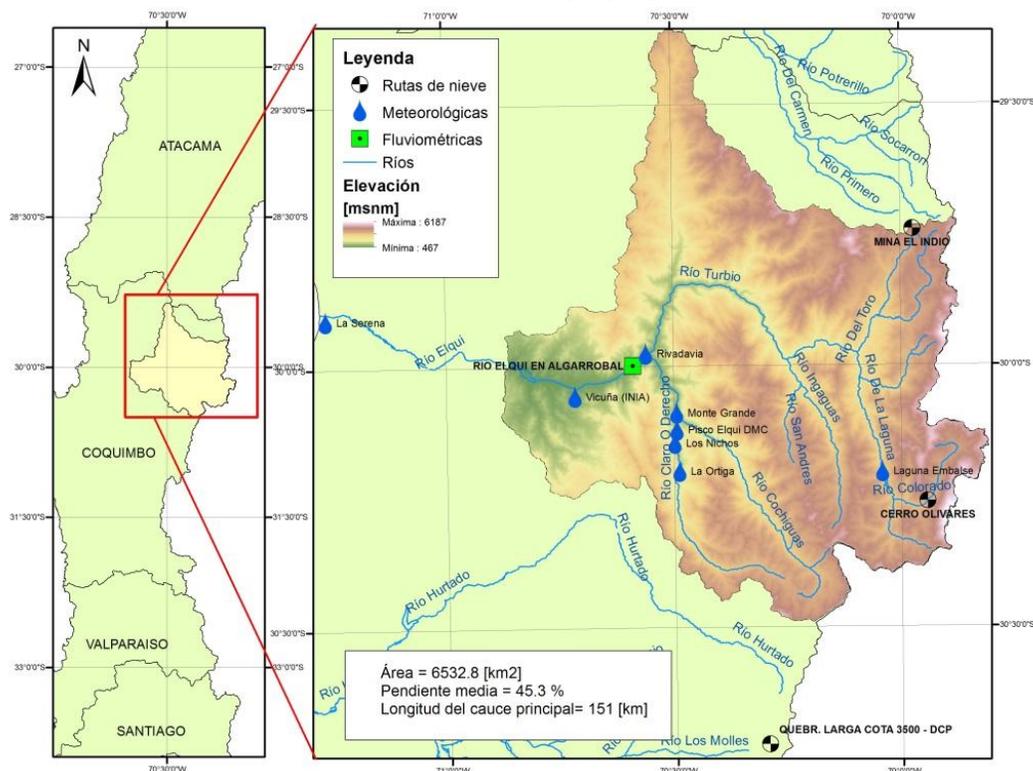


Figura 1: Ubicación general cuenca Puclaro (izquierda), modelo de elevación digital y ubicación de estaciones (derecha).

Las principales estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio se escogieron por tener un registro superior a 30 años. Sus coordenadas así como las variables que registran y la extensión de los mismos se listan en la Tabla 1, situadas espacialmente en el panel derecho de la Figura 1. Del mismo modo la estación fluviométrica y de rutas de nieve que se listan en la Tabla 2 (Los registros de rutas de nieve son intermitentes desde su año de inauguración, con ~1 registro anual).

Tabla 1: Estaciones Meteorológicas en zona en estudio. N: Longitud de registro, Precipitación: Pp, Temp: Temperatura, HR: Humedad Relativa.

Nombre	UTM N [m]	UTM E [m]	Altitud [msnm]	N	Variable
Vicuña INIA	6 673 645	334 506	730	40	Pp
Rivadavia	6 682 825	349 469	820	57	Pp, Temp. y HR
Monte Grande	6 670 313	356 032	1 120	50	Pp
Pisco Elqui DMC	6 666 743	356 133	1 250	32	Pp
Los Nichos	6 663 904	355 688	1 330	32	Pp
La Ortiga	6 657 957	356 723	1 560	32	Pp, Temp. y HR.
Laguna Embalse	6 658 116	399 735	3 160	47	Pp, Temp. y HR.
La Serena	6 689 311	281 581	15	57	Pp, Temp. y HR.

Tabla 2: Estación fluviométrica y de rutas de nieve. Q: Caudales, RN: Ruta de nieve.

Nombre	UTM N [m]	UTM E [m]	Altitud [msnm]	N	Variable
Río Elqui en Algarrobal	6 680 298	346 744	760	41	Q
Cerro Olivares	6651902.33152	409308.583604	3550	39	RN
Mina El Indio	6709624.64388	405944.631366	4300	32	RN
Quebrada Larga	6600162.8347	375967.620714	3500	57	RN

3. METODOLOGÍA

3.1. DETERMINACIÓN DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN

Los eventos extremos de precipitación que dan origen a las crecidas en estudio se evalúan principalmente con la serie de registros de precipitaciones máximas diarias anuales, realizando un análisis de frecuencia para cada estación así como para determinar la PMP según el método de Hershfield (1961, 1965), descrito por la ecuación (1) con las consideraciones de WMO (2009).

En el caso de la determinación de la PMP según métodos hidrometeorológicos (WMO, 2009), se estudia un enfoque de la PMP basado en la cuenca (HM1), descrito por la ecuación (2) el cual considera la eficiencia de todas las tormentas históricas. El otro enfoque analizado se basa en un enfoque tradicional según la determinación de las curvas Precipitación Duración Área (PDA) para eventos extremos registrados (WMO, 1969), maximizadas por un factor de humedad (HM2), descrito por la ecuación (3).

$$PMP_{Hersh} = \bar{X}_n + K_m \cdot S_n \quad (1)$$

$$PMP_{HM1} = \left(\frac{Pp}{W_{in} \cdot t} \right)_m \cdot t \cdot W_{in-m} \quad (2)$$

$$PMP_{HM2} = \frac{W_{in-m}}{W_{in}} \cdot PDA \quad (3)$$

Donde:

\bar{X}_n, S_n : Promedio y desviación estándar de lluvias máximas anuales de 24 hrs.

K_m : Factor de frecuencia ajustado en función de la lluvia media anual

Pp : Precipitación observada en la duración t .

W_{in} : Agua precipitable observada en la tormenta, donde $-m$, denota $T = 100$ años.

3.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE PRECIPITACIÓN

Con el fin de poder cuantificar las áreas pluviales aportantes que determinen la magnitud de las crecidas en el embalse Puclaro, se utilizan estimaciones indirectas basadas en registros de temperatura propuesto por Garreaud (1993). Para el caso de la determinación del área pluvial aportante en la determinación de la CMP, se considera como criterio hidrometeorológico la elevación de la isoterma cero de $T=100$ años en los escenarios LB, A2 y B1.

Para la distribución espacial de precipitación en el caso de las crecidas milenarias y decamilenarias se optó, por utilizar los polígonos de Thiessen, mientras que para el estudio de la CMP se utilizó una distribución en base a las isoyetas anuales del estudio DGA (1987) corregidas por gradientes orográficos de precipitación en base a registros de estaciones meteorológicas y de rutas de nieve en la dirección preferencial del viento (NW). La distribución temporal de la precipitación se determinó mediante las distribuciones de Varas (1985), Grupo II.

3.3. DETERMINACIÓN DE LAS CRECIDAS DE $T=1\ 000$, $10\ 000$ AÑOS Y CMP

Las crecidas calculadas para el embalse Puclaro se determinaron mediante el empleo del Hidrograma Unitario Sintético tipo Snyder, cuyos parámetros fueron calibrados para la cuarta región según el estudio MOP (1995). Estos hidrogramas sintéticos resultaron similares a los hidrogramas unitarios construidos en la cuenca para el diseño del embalse Puclaro (MOP, 1994).

Para las crecidas de periodo de retorno de $1\ 000$ y $10\ 000$ años se analizaron distintas combinaciones de frecuencias de precipitación y elevación de la línea de nieve (H_{LN}) listadas en la Tabla 3 que bajo el supuesto de independencia estadística entre las variables de precipitación y temperatura estaría dado por la ecuación (4). Esta expresión es derivable del estudio de Seguel y Stowhas (1985) y sería válida para altos periodos de retorno, despreciando los efectos de otras variables; si bien es cierto que existen infinitas combinaciones de $T_{Precipitación}$ y $T_{Línea\ de\ nieves}$ para esta formulación que entreguen crecidas resultantes de igual periodo de retorno, solo se estudian cuatro combinaciones en este estudio. El supuesto de independencia entre las variables de precipitación y temperatura (de la cual se deriva H_{LN}), fue verificado mediante el test de t-student (Lagos y Vargas, 2013).

$$T_{crecida} \approx T_{Precipitación} \cdot T_{Línea\ de\ nieves} \quad (4)$$

Tabla 3: Combinaciones de periodos de retorno de elevación H_{LN} y Pp

Crecida de $T=1\ 000$ años		Crecida de $T=10\ 000$ años	
T Pp [años]	T H_{LN} [años]	T Pp [años]	T H_{LN} [años]
1 000	1	10 000	1
500	2	5 000	2
100	10	1 000	10
20	50	200	50

Los HUS correspondientes para la CMP se estimaron en base a elevación de la isoterma cero de periodo de retorno de 100 años. Para determinar la razonabilidad de las estimaciones de la CMP, se comparan los resultados obtenidos con eventos pluviales y de deshielo así como la envolvente

de las crecidas más severas registradas a nivel mundial que para el área total de la cuenca Puclaro corresponde a $Q_{Env} = 29\ 448\ [m^3/s]$ (Wang et al. 2005). Se comparan además con los cuocientes entre las crecidas deca-milenarias y la CMP recopilados por King y Tapia (2009, 2011).

3.4. PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

El proceso de escalamiento utilizado y los GCM seleccionados corresponden a los descritos por Lagos y Vargas (2011). Para eventos de periodo de retorno de 1 000 y 10 000 años se realizó un análisis de frecuencia estándar tanto en la línea base como en el período futuro 2045-2065 para las estaciones más cercanas y de registro extenso en la cuenca Puclaro.

La variabilidad de la PMP-Hershfield y de los eventos de precipitación de $T=1\ 000$ y $10\ 000$ años corresponden a las encontradas por Lagos y Vargas (2011) añadiéndose en este estudio las proyecciones de PMP - HM1 y HM2. Para los métodos hidro-meteorológicos solo se utilizó el modelo ECHAM5 debido a su habilidad de reproducir tanto la estacionalidad de la climatología local así como la magnitud de las variables meteorológicas en estudio. En estos últimos casos, se consideran las proyecciones de las series previamente escaladas de temperatura y temperatura de punto de rocío en los escenarios A2 y B1.

En las crecidas milenarias y deca-milenarias, se utilizan los resultados de proyecciones de precipitación obtenidas de los procedimientos anteriores y las proyecciones de temperatura de Maurer et al. (2007) en periodo invernal, que determinarán el HUS a utilizar en cada caso. Los posibles escenarios de evaluación de cambio para esta crecida se muestran en la Tabla 4.

Las proyecciones de CMP se calculan acoplando los efectos de la PMP obtenida con métodos estadísticos e hidrometeorológicos con los HUS generados por las proyecciones de temperatura del modelo ECHAM5 y sus efectos en la elevación de la isoterma cero de periodo de retorno 100 años, que genera nuevas áreas pluviales aportantes para cada escenario de cambio climático.

Tabla 4: Sub escenarios considerados para evaluar las variaciones de crecidas invernales de origen pluvial en la cuenca Puclaro.

Sub-escenario	Proyecciones consideradas para los escenarios A2 y B1
1	ΔPp . promedio considerando H_{LN} del periodo LB
2	$\Delta Temp$. máxima, considerando observaciones de Pp del periodo LB
3	$\Delta Temp$. media, considerando observaciones de Pp del periodo LB
4	$\Delta Temp$. mínima, considerando observaciones de Pp del periodo LB
5	$\Delta Temp$. máxima,, considerando ΔPp promedio.
6	$\Delta Temp$. media, considerando ΔPp promedio.
7	$\Delta Temp$. mínima, considerando ΔPp promedio.

4. RESULTADOS

4.1. CRECIDAS MILENARIAS Y DECA-MILENARIAS

Las crecidas de origen pluvial y de deshielo para distintos periodos de retorno obtenidas en forma estadística, así como sus respectivos intervalos de confianza, se muestran en la Figura 2, en donde se aprecia que las crecidas de deshielo son las que generan condiciones más severas.

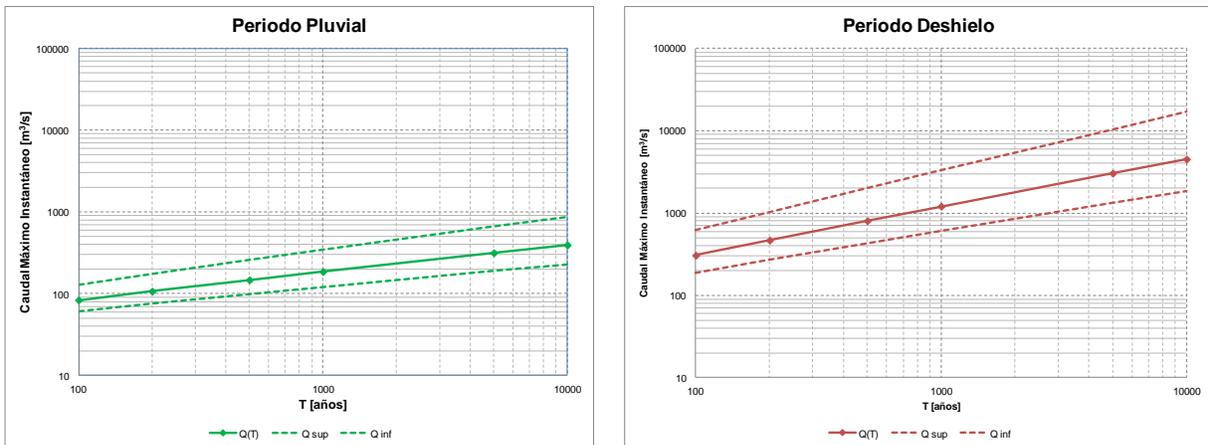


Figura 1: Análisis de frecuencias para crecidas de origen pluvial (izquierda) y de origen de deshielo (derecha) afluentes al embalse Puclaro

De las combinaciones entre H_{LN} y la magnitud de precipitación listadas en la Tabla 4, las crecidas de origen pluvial de $T=1\ 000$ y $10\ 000$ años se muestran en la Tabla 5 en donde además se comparan los resultados obtenidos con las determinadas en el diseño del embalse (MOP, 1994).

Tabla 5: Comparación de caudales máximos instantáneos de crecidas de origen pluvial obtenido según distintas combinaciones de periodo de retorno de H_{LN} y precipitación.

T crecida [años]	Diseño Puclaro MOP (1994) [m ³ /s]	T de H_{LN} [años]				ΔQ
		~1	2	10	50	
1 000	1 750	785	1 399	1 478	1 074	-56.7 % a -15.5%
10 000	2 500	1 185	2 231	2 747	2 720	-52.6 % a +9.9 %

4.2. PRECIPITACIÓN MÁXIMA PROBABLE

En la Tabla 6 se muestran los resultados de la PMP obtenida mediante los métodos de Hershfield e hidrometeorológicos HM1 y HM2. Estos valores están referidos al área inducida por una elevación de isoterma cero de $3\ 700$ [msnm], dada por la temperatura media diaria en día de lluvia de 100 años de periodo de retorno.

Tabla 6: PMP y tormentas diarias de $T=1\ 000$ y $10\ 000$ años en el periodo LB (1961-1999).

Método de estimación	Precipitación 24 horas [mm]
PMP Hershfield	1 004
PMP HM1	410
PMP HM2	267
T=1 000 años	259
T=10 000 años	323

4.3. CRECIDA MÁXIMA PROBABLE

En la Tabla 7 se muestra la comparación para el periodo histórico de los cuocientes entre la CMP determinada por distintos métodos y las crecidas de periodo de retorno 10 000 estimadas mediante análisis de frecuencia (AF) para los periodos invernales y de deshielo, así como las obtenidas al considerar combinaciones de frecuencia de H_{LN} y precipitación (Pp- H_{LN} -HUS). Se comparan además las CMP obtenidas junto con la crecida de diseño y Q_{Env} .

Tabla 7: Comparación del caudal máximo instantáneo (Q_{mi}) de la CMP obtenida con distintos métodos con la crecida de 10 000 años de periodo de y la Q_{Env} .

Método de estimación CMP	Q_{mi} CMP [m ³ /s]	CMP/ $Q_{10\ 000}$ (AF Deshielos)	CMP/ $Q_{10\ 000}$ (Pp- H_{LN} -HUS)	CMP/ Q_{Env}
PMP - Hershfield	32 208	7.14	11.72	1.09
PMP - HM1	11 046	2.45	4.02	0.38
PMP - HM2	6 135	1.36	2.23	0.21
Diseño MOP (1994)	3 700	0.82	1.35	0.13

4.4. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

4.4.1. PROYECCIONES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA

Las proyecciones de precipitación encontradas en Lagos y Vargas (2011) mostraron en general mayores los incrementos en mediana en el escenario B1 que en el A2, siendo en promedio para eventos de T=10 000 años cercana al 45% para el promedio de las 7 estaciones dentro de la cuenca. En el caso de las variaciones de PMP estadística proyectadas para cada escenario se alcanza un incremento en la mediana de +12 y +5% para los escenarios A2 y B1 respectivamente.

Los efectos que tienen los incrementos de temperatura invernales proyectados por Maurer et al. (2007) para los escenarios A2 y B1, tienen un efecto muy significativo tanto en el área pluvial aportante como en la de H_{LN} cuyas variaciones promedio se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: H_{LN} en escenarios LB, A2 y B1 y el incremento resultante en el área aportante.

T [años]	H_{LN} [msnm]			Incremento de área aportante	
	LB	B1: LB+1.3 °C	A2: LB+1.8 °C	B1: LB + 1.3 °C	A2: LB + 1.8 °C
~1	1 700	1 900	2 000	20.2%	31.0%
2	2 600	2 900	3 000	23.5%	33.1%
10	3 400	3 700	3 800	20.7%	29.1%
50	4 000	4 300	4 300	16.4%	16.4%

4.4.2. PROYECCIONES DE CRECIDAS AFLUENTES AL EMBALSE PUCLARO

En la Figura 2 se muestran las mayores variaciones en el caudal máximo producidas según los sub escenarios listados en la Tabla 3 para la crecida de T= 10 000 años. Apreciándose que los incrementos más severos en las crecidas se dan en el escenario A2 y son principalmente efecto de los incrementos de temperatura, que inducen en promedio caudales un 25% respecto al escenario

LB. Los resultados obtenidos para la crecida milenaria son similares y por ende se omiten en este estudio.

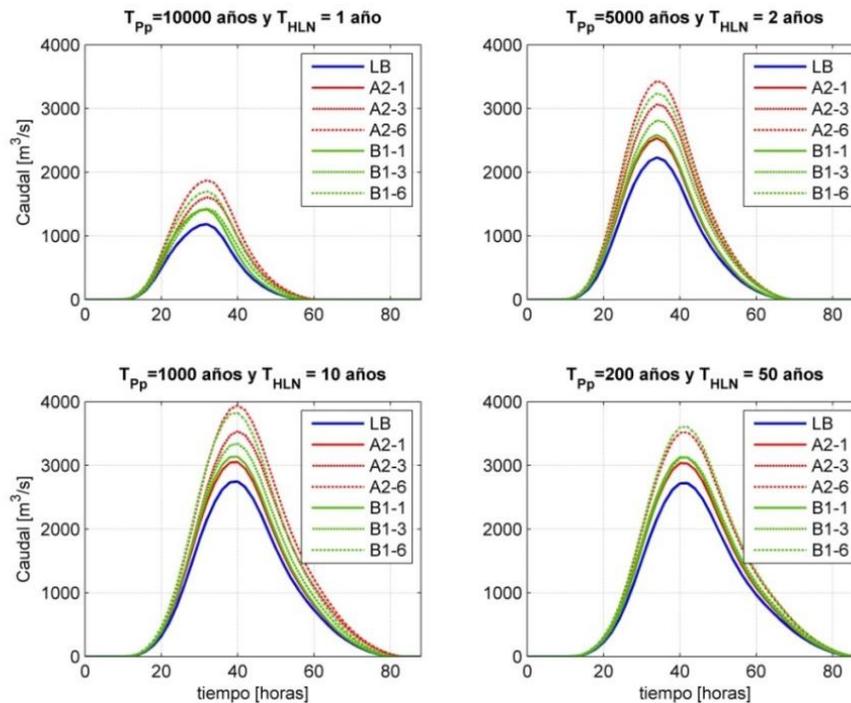


Figura 2: Crecidas de T=10 000 años, para distribución 10% de Varas (1985) Grupo II.

4.4.3. PROYECCIONES DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA PROBABLE

La sensibilidad climática de la PMP sobre el área pluvial aportante en el embalse Puclaro dependerá principalmente de las proyecciones de variación de precipitación y la temperatura media a la que ocurren estos eventos, que para el modelo ECHAM5, se muestran en la Figura 3.

El incremento de temperaturas en días de lluvia, generaría una nueva elevación de la isoterma cero, obtenido al considerar un gradiente adiabático húmedo igual al estimado en el periodo LB de $-5.55^{\circ}\text{C}/\text{km}$ de 4 260 y 4 080 [msnm] para los escenarios A2 y B1 respectivamente. En la Tabla 9 se resumen las estimaciones de la PMP según el método de Hershfield y los métodos hidrometeorológicos HM1 y HM2 en la cuenca Puclaro para condiciones de cambio climático en los escenarios A2 y B1, así como sus incrementos relativos respecto al periodo LB.

Tabla 9: Estimaciones de PMP 24 horas para escenarios LB, A2 y B1 en periodo (2045-2065) promedio en la cuenca Puclaro

Método de estimación	Elevación de la isoterma cero [msnm]			Variación porcentual	
	LB: 3700	A2: 4260	B1: 4080	A2	B1
PMP Hershfield [mm]	1004	1309	1207	+30.4%	+20.2%
PMP HM1 [mm]	410	670	608	+63.4%	+48.3%
PMP HM2 [mm]	267	605	434	+126.6%	+62.5%

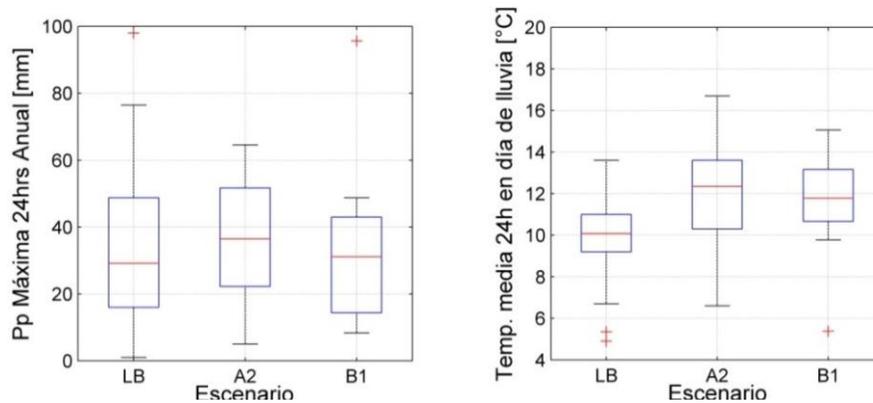


Figura 3: Proyecciones del modelo ECHAM5 para precipitación (izquierda) y temperatura media (derecha) en eventos de lluvia diaria máxima anual en los escenarios LB, A2 y B1.

4.4.4. PROYECCIONES DE CMP AFLUENTE AL EMBALSE PUCLARO

La Figura 4 muestra los hidrogramas de crecida que originaría la PMP para los escenarios LB, A2 y B1 según las metodologías hidrometeorológicas HM1 y HM2. Se tiene que para ambos métodos la CMP presentaría aumentos significativos en los caudales máximos instantáneos. Las variaciones porcentuales de caudal máximo instantáneo y volumen de escorrentía directa se aprecian en la Tabla 10, que además incluye estas variaciones para el método estadístico de Hershfield.

Tabla 10: Diferencias respecto al periodo LB en la estimación de CMP en condiciones de humedad antecedente normal

Método de PMP para estimar CMP	Variación de caudal máximo instantáneo		Variación de Volumen de escorrentía directa	
	A2	B1	A2	B1
Hershfield	+27.2%	+17.3%	+34.7	+23.1%
HM1	+72.7%	+55.9%	+85.8%	+65.7%
HM2	+175.5%	+84.8%	+200.0%	+96.5%

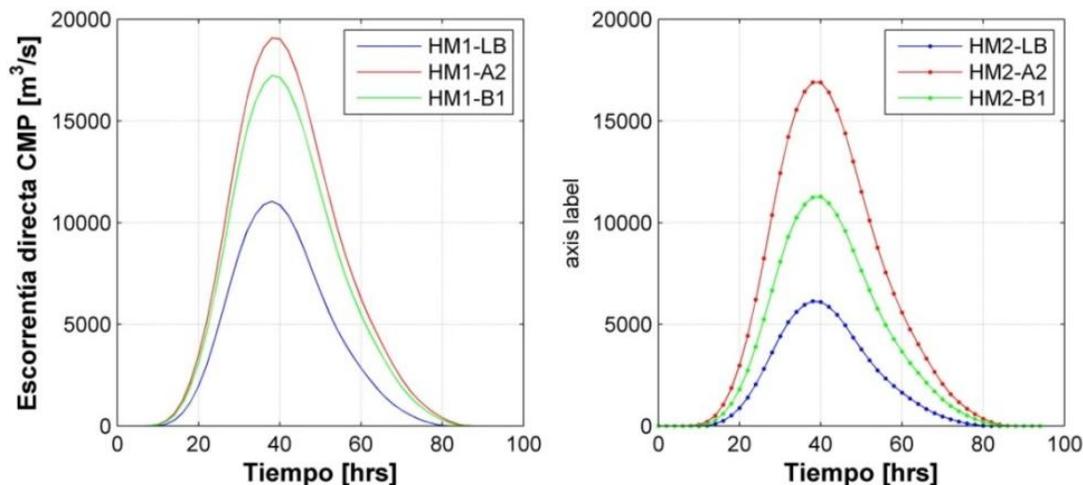


Figura 4: CMP afluentes al embalse Puclaro obtenidas mediante métodos hidrometeorológicos en escenarios LB, A2 y B1

4.5. INCERTIDUMBRE EN LAS ESTIMACIONES CALCULADAS

4.5.1. INCERTIDUMBRE EN LAS CRECIDAS PLUVIALES ESTIMADAS

En general existe una gran dispersión de valores de caudal máximo instantáneo, como se muestra en la Figura 5, proyectándose un aumento en mediana de +24% y +23.8% para la crecida de 1 000 años en los escenarios A2 y B1, mientras que en los mismos escenarios para la crecida deca milenaria, se proyectan incrementos en mediana de +24.9% y 23.2% respectivamente, en relación con la línea base.

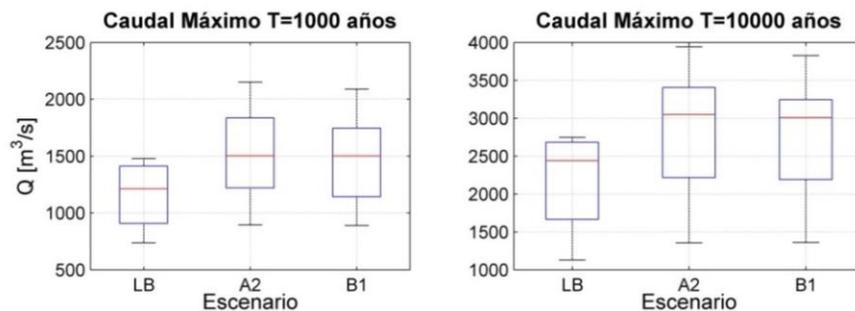


Figura 5: Comparación de crecidas de 1 000 y 10 000 años en caudal máximo para cada escenario climático analizado afluentes al embalse Puclaro.

4.5.2. INCERTIDUMBRE EN LAS ESTIMACIONES DE LA PMP Y CMP

Para el caso de las estimaciones de PMP mediante métodos hidrometeorológicos, se presenta en la Figura 6 el rango de posibles valores que se podrían obtener en cada escenario según los métodos empleados, incorporando los intervalos de confianza del 95% de los factores de maximización utilizados.

La Figura 7 presenta el rango de variabilidad de caudales máximos instantáneos de CMP que incorpora las variaciones de condiciones de humedad antecedente, probabilidad de excedencia de la distribución temporal de lluvia según las distribuciones de Varas (1985) y los rangos de variación de las estimaciones de PMP según los métodos HM1 y HM2. Se aprecia del amplio rango de variación del método HM1, que para el escenario A2 se alcanzaría el caudal envolvente de Wang et al. (2005).

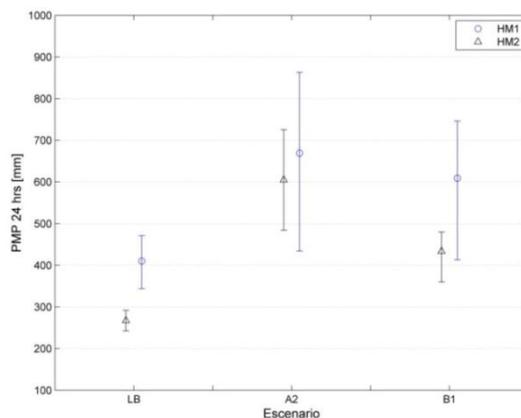


Figura 6: Rangos de variación de valores de PMP media diaria sobre el área pluvial para una elevación de isoterma cero de periodo de retorno 100 años en los escenarios BL, A2 y B1.

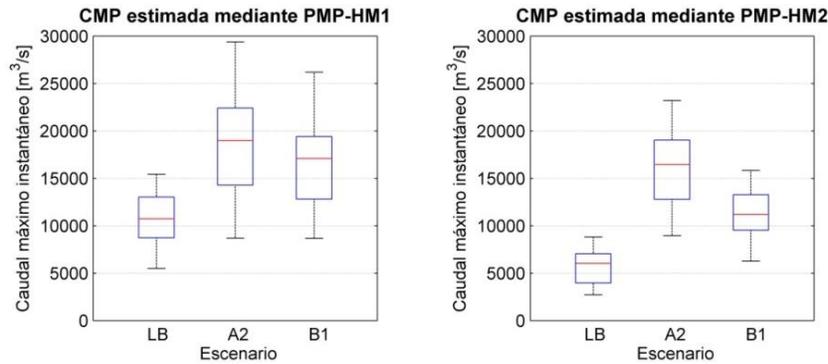


Figura 7: Rangos de variación del caudal máximo instantáneo de la CMP afluente al embalse Puclaro según métodos HM1 (izquierda) y HM2 (derecha).

5. DISCUSIÓN

El estudio MOP (1994), consideró una H_{LN} de aproximadamente 2 años y por ende las crecidas calculadas en dicho estudio, bajo el supuesto de independencia, corresponderían al considerar válida la aproximación de la ecuación (4), a crecidas del orden de 2 000 y 20 000 años respectivamente. Sin embargo, en la Tabla 4 se muestra que una precipitación de 1 000 años combinada con una H_{LN} de periodo de retorno de 10 años, puede producir una crecida un 10% mayor en caudal máximo respecto al caudal de diseño del embalse, y un 30% superior a aquella estimada con una precipitación de 10 000 años y H_{LN} de frecuencia alta (~ 1 año).

Otra consideración importante que ha de hacerse es considerar gradientes adiabáticos correctos en los estudios, puesto que en el estudio del embalse Puclaro se consideró una atmósfera estándar que decae térmicamente a -6.5 °C/km siendo que con los registros se tiene un gradiente promedio de -5.55 °C/km que hubiera resultado en resultados más conservadores.

De la Tabla 7 se aprecia que las crecidas de origen de deshielo de periodo de retorno 10 000 años del análisis de frecuencia alcanzan el valor de CMP estimado en el diseño del embalse, y la crecida más severa obtenida según la Tabla 5 no alcanzan los valores de CMP, según ningún método. En el caso de las crecidas de deshielo, el método HM2 entra en el nivel de confianza de crecidas de 2 500 años de origen de deshielo (Figura 2). El método HM1 por su parte entra en el nivel de confianza de las crecidas del orden de 5 500 años (Figura 2).

Debido a que la metodología de Hershfield entrega crecidas mayores a la envolvente de crecidas mundiales históricas, se considera este enfoque como poco realista para la zona en estudio. En este sentido la metodología propuesta por Stowhas (1983) de fijar un factor de frecuencia igual a 11 podría haber entregado valores más realistas. De acuerdo al estudio de Lagos y Vargas (2011) según la metodología de Stowhas (1983), para la región de Coquimbo se tendrían estimaciones de PMP un 35% inferiores a las de la metodología propuesta por Hershfield, en este sentido, de la Tabla 4, considerando esta misma variación se habría obtenido en la línea base una PMP incluso un 60% mayor que el método hidro-meteorológico más conservador, lo que permite concluir que en efecto esta metodología sigue siendo muy conservadora, al menos para la zona en estudio.

Los factores de CMP/Q_{10000} , se encuentran dentro de rangos de estudios recopilados en King y Tapia (2009, 2011), que en cuencas chilenas nunca superó el valor de 2, por lo que dichas

estimaciones serían adecuadas, siendo el método HM1 el más conservador. Si se maximizara además el método HM2 por un factor de viento (WMO, 2009), probablemente se tendrían valores similares entre ambos criterios.

Las condiciones de cambio climático inducen incrementos en caudal máximo de hasta un +85% y +81% mayores respecto al periodo LB para las crecidas de 1 000 y 10 000 años respectivamente. En el caso de la CMP por su parte, se proyecta un incremento en caudal máximo instantáneo para el método HM1 de hasta un +76% en el escenario B1 mientras que en el método HM2 se proyectan variaciones de hasta un +175% en el escenario A2. Con esto se puede concluir que el supuesto de invariabilidad climática en el tiempo, ya no es un supuesto que puede ser considerado válido en un planeta en evidente proceso de calentamiento (IPCC, 2007).

De la experiencia adquirida en la realización de este estudio y en la revisión de estudios hidrológicos y meteorológicos que determinan crecidas en cuencas Andinas de régimen hidrológico mixto, se propone un diagrama general ilustrado en la Figura 8, a modo de cuantificar de forma más adecuada las posibles crecidas de diseño, favoreciendo un dimensionamiento que considere efectos de incertidumbre y de cambio climático, teniendo así mayor seguridad en la concepción de obras hidráulicas, especialmente de grandes dimensiones. Los resultados obtenidos siempre deben verificarse con la compatibilidad climática de la ocurrencia de ciertos eventos de precipitación con áreas pluviales aportantes que pueden estar delimitadas por varios criterios meteorológicos.

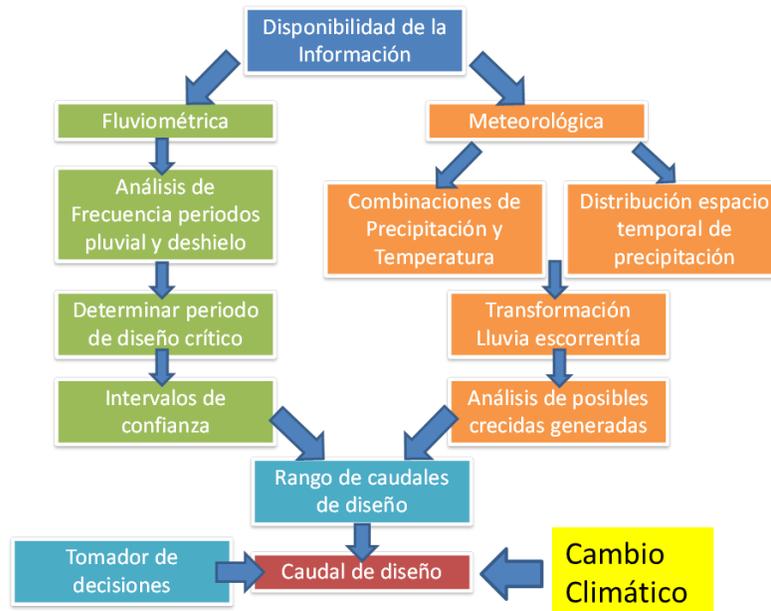


Figura 8: Diagrama general para la estimación de crecidas pluviales en cuencas de régimen hidrológico mixto

5. CONCLUSIONES

El estudio realizado entrega diversos aportes al cálculo de crecidas en cuencas de régimen hidrológico mixto, concluyendo que estos deben hacerse considerando variaciones de la elevación de la línea de nieves en conjunto con análisis de precipitaciones a modo de estudiar

varias combinaciones posibles para una crecida asociada a una probabilidad de excedencia conjunta entre estas dos variables.

Proyecciones de cambio climático muestran que existe un incremento en la temperatura invernal y precipitación máxima diaria anual para la cuenca del embalse Puclaro. En caso de proyectarse disminución en la intensidad de las tormentas son los incrementos de temperatura los que predominan en la formación de crecidas más severas en términos de caudal máximo y volumen de escorrentía, como se constató para este caso de estudio en las crecidas milenarias, decamilenarias y la CMP. Siendo estos efectos más sensibles en cuencas cuya topografía determine que pequeñas variaciones de la elevación de la línea de nieves induzca importantes variaciones de área pluvial aportante, como en el caso de la cuenca del Puclaro.

Los resultados encontrados en este estudio, pueden ser generalizados a zonas de similares proyecciones de cambio climático, régimen hidrológico mixto y amplios rangos de elevación y características topográficas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección General de Aguas y a la Dirección Meteorológica de Chile a través de su ley de transparencia por proveer la información meteorológica necesaria para realizar este estudio.

REFERENCIAS

Carrasco, J., Cassasa, G. Y Quintana, J. 2005. Changes of the 0° isotherm and the equilibrium line altitude in Central Chile during the last quarter of the 20th century. *Journal of Hydrological Sciences*. Vol. 50(6) , pp.933-948.

Carrasco, J., Osorio, R. Y Cassasa, G. 2008. Secular trend of the equilibrium-line altitude on the western side of the southern Andes, derived from radiosonde and surface observations. *Journal of Glaciology*. Vol 54 , pp. 186.

Cassasa, G. 1995. Glacier inventory in Chile: current status and recent glacier variations. *Ann. Glaciol.* Vol. 21 , pp.317-322.

Dirección General de Aguas (DGA). 1987. Balance Hídrico de Chile. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

Falvey, M., and R. D. Garreaud (2009), Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006), *J. Geophys. Res.*, 114, D04102, doi:10.1029/2008JD010519.

Garreaud, R. 1993. Impacto de la variabilidad de la línea de nieve en crecidas invernales en cuencas pluvio-nivales de Chile Central. En XI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Octubre, Concepción.

Hershfield, D. 1961. Estimating the Probable Maximum Precipitation. *J. of the Proceedings of the American Society of Civil Engineers* , 99-116.

Hershfield, D. 1965. Method for Estimating Probable Maximum Rainfall. *J. Am. Waterworks Assoc* 57 , 965-972.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Khalthoff, N., Bischoff-Gauß, I., Fiebig-Wittmaack, M., Fiedler, F., Thürauf, J., Novoa, E., Pizarro, C., Castillo, R., Gallardo, L., Rondanelli, R. and M. Kohler. 2002. Mesoscale Wind Regimes in Chile at 30°S. American Meteorological Society. Vol 41 pp 953-970.

Kharin, V., FW. Zwiers, X. Zhang y GC. Hegerl. 2007. Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations. *J Climate*, 20:1419–1444.

King, H Y Tapia, R. 2011. Análisis de la determinación de la crecida máxima probable y de la determinación del caudal de diseño de obras de evacuación de grandes presas. En XX congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.

King, H Y Tapia, R. 2009. Estimación de crecidas máximas probables de origen hidrometeorológico. En XIX congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.

Lagos, Miguel y Vargas, Ximena. 2013. Potenciales influencias del cambio climático en crecidas pluviales en una cuenca andina. *Revista Ciencia y Tecnología del Agua*. Enviado julio 2012. Aceptado 20 de junio de 2013. A publicar en Volumen V, número 2. 2014.

Lagos y Vargas. 2011. Variación de eventos extremos de precipitación diaria proyectados a mediados del siglo XXI, resultados en regiones de Coquimbo y Maule. Presentado en el XX Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.

Maurer, E., Brekke, L., Priutt, T., and Duffy, P. B. 2007. Fine-resolution climate projections enhance regional climate change impact studies. *Eos Trans. AGU*, 88 (47) , 504.

Ministerio de Obras Públicas, (MOP), República de Chile. 1995. Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica. Dirección General de Aguas.

Ministerio de Obras Públicas (MOP), República de Chile. 1994. Proyecto Embalse Puclaro. Consorcio de Ingeniería INGENDESA-EDIC Ltda. Vol. VII

Rösenbluth, B., Fuenzalida, H., Y Aceituno, P. 1997. Recent temperature variations in southern South America. *International Journal of Climatology*. 17 , pp.67-85.

Seguel, R., y Stowhas, L. 1985. Estimación de crecidas de diseño en cuencas mixtas pluvionivales. Presentado en el VII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.

Stowhas, L. 1983. Precipitaciones máximas diarias en Chile. Presentado en el VI Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica.

Sugiyama, M., Shiogama, S., and S. Emori. 2010. Precipitation extreme changes exceeding moisture content increases in MIROC and IPCC climate models. *PNAS* vol 107 no 2, p. 571-575.

Varas, E. 1985. Hietogramas de Tormentas de Diseño. VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, SOCHID, Concepción, Chile.

Wang G, B. Li and J. Wang J. 2005 World's greatest known point rainfalls and their enveloping curve formula. Also published 2006: *Advances in Water Science*, 17(6): 831-836.

World Meteorological Organization (WMO). 2009. Manual for estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP), WMO-No. 1045.

World Meteorological Organization (WMO). 1994. Guide to hydrological practices. 5th edition, WMO-No. 168.

World Meteorological Organization (WMO). 1969. Manual for Depth-Area-Duration Analysis of Storm Precipitation. WMO-No.237. TP 129, Geneva.