

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ENFOQUE ESTOCÁSTICO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN
MÁXIMA PROBABLE APLICABLE A LOS MÉTODOS ESTADÍSTICOS**

IGNACIO TORO MENA¹
XIMENA VARGAS MESA²

RESUMEN

La Precipitación Máxima Probable (PMP) es usualmente estimada a través algún método estadístico, en desmedro de metodologías más elaboradas que en algunos casos requieren de un avanzado poder de cómputo o de registros meteorológicos extensos y detallados, a escalas menores a las diarias, los cuales en muchos lugares pueden no encontrarse disponibles. En términos generales, la estimación de la PMP a través de métodos estadísticos depende de la media y de la desviación estándar de la serie de precipitaciones máximas diarias, considerando idealmente más de 30 años de registros, obteniendo un único valor de PMP, sin posibilidades de caracterizar la incertidumbre asociada al método estadístico, el número de registros utilizados o el factor de frecuencia K involucrado en el cálculo de la PMP. Se proponen tres enfoques estocásticos para la estimación de la PMP, aplicando por simplicidad el método de Stöwhas con $K=11$ a las estaciones meteorológicas Quinta Normal (Santiago) y Mataveri (Rapa Nui), las que poseen más de 70 años de registros. Se caracteriza así la incertidumbre de la estimación de la PMP a través de la estimación de percentiles, obteniendo intervalos de confianza para cada uno de los casos evaluados, donde se obtienen diferencias de hasta 30% con respecto al enfoque determinístico.

¹Hidrólogo esp. en cambio climático, Mine Water, WSP Chile – ignacio.toro@wsp.com, toromena@hotmail.com

²Profesora Asociada, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – xvargas@uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

La Precipitación Máxima Probable es usualmente estimada a través del método de Hershfield (1965) o alguna adaptación local de este, correspondiendo a Chile la formulación desarrollada por Stöwahas (1983), en desmedro de la utilización de metodologías más elaboradas que en algunos casos requieren de un avanzado poder de cómputo o de registros meteorológicos extensos y detallados, a escalas menores a las diarias, los cuales en muchos lugares pueden no encontrarse disponibles.

El único requisito para la aplicación de los métodos estadísticos de Hershfield o Stöwahas es poseer registros de precipitaciones máximas diarias, idealmente de una extensión de al menos 30 años. La estimación de la PMP a través de métodos estadísticos depende de la media y de la desviación estándar de la serie de precipitaciones máximas diarias, estadísticos que dependen de la extensión de la serie utilizada, como se muestra en, por ejemplo González y Dussaubat (2009).

Si bien se ha relacionado valores de probabilidad con la PMP, como en Koutsoyiannis (1999) donde se vincula el periodo de retorno de 60.000 años de una distribución GEV con la Precipitación Máxima Probable, o bien su equivalente realizado por King y Tapia (2009) con la Crecida Máxima Probable (CMP), utilizando de referencia un periodo de retorno de 300.000 años, en ningún caso se logra caracterizar la incertidumbre de la estimación de PMP (o CMP), obteniendo en ambos casos un valor único de diseño.

A pesar de que en su nombre se hace referencia a “Probable”, el enfoque clásico para su estimación es realmente determinístico, obteniendo un único valor de PMP, sin posibilidades de caracterizar la incertidumbre asociada al método estadístico, o al número de registros utilizados o al factor de frecuencia K involucrado en el cálculo de la PMP.

Se denomina estocástico al sistema cuyo comportamiento intrínseco es no determinista. En consecuencia, significa que está sometido al azar y que es objeto de análisis estadístico, razón por la cual, en este trabajo se proponen tres enfoques estocásticos para la estimación de la PMP, aplicando por simplicidad (en los tres enfoques) el método de Stöwahas con $K=11$ a las estaciones meteorológicas Quinta Normal (Santiago) y Mataveri (Rapa Nui), las que poseen más de 70 años de registros.

Los tres enfoques evaluados provienen de ciertas consideraciones propuestas por Salas et al. (2014) y por Zhang (2019). Se caracteriza la incertidumbre del cálculo de la PMP a través de la estimación de percentiles, obteniendo intervalos de confianza para cada caso evaluado.

La evaluación propuesta en este estudio permite vincular la estimación de la PMP con la distribución de probabilidad empírica, además de la obtenida a través del método de análisis de frecuencias, usualmente seleccionada por presentar el mejor ajuste de los registros disponibles.

2. METODOLOGÍA

A continuación, se presenta la metodología considerada para evaluar la PMP a través de un enfoque estocástico. Se describen además los tres enfoques o casos propuestos, los cuales se aplican a las estaciones meteorológicas Quinta Normal y Mataveri.

Precipitaciones Máximas Diarias

Para la evaluación estocástica de la PMP estadística se consideran las estaciones meteorológicas de Quinta Normal y Mataveri, ambas con más de 70 años de registros de precipitaciones máximas diarias. Para la estimación de la PMP se considera el método de Stöwhas (1983), con $K=11$, utilizando el factor de 1,13 recomendado por la WMO (2009) para así obtener la PMP en 24 horas a partir de registros diarios.

Se debe verificar que la serie de máximas diarias no presenta tendencia estadísticamente significativa con el fin de garantizar que esta sea estacionaria, lo que se vuelve relevante considerando la mega sequía que afecta a la zona central de Chile (Boisier et al., 2016), así como también a Rapa Nui (Gatica y Toro, 2020). Para esto se evalúan las series de máximas diarias y sus subconjuntos utilizados para el resamplio estocástico a través del método de Mann-Kendall.

Enfoques para la Evaluación Estocástica de la PMP

En términos generales, la metodología utilizada en los tres enfoques se presenta en la Figura 1, los que se diferencian en la manera en la cual se realiza el resamplio de las series de precipitaciones máximas diarias. Los tres enfoques o casos analizados, se muestran en la Figura 2 y se explican en mayor detalle en esta sección.

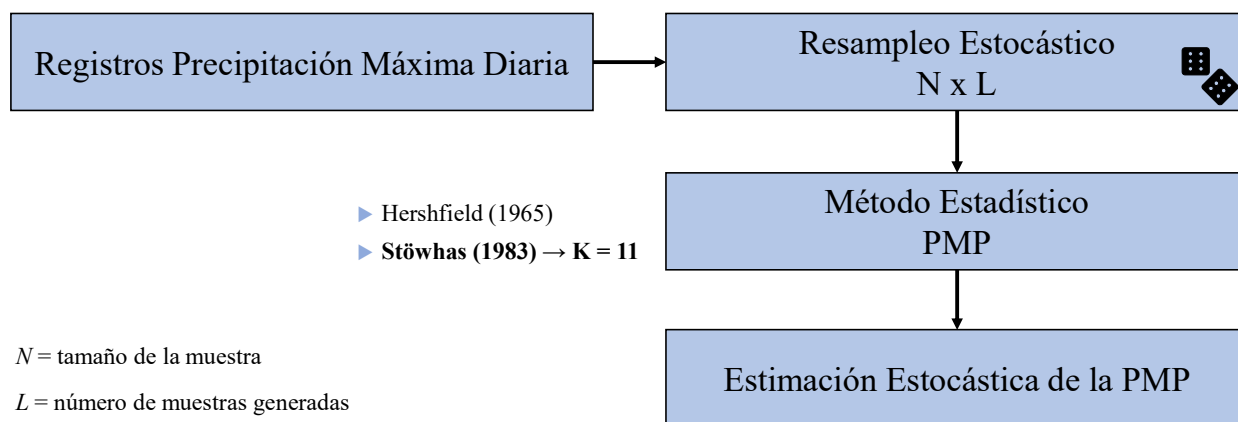


Figura 1. Metodología general, enfoque estocástico para estimación de PMP

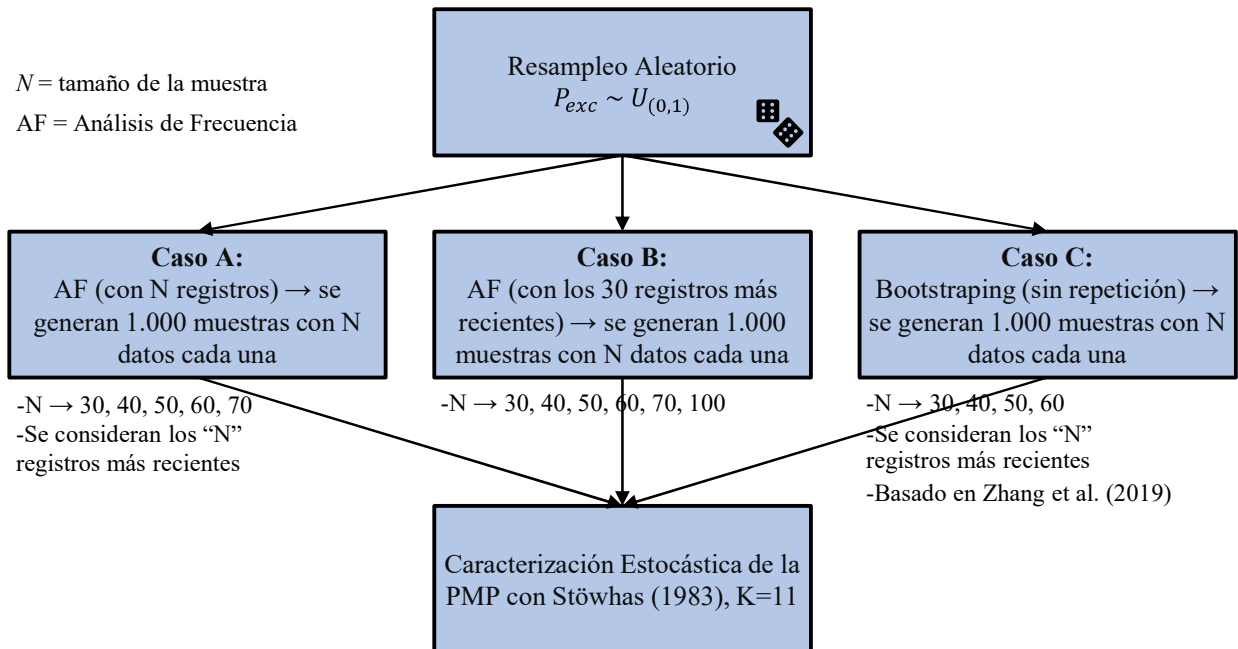


Figura 2. Casos evaluados para la caracterización estocástica de la PMP

Caso A

En este enfoque de resamplero se parte de la base que las precipitaciones máximas se pueden caracterizar a través de una distribución de probabilidad, la que suele ser escogida luego de realizar un análisis de frecuencias, seleccionando la distribución de probabilidad más apropiada. Para este estudio, la elección se basó en criterios como mejor ajuste gráfico, coeficiente de Nash-Sutcliffe, evaluación de los intervalos de confianza y el no rechazo de la prueba estadística Anderson-Darling.

Este enfoque fue propuesto por Salas et al. (2014), evaluando la PMP para un caso con factor de frecuencia constante (K), argumentando que la incertidumbre asociada a K se incorpora en el valor de la envolvente máxima (valor constante). Salas et al. (2014) resamplero 1.000 muestras para tamaños de 15, 50, 100 y 150, considerando distribución Gumbel. En el caso de este trabajo, se considera un enfoque más general a través de la elección de la mejor distribución de probabilidad.

Utilizando metodologías clásicas, la caracterización de precipitaciones máximas a través de la distribución de mejor ajuste no se vincula con la estimación de la PMP, sin embargo, al utilizar un enfoque estocástico se puede caracterizar la PMP y su incertidumbre a través de la distribución de probabilidad seleccionada, generando “ L ” muestras aleatorias de tamaño “ N ” a partir de la distribución seleccionada, estimando “ L ” valores de PMP, evaluando así su incertidumbre.

Así, para el *Caso A* se escoge una distribución de probabilidad para submuestras de distintos tamaños desde los registros de cada estación meteorológica (los últimos 30, 40, 50, 60 y 70 años respectivamente), evaluando así la dependencia de los resultados con respecto al tamaño de la muestra utilizada (N). Para cada N evaluado se resamplero un total de 1.000 muestras (L), obteniendo así 1.000 valores de PMP con los cuales caracterizar su incertidumbre. La metodología utilizada para el resamplero en este caso se presenta en la Figura 3.



Resamplero Aleatorio (N x L):

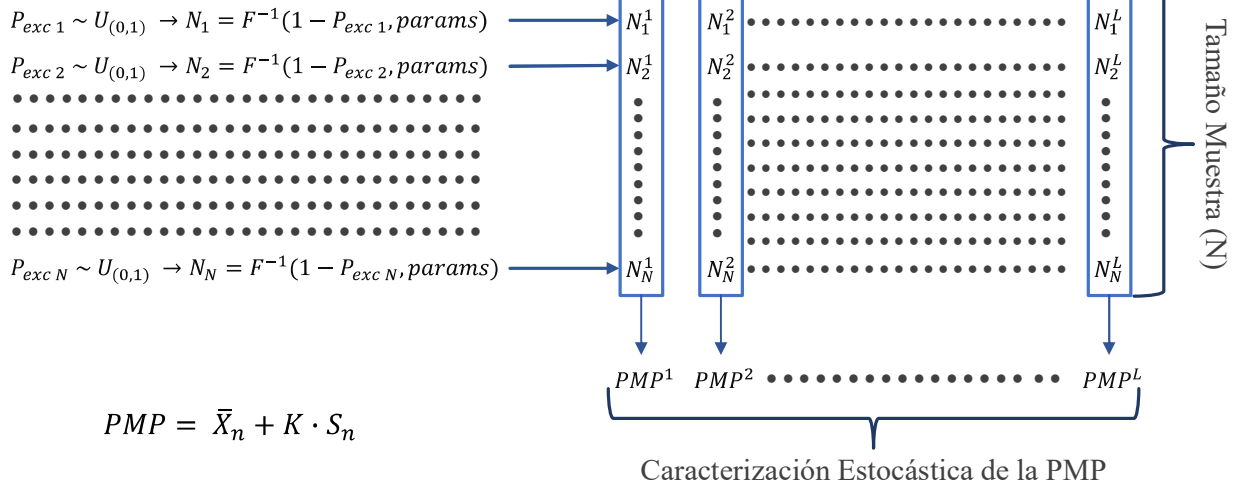


Figura 3. Método de resamplero basado en la distribución de probabilidad de mejor ajuste

Caso B

En este caso se parte de la misma premisa que para el *Caso A*, vinculando la distribución de probabilidad que mejor representa a las precipitaciones máximas con la estimación de la PMP. La diferencia para el *Caso B* radica en que se busca evaluar la PMP considerando la caracterización de las precipitaciones máximas utilizando sólo los 30 años más recientes, es decir, sólo se selecciona una distribución de probabilidad para los últimos 30 años de registros, simulando el caso en que no se cuenta necesariamente con una gran cantidad de registros, evaluando en el resamplero la generación de muestras de distinto tamaño.

Este caso busca responder si se puede obtener una mejor estimación de la PMP a partir de una serie registrada no tan extensa, aumentando el tamaño de las muestras resampladas (N; 30, 40, 50, 60, 70 y 100; 1.000 muestras para cada una) a partir de registros de menor extensión. En términos generales, la metodología utilizada para el resamplero es la misma aplicada en el *Caso A*, la que se presenta en la Figura 3.

Caso C

En este caso se busca realizar el resamplero a partir de los registros disponibles para cada estación. Para ello se utiliza el método de Bootstrapping, introducido por Efron (1992), donde no se requiere información sobre la distribución de probabilidad vinculada a los registros (Joshi et al. 2006), por lo que podría entenderse como un resamplero que mapea la distribución empírica de los registros de precipitaciones máximas.

Este enfoque fue utilizado por Zhang et al. (2019) para generar valores para el factor de frecuencia K, vinculado a la estimación de la PMP, caracterizando así una curva envolvente para este valor. Zhang et al. (2019) resamplero sus muestras considerando la repetición de los datos, es decir, al

extraer aleatoriamente valores de precipitación, para una misma muestra resamplada puede darse el caso de que dos o más datos sean el mismo.

Dado que en este estudio se evalúan estaciones con un periodo extenso de registros, se utiliza el enfoque sin repetición. En el caso de que se cuente con registros idénticos, las muestras resampladas podrán tener ese valor repetido, mas no un número mayor de veces que lo observado.

Para el *Caso C* se considera, por ende, el método de Bootstrapping sin repetición para generar 1.000 muestras de distinto tamaño (N ; 30, 40, 50, 60), donde para $N=70$ el valor de PMP es único, dado que no es posible generar submuestras distintas.

Caracterización de la Incertidumbre de la PMP

Para caracterizar la incertidumbre de la PMP se utilizan los percentiles calculados en base a las 1.000 estimaciones de PMP realizadas para cada caso y tamaño de muestra (N). Se reportan los percentiles 5, 25, 50, 75 y 95%, adoptando como intervalos de confianza los percentiles 5 y 95%.

3. RESULTADOS

Caracterización Determinística

Para la caracterización determinística de la PMP para las estaciones Quinta Normal y Mataveri, esta se estima para los “ N ” registros más recientes. Estos valores son los que se utilizarán a modo de comparación con los obtenidos a través del enfoque estocástico.

En la Figura 4 se presentan las series de precipitación máxima diaria para las estaciones Quinta Normal y Mataveri, para el periodo 1950-2021, mientras que en la Tabla 1 se muestran los principales estadísticos para las distintas muestras consideradas para la caracterización determinística para los últimos “ N ” años, así como la distribución de probabilidad adoptada y las estimaciones de periodo de retorno de 10.000 años y Precipitación Máxima Probable (PMP).

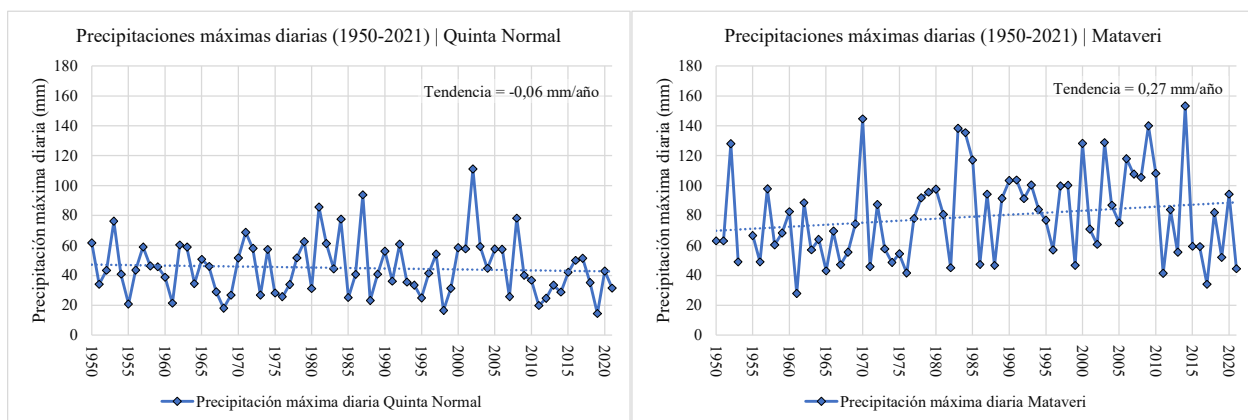


Figura 4. Series de precipitación máxima diaria (1950-2021) – Quinta Normal y Mataveri

Tabla 1. Estadísticos de las muestras consideradas para caracterización determinística de la PMP

Enfoque Determinístico	Quinta Normal					Mataveri				
Tamaño de la muestra (N)	30	40	50	60	70	30	40	50	60	70
Media (mm)	43,3	44,9	45,2	45,0	44,8	84,8	86,7	84,0	81,5	79,7
Desv. Est. (mm)	19,9	20,5	20,2	19,5	19,0	30,8	31,7	30,1	30,4	30,2
Coef. Variación (-)	0,46	0,46	0,45	0,43	0,42	0,36	0,37	0,36	0,37	0,38
Tendencia (mm/año)	-0,45	-0,40	-0,21	-0,11	-0,06	-0,74	-0,53	0,01	0,23	0,27
Mann Kendall (%)	24	14	27	30	39	21	17	100	30	16
¿Tendencia Est. Significativa?	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Distribución de Probabilidad	Gumbel					Weibull Min				
Periodo Retorno 10.000 años (mm)	171,2	185,7	180,7	172,2	173,4	228,1	234,4	229,7	243,9	223,6
PMP (mm)	269,1	312,6	298,6	286,5	274,8	504,1	516,6	484,2	480,6	470,7

Se destaca que ninguna de las muestras consideradas para la generación estocástica presenta tendencia estadísticamente significativa, donde además la elección de la distribución de probabilidad se mantiene independientemente del tamaño de la muestra (N).

Parte importante de la motivación de este trabajo se revela en la estimación de la PMP, donde dependiendo de la cantidad de registros esta puede diferir en unos 40 a 50 mm, sin importar la estación meteorológica considerada, razón por la cual en este estudio se busca proponer el uso de enfoques que permitan caracterizar adecuadamente la incertidumbre en la estimación de la PMP a través de métodos estadísticos.

Enfoque Estocástico

Los resultados de los tres enfoques utilizados para la caracterización estocástica de la PMP se presentan a continuación, destacando en **rojo** cuando alguno de los percentiles resulta ser mayor a la estimación determinística.

Caso A

Los resultados obtenidos al aplicar el primero de los enfoques propuestos (Caso A) se presentan en las Tablas 2 y 3, además de la Figura 5. Los resultados corresponden a los percentiles 5, 25, 50, 75 y 95%, estimados a partir de 1.000 valores de PMP obtenidos luego de realizado el resampleo.

Tabla 2. Caracterización estocástica de la PMP – Caso A

Caso A		PMP Quinta Normal (mm)					PMP Mataveri (mm)						
		Enfoque Determ.	Perc. 5%	Perc. 25%	Perc. 50%	Perc. 75%	Perc. 95%	Enfoque Determ.	Perc. 5%	Perc. 25%	Perc. 50%	Perc. 75%	Perc. 95%
Z	30	269	218	250	278	306	352	504	395	450	486	525	582
	40	313	247	276	301	328	372	517	414	461	493	528	579
	50	299	240	269	292	316	348	484	401	438	466	495	541
	60	286	238	261	280	303	331	481	397	436	463	493	535
	70	275	234	256	274	294	321	471	398	430	455	478	515

Tabla 3. Diferencias entre percentiles enfoque estocástico y estimación determinística – Caso A

Caso A		Quinta Normal (%)					Mataveri (%)				
		Perc. 5%	Perc. 25%	Perc. 50%	Perc. 75%	Perc. 95%	Perc. 5%	Perc. 25%	Perc. 50%	Perc. 75%	Perc. 95%
Z	30	-19%	-7%	3%	14%	31%	-22%	-11%	-4%	4%	15%
	40	-21%	-12%	-4%	5%	19%	-20%	-11%	-4%	2%	12%
	50	-20%	-10%	-2%	6%	17%	-17%	-9%	-4%	2%	12%
	60	-17%	-9%	-2%	6%	16%	-17%	-9%	-4%	3%	11%
	70	-15%	-7%	0%	7%	17%	-15%	-9%	-3%	1%	9%

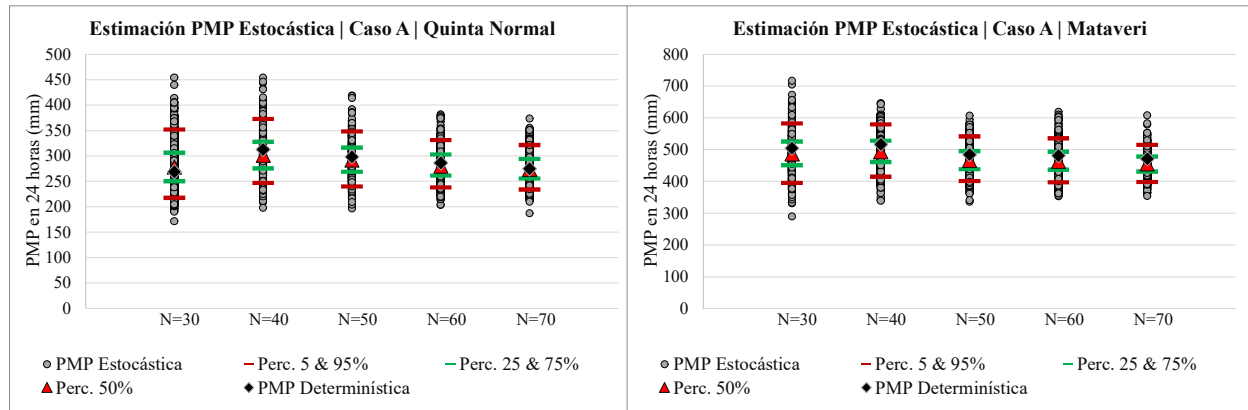


Figura 5. Resultados caracterización estocástica de la PMP – Caso A

En términos generales, la incertidumbre se reduce al aumentar el tamaño de la muestra mas no se vuelve despreciable, dado que tanto la media como la desviación estándar de la serie se tornan más estables, es decir, su dependencia con respecto al máximo valor de precipitación generado estocásticamente disminuye.

Una potencial ventaja de este enfoque radica en que, al generar los eventos de manera estocástica a partir de la distribución de probabilidad seleccionada, es posible obtener valores de precipitación que no han sido registrados, los que provienen de la misma población estadística que las observaciones.

Se observa que, para la mayoría de los tamaños de muestra evaluados, independiente de la estación meteorológica considerada, el valor determinístico es ligeramente superior a la estimación de percentil 50%, con una diferencia promedio de un 1 a 4%. Para Quinta Normal se pueden obtener

diferencias del orden de 31% con respecto a la estimación determinística, mientras que para Mataveri alcanza alrededor del 15%.

Caso B

Los resultados obtenidos al aplicar el segundo de los enfoques propuestos (Caso B) se presentan en las Tablas 4 y 5, además de la Figura 6. Los resultados corresponden a los percentiles 5, 25, 50, 75 y 95%, estimados a partir de 1.000 valores de PMP obtenidos luego de realizado el resampléo.

Tabla 4. Caracterización estocástica de la PMP – Caso B

Caso B		PMP Quinta Normal (mm)					PMP Mataveri (mm)						
		Enfoque Determ.	Perc. 5%	Perc. 25%	Perc. 50%	Perc. 75%	Perc. 95%	Enfoque Determ.	Perc. 5%	Perc. 25%	Perc. 50%	Perc. 75%	Perc. 95%
Z	30	269	218	250	278	306	352	504	395	450	486	525	582
	40	313	225	254	278	301	338	517	404	449	481	509	561
	50	299	230	254	276	301	336	484	406	447	477	505	550
	60	286	231	255	274	295	331	481	415	447	473	499	543
	70	275	231	255	272	291	321	471	410	443	468	491	525
	100	275	230	249	262	278	301	471	403	429	450	469	498

Tabla 5. Diferencias entre percentiles enfoque estocástico y estimación determinística – Caso B

Caso B		Quinta Normal (%)					Mataveri (%)				
		Perc. 5%	Perc. 25%	Perc. 50%	Perc. 75%	Perc. 95%	Perc. 5%	Perc. 25%	Perc. 50%	Perc. 75%	Perc. 95%
Z	30	-19%	-7%	3%	14%	31%	-22%	-11%	-4%	4%	15%
	40	-28%	-19%	-11%	-4%	8%	-22%	-13%	-7%	-1%	9%
	50	-23%	-15%	-7%	1%	12%	-16%	-8%	-1%	4%	14%
	60	-19%	-11%	-4%	3%	15%	-14%	-7%	-2%	4%	13%
	70	-16%	-7%	-1%	6%	17%	-13%	-6%	-1%	4%	12%
	100	-16%	-9%	-5%	1%	9%	-14%	-9%	-4%	0%	6%

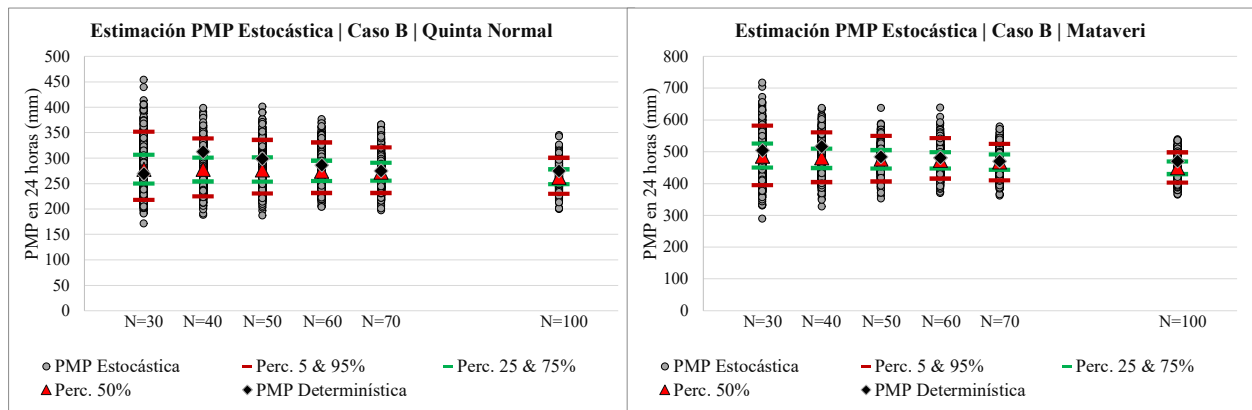


Figura 6. Resultados caracterización estocástica de la PMP – Caso B

En términos generales, la incertidumbre se reduce al aumentar el tamaño de la muestra mas no se vuelve despreciable, dado que tanto la media como la desviación estándar de la serie se tornan más

estables, es decir, su dependencia con respecto al máximo valor de precipitación generado estocásticamente disminuye.

Una potencial ventaja de este enfoque radica en que, al generar los eventos de manera estocástica a partir de la distribución de probabilidad seleccionada, es posible obtener valores de precipitación que no han sido registrados, los que provienen de la misma población estadística que las observaciones.

Además, este enfoque permite, en la medida que se confíe en la elección de la distribución de probabilidad, resamplear muestras de mayor tamaño a partir de registros de menor extensión, acotando la incertidumbre y permitiendo una mejor estimación de la PMP. Al aumentar el tamaño de la muestra resampleada se observan distintos comportamientos con respecto a los percentiles en cada estación, lo que puede estar vinculado a la elección de la distribución de probabilidad (Gumbel en Quinta Normal y Weibull_min para Mataveri).

Se observa que, para la mayoría de los tamaños de muestra evaluados, independiente de la estación meteorológica considerada, el valor determinístico es ligeramente superior a la estimación de percentil 50%, con una diferencia promedio de un 3 a 4%. Para Quinta Normal se pueden obtener diferencias de hasta 31% con respecto a la estimación determinística, mientras que para Mataveri alcanza alrededor del 15%.

Caso C

Los resultados obtenidos al aplicar el tercero de los enfoques propuestos (Caso C) se presentan en las Tablas 6 y 7, además de la Figura 7. Los resultados corresponden a los percentiles 5, 25, 50, 75 y 95%, estimados a partir de 1.000 valores de PMP obtenidos luego de realizado el resampleo.

Tabla 6. Caracterización estocástica de la PMP – Caso C

Caso C		PMP Quinta Normal (mm)						PMP Mataveri (mm)					
		Enfoque Determ.	Perc. 5%	Perc. 25%	Perc. 50%	Perc. 75%	Perc. 95%	Enfoque Determ.	Perc. 5%	Perc. 25%	Perc. 50%	Perc. 75%	Perc. 95%
Z	30	269	236	263	284	302	332	504	414	463	489	516	553
	40	313	243	266	282	296	316	517	431	463	485	505	528
	50	299	253	269	281	292	304	484	444	466	480	493	509
	60	286	259	271	279	285	290	481	450	465	475	483	493
	70	275	-	-	-	-	-	471	-	-	-	-	-

Tabla 7. Diferencias entre percentiles enfoque estocástico y estimación determinística – Caso C

Caso C		Quinta Normal (%)					Mataveri (%)				
		Perc. 5%	Perc. 25%	Perc. 50%	Perc. 75%	Perc. 95%	Perc. 5%	Perc. 25%	Perc. 50%	Perc. 75%	Perc. 95%
Z	30	-12%	-2%	5%	12%	23%	-18%	-8%	-3%	2%	10%
	40	-22%	-15%	-10%	-5%	1%	-16%	-10%	-6%	-2%	2%
	50	-15%	-10%	-6%	-2%	2%	-8%	-4%	-1%	2%	5%
	60	-10%	-5%	-3%	0%	1%	-6%	-3%	-1%	0%	3%

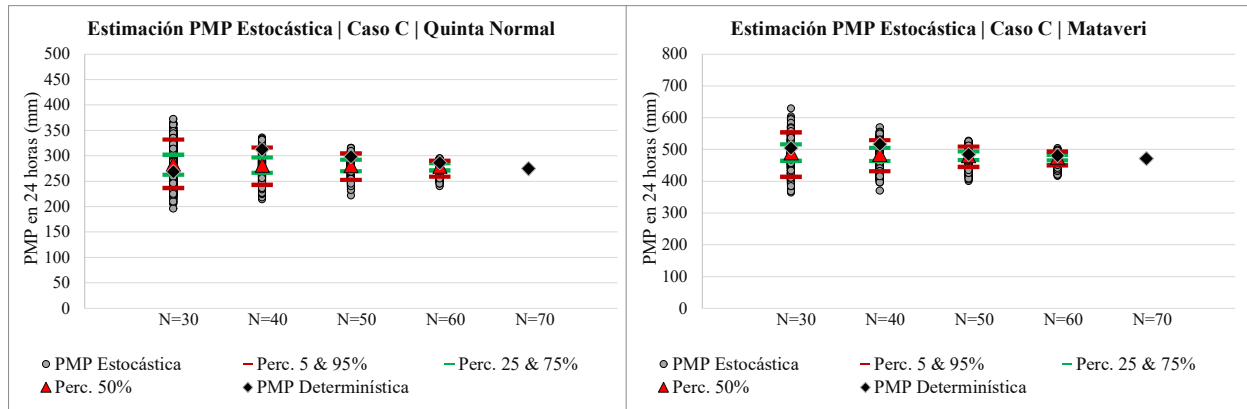


Figura 7. Resultados caracterización estocástica de la PMP – Caso C

En términos generales, la incertidumbre se reduce al aumentar el tamaño de la muestra, dado que, al aumentar el tamaño de la muestra, disminuye la cantidad de permutaciones que es posible realizar y, por ende, tanto la media como la desviación estándar de la serie se tornan más estables, es decir, su dependencia con respecto al máximo valor de precipitación registrado disminuye.

Se debe tener en cuenta que, al generar muestras basadas netamente en los registros, no es posible obtener valores de precipitación que no hayan sido registrados, sin embargo, este enfoque permite independizarse de la elección de la distribución de probabilidad.

Este enfoque permite caracterizar la PMP a través de la distribución empírica de la precipitación máxima diaria, en la medida que se considere un tamaño de muestra razonable en relación con la cantidad total de registros, permitiendo una mejor estimación de la PMP.

Se observa que, para la mayoría de los tamaños de muestra evaluados, independiente de la estación meteorológica considerada, el valor determinístico es cercano o incluso superior a la estimación de percentil 75%, lo cual al tenerse en consideración permite entender si el valor estimado es o no conservador en relación con su intervalo de confianza. Para Quinta Normal se pueden obtener diferencias de hasta 23% con respecto a la estimación determinística, mientras que para Mataveri alcanza alrededor del 10%.

4. CONCLUSIONES

El valor de la PMP estimada con enfoque determinístico, es decir, en base la estadística disponible, obteniendo un único valor, depende fuertemente de la cantidad de registros considerados, presentando diferencias de hasta 50 mm, sin importar la estación meteorológica considerada, lo que refuerza la necesidad de abordar estocásticamente el cálculo de la PMP según métodos estadísticos.

La evaluación de la incertidumbre asociada a la estimación estadística de la PMP, considerando dos estaciones meteorológicas permite concluir que, si bien no necesariamente existe un único tipo de comportamiento entre la estimación determinística y estocástica, en ambos casos se muestra una dispersión importante que es necesario abordar.

Se destaca la dispersión que presenta la estimación de la PMP, independientemente del caso analizado, reforzando la necesidad de evaluar su incertidumbre a través de enfoques que permitan su caracterización, tomando así decisiones en base al nivel de riesgo que se considere adecuado.

Si bien todos los valores generados estocásticamente corresponden a PMP's, esto no quiere decir que se recomiende considerar, por ejemplo, la estimación mínima de ellas. Se propone tomar una decisión teniendo en cuenta la incertidumbre completa de la estimación, la relación entre periodos de retorno alto (mayores a 10.000 años) y la estimación estocástica de PMP, la zona de estudio y su hidrología, el propósito del cálculo de la PMP y el nivel de riesgo que se desee abordar.

La incertidumbre se reduce al aumentar el tamaño de la muestra mas no se vuelve despreciable, dado que tanto la media como la desviación estándar de la serie se tornan más estables, es decir, su dependencia con respecto al máximo valor de precipitación generado estocásticamente disminuye.

Para los Casos A y B se debe destacar que los resultados obtenidos serán sensibles a la elección de la distribución de probabilidad, dependiendo por ejemplo del nivel de asimetría de la distribución y que tanta sensibilidad muestra para periodos de retorno altos, como suele suceder para las funciones logarítmicas.

Una potencial ventaja de los enfoques A y B radica en que, al generar los eventos de manera estocástica a partir de la distribución de probabilidad seleccionada, es posible obtener valores de precipitación que no han sido registrados y que provienen de la misma población estadística que las observaciones.

El Caso B permite, en la medida que se confíe de la elección de la distribución de probabilidad, resamplear muestras de mayor tamaño a partir de registros de menor extensión, acotando la incertidumbre y permitiendo una mejor estimación de la PMP.

Con respecto al Caso C, al generar muestras basadas netamente en los registros, no es posible obtener valores de precipitación que no hayan sido registrados, limitando además el número de permutaciones a medida que aumenta el tamaño de las muestras a resamplear.

Una potencial ventaja del enfoque C, es que permite independizarse de la elección de la función de probabilidad, caracterizando la PMP a través de la distribución empírica de la precipitación máxima diaria, en la medida que se considere un tamaño de muestra razonable en relación con la cantidad total de registros.

La idoneidad de un enfoque u otro dependerá de la confianza que se tenga sobre la elección de la distribución de probabilidad, así como también de los registros y de su extensión. Se deja a criterio del especialista la elección de alguno de ellos, o bien evaluarlos en paralelo.

Los enfoques propuestos son de fácil de evaluación, obteniendo una mejor caracterización de la incertidumbre asociada con los métodos estadísticos, lo que permite escoger un valor de PMP más robusto para el diseño hidráulico y la verificación de obras mayores, como tranques de relaves, embalses, vertederos, entre otros.

Como trabajo futuro, a partir de los enfoques aquí presentados, se recomienda avanzar en la caracterización de un mayor número de estaciones, abordar el efecto que tiene la selección de distintas distribuciones de probabilidad sobre la dispersión de los resultados, así como también abordar la incertidumbre asociada al coeficiente de frecuencia K, el cual es crucial para la estimación de la Precipitación Máxima Probable.

REFERENCIAS

- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413-421.
- Efron, B. (1992). Bootstrap methods: Another look at the jackknife. In *Breakthroughs in statistics*, 569–593. New York: Springer.
- Gatica, C. y Toro, I. (2020). Proyección de la Frecuencia de Eventos de Sequía para Rapa Nui, Escenarios de Cambio Climático RCP 4,5 y 8,5. XXIV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Santiago, Chile.
- González, R. y Dussaubat, S. (2009). Variabilidad de las precipitaciones máximas diarias en función de la longitud del registro. XIX Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Valparaíso, Chile.
- Hershfield, D. (1965). Method for Estimating Probable Maximum Rainfall. *Journal American Water Works Association*, Volume 57, 8, 965-972.
- Joshi, M., Seidel-Morgenstern, A. y Kremling, A. 2006. Exploiting the bootstrap method for quantifying parameter confidence intervals in dynamical systems. *Metabolic Engineering*. 8 (5): 447–455. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2006.04.003>.
- King, H. y Tapia, R. (2009). Estimación de Crecidas Máximas Probables de Origen Hidrometeorológico. XIX Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Valparaíso, Chile.
- Koutsoyiannis, D. (1999). A probabilistic view of Hershfield's method for estimating probable maximum precipitation. *Water Resources Research*, Volume 35, 1313–1322.
- Stöwhas, L. (1983). Precipitaciones Máximas Diarias en Chile. VI Congreso Nacional Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Santiago, Chile.
- Salas, J. D., Gavilán, G., Salas, F. R., Julien, P. Y. y Abdullah, J. 2014. "Uncertainty of the PMP and PMF." In *Handbook of engineering hydrology: Modeling, climate change, and variability*, Book II, 575–603. Hoboken, NJ: Taylor & Francis.
- WMO. (2009). Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation. N°1045, page 68.
- Zhang, Y., Singh, V. y Byrd, A. (1983). Basin-Scale Statistical Method for Probable Maximum Precipitation with Uncertainty Analysis. *Journal of Hydrologic Engineering*. 24(2). DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001759.