

U.S. Bureau of Reclamation, (1965) "Design of Small Dams", U.S. Government Printing Office, Washington D.C.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

VI CONGRESO NACIONAL

PRECIPITACIONES MAXIMAS DIARIAS EN CHILE.

Ludwig Stowhas B. (1)

RESUMEN.

Se recopilan y analizan estadística y probabilísticamente las precipitaciones máximas diarias en Chile a fin de allegar antecedentes respecto a máximos factores de frecuencia y aplicabilidad de métodos "estadísticos" para la estimación de la precipitación máxima probable (PMP). El análisis de frecuencia de los coeficientes máximos de frecuencia de 190 estaciones con un total de 6504 años de registro revela que un factor de frecuencia máximo probable igual a 11 aparece como un valor suficiente conservador para la estimación probabilística de la PMP.

A partir del trazado de envolventes superiores a los eventos más extremos registrados, en función de los parámetros estadísticos de las series de precipitaciones máximas diarias, se propone un procedimiento alternativo de doble envolvente para la estimación "estadística" de la PMP, que entrega en la gran mayoría de los casos, valores menos conservadores que los procedimientos actualmente en uso. Esto, sin comprometer mayormente la seguridad de las obras, ya que se respetan los eventos más extremos registrados en Chile y aún a nivel mundial, de los que se dispuso de información.

(1) Ingeniero Civil, Profesor Depto. Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María.

1. INTRODUCCION.

La aproximación tradicional al problema de determinar los caudales para el diseño de obras hidráulicas, ha sido la utilización del análisis de frecuencia de estadísticas de caudales o precipitaciones, con el propósito de determinar las magnitudes de las variables hidrológicas en estudio, en términos de una determinada probabilidad de excedencia, método que adquiere una gran incertidumbre, para el caso de eventos milenarios o decamilenarios, por la inevitable necesidad de suponer una función de densidad de frecuencia y extrapolar estas funciones a periodos de retorno, hasta cientos de veces más largos que la longitud del periodo estadístico base.

En los últimos años, ante las exigencias de obras cada vez más seguras, ha surgido el criterio de diseñar en términos de la llamada "crecida máxima probable", concepto que pretende definir el valor máximo que una crecida puede alcanzar cuando se maximizan todas las variables y parámetros que intervienen en su gestación. Es claro que este criterio traspasa el problema principalmente a la definición de la "precipitación máxima probable" (PMP) ó límite superior que una tormenta de lluvia puede alcanzar, considerando que es la precipitación la principal variable independiente que interviene en la gestación de una crecida.

El procedimiento habitualmente utilizado para su cálculo, llamado "método hidrometeorológico", (W.M.O., 1973) se basa en una modelación de los mecanismos que intervienen en la generación de una tormenta, estableciéndose que una tormenta será máxima cuando se maximice el contenido de agua precipitable o humedad de la atmósfera y cuando se maximice la velocidad de convergencia de dicha humedad hacia el lugar donde se ha centrado la tormenta.

La operatoria necesaria para la determinación de la PMP requiere de la construcción de curvas precipitación -duración -área maximizadas, lo que exige en principio disponer de una red de estaciones meteorológicas

con información de precipitación, temperatura, humedad y velocidad del viento, en lo posible a nivel horario, requerimiento que limita enormemente la aplicabilidad del método. Por esta razón, resulta extraordinariamente atractiva la posibilidad de utilizar un método alternativo para el cálculo de la PMP, propuesto por Herschfield (1965), que se reduce a estimar la PMP a partir de una envolvente superior, en función de la precipitación media, trazada respecto a los máximos coeficientes de frecuencia definidas por la ecuación

$$K_M = \frac{P_M - \bar{P}}{\sigma_p} \quad (1)$$

- donde P_M = precipitación máxima medida
- \bar{P} = precipitación máxima media
- σ_p = desviación standard

que hayan sido medidos en diversas regiones.

Un análisis del procedimiento propuesto por Herschfield, (Stowhas, 1983) indica que aparte de la extraordinaria ventaja que significa su simplicidad de aplicación, existen algunos aspectos que merecen un análisis más detallado si se pretende universalizar la aplicación del método. En efecto de 2.700 estaciones analizadas, los cuatro valores que definen el trazado de la envolvente superior, fueron obtenidas a partir de estaciones con menos de 25 años de registro, incluyendo dos de ellas con menos de 15 años de longitud, estableciéndose que ellos son de dudosa significancia estadística.

En efecto, un test t de Student indica que los promedios de los coeficientes de frecuencia de todas las muestras basadas en estaciones de menos de 30 años, son significativamente menores al resto y diferentes entre sí.

Otro aspecto que merece análisis se refiere al ajuste de la curva envolvente trazada por Herschfield, quien postula la existencia de un coeficiente de variación constante o al menos de aleatoriedad independiente, existiendo evidencias tanto de variaciones regionales del coeficiente de variación de los registros pluviométricos como correlaciones positivas entre las precipitaciones máximas registradas y

las precipitaciones máximas medias para determinadas duraciones de las tormentas (Herschfield, 1962), que podrían ser utilizadas para el trazado más confiable de envolventes superiores para la estimación de la PMP.

La Organización Meteorológica Mundial (1973) al recomendar y discutir el método de Herschfield advierte que éste podría tanto subevaluar como sobre-evaluar la PMP dependiendo de las características climatológicas locales de cada región. Comparaciones hechas por el propio Herschfield (1961), con estimaciones de la PMP hechas por el método hidrometeorológico en los Estados Unidos, muestran sobreestimaciones, en términos generales, del método estadístico, en zonas orográficas de la costa del Pacífico.

La similitud climática y orográfica de las costas americanas en el Pacífico Norte y Sur, y algunas estimaciones de la PMP hechas en Chile en base al método hidrometeorológico (M. Nenadovich - Harza, 1981, 1982) parecían indicar que el método de Herschfield tendería a sobreestimar la PMP en Chile, lo que se traduciría en un sobredimensionamiento de las obras, o al menos en un nivel de riesgo tan remoto, que signifique un innecesario encarecimiento de ellas.

En el presente trabajo se resume un estudio de recopilación, procesamiento y análisis en términos estadísticos y probabilísticos de la información de precipitaciones máximas en Chile con el propósito de allegar antecedentes respecto a factores de frecuencia y aplicabilidad del método de Herschfield, proponiéndose una metodología de cálculo modificada a partir de las condiciones locales.

2. INFORMACION UTILIZADA.

Para el desarrollo del estudio se recopilaron todas las estadísticas de precipitaciones máximas diarias anuales oficialmente publicadas por la Corporación de Fomento de la Producción (Ramirez, 1974) con 15 o más años de estadística exceptuando aquellas ubicadas en la región del Norte Grande de Chile, en que predominan valores nulos. Esta información fue aumentada en base a los registros publicados por la Dirección Meteorológica de Chile, información recopilada en la Dirección General de Aguas, Endesa y estadísticas actualizadas

en diversos estudios hidrológicos y proyectos de Ingeniería.

En total se utilizaron 190 estaciones con registros de longitud entre 15 y 67 años, completando un total de 6504 años de estadística. La longitud promedio de las estadísticas utilizadas es de 34,3 años con una desviación standard de 13,3 años.

La precipitación máxima diaria promedio de las 190 estaciones analizadas es de 64,1 mm/día con una desviación standard de 28,5 mm/día.

El coeficiente de frecuencia máximo promedio resulta de 3.41 con una desviación standard de 1.28.

De acuerdo a la información recopilada, la lluvia en 24 horas de mayor magnitud que se habría registrado en Chile, corresponde a 521,7 mm en un día, en la estación Melado en La Lancha, zona cordillerana del río Maule, en Mayo de 1972.

3. ANALISIS ESTADISTICO Y PROBABILISTICO DE LA INFORMACION.

La serie de 190 valores correspondientes a los coeficientes máximos de frecuencia de cada estación se sometió a un análisis de frecuencia postulando distribuciones de valores extremos tipo I (Gumbel) y distribución de valores extremos tipo III (Weibull) acotada superiormente. El análisis se efectuó calculando cada coeficiente máximo con dos criterios distintos: Incluyendo y excluyendo el valor máximo medido en el cálculo del promedio y desviación standard de cada serie.

Los mejores ajustes se logran para la serie que si incluye el valor máximo medido en el cálculo del promedio y desviación standard. Las curvas de frecuencia acumuladas se muestran en la figura 1. Un test χ^2 acepta el ajuste de ambas distribuciones extremas, resultando mejor la distribución acotada de Weibull.

El ajuste analítico de las distribuciones arroja los siguientes resultados

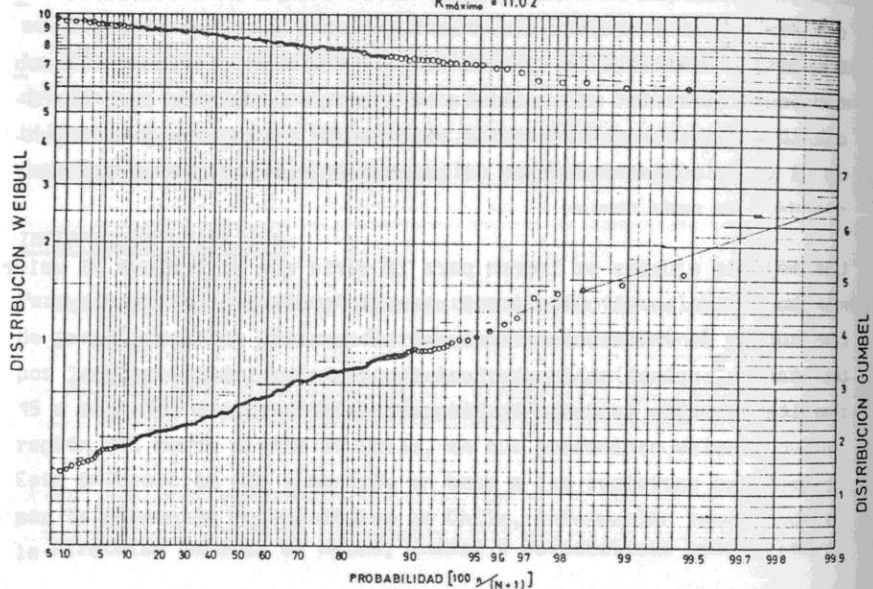
Distribución Gumbel : $F(K) = e^{-e^{-y}}$ $y = 1.712(K-2.718)+0.562$

Distribución Weibull: $F(K) = e^{-\left[\frac{Y-K}{Y-\theta}\right]^\alpha}$ $\gamma = 11.02$ (2)
 $\theta = 2.43$
 $\alpha = 14.3$

De acuerdo a estos resultados, si se acepta la distribución Weibull, el valor límite máximo de los coeficientes de frecuencia, incluyendo en su cálculo el mayor valor registrado sería de K=11.02. Si se acepta la distribución abierta de Gumbel el valor K=11.02 tendría una probabilidad de excedencia de 1 en 2.600.000.

A la luz de estos resultados, un valor del coeficiente de frecuencia de K= 11 aparece como una estimación bastante conservadora de la precipitación máxima probable en una determinada estación.

FIG. 1
DISTRIBUCION DE FRECUENCIA DE K_{max} CALCULADO INCLUYENDO PRECIPITACION MAXIMA
 $K_{max} = 11.02$



4. CURVAS ENVOLVENTES A PRECIPITACIONES MAXIMAS DIARIAS.

4.1. Dependencia del coeficiente máximo de frecuencia respecto a los estadígrafos de las precipitaciones máximas diarias.

Con el propósito de establecer dependencias entre el coeficiente de frecuencia máximo respecto a los parámetros de las estadísticas que permitieran establecer criterios de maximización y trazado de envolventes máximas, se intentó correlacionar los valores de coeficientes de frecuencias máximo con los promedios, desviaciones estandar y coeficientes de variación de las estadísticas.

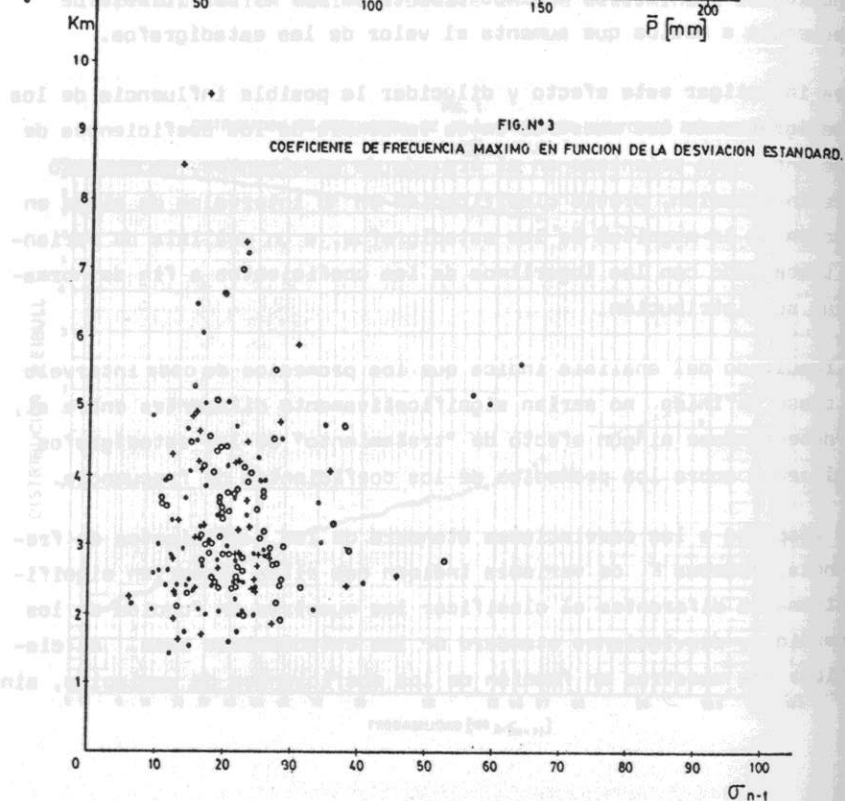
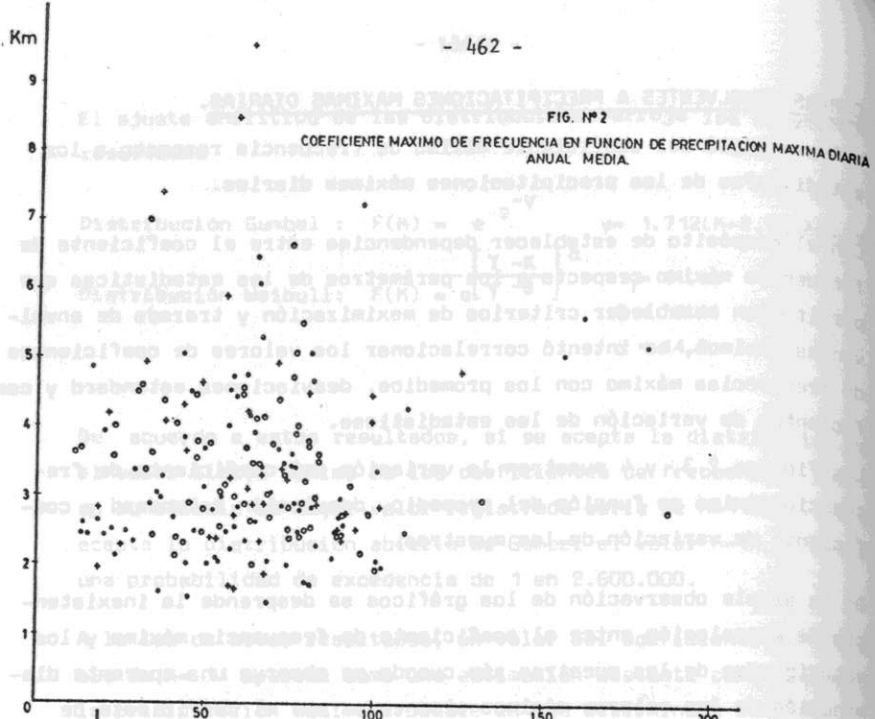
Las figuras 2 3, y 4 muestran la variación del coeficiente de frecuencia máximo en función del promedio, desviación estandar y coeficiente de variación de las muestras.

De la simple observación de los gráficos se desprende la inexistencia de correlación entre el coeficiente de frecuencia máximo y los estadígrafos de las muestras aún cuando se observa una aparente disminución de los valores máximos alcanzados por el coeficiente de frecuencia a medida que aumenta el valor de los estadígrafos.

Para investigar este efecto y dilucidar la posible influencia de los estadígrafos de las muestras en la tendencia de los coeficientes de frecuencia que orientara en el trazado de envolventes, se sometió a la información, previa clasificación en 10 intervalos de clase en función de la magnitud de los estadígrafos, a un análisis de varianza trabajando con los logaritmos de los coeficientes a fin de normalizar su distribución.

El resultado del análisis indica que los promedios de cada intervalo de clase definido no serían significativamente diferentes entre sí, no detectándose ningún efecto de "tratamiento" de los estadígrafos analizados sobre los promedios de los coeficientes de frecuencia.

Con respecto a las desviaciones standard de los coeficientes de frecuencia, pruebas F de varianza indican que ellas no serían significativamente diferentes al clasificar las muestras en función de los promedios y desviaciones standard de las estadísticas base. Al clasificar las muestras en función de los coeficientes de variación, sin



embargo, se obtiene que las desviaciones standard de los intervalos 1, 2, 3 y 10 serían significativamente mayores que las desviaciones standard de las muestras 4, 5, 6, 8 y 9. Es decir, a excepción de la muestra 10 que corresponde a estaciones con alto coeficiente de variación, se tendría que las varianzas de los coeficientes de frecuencia provenientes de estaciones con coeficiente de variación bajo (muestras 1, 2 y 3) serían mayores que las varianzas de los coeficientes de frecuencia provenientes de estaciones con estadísticas de coeficiente de variación mayor, sugiriendo la existencia de una tendencia.

Lo anterior puede resumirse expresando que sólo en el caso de los coeficientes de variación podría haber argumentos de índole estadístico para trazar envolventes decrecientes a los coeficientes máximos de frecuencia.

Al trazar una recta envolvente decreciente a los datos de la figura Nº 4 se obtiene la ecuación

$$K_{max} = 11.21 - 6.13 C_v \quad (4)$$

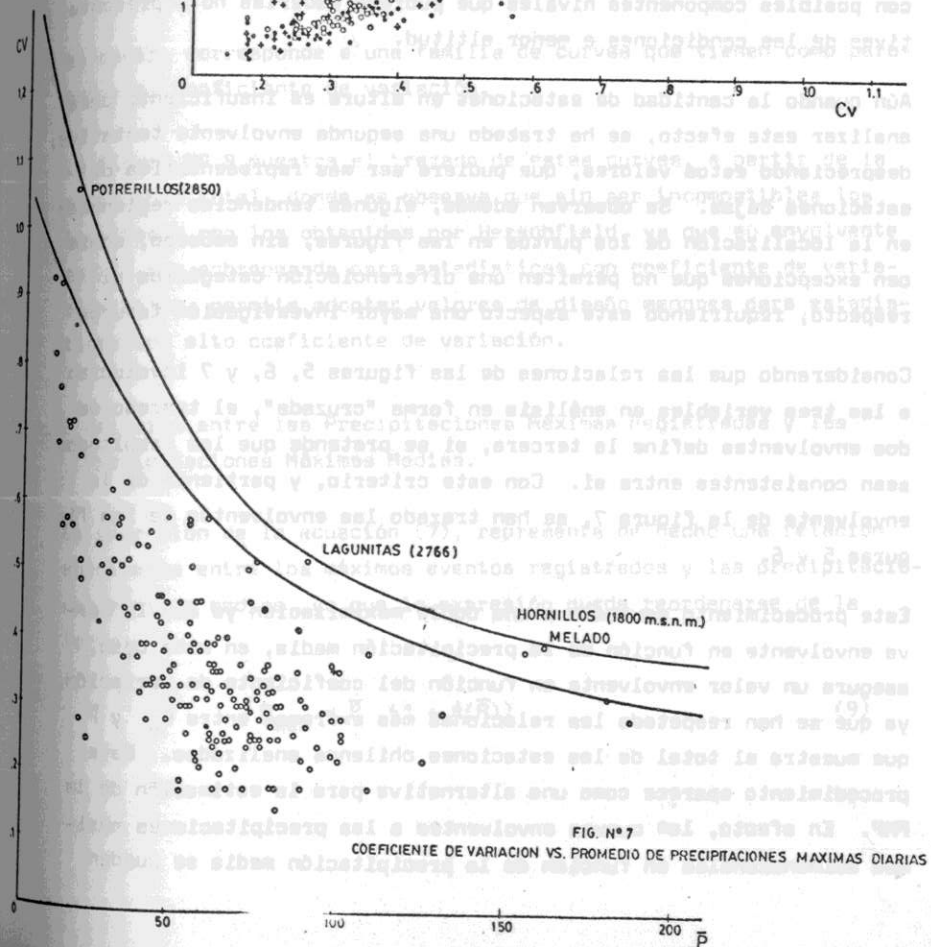
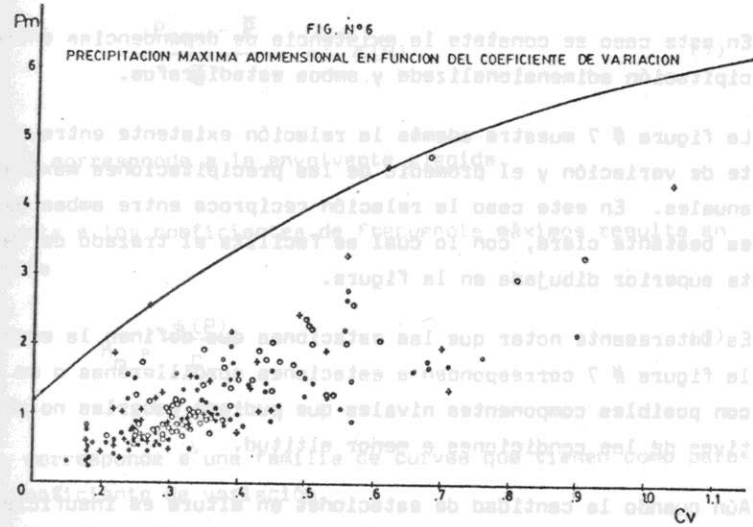
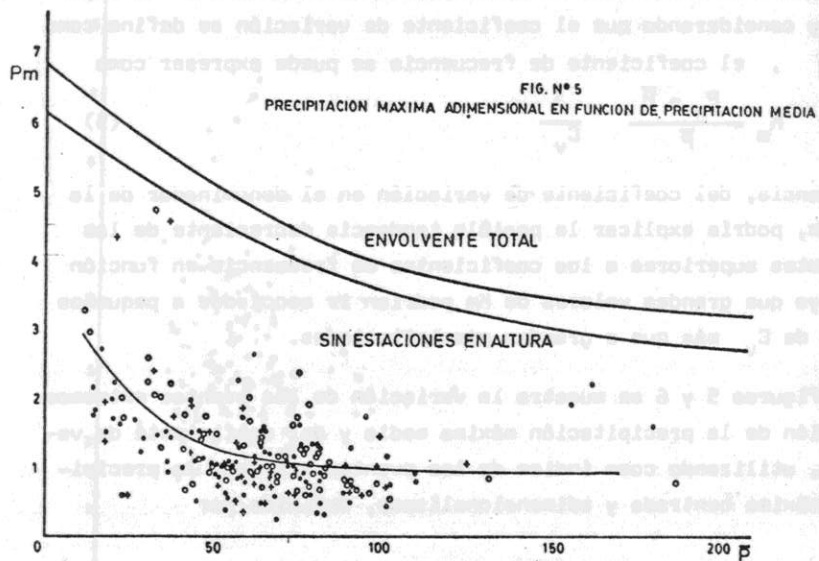
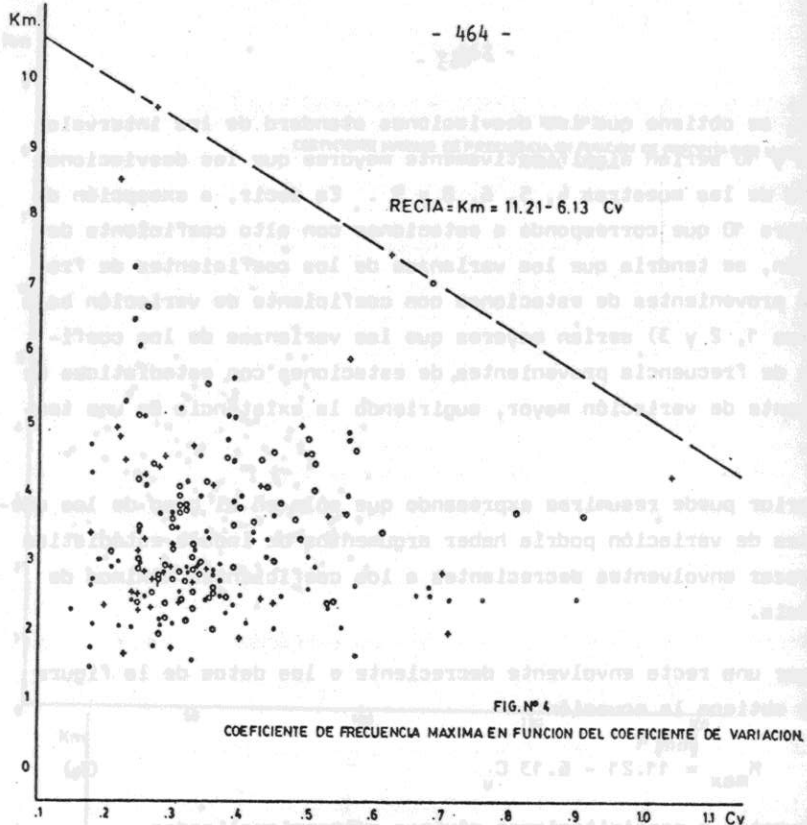
4.2. Envolventes a precipitaciones máximas adimensionalizadas.

De acuerdo a la definición de coeficiente de frecuencia de la ecuación 1 y considerando que el coeficiente de variación se define como $C_v = \frac{\sigma_p}{\bar{p}}$, el coeficiente de frecuencia se puede expresar como

$$K_m = \frac{p_n - \bar{p}}{\bar{p}} \cdot \frac{1}{C_v} \quad (5)$$

La presencia, del coeficiente de variación en el denominador de la ecuación, podría explicar la posible tendencia decreciente de las envolventes superiores a los coeficientes de frecuencia en función de C_v , ya que grandes valores de K_m podrían ir asociados a pequeños valores de C_v más que a grandes precipitaciones.

En las figuras 5 y 6 se muestra la variación de los eventos extremos en función de la precipitación máxima media y del coeficiente de variación, utilizando como índice de los eventos extremos la precipitación máxima centrada y adimensionalizada, definida por



$$p_m = \frac{P_m - \bar{P}}{\bar{P}} \quad (6)$$

En este caso se constata la existencia de dependencias entre la precipitación adimensionalizada y ambos estadígrafos.

La figura # 7 muestra además la relación existente entre el coeficiente de variación y el promedio de las precipitaciones máximas diarias anuales. En este caso la relación recíproca entre ambas variables es bastante clara, con lo cual se facilita el trazado de la envolvente superior dibujada en la figura.

Es interesante notar que las estaciones que definen la envolvente de la figura # 7 corresponden a estaciones cordilleranas o en altura, con posibles componentes nivales que pudiera hacerlas no representativas de las condiciones a menor altitud.

Aún cuando la cantidad de estaciones en altura es insuficiente para analizar este efecto, se ha trazado una segunda envolvente tentativa, despreciando estos valores, que pudiere ser más representativa de estaciones bajas. Se observan además, algunas tendencias regionales en la localización de los puntos en las figuras, sin embargo, aparecen excepciones que no permiten una diferenciación categórica al respecto, requiriendo este aspecto una mayor investigación futura.

Considerando que las relaciones de las figuras 5, 6, y 7 involucran a las tres variables en análisis en forma "cruzada", el trazado de dos envolventes define la tercera, si se pretende que los resultados sean consistentes entre sí. Con este criterio, y partiendo de la envolvente de la figura 7, se han trazado las envolventes de las figuras 5 y 6.

Este procedimiento equivale a una doble maximización ya que la curva envolvente en función de la precipitación media, en este caso, asegura un valor envolvente en función del coeficiente de variación, ya que se han respetado las relaciones más extremas entre C_v y \bar{P} que muestra el total de las estaciones chilenas analizadas. Este procedimiento aparece como una alternativa para la estimación de la PMP. En efecto, las curvas envolventes a las precipitaciones máximas adimensionales en función de la precipitación media se pueden

representar por la expresión

$$\frac{P_{max} - \bar{P}}{\bar{P}} = \phi(\bar{P}) \quad (7)$$

donde $\phi(\bar{P})$ corresponde a la envolvente elegida.

La envolvente a los coeficientes de frecuencia máximos resulta en consecuencia

$$K_m = \frac{\phi(P)}{C_v} \quad (8)$$

es decir, corresponde a una familia de curvas que tienen como parámetro el coeficiente de variación.

La figura Nº 8 muestra el trazado de estas curvas, a partir de la envolvente total, donde se observa que sin ser incompatibles los resultados con los obtenidos por Herschfield, ya que su envolvente podría ser sobrepasada para estadísticas con coeficiente de variación bajos, permite adoptar valores de diseño menores para estadísticas con alto coeficiente de variación.

4.3. Relación entre las Precipitaciones Máximas Registradas y las Precipitaciones Máximas Medias.

La expresión de la ecuación (7), representa de hecho una relación envolvente entre los máximos eventos registrados y las precipitaciones máximas medias, ya que la expresión puede reordenarse de la forma

$$P_{max} = \bar{P} (1 + \phi(\bar{P})) \quad (9)$$

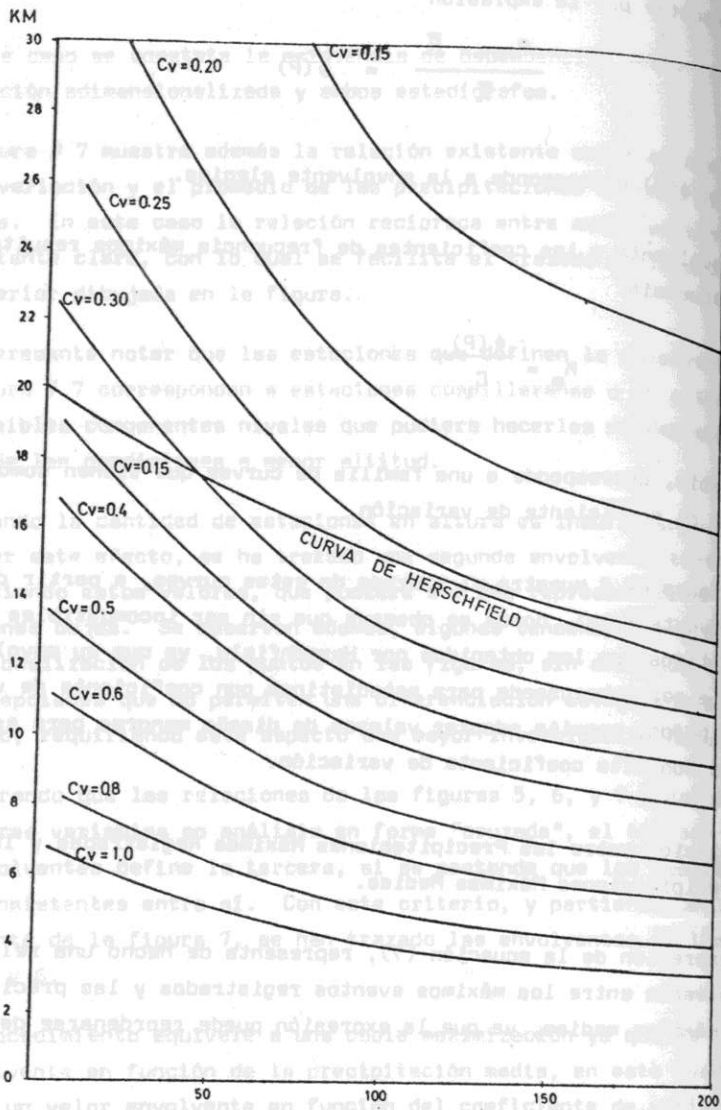


FIG. N° 8
COEFICIENTES MAXIMOS DE FRECUENCIA VS PRECIPITACIONES MAX. DIARIAS

La figura No 9 muestra el trazado de esta curva, incorporando los valores muestrales de las estadísticas chilenas y los valores más extremos que resultan de estadísticas internacionales (Herschfield, 1962). Se observa que el procedimiento propuesto no sólo respeta los eventos más extremos ocurridos en Chile, sino que, en el caso de la envolvente total, también a los valores extremos a nivel mundial de los cuales se dispuso de información. Esto si se considera que estos últimos datos corresponden a precipitaciones máximas en 24 horas, normalmente mayores a las precipitaciones diarias.

5. VERIFICACION, APLICACION Y COMPARACION DEL METODO PROPUESTO.

Considerando que para el desarrollo de este procedimiento, el cálculo de promedios y coeficientes de variación se efectuó sin incluir el máximo evento medido, para la verificación, aplicación y comparación del método, se aplicó el siguiente procedimiento:

- i) Para cada estación se calculó el promedio y desviación standard incluyendo y excluyendo el valor máximo.
- ii) Con los cuocientes \bar{x}_{n-1}/\bar{x}_n , σ_{n-1}/σ_n y la longitud de cada estadística, se corrigió el valor del promedio y desviación standard de acuerdo al procedimiento propuesto por Herschfield, obteniéndose, en consecuencia, el promedio, desviación standard y coeficiente de variación corregidos.
- iii) Entrando a las curvas de las figuras 5 o 9 se obtiene la PMP propuesta en este trabajo.
- iv) Entrando a la curva envolvente de Herschfield (figura 8) se obtiene el valor propuesto por ese autor.
- v) Se calcula la PMP resultante de tomar un valor probabilístico de $K = 11$ con el propósito de comparar los resultados con un criterio de diseño probabilístico.

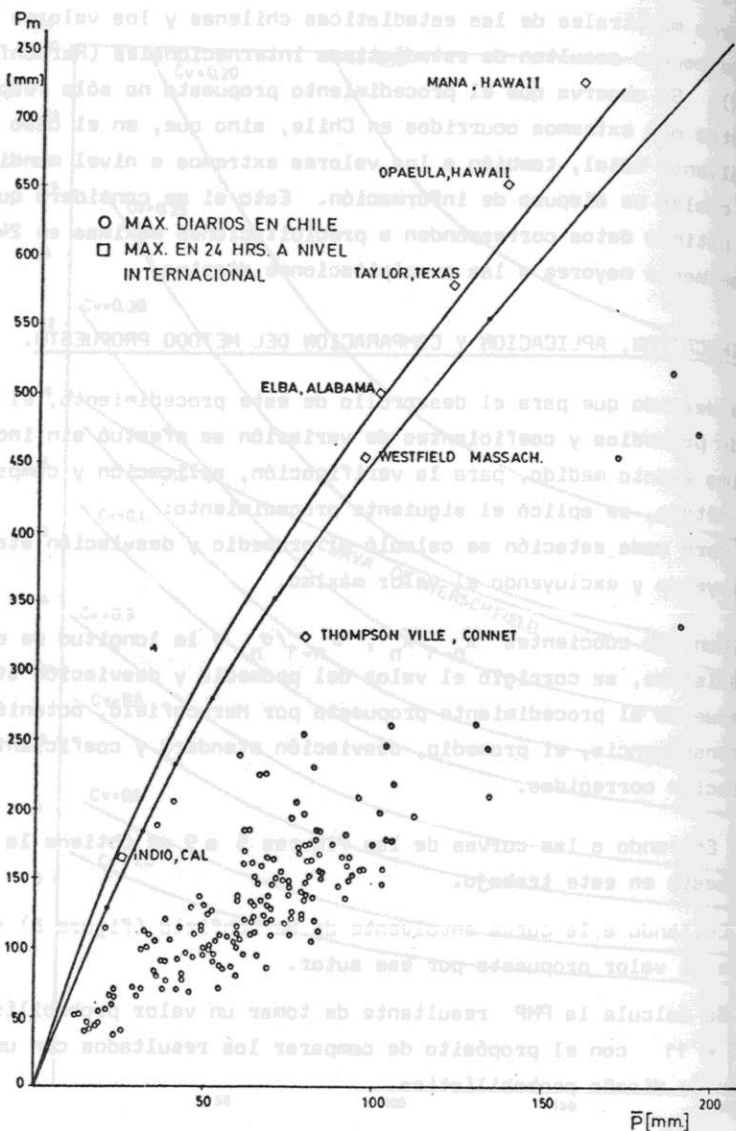


FIG. N° 9
 PRECIPITACIONES MAXIMAS MEDIDAS VS. PRECIPITACIONES MAXIMAS MEDIAS.

6. ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

Los resultados obtenidos indican que, usando la curva envolvente total, que como se ha aclarado, respeta los eventos más extremos registrados y que conceptualmente es más conservadora que la curva de Herschfield, pues maximiza las precipitaciones diarias tanto en función de las precipitaciones medias como del coeficiente de variación, se obtiene que de las 190 estaciones analizadas, en sólo 20 casos el procedimiento propuesto entrega valores más conservadores que los de Herschfield.

Usando la envolvente menos conservadora, la excedencia se produce en 16 casos.

El presente método entrega valores mayores en estaciones con muy bajo coeficiente de variación, varios de los cuales aparecen como regionalmente anómalos.

Al respecto aparece como recomendable en estudios futuros en que se cuenta con estadísticas en mayor cantidad y longitud, efectuar análisis regionales para el trazado de envolventes o las relaciones entre el coeficiente de variación y la precipitación máxima media diaria, que permitan obtener, mediante el presente procedimiento, estimaciones de la PMP de validez regional.

El presente método, al no depender de la desviación standard de cada estación, que es muy sensible a errores muestrales, entrega valores más estables y consistentes entre estaciones vecinas.

Con respecto a una comparación con un criterio probabilístico de diseño, adoptando un coeficiente de frecuencia máximo igual a 11, el presente método entrega resultados con diferencias más o menos balanceadas en ambos sentidos, a diferencia del método de Herschfield que dentro del rango de precipitaciones máximas diarias que ocurren en Chile, es siempre más conservador.

La Tabla # 2, muestra algunos de los resultados más representativos obtenidos, que ilustran las conclusiones mencionadas, incluyendo las estaciones para las cuales existen estimaciones hidrometeorológicas de la PMP. Se observa, al respecto, que las estimaciones

mediante el presente método concuerdan bastante mejor con las estimaciones hidrometeorológicas disponibles.

Se concluye, en consecuencia, que el presente método basado en información chilena, sin pretender reemplazar al método hidrometeorológico, pues adolece de la arbitrariedad de todo método basado en envolventes, permite, en la gran mayoría de los casos, estimaciones de la PMP menos conservadoras que el método de Herschfield y en mejor concordancia con las escasas estimaciones hidrometeorológicas de la PMP ó con el uso de un valor probabilístico resultante para el coeficiente de frecuencia máxima probable igual a 11.

Lo anterior, sin comprometer la seguridad de las obras, ya que respecta los eventos más extremos ocurridos en Chile, y aún a nivel internacional.

TABLA Nº 2
PRECIPITACION DIARIA MAXIMA PROBABLE (mm/ día)
COMPARACION DE METODOS

Estación	Precip. media	Coef. Variac.	Máxima Medida	Herchf.	MAXIMA PROBABLE			Hidromet.
					Prop.1	Prop.2	Probabil.3	
Visviri	24.3	0.33	37	172	167	154	112	
Copiapo	13.3	0.90	52	239	97	89	144	
Coquimbo	31.8	0.51	112	329	212	195	212	
Petorca	45.3	0.31	97	292	281	260	201	
Riechillos	65.8	0.37	110	466	372	344	331	
Valparaíso	61.5	0.48	185	563	354	327	386	
Santiago	44.8	0.35	77	322	279	258	219	
Hcda.Chada	68.3	0.21	95	306	380	353	227	
Rancagua	49.9	0.37	96	364	305	279	251	
Coya	81.3	0.39	152	579	427	398	426	
Parron	83.0	0.32	185	508	433	403	379	381 (4)
Sn.Luis,Ta	64.6	0.28	112	365	366	339	263	
Armerillo	191,2	0.30	334	900	813	721	820	760 (5)
Melado	178.4	0.48	522	1260	767	689	1123	760 (5)
Hornillos	166.3	0.43	455	1102	723	649	958	760 (5)
Concepción	82.9	0.29	137	460	433	402	345	
Temuco	65.2	0.42	151	519	368	340	366	
Valdivia	100.3	0.30	174	559	495	458	432	
Pto.Montt	63.3	0.33	133	415	361	334	293	
Castro	68.8	0.22	96	315	383	354	234	
Pto.Aysen	85.9	0.33	155	530	443	412	401	
Pta.Arenas	31.1	0.53	98	333	209	191	213	

- 1) Curva envolvente total 3) Coeficiente de frecuencia K=11
 2) Envolvente sin estaciones cordilleranas 4) Estimación preliminar
 5) Valor regional cuenca Melado

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

1. World Meteorological Organization, "Manual for the Estimation of Probable Maximum Precipitation", Op. Hydr. Report Nº 1, WMO-332, 1973.
2. Herschfield, David, "Method for Estimating Probable Maximum Rainfall", J. Water Works Assoc. Vol. 57, 1965.
3. Stowhas, Ludwig, "Coeficientes Máximos de Frecuencia de Precipitaciones Diarias en Chile, Proyecto Inv. 8222, Informe Final, Universidad Técnica Federico Santa María, 1983 (en preparación).
4. Herschfield, David, "Extreme Rainfall Relationships", J. Hydr. Div. ASCE, Nov. 1962.
5. Herschfield, David, "Estimating the Probable Maximum Precipitation", J. Hydr. Div. ASCE, Nº 2933, 1961.
6. M. Nenadovich - Harza, "Central Pehuenche, Estudio Hidrológico Presa Melado", Informe Técnico Nº 5, ENDESA, 1981.
7. M. Nenadovich - Harza, "Embalse Colihues, Análisis de Estudios Hidrológicos Existentes y Recomendaciones", Inf. Misc. 3, Nº 238, CODELCO-CHILE, División El Teniente, 1982.
8. Ramírez, Eduardo, "Análisis Probabilístico y Estadísticas de Precipitaciones Máximas en 24 horas", CORFO, División Recursos Hidráulicos, Pub. 236, Marzo 1974.
9. Dirección Meteorológica de Chile, "Anuarios Meteorológicos", Varios Tomos 1910 - 1943.

...il, Seo. Percepción Remota, Fac. Cs. FF y NT, Universidad de Chile
 ...il, Universidad de Chile
 ...il, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas