

Pinkayan, S. 1966. Conditional Probabilities of Occurrence of Wet and Dry Years over a Large Continental Area. Hydrology Paper No. 12, Colorado State University, Fort Collins.

Rodríguez, M. 1997. Homepage. 2 Julio 1999 <http://personal.redestb.es/riotorto/>

Rouhaud, J.F. 2000. Cellular automata and consumer behaviour. European Journal of Economic and Social Systems, Vol. 14, No. 1, pp. 37 – 52.

Salas, J. D. 1978. Statistical Properties of Droughts. United States-Argentinian Workshop on Droughts. Mar del Plata, Argentina.

Toffoli, T., y N. Margolus, 1987. Cellular Automata: A New Environment for Modeling. MIT Press, Cambridge, Mass.

Vogel, R. M. 1987. Reliability indices for water supply systems. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol. 113 (4), pp. 563-579.

Weimar, J. 1997. <http://www.tu-bs.de/institute/WiR/weimar/ZAscript/ZAscript.html>

Wolfram, S. 1983. Cellular Automata. Los Alamos Science, Vol. 9, pp. 2-21.

Yevjevich V. 1967. An objective approach to definition and investigation of continental droughts. Hydrology Paper No. 23, Colorado State University, Fort Collins.

## SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

### XV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

#### ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA (IDF) EN SEIS ESTACIONES PLUVIOGRÁFICAS DISTRIBUIDAS EN LA VII REGIÓN DEL MAULE, CHILE

ROBERTO PIZARRO TAPIA<sup>1</sup>

ALEJANDRO ABARZA MARTÍNEZ<sup>2</sup>

CÉSAR FARÍAS DAZA<sup>3</sup>

#### RESUMEN

Este estudio analiza la construcción de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) en la VII Región del Maule, Chile, en base al comportamiento de las precipitaciones de cuatro estaciones pluviométricas del Valle Central, y de dos de la Cordillera de los Andes. Estas estaciones son Talca, Péncahue, Melozal, Parral, Colorado y Bullileo, las cuales cuentan con registros cuya antigüedad fluctúa entre los 14 y 17 años.

La metodología consistió en muestreos sobre los pluviogramas respectivos, con el fin de obtener las intensidades máximas por año, para las duraciones de 24, 12, 8, 6, 4, 2 y 1 hora. Los datos se llevaron a intensidad horaria y para cada duración se ajustó la función de Gumbel, que dio excelentes medidas de bondad de ajuste. Luego, se construyeron las curvas IDF para los períodos de retorno 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75, y 100 años. Posteriormente se construyeron tablas de uso práctico para la extrapolación de las curvas hacia zonas sin pluviómetros.

Así, se puede señalar que las curvas IDF obtenidas para las estaciones de la Cordillera de los Andes, con respecto a las del Valle Central, son muy similares, a excepción de que las ordenadas de intensidad horaria son más altas en la zona cordillerana andina. Finalmente, en función de los resultados obtenidos, se puede recomendar tanto la utilización de los seis modelos ajustados, como su extrapolación en zonas o estaciones cercanas con regímenes climáticos similares.

<sup>1</sup> Depto. de Gestión Forestal y Ambiental, Universidad de Talca, Chile.

<sup>2</sup> Analista de Sistemas, Banco Estado, Chile.

<sup>3</sup> Ayudante de Investigación, Universidad de Talca, Chile.

## 1. INTRODUCCIÓN

Esta investigación pretendió analizar el diseño y construcción de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), para la VII Región del Maule, Chile. Para ello se utilizaron cuatro estaciones pluviográficas distribuidas en el Valle Central y dos estaciones de la Cordillera de los Andes.

El área de aplicación se caracteriza por presentar una Cordillera de los Andes disminuida en altura, un Valle Central con amplias áreas planas y con suaves ondulaciones y una Cordillera de la Costa que va perdiendo altura y que se presenta muy cortada por los valles fluviales.

En cuanto a una caracterización climática de la región, se puede mencionar que las temperaturas promedio oscilan entre los 28°C en Enero, hasta los 10°C en Julio. Asimismo, el Balance Hídrico de Chile (1987), citado por MOP-DGA (1988), destaca el clima de tipo mediterráneo, que impera desde el río Aconcagua al Bío-Bío. Además, explicita que la temperatura media, por ejemplo en Talca, es de 14,7°C, y la precipitación media anual es de 735 mm.

Con todo lo anterior, la investigación buscó realizar un acabado estudio y análisis del comportamiento de las precipitaciones en seis estaciones pluviográficas de la Región, permitiendo aportar patrones de conducta, y la posibilidad de contar con indicadores efectivos y eficientes para el diseño hidrológico.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología contempló las siguientes actividades:

### 2.1 Selección de las estaciones pluviográficas

En la VII Región existen 12 estaciones pluviográficas. De éstas, se tomaron como referencia seis estaciones, seleccionando cuatro estaciones para el Valle Central y dos para la Cordillera de los Andes. Estas estaciones son: Talca, Pencahue, Melozal, Parral, Colorado y Bullileo. En dicha selección, se tomó como criterio el tipo, cantidad y periodicidad de los datos, eligiéndose como referencia de análisis el período comprendido entre 1982 y 1998.

### 2.2 Recolección de la información requerida

Los datos pluviométricos e información necesaria para el desarrollo de esta investigación fueron aportados por la Dirección General de Aguas (DGA), VII Región y Oficina Central. Los antecedentes facilitados por dicha institución fueron las bandas de los pluviógrafos con los registros de las precipitaciones diarias y horarias.

### 2.3 Selección de intensidades máximas

En esta etapa se analizaron los registros de los pluviógrafos, para lo cual se realizaron diversos muestreos. Se partió con mediciones de las 08:00 hr de la mañana de un día hasta las 08:00 hr del día siguiente, para una duración de 24 horas; luego, fue necesario desplazarse en intervalos de tiempo de forma discreta y estable, utilizando para ello cuñas, con el propósito de ir

seleccionando para cada año los valores extremos de precipitación para tiempos de 1, 2, 4, 6, 8, 12 y 24 horas, analizándose alrededor de 4900 chubascos diferentes (con un promedio de 50 chubascos por año), observados entre los años 1982 y 1998. Posteriormente, se tomaron los valores de cada una de las series y se dividieron por su duración D en (horas), obteniéndose así las intensidades en mm/hr.

Es importante señalar que el motivo de realizar diversos muestreos fue por intentar obtener el gráfico de las curvas IDF lo más aproximado al método propuesto por Témex (1978), procurando evitar sobresaltos o cambios en la tendencia de las curvas.

### 2.4 Ajuste de los datos con una Función de Distribución de Probabilidad

Una vez calculadas las intensidades máximas horarias de precipitación, para cada estación y para cada año, fue necesario calcular, para cada duración seleccionada, las intensidades asociadas a distintos períodos de retorno. Esto se hizo ajustando a dichos valores una Función de Distribución de Probabilidad de valor, como la función Gumbel o extrema tipo I. Esta función de distribución de probabilidades se define como:

$$F(X) = P [E \leq X] = e^{-e^{-\sigma(X-\mu)}} \quad -\infty \leq X \leq \infty \quad (1)$$

Donde X es el valor a asumir por la variable aleatoria, y  $\sigma$ ,  $\mu$  son parámetros a estimar en función de los valores de la muestra.

Como medida de bondad de ajuste se utilizó el Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ), y el Test de Kolmogorov-Smirnov.

### 2.5 Determinación de las curvas IDF para distintos períodos de retorno

Una vez hecho el ajuste con la función de distribución de probabilidad de Gumbel, se procedió a graficar la intensidad de precipitación y la duración, de modo de obtener los puntos de la curva asociada a un período de retorno de 5 años. Luego, se repitió la misma operación con el período de retorno  $T = 10, 20, 30, 50, \dots, 100$  años, y para cada una de las estaciones pluviográficas.

### 2.6 Definición de tablas de uso práctico

En esta etapa se procedió a la construcción de tablas, que dan cuenta de la relación entre la intensidad de precipitación en 1, 2, 4, 6, 8, 12 hr, y la intensidad de 24 hr, esto para cada período de retorno considerado. Ello, porque la precipitación de 24 horas es la más común de encontrar y estas relaciones permitirían la extrapolación a zonas sin datos.

### 2.7 Análisis estadístico

Una vez definidas las tablas de uso práctico y diseñadas las curvas IDF para cada estación, se procedió a analizar el comportamiento de las variables involucradas en este estudio, relacionando simultáneamente las tres variables en una familia de curvas, de modo de representar la relación de la intensidad, duración y la frecuencia no sólo en forma gráfica, sino que también en forma

analítica, para lo cual se utilizó la ecuación propuesta por Aparicio (1997), la cual ha sufrido una pequeña modificación, quedando expresada de la siguiente forma:

$$I = \frac{kT^m}{D^n} \quad (2)$$

Donde **k**, **m** y **n** son constantes que se calculan mediante un análisis de regresión lineal múltiple, T es el período de retorno en años, D la duración en minutos u horas, e I la intensidad de precipitación en mm/hr.

Luego, aplicando logaritmo a la ecuación (2) se pretende llegar a la forma de un modelo de regresión lineal múltiple, cuyo modelo se expresa como sigue:

$$\log I = \log k + m \log T - n \log D \quad (3)$$

Para establecer la calidad de la regresión, se analizaron los supuestos de regresión para la función modelada, y este análisis debió probar los supuestos de normalidad, homocedasticidad y no-autocorrelación. Además, se utilizó como medida de bondad de ajuste el Coeficiente de Determinación R<sup>2</sup> y la prueba U de Mann Whitney.

### 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1 Determinación de las pruebas de bondad de ajuste.

Una vez ajustada la función de Gumbel, se determinaron las pruebas de bondad de ajuste, utilizándose como medidas de bondad al test de Kolmogorov-Smirnov y el Coeficiente de Determinación R<sup>2</sup>. Los valores de las pruebas de bondad se presentan en las Tablas 1 y 2.

**Tabla 1.** Determinación del nivel de ajuste según test Kolmogorov-Smirnov para cada estación y duración.

Estación Duración	Talca		Pencahue		Parral		Melozal		Bullileo		Colorado	
	Dc(*)	Ajuste	Dc(*)	Ajuste	Dc(*)	Ajuste	Dc(*)	Ajuste	Dc(*)	Ajuste	Dc(*)	Ajuste
1	0,124	A	0,188	A	0,103	A	0,160	A	0,127	A	0,141	A
2	0,091	A	0,118	A	0,073	A	0,102	A	0,094	A	0,077	A
4	0,135	A	0,127	A	0,115	A	0,105	A	0,118	A	0,126	A
6	0,111	A	0,089	A	0,092	A	0,120	A	0,140	A	0,185	A
8	0,091	A	0,109	A	0,063	A	0,110	A	0,175	A	0,127	A
12	0,081	A	0,143	A	0,141	A	0,070	A	0,136	A	0,134	A
24	0,112	A	0,097	A	0,070	A	0,061	A	0,108	A	0,139	A
Dt	0,318		0,318		0,318		0,318		0,328		0,349	

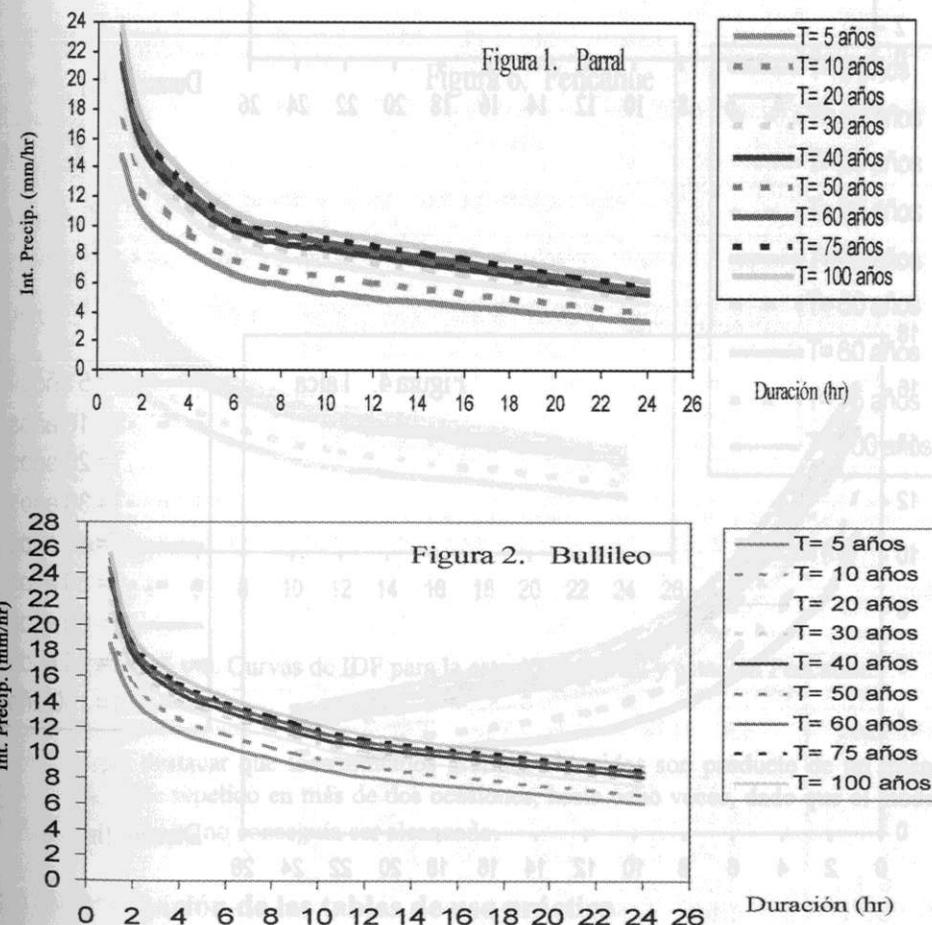
A: Es aceptado el modelo, Dc (\*): Estadístico de Kolmogorov-Smirnov calculado, Dt : Valor de tabla.

Por consiguiente se acepta para todas las estaciones, así como para cada duración considerada, el ajuste del modelo de Gumbel, según el test de Kolmogorov-Smirnov.

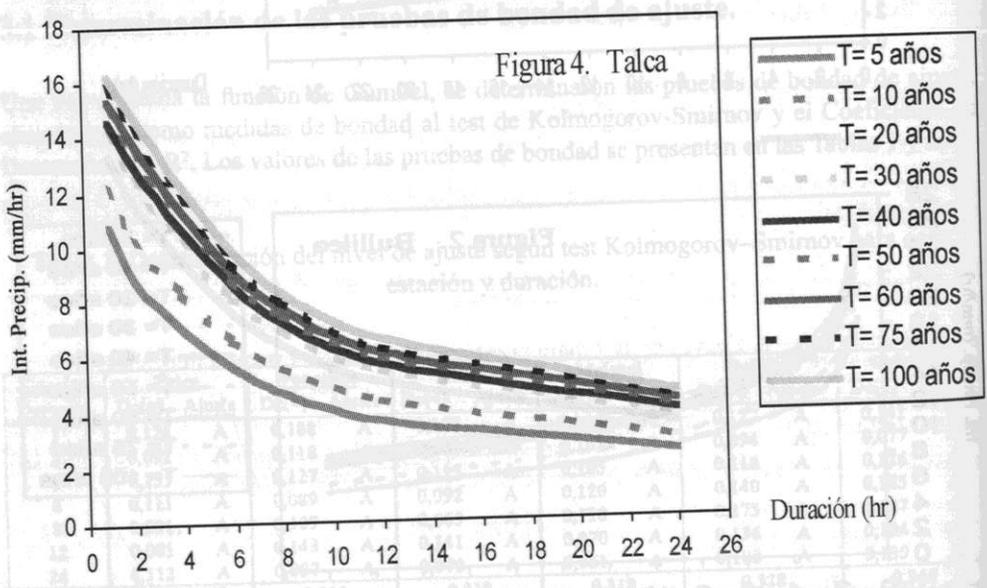
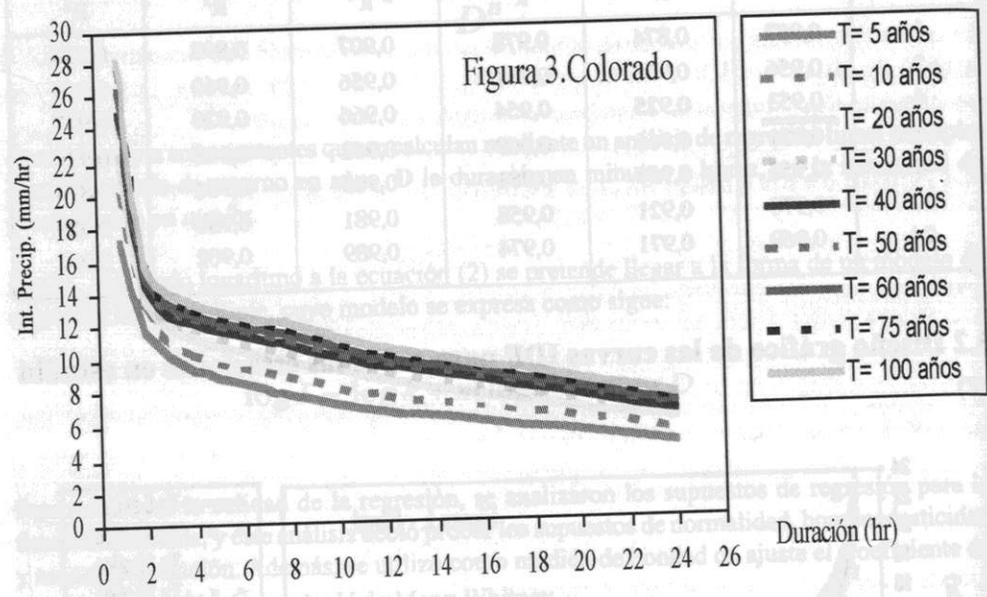
**Tabla 2.** Determinación del Coeficiente de Determinación (R<sup>2</sup>), para las seis estaciones.

Estación	Talca	Pencahue	Parral	Melozal	Colorado	Bullileo
Duración	R <sup>2</sup>					
1	0,957	0,874	0,978	0,907	0,898	0,938
2	0,956	0,958	0,981	0,956	0,960	0,969
4	0,953	0,925	0,954	0,966	0,920	0,947
6	0,951	0,966	0,969	0,962	0,908	0,920
8	0,955	0,956	0,981	0,965	0,951	0,874
12	0,970	0,921	0,958	0,981	0,930	0,929
24	0,969	0,971	0,974	0,989	0,902	0,962

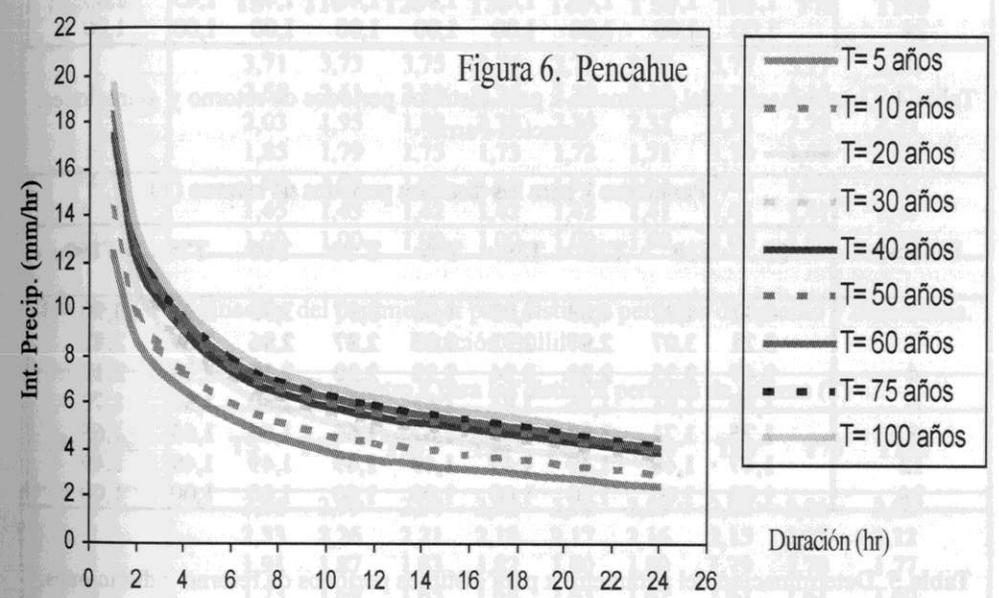
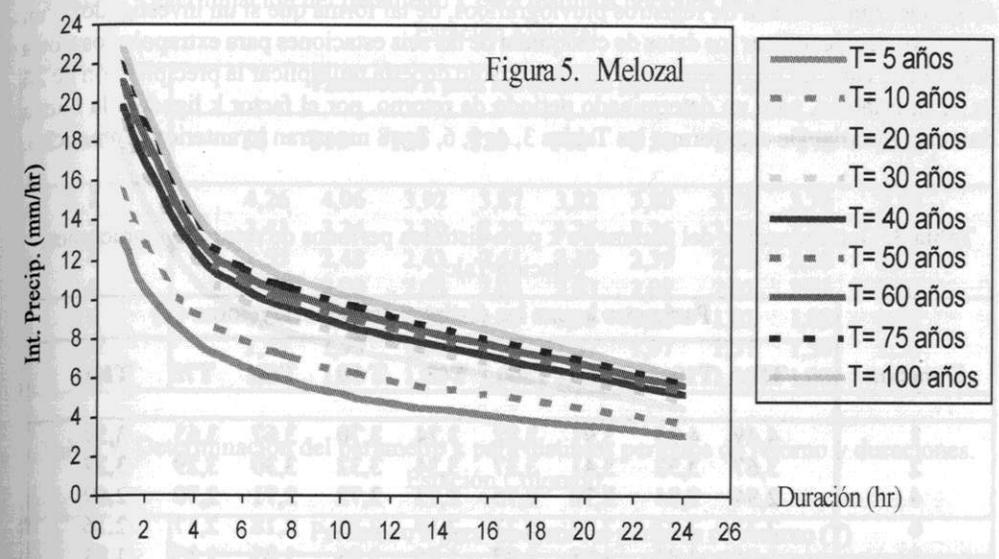
#### 3.2 Diseño gráfico de las curvas IDF para todas las estaciones en estudio



**Figura 1 y 2.** Curvas IDF para la estación Parral y estación Bullileo.



Figuras 3 y 4. Curvas IDF para la estación Colorado y estación Talca.



Figuras 5 y 6. Curvas de IDF para la estación Melozal y estación Penciahue.

Es importante destacar que los resultados gráficos obtenidos son producto de un intenso muestreo que fue repetido en más de dos ocasiones, hasta ocho veces, dado que el modelo teórico de las curvas no conseguía ser alcanzado.

### 3.3 Determinación de las tablas de uso práctico

Para hacer más adecuado el uso de esta información, se entregan las siguientes tablas de uso práctico, que permiten estimar intensidades para distintos períodos de retorno T. El parámetro k calculado da cuenta de la relación entre la intensidad horaria y la intensidad de precipitación en

24 horas para cada período de retorno. Estas relaciones permitirán la extrapolación a zonas o estaciones que carezcan de registros pluviográficos, de tal forma que si un investigador o un ingeniero decide utilizar los datos de cualquiera de las seis estaciones para extrapolarlos a otra estación de carácter meramente pluviométrico, sólo debería multiplicar la precipitación de 24 hr de su estación, para un determinado período de retorno, por el factor k ligado a la nueva duración horaria. De esta forma, las Tablas 3, 4, 5, 6, 7 y 8 muestran lo anteriormente dicho.

Tabla 3. Determinación del parámetro k para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación Talca.

Duración	Parámetro k para los distintos períodos de retorno (T)								
	T5	T10	T20	T30	T40	T50	T60	T75	T100
1	4,49	4,15	3,91	3,82	3,74	3,70	3,67	3,63	3,58
2	3,67	3,52	3,41	3,37	3,34	3,32	3,30	3,29	3,27
4	2,94	2,84	2,78	2,75	2,73	2,72	2,71	2,70	2,69
6	2,33	2,27	2,22	2,21	2,19	2,18	2,18	2,17	2,16
8	1,96	1,92	1,88	1,87	1,86	1,86	1,85	1,85	1,84
12	1,52	1,49	1,47	1,47	1,46	1,46	1,45	1,45	1,45
24	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 4. Determinación del parámetro k para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación Parral.

Duración	Parámetro k para los distintos períodos de retorno (T)								
	T5	T10	T20	T30	T40	T50	T60	T75	T100
1	4,41	4,22	4,09	4,03	4,00	3,97	3,95	3,93	3,90
2	3,21	3,07	2,97	2,92	2,89	2,87	2,86	2,84	2,82
4	2,47	2,35	2,28	2,24	2,22	2,20	2,19	2,18	2,16
6	1,99	1,91	1,86	1,84	1,82	1,81	1,80	1,80	1,79
8	1,75	1,71	1,69	1,67	1,67	1,66	1,66	1,65	1,65
12	1,47	1,48	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49
24	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 5. Determinación del parámetro k para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación Pencahue.

Duración	Parámetro k para los distintos períodos de retorno (T)								
	T5	T10	T20	T30	T40	T50	T60	T75	T100
1	5,11	4,83	4,64	4,56	4,50	4,46	4,44	4,40	4,37
2	3,54	3,33	3,19	3,13	3,08	3,05	3,03	3,01	2,98
4	2,70	2,54	2,43	2,38	2,35	2,32	2,31	2,29	2,27
6	2,20	2,07	1,98	1,94	1,91	1,89	1,88	1,86	1,85
8	1,88	1,78	1,72	1,69	1,67	1,66	1,65	1,64	1,63
12	1,50	1,46	1,43	1,42	1,41	1,40	1,40	1,39	1,39
24	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 6. Determinación del parámetro k para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación Melozal.

Duración	Parámetro k para los distintos períodos de retorno (T)								
	T5	T10	T20	T30	T40	T50	T60	T75	T100
1	4,26	4,06	3,92	3,87	3,82	3,80	3,78	3,76	3,73
2	3,41	3,34	3,30	3,28	3,26	3,26	3,25	3,25	3,23
4	2,55	2,48	2,43	2,41	2,40	2,39	2,38	2,38	2,37
6	2,14	2,09	2,05	2,04	2,03	2,02	2,01	2,01	2,00
8	1,87	1,85	1,84	1,83	1,83	1,82	1,82	1,82	1,82
12	1,53	1,55	1,56	1,57	1,57	1,57	1,57	1,58	1,58
24	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 7. Determinación del parámetro k para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación Colorado.

Duración	Parámetro k para los distintos períodos de retorno (T)								
	T5	T10	T20	T30	T40	T50	T60	T75	T100
1	3,71	3,73	3,75	3,76	3,76	3,77	3,77	3,77	3,78
2	2,55	2,41	2,30	2,25	2,22	2,19	2,18	2,15	2,13
4	2,03	1,95	1,89	2,38	2,35	2,32	2,31	2,29	2,27
6	1,85	1,79	1,75	1,73	1,72	1,71	1,70	1,69	1,68
8	1,69	1,66	1,65	1,64	1,63	1,63	1,62	1,62	1,62
12	1,45	1,43	1,42	1,42	1,42	1,41	1,41	1,41	1,41
24	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 8. Determinación del parámetro k para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación Bullileo.

Duración	Parámetro k para los distintos períodos de retorno (T)								
	T5	T10	T20	T30	T40	T50	T60	T75	T100
1	3,06	2,99	2,94	2,92	2,90	2,89	2,88	2,86	2,85
2	2,33	2,26	2,21	2,18	2,17	2,16	2,15	2,13	2,12
4	1,91	1,87	1,83	1,82	1,80	1,80	1,79	1,78	1,77
6	1,73	1,69	1,65	1,64	1,63	1,62	1,61	1,61	1,60
8	1,59	1,55	1,52	1,51	1,50	1,49	1,49	1,48	1,47
12	1,34	1,32	1,30	1,30	1,29	1,29	1,28	1,28	1,27
24	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

#### 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Otra forma de desarrollar las curvas IDF es a través de una forma analítica propuesta por Aparicio (1997). Dicho autor plantea la alternativa de obtener una ecuación que genere las curvas IDF a través de un modelo de regresión lineal, de modo de extrapolar la ecuación generada para cada estación, a zonas que carezcan de registros pluviográficos y que se encuentren relativamente cerca. Aparicio plantea el siguiente modelo de regresión lineal múltiple:

$$I = \frac{k * T^m}{(D + c)^n} \quad (4)$$

Por propia recomendación del autor y para facilidad de cálculo se modificó el modelo propuesto, eliminándose la constante c, que corresponde a un parámetro asociado a la duración y que para este caso tomó un valor cero, quedando entonces expresado el modelo:

$$I = \frac{k * T^m}{D^n} \quad (5)$$

Es importante destacar que los modelos ajustados para las seis estaciones cumplieron los supuestos de regresión de homocedasticidad, no-autocorrelación y normalidad.

#### 4.1 Medidas de bondad de ajuste

Una vez ajustados los modelos para cada estación, se probaron dos medidas de bondad de ajuste; una corresponde a la prueba U de Mann Whitney, y la otra al coeficiente de determinación ( $R^2$ ), ambas utilizadas para validar los modelos obtenidos para cada estación pluviográfica. Los modelos propuestos para obtener las curvas IDF para cada estación, así como también las pruebas de bondad de ajuste, se dan a conocer en la tabla 9.

Tabla 9. Modelos ajustados para cada estación pluviográfica.

Estación	Modelo	U	$R^2$
Talca	$I = (35,205 * T^{0,195247}) / D^{0,381204}$	se acepta Ho	96,79 %
Pencahue	$I = (63,694 * T^{0,164143}) / D^{0,469797}$	se acepta Ho	99,30 %
Parral	$I = (62,461 * T^{0,176557}) / D^{0,426971}$	se acepta Ho	98,79 %
Melozal	$I = (59,923 * T^{0,216018}) / D^{0,438091}$	se acepta Ho	98,17 %
Colorado	$I = (71,210 * T^{0,13906}) / D^{0,400498}$	se acepta Ho	96,04 %
Bullileo	$I = (57,890 * T^{0,111765}) / D^{0,325752}$	se acepta Ho	99,02 %

Donde:

- I: La intensidad de precipitación en mm/hr, para una duración D y un período de retorno T.
- T: Es el período de retorno en años.
- D: Es la duración en minutos.
- U: Corresponde a la prueba de bondad de ajuste U de Mann Whitney para cada modelo seleccionado, con un nivel de confianza del 95%.
- $R^2$ : Es el coeficiente de determinación de cada modelo.

## 5. CONCLUSIONES

Según el coeficiente de determinación  $R^2$  y los resultados de la prueba U de Mann Whitney, casi no se manifiestan diferencias entre los modelos ajustados de las estaciones del Valle Central y las estaciones pluviográficas de la Cordillera de los Andes.

Los modelos utilizados para explicar la relación entre la intensidad, la duración y la frecuencia, poseen una muy buena calidad de ajuste, lo que asegura una buena estimación y pronóstico de intensidades máximas de precipitación.

En relación a la construcción de las curvas IDF, se puede concluir que en general no se presentaron grandes problemas en el diseño y construcción de las curvas para las distintas estaciones, salvo en la estación de Colorado, en la cual fue necesario realizar acabados e intensos muestreos con el objeto de obtener una gráfica lo más cercana al modelo teórico.

## 6. RECOMENDACIONES

Se recomienda el uso de los modelos ajustados, para cada estación estudiada.

Si para la zona en estudio sólo existe información pluviométrica, es decir, duraciones de precipitación de 24 horas, se deberán utilizar las tablas de uso práctico con el parámetro k calculado de la estación pluviográfica más cercana y, mediante esto, estimar la intensidad asociada a duraciones menores de 24 horas y para distintos períodos de retorno, con las debidas precauciones y limitaciones que esta práctica conlleva.

Para estimar crecidas empleando la fórmula racional, es posible utilizar directamente los valores de intensidad máxima para diversas duraciones temporales y para los distintos períodos de retorno establecidos en las tablas de uso práctico.

Es también recomendable que este estudio sea complementado y revisado en un plazo máximo de ocho años, con el fin de añadirle nueva información, lo que podría modificar sus resultados.

## REFERENCIAS

- Aparicio, F. 1997. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Balderas, México: Limusa. 303 p.
- MOP (Ministerio de Obras Públicas), Dirección General de Obras Públicas, Dirección de Vialidad, Chile. 1981. Manual de Carreteras. Volumen n°3: Instrucciones de Diseño. Capítulo 3.700. Hidrología y Drenaje. Chile. 208 p.
- Témez, J. 1978. Cálculo Hidrometeorológico de Caudales Máximos en Pequeñas Cuencas Naturales. Dirección General de Carreteras. Madrid. España. 111 p.
- Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.
- Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.