

- El modelo representa adecuadamente los datos de hidrogramas observados, presentando la ventaja, sobre la superposición lineal, de tener integradas todas las ecuaciones con las condiciones iniciales apropiadas.

- Si la calibración se realiza utilizando valores de intensidad de lluvia efectiva cercanos al mayor valor del hietograma a modelar, y los valores de los parámetros se suponen constantes durante la tormenta de intensidad de lluvia variable, los resultados del modelo son semejantes a los presentados. Esto se debe fundamentalmente a que estos intervalos son los que dominan durante la tormenta, en las situaciones consideradas.

BIBLIOGRAFIA.

Overton D. y Meadows M. (1976), "Stormwater Modelling". Academic Press Inc., New York.
Vargas X., Brown E. y Westenenk C. (1981), "Modelación del Flujo Superficial a Través de la Aproximación de Onda Cinemática". Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica V Congreso Nacional.

AGRADECIMIENTOS.

Las autoras del presente trabajo desean dejar constancia de sus agradecimientos al Departamento de Desarrollo de la Investigación de la Universidad de Chile por el financiamiento parcial del Proyecto de Investigación I 485, del cual forma parte este trabajo.

FIG 5 APLICACION DEL MODELO. HIETOGRAMA 2

DETERMINACION DE LA LLUVIA DE CALCULO DEL ALCANTARILLADO DE SANTIAGO

Agustín Martínez L. (1) *

Rodrigo Caro C. (1) *

RESUMEN

Dada la extensión que ha adquirido la ciudad de Santiago, en el diseño del alcantarillado de aguas lluvias no es recomendable utilizar una curva única de variación de la intensidad de precipitación con el tiempo de concentración, como ha sido el procedimiento habitual (Curva de Seguridad 7 veces en 10 años). Este artículo resume los principales aspectos del análisis pluviométrico de Santiago llevado a cabo con motivo del estudio del Plan Maestro del Alcantarillado. En las conclusiones se definen cuatro zonas en las cuales la media de las precipitaciones diarias máximas tiene poca variación de modo que puede considerarse constante para toda el área que abarca la zona respectiva. Para cada una de estas cuatro zonas, se entrega la representación gráfica y analítica de las curvas de intensidad-duración-frecuencia que permiten determinar la precipitación de cálculo para áreas tributarias con diferentes tiempos de concentración y varios períodos de retorno.

(1) Ingeniero de CADE-IDEPE, Ingeniería y Desarrollo de Proyectos Ltda.

* Los autores expresan su agradecimiento a los ingenieros de EMOS, Sra. Josefina Bolelli, Jefe Depto. Estudios, y Sr. Vittorio Curotto, por autorizar la publicación de este artículo que es parte del estudio del Plan Maestro del Alcantarillado de Santiago, encargado por EMOS al Consorcio Coyne et Bellier y CADE-IDEPE.

1.- INTRODUCCION

En un artículo anterior se demostró que para el diseño de colectores de aguas lluvias, la intensidad de precipitación utilizada en el cálculo corresponde a los valores de la curva de seguridad "7 veces en 10 años" que fuera deducida en 1941. Desde esa fecha, la ciudad de Santiago se ha extendido enormemente y ha aumentado la información pluviométrica disponible. Por estos motivos, para desarrollar el Plan Maestro del Alcantarillado de Santiago, se estimó de fundamental importancia llevar a cabo un estudio pluviométrico del área metropolitana y recomendar la lluvia de diseño que se debe adoptar en diferentes zonas de la capital.

En los próximos párrafos se presentan los principales aspectos del estudio ejecutado y sus conclusiones.

2.- PRECIPITACIONES DIARIAS MAXIMAS

2.1 Estadística de los datos observados

Mientras en el área del Gran Santiago, la información pluviométrica es abundante, no ocurre lo mismo con la pluviográfica. De hecho existe sólo una estación (Quinta Normal) con estadística pluviográfica de longitud aceptable. Hasta 1960, el pluviógrafo de Quinta Normal permitió deducir las intensidades de lluvia para intervalos de 10 minutos. Sin embargo, a partir de 1961 se produce un cambio en la escala de observación, de modo que una precipitación de 24 horas aparece ahora comprendida en un espacio no mayor de 2 cm, perdiéndose totalmente las variaciones del fenómeno para intervalos más cortos. En consecuencia, para efectos prácticos, sólo es posible utilizar el material estadístico comprendido entre los años 1917 y 1960.

Sobre la base de lo expuesto, se ha definido la estación Quinta Normal como patrón pluviométrico del área, de modo que los datos de las otras estaciones serán corregidos y completados tomando como referencia la estadística de Quinta Normal.

De las estaciones con datos de precipitación en 24 horas, se eligieron nueve, en función de la longitud de su estadística y de su ubicación, de modo de cubrir en forma representativa todo el área de estudio.

En la tabla N° 1 aparecen las estaciones consideradas, con su ubicación, elevación y período de su estadística. Se han agregado, además, los valores del medio aritmético (media) y de la desviación standard de la serie anual de precipitaciones máximas en 24 horas. El cálculo de estos últimos valores se ha hecho en forma independiente para cada estación. Sin embargo, con el objeto de mejorar la estimación de los parámetros estadísticos fundamentales, se estimó conveniente analizar, en forma coherente, toda la información regional. Para ello:

- Se ha procurado corregir las duraciones y períodos de observación de las estaciones que aparecen en la tabla N° 1 para hacerlas homogéneas, de modo que todas tengan el mismo período de referencia, esto es, el de Quinta Normal (1911-1981).
- Se ha ensayado una relación analítica entre la media y la desviación standard y sobre todo, entre estos parámetros y una característica geográfica o topográfica, a fin de poder interpolar en un punto cualquiera, definir zonas de precipitación uniforme y poder calcular dichos parámetros no solamente en un punto sino en un área determinada.

2.2

Homogeneización temporal

La observación de los datos registrados en las estaciones seleccionadas revela que la longitud de estadísticas es diversa y que existen numerosos vacíos. Para uniformar la información existente, se decidió seguir el criterio que a continuación se detalla.

Sean:

m_k : media de la estación k para el período de observación.

m_3 : media de la estación Quinta Normal para el mismo período de observación de la estación k.

FIGURA N° 1

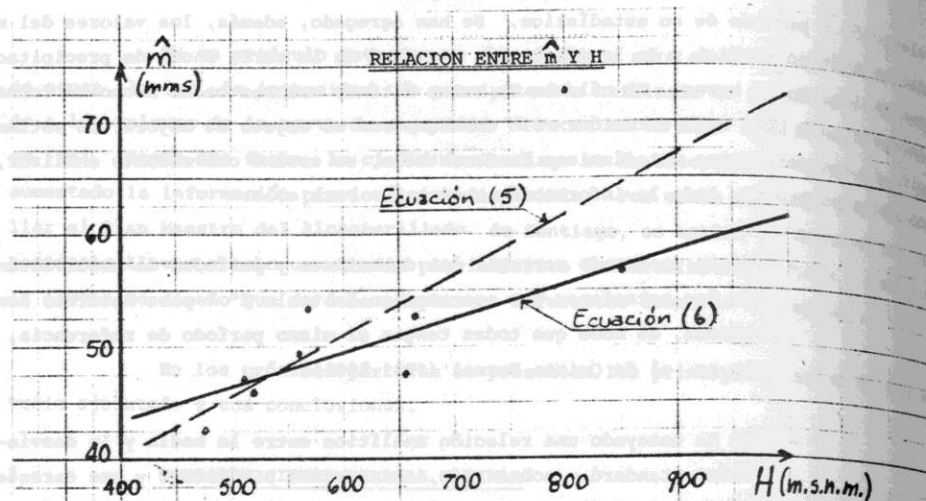


TABLA N° 1.

ESTADIGRAFOS DE LAS PRECIPITACIONES MAXIMAS EN 24 HORAS

Estación y periodo de la estadística (1)	Latitud (2)	Longit (3)	Altura (m) (4)	\bar{m}_k (mm) (5)	s_k (mm) (6)	Factor* correc. (7)	\hat{m}_k (mm) (8)	\hat{s}_k (mm) (9)	CV _k (10)
1. Fundo Huínganal (1960 - 1979)	33°20'	70°30'	850	51,31	17,333	1.105 1.190	56,70	20,633	0,36
2. Pudahuel (1967 - 1981)	33°23'	70°47'	476	42,13	22,382	1.009 0.806	42,52	18,049	0,42
3. Quinta Normal (1911 - 1981)	33°26'	70°41'	520	46,11	16,971	1.000 1.000	46,11	16,971	0,37
4. Tobelaba (1960 - 1961)	33°27'	70°33'	654	43,71	14,477	1.090 0.944	47,62	15,551	0,33
5. Los Cerrillos (1960 - 1981)	33°30'	70°42'	512	44,92	25,096	1.050 0.948	47,15	23,784	0,50
6. La Florida (1960 - 1981)	33°32'	70°33'	665	51,60	18,793	1.024 0.834	52,84	15,677	0,32
7. El Bosque (1960 - 1981)	33°33'	70°41'	558	45,88	18,157	1.081 0.930	49,60	16,895	0,34
8. La Obra (1960 - 1981)	33°36'	70°28'	799	69,92	16,058	1.042 1.081	72,83	17,357	(0,24)
9. San Bernardo (1960 - 1979)	33°36'	70°42'	568	46,16	15,849	1.162 1.105	53,65	17,519	0,33

(*) Para cada estación, existen dos factores de corrección. El primero se aplica al medio aritmético y el segundo a la desviación standard.

\hat{m}_3 : media de la estación Quinta Normal para el periodo 1911-1981 (media de largo plazo).

\hat{m}_k : media corregida de largo plazo para estación k.

Entonces,

$$\hat{m}_k = \frac{\hat{m}_3 \cdot \bar{m}_k}{\bar{m}_3} \quad (1)$$

En forma similar, la desviación standard corregida para el largo plazo

puede calcularse como

$$\hat{s}_k = \frac{\hat{s}_3 \cdot s_k}{s_3} \quad (2)$$

En la tabla N° 1 se presentan los valores calculados para el período de observación de cada estación y los valores corregidos siguiendo las fórmulas (1) y (2). En la última columna se ha incluido el coeficiente de variación, CV, que se define como:

$$CV_k = \frac{\hat{s}_k}{\hat{m}_k} \quad (3)$$

2.3 Relaciones entre parámetros y variables geográficas

Se ensayaron varias relaciones funcionales entre la media y la desviación standard y entre éstas y variables geográficas o topográficas. Sólo fue posible obtener un coeficiente de correlación aceptable para la relación entre la media de la precipitación diaria máxima y la altura (medida en metros sobre el nivel del mar) de la estación correspondiente. Llamando H a la altura medida en m.s.n.m., la relación es:

$$\hat{m} = 0,053 H + 19,2 \quad (4)$$

El coeficiente de correlación de la ecuación (4) es $r = 0.777$.

En la tabla N° 1 llama la atención el valor de la precipitación en la estación La Obra, que es ostensiblemente más alta que en el resto de las estaciones, consecuencia de la existencia de un microclima en esa zona. Excluyendo el dato de la estación La Obra, se obtiene un coeficiente de correlación igual a 0,800. La relación lineal, en este caso, es la siguiente:

$$\hat{m} = 0,031 H + 31,1 \quad (6)$$

Las rectas obtenidas según las expresiones (5) y (6) aparecen en la Figura N° 1. La relación utilizada en este estudio es la (6).

En relación a la desviación standard, dado que no fue posible establecer ninguna relación que explique una variación sistemática de ella, se decidió admitir que el coeficiente de variación CV es constante. La mejor estimación de un valor regional constante del coeficiente de variación es la media de los valores obtenidos para las diferentes estaciones, con exclusión de La Obra por las razones ya señaladas.

De la tabla N° 1 se obtiene que $\overline{CV} = 0,37$.

Llama la atención que dicho valor medio es idéntico al de la estación con período de registro más largo, esto es, Quinta Normal.

Sobre la base del análisis de toda la información disponible y a manera de conclusión, se puede establecer que las fórmulas que determinan la media m y la desviación standard de las lluvias diarias máximas anuales en cualquier punto del área metropolitana, son las siguientes:

$$m = 0,031 H + 31,1 \quad (6)$$

$$s = 0,37 m \quad (7)$$

donde s y m están expresadas en mm/día y H es la altura en metros sobre el nivel del mar.

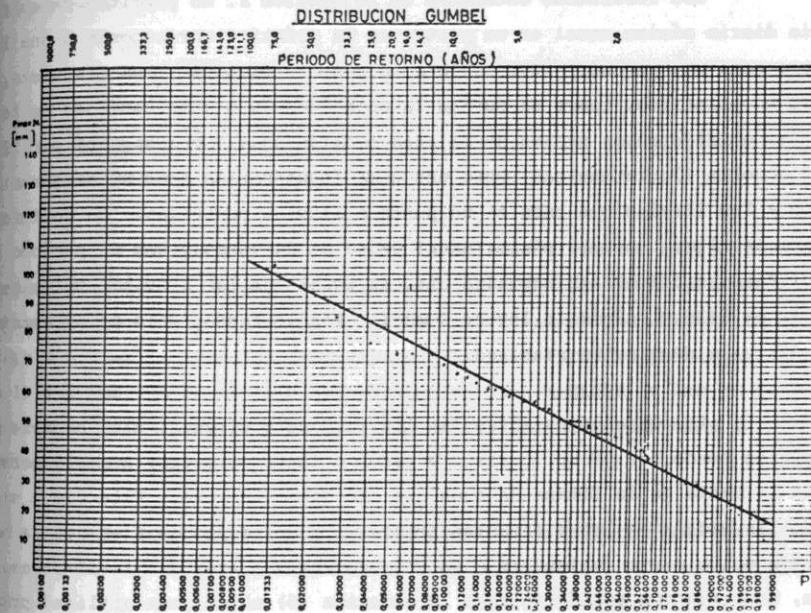
Distribución probabilística de las precipitaciones diarias máximas anuales.

Se supondrá que la serie anual de precipitaciones diarias máximas observadas se ajusta correctamente a la distribución de Gumbel. En la Figura N° 2 aparecen los valores de las precipitaciones diarias máximas anuales para la estación Quinta Normal a los cuales se les ha ajustado analíticamente la recta correspondiente.

para el ajuste analítico se han utilizado las siguientes expresiones:

$$p(24,T) = p_0 + g u(t) \quad (8)$$

FIGURA N° 2
ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE PRECIPITACIONES DIARIAS MÁXIMAS



en que:

T : período de retorno en años

u(T) : variable reducida de Gumbel = $\ln(\ln \frac{T}{T-1})$

Los parámetros de Gumbel p_0 y g son estimados por el método de los momentos:

$$g = -0,78 s \quad (9)$$

$$p_0 = m - 0,45 s \quad (10)$$

siendo m la media y s la desviación standard.

3.- CALCULO DE LA LLUVIA DIARIA SOBRE UNA ZONA (coeficiente de abatimiento espacial)

Los resultados obtenidos en la sección 2. no permiten calcular sino la lluvia diaria máxima anual en un punto; en la práctica corresponde a una lluvia sobre una zona muy pequeña, asimilable a un punto. Para una zona más vasta, es necesario, en principio, tener en cuenta la coincidencia o simultaneidad de las precipitaciones en diferentes puntos de la zona considerada. Se designará por "lámina de agua" aquella lluvia que cae sobre una zona (considerada como un conjunto), en oposición a las lluvias que caen en un punto o lluvias puntuales. Se designará como $l(24,T)$ la altura de agua máxima anual caída en 24 horas y con un período de retorno T. Para su cálculo se supondrá que, al igual que las lluvias puntuales, la frecuencia de $l(24,T)$ sigue la ley de Gumbel. Por lo tanto, sólo es necesario conocer la media y la desviación standard.

La correlación entre las lluvias que ocurren simultáneamente en diferentes puntos puede ser débil (cercana a cero) o fuerte (cercana a uno), pero eso no cambia la media de la lámina de agua que cae sobre la zona. Ella sigue siendo la media de las medias en los diferentes puntos. El único problema es que la media no es conocida en un punto cualquiera sino solamente donde existen pluviómetros. Por esta razón, una relación analítica como la ecuación (6) es de gran utilidad práctica ya

que permite la interpolación entre puntos. Asimismo, se puede utilizar para dividir la región estudiada en zonas homogéneas donde la media varía poco y por lo tanto, se puede asignar a toda la zona un valor constante. En el caso específico del Gran Santiago (ver Figura N° 3), se han considerado 4 zonas limitadas por las isoyetas de 45, 50 y 55 mm/día. Estos valores corresponden a las medias de las precipitaciones diarias máximas anuales.

La desviación standard de la lámina de agua no depende solamente de los valores que toman las desviaciones de las lluvias puntuales (como ocurrió con la media) sino que también de la correlación entre las lluvias puntuales simultáneas. La desviación standard de la lámina de agua será más grande en la medida que las correlaciones sean más fuertes. En forma más precisa, si s_0 es la media de las desviaciones standard de las lluvias puntuales, entonces se puede demostrar que:

$$s = K s_0 \quad (11)$$

donde K es el coeficiente de abatimiento espacial ($0 < K \leq 1$) y viene dado por la siguiente relación:

$$K = \sqrt{\frac{1}{r}} \quad (12)$$

donde \bar{r} es el coeficiente medio de correlación de todas las lluvias puntuales de la zona en estudio (Coyne et Bellier, 1982).

En este artículo, en lugar de aplicar el método exacto para calcular \bar{r} , cuya justificación es larga, se demostrará sobre la base de un cálculo simplificado pero suficientemente preciso que se puede desprestigiar el abatimiento espacial y suponer que $K = 1$ en la ecuación (11). Para ello se solicitó a la Dirección Meteorológica la información respecto a las precipitaciones medidas en las nueve estaciones antes consideradas para 33 días elegidos aleatoriamente. Los días de precipitación ocurrieron entre 1970 y 1981.

Se determinaron los coeficientes de correlación para cada pareja de estaciones y la distancia (en kilómetros) entre ellas. Los valores así calculados

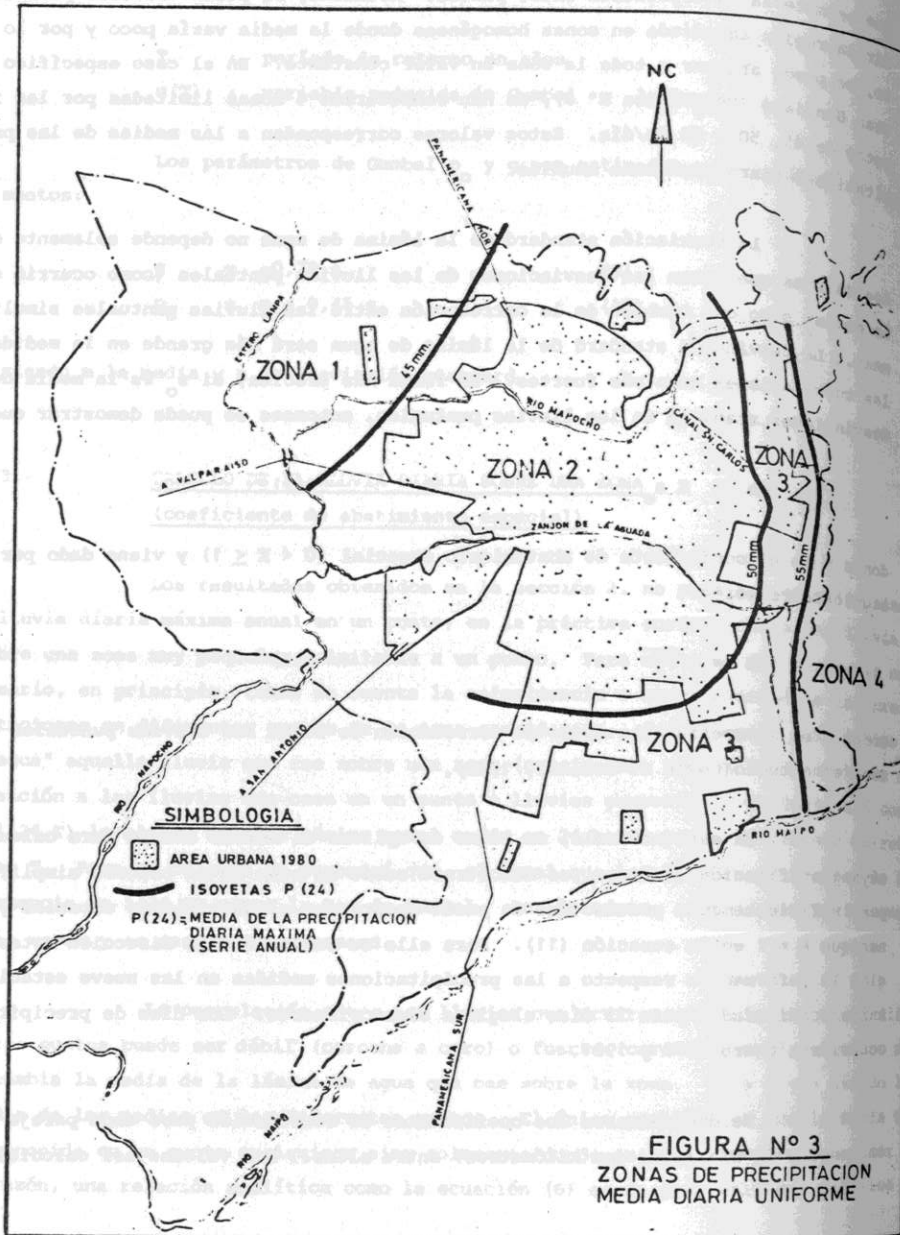


FIGURA N° 3
ZONAS DE PRECIPITACION
MEDIA DIARIA UNIFORME

han sido ordenados en una matriz en que aparecen, primero, el coeficiente de correlación r_{ij} y debajo la distancia x_{ij} (ver tabla N° 2).

Del total de 36 parejas de valores, se eliminaron los ocho correspondientes a la estación Huinganal (1) por presentar un comportamiento errático.

Una primera estimación del valor medio \bar{r} para el conjunto de la zona que abarca las nueve estaciones de la tabla N° 2, puede obtenerse simplemente calculando la media de los valores r_{ij} . Eliminando la estación Huinganal, se obtiene $\bar{r} = 0,72$ y por lo tanto, $K = \sqrt{\bar{r}} = 0,85$.

El cálculo de una lámina de agua $l(24,T)$ de duración 24 horas y período de retorno T se hace mediante la aplicación de fórmulas análogas a las ecuaciones (8), (9) y (10). Esto es:

$$l(24,T) = l_0 + g u(t) \quad (13)$$

$$g = -0,78 s \quad (14)$$

$$l_0 = m - 0,45 s \quad (15)$$

A manera de ejemplo consideremos el caso de la estación Quinta Normal en que $m = 46$ mm/día y $s = 17$ mm/día.

$$\text{Para } K = 1 \rightarrow s = s_0 = 17 \text{ mm/día}$$

$$\text{Para } K = 0,85 \rightarrow s = 0,85 \times 17 = 14,5 \text{ mm/día.}$$

En la tabla N° 3 se entregan los valores de $l(24,T)$ para los dos valores de s y para una variación de T de 2 a 10 años.

TABLA N° 2 .

COEFICIENTES DE CORRELACION Y DISTANCIA EN KMS.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Huingsanal	-	-0,050 26,2	-0,056 19,3	0,2337 12,4	-0,1928 24,6	0,5820 21,5	-0,03528 28,6	-0,165 29,0	0,1508 34,1
2. Pudahuel		-	0,9587 11,1	0,5255 23,2	0,890 14,8	0,7815 27,9	0,9347 21,0	0,9511 38,6	0,8131 25,6
3. Quinta Normal			-	0,5684 12,6	0,9207 6,8	0,8151 16,8	0,9412 13,0	0,5523 27,5	0,8702 18,7
4. Tobalaba				-	0,5487 14,9	0,6615 9,4	0,5777 17,2	0,5747 18,6	0,4198 22,2
5. Los Cerrillos					-	0,7109 14,9	0,9650 6,5	0,6176 24,8	0,8712 12,0
6. La Florida						-	0,7358 13,2	0,5364 10,6	0,7761 16,4
7. El Bosque							-	0,6666 21,2	0,8740 5,8
8. La Obra								-	0,6173 42,0
9. San Bernardo									-

TABLA N° 3

CALCULO DE LA INFLUENCIA DEL COEFICIENTE DE ABATIMIENTO ESPACIAL

	PERIODO DE RETORNO T (AÑOS)		
	2	5	10
u (T)	0,37	1,5	2,25
l(24,T) en mm/día para s = 17 mm/día	44,9	60,0	70,0
l(24,T) en mm/día para s = 14,5 mm/día	45,1	57,9	66,4

Se verifica, entonces, que la influencia del abatimiento espacial es débil, aún cuando se considere, como en el ejemplo anterior, toda el área del Gran Santiago. Lógicamente dicha influencia disminuirá más aún para zonas más pequeñas. Por lo tanto, se admitirá que $K = 1$ y para el cálculo de la lámina de agua sobre una zona se utilizarán las fórmulas (13) a (15). El valor de m será obtenido del plano de isoyetas (Figura N° 3) que define las zonas homogéneas y para s se aplicará la relación $s = 0,37$ m.

RELACIONES INTENSIDAD-DURACION-FRECUENCIA

Sobre la base del análisis efectuado en los acápites 2. y 3., es posible calcular la precipitación máxima en 24 horas para cualquier período de retorno, tanto para los casos de una precipitación puntual, $p(24,T)$, como para la lámina de agua sobre una superficie, $l(24,T)$.

Dado que los tiempos de concentración de las hoyas urbanas son generalmente mucho menores que 24 horas, más importante aún que las precipitaciones diarias máximas son las intensidades de lluvia para tiempos menores.

Como se explicó anteriormente, en el área del Gran Santiago sólo existe una estación (Quinta Normal) con datos pluviográficos para un período de longitud suficiente tal que haga el análisis confiable.

En consecuencia, todo el estudio de intensidades de precipitación entre 10 minutos y 24 horas estará basado en los datos de Quinta Normal y sus valores extrapolados a las otras estaciones siguiendo una metodología que será explicada en los párrafos finales de esta sección.

Las precipitaciones registradas por el pluviógrafo de Quinta Normal entre 1917 y 1960 fueron analizadas en el estudio "Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia para las lluvias en Quinta Normal, Santiago de Chile". (Schröder, 1973).

Según el autor, el material estadístico en que se basa su trabajo comprende 1703 lluvias que son todas las que se pueden deducir, para el período 1917-1960, de los pluviogramas que se guardan en la Dirección Meteorológica. Sin embargo, no son todas las lluvias ocurridas en el lapso mencionado, como puede observarse en la tabla N° 4 donde se comparan los totales anuales del pluviógrafo y del pluviómetro ubicado en el mismo lugar.

Las diferencias observadas pueden atribuirse a fallas del pluviógrafo o a pérdidas de algunos pluviogramas. A pesar de todo, la estadística del pluviógrafo puede considerarse suficientemente completa ya que ha registrado el 86,7% de la lluvia total ocurrida en el período 1917-1960.

La descripción de la metodología utilizada por el Sr. Schröder ha sido omitida por razones de espacio. Sólo cabe mencionar que los modelos probabilísticos utilizados fueron el de valores extremos (Gumbel) y la distribución normal logarítmica, seleccionando aquel que da el mejor ajuste. Los valores deducidos de la distribución ajustada han sido llevados al gráfico que se presenta en la Figura N° 4, que representa la familia de curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) para la estación Quinta Normal.

Para los fines prácticos de la aplicación de cualquier modelo de escorrentía, más útil que las curvas IDF graficadas, es la determinación de una expresión analítica que relacione el tiempo de duración de la lluvia y la intensidad máxima para un período de retorno dado. Para el caso específico del alcantarillado de aguas lluvias, interesan períodos de retorno no mayores de 20 años.

En la Figura N° 4, se observa que para un período de retorno dado, no existe una recta única sino más bien una línea quebrada.

Para cada uno de los tramos rectos, se puede ajustar una expresión analítica del siguiente tipo:

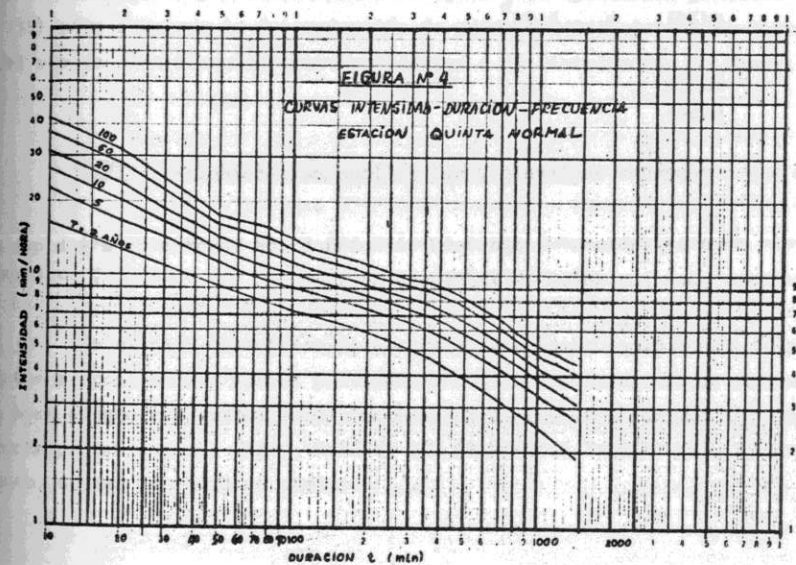
$$i = \frac{k}{t^c} \quad (16)$$

TABLA N° 4

Totales anuales de las lluvias de la estadística inicial y del pluviómetro de la Quinta Normal, Años hidrológicos 1 - Abril 31 - Marzo

N	Año	Pluviógrafo				Pluviómetro					
		I EI	I P	Δ	A %	N	Año	I EI	I P	Δ	A %
1	1917	156.6	208.5	51.9	24.9	23	1939	314.3	334.0	19.7	5.9
2	18	235.55	372.6	137.05	36.8	24	40	318.2	337.0	18.8	5.6
3	19	591.1	648.0	56.9	8.8	25	41	518.85	663.0	144.15	21.7
4	1920	249.5	290.0	40.5	14.0	26	42	375.8	429.0	53.2	12.4
5	21	407.2	438.0	30.8	7.0	27	43	191.7	218.0	26.3	12.1
6	22	398.1	446.0	47.9	10.7	28	44	500.5	537.5	37.0	6.9
7	23	285.25	319.0	33.75	10.6	29	45	144.3	162.7	18.4	11.3
8	24	40.8	53.0	12.2	23.0	30	46	95.4	127.9	32.5	25.4
9	25	216.7	262.0	45.3	17.3	31	47	236.2	256.5	20.3	7.9
10	26	662.9	758.0	95.1	12.5	32	48	317.05	376.3	59.25	15.7
11	27	364.2	406.0	41.8	10.3	33	49	254.0	295.3	41.3	14.0
12	28	311.7	357.0	45.3	12.7	34	1950	270.0	291.7	21.7	7.4
13	29	257.5	340.0	82.5	24.3	35	51	277.6	325.4	47.8	14.7
14	30	452.6	508.0	55.4	10.9	36	52	293.85	339.2	45.35	13.4
15	31	296.6	310.0	13.4	4.3	37	53	510.35	576.6	66.25	11.5
16	32	288.05	407.0	118.95	29.2	38	54	298.5	315.0	17.3	5.5
17	33	246.6	260.0	13.4	5.2	39	55	205.45	238.7	33.25	13.9
18	34	489.85	519.0	29.15	5.6	40	56	148.1	219.8	71.7	32.6
19	35	201.8	252.0	50.2	19.9	41	57	265.25	308.5	43.25	14.0
20	36	332.0	379.0	47.0	12.4	42	58	311.3	353.8	42.5	12.0
21	37	353.5	386.0	32.5	8.4	43	59	248.65	301.5	52.85	17.5
22	38	165.3	167.0	1.7	1.0	44	1960	167.15	208.1	40.95	19.7

Corresponde al pluviógrafo.



en que :

- i = intensidad de la lluvia en mm/hora
- t = tiempo en horas
- k y c = constantes para un mismo período de retorno

Si en la fórmula (16), se multiplican ambos miembros por t se obtiene :

$$p(t) = k t^b \quad (17)$$

en que p(t) es la precipitación total en el tiempo t y $b = 1-c$.

Dado que para las ocho estaciones pluviométricas, aparte de Quinta Normal, se tienen sólo valores de p(24), es importante expresar p(t) en función de p(24).

Tomando como base la ecuación (17), se puede escribir :

$$\begin{aligned} p(t) &= k t^b \\ p(24) &= k 24^b \\ \frac{p(t)}{p(24)} &= \frac{at^b}{a 24^b} \end{aligned} \quad (18)$$

en que a y b dependen del tramo y del período de retorno.

En la Tabla N° 5 aparecen calculados los valores de a y b que dan el mejor ajuste para los datos de la Figura N° 4.

TABLA N° 5

VALORES DE LAS CONSTANTES A Y b

TRAMO		Período de Retorno			
		2	5	10	20
0,17 - 6 horas (10 min.-360 min.)	a	0.190	0.173	0.168	0.168
	b	0.664	0.643	0.625	0.611
0,17 - 8 horas (10 min.-480min.)	a	0.1897	0.173	0.169	0.168
	b	0.654	0.645	0.634	0.622
8 - 24 horas (480 min.-1440 min.)	a	0.378	0.313	0.294	0.284
	b	0.306	0.365	0.385	0.396

Si bien es cierto que se ha usado la simbología p(t) y p(24) correspondientes a precipitaciones puntuales, la fórmula (18) y los coeficientes de la Tabla N° 5 también son aplicables a la altura que cae sobre un área determinada y que ha sido designada por l(t) (lámina de agua). La aplicación práctica de la fórmula (18) sólo requiere la determinación de p(24) ó l(24), lo que se logra a través del uso de las fórmulas correspondientes a la distribución de Gumbel.

5. COMPARACION ENTRE PLUVIOGRAFO Y PLUVIOMETRO

La comparación entre los valores obtenidos a partir de un pluviógrafo con aquellos deducidos del pluviómetro es de importancia.

En el caso específico de las precipitaciones en 24 horas, mientras los datos proporcionados por el pluviógrafo son los máximos reales, independiente de la hora en que haya sucedido el fenómeno, los valores deducidos del pluviómetro corresponden a horas fijas (hora en que se efectúa la lectura) y pueden, por lo tanto, no ser los máximos reales.

A las lluvias en 24 horas deducidas a partir del pluviómetro se les designará como de "origen fijo" mientras que las del pluviógrafo serán llamadas de "origen móvil". Los valores contenidos en el trabajo de E. Schroder corresponden a este último grupo, mientras que los datos de la Tabla N° 1 son evidentemente de origen fijo.

La comparación entre ambos tipos de observaciones ha sido llevada a cabo para la estación Quinta Normal para el mismo período de observación (1917 - 1960).

De acuerdo a los datos de la precipitación diaria máxima (pluviómetro), los valores de los estadígrafos fundamentales para el período determinado son :

$$\bar{m} = 47,554 \text{ mm}$$

$$s = 16,987 \text{ mm}$$

A los valores de las precipitaciones diarias máximas obtenidas del pluviómetro se les ha ajustado la distribución de Gumbel, obteniéndose los valores que aparecen en la Tabla N° 6. En la misma Tabla aparecen los valores deducidos por E. Schroder y que corresponden a las lluvias de "origen móvil".

TABLA N° 6

ESTACION QUINTA NORMAL : PRECIPITACIONES MAXIMAS
EN 24 HORAS

	Período de retorno (años)			
	2	5	10	20
Origen fijo	44,92	61,67	72,71	83,36
Origen móvil	45,36	63,36	74,40	84,48

La Tabla N° 6 muestra claramente que la diferencia entre las observaciones del pluviómetro y del pluviógrafo son insignificantes, lo que indica que no es necesario hacer correcciones a los valores de la Tabla N° 1.

DISTRIBUCION TEMPORAL DE LA PRECIPITACION

En el cálculo de las escorrentías provocadas por las lluvias, aparte de la intensidad de la precipitación, es importante conocer, además, su distribución en el tiempo, es decir, el hietograma. Utilizando la misma información básica que E. Schroder, Alfredo Echavarría E.(1979) en su tesis "Distribución Temporal de Precipitaciones, Estudio de Crecidas" analizó los hietogramas de las lluvias sobre Santiago en el período 1917 - 1960 (pluviógrafo de Quinta Normal).

Del análisis del conjunto de distribuciones temporales para las duraciones comprendidas entre 0,5 y 48 horas, Echavarría extrajo las siguientes conclusiones :

- i) No existe una distribución temporal única, que represente en forma adecuada el comportamiento real observado de la distribución temporal de las precipitaciones máximas de una duración cualquiera.
- ii) No es posible encontrar ninguna tendencia o relación entre la distribución temporal de una lluvia y los parámetros o variables que la caracterizan : magnitud en la duración especificada, magnitud de la lluvia total de la cual proviene el evento, duración total de la lluvia y época del año.

Dadas estas conclusiones, el autor optó por clasificar las distribuciones para cada duración en tres grupos, designados como Grupos I, II y III. Los tres grupos básicos (I, II y III) corresponden a distribuciones en que la máxima precipitación ocurre hacia el comienzo del evento, o hacia la mitad, o hacia el final, respectivamente. En la Tabla N° 7 se indica el número de casos que pueden asignarse a cada uno de los grupos básicos en que se han clasificado los hietogramas.

TABLA N° 7

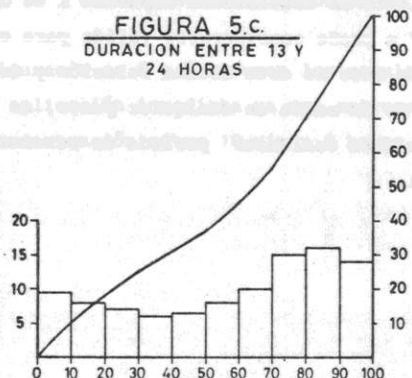
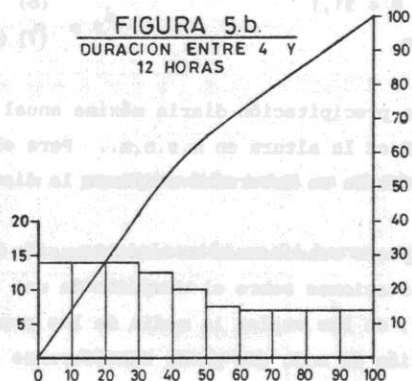
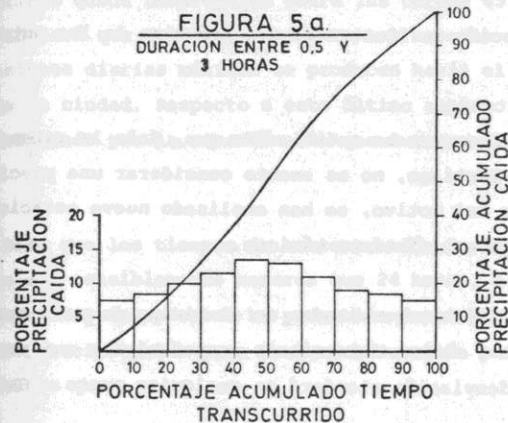
FRECUENCIAS DE LOS GRUPOS BASICOS EN QUE FUERON CLASIFICADOS
LOS HIETOGRAMAS

Duración Horas	Número de casos con que se trabajó	Número de casos en grupo		
		I	II	III
0,5	100	38	46	16
1,0	100	41	40	19
2,0	100	32	35	33
3,0	100	34	45	21
6,0	100	51	35	14
12,0	100	50	24	26
18,0	62	21	16	25
24,0	29	10	7	12

Para los efectos prácticos de determinar un hietograma de diseño, se puede señalar que para las precipitaciones de duraciones entre 0,5 y 3 horas, las distribuciones temporales, identificables con el Grupo II son las más frecuentes; para duraciones mayores que 3 y menores o iguales a 12 horas, los hietogramas Grupo I son los más abundantes, mientras que para precipitaciones con duraciones mayores que 12 horas es el Grupo III el más frecuente.

En la Figura N° 5 se proponen las distribuciones temporales de la precipitación (para diversas duraciones) a ser consideradas en la aplicación de modelos. Las curvas propuestas han sido obtenidas de promediar los hietogramas del Grupo II para duraciones de 0,5- 1 - 2 y 3 horas (Figuras N°5a); los hietogramas del Grupo I para duraciones de 6 y 12 horas (Figura N° 5b) y los del Grupo III para duraciones de 18 y 24 horas (Figura N°5c.)

DISTRIBUCION TEMPORAL DE LA PRECIPITACION



7. PRESENTACION DE RESULTADOS Y SU APLICACION

En esta sección se ilustra el uso práctico de los antecedentes presentados hasta aquí.

En primer lugar, se ha establecido que, dada la extensión que ha adquirido la ciudad de Santiago, no es exacto considerar una precipitación única para toda el área. Por tal motivo, se han analizado nueve estaciones y se han calculado sus parámetros estadísticos básicos.

Ellos han sido homogeneizados en el tiempo de modo que su período de referencia sea idéntico y se han determinado correlaciones que permitan el cálculo de la media y la desviación standard en cualquier punto. Se determinó que :

m = 0,031 H + 31,1 (6)

s = 0,37 m (7)

en que m es la media de la precipitación diaria máxima anual (en mm/día), s es la desviación standard y H es la altura en m.s.n.m.. Para el cálculo de frecuencias de la precipitación diaria se determinó utilizar la distribución Gumbel.

El segundo aspecto considerado es una discusión respecto a precipitaciones puntuales y precipitaciones sobre el conjunto de una zona. Se definieron 4 zonas (ver Figura N° 3), en las cuales la media de las precipitaciones diarias máximas tiene poca variación de modo que puede considerarse constante para toda el área que abarca la zona respectiva. Asimismo, se demostró que en el caso del Gran Santiago, el coeficiente de abatimiento espacial K es despreciable de modo que la relación s = 0,37 m puede considerarse válida para cualquier punto del área en estudio. Sobre la base de esta última relación y del plano de isoyetas que proporciona el valor de la media en cualquier punto, se puede determinar la precipitación en 24 horas para cualquier período de retorno mediante el uso de la distribución de Gumbel.



En el plano de isoyetas se observa que una parte importante del área del Gran Santiago queda comprendida entre las curvas 45 y 50 mm. Para toda esa zona se considerará que m = 47, 5 mm/día. Las mayores diferencias en términos de precipitaciones diarias máximas se producen hacia el sur y sobre todo, hacia el oriente de la ciudad. Respecto a este último aspecto, el efecto orográfico queda bien reflejado por la ecuación (6) que muestra el incremento de m con la altura.

Dado que los tiempos de concentración de las áreas tributarias del Gran Santiago son sensiblemente menores que 24 horas, el análisis de las curvas IDF de la estación Quinta Normal ha permitido determinar una expresión analítica que calcula la precipitación para cualquier duración entre 10 min y 24 horas. La fórmula establece que :

p(t) = a t^b

p(24) = a t^b

siendo :

p(t) : precipitación total en el tiempo t, expresada en mm.

p(24) : precipitación en 24 horas, en mm, para el mismo tiempo de retorno.

t : tiempo en horas

a y b : coeficientes evaluados en la Tabla N° 5.

Las Figuras N.os 6 y 7 resumen los resultados para las 4 zonas de Santiago y son de aplicación inmediata ya que entregan la precipitación para cualquier tiempo de concentración entre 10 min y 8 horas.

Universidad de Chile, Facultad de Ingeniería, Departamento de Hidráulica y Obras Públicas, Santiago de Chile, Memoria de Título, Universidad Católica, 1970.
"Distribución puntual de precipitaciones. Estudio de Granel" Memoria de Título, Universidad de Chile, 1970.

FIGURA N° 6
CURVAS INTENSIDAD-DURACION-FRECUENCIA
PARA SANTIAGO

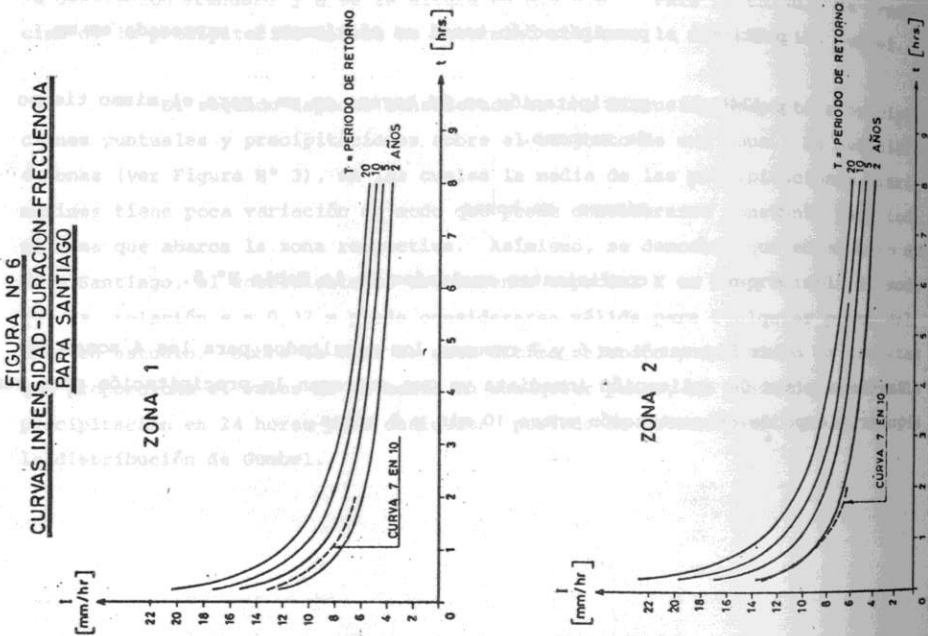
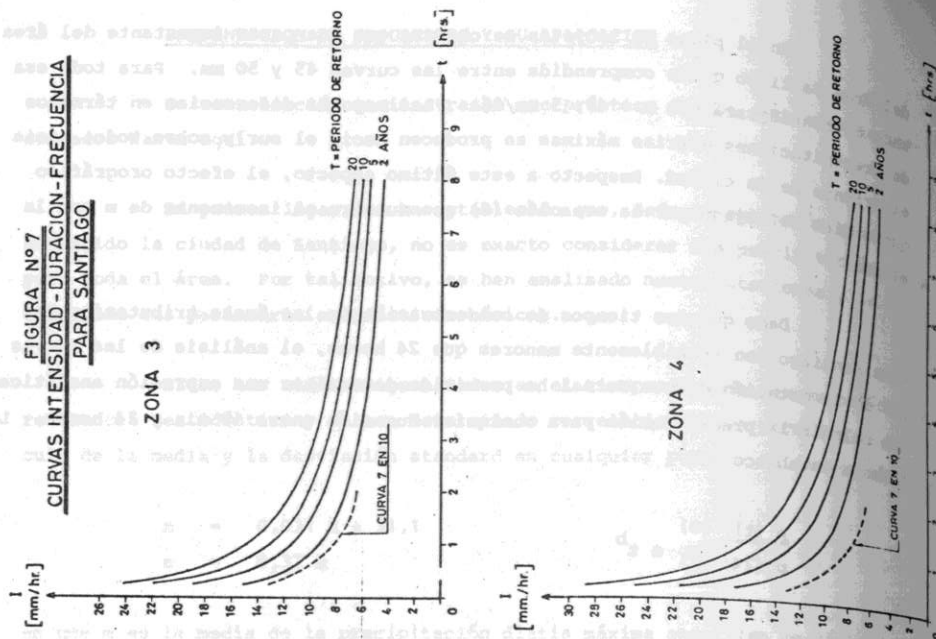


FIGURA N° 7
CURVAS INTENSIDAD-DURACION-FRECUENCIA
PARA SANTIAGO



Respecto a la distribución de la precipitación en el tiempo (hietogramas), en el párrafo 6 se ha presentado un resumen de la información disponible. Sobre la base de dichos datos, se han preparado tres gráficos que ilustran la distribución temporal de la precipitación para duraciones entre 0,5 y 3 horas, entre 4 y 12 horas y entre 13 y 24 horas (Figura N° 5)

Finalmente se desea hacer mención al período de retorno. El análisis presentado en las secciones anteriores pretende ser lo más general posible y con un amplio campo de aplicación. Por tal motivo, se han deducido coeficientes a y b para períodos de retorno de 2 a 20 años.

Dentro de este análisis general, queda también incluido el caso específico de la frecuencia "7 veces en 10 años", comúnmente utilizada en el diseño de alcantarillado de aguas lluvias. En un artículo anterior se ha hecho un análisis exhaustivo del significado de esta frecuencia de diseño. Se demostró que el concepto de seguridad "7 veces en 10 años" está ligado al uso de series estadísticas parciales y que es equivalente a considerar una probabilidad de excedencia de 51,5% ($T_r = 1,94$ años), cuando se trabaja con series estadísticas anuales.

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Dado que el análisis presentado en este informe sólo considera series anuales, para fines prácticos la seguridad "7 veces en 10 años" es lo mismo que considerar un período de retorno de 2 años.

BIBLIOGRAFIA

Coyne et Bellier, "Calcul de la correlation moyenne d'une lame d'eau en fonction de la geometrie du bassin", Note Technique, 1982.

Schröder, Eduardo, "Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia para las lluvias en Quinta Normal, Santiago de Chile", Memoria de Título Universidad Católica, 1973.

Echavarría, Alfredo, "Distribución Temporal de Precipitaciones. Estudio de crecidas". Memoria de Título, Universidad de Chile, 1979.