

ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA PLUVIOGRAFÍA DE LA CIUDAD DE SANTIAGO

LUIS E. ESTELLE A (1) - ALVARO ROZAS L. - RENE VIAUX A. (2)
Dirección de Obras Hidráulicas. Universidad de Santiago de Chile.
Estado 10 Piso 21, Santiago, Chile.
Teléfono:6612800; Fax:6612848
e-mail: luis.estelle@moptt.gov.cl

RESUMEN

El presente trabajo, que lleva por título “Análisis Espacial y Temporal de la Pluviografía de la Ciudad de Santiago”, tiene como objetivos principales presentar los resultados obtenidos en el tratamiento, tanto del patrón espacial como en la distribución temporal de las lluvias de la cuenca de Santiago, comparadas con el análisis de la pluviometría de la ciudad de Santiago efectuado en el estudio “Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Santiago”.

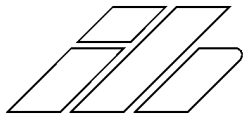
El análisis espacial y temporal de la pluviografía de la ciudad de Santiago, se realizó con información gráfica existente desde 1972 al 2001, en 7 estaciones meteorológicas registradoras distribuidas a lo largo de la Cuenca del Río Maipo, complementada con la información pluviométrica disponible en 19 estaciones cuyos registros datan desde 1911. Esta información fue procesada para la confección de planos de isoyetas, curvas IDF (intensidad – duración – frecuencia) y la determinación de Coeficientes de Duración y Frecuencia.

ABSTRACT

The title of the present work is “Temporal and Areal Análisis of the Rainfall in the city of Santiago, Chile”. Its main objectives are to present the results obtained from the analysis of both spacial and time distribution patterns of the rainfall in the area of Maipo River Basin, as compared to the rainfall análisis for the city of Santiago contained in the study called “Master Drainage Plan of Greater Santiago”.

The spacial and time análisis of the rainfall of the city of Santiago was performed using existing pluviographical I data for a period from 1972 to 2001 in 7 registering meteorological stations distributed along the Maipo River Watershed, complemented with available pluviographical information of 19 stations with registers starting in 1911. These data was processed to produce isohyet maps and IDF curves (Intensity-Duration-Frequency) and the determination of Frequency-Duration coeficients.

- (1) Coordinador de Estudios y Proyectos de Aguas Lluvias, DOH. Profesor Universidad de Santiago.
(2) Ingeniero en Obras Civiles de la Universidad de Santiago.



ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA PLUVIOGRAFÍA DE LA CIUDAD DE SANTIAGO

1. Introducción

La Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) amparada en la Ley 19.525, realizó durante los años 1997 a 2000 el estudio "Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Santiago" (PM01), estudio de planificación que permitió la identificación y desarrollo, a nivel de prefactibilidad, de las soluciones viables correspondientes a los problemas de evacuación de aguas lluvias de Santiago. Para la ejecución de este Plan Maestro, se adoptaron criterios hidrológicos sustentados principalmente sobre la base de la información existente y estudios desarrollados a esa fecha. La experiencia adquirida en la DOH estos últimos años, a través de la ejecución de varios Planes Maestros de aguas lluvias en distintas ciudades del país, el avance del conocimiento y tratamiento de la información hidrometeorológica, aconsejó desarrollar un nuevo análisis espacial y temporal de la pluviografía de la ciudad de Santiago con el objeto de disponer de mejores criterios de diseño, cuyos resultados se dan a conocer en este trabajo.

2. Selección de las Estaciones de Análisis

2.1 Estaciones Pluviométricas y Pluviográficas

La zona de estudio corresponde a parte de la cuenca del río Maipo, cuenca en la que se encuentran distribuidas varias estaciones hidrometeorológicas. Estas estaciones dependen de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas, (DGA) y de la Dirección Meteorológica de Chile, (DMC).

Para el análisis de la distribución espacial, coeficientes de frecuencia y distribución temporal de las precipitaciones de Santiago se consideraron 12 estaciones pluviográfica y 19 estaciones pluviométricas cuyas principales características se presentan en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Estaciones Pluviográficas existentes en la Cuenca del Río Maipo

Nombre	Instituc. a cargo	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altura (mt)	Inicio Registro	Término Registro	Años de Registro
Pudahuel	DMC	33°23'	70°47'	475	may-74	2001	28
Cerrillos	DMC	33°29'	70°42'	510	ene-60	2001	47
Q.Normal	DMC	33°26'	70°41'	520	ene-17	2001	87
Pirque	DGA	33°40'	70°35'	670	ago-75	2001	27
C.Calan	DGA	33°24'	70°32'	900	nov-75	2001	27
Melipilla	DGA	33°42'	71°13'	200	abr-75	2001	27
E.Rungue	DGA	33°01'	70°54'	750	abr-79	2001	23
Emb.El Yeso	DGA	33°41'	70°06'	2.475	may-62	jun-68	6
Tobalaba	DMC	33°27'	70°33'	654	95	2001	5
San Joaquín UC	DGA	33°29'	70°37'	554	abr-79	may-83	4
Queltehues	DGA	33°49'	70°13'	1.350	may-77	jul-79	2
Los Panquiles	DGA	33°26'	71°01'	250	may-85	nov-86	1

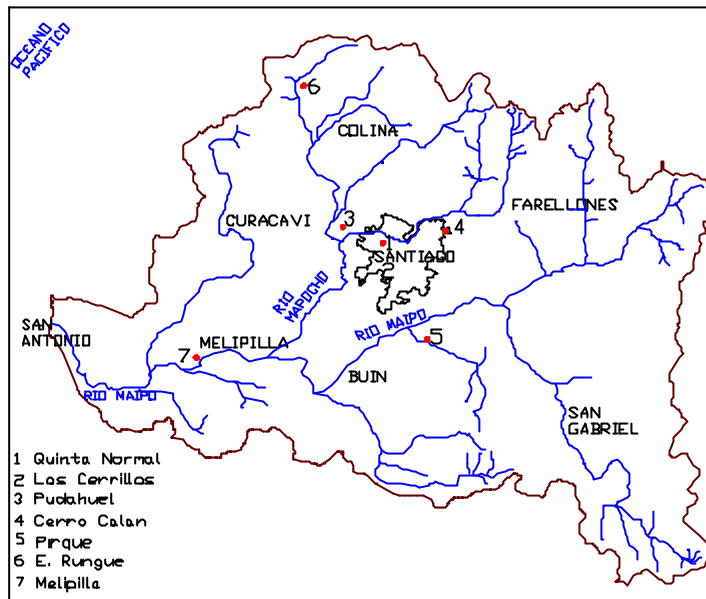
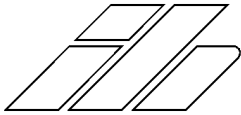


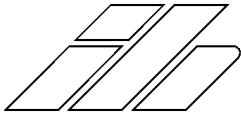
Figura 1. Ubicación de las Estaciones Pluviográficas en la cuenca del Maipo

3. Selección de las Tormentas

Para la elección de las tormentas se dispuso de la totalidad de los pluviogramas semanales existentes con el objeto de encontrar las tormentas de mayor intensidad para distintos tiempos de duración. En la Tabla 4, se presenta un resumen de tormentas seleccionadas.

Tabla 4. Resumen de Tormentas Seleccionadas.

FECHA			MAGNITUD	FECHA			MAGNITUD
día	mes	año	pp en [mm]	día	mes	año	pp en [mm]
24	6	74	40	27	5	86	70
29	6	74	50	27	11	86	25
9	7	75	40	10	8	87	90
13	7	75	30	13	8	88	20
5	6	76	30	19	8	88	20
15	6	76	20	29	4	89	20
2	7	77	25	25	7	89	60
14	7	78	50	7	7	90	30
19	7	78	90	26	5	91	40
26	7	79	60	18	7	91	40
18	7	80	40	25	5	92	70
29	9	80	60	3	6	92	35
2	5	81	25	13	4	93	40
30	5	81	40	23	9	94	30
12	5	82	40	4	7	95	30
26	6	82	100	13	6	96	30
18	6	83	40	29	5	97	70
5	7	83	40	26	4	98	20
4	5	84	25	30	8	99	30
3	7	84	120	10	9	2000	60
3	7	85	30	29	7	2001	80



Para la obtención de las estadísticas definitiva los pluviogramas fueron leídos cada 10 min. y cada 1 hora. La lectura cada 1 hora se realizó en forma directa, ya que estos gráficos permiten una lectura confiable para este intervalo de tiempo. Para poder hacer lecturas de precipitaciones cada 10 minutos, dada la imposibilidad de realizarlas en forma directa sobre los pluviogramas originales o copias, los registros se digitalizaron y fueron interpolados computacionalmente.

4. Resultados

4.1 Distribución Espacial. Plano de Isoyetas

Al ajustar el modelo probabilístico de Gumbel o Valores Extremos de Tipo I a cada serie pluviométrica de valores máximos se obtuvo precipitaciones para 24 horas de duración y 10 años de periodo de retorno. Con estos valores, se realizó una interpolación espacial usando el método Kriging. La interpolación entregó el plano de isoyetas que se muestra en la Figura 2 el que se compara con el usado en el PM01.

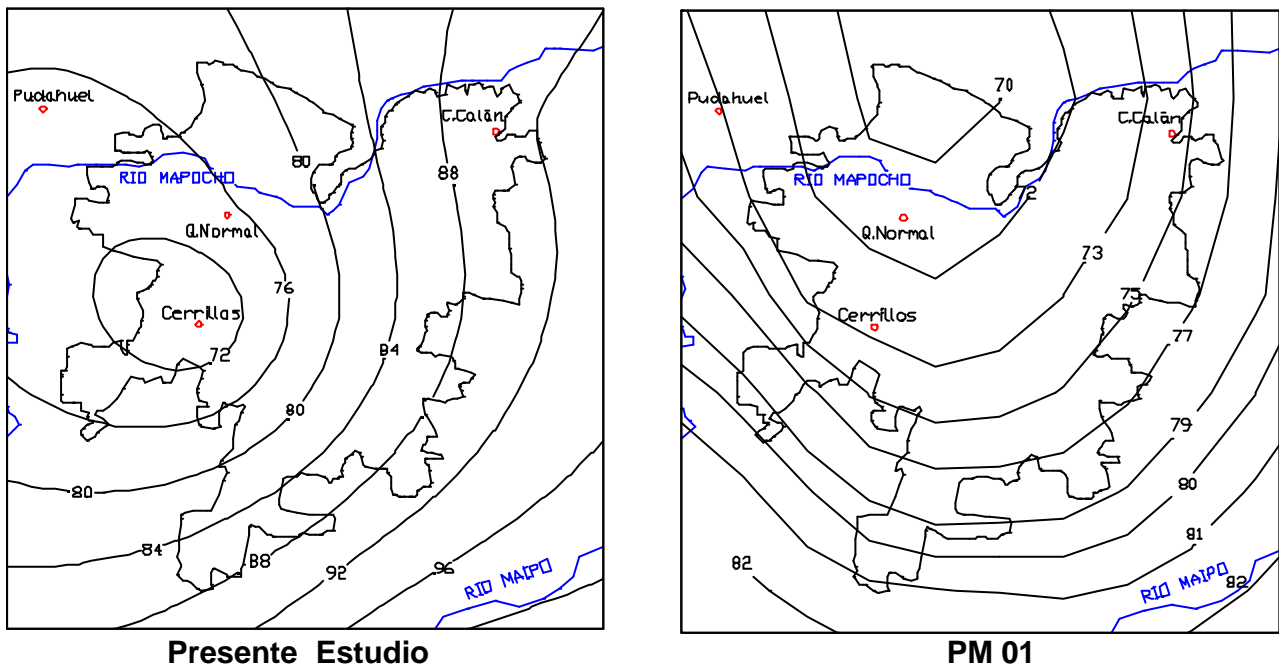


Figura 2. Planos de Isoyetas para T=10 años y 24 horas de duración, determinado en este estudio y el usado en el PM01.

En la confección del plano de Isoyetas del presente estudio no se consideró la estación del Embalse Rungue, por tener pocos años de información y poseer valores muy altos con respecto a las demás estaciones de la cuenca. Su consideración produce una distorsión inaceptable en el resto de la cuenca, elevando los valores de precipitación y desplazando los valores altos hacia la estación.



4.2 Coeficientes de Frecuencia

Los Coeficientes de Frecuencia (CF) promedio (para cualquier duración) determinados para cada una de las estaciones usadas en este estudio se presentan en la Tabla 5. Estos valores son comparados en la Tabla 6 con los valores de otros estudios.

Tabla 5. Coeficientes de Frecuencia para cualquier duración

ESTACION	PERIODO DE RETORNO T (AÑOS)						
	2	5	10	25	50	100	200
1.Q. Normal	0.612	0.845	1.000	1.195	1.340	1.484	1.628
2.Los Cerrillos	0.630	0.853	1.000	1.186	1.324	1.461	1.598
3.C.Calán	0.606	0.843	1.000	1.198	1.346	1.492	1.637
4.Pudahuel	0.608	0.844	1.000	1.197	1.343	1.488	1.633
5.Pirque	0.620	0.849	1.000	1.191	1.333	1.474	1.614
6.Melipilla	0.558	0.824	1.000	1.222	1.387	1.551	1.714
7.E.Rungue	0.519	0.808	1.000	1.242	1.422	1.600	1.778
PROMEDIO (*)	0.593	0.838	1.000	1.205	1.357	1.507	1.657

(*) Promedio de todas las estaciones y sus distintas duraciones.

Tabla 6. Cuadro comparativo de los Coeficientes de Frecuencia

ESTUDIOS Y ESTACIONES	PERIODO DE RETORNO T (AÑOS)					
	2	5	10	25	50	100
1.Qta. Normal, Plan Maestro	0.629	0.852	1.00	1.186	1.325	1.462
2.Quinta Normal (1)	0.612	0.845	1.00	1.195	1.340	1.484
Diferencia	2.8%	0.8%	0.0%	0.8%	1.1%	1.5%
3.Los Cerrillos, Plan Maestro	0.589	0.836	1.00	1.207	1.360	1.512
4.Los Cerrillos (1)	0.630	0.853	1.00	1.186	1.324	1.461
Diferencia	6.5%	2.0%	0.0%	1.8%	2.7%	3.5%
5.Valor medio, Plan Maestro (3)	0.636	0.855	1.00	1.183	1.332	1.454
6.Presente estudio (2)	0.593	0.838	1.00	1.205	1.357	1.507
7.Qta. Normal, Varas y Sánchez (4)	-	-	1.00	1.160	1.290	1.410
8.Espíldora (5)	0.640	0.860	1.00	1.190	1.300	1.400
Diferencia (entre 5 y 6)	7.2%	2.0%	0.0%	1.8%	1.8%	3.5%

(1) Presente Estudio.

(2) Estaciones Quinta Normal, Los Cerrillos, Pudahuel, Cerro Calán, Pirque, Melipilla y E. Rungue.

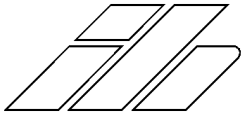
(3) Valor medio de las estaciones Quinta Normal, Los Cerrillos, Terraza DGA, Tobalaba, La Florida, El Bosque, La Obra y San Bernardo ocupadas en el Plan Maestro de Santiago (1941-1998).

(4) Ref."Relaciones Intensidad Duración Frecuencia Generalizadas", Varas y Sánchez 1983.

(5) Ref."Estimaciones de curvas Intensidad Duración Frecuencia mediante Coeficientes Generalizadas", B. Espíldora C. 1989.

Es posible encontrar una expresión analítica para determinar Coeficientes de Frecuencia, válida para T entre 2 y 200 años, con un error inferior al 6,5%:

$$CF^T = 0,229 * \ln T + 0,473 \quad (1)$$



4.3 Coeficientes de Duración para Lluvias de 10 a 120 Minutos.

La Tabla 7 muestra los Coeficientes de Duración (CD) para las estaciones usadas en este estudio para duraciones de 10 a 120 minutos, luego la Figura 3 determina valores representativos ajustando la mejor curva a un CD promedio de todas las estaciones y para las distintas duraciones, los que se dan a conocer en la Tabla 8 para la zona urbana y la totalidad de la cuenca y se comparan con los propuestos por Bell.

Tabla 7. Coeficientes de Duración para cada Estación y duraciones de 10 a 120 minutos

ESTACION	DURACION (MINUTOS)											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
1.Q.Normal	0.339	0.534	0.654	0.774	0.893	1.00	1.096	1.176	1.263	1.350	1.422	1.488
2.Cerrillos	0.423	0.559	0.670	0.780	0.904	1.00	1.096	1.178	1.258	1.355	1.457	1.541
3.C.Calán	0.377	0.530	0.649	0.771	0.870	1.00	1.113	1.213	1.302	1.414	1.528	1.616
4.Pudahuel	0.409	0.511	0.768	0.850	0.926	1.00	1.061	1.126	1.173	1.220	1.282	1.343
5.Pirque	0.343	0.543	0.667	0.779	0.898	1.00	1.075	1.154	1.216	1.297	1.376	1.455
6.Melipilla	0.346	0.517	0.657	0.775	0.897	1.00	1.106	1.203	1.296	1.387	1.472	1.555
7.E.Rungue	0.362	0.508	0.640	0.762	0.873	1.00	1.122	1.220	1.340	1.476	1.607	1.745

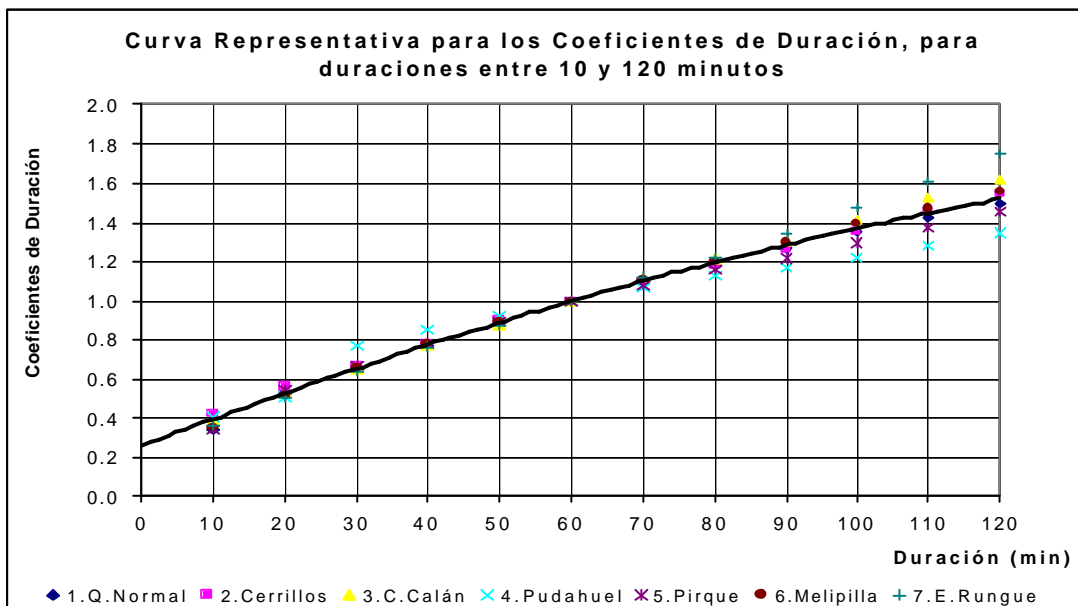
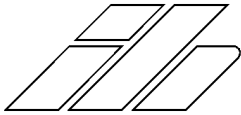


Figura 3. Coeficientes de duración calculados para duraciones entre 10 y 120 minutos.

De la Figura 3 se puede observar que los coeficientes de duración para las distintas estaciones presentan la misma tendencia para duraciones menores a una hora. En cambio para duraciones mayores los CD de Rungue tienden a ser mas altos que el resto de las estaciones, y los de Pudahuel tienden a decaer. Sin embargo el resto de las estaciones presenta valores similares.



Los valores para los CD de la Tabla 8 se obtuvieron ajustando la mejor curva a los promedios de los CD de las estaciones usadas en este estudio, ya sea para todas las estaciones (representativo cuenca del Maipo) o bien de las estaciones que se encuentran en la zona urbana (representativo zona urbana).

Tabla 8. Coeficientes de Duración Representativos para duraciones de entre 10 a 120 minutos.

Duración (min)	Representativo Cuenca del Maipo	Representativo Zona Urbana*	Bell
10	0.394	0.406	0.45
20	0.526	0.538	0.64
30	0.652	0.662	0.79
40	0.773	0.780	0.86
50	0.887	0.891	
60	1.000	1.000	1
70	1.097	1.094	
80	1.194	1.185	
90	1.284	1.269	1.16
100	1.368	1.346	
110	1.446	1.417	
120	1.518	1.481	1.25

(*) Representativo para la zona urbana; considerando solo las estaciones de Qu Pudahuel, Los Cerrillos y Cerro Calán.

Los CD determinados en el presente estudio presentan valores de hasta un 21% mas altos para duraciones superiores a una hora que los CD de Bell, en cambio para duraciones menores a 60 minutos son hasta un 18% mas bajos. Estas diferencias reflejan que la razón entre las precipitaciones de muy corta duración, de hasta 30 minutos, y las de una hora, son menores en la Región Metropolitana que las propuestas por Bell, y mayores para duraciones cercanas a dos horas.

También es posible encontrar una expresión analítica para determinar CD, aquí se propone la siguiente:

$$CD_t = 0,1t^{0,5635} \quad (2)$$

Válida para t entre 10 y 120 minutos, con error máximo de un 7,6% para t=10 minutos e inferiores al 4% para las otras duraciones.

Con las expresiones (1) y (2), se puede determinar una expresión para relacionar la precipitación máxima de 60 minutos de Duración y 10 años de Periodo de Retorno, con otra máxima de Duración entre 10 y 120 minutos y una recurrencia de entre 2 y 200 años.

$$P^T_t = P^{10}_{60} (0,299LnT + 0,473)(0,1 t^{0,5635}) \quad (3)$$

Válida para t entre 10 y 120 minutos y T entre 2 y 200 años. Siendo P^T_t =precipitación de t minutos de duración y T años de periodo de retorno y P^{10}_{60} =precipitación de 60 minutos de duración y 10 años de periodo de retorno.



4.4 Coeficientes de Duración para Lluvias de 1 a 24 Horas.

Los CD para duraciones de entre 1 a 24 horas, para la cuenca del Río Maipo y que corresponden al promedio de los CD para todas las estaciones usadas en este estudio, se encuentran en la Tabla 9, en cambio la Tabla 10 muestra los coeficientes obtenidos solo para la zona urbana tomando en cuenta las estaciones de Quinta Normal, Los Cerrillos, Pudahuel y Cerro Calán.

En las tablas anteriores se puede observar que para distintos periodos de retorno existen distintos CD para una misma duración, y que a medida que crece el periodo de retorno los CD tienden a estabilizarse. También se puede observar que las diferencias entre los CD de la cuenca y la zona urbana son menores a un 8,4 % para 1 hora, 6,4 % para 2 horas y para el resto de las duraciones las diferencias no sobrepasan un 5,4 %.

Para obtener los CD representativos de la zona en estudio, al promedio de los CD de cada estación, se les efectuó un ajuste de la mejor curva, estos resultados que se encuentran en la Tabla 11.

Tabla 9. Coeficientes de Duración Promedio para las Estaciones Usadas en este Estudio

DURACION (HORAS)	PERIODO DE RETORNO T (AÑOS)						
	2	5	10	25	50	100	200
1	0.192	0.178	0.173	0.168	0.166	0.165	0.163
2	0.302	0.273	0.263	0.255	0.251	0.247	0.245
4	0.445	0.396	0.379	0.364	0.357	0.351	0.346
6	0.562	0.513	0.496	0.481	0.473	0.467	0.463
8	0.648	0.602	0.586	0.572	0.565	0.559	0.555
10	0.720	0.675	0.660	0.646	0.640	0.634	0.630
12	0.779	0.739	0.725	0.713	0.707	0.702	0.698
14	0.827	0.791	0.778	0.767	0.762	0.757	0.754
18	0.910	0.889	0.881	0.875	0.872	0.869	0.867
24	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabla 10 Coeficientes de Duración Promedio para la Zona Urbana de Santiago.

DURACION (HORAS)	PERIODO DE RETORNO T (AÑOS)						
	2	5	10	25	50	100	200
1	0.208	0.193	0.188	0.184	0.181	0.179	0.178
2	0.322	0.290	0.278	0.269	0.264	0.260	0.257
4	0.469	0.411	0.389	0.371	0.362	0.354	0.348
6	0.591	0.536	0.515	0.498	0.489	0.482	0.476
8	0.682	0.634	0.617	0.602	0.594	0.588	0.583
10	0.751	0.710	0.695	0.682	0.675	0.669	0.665
12	0.803	0.769	0.757	0.746	0.741	0.736	0.733
14	0.847	0.816	0.805	0.796	0.790	0.787	0.783
18	0.918	0.900	0.893	0.888	0.885	0.882	0.880
24	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00



Tabla 11 Coeficientes de Duración Representativos para duraciones de 1 a 24 horas.

Duración horas	Representativo Cuenca del Maipo	Representativo Zona Urbana*	Propuestos por Varas y Sanchez
1	0.188	0.183	0.16
2	0.265	0.254	0.26
4	0.400	0.381	0.43
6	0.515	0.490	0.56
8	0.610	0.583	0.65
10	0.690	0.661	0.71
12	0.755	0.728	0.77
14	0.810	0.785	0.85
18	0.897	0.881	0.94
24	1.000	1.000	1.00

(*) Representativo para la zona urbana de Santiago; considerando las estaciones de Pudahuel, Quinta normal, Los Cerrillos y Cerro Calán.

En la Tabla 11 es posible observar que existen diferencias de hasta un 14% en los CD determinados por Varas y Sánchez con los representativos de toda la cuenca aquí determinados. Si los comparamos con los de la zona urbana las diferencias son bastante menores, siendo la mayor de ellas un 11,9%.

5. Conclusiones

Del estudio efectuado se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El Plano de isoyetas determinado muestra diferencias notorias con el propuesto en el PM01, entregando valores mas altos.
- Las diferencias entre los CF determinados en este estudio son inferiores al 7,2% respecto del PM01 e inferiores al 8% de los de Varas y Sánchez. Los CD para duraciones menores a 2 horas determinados en este estudio presentan diferencias de hasta un 21% con los propuestos por Bell, diferencias de hasta un 14% con los propuestos por Varas y Sánchez en 1983 y hasta un 11% con los usados en el PM 01.
- Quedan propuestas ecuaciones para determinar CF y CD. También, se propone una expresión analítica, que relaciona precipitaciones máximas de 60 minutos de duración y 10 años de periodo de retorno, con otras de duración entre 10 y 120 minutos y un período de retorno de entre 2 y 200 años.

Bibliografía:

1. **Varas y Sánchez** (1983), Relaciones Intensidad Duración Frecuencia Generalizadas. VI Congreso de Nacional de Ingeniería Hidráulica.
2. **Dirección de Obras Hidráulicas, Cade-Idepe** (2000), Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Santiago.
3. **Emos S.A., Cade-Idepe & Coyne et Bellier** (1983), Plan Maestro de Alcantarillado para el Gran Santiago.