



CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS LLUVIAS URBANAS DE SANTIAGO

JOSÉ PEDRO MONTT M.¹, PEDRO RIVERA I.¹, BONIFACIO FERNÁNDEZ L.¹ Y
RAFAEL VALENZUELA R.²

¹Depto. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. P. Universidad Católica de Chile.

²Dirección de Obras Hidráulicas. Ministerio de Obras Públicas.

Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile. Tel.: 6864227. Fax 6865876.

Email: bfernand@ing.puc.cl www.centroaguasurbanas.cl

RESUMEN

Se presentan los principales resultados de la primera investigación realizada acerca de la calidad de las aguas lluvias urbanas en Santiago de Chile. Se monitorearon 12 lugares de Santiago durante 7 tormentas del invierno del 2001. En cada uno de los eventos registrados se obtuvo la Concentración Media por Evento (CME) de 37 elementos. También se midieron concentraciones instantáneas durante las tormentas. Se obtuvieron polutogramas de sólidos suspendidos, sólidos disueltos, DQO, fierro, cobre, nitratos, sulfatos y cloruros.

Se contrastaron las mediciones de CME con distintas normas chilenas de calidad del agua. Los parámetros aluminio, fierro, manganeso, plomo, DBO y sólidos suspendidos fueron los contaminantes que excedieron con mayor frecuencia los valores máximos permitidos. También se compararon las CME observadas en Santiago con bases de datos de calidad de aguas lluvias de Estados Unidos.

Muchos de los polutogramas observados mostraron un claro efecto de lavado inicial. Sin embargo, en la mayoría de las tormentas este fenómeno fue poco importante. De todos modos el escurrimiento de los primeros milímetros de lluvia presentó, en promedio, mayor contaminación.

ABSTRACT

The first research of urban stormwater quality in Santiago, Chile, is presented. Twelve sites within metropolitan Santiago were monitored during seven storms in winter 2001. From each event, the Event Mean Concentration (EMC) was obtained for 37 parameters: Instantaneous concentrations were also measured during the storms. Pollutographs were generated for suspended solids, dissolved solids, COD, iron, copper, nitrates, sulfates, and chlorides. The EMC measurements were compared with the Chilean effluent discharge water quality standards. Aluminum, iron, manganese, lead, BOD, and suspended solids were the contaminants that most often exceeded the maximum allowed concentration mandated by the Chilean standards. The EMC's recorded in Santiago were also compared with a U.S.'s stormwater quality data base. Many of the pollutographs indicated a clear first flush effect. However, in the majority of the storms this phenomenon was of little importance. Either way, the first few millimeters of precipitation associated in average with the greatest levels of contamination.



CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS LLUVIAS URBANAS EN SANTIAGO DE CHILE

1 Introducción

La acelerada expansión de la superficie urbana durante las últimas décadas en Santiago ha provocado un aumento considerable de los problemas de inundación en la ciudad. Debido a ello se han buscado soluciones de drenaje urbano como obras de retención temporal e infiltración. Durante el año 2001, el Ministerio de Obras Públicas a través de su Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) construyó 46 pozos de infiltración de aguas lluvias en distintos puntos de Santiago. El objetivo era conocer de manera experimental el funcionamiento y eficiencia de estas obras como elementos de drenaje urbano, aprovechando la buena permeabilidad de los suelos de la cuenca. A partir de esta experiencia surgió la interrogante sobre la calidad del agua que escurre y luego infiltra, información que hasta la realización del trabajo que se presenta, no existía. Por esta razón la DOH decidió efectuar un muestreo y análisis físico químico de las aguas lluvias que escurren por las calles hacia los pozos de infiltración (DOH MOP, 2001).

En los países en vías de desarrollo, la contaminación de cuerpos de agua receptores provocada por las aguas lluvias urbanas, no está aún debidamente abordada y menos documentada. Esto se debe fundamentalmente a que todavía existen problemas de contaminación del agua más urgentes que resolver, como son las descargas industriales y las aguas servidas urbanas. El presente trabajo muestra los resultados del primer estudio a gran escala hecho en Chile sobre el problema de la contaminación de las aguas lluvias urbanas de una gran metrópoli, como es el caso de la ciudad de Santiago.

La contaminación por aguas lluvias propiamente tal, esto es, descontando la contaminación por aguas servidas provocada por el desborde de sistemas unitarios de colectores, es un fenómeno de contaminación difusa que consta fundamentalmente de dos subprocesos. El primero de ellos es la acumulación de contaminantes y residuos en general sobre la superficie de las ciudades durante los períodos secos. El segundo subproceso es el lavado de contaminantes desde la atmósfera y desde la superficie urbana provocada por la precipitación y la escorrentía superficial. A lo que también se incluye la erosión de terrenos desnudos. La acumulación de contaminantes depende principalmente del tipo de desarrollo del sector, de los hábitos de la población, de la frecuencia con que las calles son limpiadas, además de la longitud de los períodos secos. El lavado depende básicamente del tipo de superficie urbana y de las características de las lluvias.

Estos dos factores hacen que la calidad de las aguas lluvias presente una enorme variabilidad de un lugar a otro, incluso en la misma ciudad. Lo que hace poco aconsejable utilizar para estudios técnicos valores de referencia de ciudades de otros países, cuyas características urbanas pueden ser muy distintas.

El objetivo de este estudio es reunir antecedentes para la caracterización de la calidad de las aguas lluvias urbanas que escurren superficialmente por la ciudad Santiago, de modo de disponer de datos locales que puedan ser utilizados para diferentes fines. Por ejemplo, para estimar el impacto en la calidad de los cuerpos



receptores, comparar con la contaminación observada en otras partes del mundo o diseñar elementos de tratamiento local.

La investigación consistió específicamente en medir concentraciones instantáneas y concentraciones medias de una serie de contaminantes, que pudieran estar presentes en las aguas lluvias que escurren por las calles. Se monitorearon 12 lugares de Santiago durante el invierno del 2001, en cada uno de ellos se obtuvo la Concentración Media por Evento (*CME*) de 37 contaminantes y se obtuvieron polutogramas para algunos contaminantes escogidos. Se monitorearon en promedio 3 tormentas por lugar. De este modo se obtuvo un total de 1332 mediciones de *CME* y más de 250 polutogramas.

2 Metodología

2.1 Zona de Estudio

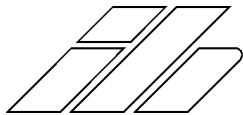
Se definieron 12 lugares de muestreo de escurrimiento superficial de aguas lluvias distribuidos en toda la ciudad, coincidentes con la ubicación de pozos de infiltración. Las cuencas aportantes a estos puntos son de distintas características urbanas. En algunos casos se trata de pequeñas cuencas residenciales, de cerca de 1 hectárea, y un tráfico casi nulo. En otros casos, éstas son grandes cuencas urbanas, mayores a las 200 hectáreas, con sectores industriales y alta intensidad de tráfico. Las características de los 12 lugares muestreados se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Sitios de Muestreo y Características de las Cuencas Aportantes.

Sitio	Id.	Superficie cuenca (ha)	Industrias	Intensidad de Tráfico
Lo Espejo	P1	272	Si	Alta
Peñalolén	P2	18,6	No	Baja
Macul	P3	0,8	No	Baja
San Joaquín	P4	1,4	No	Media
San Ramón	P5	72,2	Si	Media
Los Litres	P6	0,6	No	Baja
Denébola	P7	1,1	No	Baja
Mahuidanche	P8	11,2	No	Baja
San Miguel	P9	214	Si	Alta
La Cisterna	P10	105	Si	Alta
Tobalaba	P11	29,9	No	Media
Sótero del Río	P12	627	Si	Alta

2.2 Muestreo

En los lugares de monitoreo se tomaron muestras de modo manual, principalmente desde el escurrimiento en la cuneta. En algunos casos también se tomaron desde el sistema de captación a pozos de infiltración. Por razones presupuestarias, de las 7 tormentas controladas y de los 12 lugares, sólo se midieron un total de 36 eventos. Las características de estas tormentas se muestran en la Tabla 2.



En todos los eventos monitoreados se tomaron varias muestras por tormenta. Durante el inicio de ellas, las muestras se tomaron a intervalos de 1 hora. El tiempo entre muestras se extendió con el transcurso de la tormenta, hasta llegar a intervalos de 8 horas para tormentas que superaban las 24 horas de duración. El muestreo se hizo de este modo con el objeto de controlar mejor el comienzo de las tormentas, donde es esperable que se encuentren las concentraciones máximas de contaminantes

Tabla 2. Características de las Tormentas Registradas.

Lluvia	Precipitación total (mm)	Inicio	Duración (hrs)	Período seco anterior (días)
L1	23,3	08/07/01 11:30	15,3	40
L2	23,1	13/07/01 21:00	16,7	4,8
L3	21,0	17/07/01 08:30	69,3	2,8
L4	58,0	29/07/01 10:30	42,3	9,2
L5	34,5	25/08/01 15:00	31,8	25,4
L6	14,9	28/08/01 09:35	23,0	1,4
L7	11,2	29/09/02 19:25	4,6	31,5

2.3 Análisis de Laboratorio

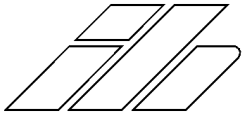
Se utilizó una fracción de cada una de las muestras puntuales para medir concentración instantánea de algunos contaminantes y así obtener sus respectivos polutogramas. Además, con las muestras puntuales se formó una muestra compuesta para cada tormenta y cada lugar, con el objeto de obtener un índice de concentración media de contaminantes. Esta muestra compuesta se formó ponderando cada una de las muestras puntuales por el agua caída en el intervalo de tiempo correspondiente. La precipitación se registró en un pluviógrafo digital de la estación San Joaquín ubicado en un lugar central a los sitios de monitoreo. Este pluviógrafo registró la precipitación acumulada cada 5 minutos.

Se seleccionaron 37 contaminantes para ser analizados. Los contaminantes se escogieron por tener exigencias de concentraciones máximas en normas chilenas de calidad del agua, o bien por ser de interés general. Las muestras se analizaron según metodología estándar (APHA, 1998) en el Laboratorio de Calidad del Agua de la P. Universidad Católica de Chile.

2.4 Indicador de Concentración Media

Se utilizó el parámetro *CME* (Concentración Media por Evento) como índice para medir la concentración promedio de los contaminantes durante la tormenta. Este es el índice estándar utilizado para la medición de la contaminación en el escurrimiento urbano. Este parámetro es una estimación de la concentración promedio en sentido físico, del contaminante en el escurrimiento. Se define como la masa total del contaminante arrastrada durante la tormenta (M_T) dividido por el volumen total de agua escurrida en la sección de muestreo (V_T).

$$CME = \frac{M_T}{V_T} \quad (1)$$



En este estudio no se contó con mediciones de caudal del escurrimiento, por lo que se ponderaron las muestras puntuales según el hietograma registrado en la estación San Joaquín. De modo que:

$$CME = \frac{M_T}{V_T} = \frac{\sum C_i V_i}{V_T} \approx \frac{\sum C_i H_i}{H_T} \quad (2)$$

En que C_i es la concentración instantánea; V_i volumen escurrido en el intervalo i ; H_i agua caída en el intervalo; y H_T agua caída total en la tormenta.

3 Resultados

A partir del análisis de las muestras, tanto compuestas como puntuales, se obtuvieron concentraciones de diferentes contaminantes orgánicos, inorgánicos, metales y otros. Los resultados se presentan como valores de Concentración Media por Evento (CME) y polutogramas.

3.1 Concentración Media por Evento

3.1.1 Estándares de Calidad del Agua

En la Tabla 3 se presentan los valores medios, mínimos y máximos de CME de todos los contaminantes monitoreados. Con el objeto de comparar estos valores con los estándares de calidad del agua, también se presentan los valores límites señalados en las normas chilenas de descargas a aguas superficiales y a aguas subterráneas.

De los 37 parámetros de calidad del agua medidos, hubo 9 contaminantes que no fueron detectados en ninguno de los 36 eventos monitoreados. Estos son cadmio, mercurio, selenio, benceno, pentaclorofenol, sulfuros, tetracloroetano, triclorometano y nitrito.

La norma chilena de descarga a aguas superficiales fue superada persistentemente por los parámetros aluminio, manganeso, nitrógeno Kjeldahl total, DBO, y sólidos suspendidos. La norma chilena de emisión a aguas subterráneas fue superada en casi todos los eventos por los contaminantes aluminio y hierro. En el caso de los sitios monitoreados correspondientes al escurrimiento desde grandes sectores urbanos (mayores a 100 ha), con industrias y alta intensidad de tráfico vehicular, el plomo se agrega a los contaminantes mencionados anteriormente ya que supera persistentemente ambas normas.

Otros contaminantes superaron estas normas pero sólo en algunos de los eventos. En el caso de la norma de descarga a aguas superficiales estos contaminantes fueron: cobre, cromo, molibdeno, zinc, fósforo, nitrato, cianuro, hidrocarburos y aceites y grasas.

Los contaminantes que superaron en algunos eventos la norma de descarga a aguas subterráneas fueron: arsénico, cromo, manganeso, zinc, amoníaco, cianuro, nitrógeno Kjeldahl total, nitrato y aceites y grasas.

3.1.2 Fracción Disuelta e Infiltración de Aguas Lluvias

Es importante, también, considerar la fracción de los contaminantes que se encuentra disuelta y la que se encuentra suspendida, especialmente para la evaluación

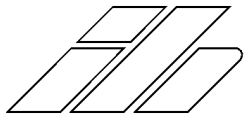


del impacto de la infiltración de aguas lluvias. Los contaminantes transportados de forma suspendida terminarán decantando y sedimentando en el suelo. Además pueden ser removidos con relativa facilidad por medios físicos, mediante sedimentadores y filtros. Los contaminantes disueltos, en cambio, pueden seguir junto con el agua hacia capas inferiores del suelo, y eventualmente contaminar el acuífero. Su remoción requiere procedimientos químicos o biológicos.

Se realizaron análisis de la fracción disuelta de los contaminantes que superaron en al menos un evento la norma de descarga a aguas subterráneas. En este análisis se observó que los contaminantes aluminio, arsénico, hierro, manganeso, zinc, nitrógeno Kjeldahl total y nitrato presentaron fracción disuelta insignificante en relación al total. Por lo tanto estos parámetros no debieran ser de una gran preocupación en lo referente a la infiltración de aguas lluvias. Los contaminantes amoníaco, cianuros, plomo y cromo, en cambio, si ameritan mayor atención.

Tabla 3. Resumen Concentración Media por Evento Observadas y Normas de Calidad del Agua.

Grupo	Parámetro (mg/L)	Nº Eventos Medidos	Eventos Con Detección	Promedio (mg/L)	Coef. de Variación	Mínimo (mg/L)	Mediana (mg/L)	Máximo (mg/L)	Norma Ch. Descarga a Ríos	Norma Chilena de Infiltración	
Inorgánicos	Amoniaco	36	34	1,06	0,95	<0,05	00,60	4,11		1	
	Cianuros	36	3	< 0,05	4,36	< 0,05	< 0,05	0,24	0,2	0,2	
	Cloruros	36	36	13,50	0,70	1,17	10,60	35,51	400	250	
	Fluoruros	36	36	0,08	0,37	0,04	00,080	0,21	1,5	1,5	
	Nitrato	36	27	3,96	3,00	< 0,5	11,3	71,07	10	10	
	Nitrito	36	0	< 0,1	0,00	< 0,1	< 0,1	< 0,1			
	Sulfatos	36	36	29,94	0,92	0,36	119,9	125,98	1000	250	
	Sulfuros	36	0	< 0,001	0,00	< 0,001	< 0,001	< 0,001	1	1	
Orgánicos	Aceites y Grasas	36	27	28	2,95	< 1	44,0	444	20	10	
	Benceno	36	20	< 0,001	0,00	< 0,001	< 0,001	< 0,001		0,01	
	Pentaclorófenol	12	0	< 0,001	0,00	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,009	0,009	
	Hidrocarburos	19	2	1	4,18	< 1	< 1	21,50	10		
	Tetracloroetano	12	0	< 0,001	0,00	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,04	0,04	
	Tolueno	36	16	0,041	1,32	< 0,001	< 0,001	0,20	0,7	0,7	
	Triclorometano	12	0	< 0,001	0,00	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,2	0,2	
	Xileno	36	1	< 0,001	6,00	< 0,001	< 0,001	0,001	0,5	0,5	
Metales	Aluminio	36	36	13,11	0,88	0,62	110,95	59,50	5	5	
	Arsénico	36	25	0,008	0,87	<0,005	00,008	0,026	0,5	0,01	
	Boro	36	28	0,04	0,92	< 0,01	00,040	0,15	0,75	0,75	
	Cadmio	36	0	< 0,005	0,00	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,01	0,002	
	Cobre	36	35	0,12	0,87	< 0,01	00,09	0,46	1	1	
	Cromo Hex.	36	20	0,01	1,29	< 0,01	00,010	0,07	0,05	0,05	
	Fierro	36	35	11,66	0,83	<0,01	110,26	37,00		5	
	Manganeso	36	34	0,52	1,08	<0,01	00,395	3,00		0,5	
	Mercurio	36	0	< 0,001	0,00	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,001	0,001	
	Molibdeno	36	21	0,02	1,16	< 0,01	00,015	0,10	1	1	
	Níquel	36	24	0,02	0,97	< 0,01	00,015	0,06	0,2	0,2	
	Plomo	36	26	0,08	1,37	< 0,03	00,035	0,44	0,05	0,05	
	Selenio	36	0	< 0,005	0,00	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,01	0,01	
	Sodio	36	36	8,52	0,63	0,70	88,13	24,00			
	Zinc	36	36	1,60	1,77	0,06	00,48	14,50	3	3	
	Nutrientes	Fósforo	36	36	1,21	0,60	0,19	11,21	3,45	10	
		Nitróg. Kjeldahl	36	36	6,12	0,65	1,10	55,55	15,50	50	15
Demanda de Oxígeno	DBO5	36	36	63	1,10	3	444	301	35		
	DQO	36	36	143	1,22	10	1124	905			
Sólidos	Sól. Suspendidos	36	36	504	0,80	27	4421	1976	80		
	Sól. Disuel	36	36	156	0,69	10	1133	557			



3.1.3 Comparación con Valores de Referencia

Se compararon los valores de *CME* obtenidos en Santiago, con valores medios de Estados Unidos, publicados por dos fuentes, ambas con una gran cantidad de observaciones de terreno. La primera de ellas es una compilación de los datos recogidos por entidades gubernamentales de Estados Unidos (Smullen *et al* 1999). En ella se recogen los datos reportados por la NURP (Nationwide Urban Runoff Program), por el USGS (United States Geological Survey), y por el NPDES (National Pollutant Discharge Elimination System). La segunda fuente presentada es el National Stormwater BMP Database. Esta corresponde a una base de datos que contiene una gran cantidad de estudios sobre la eficacia en la remoción de contaminantes de distintas técnicas alternativas o BMP (Best Management Practices). Se seleccionaron las observaciones tomadas en el escurrimiento de entrada a las BMP. Ambas fuentes de referencia, al igual que los valores encontrados en este estudio para Santiago, se muestran en la Tabla 4.

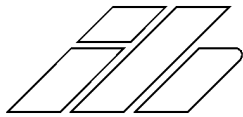
Las fuentes citadas en la Tabla 4 contienen referencias de *CME* de 27 contaminantes, del total de los 37 considerados en esta investigación. Muchos de ellos mostraron valores de *CME* significativamente mayores que los de Estados Unidos. Estos contaminantes fueron aluminio, cobre, fierro, manganeso, molibdeno, zinc, arsénico, sodio, amoníaco, fluoruros, nitratos, nitrógeno Kjeldahl total, fósforo, sólidos suspendidos y sólidos disueltos. El nivel de confianza es de 95%. Se realizó un test no paramétrico para este efecto.

El valor promedio de concentración de sólidos suspendidos, por ejemplo, es del orden de los 500 mg/l, cerca de 10 veces mayor que los valores típicos reportados en ciudades de Estados Unidos. Esta diferencia se debe fundamentalmente a la gran cantidad de terrenos permeables desprotegidos que tiene una ciudad como Santiago. En Santiago, la erosión del suelo durante las lluvias puede ser considerable, y por ende la cantidad de sólidos arrastrados en el escurrimiento. Este hecho provoca varios problemas. Por ejemplo, hace que sea mucho más difícil la implementación de soluciones de drenaje urbano tipo BMP, como obras de infiltración.

Los contaminantes que se presentaron en niveles relativamente similares a los valores típicos de Estados Unidos fueron los siguientes: cromo, plomo, níquel, cloruros, sulfatos, DBO, DQO y aceites y grasas. Sólo los hidrocarburos estuvieron por debajo de los valores de referencia. Para el mercurio, selenio, cadmio y nitritos no se pudo realizar esta comparación, ya que el umbral de detección del laboratorio es superior a los valores de referencia.

En resumen, una buena parte de los contaminantes presentan índices muchos mayores que los típicos de Estados Unidos. Es probable que este hecho se deba en parte a los pocos programas de limpieza de calles existentes o a factores culturales como el arrojar basuras y desperdicios en las calles. Sin embargo, es razonable pensar que la diferencia de 10 veces en la concentración de sólidos sea una buena explicación para la mayor concentración del resto de los contaminantes. Es decir, muchos contaminantes se encuentran naturalmente en el suelo, y dada la alta erosión, muchos de ellos se presentarán en el escurrimiento en altas concentraciones.

Este es probablemente la causa de las altas concentraciones observadas de fierro, aluminio, arsénico, cobre, fósforo, formas de nitrógeno, etc.



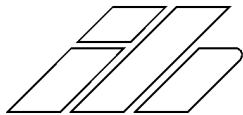
3.1.4 Uso del Suelo y Contaminación

En general, prácticamente todos los contaminantes medidos en diversos estudios presentan una enorme variabilidad, ya sea entre distintos sitios o entre diferentes lluvias. Si bien es razonable suponer diferencias en la *CME* según el uso del suelo (residencial, industrial, comercial, etc), aún no existe unanimidad al respecto. Algunas investigaciones concluyen que la variabilidad no explicada de la *CME* puede ser mucho mayor que la explicada por el uso del suelo. Esto quiere decir que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los distintos tipos de superficies o ubicación geográfica (U.S.EPA, 1983). Otros estudios, sin embargo, llegan a conclusiones diferentes. Por ejemplo, Pitt *et al.* (1995) estudiaron la toxicidad de 87 fuentes de escurrimiento urbano y determinaron que los lugares de estacionamientos y servicio de vehículos muestran las más altas concentraciones de contaminantes tóxicos.

En este estudio, se observó que los lugares con gran cuenca aportante, alto tráfico y con industrias, las *CME* observadas, de casi todos los contaminantes, fueron en promedio mayores que en los pequeños sectores residenciales. Sin embargo, el número de eventos medidos es aún muy pequeño. Por lo que no es posible obtener relaciones concluyentes entre las características de las cuencas urbanas (tamaño, tráfico, nivel socioeconómico, tipos de vivienda, etc), con las observaciones de *CME*.

Tabla 4. *CME* Observadas y *CME* de Referencia.

Grupo	Parámetro	Datos Santiago		Datos NURP-USGS-NPDES		Datos ASCE-EPA2			
		N° Datos	Mediana	N° Datos	Media	N° Datos	1er Cuartil	Media	3er Cuartil
Inorg.	Amoniaco	36	0,60			731	0,0325	0,0952	0,253
	Cianuros	36	< 0,05						
	Cloruros	36	10,60			413	1,04	3,3	17,6
	Fluoruros	36	0,080			50	0,025	0,03	0,04
	Nitrato	36	1,3			662	0,2299	0,5	1
	Nitrato	36	< 0,1			117	0,01	0,01	0,024
	Sulfatos	36	19,9			109	6,5	14	63
	Sulfuros	36	< 0,001						
Org.	A y G	36	4,0			103	0,8	2,5	8,7
	Benceno	36	< 0,001						
	Pentaclorofenol	12	< 0,001						
	Hidrocarburos	19	< 1			18	0,5	0,925	1,45
	Tetracloroetano	12	< 0,001						
	Tolueno	36	< 0,001						
	Triclorometano	12	< 0,001						
	Xileno	36	< 0,001						
Met.	Aluminio	36	10,95			49	0,0623	0,111	0,207
	Arsénico	36	0,008			111	0,0006	0,0015	0,003
	Boro	36	0,040						
	Cadmio	36	< 0,005			621	0,0002	0,0004	0,001
	Cobre	36	0,09	1657	0,0111	970	0,003	0,009	0,02
	Cromo Hex.	36	0,010			340	0,002	0,0047	0,01
	Fierro	36	10,26			465	0,15	0,41	1,159
	Manganeso	36	0,395			439	0,0056	0,016	0,052
	Mercurio	36	< 0,001			18	0,0002	0,0002	0,0002
	Molibdeno	36	0,015			11	0,0004	0,001	0,002
	Níquel	36	0,015			318	0,0034	0,0049	0,02
	Plomo	36	0,035	2713	0,0507	1170	0,002	0,006	0,024
	Selenio	36	< 0,005			18	0,002	0,002	0,002
Sodio	36	8,13			198	0,27	1	3,6	
Zinc	36	0,48	2234	0,129	1214	0,03	0,0685	0,168	
Nut.	Fósforo	36	1,21	3094	0,259	1673	0,1	0,24	0,54
	Nit. Kjeldahl	36	5,55	2693	1,47	892	0,83	1,4	2,2925
DO	DBO5	36	44	1035	11,5	162	3,2	5,35	8,975
	DQO	36	124	2639	44,7	749	26	52	97
Sól.	Sól. Sus.	36	421	3047	54,5	191	46	82	141
	Sól. Disueltos	36	133			66	36	57,5	99,5



3.2 Concentraciones Instantáneas

3.2.1 Polutogramas

Se realizaron análisis de concentración instantánea de los contaminantes más típicos, y que pudieran a su vez representar el comportamiento de otros similares. Se obtuvieron los polutogramas de cobre, hierro, cloruros, sulfatos, nitratos, DQO, sólidos suspendidos y sólidos disueltos. Como ejemplo, la Figura 1 muestra algunos de los polutogramas obtenidos de sólidos suspendidos durante dos tormentas.

Se observa una gran variabilidad de la concentración instantánea durante el transcurso de la tormenta. Este hecho evidencia que son necesarias una buena cantidad de muestras por tormenta para caracterizar correctamente la calidad de las aguas lluvias.

No se observaron grandes diferencias entre los polutogramas de los distintos contaminante. Todos presentaron un comportamiento similar.

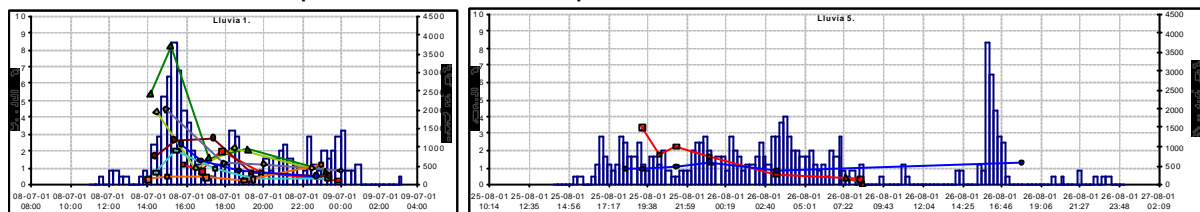


Figura 1. Polutogramas de sólidos suspendidos, tormentas 1 y 2.

3.2.2 Lavado Inicial

Si bien no todos los eventos muestran un efecto de lavado inicial, se puede decir que en promedio la primera parte de la tormenta es más contaminada que la parte final. Este hecho se muestra en la Figura 2. En ella, se agruparon los datos de concentración instantánea de todos los lugares. Se separaron las observaciones correspondientes a los primeros 10 mm de tormenta, entre los 10 y 20 mm, y después de los 20 mm. En cada uno de estos rangos se contó del orden de 50 observaciones de los cuales se obtuvo el promedio.

Sólo el Hierro y el Nitrato no muestran una clara disminución en su concentración instantánea con el agua caída. Por ejemplo el promedio de todas las observaciones de sólidos suspendidos durante los primeros 10 mm fue casi 900 mg/l. Entre los 10 y 20 mm, en cambio, la concentración promedio bajó a 500 mg/l.

Algunos eventos mostraron un claro efecto de lavado inicial. Sin embargo, en la mayor parte de los casos, este fenómeno fue poco significativo, y en algunos casos inexistente.

Es razonable suponer que el efecto de lavado inicial sea más importante en las cuencas más impermeabilizadas que en las cuencas con erosión. También existen investigaciones que establecen que la importancia del efecto de lavado inicial depende de: el tipo de contaminante (Barret et al. 1998a; Sansalone y Buchberger, 1997), de la magnitud de la tormenta (Barret et al., 1998a; Sansalone et al., 1998), o también del tamaño de la cuenca (Characklis y Wiesner, 1997). En el caso de Santiago, sin embargo, no se observó relación entre las variables mencionadas y la importancia del fenómeno de lavado inicial.

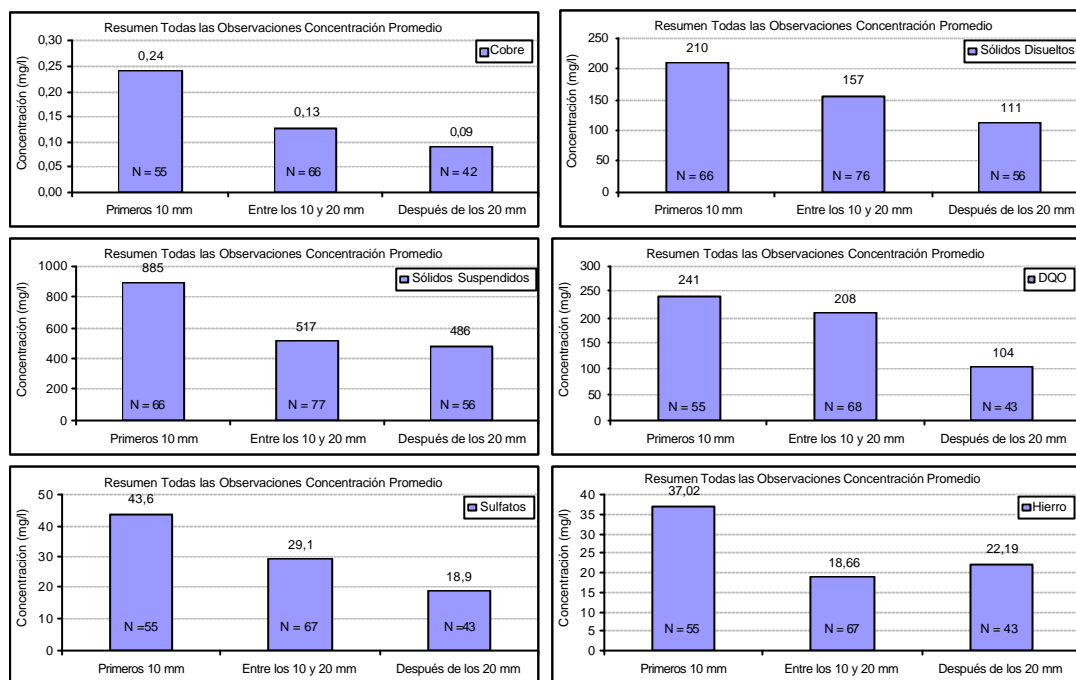


Figura 2. Variación en la concentración durante la tormenta.

3.3 Efecto de obra de regulación sobre la calidad de las aguas lluvias.

Con el objetivo de establecer el efecto de la sedimentación en estanques de retención sobre la calidad de las aguas lluvias que recibe el pozo, se tomaron muestras, durante dos lluvias, del escurrimiento de la calle en la toma del estanque y en la descarga del estanque al pozo, en el sector de Lo Espejo (P1).

Teóricamente se planteó que en el estanque, los contaminantes asociados a partículas en suspensión pueden decantar y así mejorar la calidad del caudal efluente.

Tabla 5. Variación CME en Laguna de Retención

Lluvia	25/08/2001 Duración Total 31,8 horas. Pp.total 34,5 mm.			28/08/2001 Duración Total 23 horas Pp. Total 14,9 mm.		
Lugar Muestreo	Entrada Laguna (Calle)	Salida Laguna	Reducción Concentración (%)	Entrada Laguna (Calle)	Salida Laguna	Reducción Concentración (%)
Cloruros (mg/L)	18,4	10,5	43	15,1	10,7	29
Fluoruros (mg/L)	0,11	0,08	27	0,09	0,08	11
Sulfatos (mg/L)	42	19,4	54	23,9	18,6	22
Aluminio (mg/L)	16	4,95	69	44	14,4	67
Cromo Hexavalente (mg/L)	0,027	< 0,01	----	0,05	0,01	80
Manganeso (mg/L)	1,29	0,21	84	1,33	0,46	65
Molibdeno (mg/L)	0,08	0,03	63	0,01	< 0,01	----
Níquel (mg/L)	0,02	< 0,01	----	0,05	0,03	40
Plomo (mg/L)	0,17	0,03	82	0,29	0,07	76
Zinc (mg/L)	0,61	0,27	56	1,17	0,41	65
Nitrógeno Total (mg/L)	10,9	1,1	90	9,6	5,7	41
Sodio (mg/L)	12,6	6,04	52	9,7	7,8	20
Fósforo (mg/L)	1,88	0,78	59	2,24	1,63	27
DBO5 (mg/L)	102	89	13	119	71	40
DQO (mg/L)	194	144	26	271	143	47
Sólidos Suspensos (mg/L)	448	132	71	1267	471	63
Sólidos Disueltos (mg/L)	259	102	61	174	146	16



Dadas las características del sistema estanque-pozo, la operación del pozo comenzó cerca de 12 horas después del inicio de cada lluvia analizada. Como resultado de ambas mediciones se estableció que en ese tiempo, muchos contaminantes asociados a las partículas de mayor tamaño presentaron una disminución en sus concentraciones respecto de los escurrimientos analizados en la toma de la laguna. Los contaminantes que disminuyeron en forma clara su concentración fueron: aluminio, cromo, manganeso, molibdeno, níquel, plomo, sodio, zinc, cloruros, fluoruros, sulfatos, fósforo, nitrógeno total, DBO, DQO, sólidos suspendidos y sólidos disueltos.

4 Conclusiones

Se realizó la primera campaña de monitoreo y medición de la calidad de las aguas lluvias urbanas en Santiago. Se monitorearon 12 sitios, de distintas características. Se obtuvo una gran cantidad de información de terreno, en particular, valores de Concentración Media por Evento de 38 contaminantes en 36 eventos.

Los parámetros aluminio, manganeso, nitrógeno Kjeldahl total, DBO y sólidos suspendidos sobrepasaron persistentemente la norma chilena de emisiones a aguas superficiales. Los metales aluminio y fierro lo hicieron con la norma de emisión a aguas subterráneas. Otros parámetros que presentaron valores riesgosos, aunque sólo en algunos de los eventos, fueron: arsénico, cobre, cromo, fósforo, manganeso, molibdeno, plomo, zinc, amoníaco, cianuro, nitrógeno Kjeldahl total, nitrato, aceites y grasas e hidrocarburos.

Se compararon las *CME* obtenidas con valores de referencia de Estados Unidos. En general las *CME* de Santiago son en promedio mayores. Exceptuando los compuestos orgánicos y algunos metales que no fueron detectados. Particularmente el transporte de sólidos, ya sea de forma suspendida o disuelta, es mucho mayor que lo comúnmente reportado en ciudades con mayor nivel de desarrollo. Gran parte de la responsabilidad de la contaminación observada se le asigna a la erosión de terrenos urbanos permeables desprotegidos durante las tormentas.

Se obtuvieron polutogramas de sólidos suspendidos, sólidos disueltos, cobre, fierro, cloruros, sulfatos, DQO y nitratos. No se observaron grandes diferencias entre los polutogramas de los distintos contaminantes. Algunos eventos mostraron un claro efecto de lavado inicial. Sin embargo, en la mayor parte de los casos, el fenómeno de lavado inicial fue poco significativo, y en algunos casos inexistente. Lo que se mantuvo constante durante todos los eventos, era la gran variabilidad en la concentración de los contaminantes durante el transcurso de la tormenta. Los valores excepcionalmente altos de concentración de contaminantes, eso sí, se encontraron casi siempre en los 10 primeros milímetros de lluvia.

5 Referencias

APHA, 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Edition. APHA, AWWA, WEF.

Barret, M.E., L.B. Irish, J.F Malina, R.J. Charbeneau, 1998. Characterization of Highway Runoff in Austin, Texas, area. Journal of Environmental Engineering, 124, (2), 131-137.



Characklis, G.W. y M.R. Wiesner, 1997. Particles, Metals, and Water Quality in Runoff from Large Urban Watershed. *Journal of Environmental Engineering*. 123, 753-759.

CONAMA, 2000. Ministerio Secretaría General de la Presidencia, Gobierno de Chile. Anteproyecto de Norma de Emisión a Aguas Subterráneas. Borrador 2.5.

CONAMA, 2001. Ministerio Secretaría General de la Presidencia, Gobierno de Chile. Decreto N°90. Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales.

DOH, 2001. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Análisis de la Calidad de las Aguas Lluvias Urbanas en Pozos de Infiltración en la Ciudad de Santiago.

DOH, 2001. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Análisis Experimental de Pozos de Infiltración de Aguas Lluvias en Hospital Sótero del Río y Aeródromo de Tobalaba: Medición de Caudal y Análisis de la Calidad.

National Stormwater Best Management Practices Database, Versión 1.3, 2002. Urban Water Resources Research Council. American Society of Civil Engineers.

Pitt, R., R. Field, M. Lalor y M. Brown, 1995. Urban Stormwater Toxic Pollutants, Assessment, Sources and Treatability. *Water Environ. Research*. 67(3), 260-275.

Sansalone, J.J. y S.G. Buchberger, 1997. Partitioning and First Flush of Metals in Urban Roadway Storm Water. *Journal of Environmental Engineering*. 123, 134-143.

Sansalone, J.J., J.M. Koran, J.A. Smithson y S.G. Buchberger, 1998. Physical Characteristics of Urban Roadway Solids Transported During Rain Events. *Journal of Environmental Engineering*, 124, 427-440.

Smullen, J.T., A.L. Shallcross y K. A. Cave. 1999. Updating the U.S. Nationwide Urban Runoff Quality Data Base. *Water Science Technology*. Vol. 39. No 12, pp 9-16.

U.S.EPA, 1983. Results of the Nationwide Urban Runoff Program. Vol. 1. Final Report, Water Planning Division, U.S. Environmental Protection Agency, NTIS Access PB84-18552. Washington D.C.

6 Agradecimientos

El desarrollo del trabajo experimental y análisis de las muestras de laboratorio fue patrocinado por el Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile, en el marco del estudio "Análisis de la Calidad de las Aguas Lluvias Urbanas en Pozos de Infiltración en la Ciudad de Santiago".

El análisis de los resultados de laboratorio y el desarrollo de esta publicación se realizó con financiamiento de la Corporación Nacional de Investigación Científica y Tecnológica del Gobierno de Chile (CONICYT) a través de su Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF) en el marco del proyecto de investigación "Sistemas Estandarizados de Drenaje de Aguas Lluvias para Urbanizaciones y Viviendas", desarrollado por la Pontificia Universidad Católica de Chile.