

La bahía en general no presenta problemas en cuanto a la concentración de oxígeno disuelto, a excepción del sector Puerto Pesquero comprendido entre el muelle CAP y Punta Liles, que siendo sólo un 7% de todo el sistema, presenta las peores condiciones de contaminación y concentraciones de oxígeno disuelto, impidiendo incluso el desarrollo de vida de las especies marinas, es importante destacar que los valores mínimos dados por la norma, en cuanto a concentraciones de oxígeno disuelto, no aseguran el desarrollo de vida de estas especies, por lo que se hace necesario utilizar otro método de comparación, como la tabla de porcentajes del valor de saturación presentada en este trabajo.

Al analizar la cantidad de carga de DBO soportada por este sector, se concluye que el sector pesquero debe disminuir su carga de DBO en aproximadamente un 20%, para lograr que la concentración de oxígeno disuelto presente un valor que permita el desarrollo de vida de las especies pelágicas.

La modelación realizada para la bahía San Vicente es simple, y quedan abierta a su mejoramiento a través de la incorporación de nuevos factores y consideraciones, para lograr así una modelación más completa del comportamiento del oxígeno disuelto en esta bahía, a partir de esta primera aproximación. Por ejemplo, aumentando el número de elementos que constituyen el área de estudio.

5- BIBLIOGRAFIA

- 1- Ahumada, R. (1995), "Bahías: áreas de uso múltiple, un enfoque holístico al problema de contaminación". Ciencia y Tecnología del mar, Cona N° especial: 59-68
- 2- Ahumada, R. (1993), "Distribución espacial de metales trazas (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn), en una bahía de uso múltiple: San Vicente, Chile". Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Escuela de Graduados. Centro Eula - Chile. Universidad de Concepción.
- 3- Ahumada, R. y Arcos D. (1976), "Descripción de un fenómeno de varazón y mortandad de peces en la Bahía de Concepción, Chile". Rev. Com. Per. Pacífico Sur. N° 5: 101-111.
- 4- Alarcón G. (1993) "Análisis de los residuos líquidos dispuestos en la bahía de San Vicente y proposición de tratamiento". Informe de Habilitación Profesional para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de Concepción.
- 5- Chapra, S (1995) "Surface Water Quality Modelig". Ed. Mc Graw- Hill C. Inc.
- 6- Thomann R. & Muelerr J. (1987) "Principles of Surface Water, Quality, Modeling and Control". De Harper & Row, Publishers. New York.
- 7- Thurman, H. (1991) "Introductory Oceanography". Ed. McMillan Publishing Co. New York.
- 8- WQRRS (1988) "Water quality for river - reservoir systems". Hydrologic Engineering Center. US Army Corps of Engineers.

XIV CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

CARACTERIZACIÓN Y CONTAMINACIÓN DE AGUAS LLUVIAS EN CIUDADES DE CHILE

Pedro Rivera I. y José P. Montt M.¹
Bonifacio Fernández Larrañaga²

RESUMEN

Los problemas generados por las aguas lluvias en las zonas urbanas son un tema de renovada preocupación en Chile. Las características de los escurrimientos que se generan y la calidad de ellos requieren para su modelación de una serie de parámetros que dependen en gran medida de las propiedades de la urbanizaciones y el comportamiento cultural de los ciudadanos, de manera que no son directamente extrapolables a partir de los datos proporcionados por la literatura técnica extraídos de otras realidades. En este artículo se presentan los resultados de una campaña de terreno desarrollada con el objetivo de conseguir antecedentes empíricos sobre el comportamiento de escurrimientos urbanos en condiciones típicas de ciudades de Chile, incluyendo aspectos de calidad y cantidad. Se presentan los valores obtenidos durante seis tormentas en la ciudad de Valdivia y se comparan con datos disponibles en la literatura.

¹ Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile, Alumno de Magister en Ciencias de la Ingeniería, PUC.
² Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Ingeniero Civil, PUC, Ph. D. Colorado State University.

1. INTRODUCCION

Desde la promulgación de la Ley 19525 sobre Aguas Lluvias en 1998 los problemas generados por la escorrentía urbana han vuelto a tomar importancia en Chile (Arresse, 1998). Existe hoy en día una gran desafío para la ingeniería nacional, cual es el de generar en los próximos años las soluciones a los problemas de aguas lluvias producidos y acumulados durante décadas de inactividad en este tema. Esta inactividad se refiere no sólo a la falta de soluciones específicas, sino también a la escasez de antecedentes concretos sobre las características de diseño de las soluciones, la calidad de las aguas lluvias que se generan y de parámetros para la modelación de aspectos relacionados con las aguas lluvias en las urbanizaciones típicas de Chile. En este artículo se presentan antecedentes preliminares sobre propiedades de los escurrimientos, tanto de cantidad como de calidad en una cuenca urbana de Valdivia, que puede considerarse similar a muchas de las típicas urbanizaciones realizadas en las últimas décadas en varias de las ciudades chilenas de más de 50.000 habitantes.

Una vez solucionados los problemas de contaminación de los cauces generados por las aguas servidas urbanas, en muchos países ha quedado en evidencia que parte importante de los problemas de calidad en los ríos se deben a la llamada contaminación difusa, provocada por actividades agrícolas, mineras y principalmente urbanas en las grandes ciudades (U.S.EPA, 1990; Wu et al, 1998). Los aspectos de calidad de las aguas lluvias urbanas, y su efecto en la contaminación de los cauces es un tema que aparece cada vez más evidente que debe considerarse al momento de abordar las soluciones (Fernández et al, 1998; Fernández, 1998). Las aguas lluvias urbanas a menudo contienen cantidades significativas de metales, material particulado, sólidos disueltos, compuestos orgánicos e inorgánicos. Los metales producidos por el tráfico urbano no son fácilmente degradados por el ambiente, y constituyen un aporte importante a la contaminación. El depósito y acumulación de estos elementos en las zonas urbanas, que posteriormente son arrastrados por las aguas lluvias, son el resultado del tráfico, desechos de vehículos, filtraciones, degradación del pavimento y mantención de caminos, está bien demostrado en la literatura (Ball et al, 1991). Sin embargo, muchas de estos valores dependen de las características de las urbanizaciones, comportamiento cultural de los habitantes de las ciudades, políticas de mantención y limpieza y otros y otros aspectos que hacen difícil extrapolar directamente de unas ciudades a otras los valores registrados. En este artículo se recopilan antecedentes sobre aguas lluvias urbanas y se analizan con fines comparativos, de manera de visualizar la magnitud de este problema en ciudades de Chile.

2. METODOLOGÍA

Con el objeto de disponer de antecedentes empíricos sobre las características, tanto de cantidad como de calidad, de las aguas lluvias en zonas urbanas de Chile, se seleccionó una cuenca de condiciones típicas en la cual fuera posible medir las propiedades de las lluvias, los caudales y tomar muestras de los escurrimientos para efectuar análisis fisicoquímicos de ellos. Para asegurar que en un periodo de trabajos de terreno razonable se pudiera disponer de varias tormentas se seleccionó la ciudad de Valdivia, donde una precipitación media anual de 2300 mm y un promedio de 154 días de lluvia al año permiten asegurar una cantidad suficiente de eventos lluviosos.

2.1.- Descripción de la cuenca experimental

Se eligió como cuenca experimental un sector de la población Teniente Merino, al sur-oriente de la ciudad de Valdivia (Figura 1) de una superficie de 32,4 hectáreas. Esta cuenta con una red separada de colectores y sumideros que aseguran un buen drenaje de aguas lluvias, por lo cual no existen en el sector problemas de inundación, ni interferencia de aguas servidas. La cuenca se ubica en un sector residencial típico en poblaciones chilenas, con un alto porcentaje de áreas permeables de tierra y cubierta vegetal, lo que significa un aporte importante de sedimentos al escurrimiento, además de una gran capacidad de infiltración y retención superficial.



Figura 1.- Ubicación de las cuencas experimentales en la ciudad de Valdivia.

El sector está conformado en su mayoría por viviendas unifamiliares en terrenos de alrededor de 200 m², además de importantes superficies destinadas a plazas y terrenos eriazos. Las calles tienen pavimento de hormigón. Aunque existen muchos pasajes en mal estado y con poco tránsito, también hay algunas calles con flujo vehicular intenso. Las calles y terrenos públicos no se someten a ningún sistema de limpieza particular, como ocurre en calles más céntricas que son barridas o aspiradas. La figura 2 muestra una imagen aérea de la cuenca en estudio, en la que es posible apreciar las distintas superficies presentes, y en la Tabla 1 se indica la participación de cada una de estas en la cuenca, separando en la cuenca total la subcuenca norte de ella, donde también se midieron caudales. En la figura se han indicado los límites de la cuenca y la red de colectores de aguas lluvias existente.

Tabla 1.- Características de uso del suelo en la cuenca experimental.

Superficies	Subcuenca Norte		Cuenca total	
	Area (m ²)	%	Area (m ²)	%
Techos	61746	32,3	104116	31,9
Calles	45129	23,6	79518	24,2
Plazas y Areas Públicas	33129	17,3	52604	16,1
Patios	51372	26,8	90083	27,6
Total	191376	100,0	326321	100,0

2.2.- Programa de monitoreo

El programa de monitoreo incluyó la recopilación de antecedentes para poder confeccionar hietogramas de las lluvias e hidrogramas y polutogramas de las crecidas durante 6 episodios lluviosos.

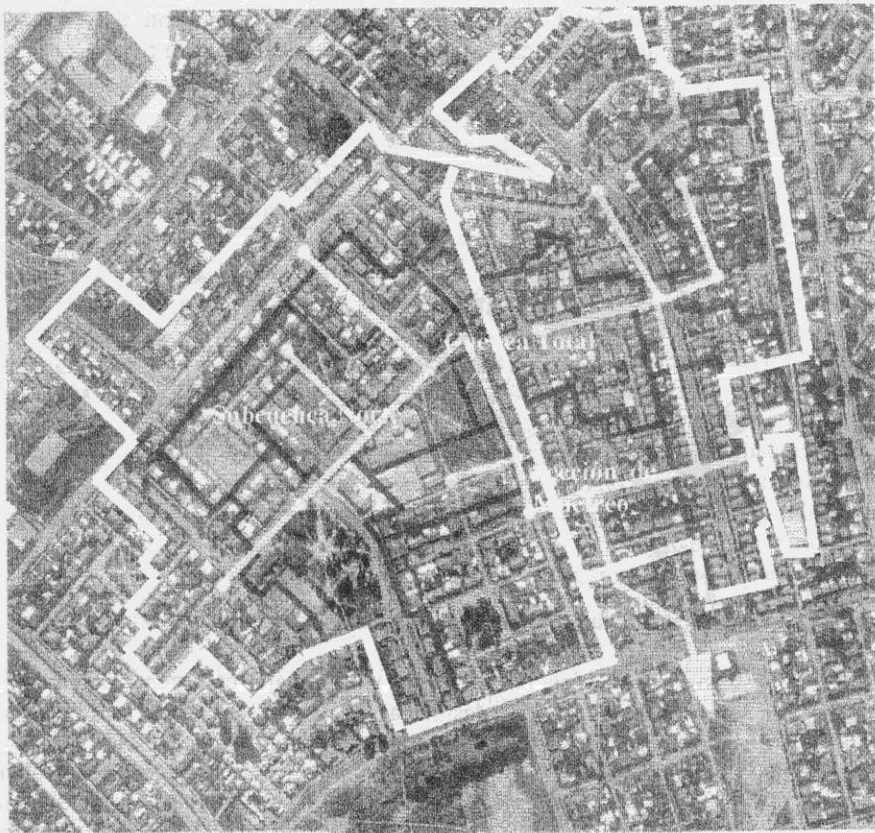


Figura 2.- Límites de las subcuencas y red de colectores de aguas lluvias de la cuenca experimental en la ciudad de Valdivia.

Los datos sobre lluvias se recogieron de una estación ubicada en la Universidad Austral, a 4,4 km de la cuenca, de la cual se pudo obtener información pluviométrica cada 15 minutos. Para caracterizar los hidrogramas se midieron caudales a intervalos de 30 y 60 minutos desde una cámara del sistema de colectores de aguas lluvias que definía la cuenca de estudio. El sentido del escurrimiento en las calles y las áreas aportantes a cada nodo del sistema se verificaron en terreno durante las lluvias. En el mismo lugar donde se midieron los hidrogramas también se recogieron muestras de agua a intervalos de 1 hora y posteriormente se analizaron, con lo que se obtuvieron polutogramas de concentración de Sólidos Suspendidos (SS), Sólidos Disueltos (SD), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO). Adicionalmente se midieron concentraciones medias por tormenta para otros 16 parámetros, a partir de una muestra

compuesta para cada tormenta. Además, con el objeto de disponer de antecedentes de calidad en sectores de mayor actividad urbana, se obtuvieron estos mismos polutogramas de concentración tomados directamente de la cuneta de las calles en un sector céntrico de la ciudad.

La sección de control consiste en un tubo de 0,80 m de diámetro, inmediatamente a la salida de una cámara donde se instaló el equipo y a la cual llegan los aportes de dos colectores y de dos sumideros. En esta cámara se pudo obtener adicionalmente el hidrograma de uno de los colectores aportantes que define la subcuenca norte dentro de la cuenca total.

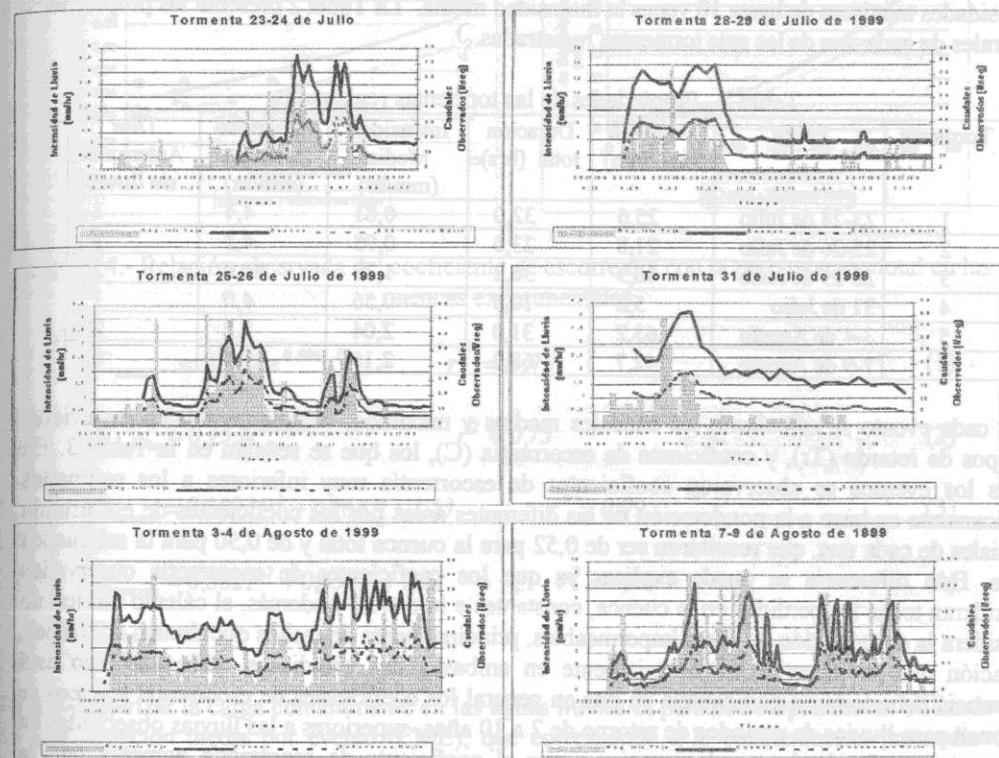


Figura 3.- Hietogramas de lluvias e hidrogramas de las crecidas de aguas lluvias urbanas registrados durante seis tormentas en la ciudad de Valdivia.

Para tomar las muestras y medir las alturas de agua en la sección control se utilizó un muestreador automático ISCO 6700 instalado dentro de la cámara, operando según un programa de muestreo preestablecido para registrar alturas de escurrimiento y extraer muestras, con las cuales se obtuvo los hidrogramas y polutogramas.

El programa de medición y muestreo era variable, pero en general se obtuvo una medición de altura cada media hora. Adicionalmente se registró el volumen escurrido acumulado, lo que permitió interpolar los hidrogramas con datos cada 15 minutos. Los resultados obtenidos son los que se muestran en la figura 3 que incluyen los hietogramas de las lluvias, y los hidrogramas obtenidos en la cuenca total y en la subcuenca Norte.

3. RESULTADOS

3.1.- Aspectos hidrológicos

Se obtuvieron mediciones de escurrimientos en la red de 6 lluvias ocurridas durante los últimos días de julio y los primeros de agosto del año 1999. En general, las lluvias observadas fueron de larga duración y con magnitudes totales que variaron entre los 5,2 mm y los 142,7 mm, siendo todas ellas relativamente habituales en la ciudad ya que ninguna resultó de periodo de retorno mayor a 1 año. La variación de intensidades durante los eventos fue importante, registrándose intensidades máximas de hasta 10 veces la intensidad media. La Tabla 2 presenta las propiedades generales de cada una de las seis tormentas registradas.

Tabla 2.- Propiedades de las tormentas registradas

Tormenta	Fecha	Magnitud total (mm)	Duración total (hrs)	Intensidad Media (mm/hr)	Intensidad Máxima (mm/hr)	Días Anteriores sin lluvia
1	23-24 de Julio	25,6	32,0	0,81	4,4	1
2	25-26 de Julio	21,8	23,0	0,95	4,2	1
3	28-29 de Julio	46,3	36,2	1,28	14,0	2
4	31 de Julio	5,2	10,5	0,56	4,0	1
5	3-4 de Agosto	63,2	31,0	2,04	7,2	2
6	7-9 de Agosto	142,7	68,2	2,15	9,4	3

Para cada evento se calcularon los caudales medios y máximos, volúmenes totales escurridos, tiempos de retardo (Tr), y coeficiente de escorrentía (C), los que se señalan en la Tabla 3. En todos los eventos se observaron coeficientes de escorrentía muy inferiores a los estimados teóricamente en base a la ponderación de las diferentes áreas por los coeficientes de escorrentía parciales de cada una, que resultaron ser de 0,52 para la cuenca total y de 0,50 para la subcuenca norte. Esta diferencia se puede explicar ya que los coeficientes de escorrentía observados consideran todas las pérdidas en la cuenca, constantes e iniciales, y además, el cálculo teórico no considera la desconexión de áreas impermeables, principalmente de techos que drenan a jardines, situación que se presenta mayoritariamente en ambas zonas estudiadas. Sin embargo esta diferencia debe tomarse con cautela ya que en general los coeficientes de escorrentía teóricos se suponen para lluvias de periodos de retorno de 2 a 10 años, superiores a las lluvias observadas en este estudio. De hecho puede apreciarse que el coeficiente de escorrentía aumenta con la precipitación en ambas cuencas como se aprecia en la Figura 4.

Tabla 3.- Propiedades de las crecidas observadas.

Fecha	Cuenca					Subcuenca Norte				
	Volumen Escurrido (m3)	Tiempo retardo (hr)	Caudal Medio (l/s)	Caudal Máx. (l/s)	C	Volumen Escurrido (m3)	Tiempo retardo (hr)	Caudal Medio (l/s)	Caudal Máx. (l/s)	C
23-24 Julio	1895	11,35	34,8	75,8	0,23	861	11,01	15,6	36,3	0,18
25-26 Julio	1433	5,64	27,7	70,0	0,20	810	4,53	14,7	37,4	0,19
28-29 Julio	2861	2,08	44,3	87,5	0,19	1373	1,92	27,1	42,3	0,15
31 Julio	381	4,38	22,7	45,5	0,22	170	4,18	9,6	20,8	0,17
3-4 Agosto	4695	4,04	48,5	81,9	0,23	2201	3,95	22,4	39,4	0,18
7-9 Agosto	18591	1,97	94,7	224,4	0,40	9134	1,62	46,2	113,5	0,33

La figura 4 presenta la relación observada entre coeficiente de escorrentía y precipitación, y la relación entre precipitación efectiva (R, en mm) y precipitación total. Junto con esto se señalan las expresiones encontradas para el coeficiente de escorrentía en ambas cuencas como función de la precipitación total en milímetros, P, y la de precipitación efectiva con precipitación total, expresiones (1) (2) (3) y (4), respectivamente.

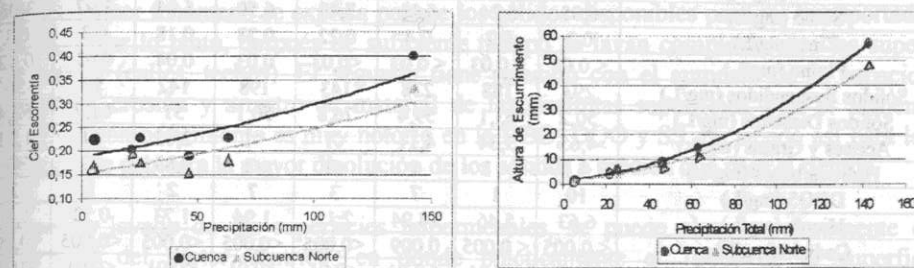


Figura 4.- Relación observada del coeficiente de escorrentía con la precipitación total en las cuencas experimentales.

$$C_{cuenca} = 0,187 e^{0,0047 P} ; \quad r^2 = 0,75 \quad (1)$$

$$C_{scorte} = 0,153 e^{0,0048 P} ; \quad r^2 = 0,75 \quad (2)$$

$$R_{cuenca} = 0,0023 P^2 + 0,064 P + 1,53 ; \quad r^2 = 0,99 \quad (3)$$

$$R_{scorte} = 0,002 P^2 + 0,038 P + 1,52 ; \quad r^2 = 0,99 \quad (4)$$

3.2.- Contaminación

Para caracterizar la carga contaminante en las aguas lluvias el parámetro típicamente utilizado es la concentración media por evento (CME), que corresponde a la concentración promedio del contaminante en el agua escurrida durante una lluvia. Prácticamente todos los contaminantes medidos en diversos estudios presentan enormes variabilidades, ya sea entre distintos sitios o entre diferentes lluvias. Si bien se puede suponer diferencias en las CME según el uso del suelo (residencial, industrial, comercial, etc), diversos estudios concluyen que generalmente la variabilidad de la CME no explicada puede ser mucho mayor que la explicada por el uso del suelo. Esto quiere decir que no hay diferencias estadísticamente significativas para los distintos tipos de superficies o ubicación geográfica. (EPA, 1983). En la Tabla 4 se muestran las observaciones de concentraciones medias de distintos parámetros de calidad, para las 6 lluvias antes señaladas. Los promedios de las CME observadas para las superficies residencial y comercial, se muestran en la tabla 5. Además, se señalan valores de referencia obtenidos de distintas fuentes bibliográficas. La investigación más exhaustiva en el tema, que abarcó 67 lugares en las ciudades más importantes de Estados Unidos, fue el estudio "Nationwide Urban Runoff Pollution", (U.S. EPA, 1983).

Tabla 4.-Concentración Media por Evento Observada en la Ciudad de Valdivia

Lugar	Concentración Media por Evento (CME)							
	Población Teniente Merino						Sector Céntrico	
	Tor. 1	Tor. 2	Tor. 3	Tor. 4	Tor. 5	Tor. 6	Tor. 5	Tor. 6
Parámetro								
pH	6,9	6,8	6,8	7,0	7,0	6,9	7	7
DQO (mg/L)	36	8	37	21	30	24	15	10
Sulfato (mg/L)	< 2	< 2	< 2	10,8	< 2	2,9	3	2
Cobre (mg/L)	0,02	0,02	0,04	0,44	0,04	0,02	0,04	0,01
Sodio (mg/L)	6,05	6,24	5,11	7,45	6,50	5,04	3,97	3,03
Zinc (mg/L)	0,2	0,2	0,4	0,22	0,23	0,18	0,3	0,1
Plomo (mg/L)	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,03	0,04	0,03	0,02
Sólidos Suspendidos (mg/L)	293	188	238	143	198	142	55	56
Sólidos Disueltos (mg/L)	50,2	63,1	59,4	76,8	50,1	51	61,7	52,4
Aceites y Grasas (mg/L)	4,65	3,34	4,11	< 1	< 1	2,02	< 1	1,71
Hidrocarburos (mg/L)	< 1	< 1	4	< 1	< 1	0,83	< 1	< 1
DBO5 (mg/L)	10	1	7	3	7	2	1	2
Hierro (mg/L)	6,63	5,46	14,94	2,11	1,94	1,73	0,53	1,10
Cadmio (mg/L)	< 0,005	< 0,005	0,009	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Cromo (mg/L)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Fósforo (mgPO ₄ /L)	0,66	0,37	0,94	0,88	0,51	0,27	0,16	0,17
Niquel (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Mercurio (mg/L)	< 0,001	< 0,001	0,089	0,004	0,006	< 0,001	0,004	< 0,001
Nitrógeno Amoniacal (mgNH ₃ /L)	0,12	0,11	< 0,05	0,38	0,66	0,4	0,35	0,23
Sulfuros (mg/L)	< 0,5	1,8	< 0,5	0,77	0,76	0,6	1,0	0,5

Tabla 5.- Valores Promedio de CME Observados y de Referencia.

Concentración Media por Evento (CME)	Valdivia Sector Poblacional, Colectores de Aguas Lluvias	Valdivia Sector Comercial, Calle	Valores Promedio de CME en la Literatura (varias fuentes)
PH	6,9	7	7
DQO (mg/L)	27,50	12,15	73-92
Sulfato (mg/L)	3,11	2,73	20
Cobre (mg/L)	0,099	0,025	0,038-0,048
Sodio (mg/L)	6,32	3,50	
Zinc (mg/L)	0,254	0,185	0,179-0,226
Plomo (mg/L)	< 0,030	< 0,030	0,161-0,204
Sólidos Suspendidos (mg/L)	203,55	55,17	141-224
Sólidos Disueltos (mg/L)	60,43	57,02	144
Aceites y Grasas (mg/L)	2,62	1,10	0-110
Hidrocarburos (mg/L)	1,17	< 1	
DBO ₅ (mg/L)	6,40	1,52	10-13
Hierro (mg/L)	5,56	0,81	1,99
Cadmio (mg/L)	< 0,005	< 0,005	0,015
Cromo (mg/L)	< 0,010	< 0,010	0,0072
Fósforo (mgPO ₄ /L)	0,62	0,16	0,37-0,47
Niquel (mg/L)	< 0,010	< 0,010	0,009-0,091
Mercurio (mg/L)	0,017	0,002	0,00017
Nitrógeno Amoniacal (mgNH ₃ /L)	0,30	0,29	0,32
Sulfuros (mg/L)	0,77	0,77	

Las mediciones permitieron además obtener el comportamiento de la concentración de los contaminantes principales en el escurrimiento durante el transcurso de la tormenta. En las Figuras 5 a 9 se muestran los hidrogramas y polutogramas de concentración de la DBO, DQO, Sólidos Suspendidos y Sólidos Disueltos, observados en las muestras tomadas en la población Teniente Merino en 3 episodios lluviosos, y en el sector céntrico de la ciudad para los últimos 2 eventos, respectivamente. En general se puede observar la superposición de dos efectos, uno es el decrecimiento de la concentración en el tiempo, y el aumento de esta con el incremento del caudal. El primer fenómeno se explica porque los sólidos disponibles para ser transportados son limitados, y por lo tanto, después de suficiente tiempo se lavan completamente las superficies impermeables (calles, techos). El segundo tiene relación con el aumento de la capacidad de resuspensión, erosión y arrastre de material de las distintas superficies, con el aumento del caudal. Este comportamiento es muy notorio en la DBO, DQO y SS, no siendo así para los SD, probablemente debido a la mayor disolución de los sólidos a medida que pasa el tiempo.

El efecto de lavado de las superficies impermeables, se puede observar claramente en los polutogramas del sector céntrico, en donde prácticamente el 100% de la superficie es impermeable. El efecto de erosión y aumento de transporte sólido con el aumento de caudal, es más notorio en los polutogramas de la cuenca Teniente Merino, debido a la gran proporción de superficies permeables sin protección de suelos erosionables.

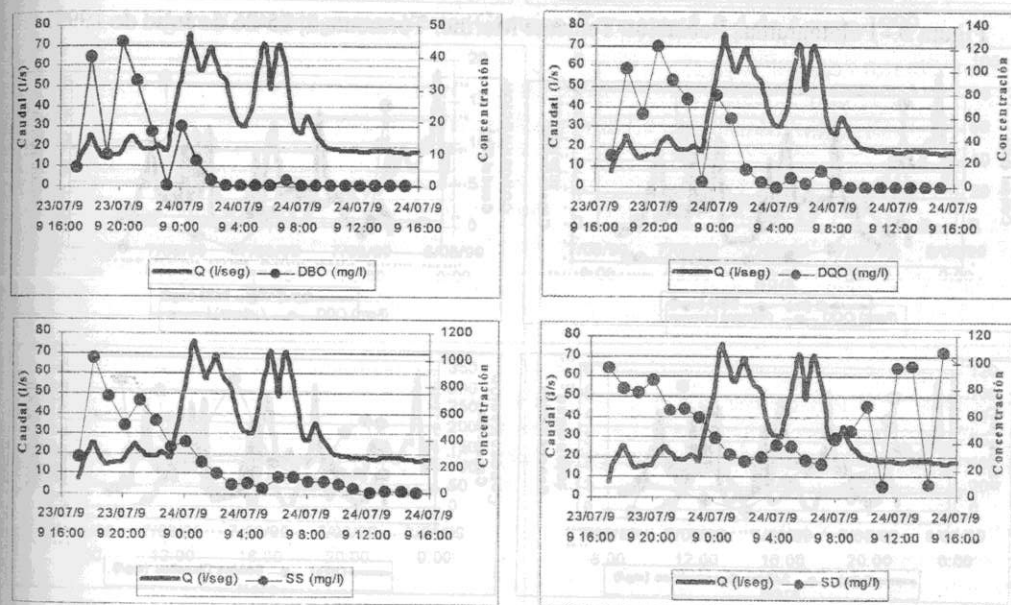


Figura 5.-Polutogramas Población Teniente Merino. Tormenta 1, 23-24 de julio 1999.

Figura 9.-Polutogramas Sector Céntrico. Tormenta 6, 7-8 de Agosto 1999.

Por los polutogramas de concentraciones de contaminantes, y los hidrogramas de caudales, se determinó la curva de masa arrastrada acumulada en el tiempo. La posición de las curvas en relación a la curva de volumen escurrido, es un indicador del comportamiento del

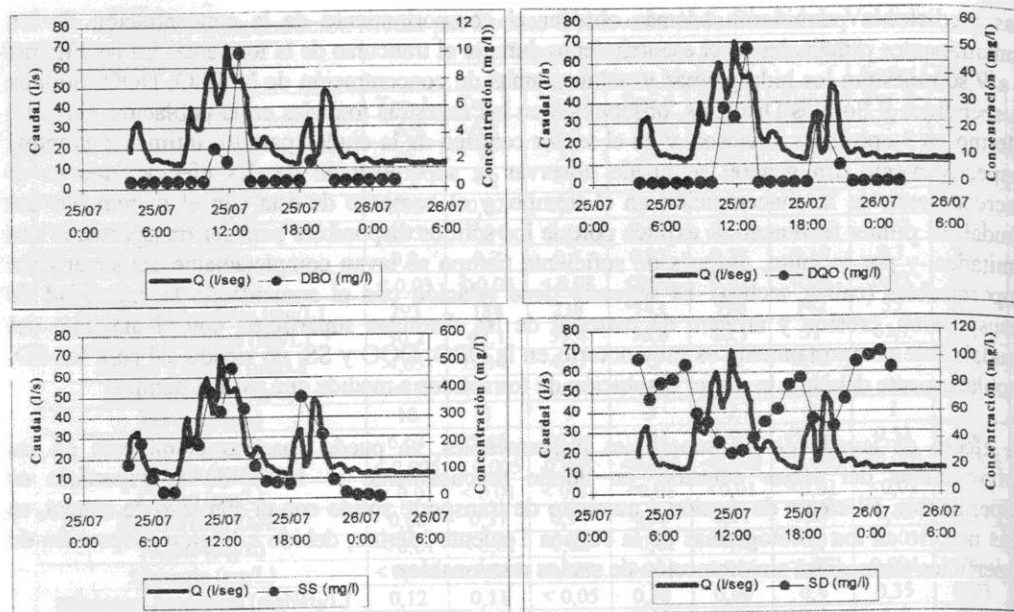


Figura 6.- Polutogramas Población Teniente Merino. Tormenta 2, 25-26 de Julio de 1999.

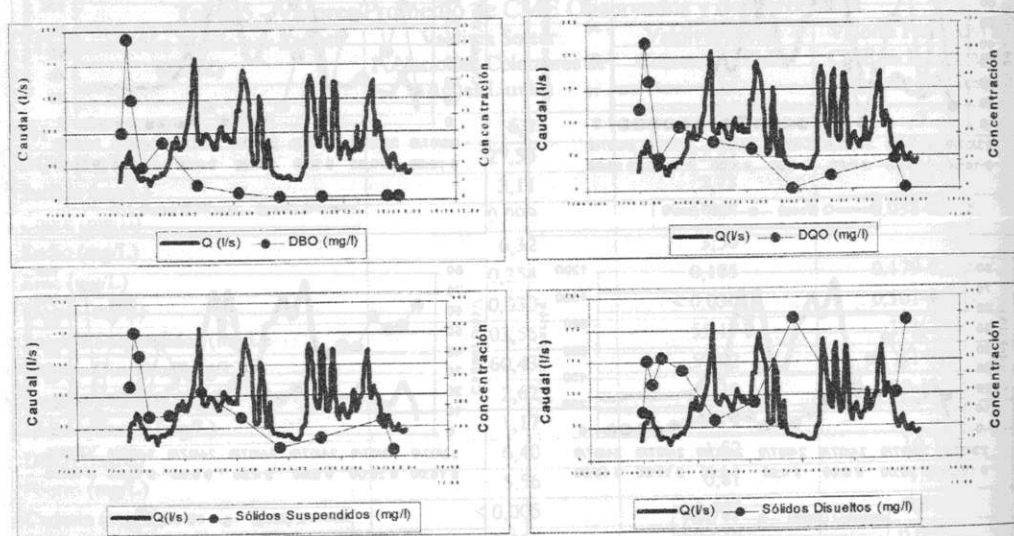


Figura 7.- Polutogramas Población Teniente Merino. Tormenta 6, 7-8 de Agosto 1999.

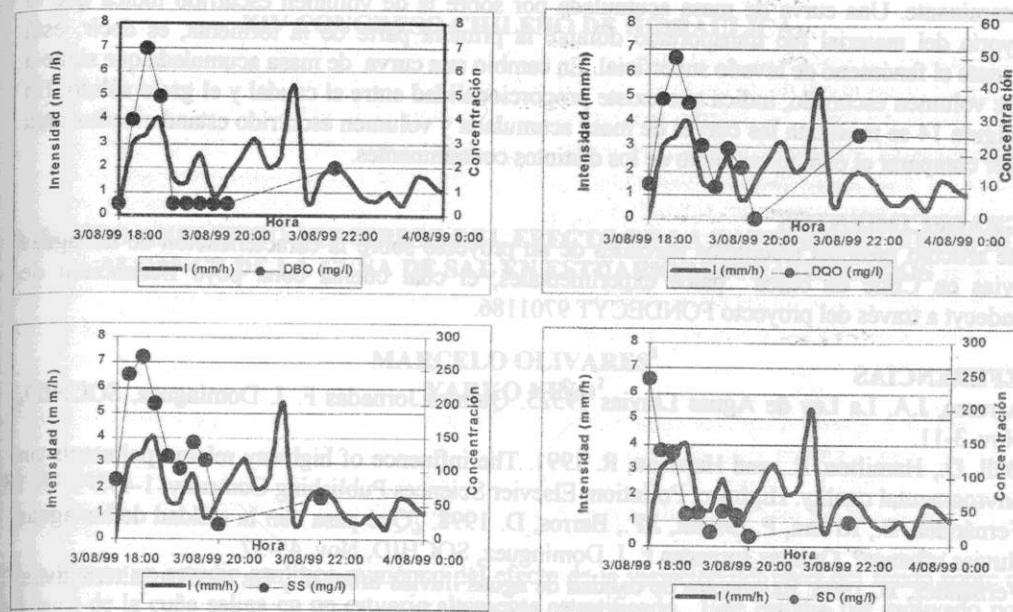


Figura 8.- Polutogramas Sector Céntrico. Tormenta 5, 3-4 de Agosto 1999.

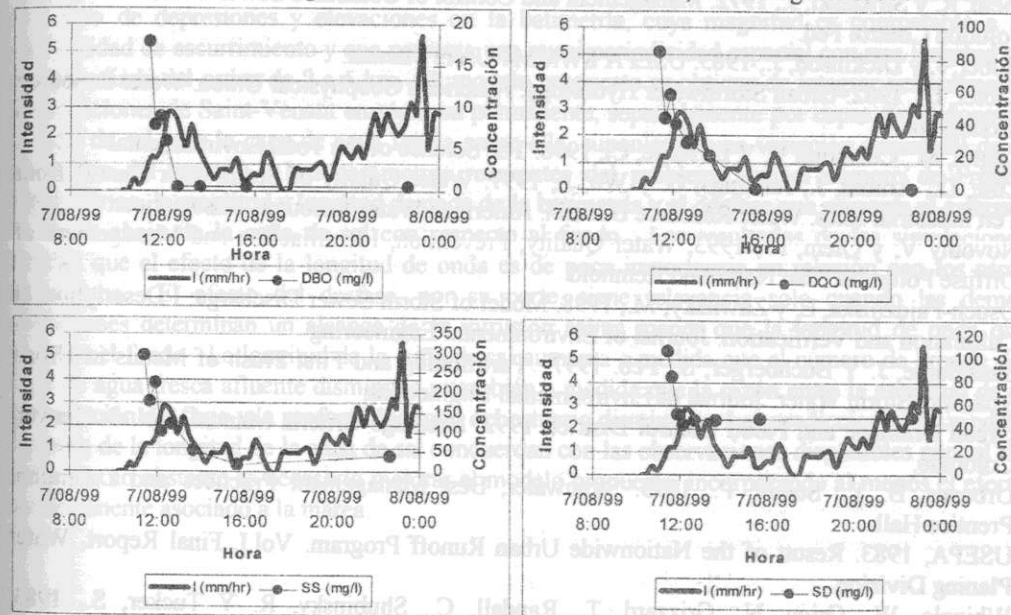


Figura 9.- Polutogramas Sector Céntrico. Tormenta 6, 7-8 de Agosto 1999.

A partir de los polutogramas de concentraciones de contaminantes, y los hidrogramas de escurrimientos, se determinó la curva de masa arrastrada acumulada en el tiempo. La posición de estas curvas en relación a la curva de volumen escurrido, es un indicador del comportamiento del

contaminante. Una curva de masa acumulada por sobre la de volumen escurrido indica que la mayoría del material fue transportado durante la primera parte de la tormenta, es decir, está presente el fenómeno de lavado superficial. En cambio una curva de masa acumulada que sigue a la de volumen escurrido, indica que existe proporcionalidad entre el caudal y el gasto sólido. En la Figura 14 se muestran las curvas de masa acumulada y volumen escurrido estandarizados para poder comparar el comportamiento de los distintos contaminantes.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo presenta resultados parciales de un proyecto sobre la caracterización de las aguas lluvias en Chile en base a datos experimentales, el cual cuenta con el apoyo financiero de Fondecyt a través del proyecto FONDECYT 9701186.

REFERENCIAS

- Arresse, J.A. La Ley de Aguas Lluvias 19525. Quintas Jornadas F. J. Domínguez, SOCHID, Nov. 3-11.
- Ball, D., Hamilton, R., and Harrison, R. 1991. The influence of highway related pollutants on environmental quality. Highway Pollution, Elsevier Sciences Publishing Company, 1-47.
- Fernández, B., Rivera, P., Montt, J.P., Barros, D. 1998. ¿Qué pasa con la calidad de las aguas lluvias urbanas?. Quintas Jornadas F. J. Domínguez, SOCHID, Nov. 45-57.
- Fernández, B. 1998. Exigencias de calidad de aguas lluvias urbanas y las técnicas alternativas. Quintas Jornadas F. J. Domínguez, SOCHID, Nov. 35-43.
- Field, R. y Struzeski, J., 1972. Management and Control of Combined Sewer Overflow. J. Water Pollution Control Fed.
- Huber, J. y Dickinson, J., 1983. USEPA SWMM4 Users Manual.
- Kibler, D., 1982. Urban Stormwater Hydrology. American Geophysical Union. Water Resource Monograph
- Legret, M., Colandini V. Y Le Marc, C., 1996. The Science of the Total Environmental
- Line, D., Arnold, J., Jennings, G. y Wu, J., 1997. Water Quality of Stormwater Runoff from Ten Industrial Sites. Water Resource Bulletin. American Water Resource Association.
- Novotny V. y Olem, H., 1993, Water Quality: Prevention, Identification and Management of Diffuse Pollution. Van Nostrand Reinhold
- Osuch-Pajdzinska, E. y Zawilsky, M., 1998. Model of Storm Sewer Discharge: I Description; II Calibration and Verification. Journal of Environmental Engineering
- Sansalome, J. Y Buchberger, S., Feb. 1997. Partitioning and First Flush of Metals in Urban Roadway Storm Water. Journal of Environmental Engineering
- Urban Drainage and Flood Control District, 1992. Drainage Criteria Manual, Vol. 3. Denver, Colorado.
- Urbonas, B. Y Stahre, P., 1993. Stormwater, Best Management Practices and Detention. Prentice Hall.
- USEPA, 1983. Result of the Nationwide Urban Runoff Program. Vol.I. Final Report, Water Planning Division.
- Whipple, W., Grigg, N., Grizzard, T., Randall, C., Shubinsky, R. Y Tucker, S., 1983. Stormwater Management in Urbanizing Areas. Prentice Hall.
- Wu, J. Allan, C. Saunders, W. y Evett, J., 1998. Characterization and Pollutant Loading Estimation for Highway Runoff. Journal of Environmental Engineering.

XIV CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

ESTUDIO ANALITICO-NUMERICO DEL EFECTO DE LA BATIMETRIA SOBRE EL ALCANCE DE LA CUÑA DE SAL EN ESTUARIOS ESTRATIFICADOS

MARCELO OLIVARES¹

YARKO NIÑO²

RESUMEN

Se presenta un estudio analítico-numérico del efecto de la variación del nivel del fondo sobre el alcance de la cuña salina en un estuario altamente estratificado. Este estudio fue motivado por los resultados de un estudio de campo realizado en el estuario del río Valdivia, que muestran la presencia de depresiones y elevaciones en la batimetría, cuya magnitud es comparable a la profundidad de escurrimiento y que presenta una cuasi-periodicidad espacial con una longitud de onda asociada del orden de 2 a 5 km. El modelo propuesto se obtiene de integrar verticalmente las ecuaciones de Saint-Venant en régimen permanente, separadamente por capas, en la zona de la cuña de sal y en la capa de agua fresca sobre ella, suponiendo una variación sinusoidal de la batimetría del estuario. Los parámetros relevantes del problema son el número de Froude densimétrico, la amplitud y longitud de onda de la batimetría y el desfase que presenta el extremo de aguas abajo de la cuña de sal con respecto al fondo. Los resultados de las simulaciones indican que el efecto de la longitud de onda es de poca importancia en relación con los otros parámetros. El efecto del desfase, por su parte, tiene relevancia sólo cuando las demás condiciones determinan un alcance de la intrusión salina menor que la longitud de onda que describe el fondo. La longitud de la cuña de sal aumenta a medida que el número de Froude del flujo de agua fresca afluente disminuye y también a medida que la razón entre la amplitud de la deformación del flujo y la profundidad total del estuario disminuye. Las predicciones del modelo respecto de la longitud de la cuña de sal concuerdan con las observaciones disponibles para el río Valdivia, no obstante es necesario mejorar el modelo propuesto, incorporando al menos el efecto impermanente asociado a la marea.

$$(1 - \frac{q_1}{\Phi g h_1}) \frac{dh_1}{dx} + c_f \frac{q_1}{\Phi g h_1^2 h_2} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{dh_1}{dx} + \frac{dh_2}{dx} + \frac{dh_3}{dx} = (1 - \Phi) c_f \frac{q_1^2}{h_1^3} \quad (4)$$

¹ Ayudante de Investigación, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile
² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile