

# **SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA**

## **XIX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA**

### **SIMULACIÓN CONTINUA DE LLUVIAS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE DRENAJE URBANO**

**ROMINA ARANDA M.<sup>1</sup>  
BONIFACIO FERNÁNDEZ L.<sup>2</sup>**

#### **RESUMEN**

Se presenta, compara y analiza un método basado en la simulación continua para el diseño de Sistemas de Drenaje Urbano de aguas lluvia. Tradicionalmente estos sistemas se dimensionan considerando tormentas de diseño de periodo de retorno determinado para enfrentar un riesgo de falla aceptable las que representan eventos aislados que reproducen algunas de las características de las lluvias observadas y se obtienen con diferentes procedimientos basados en un resumen de las propiedades de las lluvias en el lugar, que habitualmente se presentan como relaciones IDF. La simulación continua utiliza un registro completo y amplio de precipitaciones detalladas para estimar la respuesta de la cuenca y generar a su vez un registro continuo de variables de diseño de interés. Esta metodología se aplica en cuencas urbanas de las ciudades de Chillán y Santiago, para obtener funciones de distribución de los parámetros asociados a la escorrentía (volúmenes de escorrentía, pérdidas y caudales máximos). Se han comparado estas funciones con las estimadas a partir del uso tormentas de diseño, verificando que estas últimas reproducen de manera confiable condiciones de caudales máximos de eventos menos frecuentes, pero no reproduce en buena forma la distribución de volúmenes, concluyendo que no son representativas para dimensionar elementos que favorezcan la retención o la infiltración. Finalmente se analiza la curva de frecuencia de los caudales máximos y volúmenes de escorrentía obtenida por la simulación continua para evaluar los efectos de elementos de retención y control en la cuenca.

---

<sup>1</sup>Ing. Civil, Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas. Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Departamento Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile - mail: [romina.aranda@mop.gov.cl](mailto:romina.aranda@mop.gov.cl)

<sup>2</sup>Profesor Titular, Departamento Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile - mail: [bfernand@ing.puc.cl](mailto:bfernand@ing.puc.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

En un enfoque tradicional las soluciones que se proponen para los problemas de drenaje urbano se enfocan a disminuir los caudales máximos, dimensionando elementos de transporte, y considerando como beneficio económico los daños evitados por inundaciones (Urbonas, 2001). Sin embargo se han ignorado las mejoras en calidad, disminución del impacto hidrológico hacia la cuenca receptora y otros que se pueden lograr controlando los volúmenes de escorrentía. En la segunda mitad del siglo XX muchas ciudades de gran desarrollo reconocieron la necesidad de controlar el volumen, los caudales máximos y la contaminación en la fuente, minimizando el cambio hidrológico y las externalidades negativas del proceso de urbanización sobre la hidrología. Para ello se desarrollaron nuevos enfoque conocidos en EE.UU. como BMP, Best Management Practices (Urbonas, 1993), que en Chile se conocen como Técnicas Alternativas, (MINVU, 1996) y que consisten en la captura de un volumen para el tratamiento en el mismo lugar en que se generan las aguas lluvias, para lo cual se recurre a la aplicación de técnicas y obras que permiten y facilitan la retención, la infiltración y el almacenamiento.

Hoy en día en el diseño de los sistemas de drenaje urbano se considera un conjunto complejo de elementos que captan, retienen, almacenan, infiltran, conducen y disponen de las aguas lluvias sobre una cuenca urbanizada, conocidas con el nombre genérico de LID (Low Impact Development). Las urbanizaciones en general no disponen de registros de las variables de interés para el diseño de los elementos que lo componen, por lo que se recurre a estimaciones en base a modelos precipitación-escorrentía, que simulan las variables asociadas a la escorrentía mediante una caracterización adecuada de la precipitación. El procedimiento de simulación habitualmente utilizado es el basado en eventos como las tormentas de diseño, en conjunto con un modelo lluvia-escorrentía en el cual se supone que la frecuencia con que aparecen parámetros vinculados a la escorrentía, es la misma que la de la tormenta que los provoca. Sin embargo muchos análisis reconocen que esta aproximación tiene limitaciones, entre otros, el supuesto que la tormenta de diseño y los valores de las variables generadas tienen el mismo periodo de retorno, no se sostiene (Bradley, 1996), fundamentalmente por la falta de linealidad entre la respuesta de la cuenca y la precipitación, sobre todo en el caso de tormentas menores. La necesaria linealidad entre excitación y respuesta de estos métodos puede ser válida para los caudales en tormentas muy poco frecuentes, en las cuales se puede asumir que todos los almacenamientos se encuentran saturados. Esto hace que estas metodologías no entreguen condiciones de diseño para otras variables no directamente relacionadas con el sistema de transporte, como las retenciones, infiltración, almacenamiento y muchas vinculadas con calidad de las aguas lluvias necesarias para el diseño de elementos BMP. También como las condiciones de diseño mínimas para la red de transporte del sistema de drenaje se realizan para tormentas de poca frecuencia, usualmente de dos a diez años, nada se puede deducir sobre el comportamiento de la cuenca para tormentas frecuentes, con menos de dos años de periodo de retorno, que son las que mayor aporte hacen a los volúmenes anuales.

Una alternativa al uso de las tradicionales tormentas de diseño es la simulación continua, que supera muchas de las desventajas e inconvenientes de los métodos que utilizan eventos de diseño y que permite considerar por igual, condiciones para cualquier frecuencia. El propósito de este trabajo es explorar la aplicabilidad a ciudades chilenas, de la simulación continua, utilizando como información base un registro continuo de lluvias en el tiempo, la que actúa como variable de excitación de un modelo de simulación continua, el que producirá un registro, también

continuo, de respuestas en el tiempo en una cuenca de interés. Estas series temporales de variables de respuesta permitirán estimar una relación entre los valores de diseño que reflejan el comportamiento de la cuenca asociado a un periodo de retorno. que se utilizará como procedimiento para evaluar el riesgo y el dimensionamiento de sistemas de drenaje urbano. A partir de ello será posible comparar y verificar diferencias, analizar las desventajas, vacíos e incertidumbres del procedimiento y analizar las restricciones de los métodos basados en las lluvias de diseño.

## **2. METODOLOGÍA**

Se propone comparar y analizar los resultados de procedimientos de diseño de sistemas de drenaje urbano, como son el método de tormentas de diseño o simulación por eventos y el método de simulación continua en base a su aplicación a cuencas reales. Los métodos que se comparan están basados en la transformación de datos de lluvia en escorrentía para lo cual se utiliza el modelo EPA SWMM 5.0 (Storm Water Management Model) de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA), en su versión 2005, que permite representar de manera razonablemente precisa las condiciones urbanas y es ampliamente empleado en el diseño de sistemas de drenaje urbano. Los procedimientos de diseño mencionados se basan en la simulación del comportamiento de las cuencas urbanas frente a lluvias de interés, por lo tanto el registro y caracterización de las precipitaciones es extremadamente importante.

### **2.1. Caracterización de las lluvias**

La tormenta de diseño se puede definir como un evento o episodio de lluvia de periodo de retorno  $T$ , con una duración  $D$  y una precipitación total  $P$ , o intensidad media  $I$ , que representa una situación para la cual el sistema diseñado opera correctamente, mientras para situaciones peores, normalmente menos frecuentes, el sistema podría fallar o no operar correctamente. A partir de las curvas IDF, que son un método utilizado para resumir y caracterizar la información de los registros de lluvias y que permiten relacionar la intensidad media o la precipitación de la lluvia para varias duraciones y periodos de retorno o frecuencias, se pueden definir tormentas de diseño para distintos periodos de retorno y duraciones, caracterizadas cada una de ellas por su intensidad máxima y volumen. Este evento supone que la intensidad es uniforme durante  $D$ , dada por  $I=P/D$ . Sin embargo en eventos reales la intensidad cambia durante el evento, manteniendo el promedio. Debido a que para un mismo periodo de retorno la intensidad media disminuye con la duración de la tormenta, el evento de diseño debe seleccionarse para una duración lo menor posible compatible con el tamaño de la cuenca. Esto conduce a proponer para la duración el tiempo de concentración de la cuenca aportante. Desgraciadamente la estimación del tiempo de concentración en una cuenca es muy poco precisa y no se dispone de métodos confiables para ello. Además eso conduce a que el evento seleccionado sea válido sólo para esa cuenca y resulta difícil aplicarla a situaciones complejas.

Un registro histórico de precipitación puede llegar a ser una serie de tiempo suficientemente extensa dependiendo de los años y los intervalos en que se registran los episodios en que llueve y no llueve. A primera vista esta información resulta inmanejable, sin embargo con el uso de algunas definiciones es posible dividir este registro en eventos discretos de modo de caracterizar los eventos de lluvia de la serie continua de datos y conocer las propiedades de cada tormenta.

Una forma de caracterizar las tormentas es a través de la definición del tiempo mínimo entre eventos (IETD), que fija el número mínimo de horas entre el final de un evento y el comienzo de otro. La importancia de esta definición, es que la serie extensa de datos de lluvia y no lluvia, se discretiza en eventos de tormentas de los cuales se puede identificar una serie reducida de las propiedades de interés de cada tormenta como la intensidad máxima, volumen y duración. A las series de intensidad máxima, volumen y duración de las tormentas se les puede realizar un análisis de frecuencia para ajustarles en cada caso un modelo de función de probabilidades, considerando una distribución empírica en que la probabilidad de excedencia y el periodo de retorno de cada valor de la serie se calcula de acuerdo a las expresiones (1) y (2) respectivamente.

$$P = \frac{n}{(N+1)} \cdot \frac{1}{f} \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{P} \quad (2)$$

Donde  $P$ : Probabilidad de excedencia;  $n$ : Número de orden del evento;  $N$ : Número total de eventos;  $f$ : Numero de eventos promedio anuales; y  $T$ : Periodo de retorno (años). Es de importancia señalar que el término  $f$  en la ecuación que calcula la probabilidad de excedencia tiene relación con asociar esa probabilidad a la frecuencia anual ( $f$ ) en que ocurre cada variable, y que está dada por la razón entre el número de eventos que se obtienen de la discretización del registro continuo a partir del IETD y los años del registro. Además, es posible realizar un ajuste de la serie de valores a una función de distribución de probabilidad (fdp) en términos del periodo de retorno. De manera similar al análisis de frecuencia realizado, se estima la probabilidad de que cada valor de la serie siga una función de distribución conocida, idealmente con más de un parámetro, y el periodo de retorno ( $T$ ) se estima de acuerdo a la expresión (3):

$$T = \frac{1}{f \cdot (1 - F(x))} \quad (3)$$

Donde  $F(x)$ : Función de distribución acumulada de cada valor; y  $f$ : Numero de eventos promedio anuales. Si bien las curvas de frecuencia de las fdp empíricas pueden ser limitadas en cuanto a su alcance para los periodos de retorno mayores a los años de registro, es posible extrapolarlas y estimar la magnitud de las variables de eventos menos frecuentes.

## 2.2. Transformación lluvia escorrentía

El modelo SWMM 5.0 EPA, es un modelo numérico desarrollado principalmente para el estudio, diseño y análisis de sistemas de drenaje urbano complejos, que puede simular la cantidad y también la calidad de la escorrentía en cuencas urbanas. Originalmente permitía la simulación de la escorrentía a partir de tormentas de diseño y en su versión 5.0 se modificó para realizar simulación continua e incluir un módulo para analizar estadísticamente los múltiples datos de salida de los hidrogramas. En las primeras versiones de SWMM se simulaba las respuestas del sistema de drenaje en base a tormentas de diseño y estimaba las pérdidas del sistema basado en alguno métodos de infiltración (Horton, Green-Ampt, Curva Número), sin tomar en cuenta las condiciones de humedad del suelo previo al evento suponiendo que todos los almacenamientos del sistema están saturados. Su última actualización permite realizar simulación continua a partir de eventos de lluvia provenientes de registros de precipitación histórica, donde un aspecto

importante que se considera dentro de la modelación, es la variación temporal de la humedad del suelo durante y entre los eventos de tormentas. Para ello el modelo simula las respuestas en los periodos con lluvias y en los periodos sin lluvias, en que para estos últimos interesa la recuperación de la capacidad de infiltración del suelo entre tormentas, que devuelve las condiciones de almacenamiento naturales de la cuenca, basados en las modificaciones realizadas por Huber y Dickinson (1988) a la ecuación de infiltración de Horton que es la más utilizada en los modelos de simulación continua para estimar la capacidad de recuperación del suelo entre eventos de tormentas (Nnadi, 1999).

### **2.3. Concepto de Volumen de Captura en la Modelación**

Si el problema de las aguas lluvias en zonas urbanas se enfrenta exclusivamente mediante el transporte y la evacuación de las aguas, no es posible conseguir el tratamiento en el lugar, ya sea almacenando o infiltrando como proponen las BMP. Además como demostraron Wong y Somes (1997), el uso de elementos de regulación de crecidas en cuencas urbanizadas, puede disminuir los caudales máximos generados por tormentas de periodos de retorno entre 1 y 100 años, y además permitiría modificar la curva de frecuencia de esta variable hacia las condiciones previas al desarrollo de la cuenca. Como respuesta a dicho estudio, Maxted y Shaver (1997) señalaron que desde el punto de vista de la calidad del agua, los elementos de regulación diseñados por Wong y Somes no necesariamente mejoraban la calidad o reducían los impactos sobre la vida acuática de los cauces receptores aguas abajo de las urbanizaciones, debido a que las tormentas menores o más frecuentes, que son las que arrastran el mayor volumen de contaminantes en el largo plazo, no serían tratadas o controladas con estos elementos si ellos se dimensionan solo para las tormentas menos frecuentes. Efectivamente, Roesner (2001) planteó que las estructuras utilizadas en el estudio de Wong y Somes, estaban dimensionadas para eventos aislados y que su diseño no consideraba control sobre las tormentas menores a 2 años de periodo de retorno. Posteriormente Roesner (2004) realizó un estudio donde compara los efectos sobre estas tormentas al utilizar un elemento de retención de crecidas y una BMP para comprobar que el primero, de mayores dimensiones solo tiende a disminuir el tramo de la curva de frecuencia para aquellas tormentas menos frecuentes y que las BMP tienen un control sobre todo el espectro de frecuencias de las tormentas. Por lo tanto es necesario considerar ambas situaciones para los elementos de retención. Desde el punto de vista del control de la calidad se recomienda que las BMP detengan un volumen denominado Volumen de Captura (Urbanas, 1990), con el objetivo de captar una proporción de los volúmenes de tormentas para los eventos menos frecuentes, o la totalidad del volumen de las tormentas más frecuentes que son las que aportan en gran cantidad al volumen escurrido anual de las cuencas.

### **Precipitación Base**

El concepto de precipitación base está ligado a la idea de volumen de captura, el cual se origina a partir de las acciones que se han desarrollado en el último tiempo para enfrentar el problema de calidad de las aguas lluvias y colaborar en otros aspectos del drenaje de las aguas lluvias mediante las denominadas BMP o Técnicas Alternativas, que recomiendan utilizar como criterio general la disposición local, ya sea infiltrando o almacenando las aguas lluvias en el lugar que se originan para lograr el tratamiento y evacuarlas después de terminada la tormenta (UDFCD, 1999). Esto se puede lograr disponiendo de los elementos necesarios para retener un volumen determinado de cada tormenta, denominado Volumen de Captura (VC) que permita minimizar los

impactos negativos de la calidad de las aguas lluvias y contribuir en parte a minimizar impactos de cantidad. Para dimensionar el del volumen de captura ( $m^3$ ) se propone calcularlo como el producto de la precipitación base (mm), por el área impermeable ( $m^2$ ) de acuerdo a la siguiente expresión:

$$VC=0.001 \times Pbase \times Aimp \quad (4)$$

Para la estimación de la Precipitación Base se considera el comportamiento de las precipitaciones en la zona, esencialmente la cantidad promedio de tormentas de un determinado tamaño en un año y la cantidad de agua que generan como escurrimiento una vez que precipitan sobre la zona urbana.

Para esta investigación es importante que el modelo de simulación de la cuenca considere de manera explícita los elementos de regulación y en particular el volumen de captura como un elemento importante de diseño. Para ello, se analizan dos maneras distintas en que se puede incorporar al modelo SWMM 5.0 la idea de volumen de captura con el objetivo de analizar la respuesta del sistema frente al uso de algún elemento u obra que pueda controlar las crecidas y disminuir el volumen escurrido, no solo de eventos extremos, sino también de las tormentas más frecuentes. Una opción es considerar el Volumen de Captura en altura de detención, para lo cual se puede aprovechar que al definir una subcuenca, SWMM 5.0 subdivide el área impermeable como: (1) área impermeable sin detención que corresponde al área de techos y superficies impermeables con pendiente importante, y (2) área impermeable con detención, que equivale a pavimentos y superficies impermeables con poca pendiente capaz de almacenar y donde se requiere una altura de agua para que genere escurrimiento. Así, uno de los parámetros que caracteriza una subcuenca en el modelo es la altura de detención y se define como la altura de agua máxima sobre la superficie impermeable que queda detenida, la que debe ser llenada para que se genere un flujo hacia aguas abajo. Desde el punto de vista del sistema de drenaje, se puede asumir que este procedimiento representa el caso en que el volumen de captura fuera almacenado e infiltrado, ya que posteriormente no es descargado hacia aguas abajo de la red de drenaje. Debido a esto la incorporación de la precipitación base como altura de detención en el modelo, podría considerarse como una técnica de BMP en que una de sus principales funciones es conducir el volumen que genera una tormenta sobre techos y superficies con grandes pendientes hacia depresiones donde es posible la infiltración para su tratamiento (Strecker, 2001), sin que haya una descarga hacia aguas abajo en la red de drenaje.

Otra opción es considerar el Volumen de Captura en Elementos de Control, aprovechando que en los últimos años se ha introducido el uso de elementos de detención y/o regulación en el área urbana, como una alternativa favorable para disminuir los caudales máximos y lograr también la detención de volúmenes de tormentas frecuentes, con criterios de diseño para este tipo de elementos que se enfocan, no sólo en controlar los caudales y la escorrentía que producen los eventos más extremos, sino también los más pequeños para tener un control efectivo sobre la calidad. Con el fin de introducir de la manera más óptima estos elementos en el sistema, se pueden incorporar varios estanques de detención en la red de drenaje en que cada uno de ellos controla la escorrentía superficial que genera el área impermeable y permeable proveniente de una o más subcuencas. El volumen del estanque corresponde al volumen de captura determinado para dichas subcuencas. El vaciamiento se realizará a través de un orificio lateral en el fondo del

estanque para las tormentas más pequeñas y las tormentas mayores las descargará por un vertedero lateral ubicado en el umbral del elemento.

Finalmente, se modelarán 3 situaciones: a) **Situación Actual:** Cuenca Urbanizada, donde el volumen que escurre corresponde al de las superficies impermeables y al que no es infiltrado en las superficies permeables. No cuenta con elementos especiales de regulación ni para el tratamiento del volumen de captura; b) **Situación con Elementos de Retención:** Cuenca Urbanizada con elementos de retención (altura de detención) sobre las superficies impermeables de las subcuencas. El volumen que escurre es el de las superficies permeables que no es infiltrado y el que no es retenido en las superficies impermeables; y c) **Situación con Elementos de Control:** Cuenca Urbanizada con elementos de control a la salida de una o más subcuencas. El volumen que escurre es el de las superficies permeables que no es infiltrado y el de las superficies impermeables. Sin embargo este volumen de escorrentía puede ser controlado en un estanque si es menor que la capacidad del elemento; si la supera, la diferencia corresponde a una proporción del volumen que no tiene control.

## 2.4. Serie de Crecidas y sus Propiedades

Una vez que se dispone de las características de las lluvias, ya sean tormentas de diseño con diferentes propiedades o una serie continua de precipitaciones, se procede a la simulación mediante SWMM 5.0 para obtener caudales máximos y los volúmenes de escorrentía asociados a las crecidas, como las variables principales para el diseño de elementos de transporte, y elementos de retención y almacenamiento respectivamente. En el método por simulación continua, la aplicación de la serie continua de lluvias genera como respuesta del sistema una serie también continua de eventos de crecidas en que cada evento está caracterizado por un caudal máximo y volumen de escorrentía. Las series de cada una de estas propiedades se analizan en términos de su comportamiento probabilístico de manera similar al análisis realizado a las propiedades de la serie continua de lluvias. Por otra parte del método de tormentas de diseño para periodos de retorno predefinidos, se obtienen hidrogramas de crecidas caracterizados por las variables de análisis y donde se supone que el periodo de retorno es el mismo que el de la tormenta que las provoca. Con el conjunto de tormentas simuladas para cada método se obtendrá una serie con un conjunto de igual tamaño de variables asociadas a las crecidas: caudal máximo y volumen de escorrentía.

Finalmente se comparan los resultados de caudales máximos y volumen de escorrentía obtenidos por las distintas metodologías, en términos del periodo de retorno, para analizar y comparar las respuestas del sistema ante estos procedimientos de modo de analizar todo el espectro de frecuencias para las tres situaciones antes descritas.

## 3. APLICACIÓN Y RESULTADOS

### Caracterización de Lluvias

La metodología es aplicada en cuencas con distinto desarrollo urbano en las ciudades de Chillán y Santiago, las que presentan diferentes propiedades de la serie de precipitaciones, y para las cuales se cuenta con información de sus características físicas como topografía, infraestructura, uso de suelo y propiedades hidrológicas de cada una de ellas. Se dispone de un registro de 9 años

con datos continuos de precipitaciones cada 15 minutos para el periodo enero 1998 a diciembre 2006 en la ciudad de Chillán. Por otra parte se dispone de un registro de 44 años con datos continuos de precipitaciones cada 10 minutos para el periodo enero 1917 a diciembre 1960 en la Estación Quinta Normal en la ciudad de Santiago. La precipitación media anual de los registros es de 1.116,1 mm y 305,6 mm para Chillán y Santiago respectivamente. El agrupar los registros a un nivel diario permite determinar que en promedio en la ciudad de Chillán llueve 128 días al año y en Santiago 34 días.

Para el análisis estadístico del registro histórico de precipitación se discretiza la serie continua para distinguir eventos de tormentas consecutivas e independientes a través de la definición del tiempo mínimo entre tormentas (IETD). Zegpi (2008), determinó para el registro de lluvias de la ciudad de Chillán y Santiago, que el tiempo mínimo entre tormentas IETD es de 18 y 30 horas respectivamente. Se identificaron 666 eventos de tormentas para Chillán y 860 eventos para Santiago, y cada evento se caracterizó por la duración, volumen de lluvia e intensidad máxima. En el registro de tormentas continuas se constató que muchas de ellas tienen una duración mayor a un día, por lo tanto un evento de tormenta puede contener varios días de lluvia. Se estimó que el promedio anual de eventos de tormentas en un año es de 74 para Chillán y 20 en Santiago. En la Tabla 1 se puede apreciar la relación entre el número de eventos que precipita en un determinado rango. Las características de cada tormenta pueden verse como una serie de valores en el tiempo y sus principales estadígrafos se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 1: Número de tormentas promedio anuales en Chillán y Santiago**

Precipitación por evento (mm)	Tormentas promedio en el año	
	Chillán	Santiago
<b>Menos de 2 mm</b>	<b>37.6</b>	<b>4.3</b>
<b>Entre 2 y 10 mm</b>	<b>13.0</b>	<b>6.3</b>
Entre 10 y 20	7.6	4.4
Entre 20 y 30 mm	3.7	2.0
Entre 30 y 50 mm	5.9	1.3
Entre 50 y 80 mm	3.2	0.7
Entre 80 y 100 mm	1.0	0.2
Más de 100 mm	2.1	0.3
<b>TOTAL</b>	<b>74</b>	<b>20</b>

Las tormentas de diseño se obtuvieron a partir de las curvas IDF calculadas a partir del mismo registro de lluvias de la ciudad de Chillán y Santiago disponible para la simulación continua. Para la elaboración de las tormentas de diseño se han escogido duraciones de 6, 8, 12 y 24 horas para periodos de retorno de 1, 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años, lo que permite definir 24 tormentas de diseño para Chillán y Santiago. Los hietogramas de las tormentas de diseño se han construido con la metodología de bloques alternos con intervalos cada 15 minutos. Los volúmenes de lluvia e intensidades máximas para cada tormenta de diseño se presentan en la Tabla 3. El volumen de lluvia de cada tormenta de diseño y la intensidad máxima según el periodo de retorno indicado en la Tabla 3, se han graficado junto al volumen e intensidad de lluvia respectivamente, obtenidos del análisis de frecuencia de la serie continua de ambas características ajustada a una distribución Gamma 2, como se muestra en las Figuras 1 y 2.

**Tabla 2:** Principales estadígrafos del registro de tormentas en Chillán y Santiago

	Chillán (1998 a 2006)			Santiago (1917 a 1960)		
	Duración (hr)	Volumen (mm)	Intensidad (mm/hr)	Duración (hr)	Volumen (mm)	Intensidad (mm/hr)
Promedio	17.7	15.3	5.3	18.2	15.5	6.0
Máximo	311.5	333.4	47.5	286.7	210.6	38.4
Mínimo	0.2	0.1	0.5	0.2	0.1	0.6
Desv. Estándar	28.9	32.5	7.1	24.0	22.0	4.7
Asimetría	3.9	4.4	2.2	3.6	3.6	2.0

**Tabla 3:** Intensidad máx. y volumen de lluvia de las Tormentas de Diseño de Chillán y Santiago

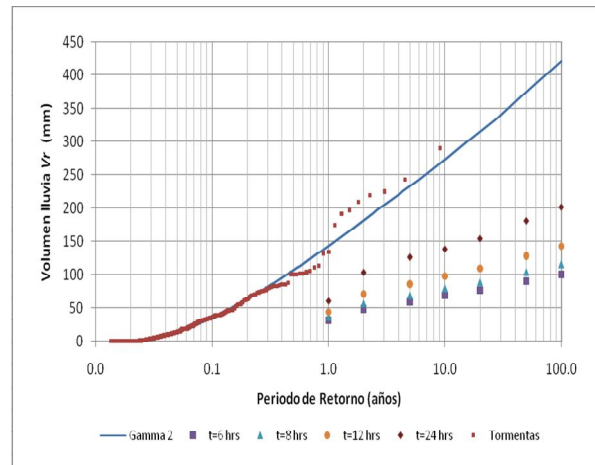
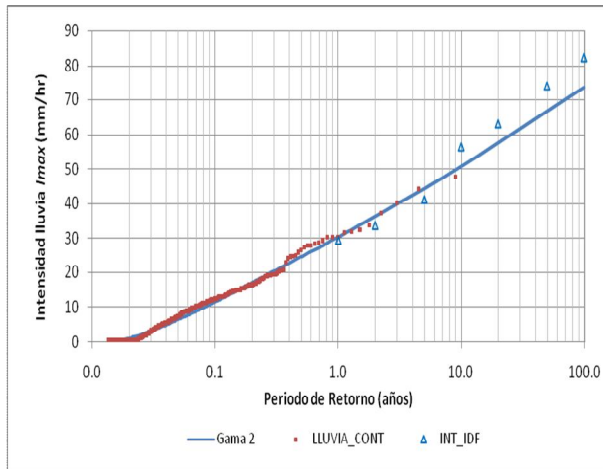
T (años)	Volumen de lluvia del evento (mm)									
	Chillán					Santiago				
	Imáx (mm/hr)	t = 6 hrs	t = 8 hrs	t = 12 hrs	t = 24 hrs	Imáx (mm/hr)	t = 6 hrs	t = 8 hrs	t = 12 hrs	t = 24 hrs
1	29.5	31.8	36.3	43.8	60.2	12.7	18.2	21.4	26.7	39.1
2	33.8	48.5	56.8	71.0	104.0	18.4	26.4	30.9	38.6	56.6
5	41.1	59.0	69.1	86.4	126.5	21.7	31.2	36.5	45.6	66.8
10	56.6	69.3	80.0	98.0	138.5	28.3	34.6	40.0	49.0	69.2
20	63.2	77.3	89.3	109.4	154.7	32.6	39.9	46.1	56.4	79.7
50	74.1	90.7	104.7	128.2	181.4	38.2	46.8	54.1	66.2	93.6
100	82.3	100.8	116.4	142.6	201.6	42.5	52.1	60.1	73.6	104.1

### Caracterización de las cuencas

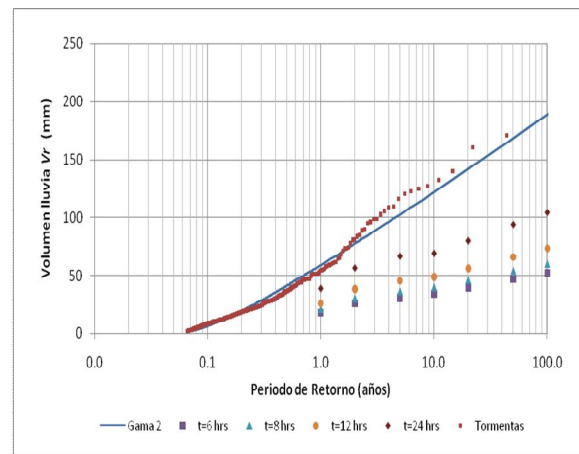
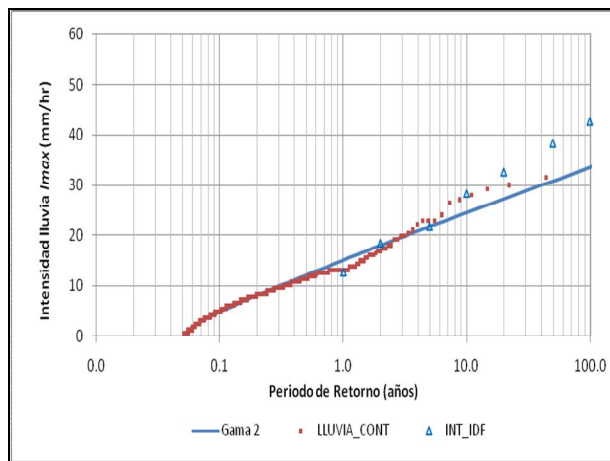
Se modelaron en SWMM 5.0, 4 cuencas en Chillán denominadas 11, 12, 16 y 17 pertenecientes al Sistema Canal de La Luz, definido en el Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias de la ciudad de Chillán (MOP, 2003). Para Santiago, se utilizó el trabajo realizado por González (2008) en la comuna de La Reina del cual se escogió una cuenca urbana totalmente consolidada de 13,7 há. En la Tabla 4 se entrega un resumen de las propiedades más importantes que caracterizan a cada cuenca.

### Volumen de Captura en Altura de Detención

Para considerar los efectos sobre el diseño de los elementos que componen el sistema de drenaje al incorporar de esta manera un volumen de captura se simuló los resultados de los volúmenes escurridos y caudales máximos en las 5 cuencas en estudio, utilizando los mismos datos con que se modelaron las cuencas inicialmente y solo se efectuaron tres modificaciones. La primera fue cambiar el porcentaje de área impermeable sin almacenamiento de la Tabla 4 para Chillán y Santiago, por su diferencia porcentual, con la idea de que la escorrentía que generan las lluvias sobre las superficies con mayores pendientes se retenga en la altura de detención. La segunda es cambiar las alturas de detención de esas superficies a 15 mm y 10 mm para Chillán y Santiago respectivamente, donde ambos valores corresponden a la precipitación base de esas ciudades estimadas en el Estudio Diseño de Elementos Urbanos de Aguas Lluvias, MINVU (2008) de acuerdo a lo indicado. Finalmente incorporar a SWMM 5.0 un registro continuo diario de evaporación en el módulo de Climatología, con tasas de evaporación en mm/día. El registro continuo se elaboró con un valor constante pero exagerado de esta tasa en mm/día, cada vez que ha finalizado un evento de tormenta para recuperar la capacidad de almacenamiento. En Chillán se adoptó un valor de 20 mm/día y en Santiago de 15 mm/día.



**Figura 1:** Serie Continua y tormentas de diseño. Comparación de I máx. y vol. de lluvia en Chillán.



**Figura 2:** Serie Continua y tormentas de diseño. Comparación de I máx. y vol. de lluvia en Santiago.

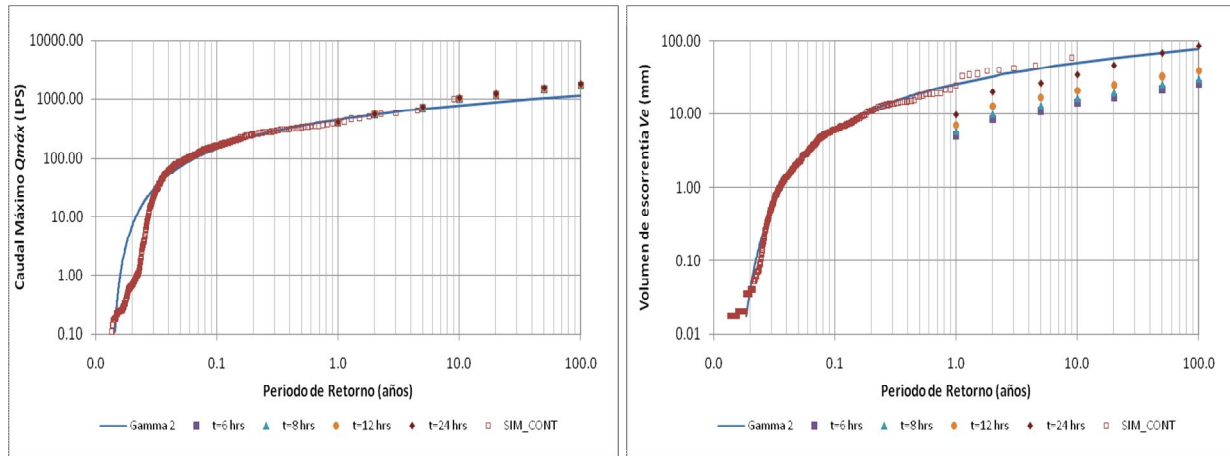
**Tabla 4:** Propiedades principales de las cuencas de Chillán y La Reina

	11	12	16	17	La Reina
Área de la cuenca (Ha)	55.3	54.5	54.1	119.1	13.7
Porcentaje de área impermeable (%)	35.1	45.8	62.3	53.1	75.2
Pendiente (m/m)	0.009	0.0024	0.0073	0.0062	0.0058
Altura de almac. en área imp. (mm)	2.7	2.4	2.2	2.4	4
Altura de almac. en área perm. (mm)	12	12	10.3	10.64	12
Área imp. sin almacenamiento (%)	42.5	53.9	59.5	47.7	42.5

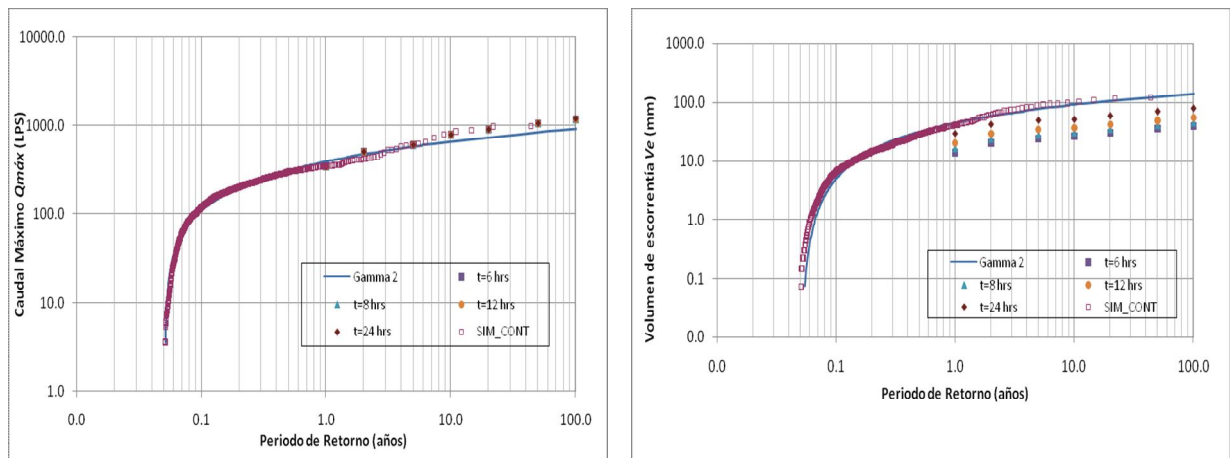
### Volumen de Captura en Elementos de Control

Se dispusieron varios estanques aguas abajo de una o más subcuencas. El volumen de cada estanque corresponde al VC definido con la ecuación (4) propuesta, para las precipitaciones base de 15 y 10 mm para Chillán y Santiago respectivamente. Las áreas impermeables y su porcentaje de superficie con detención así como las alturas de detención se mantienen de la situación original. El dimensionamiento de los estanques se desarrolló con la propuesta del Manual de Drenaje Urbano de la ciudad de Denver (UDFCD, 1999) para una altura máxima de 1.5 m. Se ubicó un orificio rectangular en el nivel inferior del estanque de 0.05 m de ancho y 0.05 m de alto dimensionado para un tiempo de vaciamiento de 24 horas. En el umbral de cada estanque se

dimensionó un vertedero lateral rectangular de 1 m de ancho y 0.30 m de altura. Las curvas de frecuencia para los caudales máximos y volúmenes de escorrentía obtenidos por la simulación continua y de la simulación por eventos para las cuencas en la situación actual se presentan las Figuras 3 y 4 para la cuenca 11 y La Reina respectivamente, situación similar ocurre en el resto de las cuencas. En un análisis de excedencias por año estas mismas variables se comparan con las generadas luego de incorporar en el modelo elementos de retención y de control del volumen de captura como muestran las Figuras 5 y 6 para las mismas cuencas.

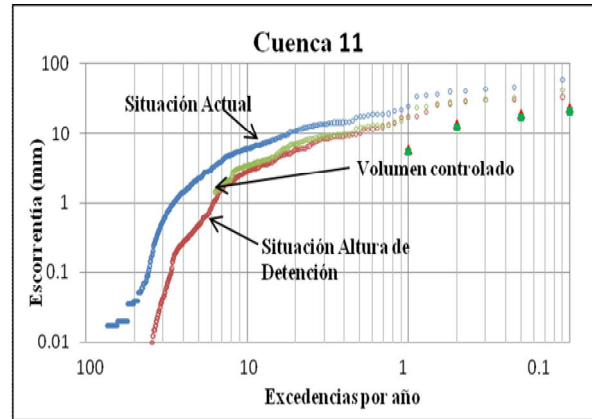
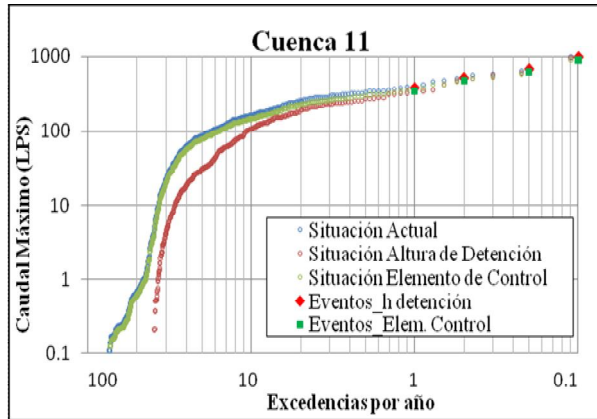


**Figura 3:** Análisis de frecuencia del caudal máximo y volumen de escorrentía para la situación actual en la Cuenca 11 en Chillán, considerando simulación continua y por eventos

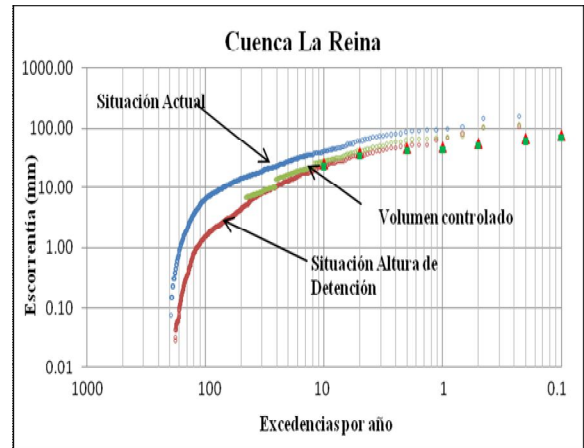
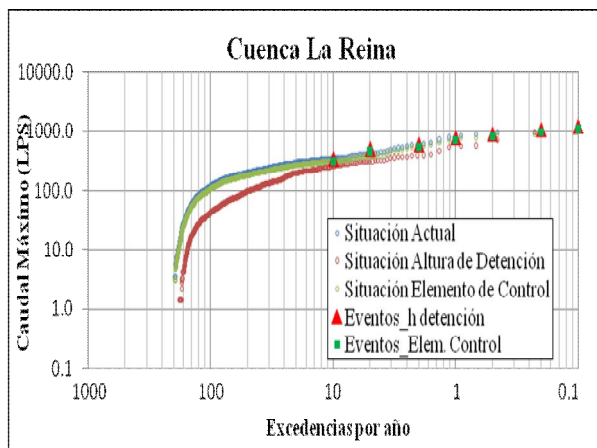


**Figura 4:** Análisis de frecuencia del caudal máximo y volumen de escorrentía para la situación actual en la Cuenca La Reina en Santiago, considerando simulación continua y por eventos

En las Tablas 5 y 6 se han cuantificado los resultados en términos de los volúmenes de escorrentía. Se indican los volúmenes de escorrentía, volúmenes retenidos, volúmenes controlados y volúmenes infiltrados (pérdidas) promedios anuales en los mismos rangos. En ellas se presenta el valor esperado de volumen de precipitación promedio anual, para un rango de lluvias, y para las tres situaciones modeladas a) Situación actual, b) Situación con elemento de retención y c) Situación con estanque de control, en la cuenca 11 en Chillán y un resumen del volumen total esperado anual promedio de las cuencas 12, 16, 17 y La Reina.



**Figura 5:** Comparación del análisis de frecuencia del caudal máximo y volumen de escorrentía para la situación actual y con elementos de control en la Cuenca 11 en Chillán



**Figura 6:** Comparación del análisis de frecuencia del caudal máximo y volumen de escorrentía para la situación actual y con elementos de control en la Cuenca La Reina en Santiago

**Tabla 5:** Volumen esperado promedio anual para la Cuenca 11 en Chillán

Lluvias (mm)	Vol. Lluvia	Sit. Actual		Sit. Altura de Retención			Situación Estanque de Detención			
		Vol esc.	Vol Infil.	Vol esc.	Vol Retenido	Vol Infil.	Vol esc.	Vol Infil.	Vol Controlado	Vol no controlado
< 2mm	12.37	1.95	10.45	<b>0.07</b>	4.46	7.84	<b>1.95</b>	10.45	<b>1.95</b>	0
2 a 10	71.02	11.6	60.9	<b>1.91</b>	23.41	45.69	<b>11.6</b>	60.9	<b>11.6</b>	0
10 a 20	108.34	17.92	90.4	4.69	35.82	67.83	17.92	90.4	15.04	2.89
20 a 30	93.38	15.57	75.37	6.07	30.77	56.55	15.57	75.37	8.76	6.81
30 a 50	221.97	38.07	183.92	18.1	65.89	137.99	38.07	183.92	16.15	21.91
50 a 80	210.63	36.75	173.84	20.38	59.82	130.43	36.75	173.84	13.06	23.69
80 a 100	65.44	14.41	69.69	8.36	4.8	52.28	14.41	69.69	4.84	9.57
> 100 mm	332.93	59.86	273.05	38.47	89.6	204.86	59.86	273.05	17.81	42.04
<b>TOTAL</b>	<b>1116.08</b>	<b>196.13</b>	<b>937.62</b>	<b>98.05</b>	<b>314.57</b>	<b>703.47</b>	<b>196.1</b>	<b>937.62</b>	<b>89.21</b>	<b>106.91</b>

**Tabla 6:** Resumen del volumen total esperado promedio anual para la Cuenca 12, 16, 17 en Chillán y La Reina en Santiago

	Lluvias (mm)	Vol. Lluvia	Sit. Actual		Sit. Altura de Retención			Situación Estanque de		Detención
			Vol esc.	Vol Infil.	Vol esc.	Retenido	Vol Infil.	Vol esc.	Vol Infil.	Vol Controlado
Cuenca 12	<b>1116.1</b>	<b>379.8</b>	735.3	<b>194.1</b>	355.7	566.3	379.8	735.3	<b>180.9</b>	198.9
Cuenca 16	<b>1116.1</b>	<b>734.2</b>	380.9	<b>368.8</b>	446.4	300.9	734.2	380.9	<b>375.5</b>	358.7
Cuenca 17	<b>1116.1</b>	<b>423.3</b>	691.8	<b>199.6</b>	384.1	532.4	423.23	691.8	<b>186.1</b>	237.2
La Reina	<b>303.2</b>	<b>228.4</b>	74.8	<b>98.9</b>	151.6	52.7	228.4	74.8	<b>127.8</b>	100.5

#### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Al comparar los resultados de caudal máximo en las Figuras 3 y 4, se observa que no existen mayores diferencias entre los Q determinados por las tormentas de diseño y por simulación continua en el rango de frecuencias mayores a 2 años. Esto confirma que para eventos poco frecuentes ( $T > 2$  años) existe una relación lineal entre la  $I_{m\acute{a}x}$  de una tormenta y el escurrimiento máximo que genera. Esta situación era predecible ya que como se aprecia en la Figura 2, las  $I_{m\acute{a}x}$  de la serie continua de tormentas y las que reproducen las tormentas de diseño son similares para los mismos periodos de retorno, pero no ocurre lo mismo con los volúmenes de lluvia, que tienen relación con el volumen escurrido, ya que para todas las duraciones de tormentas resultan inferiores a los observados en las series continuas para las mismas frecuencias. Por lo anterior, al incorporar BMP al sistema de drenaje que permitan recuperar las condiciones de drenaje de la cuenca, favoreciendo el almacenamiento, la infiltración y el tratamiento de las aguas lluvias, su diseño no se puede abordar considerando como metodología la simulación de eventos de diseño. En cambio la simulación continua reproduce todas las variables, caudales máximos, volúmenes escurridos, volúmenes de pérdidas, entre otros, para un amplio rango de frecuencias de tormentas.

Se observa en la Figura 5 y 6, que la incorporación del VC tiene un efecto importante en las crecidas más frecuentes pero menor en las extraordinarias, si bien se logra un efecto importante sobre el volumen escurrido no están concebidas para minimizar o influir de manera destacada en el control de inundaciones extraordinarias. Se aprecia la efectividad en la disminución de los volúmenes de escorrentía en el caso de los elementos de retención y la curva de los volúmenes controlados de un estanque de detención para el control del VC, que se refleja para esta última situación, en el desplazamiento del inicio de las curvas con respecto de la frecuencia anual. La curva de frecuencia de los  $Q_{m\acute{a}x}$  se desplaza hacia abajo con respecto a la de la situación actual para las cuencas con elementos de retención, debido a que parte de la lluvia de un evento es retenida en estos elementos y no es descargada hacia aguas abajo lo que explica el menor flujo, algo diferente ocurre con el elemento de control en que la atenuación del flujo es muy leve ya que los pequeños orificios en el fondo de los estanques permiten que evacúe las aguas lluvias sin poder regular el peak, para ello requiere un volumen de control de crecida adicional al volumen de captura sobre el elemento para el control de los  $Q_{m\acute{a}x}$ . En las Tablas 5 y 6 se cuantifican las situaciones en términos de los volúmenes esperados para diferentes rangos de precipitación donde se aprecia claramente que se logra capturar (mediante retención o control) el escurrimiento que producen las lluvias menores a 10 mm, lo que significaría de acuerdo a la Tabla 1 que se están controlando el 75% y el 50% de las tormentas que ocurren anualmente en Chillán y Santiago respectivamente.

Finalmente se concluye que las BMP dimensionadas para el volumen de captura permiten mejorar las condiciones de drenaje de la cuenca y disminuir los volúmenes escurridos, sin embargo su implementación requiere de políticas y lineamientos claros respecto de sus parámetros, metodologías y condiciones de diseño. La simulación continua es un método eficaz para el diseño de sistemas complejos de drenaje urbano y reproduce de manera confiable las condiciones habituales de drenaje, resultados posibles de extrapolar hacia condiciones extremas.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Dirección de Obras Hidráulicas del MOP el haber facilitado la información de las cuencas estudiadas en Chillán. Los registros de lluvias de la ciudad de Chillán utilizados fueron aportados por el Profesor José Luis Arumí de la U. de Concepción.

## REFERENCIAS

- Bradley, A., Cooper, P., Potter, K. & Price, T. (1996). Floodplain Mapping Using Continuous Hydrologic and Hydraulic Simulation Models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1 (2), 63-68.
- Huber, W.C. & Dickinson, R.E. (1988). Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual. U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia, USA.
- Maxted, J. & Shaver, E. (1997). Use of Retention Basins to Mitigate Stormwaters Impacts on Aquatic Life. *Effects of Watershed Development and Management on Aquatic Ecosystems Conference* (pp. 494-512).
- MINVU (1996). Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos. Guía de diseño. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Santiago, Chile.
- MINVU (2008). Diseño de Elementos Urbanos de Aguas Lluvias. Manual de Diseño. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Santiago, Chile.
- MOP (2007). Estudio de Factibilidad y Diseño Detallado del Mejoramiento del Canal de la luz en Chillán, VIII Región. Tomo I. Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile.
- Nnadi, F. & Wanielista M. P. (1999). Comparison of Design Storms Concepts Using Continuous Simulation with Short Duration Storm. *Journal of the American Water Resources Association*, 35, (1). 61-72.
- Roesner, L. A., Bledsoe, B. P. & Brashear, R. W. (2001). Are Best Management Practices Criteria Really Environmentally Friendly? *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(3), 150-154.
- Roesner, L. A. & Nehrke, S.M. (2004). Effects of design practice for flood control and BMP on the flow-frequency curve. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(2), 131-139.
- Strecker, E. W. (2001). Low Impact Development (LID) Is it Really Low or just Lower? *Linking Stormwater BMP Designs and Performance to Receiving Water Impact Mitigation Conference* (pp. 210-222). Colorado, USA.
- Urban Drainage and Flood Control District (UDFCD). (1999). Urban Stormwater Drainage Criteria Manual. (Vol. 1). Denver, Colorado.
- Urbonas, B. R., C. Y. Guo, & L. S. Tucker. (1990). Optimization of Stormwater Quality Capture Volume in Urban Stormwater Quality Enhancement. Conferencia ASCE. Suiza: New York, USA.
- Urbonas, B., & Starhre, P. (1993). Best Management Practices and Detention for Water Quality, Drainage and CSO Management. New Jersey, USA: Prentice Hall.
- Urbonas B. R. (2001). Assessing Receiving Water Effects of Urban Stormwater BMPs. *Linking Stormwater BMP Designs and Performance to Receiving Water Impact Mitigation Conference* (pp 426-437). Colorado, USA.
- Wong, T.H.F. & Somes, N.L.G. (1997). Designing Outlet Characteristic for Optimal Wetland Performance. *Water Science and Technology*, 36(8-9), 235-240.
- Zepi, M. (2008). Modelo Analítico para el Comportamiento Hidrológico de Cuencas Urbanas. Memoria para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Ingeniería Hidráulica. Pontificia Universidad Católica. Santiago, Chile.