

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA**  
**XVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERIA HIDRAULICA**

**INDICADORES DE IMPACTO DE LAS AGUAS LLUVIA URBANAS PARA  
COMPARAR SOLUCIONES DE DRENAJE URBANO**

**SOFÍA CARRASCO O.<sup>1</sup>**  
**BONIFACIO FERNANDEZ L.<sup>2</sup>**

**RESUMEN**

La selección y dimensionamiento de las obras de drenaje urbano se efectúan en base a una evaluación socio-económica de proyectos en la cual se estiman los costos y beneficios del sistema. Sin embargo, existen una gran cantidad de factores y consecuencias cuya evaluación económica resulta compleja y difícil incorporar en esta evaluación. Este artículo presenta los resultados de un trabajo de investigación centrado por una parte, en los efectos generados por las aguas lluvia urbanas, tanto a nivel de la cuenca como de la urbanización, así como en la utilización de indicadores de impacto que permitan cuantificar dichos efectos para orientar la selección de soluciones del drenaje urbano. Se identifican y analizan diferentes indicadores propuestos en la literatura, todos ellos destinados a cuantificar los impactos generados por las aguas lluvia en una cuenca, y de manera especial, sobre los cuerpos receptores del drenaje urbano.

La aplicación de los indicadores propuestos se llevó a cabo en un área residencial de aproximadamente 209 hectáreas, en la comuna de La Reina. La comparación de los resultados permite observar que los indicadores de impacto no sólo son útiles al momento de evaluar los programas de control y manejo de aguas lluvia, sino que además, sirven para orientar su diseño, así como la selección de soluciones en base a diferentes criterios y escenarios, permitiendo encontrar opciones distintas que incluso pueden incluir la combinación de diferentes tipos de obras.

---

<sup>1</sup> Ingeniera Civil de Industrias, Mención en Ingeniería Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile – mail: sacarras@uc.cl

<sup>2</sup> Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile – mail: bfernand@ing.puc.cl

## 1. INTRODUCCION

La calidad y las características de los recursos naturales hídricos de una cuenca se ven afectados por las actividades humanas propias de una urbanización. La generación de una mayor cantidad de zonas impermeables modifica el sistema natural de drenaje, disminuyendo de manera notable la tasa de infiltración de los suelos, así como la capacidad de recarga de los acuíferos, lo que produce un incremento en los volúmenes y velocidad de las escorrentías. Se modifica también, la frecuencia y el número de las inundaciones urbanas, y aparece una mayor cantidad de contaminantes que son arrastrados hacia las corrientes naturales de la cuenca. Por otra parte, el proceso de urbanización y la respectiva aplicación de soluciones a los problemas de drenaje provocan importantes efectos aguas abajo, alterando las condiciones ambientales del sistema receptor.

El enfoque tradicional del drenaje urbano ha estado orientado a la rápida y eficiente evacuación de las aguas lluvia mediante la utilización de elementos como colectores, cunetas y canales. La selección y dimensionamiento de las obras de drenaje urbano se efectúan en base a una evaluación económica y social de proyectos, en la cual se estiman los costos y beneficios del sistema. Sin embargo, existen una gran cantidad de factores y consecuencias cuya evaluación económica resulta compleja y difícil de incorporar en este tipo de evaluación. La mayoría de estos factores tienen relación con aspectos ambientales, externalidades de las obras y beneficios de las situaciones con efectos menos invasivos sobre el medio ambiente o sobre las condiciones naturales, difíciles de evaluar en términos monetarios. La experiencia a nivel internacional, así como en Chile, ha demostrado que es el enfoque económico el que impera al momento de seleccionar soluciones de drenaje, en base al equilibrio de costos y beneficios cuantificables relacionados con la reducción de los daños por inundaciones. Sin embargo, se ha demostrado la necesidad de considerar otro tipo de costos que involucren aspectos de tipo social, complejos en su cuantificación; costos ambientales, que consideren precio y mecanismos de incentivos; y asuntos de equidad (DIPNR, 2005).

Es así como en la década del noventa, en varias ciudades de Alemania, Suiza, Francia, Australia y Estados Unidos, se reconoció la necesidad de desarrollar un nuevo enfoque del drenaje urbano que considerara las aguas lluvia como un recurso más que como un desecho, así como las consecuencias hacia aguas abajo sobre toda la cuenca, como un usuario más del sistema (Chocat et al, 2001; Lawrence, 2002; Mikkelsen et al, 2002; Shaver y Hatton, 2001; Fernández et al, 2005). De esta manera surgieron en Estados Unidos las *BMPs* o *Best Management Practices*, soluciones de bajo impacto destinadas a captar y tratar las escorrentías en el lugar en que se generan para su posterior reutilización o descarga a los cursos naturales del drenaje. Estas soluciones son también conocidas como *Técnicas de Gestión de Escurrimientos Urbanos, TGEU*, en España y como *Técnicas Alternativas* en Chile (MINVU-DICTUC, 1996), sin embargo, ha resultado difícil incorporarlas en el sistema de evaluación económica considerando sus efectos más allá de los reflejados en las crecidas o inundaciones, es decir, sólo son de carácter cuantitativo.

Este artículo presenta los resultados de un trabajo de investigación centrado por una parte, en los efectos generados por las aguas lluvia urbanas, tanto a nivel de la cuenca como de la urbanización, así como en la utilización de indicadores de impacto que permitan cuantificar dichos efectos para orientar la selección de soluciones del drenaje urbano.

## **2. OBJETIVOS Y METODOLOGIA**

El objetivo de este trabajo es recopilar y analizar indicadores de impacto de aguas lluvia en zonas urbanas, que consideren los efectos sobre la cuenca y la urbanización en base a aspectos hidrológicos, hidráulicos, físico-químicos, estéticos, sociales y de infraestructura urbana.

Mediante el análisis de la literatura técnica internacional y de los avances realizados a nivel nacional, se pretende disponer de un conjunto de indicadores que ayuden a identificar la problemática generada por las aguas lluvia en zonas específicas de la ciudad de Santiago, que permitan orientar la selección de soluciones locales de una manera sustentable y más integral frente al análisis tradicional que sólo considera el costo y beneficio de elementos cuantificables económicamente. Los indicadores escogidos fueron aplicados en una zona residencial de la comuna de La Reina, en la ciudad de Santiago, considerando escenarios que incluyen la implementación de *TGEU* (con obras de almacenamiento o infiltración), colectores y situaciones sin solución de obra.

## **3. LA CARACTERIZACION DE LOS EFECTOS DE LAS AGUAS LLUVIA URBANAS Y EL NUEVO ENFOQUE DEL DRENAJE URBANO**

El estudio de los impactos generados por las aguas lluvia urbanas tuvo su origen con la aparición de lo que se conoce como “*el síndrome de los cauces urbanos*”, que hace referencia a la progresiva degradación ecológica de los cauces naturales atribuida al proceso de urbanización (Walsh et al, 2005). Las alteraciones encontradas incluyeron cambios en la morfología e hidrología de los cauces, reducción de la biota y aparición de elevados niveles de nutrientes y contaminantes, lo que dio origen a una serie de estudios y monitoreos en los Estados Unidos durante la década de los ochenta (Walsh et al, 2004). De acuerdo a reportes de la EPA (Burton y Pitt, 2002), la amplia variedad de contaminantes encontrados en los cauces naturales provienen principalmente, de las escorrentías urbanas descargadas sin tratamiento a través de colectores simples, de los rebales en las plantas de aguas servidas por la llegada de aguas desde colectores combinados y de los desechos líquidos provenientes de la actividad agrícola.

De estos contaminantes, los metales pesados como el plomo, cadmio, bario, zinc, cobre, cromo y níquel han sido encontrados en altas concentraciones en la superficie de los suelos urbanos debido a causas antropogénicas (Boller, 1997 y Murray et al, 2004), los que son arrastrados por las aguas lluvia urbanas junto con otros contaminantes como sedimentos, hidrocarburos y fertilizantes. Según Boller (1997), tan sólo las escorrentías provenientes de calles y techos colaboran con un 50-80% del total de contaminantes presentes en las aguas residuales domésticas, las que muchas veces son descargadas directamente a los cauces naturales debido al rebalse ocasionado en las plantas de tratamiento de aguas servidas que reciben además, las aguas lluvia provenientes de colectores combinados durante eventos de tormenta. Es así como diversos estudios realizados en diferentes zonas de Estados Unidos han demostrado que las urbanizaciones generan cambios físicos, químicos y biológicos en el estado de los cauces naturales, cuyas magnitudes varían en función del clima y de las condiciones económicas y sociales de cada urbanización (Brown et al, 2005 y Walsh et al, 2005). Y si bien, los cauce naturales pueden

adaptarse a estos cambios, el proceso es lento, calculándose un tiempo de recuperación aproximado de 20 años (Finkenbine et al, 2000).

De la literatura analizada, se desprende la existencia de ciertos impactos cuantificables generados por las aguas lluvia urbanas, cuya relación con los procesos de impermeabilización de los suelos y los cambios ocurridos en la naturaleza había sido ya corroborada en la década del ochenta por Schueler (1987), y de manera reciente por Urbonas (2000). De esta manera, los impactos encontrados pueden ser caracterizados de acuerdo a sus efectos sobre dos grandes factores: el estado de la cuenca y el estado de la urbanización. El primer factor incluye los efectos sobre el flujo de los cauces naturales de drenaje, en su morfología, sobre el hábitat acuático y en la calidad de las aguas (EPA, 1997; LeRoy et al, 1997; Montt, 2000; Walsh, 2000; Purcell et al, 2002; Burton y Pitt, 2002; Roesner y Bledsoe, 2003; Allan, 2004; Booth et al, 2004; Walsh et al, 2004 y Edgerly, 2006). Mientras que el segundo factor involucra los efectos ocurridos sobre la propiedad pública y privada, el transporte y los tiempos de desplazamiento, y sobre aspectos del paisaje urbano frente a los riesgos por inundación. También, incluye efectos en la salud de las personas, como infecciones al oído y al intestino, así como alteraciones en la calidad en las reservas de agua potable y en la calidad de vida de las personas (EPA, 1999; MIDEPLAN, 1999; Noji, 2000 y Booth et al, 2004).

#### **4. LOS INDICADORES Y SU SELECCIÓN**

La presencia de los contaminantes encontrados en las escorrentías urbanas alertó sobre sus posibles impactos en la biodiversidad de la cuenca y la salud de sus habitantes. Estudios realizados en los años ochenta por el Centro de Protección de Cuencas, a través del *Programa de Prevención de la Contaminación por Escorrentías en el Valle de Santa Clara*, en California, evaluaron la factibilidad de 26 indicadores de impacto ambiental de las aguas lluvia urbanas para posteriormente, generar directrices en los programas de control y manejo del drenaje (Claytor and Brown, 1996). Los resultados mostraron la utilidad y validez de 21 indicadores aplicados en diferentes escalas y grados de intervención humana, los que fueron clasificados en dos tipos. El primero de ellos tenía relación con la gestión y diseño de los planes de manejo y prevención de inundaciones, mientras que el segundo grupo de indicadores incluía monitoreos de las condiciones físicas, químicas, biológicas e hidrológicas de los cuerpos de drenaje.

De acuerdo a la literatura analizada, se encontraron diferentes indicadores propuestos, algunos de ellos destinados a cuantificar los impactos generados por las aguas lluvias en una cuenca y de manera especial, sobre los cuerpos receptores del drenaje urbano, y otros, orientados a la evaluación y monitoreo de las obras implementadas (normalmente soluciones de bajo impacto). El año 1997, EPA propuso una escala de valorización de tipo cualitativa sobre aspectos ecológicos en las zonas ribereñas (flora y fauna presente), aspectos sociales (salud humana y paisaje urbano) y aspectos económicos (uso del agua, aumento de plusvalía de propiedades por uso de *TGEU* atractivas y eficientes y reutilización de aguas lluvias). El año 2002, Burton y Pitt publicaron su propuesta de indicadores cuantitativos y cualitativos, que consideraba aspectos físicos e hidrológicos, biológicos, de calidad del agua, sociales, programáticos y de monitoreo de *TGEU* instaladas (éstos dos últimos relacionados directamente con los planes de gestión y manejo del drenaje urbano). Donovan y Naji (2003) sugirieron una serie de directrices al momento de diseñar este tipo de indicadores, en función de la protección de la diversidad biológica y la

integridad de la cuenca. Stretcher y Urbonas (2002) propusieron una serie de indicadores cuantitativos que consideraban condiciones químicas (contaminantes), físicas (morfología de cauces, patrones de flujo y monitoreos de turbiedad y temperatura), biológicas (tasas de reproducción y muerte, variaciones poblacionales y de predación) y bioquímicas (monitoreos de DBO, DQO, COT, OD y de niveles de toxicidad), recalcando además, la necesidad de considerar los efectos según los diferentes usos de la tierra. Actualmente en el estado de Virginia, en los Estados Unidos, se están aplicando una serie de indicadores de tipo cuantitativo y cualitativo que consideran no sólo los aspectos antes mencionados, sino que además, condiciones de uso del suelo (USEPA, 2005). De esta manera, los indicadores propuestos, no sólo estaban destinados a establecer las condiciones de ciertos parámetros en la cuenca y en su sistema de drenaje, sino que además, permitía monitorear los cambios que en ellos ocasionaban diversos tipos de *TGEU*. Por otro lado, avances en las mediciones del comportamiento y efectividad de las mismas, permitía pronosticar el impacto que ocasionaría su implementación sobre estos indicadores, a modo de orientar su selección de manera previa en los programas de gestión y manejo de aguas lluvia en los Estados Unidos.

De todos estos indicadores, los más utilizados en estos programas locales fueron aquellos diseñados por Claytor (Cloack y Bicknell, 200; Pitt y Burton, 2002). Sin embargo, cabe destacar que los intentos por evaluar los impactos de las escorrentías han estado enfocados únicamente hacia los efectos generados sobre los cursos del drenaje natural, sin considerar aquellos ocurridos en la urbanización y los efectos aguas abajo producto de su expansión. Es decir, si bien han permitido orientar la selección de soluciones, no han permitido considerar aspectos importantes para su funcionamiento, como lo son la expansión urbana y el consecuente aumento de la impermeabilización de los suelos, y los efectos generados aguas abajo, principalmente por los cambios urbanos antes mencionados, ocurridos aguas arriba.

Pese a estos avances, la experiencia a nivel internacional, así como en Chile, ha demostrado que es el enfoque económico el que impera al momento de seleccionar soluciones de drenaje, en base al equilibrio de costos y beneficios cuantificables relacionados con la reducción de daños por inundaciones. Sin embargo, se ha demostrado la necesidad de considerar otro tipo de costos que involucren aspectos de tipo social, difíciles de cuantificar, costos ambientales, que consideren precio y mecanismos de incentivos, y asuntos de equidad (DIPNR, 2005).

En base a la información analizada y los efectos que las aguas lluvia ocasionan en la ciudad de Santiago, se propusieron las siguientes categorías generales a considerar al momento de escoger los indicadores: calidad del agua, aspectos hidrológicos, hidráulicos y del hábitat acuático, aspectos sociales, estado de la propiedad pública y privada, y condiciones del paisaje (recursos estéticos y de recreación). En la figura N°1 se puede observar un esquema simplificado de la interacción entre los diferentes componentes del sistema con los objetivos a priorizar al momento de evaluar los indicadores, orientados tanto a la protección del sistema de drenaje natural de una cuenca y su ecosistema, como al mejoramiento de la calidad de vida en las ciudades construidas en ella.

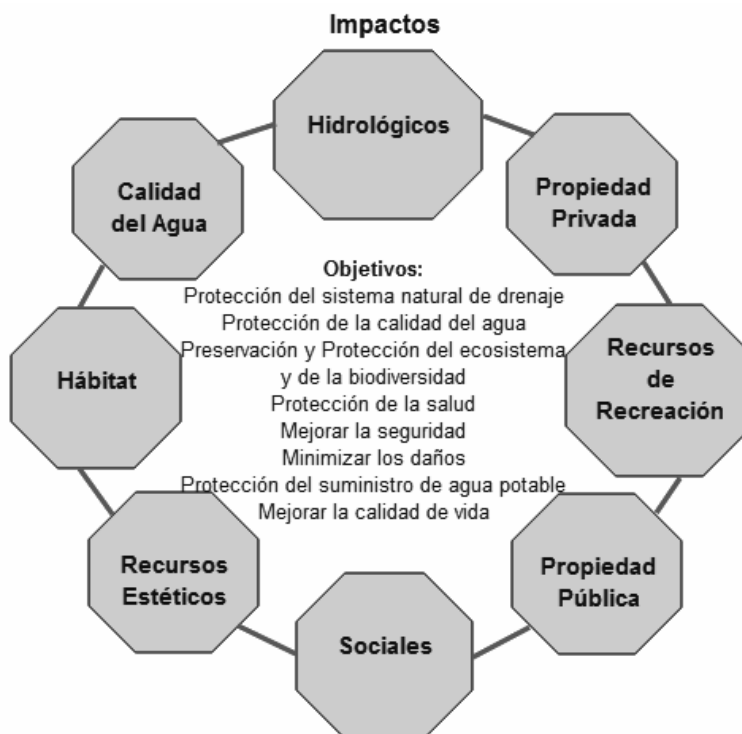


Figura N°1: Esquema de los impactos generados por las aguas lluvias urbanas y su interrelación junto a los objetivos a considerar en su manejo. Fuente: Carrasco, 2006.

Los indicadores propuestos, en función de la literatura internacional estudiada, se presentan en la tabla N°1.

Tabla N°1: Indicadores de impacto por aguas lluvias urbanas. Fuente: Carrasco, 2006.

<b>Categoría</b>	<b>Sigla</b>	<b>Nombre del Indicador Simple de Impacto</b>
<b>Calidad del Agua</b>	CA1-CA7	Concentración de contaminantes (mg/L)
	CA8-CA11	Test de toxicidad (mg/L)
<b>Hidrológico</b>	HG1	Disminución de área infiltrable (%)
	HG2	Volumen retenido (%)
	HG3	Caudal máximo (m <sup>3</sup> )
<b>Hidráulico</b>	HC1	Drenaje natural (%)
	HC2	Riesgo por inundación (%)
	HC3	Riesgo por inundación aguas abajo (%)
<b>Paisaje y Estética</b>	PE1-PE4	Contaminación en recursos estéticos
	PE5-PE8	Contaminación en recursos de recreación
<b>Infraestructura Urbana</b>	IU1-IU3	Daño a la propiedad privada
	IU4	Daño a la propiedad pública
	IU5	Zona de alta congestión vehicular
<b>Social</b>	SC1-SC4	Daño a las personas
	SC5	Riesgo a la salud por presencia de sustancias tóxicas o microorganismos en eventos de inundación

## 5. APLICACIÓN Y RESULTADOS

La aplicación de los indicadores propuestos se llevó a cabo en un área residencial de aproximadamente 209 há. en la comuna de La Reina, con una precipitación total anual de 347,2 mm/año y un coeficiente de escorrentía equivalente de 1.285.895,25 m<sup>2</sup>. La zona en estudio está limitada al este por el canal El Bollo, al oeste por el canal San Carlos, al Norte por la calle Simón Bolívar y al Sur, por la Av. Larraín. La selección de esta zona, se basó en su pertenencia a una comuna con problemas históricos de inundación, así como por la presencia de variados elementos de drenaje natural, algunos sin modificar y otros intervenidos completamente, producto de la impermeabilización de los suelos.

Tabla N°2: Aspectos de la zona en estudio, considerando las condiciones previas a la urbanización y con el nivel actual de impermeabilización. Fuente: Carrasco, 2006.

Características Zona en Estudio	Estado Natural	Estado Actual
Área Impermeable (m <sup>2</sup> )	0	1.808.150
Volumen Retenido Anual (m <sup>3</sup> )	602.114	345.501
Caudal Máximo* (m <sup>3</sup> /s)		
T=2 años	1,45	4,84
T=5 años	1,79	5,93
T=10 años	2,04	6,77
(*) Considerando precipitación en 24 hrs (T=10 años) de 74 mm.		

Para la evaluación de los indicadores propuestos sobre la calidad del agua se utilizaron mediciones presentes en uno de los escasos análisis de la calidad de las aguas lluvia realizado en Santiago (MOP-DICTUC, 2001). Estos valores fueron comparados con los establecidos en las normas chilenas de emisión de residuos líquidos hacia aguas superficiales y subterráneas, bajo el supuesto de continuidad en las descargas de las escorrentías. De estos indicadores, se encontró que los contaminantes por demanda de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y los sólidos suspendidos superaban los valores establecidos en la norma de descarga a aguas superficiales, mientras que los contaminantes inorgánicos (amoníaco), nutrientes (N Kjeldahl) y metales pesados (cadmio y fierro) superaron los valores definidos en la norma de infiltración.

Para los indicadores hidrológicos, se encontró una disminución de un 87% en la superficie infiltrante natural (indicador HG1). El indicador HG2, que representa el volumen capturado en la zona de estudio fue calculado en función del área, la precipitación total y los coeficientes de escorrentías por tipo de suelo y urbanización. Los resultados arrojaron un aumento de un 42, 62% del volumen total con respecto a las condiciones naturales del terreno. Por último, el indicador HG3, que hace referencia a la generación de caudales máximos, se diseñó en base al Método Racional, considerando diferentes periodos de retorno. Como se indica en la tabla N°2, para las etapas previas a la urbanización y un periodo de retorno de 5 años, se obtuvo un caudal de 1,79 m<sup>3</sup>/s, mientras que para un periodo de 10 años, 2,04 m<sup>3</sup>/s. Para los mismos periodos de retorno, pero considerando la situación de impermeabilización actual los resultados fueron 5,93 y 6,77 m<sup>3</sup>/s respectivamente.

En el cálculo del indicador hidráulico HC1 que permite identificar la pérdida de áreas de drenaje natural frente al avance de la urbanización, se consideraron dos quebradas definidas en el *Plan Regulador de la Comuna de La Reina 2002*, correspondientes a quebrada Verde y Carpay. La

primera presentó la impermeabilización del 37% de su extensión, mientras que la segunda, un 100%. El indicador HC2 identifica zonas con alto, medio o bajo riesgo de inundación, de acuerdo al estudio de riesgo de inundación para el Gran Santiago (DIHA, 2003), que considera zonas de alto riesgo aquellas que se inundan desde varias veces al año hasta una vez cada dos años, de riesgo medio, las que se producen con una frecuencia igual o mayor a una vez cada dos años y menor a una vez por década, y de riesgo bajo, si las inundaciones ocurren con frecuencia menor a una vez por década. Este indicador arrojó la presencia de riesgo de inundación medio en el 10% del área total y de bajo riesgo en un 22% . Sin embargo, los sectores aguas abajo sí presentaron alto riesgo de inundación y un gran porcentaje de riesgo medio, debido a los desbordes del canal San Carlos. De los indicadores relacionados con la estética urbana y paisaje, fue posible evaluar solamente los correspondientes al PE1, PE2, PE3 y PE4 ya que del PE5 a PE8 se hace referencia al estado de zonas con presencia de aguas destinadas a la recreación sin contacto directo, inexistentes en el área en estudio. Se encontró la presencia de una alta cantidad lodos y barros en las áreas verdes después de los eventos de tormenta, así como una cantidad menor de ramas, trozos de raíces y pasto suelto.

Con respecto a los indicadores de Infraestructura Urbana IU1-IU3, correspondientes a la evaluación de viviendas dañadas, se utilizó la información del Centro de Documentación de la Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior (ONEMI), sin embargo, los datos obtenidos involucran cifras totales comunales, sin existir un detalle más fino de los casos, problema que también se encontró en los datos de la Municipalidad. De la revisión de la prensa, se pudo constatar sólo la presencia de daños menores a la propiedad, vale decir, inmuebles con daños de hasta un 30% en su estructura con posibilidad de reparación en un corto plazo, sin el desalojo de los habitantes. En el caso del indicador IU4 sobre daños ocasionados a la propiedad pública, se utilizaron datos de la inversión municipal en la reparación de pavimentos, mejoras al sistema convencional de drenaje y costos por equipamiento público destruido. El indicador arrojó una inversión por daños muy reducida, un 7% con respecto del total de inversiones anuales comunales en infraestructura.

Los problemas ocasionados al tráfico y a aumentos en los tiempos de viaje fueron representaron por el indicador IU5, en función de la superposición de los mapas: *Análisis de las zonas con mayor congestión vehicular en Santiago* (El Mercurio, 2005) y *Mapas de riesgo de inundación para el Gran Santiago* (DIHA, 2003), donde se identificó la asociación entre las zonas de alto, medio y bajo riesgo de congestión vehicular con las zonas de alto, medio y bajo nivel de riesgo por inundación. En el caso del área en estudio, no se encontraron problemas con respecto a esta variable, pero sí aguas abajo.

Finalmente, los indicadores SO1-SO4 de tipo Social buscan representar la magnitud del daño generado por las inundaciones urbanas sobre las personas. Para esto se consideraron cifras de la ONEMI correspondientes al número de damnificados, albergados, fallecidos y afectados anualmente y por evento. Pese a que esta información no se encuentra detallada por sector comunal, sino que por total comunal, el detalle presentado en la prensa escrita permitió detectar la presencia de personas damnificadas en el área, entendiendo por esto, a aquellos que han sufrido, en su personas o sus bienes, daños evaluables y cuantificables provocados directamente por un desastre, considerando también, la pérdida de su fuente laboral o empleo. Por otra parte, el indicador SO5 intenta identificar zonas con riesgo directo a la salud humana, ya sea por ingesta de agua contaminada o por el contacto directo con ella, considerando los desbordes de aguas



servidas durante eventos de inundación, ya que no existe información detallada con respecto a la demanda por enfermedades de este origen en el sistema de salud comunal ni nacional. En el área en estudio no se encontraron problemas de este tipo, sin embargo, sí aguas abajo, donde estos desbordes ocurren con frecuencia.

Una vez obtenido el diagnóstico de la situación en el área de estudio, los indicadores fueron re-evaluados considerando las eficiencias y comportamiento esperado de diferentes soluciones de drenaje a implementar, entre las que se consideraron colectores y *TGEU* de almacenamiento e infiltración. Para efectos de cálculo se consideró que la implementación de estas obras alternativas ocuparían tan sólo un 10% del área total, debido a la inexistencia de mayor superficie para llevarlas a cabo, de acuerdo a lo expuesto por Urbonas (2000) y EPA (1999). De acuerdo a la comparación realizada, fueron las obras de almacenamiento aquellas que de mejor manera mitigaron los impactos relacionados con la inundación *in situ* y aguas abajo. Las obras de infiltración presentaron una mayor eficiencia en la remoción de los contaminantes de las aguas, pero no tanto en lo relacionado a las inundaciones. Mientras que los colectores, si bien mejoraban la situación de inundaciones en el área de estudio, no lo hacía de igual manera aguas abajo ni tampoco representaba alguna mejora en la calidad de las escorrentías.

## 6. CONCLUSIONES

La recopilación y análisis de los antecedentes expuestos en la literatura técnica internacional y nacional sobre los impactos de las aguas lluvia urbanas revelan su incidencia en múltiples aspectos de la cuenca y la ciudad, tales como sobre la calidad del agua, aspectos sociales, hidrológicos, hidráulicos, biológicos y de daños en la infraestructura urbana. En Chile los estudios son escasos, existiendo algunos relacionados con la caracterización de las aguas en los cauces naturales y en las aguas lluvia urbanas de Santiago. Tampoco existen métodos ni indicadores que contribuyan a un correcto diagnóstico de los impactos generados por las escorrentías urbanas a nivel nacional, ni que permitan una correcta selección de soluciones de manera que se adapten a las características de la problemática local, pese a la presencia de una institucionalidad que ha definido técnicas capaces de mitigar estos impactos de manera más sustentable. Los indicadores aplicados resaltaron la presencia de contaminantes tóxicos (metales pesados), así como altas concentraciones de sólidos suspendidos y de  $DBO_5$  en las escorrentías generadas en el área de estudio. También, se encontraron elevados niveles de materia orgánica provenientes del arrastre de ramas, hojas, pasto, desechos orgánicos, estiércol y lodos (sólidos sedimentables). Los indicadores hidrológicos corroboraron la relación entre el elevado porcentaje de impermeabilización del área en estudio y el volumen de captura local, que disminuyó en un 43% con respecto a las condiciones naturales del terreno, generándose un 70% más de caudales máximos aguas abajo. Por otra parte, los indicadores hidráulicos permitieron explicar de mejor manera las dinámicas de las inundaciones tanto en el área de estudio como aguas abajo. El indicador relacionado con la infraestructura pública resultó ser importante para evaluar el estado y la mantención de las obras de mitigación de las aguas lluvia a nivel local. El indicador relacionado con los tiempos de espera y el tránsito vehicular no resultó ser suficientemente significativo, por su directa relación con la evaluación de los riesgos por inundación, no así los relacionados con el paisaje y la estética urbana, que son importantes para la población por cuanto a la funcionalidad y utilización de estas zonas. Finalmente, los indicadores de tipo social permitieron identificar el nivel de daños a la salud, así como alteraciones en la calidad de vida de

las personas, sin embargo, hace falta información más detallada que permita aumentar su representatividad y eficiencia.

La aplicación de estos indicadores permitió realizar un diagnóstico de la situación local sobre los impactos incurridos por las escorrentías urbanas tanto *in situ* como aguas abajo. La re-evaluación de estos indicadores suponiendo escenarios con diferentes obras permite definir criterios que orienten la selección de las mismas de acuerdo a los aspectos de mitigación que se buscan priorizar. Es así como las *TGEU* o *Técnicas Alternativas* relacionadas con obras de almacenamiento resultaron ser eficientes para resolver los problemas de inundación en el mismo lugar y aguas abajo, mientras que las de infiltración reflejan mayores mejorías en los impactos generados sólo aguas abajo. Finalmente, si bien los colectores pueden resolver el problema de las inundaciones en el área, no son capaces de mitigar los impactos sobre la calidad de las aguas ni los relacionados con área infiltrable, volúmenes de escorrentías y caudales máximos generados.

De esta manera, los indicadores de impacto no sólo son útiles al momento de evaluar el estado del drenaje de una cuenca, sino que además, permiten identificar los problemas generados por las aguas lluvia *in situ* y aguas abajo. Esto contribuye a orientar la selección de soluciones a una problemática local específica, en base a diferentes criterios y escenarios, que incluso, pueden incluir la combinación de diferentes tipos de obras.

Este nuevo enfoque del drenaje urbano, se presenta como una oportunidad de estudio y un desafío para el mejoramiento de los programas y estrategias para el control y manejo de las aguas lluvia urbanas a nivel nacional. Para ello, no sólo es necesario generar información acerca de los impactos generados por las escorrentías en las ciudades nacionales, sino que también, se debe mejorar y completar las estadísticas disponibles a nivel nacional y municipal, las que para efectos prácticos en este trabajos, no permitieron desagregar situaciones al interior de una comuna, limitando la aplicación de ciertos indicadores a un nivel comunal o mayor. El estudio de los efectos de las *TGEU* a nivel local nacional, también se presenta como una oportunidad de desarrollo, con el fin de analizar su eficiencia y control en el drenaje urbano para la aplicación de nuevas soluciones de bajo impacto y costo que puedan complementarse a las ya existentes.

## REFERENCIAS

Allan, D. 2004. *Landscapes and Riverscapes: The Influence of Land Use on Stream Ecosystems*. Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst. 2004. 35:257-84. Colorado State University, USA.

Boller, M. 1997. *Tracking Heavy Metals Reveals Sustainability Deficits of Urban Drainage Systems*. Water Science and Technology. Vol.35, N° 9, pp:77-87.

Booth, D. J. Karr, S. Schauman, C. Konrad, S. Morley, M. Larson and S. Burges. 2004. *Reviving Urban Streams: Land Use, Hydrology, Biology, and Human Behavior*. Journal of the American Water Resources Association 40(5):1351-1364.

Brown, L.R., Gray, R.M. and Hughes, M.R. 2005. *Introduction to Effects of Urbanization on Stream Ecosystems*. American Fisheries Society Symposium 47:1-8, 2005 2005 by the American Fisheries Society.

Burton, G.A. and Pitt, R.E. 2002. *Stormwater Effects Handbook: A Toolbox for Managers, Scientist, and Engineers*. Lewis, Florida. U.S.A.

Carrasco, S. 2006. *Indicadores de Impacto del Drenaje Urbano de Aguas Lluvia*. Memoria para optar al título de Ingeniera Civil Industrial, Mención en Medio Ambiente. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago.

Chocat, B., Barraud, S. and Alfakih, E. 2002. *Development of BMPs Progress in France and Western Europe*. Linking Stormwater BMP Designs and Performance to Receiving Water Impact Mitigation Proceedings of an Engineering Foundation Conference. Pp: 336-368. Snowmass Village, Colorado.

Claytor, R.A. and Brown W.E. 1996. *Environmental Indicators to Assess Stormwater Control Program and Practices, Final Report*. Center for Watershed Protection, Silver Spring, MD.

Cloak, D., Bicknell J.C. 2001. *Use of Environmental Indicators to Assess Stormwater Program*. Linking Stormwater BMP Designs and Performance to Receiving Water Impact Mitigation Proceedings of an Engineering Foundation Conference. Pp 305-315. Snowmass Village, Colorado.

DIHA, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental. 2003. *Mapas de riesgo de inundación para el Gran Santiago*. Para Asociación Chilena (AACH) y Mapcity, publicado el año 2005. Santiago, Chile.

DIPNR, Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources. 2005. *Floodplain Development Manual: The management of Flood Liable Land*. New South Wales Government. Sydney, Australia.

Donovan, I. and Naji, F. 2003. *Water Sensitive Planning Guide: For the Sydney Region*. NSW Stormwater Trust. USA 1:1-8.

Edgerly, J.L 2006. *Quantifying Urban-Induced Flow Regime Alteration Using Mathematical Models and Hydrologic Metrics*. Thesis for the Degree of Master of Science, Colorado State University. Department of Civil Engineering. Fort Collins.U.S.A.

El Mercurio. 2005. *Análisis de las zonas con mayor congestión vehicular en Santiago*. Edición especial.

EPA, Environment Protection Authority, 1997. *Managing Urban Stormwater: Council Handbook*. Appendix B. Pp.71-92, Appendix C, pp.93-96. Gouldburn St. Sydney.

EPA, United States Environmental Protection Agency, 1999. *Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices* 4: 23-48, 5: 1-85, 6: 28-37.

Fernández, B., Montt, J.P., Rivera P. 2005. *Drenaje de Aguas Lluvias Urbanas en Zonas Semiáridas*. Ensayos y documentos. Revista de Arquitectura de la Pontificia Universidad Católica de Chile, ARQ, pp 64-67. Santiago, Chile.

Finkenbine, J.K, Atwater, J.W. and Mavinic, D.S. 2000. *Stream Health After Urbanization*. J. Am. Water Res. Assoc. 36(6), 1149.

Lawrence, I. 2002. *Australian Urban Water BMPs Strategic Review*. Linking Stormwater BMP Designs and Performance to Receiving Water Impact Mitigation Proceedings of an Engineering Foundation Conference. Pp:369-385. Snowmass Village, Colorado.

LeRoy, N., Allan, D., Bain, M., Karr, J., Prestegaard, K. 1997. *The Natural Flow Regime: A Paradigm for River Conservation and Restoration*. American Institute of Biological Science. BioScience Vol. 47 N° 11, pp: 769-784.

MIDEPLAN, Ministerio de Planificación. 1999. *Metodología de Preparación y Evaluación de Proyectos de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias*. División de Planificación, Estudios e Inversión. Santiago, Chile.

MOP-DICTUC, 2001. *Análisis de la Calidad de las Aguas Lluvias en Pozos de Infiltración en la Ciudad de Santiago*. Santiago, Chile.

Mikkelsen, P., Viklander, M., Linde, J., and Malmqvist, P. 2002. *BMPs in Urban Stormwater Management in Denmark and Sweden*. Linking Stormwater BMP Designs and Performance to Receiving Water Impact Mitigation Proceedings of an Engineering Foundation Conference. Pp: 354-368. Snowmass Village, Colorado.

MINVU-DICTUC, Ministerio de Vivienda y Urbanismo y Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile. 1996. *Guía de Diseño de Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos*. MINVU, Santiago, Chile.

Montt, J.P. 2000. *Antecedentes Empíricos y Modelación de la Calidad de las Aguas Lluvias Urbanas*. Tesis (Magíster en Ciencias de la Ingeniería). Santiago, Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería.

Murray, K.S., Rogers, D., Kaufman, M. 2004. *Heavy Metals in an Urban Watershed in Southeastern Michigan*. J. Environ. Qual., Vol. 33, January-February 2004. Madison, USA.

Noji, E. 2000. *Impacto de los Desastres en la Salud Pública*. Organización Panamericana de la Salud. Bogotá, Colombia.

Purcell, A., Friedrich, C., Resh, V. 2002. *An Assessment of a Small Urban Stream Restoration Project in Northern California*. Society for Restoration Ecology, Vol. 10 N° 4, pp 685-694

Roesner, L., Bledsoe, B. 2003. *Physical Effects on Wet Weather Flows on Aquatics Habitats: Present Knowledge and Researches Needs*. Water Environment Resource Foundation. Colorado, USA.

Shaver, E and Hatton, C. 2002. *Auckland Experience with BMPs Mitigating Adverse Impact*. Linking Stormwater BMP Designs and Performance to Receiving Water Impact Mitigation Proceedings of an Engineering Foundation Conference. Pp: 387-402. Snowmass Village, Colorado.

Schueler, T. 1987. *Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs*. Metropolitan Washington Council of Governments, Washington, DC.

Strecker, E.W. and Urbonas, B.R. 2002. *Assesing Receiving Water Effects of Urban Stormwater BMPs*. Linking Stormwater BMP Designs and Performance to Receiving Water Impact Mitigation Proceedings of an Engineering Foundation Conference. Pp: 426-439. Snowmass Village, Colorado.

Urbonas, B. 2000. *Assesment of Stormwater Best Management Practice Effectiveness* (Chapter 7, pp 225-300). In Innovate Urban Wet-Weather Flow Management System. Technomic Publishing Co. Lancaster.

USEPA, United States Environmental Protection Agency, 2005. *National Management Measures to Control Nonpoint Source Pollution from Urban Areas* [en línea] Office of Water, Washington [fecha de consulta: 22 de noviembre 2006]. Disponible en: <<http://www.epa.gov/owow/nps/urbanmm/index.html>>

Walsh, C.J. 2000. *Urban Impacts on the Ecology of Receiving Waters: A Framework for Assessment, Conservation and Restoration*. Hydrobiologia 431: 107-114, 2000. Kluwer Academic. Netherlands.

Walsh, C.J, Leonard A. W., Ladson A.R. and Fletcher, T.D. 2004. *Urban Stormwater and the Ecology of Streams*. Cooperative Research Centre for Freshwater Ecology and Cooperative Research Centre for Catchment Hidrology. Canberra.

Walsh, C.J., Roy, A.H., Feminella, J.W., Cottingham, P.D., Groffman, P.M and Morgan, R.P. 2005. *The Urban Stream Syndrome: Current Knowledge and the Search for a Cure*. Journal The North American Benthological Society 24(3): 706-723.