

Desafíos y evolución del drenaje urbano en Chile **Challenges and evolution of urban drainage in Chile**

Javier Camaño¹

José Luis Arumí²

¹Universidad de Concepción, Concepción, Chile, javiercamano@udec.cl

²Universidad de Concepción, Concepción, Chile, jarumi@udec.cl

Autor para correspondencia: javiercamano, javiercamano@udec.cl

Resumen

La urbanización altera los procesos hidrológicos naturales en una cuenca, a través del reemplazo de la red de drenaje natural compuesta por esteros, quebradas por otra de calles y colectores de aguas lluvia. Desde mediados de los años 90 existe un nuevo concepto para concebir el drenaje urbano llamado SUDS (sustainable urban drainage systems) o "drenaje urbano sustentable"; en Chile se encuentran evidencias de este nuevo enfoque a partir de 1996. El documento recopila los principales tópicos que aún debe investigar Chile dentro del campo del drenaje urbano, así como su avance institucional, normativo, técnico, proyectos de investigación y construcción relevantes, en materia SUDS. La investigación se realizó a través de una revisión de leyes, normas, documentos científicos y técnicos publicados. Chile ha efectuado investigación científica, y ha ejecutado proyectos públicos y privados en drenaje urbano sustentable. La investigación se ha orientado principalmente en algunas medidas de control del agua lluvia, en la fuente y los proyectos realizados en algunos parques públicos y condominios. Se observa que los principales tópicos de investigación a potenciar son la calidad del agua lluvia, implementación de medidas no estructurales, análisis del desempeño de algunas medidas SUDS a escala domiciliaria, y de ciudad, a la realidad climática nacional, a través

de modelación hidrológica e hidráulica; la desagregación temporal, espacial de la precipitación diaria, elaboración de planes de conservación y rehabilitación de los cauces urbanos.
Palabras clave: drenaje urbano, sustainable urban drainage systems (SUDS), desafíos, Chile.

Abstract

Urbanization changes the natural hydrological processes of a catchment through the replacement of the natural urban drainage network composed of creeks and ravines for an artificial one of streets, channels and stormwater drainage pipes. Since of middle 90's there has been a new concept to deal with stormwater named "SUDS" (sustainable urban drainage systems). In Chile there is evidence of this new paradigm since 1996. The paper reviews the main topics still unresearched in the field of urban drainage in Chile, relevant research and construction of SUDS projects as well as the advances in institutional, lawful and technical matter. The research was made through laws, technical and scientific published documents. Chile has carried out scientific projects and constructed public, private projects who consider sustainable urban drainage systems principles, the first area has been stormwater source control such as permeable pavements, green roofs, rain gardens and rain harvest, the second are public spaces and private neighborhoods. It is noted that the urban drainage topics to develop are stormwater quality, non-structural measures implementation, hydrological behavior of some structural measures in a home and city scale in a Chilean climatological context through hydrological and hydraulic modelling, temporal and spatial rainfall disaggregation, protection and the rehabilitation of urban streams.

Keywords: urban drainage, sustainable urban drainage systems (SUDS), challenges, Chile.

Recibido: 21/07/2017

Aceptado: 07/05/2018

Introducción

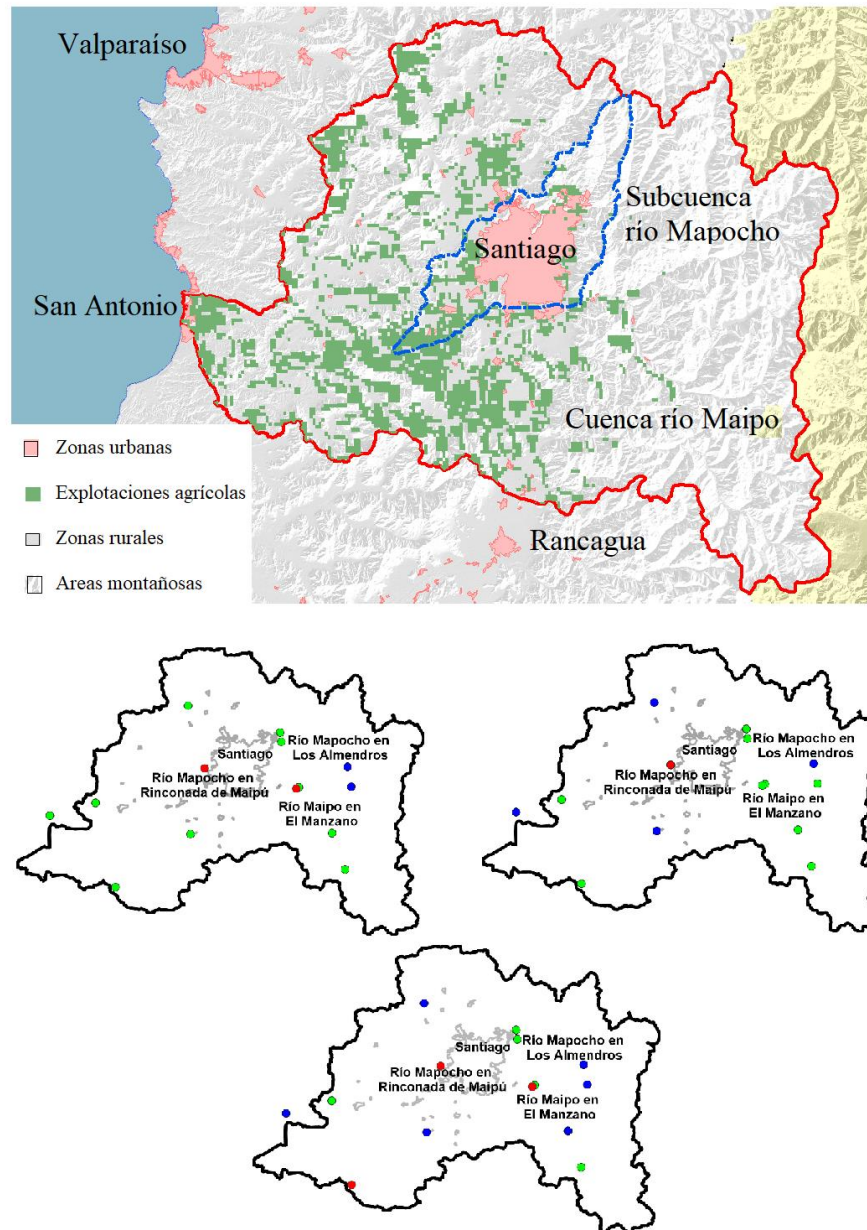
Chile, al igual que otros países en el mundo, posee un crecimiento urbano al alza, esta urbanización de las cuencas naturales provoca una alteración de sus procesos hidrológicos. Estas cuencas que se encuentran sujetas a una urbanización constante, presentan respuestas en escorrentía más rápidas, haciendo que las consecuencias de los anegamientos sean cada vez más severas y presentando un desmedro de la calidad de la escorrentía urbana, provocando que los países requieran de nuevas soluciones para adaptarse a una solicitud cada vez mayor de sus sistemas de drenaje. El país ha experimentado una evolución en materia de drenaje urbano a partir del año 1997, antes de ese año, Chile carecía de una institucionalidad y normativa que lo rigiese. Posteriormente, y a raíz de fuertes inundaciones acaecidas en ese mismo año, surge la necesidad de contar con instituciones que se encargasen de fiscalizar la construcción y el mantenimiento de las obras de drenaje urbano, y de normativas que estandaricen los diseños de las obras que se construyan en el país. Desde 1999, en Maryland (Estados Unidos) se comenzó a discutir y acuñar el término "drenaje urbano sustentable" (por sus nombre en inglés SUDS: sustainable urban drainage systems; BMP: best management practices; LID: low impact development, técnicas alternativas, etc.), el cual, no sólo pone énfasis en controlar la cantidad de escorrentía que circula por las calles durante tormentas, sino en mejorar la calidad de los componentes de la escorrentía, a través de un tratamiento pasivo, permitiendo la sedimentación y la infiltración de la escorrentía para promover una barrera sanitaria efectiva, evitando anegamiento, contaminación de los cuerpos receptores y en disminuir los impactos propios del desarrollo urbano. Para cumplir estos objetivos existen medidas estructurales y no estructurales que pueden adaptarse, donde las primeras corresponden a soluciones constructivas que cumplen los objetivos técnicos, tales como lagunas de detención, pavimentos permeables, zanjias cubiertas con vegetación, jardines lluvia, etc. Las segundas corresponden a un conjunto de medidas de gestión, enfocadas en la educación de la comunidad, mejora de los instrumentos de planificación territorial y de las prácticas habituales que se realizan dentro de las ciudades. En Chile se presentan evidencias de este nuevo enfoque a partir del año 1996, y hasta la fecha se han desarrollado diversos proyectos de construcción e investigación en el área de drenaje urbano sustentable;

sin embargo, es necesario continuar desarrollando investigación aplicada en el área, así como también se requiere de profesionales y técnicos idóneos para implementarlas.

Evidencias del efecto de la urbanización sobre la escorrentía en la región metropolitana

Una de las consecuencias de la urbanización sobre una cuenca natural es el aumento de la cantidad de escorrentía. La región metropolitana de Chile corresponde a una zona altamente urbanizada, en particular la zona cercana a Santiago, capital del país, conformada por 37 comunas. Dentro de la región, sobre todo de los ríos Mapocho y Maipo, están sujetos a una urbanización constante, sin embargo, también se presentan superficies montañosas y agrícolas. Los ríos cercanos a la cordillera se encuentran colindantes a zonas con poca superficie urbana, mientras que aguas abajo se concentran los asentamientos urbanos donde los cauces reciben mayor escorrentía, resultado de la presencia de las superficies impermeables (cubiertas, pavimentos, suelo compactado y de la canalización a través de calles y canales) que impiden la infiltración. Este patrón se ve reflejado en los ríos Mapocho y Maipo. En lo que respecta al río Mapocho, en las estaciones fluviométricas Rinconada de Maipú y Los Almendros (aguas abajo y aguas arriba de Santiago respectivamente), donde la primera presenta tendencias al alza en los caudales máximo, mínimo y promedio mientras que la segunda no presenta ninguna tendencia significativa en estos caudales (Figura 1). En lo referente río Maipo, en las estaciones el Manzano, Queltehues y Hualtatas (la primera, aguas abajo de una superficie urbanizada; la segunda y tercera, aguas arriba, sin urbanización), presentándose en la estación aguas abajo tendencias al alza en los caudales máximo y mínimo, mientras que en las estaciones aguas arriba no se presentan tendencias significativas, lo que confirma lo planteado anteriormente. El análisis de tendencia fue realizado mediante el test no paramétrico Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) utilizando un nivel de significancia de 0.05.

Figura 1. Tendencias en los caudales máximos (a), mínimos (b) promedios (c) anuales para la Región Metropolitana, Chile (rojo: tendencia al alza, azul: tendencia a la baja, verde: tendencia no significativa).



Cambio de enfoque en Chile: desde el tradicional, hacia el drenaje urbano sustentable

Las medidas estructurales propuestas dentro de las prácticas SUDS se enfocan en minimizar los impactos del crecimiento urbano en la calidad y cantidad de escorrentía, así como en maximizar las oportunidades de armonizar y de promover la biodiversidad (Woods-Ballard, Kellagher, Martin, Jefferies, Bray, & Shaffer, 2007) y en lo posible, de camuflar la red de drenaje urbano con la red natural.

El avance de Chile hacia el drenaje sustentable ha sido gradual y ha constado de diversas etapas (Figura 2); 1) con la promulgación de leyes e instituciones ambientales; 2) con la creación de leyes e institucionalidad explícitas en drenaje urbano; y 3) con la estandarización de las técnicas de diseño, construcción y mantenimiento de las obras, que incluyen las medidas estructurales y no estructurales propuestas dentro de las prácticas SUDS. El primer avance en materia de sustentabilidad ocurrió en el año 1994, con la promulgación de la ley sobre bases generales del medio ambiente (Ley 19300, 1994; la cual, primero establece el derecho de la población de vivir en un medio ambiente libre de contaminación; regula la protección del mismo; la preservación de la naturaleza, y a su vez, califica ambientalmente los proyectos mediante el sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA) (Decreto 40, 2013), el cual estableció que los sistemas de evacuación de aguas lluvias que atiendan a una población mayor a 10 000 habitantes, proyectos de equipamiento, grandes urbanizaciones, proyectos industriales, aeropuertos y estacionamientos, deberán ingresar a este sistema. Estos proyectos tienen relación directa con el drenaje urbano, sobre todo, aquellos que presentan una alta superficie impermeable y que sus sistemas de evacuación de aguas lluvias deban ser revisados, de tal manera que su construcción no presente un desmedro sobre la calidad de vida de los habitantes ni sobre el medio ambiente en el que se emplazan. Hoy en día (posterior al año 2010), el SEIA es administrado por el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), creándose la Superintendencia y el Ministerio del Medio Ambiente (Ley 20417, 2010). Algunas de las medidas estructurales SUDS fueron recogidas y publicadas, por primera vez, por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), en 1996, en una guía de diseño titulada *Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos* (Ministerio de Vivienda y Urbanismo [MINVU], 1996). Esta guía contenía

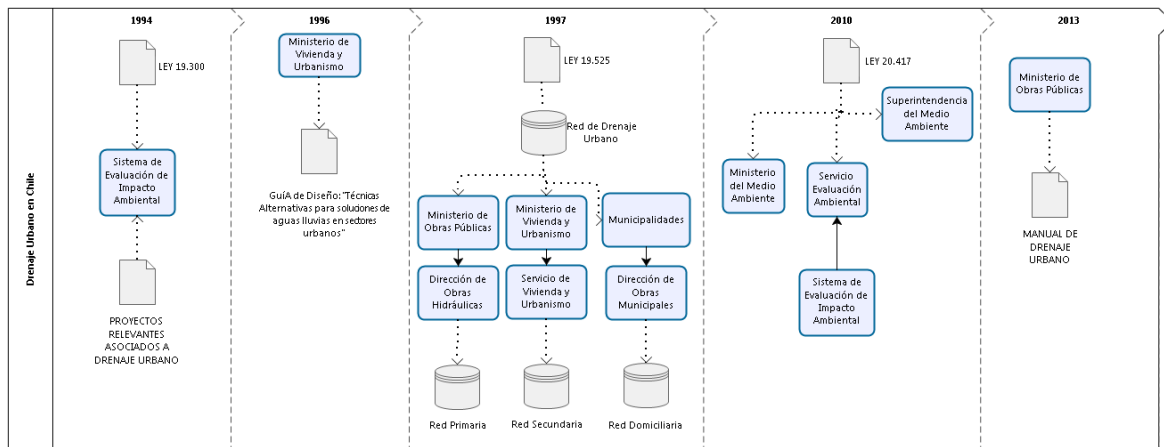
aspectos generales del diseño de obras de infiltración y almacenamiento de aguas lluvias, presentación de proyectos, así como especificaciones generales de construcción y de mantenimiento. La guía proponía las medidas estructurales SUDS como alternativa para solucionar los problemas que generan las aguas lluvias, con base en un enfoque de control de la escorrentía (enfoque tradicional), pero no abarcando aspectos de calidad del agua lluvia, de armonización del paisaje ni de protección de la biodiversidad acuática, que corresponde al enfoque de drenaje sustentable; no obstante, recopilaba el conocimiento de la época en esta materia y es, sin duda, un aporte a considerar, pues corresponde al primer documento publicado en Chile, con fines de diseño donde se proponen técnicas no convencionales para tratar las aguas lluvias urbanas. Sin embargo y a pesar de la publicación de la guía de 1996, no existía una ley explícita sobre la evacuación y el drenaje de las aguas lluvias en la zona urbana, careciendo de entidades gubernamentales que tuviesen competencia directa en el tema de asignación de responsabilidades al sector privado, en cuanto a la construcción y mantenimiento de las obras de drenaje urbano, sino que se poseían de una serie de cuerpos legales, leyes y documentos técnicos, donde se hacía referencia a la naturaleza jurídica de las aguas lluvias, pero sin crear institucionalidad ni responsabilidades asociadas. Dentro de los organismos legales destacan la constitución política de la república, el código civil y el código de aguas de Chile, dentro de las leyes, destacan la ley general de urbanismo y construcción (Decreto con fuerza de ley 458, 1976) , la ley orgánica constitucional de municipalidades (Ley 18695, 1988) y la ordenanza general de urbanismo (Decreto 47, 1992) y construcción dentro de los documentos técnicos. La Ley General de Urbanismo y construcciones asignó a las municipalidades de cada ciudad chilena, la responsabilidad del saneamiento de las poblaciones insalubres, así también señala que el diseño y construcción de los sistemas de evacuación de aguas lluvia debe cumplir con las disposiciones indicadas en la ordenanza general de urbanismo y construcción. La ley orgánica constitucional de municipalidades (Ley 18.625, 1992) otorga a éstas, las facultades de aplicar sanciones referidas al vertido de desperdicios, basuras en canales y su limpieza, cuando éstos se encontraran obstruidos, además solicita la elaboración del plan regulador comunal donde se establecen las zonas con riesgo de inundación, pudiendo incluso, erradicar poblaciones que se encuentren emplazadas en estas zonas. No fue sino hasta el año 1997, donde se promulgó la Ley 19525 que

regula los sistemas de evacuación y drenaje de aguas lluvia, donde se establece como deber del estado, la existencia de sistemas de evacuación y drenaje de aguas lluvias en las ciudades y poblados. Esta ley ayudó a solucionar diversas equivocaciones institucionales y técnicas, en cuanto la responsabilidad de los organismos públicos y privados en cuestión de drenaje urbano. Dentro de las mejoras técnicas propuestas destacan: vigilar la construcción de colectores de aguas lluvias separados de los de aguas servidas; separar la red de evacuación y drenaje de aguas lluvias en una red primaria y secundaria dependiente de entes públicos independientes; y establecer la responsabilidad privada donde los urbanizadores deben ejecutar a su costa, las obras de desagüe de aguas lluvias, encauzando así el interés estatal para cumplir estos objetivos propuestos en la ley. En las mejoras institucionales le asigna al Ministerio de Obras Públicas (MOP) la responsabilidad de la planificación, estudio, proyección, construcción, reparación, mantenimiento y mejoramiento de la red primaria, creando la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), para contratar la realización de las obras y al Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), la responsabilidad de la planificación y el estudio de la red secundaria y éste, a través del Servicio de Vivienda y Urbanismo (SERVIU) la proyección, construcción, reparación y mantenimiento de la misma.

Si bien la Ley 19525 sentó las bases para la gestión del drenaje urbano en Chile, antes del año 2013 se seguía careciendo de documentos oficiales donde se estandarizaran los criterios de diseño hidráulico, hidrológico y estructural de las obras de drenaje urbano que existían en el conocimiento nacional e internacional, y que éstos se pusieran al alcance de los proyectistas, urbanizadores y profesionales del área. En 2013 fue publicado el *Manual de drenaje urbano* (Ministerio de Obras Públicas [MOP], 2013), elaborado por el DICTUC S.A, por encargo del MOP, recibiendo aportaciones del banco mundial. Además de los profesionales del MOP, en su elaboración participaron investigadores chilenos (Bonifacio Fernández, Jorge Gironás) y extranjeros (Larry Roesner, Ben Urbonas), en sus tres volúmenes se abarcan, actualizan y estandarizan las metodologías, criterios e información disponible para diseñar y construir dispositivos SUDS (pavimentos permeables, zanjas revestidas de vegetación, estanques de infiltración, cubiertas verdes, jardines de aguas lluvia, etc.); del mismo modo, se incorporan antecedentes para complementar el diseño de las obras de drenaje tradicionales.

La publicación del manual de drenaje urbano marca un hito importante en Chile, con relación al drenaje sostenible, pues corresponde a un documento de libre consulta elaborado por investigadores y profesionales del más alto nivel al que los especialistas pueden recurrir, abarcando todas las etapas de las obras de drenaje urbano, desde el desarrollo de proyectos y el diseño, hasta la construcción, mantenimiento de éstas y en el que las medidas estructurales (dispositivos SUDS) y no estructurales son aplicadas a lo largo de todas estas etapas (Figura 2)

Figura 2. Evolución institucional y normativa del drenaje urbano en Chile



Drenaje urbano sustentable en Chile: proyectos de investigación y construcción

La investigación en drenaje urbano en Chile ha avanzado de manera paralela con la evolución institucional y normativa del país, pues los investigadores enfocados en el área de drenaje, urbano junto con los profesionales de los organismos públicos, han participado de la redacción de los manuales y guías de diseño. La investigación en drenaje urbano sustentable ha sido llevada a cabo, en gran medida, por

la Pontificia Universidad Católica de Chile; sobresale la implementación de algunas medidas estructurales SUDS a las condiciones hidroclimáticas del país, en su mayoría mayormente en obras de control en la fuente, destacando las cubiertas verdes, pavimentos permeables y jardines infiltrantes. Con respecto a la investigación en cubiertas verdes, Olate, Gómez, Musalem, Sepúlveda y Ferrer (2011) evaluaron 16 especies nativas de la zona central de Chile para uso en cubiertas verdes. La evaluación consistió en agrupar las especies en condiciones de sombra parcial y exposición total al sol, analizando parámetros durante la época de crecimiento como la resistencia a la sequía, porcentaje de sobrevivencia, tiempo de floración, habilidad para competir contra malezas, costos de mantenimiento, floración, tasa de cobertura, etc.; concluyendo que las plantas nativas chilenas de la zona mediterránea son factibles para utilizar bajo condiciones de techos verdes, destacando las asociaciones de *Glandularia berterii*, *Geum magallanicum* y *Cotula scariosa*. De Solminihac, Videla, Fernandez y Castro (2007), estudiaron en pavimentos permeables, las relaciones agua-cemento, resistencia a la flexión y el contenido de huecos en el hormigón para su uso como pavimento permeable, dentro de sus resultados proponen un contenido de huecos de un 14% para conseguir la permeabilidad esperada, el haber conseguido una resistencia a la flexión 20% superior a la recomendada y un contenido de pasta de cemento óptimo. Posteriormente, Castro, De Solminihac, Videla y Fernández (2009) presentaron una ecuación para dosificar hormigones porosos, analizando 18 mezclas diferentes en función del contenido de vacíos, razón agua cemento, estudiando parámetros como el contenido de huecos, tasa de infiltración, resistencia a la flexotracción y la densidad en estado fresco, proponiendo razones agua cemento entre 0.35 y 0.38.

En jardines infiltrantes Dussailant, Wu y Potter (2004) desarrollaron un modelo numérico que acoplara la ecuación de Richards con modelos de balance de agua superficial con fines de diseño y evaluación de un jardín lluvia. El modelo se validó con datos del sur de Wisconsin (USA) mostrando que se pueden obtener altas tasas de recarga. A la postre Aravena y Dussailant (2009), mediante la modelación con volúmenes finitos desarrollaron un modelo en dos dimensiones que permitiera simular la matriz del suelo, la distribución de agua en el suelo y la percolación en un jardín lluvia, comparándolos con información de un jardín lluvia experimental bajo condiciones controladas. Vargas, Padilla y Schwarz (2015) estudiaron el volumen de captura de agua lluvia de una celda de bioretención

mediante el software WQ-COSM. Otra herramienta para la modelación de superficies vegetadas fue la investigación publicada por Herrera, Gironás, Bonilla, Vera y Reyes (2016), quienes desarrollaron un modelo capaz de representar los procesos hidrológicos a escala residencial para climas mediterráneos llamado IHMORS, el cual permite simular diversas prácticas SUDS como jardines infiltrantes, cubiertas verdes y áreas de retención superficiales.

Existen condominios privados en Chile que han incorporado algunas prácticas SUDS dentro de su diseño para evacuar las aguas lluvias, que corresponden a proyectos emplazados en la periferia de Santiago y están concebidos como urbanizaciones con amplias áreas verdes y espacios recreativos, donde la naturaleza forma parte de la misma urbanización. El sector de Chicureo (norte de Santiago), ha destacado como un lugar donde este tipo de barrios han prosperado, presentando gran demanda por parte de los sectores más acomodados del país, destacando los condominios Piedra Roja y La Reserva. El condominio Piedra Roja se ubica en la periferia de Santiago, en la localidad de Chicureo, construido por la inmobiliaria Manquehue. En la planificación del condominio se observa que la red de drenaje ha sido armonizada con las áreas de recreación, construyéndose una laguna de ocho hectáreas, permitiendo la retención de la escorrentía generada durante tormentas intensas; el agua de la laguna es almacenada y utilizada para fines de riego, actividades acuáticas (kayak, veleros y diversas embarcaciones), y como ecosistema para aves e insectos. El condominio La Reserva, construido en 2004 por la inmobiliaria con el mismo nombre, está ubicado en la localidad de Chicureo; contempla un cauce naturalizado que forma parte de un parque cuyo trazado considera la topografía del sector, construyéndose disipadores de energía y saltos que disminuyen la velocidad del flujo permitiendo la detención y posterior infiltración de la escorrentía.

El proyecto paisajístico fue realizado por Teodoro Fernández junto con Bonifacio Fernández (Fernández, 2004). Además de los condominios privados que empiezan a surgir en Chile, existen iniciativas públicas para construir infraestructuras que contemplen las prácticas SUDS, tales como el Parque D' Agostini (Punta Arenas y el Parque la Aguada (Santiago)), siendo el segundo el más relevante en cuanto al monto invertido y la integración multidisciplinaria academia-estado en lo que respecta a diseño y planificación. El proyecto consiste en un canal y un parque inundable con una laguna permanente, amplias áreas verdes capaces de permitir una inundación controlada

durante tormentas intensas y servir de terreno para deportes, teatros al aire libre, estanque recreacional y deportes acuáticos durante condiciones normales. El proyecto está emplazado en el anillo sur de Santiago, lugar que hace tiempo fue industrial, aledaño a vertederos, donde proliferaba la delincuencia y se encontraba el Zanjón de la Aguada, antiguo canal natural que cruzaba el centro de Santiago (entubado por más de 4 kilómetros), provocando inundaciones que afectan amplias áreas pobladas durante las tormentas invernales. Fue propuesto por el equipo SEREX-UC, relacionando a los ministerios de vivienda y de obras públicas, su monto total es de 53 mil millones de pesos y se licitó en cinco contratos de obra.

Desafíos actuales de Chile en drenaje urbano

Estudios de calidad del agua de lluvia

Las aguas lluvias participan en la contaminación difusa del agua superficial, subterránea y marina, a través del arrastre de contaminantes depositados en la superficie urbana; producto de la descarga de agua lluvia y agua servida desde los sistemas combinados, al ser excedida la capacidad de éstos durante eventos de precipitación. Esta contaminación de los cuerpos receptores provoca problemas de salud en la población y también que el agua del cuerpo receptor no cumpla con los estándares definidos para su uso (bebida, recreación o uso industrial). Las ciudades presentan diversas fuentes contaminantes, proviniendo de la industria, viviendas, automóviles, parques y campos colindantes. Correspondiendo éstas a basuras, suciedad, ramas, hojas, polvo, polen, emisiones industriales (plomo, cadmio, estroncio, zinc, mercurio) e hidrocarburos y aceites.

Los estudios sobre calidad del agua lluvia en Chile se han basado en mediciones esporádicas de los distintos contaminantes presentes en éstas, dependiendo los resultados de las características de la tormenta, del uso de cada cuenca urbana y de la estación del año. En Chile existen

normas que regulan los contaminantes asociados con la descarga de residuos líquidos en aguas superficiales continentales y marinas (Decreto 90, 2001) y aguas subterráneas (Decreto 46, 2003). Montt (2000), y Montt, Rivera y Fernández (2003) monitorearon 12 lugares de Santiago, durante siete tormentas transcurridas en el año 2001, midiendo 37 elementos y obteniendo las concentraciones medias por evento, concentraciones instantáneas, y contrastándolas con los decretos 90 y 46, consiguiendo que el decreto supremo 90 fuera superado en parámetros, como en el caso del aluminio, manganeso, nitrógeno kjeldah total, DBO, sólidos suspendidos y el decreto supremo 46 en aluminio, fierro y plomo. Se plantea la necesidad de elaborar una norma de calidad de agua lluvia donde se establezcan los límites que deben cumplir éstas, antes de que ingresen a los cuerpos receptores y de que se establezca un plan de monitoreo sistemático de la calidad del agua lluvia en las ciudades Chilenas.

Medidas no estructurales

Las medidas no estructurales del drenaje urbano sostenible persiguen la mejora de la calidad y la cantidad de agua en las ciudades, pero a través de la elaboración de normas e instructivos técnicos, instrumentos de planificación territorial y difusión de información a la comunidad. De acuerdo con Lawrence, Marsalek, Ellis y Urbonas (1996), las medidas no estructurales se enfocan en la modificación del uso y las prácticas de disposición de materiales domésticos, uso del suelo y las prácticas de manejo, programas de control de la escorrentía en el sitio, manejo de la acumulación de contaminantes y el manejo de la infiltración en el alcantarillado. Se plantea la necesidad de implementar algunas de las medidas no estructurales, tales como la educación de la comunidad sobre los productos domésticos que son peligrosos, en caso de que éstos arriben a la red de aguas lluvia, es necesario actualizar los planes reguladores de las ciudades para que éstos definan la llanura de inundación donde se evite la construcción en aquellas zonas, se definan y protejan los hábitats acuáticos urbanos; también resulta importante mejorar la fiscalización de las urbanizaciones nuevas para minimizar el potencial de generación de contaminantes que produzcan éstas (el

decreto 40 considera 80 viviendas aisladas o 160 viviendas progresivas para que el proyecto ingrese al SEIA), elaboración de instructivos municipales donde se promueva la desconexión de las áreas impermeables y reducción de éstas en la superficie total de las viviendas, mejora de los planes de barrido de pasajes al igual que las calles, privilegiar el uso de tuberías plásticas, por sobre las de cemento comprimido para la red de drenaje urbano, para evitar la infiltración del agua lluvia a la red de alcantarillado.

Tópicos especializados

A pesar de que Chile presenta varias investigaciones en drenaje urbano, aún requiere avanzar en investigación en otros tópicos que en Norteamérica y Europa se encuentran bastante avanzados; si bien algunos son genéricos, tales como construcción de modelos, otros corresponden a herramientas y prácticas que deberían surgir a partir de las investigaciones realizadas para las ciudades y diferentes climas presentes en el país.

En cuanto a modelación hidrológica se requiere todavía es necesario estudiar el desempeño de las técnicas SUDS en la realidad climática del país, a escala domiciliaria y a escala de ciudad (un ejemplo de ello corresponde a la cuantificación de la retención y detención de la escorrentía de las cubiertas verdes para el clima chileno); pues Chile posee un clima árido y semiárido en la zona norte y centro, lo que implica que la cantidad de precipitación es muy baja y que muy pocos eventos generan escorrentía; donde las obras de drenaje pasan la mayor parte del tiempo sin uso, un clima húmedo en la zona sur, con mucha precipitación lo que produce anegamientos y un uso frecuente de las obras de drenaje; un clima muy frío en el extremo sur, lo que implica que la escorrentía es producida por el derretimiento nival <¿ES CORRECTO?>, donde la red de drenaje y el suelo se encuentran congelados en ciertas épocas del año.

A escala domiciliaria se necesita avanzar en investigación del comportamiento hidrológico de las medidas de control del agua lluvia en la fuente, sobre todo en cubiertas verdes, zanjas revestidas con

vegetación, pavimentos permeables, pozos absorbentes y la aportación de éstos controlando la calidad y cantidad de escorrentía para los diferentes climas del país. A escala de ciudad, se requiere cuantificar el aporte de las prácticas SUDS (estructurales y no estructurales) a escala de ciudad a través de modelos hidrológicos e hidráulicos (como el Storm Water Management Model SWMM u otros). Pues a pesar de que en las ciudades chilenas de mayor población se elaboran planes maestros de aguas lluvia, no se observa que las prácticas SUDS hayan sido consideradas en la planificación de éstos, no se ha evaluado la mejora en la calidad del agua lluvia ni la disminución de la sobrecarga hidráulica en cauces y colectores de aguas lluvia, a raíz de la implementación de estas prácticas.

Una herramienta que debería desarrollar Chile corresponde a la técnica de desagregación temporal y espacial de la precipitación diaria. En la mayoría de los países se informa la precipitación caída en un día, sin embargo, para aplicaciones en hidrología urbana se requiere de una resolución temporal superior (subhoraria). Los modelos de desagregación temporal y espacial han sido estudiados en la literatura, por autores como Demetris Koutsoyiannis, Christian Onof, Jonas Olsson, etc. Algunas de estas investigaciones han sido capitalizadas en software como el HYETOS (Koutsoyiannis & Onof, 2000), MuDRain (Koutsoyiannis, 2003), Stormpac (Onof, Townend, & Kee, 2005), entre otros. No obstante, estos softwares han sido desarrollados para países de Europa (Reino Unido y Grecia), por lo que su uso en Chile sería cuestionable. La investigación y desarrollo de un software libre, calibrado para las distintas regiones del país, que pudiese generar series subhorarias de precipitación para Chile (en cualquier punto), sería muy útil en estudios de modelación hidrológica a escala domiciliaria y ciudad, así como también en estudios de erosión. Otras prácticas que deberían surgir, producto de la investigación, corresponden a la mejora en la administración de los cauces urbanos y a un avance en el control en tiempo real de la red de drenaje. Para esto es necesario implementar una red de monitoreo continuo de la escorrentía, calidad de agua y además sedimentos, coliformes fecales, especies vertebradas e invertebradas presentes en los cauces, a fin de tomar medidas que contribuyan a evitar la degradación morfológica, biótica y rehabilitar los cauces degradados. Este monitoreo continuo permitiría avanzar hacia una fase de control en tiempo real de la red de drenaje, es decir, que parte de esta red pueda operar de manera automática administrando la infraestructura existente (compuertas,

estanques de retención, válvulas, plantas elevadoras, etc.) frente a ciertos eventos de precipitación, previniendo los anegamientos y la descarga de contaminantes a los cuerpos receptores.

Conclusiones

Mediante un análisis de tendencia realizado a través del Test Mann-Kendall se observó que existen estaciones pluviométricas aguas abajo de zonas urbanizadas (Santiago y San José de Maipo), que presentan alzas en sus escurrimientos máximos, promedios anuales y se presume que la causa más probable corresponde al aumento de la superficie urbanizada.

Chile creó su institucionalidad en materia de aguas lluvias a través de la Ley 19525 publicada en 1997, en un contexto de severas inundaciones acaecidas en el mismo año, esta ley le asignó al Ministerio de Obras públicas (MOP) y al Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), las responsabilidades sobre las redes primarias y secundarias de aguas lluvia respectivamente. Muchas de las nuevas prácticas en drenaje urbano sostenible (SUDS) que surgieron en la década de los 90 en Estados Unidos se ven plasmadas, primero, en la guía de diseño *Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvia en sectores urbanos* publicada en 1996 y después, con la publicación del *Manual de drenaje urbano*, en 2013, que recopila el conocimiento y las herramientas disponibles en la literatura científica para la planificación, diseño, construcción y mantenimiento de las obras de drenaje urbano.

La investigación que ha llevado a cabo Chile se ha centrado mayoritariamente en la modelación de obras de control del agua lluvia en la fuente (SUDS) y ha sido llevada a cabo en su mayor parte por la Pontificia Universidad Católica de Chile; no obstante, mucha de la investigación no se consideró en la elaboración de normativa hasta la aparición del *Manual de drenaje urbano*, en 2013.

El parque La Aguada corresponde al proyecto público de mayor envergadura, pues considera los conceptos del drenaje urbano sostenible dentro de su planificación y reemplaza a una obra obsoleta de drenaje tradicional. En las urbanizaciones, sólo en las de mayor valor

monetario <poder adquisitivo> se observa que consideren algunos principios SUDS dentro de su planificación, por lo que es necesario que estos conceptos sean masificados a otras urbanizaciones en el país, pudiendo ser considerados para la planificación de grandes conjuntos de viviendas sociales o residenciales de menor costo, que son las que usualmente se ven afectadas por los anegamientos y la contaminación.

Los desafíos actuales para Chile en materia de drenaje urbano, se centran, en su mayoría, en la calidad del agua lluvia, medidas no estructurales y tópicos más especializados del área, como el estudio del desempeño de las medidas estructurales SUDS a la realidad climática del país, a través de modelación hidrológica e hidráulica a escala domiciliar y de ciudad, en la desagregación temporal y espacial de la precipitación diaria, en la elaboración de planes de conservación-rehabilitación de cauces urbanos y en el desarrollo de la investigación orientada hacia un control en tiempo real de la red de drenaje.

Agradecimientos

Ambos autores desean expresar su agradecimiento tanto a Conycit, por el financiamiento dado a través del proyecto Conycit/Fondap 15130015, como a los revisores anónimos, cuyas sugerencias contribuyeron significativamente a mejorar este documento. Además, el autor, Javier Camaño agradece el financiamiento otorgado a través de la Beca Conycit, Doctorado Nacional.

Referencias

Aravena, J. E., & Dussailant, A. (2009). Storm-water infiltration and focused recharge modeling with finite-volume two-dimensional Richards equation: Application to an experimental rain garden. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(12), 1073-1080.

De Solminihac, H., Videla, C., Fernandez, B., & Castro, J. (2007). Porous concrete mixtures for pervious urban pavements. *Materiales de Construcción*, 57(287), 23-36.

Castro, J., de Solminihaq, H., Videla, C., & Fernández, B. (2009). Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón. *Revista Ingeniería De Construcción*, 24(3), 271-284.

Decreto 90. Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Ministerio Secretaría General de la Presidencia. 07 de Marzo de 2001. Recuperado de <http://bcn.cl/1v03z>.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2000). Decreto 90. *Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales*. Recuperado de <http://bcn.cl/1v03z>

Decreto 46. Establece norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas. Ministerio Secretaría General de la Presidencia. 17 de Enero de 2003. Recuperado de <http://bcn.cl/1v0c9>

Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2002) Decreto 46. *Establece norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas*. Recuperado de <http://bcn.cl/1v0c9>

Decreto 40. Aprueba reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental. Ministerio del Medio Ambiente. Santiago, Chile. 12 de Agosto de 2013. Recuperado de <http://bcn.cl/1uvq>.

Decreto 47. Fija el nuevo texto de la ordenanza general de la ley general de urbanismo y construcciones. Ministerio de Vivienda y urbanismo. Santiago, Chile. 05 de Junio de 1992. Recuperado de <http://bcn.cl/1uvyr>.

Ministerio de Vivienda y urbanismo. (1992). Decreto 47, *Fija el nuevo texto de la ordenanza general de la ley general de urbanismo y construcciones*. Recuperado de <http://bcn.cl/1uvyr>

Decreto con fuerza de ley 458. Aprueba nueva ley general de urbanismo y construcciones. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Santiago, Chile. 13 de Abril de 1976. Recuperado de <http://bcn.cl/1uuhi>.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (1975). Decreto con fuerza de ley 458. *Aprueba nueva ley general de urbanismo y construcciones*. Recuperado de <http://bcn.cl/1uuhi>.

Dussailant, A. R., Wu, C. H., & Potter, K. W. (2004). Richards equation model of a rain garden. *Journal of Hydrologic Engineering*, 9(3), 219-225.

Fernández, B. (2004). Drenaje de aguas lluvias urbanas en zonas semiáridas. *Arq (Santiago)*, (57), 64-67.

Herrera, J., Gironás, J., Bonilla, C., Vera, S., & Reyes, R. (2016). A hydrological model to study the performance and irrigation of stormwater facilities. Moving towards an integrated and sustainable urban water management. *Novatech*. NO TIENE VOLUMEN NI NÚMERO

Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*. London, UK: Charles Griffin.

Koutsoyiannis, D., & Onof, C. (2000). A computer program for stochastic disaggregation using adjusting procedures. Millennium Conference on Earth, Planetary & Solar Systems Sciences. XXV General Assembly of European Geophysical Society. Nice, France.

Koutsoyiannis, D., & Onof, C. (2000). A computer program for stochastic disaggregation using adjusting procedures, *25th General Assembly of the European Geophysical Society, Geophysical Research Abstracts*, 2. DOI: [10.13140/RG.2.2.33488.10243](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33488.10243)

Koutsoyiannis, D. (2003). Rainfall disaggregation methods: Theory and applications. En: Piccolo, D., Ubertini, L. (eds.) *Proceedings, Workshop on Statistical and Mathematical Methods for Hydrological Analysis* (pp. 1-23). Rome, Italy: Università di Roma "La Sapienza".

Lawrence, A. I., Marsalek, J., Ellis, J. B., & Urbonas, B. (1996). Stormwater detention & BMPs. *Journal of Hydraulic Research*, 34(6), 799-813.

Ley 19.300. Aprueba ley sobre bases generales del medio ambiente. Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Santiago, Chile. 09 de Marzo de 1994. Recuperado de <http://bcn.cl/1ux38>

Ley sobre bases generales del medio ambiente de 1994, *Ministerio Secretaría General de la Presidencia* § 19300. Recuperado de <http://bcn.cl/1ux38>

Ley 19.525. Regula sistemas de evacuación y drenaje de aguas lluvia. Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile. 10 de Noviembre de 1997. Recuperado de <http://bcn.cl/1vd2g>

Regula sistemas de evacuación y drenaje de aguas lluvia de 1997, *Ministerio de Obras Públicas* § 19525. Recuperado de <http://bcn.cl/1vd2g>

Ley 20417. Crea el ministerio, el servicio de evaluación ambiental y la superintendencia del medio ambiente. Ministerio Secretaría General de

la Presidencia. Santiago, Chile. 26 de Enero de 2010. Recuperado de <http://bcn.cl/1v6dk>

Crea el ministerio, el servicio de evaluación ambiental y la superintendencia del medio ambiente de 2010. *Secretaría General de la Presidencia* § 20417. Recuperado de <http://bcn.cl/1v6dk>

Ley 18695. Ley orgánica constitucional de municipalidades. Ministerio del Interior. Santiago, Chile. 31 de Marzo de 1988. Recuperado de <http://bcn.cl/1v1qu>

Ley orgánica constitucional de municipalidades de 1988, *Ministerio del Interior* § 18695. Recuperado de <http://bcn.cl/1v1qu>

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 13(3), 245-259.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (1996). *Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos*. Recuperado de http://www.minvu.cl/opensite_det_20070317115825.aspx.

Ministerio de Obras Públicas. (2013). *Manual de drenaje urbano*. Recuperado de <http://www.doh.gov.cl/manualdrenajeurbano/Paginas/default.aspx>

Montt, J. (2000). *Antecedentes empíricos y modelación de la calidad de las aguas lluvias urbanas*. Santiago, Chile: Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Montt, J., Rivera, P., Fernández, B., & Valenzuela, R. (2003). *Caracterización de la calidad de las aguas lluvias urbanas de Santiago*. XVI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Chile.

Olate, E., Gómez, M. F., Musalem, M., Sepúlveda, C., & Ferrer, J. M. (2011). *Evaluation of native species for use in green roofs in the semiarid Mediterranean region of central Chile*. VII International Symposium on New Floricultural Crops 1000. DOI: 10.17660/ActaHortic.2013.1000.21.

Onof, C., Townend, J., & Kee, R. (2005). Comparison of two hourly to 5-min rainfall disaggregators. *Atmospheric Research*, 77(1), 176-187.

Vargas, J., Padilla, C., & Schwarz, A. (2015). Determination of the volume of stormwater capture for bioretention systems in Concepcion (Chile). E-Proceedings of the 36th IAHR World Congress. International Association of Hydrological Sciences. The Hague, Netherlands.

Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., & Shaffer, P. (2007). *The SUDS manual*. London, UK: Ciria.