

# **SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

## **XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

### **EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO A LARGO PLAZO Y LOS BENEFICIOS ECONÓMICOS DE LOS SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SUSTENTABLE MEDIANTE SIMULACIÓN CONTINUA**

**VALENTINA CERDA<sup>1</sup>**  
**JORGE GIRONÁS<sup>2</sup>**  
**OSHEEN<sup>3</sup>**

#### **RESUMEN**

Las superficies urbanas reducen la infiltración, limitan la capacidad de almacenamiento y alteran las vías naturales de drenaje, lo que aumenta los caudales máximos y los volúmenes de escorrentía directa, y altera el régimen hidrológico general. Para abordar estos impactos se promueve los Sistemas de Drenaje Urbano Sustentable (SUDS), que ofrecen un enfoque para la gestión local de la escorrentía y preservar la respuesta natural lluvia-escorrentía. Este trabajo presenta el uso de la simulación continua para evaluar los beneficios y estimar, al menos parcialmente, la rentabilidad económica de los SUDS. El modelo Stormwater Management Model (SWMM) se aplica para simular de manera continua el rendimiento a largo plazo de SUDS diseñados para el área de San Eugenio, un barrio céntrico de la ciudad de Santiago. Los resultados de estas simulaciones no solo brindan información valiosa para evaluar alternativas de diseño que replican el régimen hidrológico natural, sino también para evaluar la rentabilidad económica de estas alternativas, considerando beneficios como la reducción de fallas esperadas en un sistema de alcantarillado combinado, la reducción de los tiempos de viaje vehicular en calles, y la disminución de anegamientos y molestias para peatones. La implementación de SUDS en el área de estudio reduce potencialmente las demoras en el transporte urbano en más del 50% y aumenta el control de los potenciales eventos de descarga de sistemas unitarios desde un 14% al 97,6%, con una rentabilidad anual proyectada de US\$ 45,536 por la disminución de las interrupciones relacionadas con las inundaciones. Este estudio enfatiza la utilidad de la simulación continua para cuantificar beneficios al largo plazo de los SUDS y promover eficazmente su adopción.

---

<sup>1</sup> Ingeniera Civil, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile

<sup>2</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile; Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS); Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN); Centro Interdisciplinario de Cambio Global UC- email: [jgironas@uc.cl](mailto:jgironas@uc.cl)

<sup>3</sup> Postdoctoranda, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile; Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS)

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo urbano altera significativamente los procesos hidrológicos. La mayor impermeabilidad y los cambios a la red drenaje provocan un aumento de la escorrentía directa, mayores caudales máximos y tiempos de respuesta más cortos, lo que contribuye a problemas generalizados de anegamiento (Bisht et al., 2016) y altera significativamente los regímenes de caudal y los patrones hidrológicos (Liu et al., 2023). Para abordar en parte estos impactos, se han propuesto los Sistemas de Drenaje Urbano Sustentable (SUDS) como estrategia para la gestión de la escorrentía urbana (Fletcher et al., 2015). Mediante técnicas de infiltración y almacenamiento, las SUDS buscan controlar localmente los volúmenes de escorrentía y los caudales máximos, junto con minimizar el lavado de contaminantes (e.g., Cipolla et al., 2016; Gao et al., 2021; D'Ambrosio et al., 2022; Lin et al., 2023; Tansar et al., 2024). Además, los SUDS ofrecen diversos beneficios ecosistémicos, como la creación y protección de hábitat, la mitigación del cambio climático, la mejora estética, y entrega de oportunidades recreativas y educativas (e.g., Lähde et al., 2023; Prudencio y Null, 2018).

Desgraciadamente, la mayoría de los estudios sobre el desempeño de SUDS se han realizado en ciudades de los EE. UU., Europa, China, Canadá y Australia, mientras que en países del Sur Global, como Chile, la implementación de SUDS sigue siendo limitada. Sin embargo, en nuestro país se está enfatizando el uso de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) para la gestión de inundaciones urbanas y aguas lluvias (Cacciuttolo et al., 2023; Hernández-Moreno y Reyes-Paecke, 2018; Herrera et al., 2017; Herrera et al., 2018; Vásquez et al., 2016). En consecuencia, es crucial desarrollar y probar metodologías para evaluar los costos y beneficios de la implementación de SUDS en Chile, de modo de promover su uso en un contexto de limitaciones presupuestarias y con un enfoque consolidado principalmente basado en la conducción a través colectores de aguas lluvia.

En hidrología urbana, la transformación lluvia-escorrentía implica simulaciones de eventos con tormentas de diseño que reflejan las condiciones propias del área de estudio (Pathiraja et al., 2012). La tormenta de diseño se crea usando curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) con período de retorno y duración predeterminados, y la transformación permite obtener un caudal máximo o un hidrograma de diseño (Grimaldi et al., 2012). Un enfoque más integral para la transformación lluvia-escorrentía es la simulación continua (e.g., Guo y Adams, 1999; Zegpi y Fernández, 2010), la que utiliza registros continuos de lluvia para generar series continua de variables hidrológicas. Este enfoque considera explícitamente la humedad del suelo antecedente, la evapotranspiración y otras variables que afectan la respuesta frente a las distintas lluvias (Pathiraja et al., 2012). Los resultados de una simulación continua pueden ser usados para evaluar integralmente el rendimiento del sistema al largo plazo y frente al régimen completo de tormentas, mediante curvas de frecuencia de caudal máximo y volumen de escorrentía, curvas de duración de caudal, etc. En concreto, se puede evaluar la respuesta del sistema frente a lluvias frecuentes que a menudo causan disfuncionalidades urbanas e impactos ambientales, como el lavado y transporte de contaminantes y la erosión de cauces, más no grandes inundaciones urbanas. Estos impactos comúnmente se desprecian en los enfoques de diseño tradicionales orientados a la evaluación y diseño con eventos significativos, relevantes para la infraestructura y la seguridad pública (Akan y Houghtalen, 2003).

Hidalgo-Monroy et al. (2022) indicaron que, aunque los SUDS son viables, enfrentan desafíos institucionales y de mantenimiento en Chile. Estas barreras pueden mitigarse mediante evaluaciones socioeconómicas adecuadas (Osheen et al., 2024; Pugliese et al., 2021). Diversos estudios han cuantificado sus beneficios económicos usando metodologías variadas (e.g., Ashley et al., 2018; Vincent et al., 2017; Zhang et al., 2012). Zhang et al. (2012) estimaron beneficios por reducción de escorrentía en espacios verdes urbanos, incluyendo costos evitados. Ashley et al. (2018) aplicaron la herramienta BeST en Europa, y Yaron y Wilson (2020) usaron métodos participativos en Myanmar. Zanini et al. (2024) valoraron nueve servicios ecosistémicos, destacando calidad del agua y recreación, y el aporte de humedales al suministro hídrico.

A partir de la simulación hidrológica continua, este estudio evalúa el desempeño de SUDS, y cuantifica sus beneficios económicos mediante el análisis de la reducción de los diversos impactos detectados a partir de esta simulación. En particular, se propone el uso de simulación continua para cuantificar el efecto de los SUDS precisamente sobre las lluvias más frecuentes, de periodo de retorno menor al anual, frente a las cuales este tipo de soluciones son más efectivas. Para esto se modelan distintas alternativas de diseño en una cuenca urbana ubicada en Santiago, Chile, las que consideran distintos criterios y se dimensionan usando lluvias de diseños. Por otra parte, la evaluación de estas alternativas, así como de los casos pre-urbanización y urbano sin control se realiza con simulación continua. Los resultados de estas simulaciones son utilizados para la caracterización del desempeño, y para evaluar y cuantificar económicamente, cuando es posible, los impactos de la urbanización y los beneficios de las alternativas SUDS.

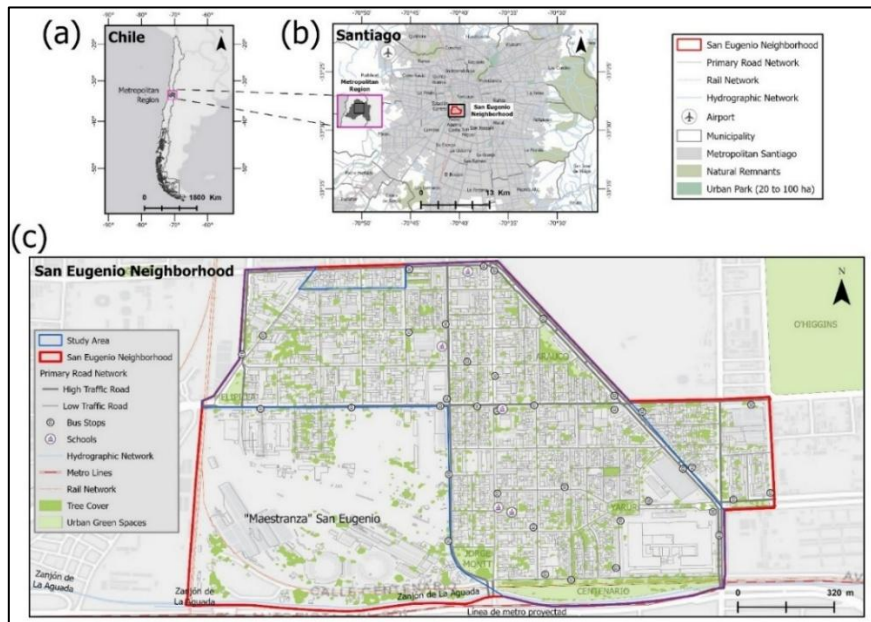
## **2. ÁREA DE ESTUDIO**

El barrio San Eugenio, ubicado al suroeste de Santiago centro a ~570 m s.n.m., es una zona residencial y patrimonial de ~1 km<sup>2</sup> con clima mediterráneo y lluvias invernales esporádicas (Figura 1). La precipitación anual promedio en Santiago es de ~290 mm, concentrada en 20 a 30 días (MOP, 2013), con eventos de 2 a 5 horas y, en un 80 %, inferiores a 20 mm (CADE-IDEPE, 2001; Rivera et al., 2005). Dado que los SUDS son adecuados para tormentas de baja-media intensidad (Wang et al., 2022), su implementación resulta apropiada en esta zona. Además de gestionar aguas lluvias, los SUDS aportan beneficios como mejor calidad del aire, reducción de contaminación, mitigación de olas de calor, mayor biodiversidad, recarga de acuíferos y control de inundaciones (Viecco et al., 2021; Mora-Melià et al., 2018; Cacciuttolo et al., 2023), lo que los convierte en una opción valiosa para barrios como San Eugenio, con limitada infraestructura verde.

## **3. DATOS Y MODELAMIENTO EN SWMM**

El Stormwater Management Model (EPA-SWMM) es un modelo dinámico semi-distribuido para la simulación continua y basada en eventos de procesos lluvia-escorrentía, lo que permite evaluar la cantidad y calidad de la escorrentía en sistemas de drenaje urbano (Rossman, 2010), así como el desempeño de infraestructura gris convencional y de SUDS (e.g. celdas de biorretención, pavimentos permeables, zanjas de infiltración, estanque de retención). LOS SUDS son modeladas representando los procesos de captura, detención,

infiltración y evapotranspiración, usando una configuración de múltiples capas verticales con sus respectivas propiedades (Cipolla et al., 2016; Rossman y Huber, 2016a).

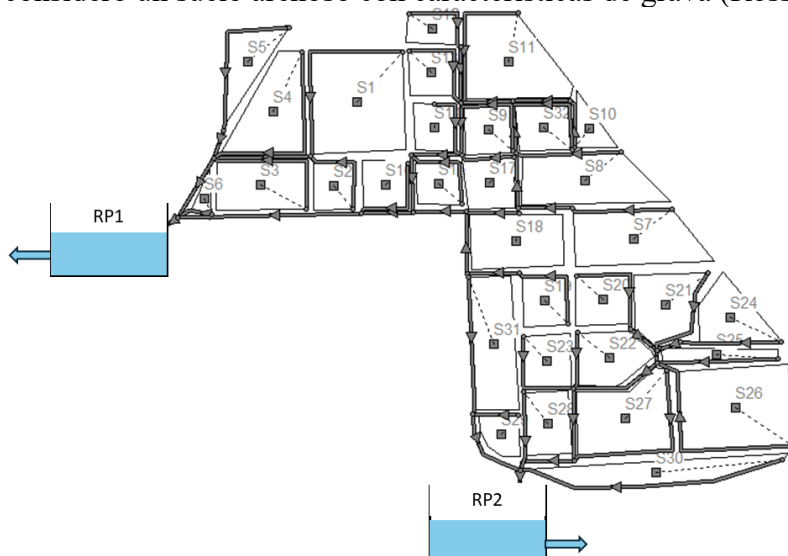


**Figura 1.** Mapa del área de estudio que indica (a) Chile (b) Santiago en la Región Metropolitana (c) Barrio San Eugenio

La construcción de los modelos SWMM requirió de un Modelo Digital de Elevación de 12,5 m de resolución espacial proveniente del Alaska Satellite Facility (ASF) para obtener las características del terreno. Los datos de precipitación se obtuvieron de registros de la estación DGA Terraza Oficinas (DGA, 2020), del cual se obtuvieron los máximos anuales de 1985 a 2018, y del estudio de Zegpi y Fernández (2010) que reporta precipitación cada 10 min entre 1917 y 1960 en la estación Quinta Normal. Finalmente, la información para modelar el suelo se obtuvo de MOP (2013) y Rossman y Huber (2016b). La cuenca se discretizó en 32 subcuencas para simular la respuesta lluvia-escorrentía en SWMM (Figura 2). Los atributos claves de estas subcuencas, incluyendo área, porcentaje de impermeabilidad y la implementación y nivel de cobertura de las distintas SUDS -definidas como LID, low-impact development en SWMM- que incluyen celdas de biorretención, pavimentos permeables y zanjas, se encuentran detallados en Cerda et al. (2025). Adicionalmente, se integraron en el modelo dos estanques de retención (RP1 y RP2) para atenuar los caudales máximos en las dos salidas del sistema de drenaje (Figura 2). El diseño detallado de estos estanques y sus estructuras de salida también se encuentra disponible en la publicación de Cerda et al. (2025). Este diseño busca reducir los caudales máximos posteriores al desarrollo urbano, a los valores esperados en las condiciones previas al desarrollo para el mismo período de retorno.

Se construyeron tres modelos SWMM para representar diversos escenarios de desarrollo en el sitio de estudio: (1) el modelo post-urbanización, que refleja las condiciones urbanas actuales sin sistemas de alcantarillado y sin contribución de escorrentía desde áreas adyacentes; (2) el modelo pre-urbanización, que simula las condiciones previas a la existencia del barrio; y (3) un modelo SUDS que integra las distintas soluciones SUDS. En

todos los modelos la infiltración se simuló con la ecuación de Horton Modificada, y se consideró un suelo arenoso con características de grava (Rossman y Huber, 2016b).



**Figura 2.** Mapa de drenaje del área de estudio implementado en SWMM

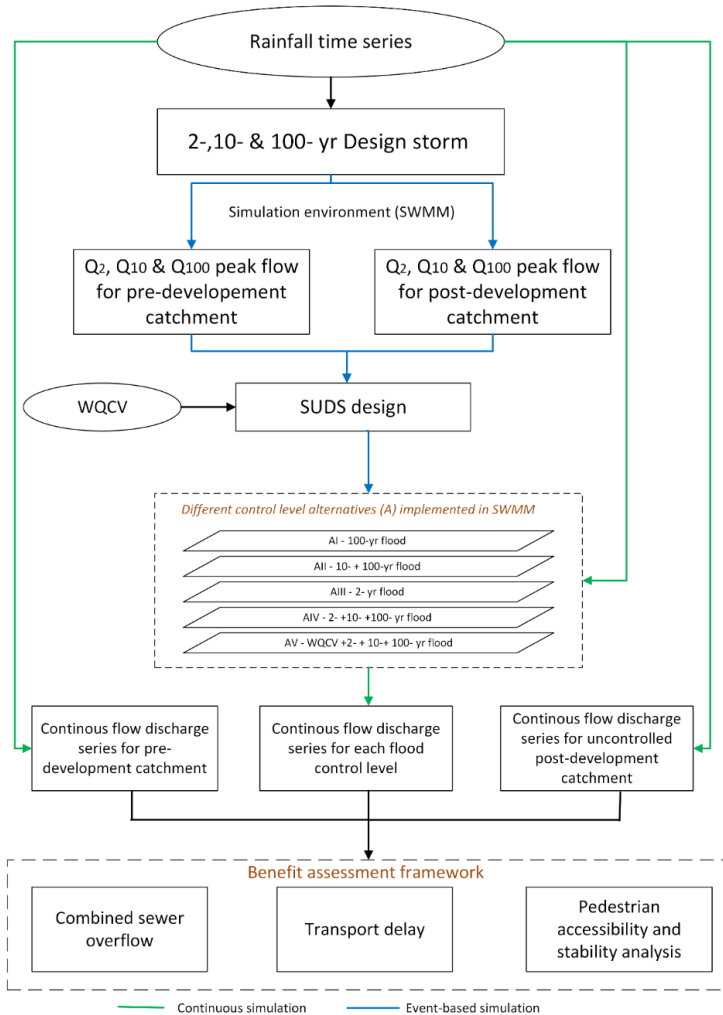
#### 4. METODOLOGÍA

La metodología de trabajo (Figura 3) considera el diseño de SUDS mediante un enfoque clásico basado en eventos, mientras que las simulaciones continuas se utilizan para evaluar su rendimiento y cuantificar sus beneficios (Cerd et al., 2025). La simulación continua durante 44 años, cada 10 min, proporcionó información sobre el rendimiento a largo plazo de los SUDS, lo que permitió la evaluación de beneficios económicos e impactos operativos no solo de las condiciones máximas anuales (i.e. con periodos de retorno de 1 o más años), sino frente a evento más frecuentes. Estos impactos y beneficios incluyen la reducción de DSUs, mejoras en los tiempos de viaje y mejoras en accesibilidad y estabilidad peatonal. Para evaluar el rendimiento a largo plazo de las alternativas de diseño de SUDS en el control de caudales máximos usando, se definió un tiempo mínimo seco entre eventos distintos de precipitación (IETD) de 30 h, tal como lo proponen Zegpi y Fernández (2010).

##### 4.1. Diseño SUDS

Se diseñó un conjunto de SUDS para controlar distintos caudales máximos, y en un caso, el volumen de captura para el control de la calidad (VCCC), lo que implica gestionar los volúmenes de escorrentía de tormentas frecuentes (MOP, 2013). Para Santiago, el VCCC corresponde al volumen de escorrentía producido por 10 mm de precipitación sobre el área impermeable (Herrera et al., 2017; MOP, 2013). Se determinaron tormentas de diseño propias de eventos frecuentes (2 años), ocasionales (10 años) y extremos (100 años), con duraciones que coinciden con el tiempo de concentración de la cuenca y las intensidades obtenidas de las curvas IDF generadas con las precipitaciones diarias máximas anuales. Estas tormentas se usaron para el diseño de las distintas alternativas SUD con objeto de reducir los caudales de salida a los niveles pre-urbanas (Tabla 1). Las Alternativas I y II incorporan estanques de retención para reducir los caudales máximos de 10 y 100. La Alternativa III controla el caudal máximo de 2 años mediante la infiltración de escorrentía usando. Las

Alternativas IV y V combinan el uso de estanques de retención e infiltración para reducir los caudales máximos de 2, 10 y 100 años. Finalmente, la Alternativa V también incluyendo el control de VCCC y su liberación lenta dentro de 24 a 48 h.



**Figura 3.** Diagrama de flujo de la metodología (Cerde et al., 2025)

#### 4.2. Evaluación de beneficios con simulación continua

Los resultados de la simulación continua incluyen variables hidrológicas clave (e.g., caudal, la velocidad y la profundidad del agua), usadas para evaluar los beneficios de las alternativas SUDS en el control de escorrentía. Su eficacia se evalúa comparando los resultados de la simulación continua del modelo post-urbano no controlado con los obtenidos para las distintas alternativas. Esta comparación permitió cuantificar la reducción de los impactos de la escorrentía, lo que sirvió como medida de los beneficios asociados a los SUDS. Estas reducciones se incorporaron a un marco de evaluación de beneficios, donde se cuantificaron y monetizaron, cuando fue posible. La Tabla 2 describe las categorías de problemas de escorrentía urbana analizados, la variable hidrológica/hidráulica específica derivada de la simulación continua y la unidad utilizada para cuantificar los beneficios en términos económicos. Estas métricas proporcionan una base para evaluar la viabilidad a largo plazo y el impacto económico de los SUDS en la gestión de aguas pluviales urbanas.

**Tabla 1.** Resumen de alternativas de SUDS diseñadas con simulaciones basadas en eventos

<b>Alternativa</b>	<b>Nivel de control de inundaciones</b>	<b>Práctica primaria</b>	<b>Elementos clave</b>	<b>Descripción</b>
I	100 años	Retención	Estanques de retención (ER)	Ubicados en salidas de la urbanización, con orificios para controlar caudales máximos de 100 años.
II	10 y 100 años	Retención	ER	Ubicados en salidas de la urbanización, con orificios y vertederos para controlar caudales máximos de 10 y 100 años
III	2 años	Infiltración	Celdas de biorretención (CB), zanjas (Z) y pavimentos permeables (PP)	Control local de caudales máximos de 2 años
IV	2, 10 y 100 años	Infiltración y retención	CB, Z y PP	Alternativas II y III combinadas para control de caudales máximos de 2, 10 y 100 años
V	2, 10 y 100 años, incluido WQCV	Infiltración y retención	CB, Z, PP y ER	Alternativa IV modificada con un orificio adicional para el control del VCCC en estanques de retención

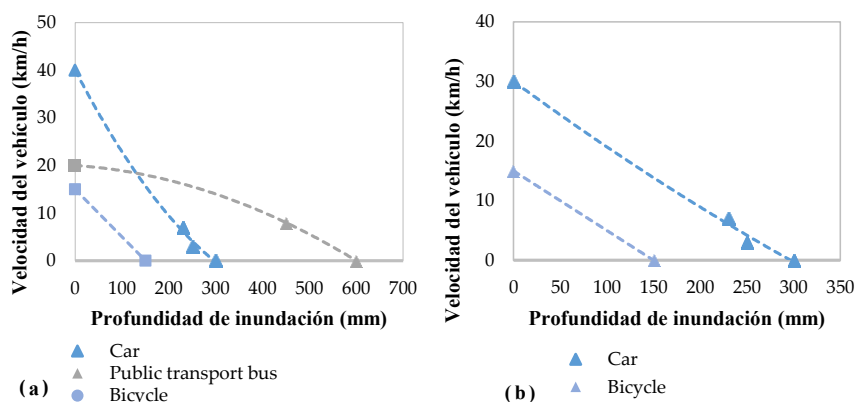
**Tabla 2.** Categorías de problemas analizadas para la evaluación de beneficios utilizando resultados de simulación continua

<b>Categoría del problema</b>	<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad de evaluación anual</b>
Descarga de Sistemas Unitarios (DSUs)	Caudal máximo de salida (m <sup>3</sup> /s)	Mide la frecuencia de DSUs	Número de DSUs
Interrupción del tráfico	Altura de agua (m)	Evalúa retrasos en tiempos de viaje por reducción de la velocidad vehicular	Horas de retraso en transporte
Duración de anegamientos	Altura de agua (m)	Cuantifica la duración de anegamientos en calles	Horas de anegamiento en calles
Peligro para la seguridad de los peatones	Altura de agua (m) y velocidad (m/s)	Evalúa el tiempo de riesgo peatonal por flujo en calles	Horas de nivel de riesgo peatonal medio/alto

Un evento de DSU ocurre cuando el caudal excede la capacidad del sistema de alcantarillado unitario, lo que provoca descargas de aguas pluviales y residuales sin tratar a cuerpos de agua

cercanos (NACTO, 2017). Para este estudio, se analizó la recurrencia de DSU suponiendo la existencia de un alcantarillado unitario que recolecta toda la escorrentía urbana. Se calculó un caudal de diseño constante de aguas residuales de 15 l/s que, según la normativa chilena, podría transportarse con una tubería de 200 mm (INN, 1999). Utilizando la ecuación de Manning, se calculó el diámetro de tubería necesario para gestionar los caudales máximos de cada evento de lluvia en el registro continuo, junto con el caudal sanitario de diseño. La recurrencia de DSUs se evaluó contando el número de eventos de escorrentía que la tubería de alcantarillado puede acomodar para cada diámetro considerado. Además de implementar el enfoque anterior utilizando tanto las condiciones no controladas como las alternativas SUDS, también se evaluó el impacto sobre la frecuencia de DSUs que tendría un 10% de desconexión de del Área Impermeable (IAD). Este escenario se utiliza para comprender la sensibilidad del rendimiento del sistema a simples ajustes del área impermeable en vez de la implementación formal de SUDS siguiendo criterios de diseño específicos.

Para cuantificar las interrupciones del tráfico debido a la escorrentía urbana, se aplicaron las relaciones profundidad de agua en la calle vs. velocidad vehicular siguiendo la metodología propuesta por Pregolato et al. (2017). Estas curvas se definen según tipos de calle para automóviles, buses y bicicletas, y utilizó la información levantada en estudios previos (Mora et al., 2021; Pregolato et al., 2017; Vecchio et al., 2020) para la construcción de estas en la zona de estudio (Figura 4).



**Figura 4.** Relaciones profundidad de agua vs. velocidad vehicular en calles con (a) mucho tráfico y (b) poco tráfico.

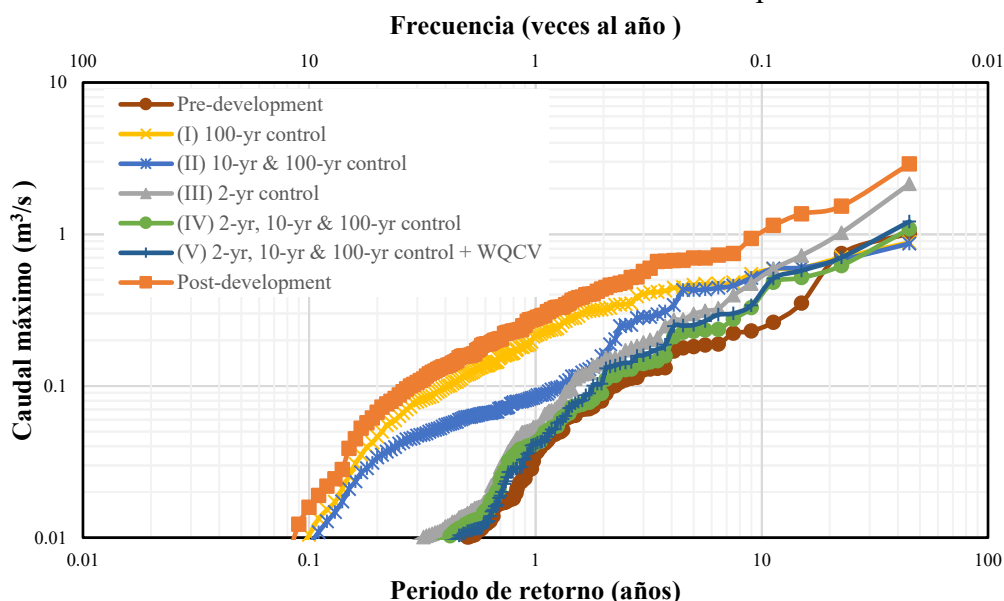
Usando estas relaciones y la profundidad de agua en cada instante según las simulaciones continuas, se estimaron las reducciones de velocidad en relación con condiciones secas en las seis calles con tráfico relevante. Luego se estimaron las demoras en el transporte y se evaluó su disminución con el proyecto SUDS. Los supuestos clave incluyeron: (1) cada 30 min, un auto, una bicicleta y un bus recorren cada tramo de la vía a velocidad constante; (2) durante las lluvias, la velocidad se ajusta, y es constante, en cada tramo de calle; (3) la reducción de velocidad se atribuye solo a la escorrentía; y (4) no hay interacción entre los distintos tramos de calle. Finalmente, el valor social de la reducción del tiempo de viaje se estima considerando un valor social del tiempo de \$3.114 por hora y pasajero (MDSF, 2024), junto con valores específicos asignados a otras variables relacionadas con el flujo medio vehicular y las tasas medias de ocupación por modo presentadas por Cerda et al. (2025).

Para el análisis de duración de anegamientos, se usaron las profundidades de aguas en calles de la simulación. Una calle se asume anegada si el ancho superficial del flujo en ella excede 1 m (MOP, 2013), ancho que permite cruzar la cuneta con cierta seguridad. Así entonces, se contabilizó el tiempo durante el cual las calles tuvieran más de 4 cm de agua, al asumirse una pendiente de bombeo del 4%. Por otra parte, se evaluó los impactos sobre la estabilidad de los peatones, los que se ven afectados por alturas y/o velocidades de flujo altas en las calles (Russo et al., 2013). Esto se hizo cuantificando la cantidad de tiempo en la simulación continua en que las velocidades de flujo  $v$  (m/s) para distintos niveles de peligro propuestas por Russo et al. (2011) se presentaran en cada calle. Estas condiciones son:  $v \geq 1,88$ ;  $1,5 \leq v \leq 1,88$ ; y  $v \leq 1,5$  para niveles de peligro alto, moderado y bajo, respectivamente.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Frecuencia máxima de salida y el papel de los SUDS

La Figura 5 muestra la curva de frecuencia de caudales máximos obtenida desde los tres modelos con condiciones de pre-urbanización, post-urbanización, y post-urbanización con SUDS. Para el último modelo se evalúan las 5 alternativas presentadas en la Tabla 1.



**Figura 5.** Curva de frecuencia de caudales máximo para condiciones previas y posteriores a la urbanización, considerándose además las distintas alternativas de diseño SUDS.

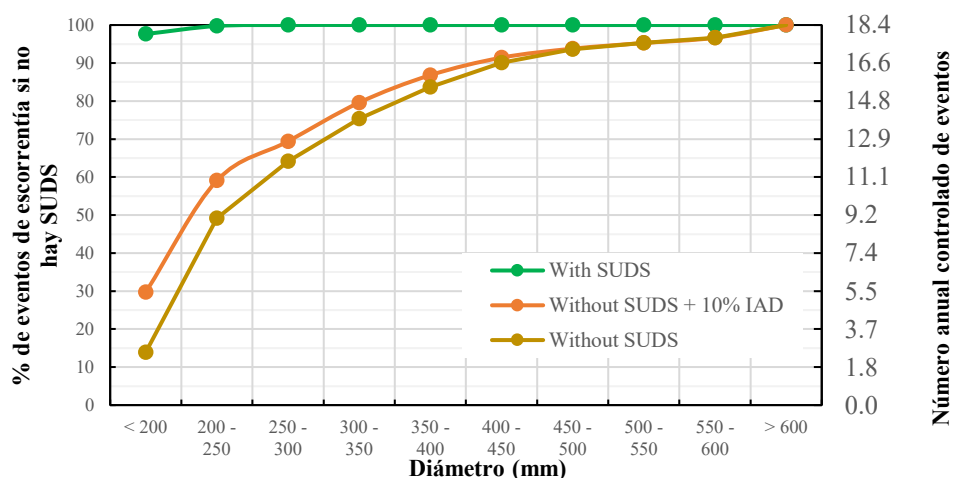
Se observa una clara progresión de la curva según escenarios, lo que ilustra las diferencias en la respuesta hidrológica asociadas a la urbanización y las diversas estrategias de control. La curva pre-urbanización tiene los caudales máximos más bajos para todos los periodos de retorno, mientras que la impermeabilidad provoca un aumento de estos caudales, principalmente para periodos de retorno más bajos. Las alternativas SUDS reducen los caudales máximos de la urbanización a medida que los criterios de diseño cubren un rango mayor de periodos de retorno. La Alternativa I reduce los caudales máximos para tormentas poco frecuentes, pero no así para eventos más frecuentes. De igual forma, la Alternativa III, con foco en la tormenta de 2 años, mitiga eficazmente el caudal de los eventos frecuentes, pero no así los caudales de mayor magnitud. Las alternativas más integradas (i.e. II, IV y V)

replican mejor una gama más amplia de caudales máximos preurbanización. De hecho, la Alternativa IV equilibra eficazmente la mitigación de tormentas frecuentes y extremas, con reducciones significativas en los caudales máximos para todos los períodos de retorno. La Alternativa V resulta ser la estrategia más integral de gestión puesto que mejora aún más este rendimiento al incorporar el VCCC y controlar pequeños eventos de escorrentía relevantes en términos de calidad de las aguas lluvias. Así entonces, la Alternativa V se convierte en la opción de diseño óptima desde una perspectiva hidrológica, por lo que los beneficios identificados en la Tabla 2 son evaluados para ella.

## 5.2. Evaluación de beneficios

### 5.2.1. Recurrencia de CSO

La Figura 6 ilustra el número de eventos de escorrentía que pueden gestionarse con una tubería de alcantarillado combinada de distintos diámetros durante el período de estudio. Una tubería de 200 mm diseñada para transportar aguas servidas en la zona, solo controlaría el 14% de estos eventos. Incluso aumentando el diámetro a 600 mm, un 3% de los eventos (un evento por año) superaría su capacidad; de hecho, la gestión segura de todas las descargas requeriría una tubería de 1250 mm. El uso de un IAD del 10% ayuda a infiltrar una parte de los eventos más frecuentes, aumentando ligeramente el número de eventos gestionados por la tubería de 200 m. Sin embargo, el impacto de la reducción es insignificante para eventos de escorrentía mayores, y la misma tubería de 1250 mm sigue siendo necesaria para gestionar todas las descargas combinadas. Por el contrario, la Alternativa V tiene un rol significativo en el control de DSU, ya que se puede gestionar el 97% y el 100% de los eventos de escorrentía con la tubería de 200 y de 300 mm, respectivamente}. Estos resultados confirman lo reportado por Hernes et al. (2020), ya que demuestran que el control local de la escorrentía, en particular la generada por lluvias frecuentes, puede reducir sustancialmente las DSU.



**Figura 6.** Diámetro necesario para controlar eventos de escorrentía para tres condiciones: sin SUDS, 10% de desconexión del área impermeable (IAD), y con SUDS según Alternativa V.

Una forma de estimar el beneficio de los SUDS sería cuantificando el ahorro asociado al menor diámetro colectores aguas abajo. Usando los resultados obtenidos, el supuesto de que

todos los caudales máximos deben ser controlados, y valores de referencia de los precios unitarios, i.e. US\$120 y US\$500 para las tuberías de 300 y 1250 mm respectivamente (comunicación personal con DOH), se estima un ahorro de US\$380 por metro de tubería.

## 5.2.2. Análisis de retrasos en el transporte y estabilidad peatonal

### Reducción en los tiempos de viaje vehicular

La Tabla 3 resume el retraso en los tiempos de viaje del sistema sin y con SUDS (Alternativa V). Sin SUDS, el retraso anual para buses, autos y bicicletas es de 2, 11 y 33 h. Con SUDS, estos retrasos se reducen a 1, 5 y 14 h al año. La menor reducción para buses se debe a que su velocidad es menos afectada al agua en calles en comparación con autos y bicicletas; estas últimas experimentan la mayor reducción en tiempos de viajes debido al proyecto SUDS. Las reducciones en los tiempos se monetizaron usando un valor social del tiempo de \$3.114 por habitante/hora (MDSF, 2024) y los supuestos ya descritos para cuantificar los flujos por tipo de vehículo y para calles de bajo y alto tráfico, según las relaciones de la Figura 4. El retorno económico anual estimado de la reducción de la demora para los autos es de \$US36,164, mientras que para los buses y bicicletas los retornos anuales son de US\$2,512 y US\$6,860. En general, el retorno económico total para el sistema es de US\$45,536 por año, con un 75% de este atribuido a las reducciones en la demora de los autos. Es importante recordar que estas estimaciones suponen la reducción de la velocidad de los vehículos, pero no su cantidad en movimiento, lo que representa un supuesto conservador.

**Tabla 3.** Efecto sobre el tiempo de viaje y beneficios económicos anuales de proyecto SUD según tipo de vehículo

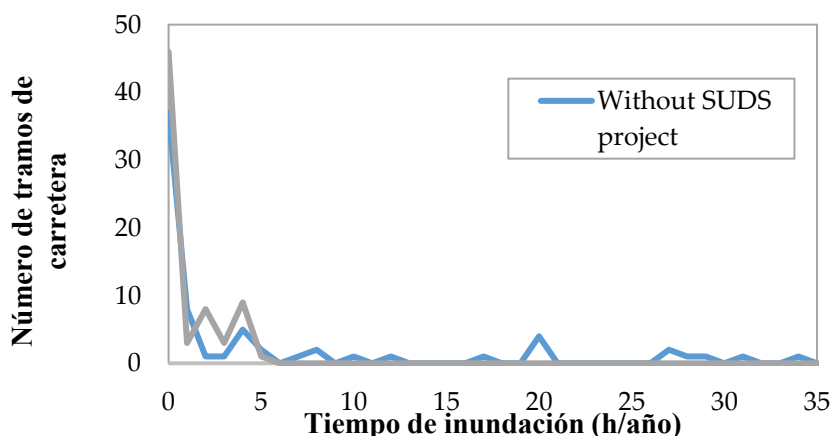
Tipo de vehículo	Retraso sin SUDS (h/año)	Retraso con SUDS (h/año)	Reducción de retrasos (h/año)	Beneficio anual (US\$/año)
Autos	11	5	6	36.164
Buses	2	1	1	2.512
Bicicletas	33	14	19	6.860
<b>Total</b>	<b>46</b>	<b>20</b>	<b>26</b>	<b>45.536</b>

### Análisis de accesibilidad y estabilidad peatonal

Como lo muestra la Figura 7, los SUDS reducen notoriamente la duración de las inundaciones en calles. Sin SUDS, 16 tramos de calle se inundan al menos 5 h al año, afectando el tránsito, dañando la calle y poniendo en riesgo a peatones, especialmente niños y adultos mayores. Al implementar SUDS, ningún tramo se inunda por más de 5 h al año. Así entonces, los SUDS permiten en gran medida cumplir con el estándar chileno de evitar flujos de más de 1 m de ancho en las calles durante eventos frecuentes (MOP, 2013), a la vez que mitigan la exposición prolongada a desgaste del pavimento.

Los SUDS no solo mejoran la accesibilidad peatonal, sino que reducen las molestias y peligros para los peatones, como se muestra en la Tabla 4. Según el criterio de Russo et al., (2013), los tiempos en que se tienen condiciones de peligro medio para los peatones se

reducen en un 78%, de 3458 h a 772 h (i.e., de 79 a 18 h/año), mientras que se espera una reducción en un 30% del tiempo con condiciones de peligro alto (i.e. de 7 a 5 h/año). La mejora es más significativa para las condiciones de peligro medio, puesto que son las lluvias moderadas y frecuentes las mejor gestionadas por SUDS. Aunque los peligros de nivel alto asociados a lluvias más extremas se reducen algo, estos eventos siguen siendo un desafío para los métodos de control basados en la infiltración.



**Figura 7.** Duración de las inundaciones en los tramos de carretera durante el período de simulación continua

**Tabla 4.** Duración del peligro para peatones clasificada por niveles de peligro medio y alto durante la simulación continua.

Nivel de riesgo de inundación	Sin SUDS (h)	Con SUDS (h)	Reducción de riesgos (%)
Medio	3.458	772	78%
Alto	311	218	30%

## 6. Conclusiones

Este estudio propone la evaluación de sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS) a través de la simulación continua en SWMM, con foco en evaluar el desempeño y los beneficios económicos y sociales. La simulación continua permite evaluar los impactos de todas las lluvias (y no sólo las magnitudes máximas anuales para distintas duraciones), de modo de cuantificar mejor los efectos de los SUDS, ya que estas técnicas buscan precisamente controlar la escorrentía de las lluvias frecuentes. Se diseñaron alternativas SUDS basadas en infiltración y retención considerando distintos criterios hidrológicos (periodos de retorno de 2, 10 y 100 años, así como el control de calidad del agua). Luego, se comparó el desempeño del sistema con y sin SUDS, y se identifican posibilidades para la estimación y cuantificación de beneficios como la reducción de fallas del alcantarillado, y mejoras en los tiempos de viaje en transporte y riesgos para peatones. Las principales conclusiones son las siguientes:

- El drenaje urbano debe considerar tanto lluvias significativas, mediante tormentas de diseño, como el funcionamiento continuo del sistema. La simulación continua revela beneficios clave que suelen pasarse por alto al enfocar el análisis solo en lluvias extremas. Esto es justamente lo que ocurre cuando se consideran lluvias y crecidas de periodos de

retorno de 1 o más años, obviándose los potenciales y reiterados efectos de decenas de eventos frecuentes. Más aún, la simulación continua representa mejor la dinámica hidrológica, considerando efectos acumulativos de la lluvia y evapotranspiración, lo que mejoraría la toma de decisiones en lo referido a SUDS.

- Los SUDS aumentan la resiliencia y generan beneficios eventualmente evaluables económicamente. Al largo plazo los SUDS en la zona de estudio reducen en ~50% los retrasos en transporte y en 78% y 30% los riesgos peatonales medio y alto. Esto demuestra su efectividad, especialmente para controlar impactos de lluvias frecuentes. Este aumento de resiliencia también puede lograrse con infraestructura tradicional, la que, más bien, busca conducir flujos de manera segura, y no reducir caudales y volúmenes de escorrentía que originan más bien disfuncionalidades e impactos ambientales.
- Los SUDS también permiten reducir el tamaño de colectores aguas abajo, así como la cantidad de descargas de sistemas unitarios. A modo de ejemplo, un colector unitario de 300 mm, que solo podría controlar un ~65% de los eventos de escorrentía, controlaría la totalidad de estos si es que se implementan SUDS capaces de controlar el volumen de captura, así como elementos de almacenamiento para controlar crecidas mayores.

El estudio aporta bases metodológicas para mejorar la evaluación socioeconómica de proyectos de aguas lluvias y apoyar la toma de decisiones sobre soluciones DUS. Se enfoca exclusivamente en los beneficios de los SUDS, dejando fuera los costos, los cuales deben incorporarse en una evaluación integral que determine si los beneficios compensan las inversiones. A futuro, se plantea ampliar el análisis a otros impactos cuantificables mediante simulaciones continuas, como el lavado y arrastre de contaminantes urbanos, e incluir los costos del ciclo de vida para estimar la viabilidad económica total.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece el financiamiento de Fondecyt 1241163 y de los centros FONDAP CEDEUS (ANID FONDAP 1523A0004) y CIGIDEN (ANID FONDAP 1523A0009). Jorge Gironás es miembro de la Mesa de Gestión de Aguas Lluvias del Colegio de Ingenieros, y el Grupo de Aguas Urbanas de CONAPHI-Chile, instancias a las que también se agradece.

## **REFERENCIAS**

- Akan, A. O., and Houghtalen, R. J. (2003). *Urban hydrology, hydraulics, and stormwater quality: engineering applications and computer modeling*. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Ashley, R. M., Gersonius, B., Digman, C., Horton, B., Bacchin, T., Smith, B., Shaffer, P., and Baylis, A. (2018). Demonstrating and monetizing the multiple benefits from using SuDS. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment* 4(2): 05017008.
- Cacciuttolo, C., Garrido, F., Painena, D., and Sotil, A. (2023). Evaluation of the use of permeable interlocking concrete pavement in Chile: urban infrastructure solution for adaptation and mitigation against climate change. *Water* 15(24): 4219.
- CADE-IDEPE (2001). *Plan maestro de evacuación y drenaje de aguas lluvias del Gran Santiago*. Dirección de Obras Hidráulicas, Santiago, Chile.
- Cerda, V., Osheen, & Gironás, J. (2025). Evaluating the Long-Term Performance and Economic Benefits of SUDS Using Continuous Simulation. *Water Resources Management*, 1-23.  
<https://doi.org/10.1007/s11269-025-04209-3>
- Cipolla, S. S., Maglionico, M., and Stojkov, I. (2016). A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM. *Ecological Engineering* 95:876-887.

- D'Ambrosio, R., Balbo, A., Longobardi, A., and Rizzo, A. (2022). Re-think urban drainage following a SuDS retrofitting approach against urban flooding: A modelling investigation for an Italian case study. *Urban Forestry & Urban Greening* 70:127518.
- DGA, (2020). Información oficial hidrometeorológica y de calidad de aguas en línea de la DGA. <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., and Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal* 12(7): 525-542.
- Gao, J., Li, J., Li, Y., Xia, J., and Lv, P. (2021). A distribution optimization method of typical LID facilities for sponge city construction. *Ecohydrology & Hydrobiology* 21(1): 13-22.
- Grimaldi, S., Petroselli, A., and Serinaldi, F. (2012). Design hydrograph estimation in small and ungauged watersheds: continuous simulation method versus event-based approach. *Hydrological Processes* 26(20): 3124-3134.
- Guo, Y., and Adams, B. J. (1999). An analytical probabilistic approach to sizing flood control detention facilities. *Water Resources Research* 35(8): 2457-2468.
- Hernández-Moreno, Á., and Reyes-Paecke, S. (2018). The effects of urban expansion on green infrastructure along an extended latitudinal gradient (23°S–45°S) in Chile over the last thirty years. *Land Use Policy* 79:725-733.
- Hernes, R. R., Gagne, A. S., Abdalla, E. M., Braskerud, B. C., Alfredsen, K., and Muthanna, T. M. (2020). Assessing the effects of four SUDS scenarios on combined sewer overflows in Oslo, Norway: Evaluating the low-impact development module of the Mike Urban model. *Hydrology Research* 51(6): 1437-1454.
- Herrera, J., Bonilla, C. A., Castro, L., Vera, S., Reyes, R., and Gironás, J. (2017). A model for simulating the performance and irrigation of green stormwater facilities at residential scales in semiarid and Mediterranean regions. *Environmental Modelling & Software* 95:246-257.
- Herrera, J., Flamant, G., Gironás, J., Vera, S., Bonilla, C. A., Bustamante, W., and Suárez, F. (2018). Using a hydrological model to simulate the performance and estimate the runoff coefficient of green roofs in semiarid climates. *Water* 10(2): 198.
- Hidalgo-Monroy, G., Vasquez-Avila, S., and Araya F. (2022). Análisis cualitativo de sostenibilidad social de sistemas de drenaje urbano en Chile. *Revista Hábitat Sustentable* 12(1): 44 -57.
- INN, (1999). Ingeniería sanitaria - Alcantarillado de aguas residuales: Diseño y cálculo de redes. Norma Chilena N°1105. Santiago, Chile.
- Lähde, E., Dahlberg, N., Piirainen, P., and Rehunen, A. (2023). Ensuring ecosystem service provision of urban water nature-based solutions in infill areas: comparing Green factor for districts and SWMM modeling in scenario assessment. *Environmental Processes* 10(4): 61.
- Lin, J., Uchiyama, S., Bhattacharya, Y., and Nakamura, H. (2023). Efficacy of rain barrels and rain gardens to reduce urban pluvial flooding in densely built-up residential areas: a case study on Miyahara-Cho in Saitama City, Japan. *City and Built Environment* 1(1): 19.
- Liu, W., Feng, Q., Engel, B. A., and Zhang, X. (2023). Cost-effectiveness analysis of extensive green roofs for urban stormwater control in response to future climate change scenarios. *Science of The Total Environment* 856: 159127.
- Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MDSF) (2024). Precios Sociales. División de Evaluación Social de Inversiones, Ministerio de Desarrollo Social y Familia, Santiago, Chile.
- MOP (2013). Manual de Drenaje Urbano. Dirección de Obras Hidráulicas, Santiago, Chile.
- Mora-Melià, D., López-Aburto, C. S., Ballesteros-Pérez, P., and Muñoz-Velasco, P. (2018). Viability of green roofs as a flood mitigation element in the central region of Chile. *Sustainability* 10(4): 1130.
- Mora, R., Truffello, R., and Oyarzún, G. (2021). Equity and accessibility of cycling infrastructure: An analysis of Santiago de Chile. *Journal of Transport Geography* 91:102964.
- NACTO, (2017). Urban street stormwater guide, Island Press, New York. <https://nacto.org/publication/urban-street-stormwater-guide/>

- Osheen, Kansal, M. L., and Bisht, D. S. (2024). Enhancing urban drainage infrastructure through implementation of low impact development techniques. *Water Resources Management* 38(12): 4517-4540.
- Pathiraja, S., Westra, S., and Sharma, A. (2012). Why continuous simulation? The role of antecedent moisture in design flood estimation. *Water Resources Research* 48(6): W06534.
- Pregolato, M., Ford, A., Wilkinson, S. M., and Dawson, R. J. (2017). The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 55, 67-81.
- Prudencio, L., and Null, S. E. (2018). Stormwater management and ecosystem services: a review. *Environmental Research Letters* 13(3): 033002.
- Pugliese, F., Caroppi, G., Zingraff-Hamed, A., Lupp, G., and Gerundo, C. (2021). Assessment of NBSs effectiveness for flood risk management: The Isar River case study. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society* 71(1): 42-61.
- Rivera, P., Gironás, J., Montt, J., and Fernandez, B. (2005). An analytical model for hydrologic analysis in urban watersheds. *In "10<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage"*, pp. 21-26, Denmark.
- Rossman, L. (2010). Storm water management model user's manual version 5.0. US Environmental Protection Agency: Cincinnati, OH, USA.
- Rossman, L., and Huber, W. (2016a). SWMM reference manual volume III—Water quality. (O. o. R. a. D. National Risk Management Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, ed.), Cincinnati, OH.
- Rossman, L. A., and Huber, W. C. (2016b). Storm water management model reference manual Volume I—Hydrology (Revised). US Environmental Protection Agency: Cincinnati, OH, USA.
- Russo, B., Gómez, M., and Macchione, F. (2011). Experimental approach to determine flood hazard criteria in urban areas. *In "12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Brazil"*.
- Russo, B., Gómez, M., and Macchione, F. (2013). Pedestrian hazard criteria for flooded urban areas. *Natural Hazards* 69(1), 251-265.
- Tansar, H., Li, F., Zheng, F., and Duan, H.-F. (2024). A critical review on optimization and implementation of green-grey infrastructures for sustainable urban stormwater management. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society* 73(6), 1135-1150.
- Vásquez, A., Devoto, C., Giannotti, E., and Velásquez, P. (2016). Green infrastructure systems facing fragmented cities in Latin America - case of Santiago, Chile. *Procedia Engineering* 161, 1410-1416.
- Vecchio, G., Castillo, B., and Steiniger, S. (2020). Movilidad urbana y personas mayores en Santiago de Chile: el valor de integrar métodos de análisis, un estudio en el barrio San Eugenio. *Revista de Urbanismo*, 26-45.
- Viecco, M., Jorquera, H., Sharma, A., Bustamante, W., Fernando, H. J., and Vera, S. (2021). Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter. *Building and Environment* 204: 108120.
- Vincent, S. U., Radhakrishnan, M., Hayde, L., and Pathirana, A. (2017). Enhancing the economic value of large investments in sustainable drainage systems (SuDS) through inclusion of ecosystems services benefits. *Water* 9(11), 841.
- Wang, R., Brent, D., and Wu, H. (2022). Willingness to pay for ecosystem benefits of green stormwater infrastructure in Chinese sponge cities. *Journal of Cleaner Production* 371: 133462.
- Yaron, G., and Wilson, D. (2020). Estimating the economic returns to community-level interventions that build resilience to flooding. *Journal of Flood Risk Management* 13(4): e12662. doi: 10.1111/jfr3.12662.
- Zanini, S. F., de Carli, A., Rizzo, A., Conte, G., and Masi, F. (2024). Monetization of ecosystem services from nature-based solutions for agricultural diffuse pollution control: simplified value transfer method at European scale. *Water* 16(6): 898.
- Zegpi, M., and Fernández, B. (2010). Hydrological model for urban catchments – analytical development using copulas and numerical solution. *Hydrological Sciences Journal* 55(7): 1123-1136.
- Zhang, B., Xie, G., Zhang, C., and Zhang, J. (2012). The economic benefits of rainwater-runoff reduction by urban green spaces: A case study in Beijing, China. *Journal of Environmental Management* 100: 65-71.