



Universidad de Concepción  
Dirección de Postgrado  
Facultad de Ingeniería Agrícola - Programa de Doctorado en Ingeniería Agrícola con  
mención en Recursos Hídricos en la Agricultura

**“ESTUDIO DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE CUBIERTAS  
VERDES PARA LA ZONA CENTRAL DE CHILE”.**

Tesis para optar al grado de Doctor en Ingeniería Agrícola con  
mención en Recursos Hídricos en la Agricultura



**JAVIER ANDRÉS CAMAÑO ESPINOZA**

CHILLÁN-CHILE

2019

Profesor Guía: Dr.- José Luis Arumí Ribera

Dpto. de Recursos Hídricos

Facultad de Ingeniería Agrícola

Universidad de Concepción

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Concepción, junto con la Facultad de Ingeniería Agrícola, Departamento de Recursos Hídricos y programa de Doctorado en Ingeniería Agrícola, por haber expresado su confianza permitiendo mi admisión en el programa de Doctorado de la Universidad, volviendo posible el realizar una especialización en este campo del conocimiento por el cual siento una gran pasión.

A mi profesor guía Dr. José Luis Arumí por su constante apoyo, confianza, amistad y paciencia, los cuales fueron fundamentales para mi formación como científico además de profesor, cuyas lecciones sobre la hidrología, la ciencia y la forma de hacer docencia, guardaré por siempre.

A los profesores del Departamento de Recursos Hídricos, especialmente al Dr. Jerónimo Paredes, Dr. Diego Rivera, Dr. Jorge Jara y Dr. Max Billib, cuya disposición y dedicación a sus respectivas cátedras lograron despertar en mí, el espíritu de la ciencia.

Al proyecto Conicyt/Fondap/15130015 cuyo financiamiento fue de gran importancia para poder llevar a cabo esta investigación científica.

A la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) por los recursos otorgados a través de la Beca Doctorado Nacional y de Gastos Operacionales.

A Dr. Jörg Dietrich, Dr. Sven van der Heijden, Dr. Max Billib y en general al Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau (WAWI), por su gentileza y hospitalidad durante mi pasantía en la Leibniz Universität Hannover.

A mis padres Santiago, Patricia, a mis abuelas Olga, Lila, a mi abuelo Santiago, a mis hermanos Katherine y Agustín, por su apoyo afectivo, fraterno, incondicional a lo largo de toda mi vida, sin cuya presencia física o espiritual hubiera sido del todo imposible mi desarrollo como ser humano.

A mi esposa Sabrina por su cariño, apoyo, paciencia, comprensión, durante la realización de esta investigación, cuyos comentarios y sugerencias fueron de gran valor para llevar a cabo toda esta investigación.

A mis compañeros de programa de Postgrado, Francisco Lecaros, Denisse Duhalde, Walter Valdivia, Angela Blanco, Juliette Galdames, Camila Matta, Alejandra Lavados, Filippus de Bruijn, Fernando Bolaños y Carlos Salinas, por su amistad y compañía, de las cuales ambas, atesoraré indudablemente.

Al profesor Dr. Mario Lillo, por su excelente gestión como director del programa, al igual que por su constante preocupación por los alumnos pertenecientes a éste.

A Clara Castro, por su excelente gestión como Secretaria de Postgrado de la Universidad, adicionalmente tanto por sus buenos consejos y como por su apoyo durante mi permanencia en el programa de Doctorado.

A todas las personas que, si bien no se encuentran nombradas en este apartado, posibilitaron el desarrollo de esta investigación.

A todos ellos sea mi eterno agradecimiento



“Estudio de la respuesta hidrológica de las cubiertas verdes para la zona central de Chile”.

Tesis aprobada por:

José Luis Arumí Ribera


Ingeniero Civil, Doctor

---

Profesor Guía

Diego Rivera Salazar

Ingeniero Civil, Doctor



---

Evaluador Interno

Octavio Lagos Roa

Ingeniero Civil Agrícola, Doctor

---

Evaluador Interno

Mario Lillo Saavedra

Ingeniero Civil Eléctrico, Doctor

---

Director de Programa

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	i
<b>RESUMEN</b> .....	ix
<b>ABSTRACT</b> .....	x
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. Problemática de las aguas lluvias urbanas .....	1
1.2. Procesos hidrológicos en una cuenca urbana.....	1
1.3. Disponibilidad de Información para Diseño de Obras de Drenaje Urbano.....	2
1.3.1. Información climática y de relieve disponible .....	2
1.3.2. Transformación de la Escorrentía en cuencas urbanas.....	3
1.4. Concepto de Drenaje Sustentable .....	4
1.4.1. Medidas estructurales.....	4
<b>2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS</b> .....	8
2.1. Hipótesis .....	8
2.2. Objetivo General.....	8
2.3. Objetivos Específicos.....	9
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	9
3.1. Especies vegetales consideradas en el estudio.....	9
3.2. módulos de cubierta verde para el estudio de la respuesta hidrológica.....	11
3.3. módulos para el estudio de las propiedades de tres sustratos comercializados en Chile. 13	
3.4. Modelo hidrológico considerado en el estudio.....	14
3.5. Extensión del modelo hidrológico .....	17
3.5.1. Curvas intensidad, duración, frecuencia (IDF) generadas para obtener los hietogramas de diseño considerados en el estudio.....	18
3.6. Calibración del modelo hidrológico.....	19
<b>4. RESULTADOS</b> .....	20
<b>4.1. Capítulo I. Desafíos y evolución del drenaje urbano en Chile</b> .....	20
Resumen .....	20
Introducción .....	21
Evidencias del efecto de la urbanización sobre la escorrentía en la región metropolitana. ....	22
Cambio de enfoque en Chile: Desde el Tradicional hacia el drenaje urbano sustentable. ....	24

Drenaje urbano sustentable en Chile: Proyectos de Investigación y Construcción....	26
Desafíos actuales de Chile en Drenaje urbano .....	28
Tópicos especializados.....	29
Conclusiones .....	31
Agradecimientos.....	32
Referencias .....	32
<b>4.2. Capítulo II. Caso de Estudio: Desempeño hidrofísico nutricional de sustratos de cubierta verde chilenos .....</b>	<b>35</b>
Resumen .....	35
Introducción .....	35
Materiales y Métodos.....	38
Resultados.....	40
Discusión .....	46
Conclusión.....	48
Agradecimientos.....	48
Referencias .....	49
<b>4.3. Capítulo III. Respuesta Hidrológica de las cubiertas verdes para la zona central de Chile .....</b>	<b>51</b>
Resumen .....	51
Introducción.....	52
Metodología.....	54
Construcción de los módulos de cubierta verde y plan de pruebas.....	54
Modelo Hidrológico de cubierta verde.....	58
Calibración.....	60
Extensión del modelo hidrológico .....	61
Resultados.....	63
Calibración del modelo hidrológico .....	63
Resultados estadísticos resultantes de la separación de eventos.....	66
Resultados estadísticos resultantes de la tormenta de diseño .....	75
Discusión .....	81
Agradecimientos.....	84
Referencias .....	85
<b>5. Discusión General .....</b>	<b>87</b>
<b>6. Investigación Futura.....</b>	<b>88</b>

**7. REFERENCIAS GENERALES ..... 89**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1.- Transformación de la escorrentía a través del reservorio no lineal (Rossman, 2010). ..... 4

Figura 2.- Cuneta revestida con vegetación (grassed swale) con embalse de chequeo (check dam) ..... 5

Figura 3.- Estanque seco (Dry Pond) en Estados Unidos ..... 6

Figura 4.- Instalación de una zanja de infiltración (fuente: DENR, 2007)..... 7

Figura 5.- Especies de Sedum Utilizadas en Chile (www.zinco.cl). ..... 10

Figura 6.- Fotografía de algunas de las especies nativas consideradas en la investigación ..... 11

Figura 7.- Dimensiones del módulo de Cubierta Verde. .... 12

Figura 8.- Corte del Módulo de Cubierta verde. .... 12

Figura 9.- Esquema de módulo de cubierta verde utilizado en el estudio..... 13

Figura 10.- Medidor portátil de clorofila SPAD-595 ..... 14

Figura 11.- Esquema del modelo de cubierta verde propuesto por Locatelli et al., (2014). ..... 17

Figura 12.- Estadísticos generados a partir de la comparación entre la escorrentía de una cubierta verde y la de una cubierta de superficie impermeable..... 18

Figura 13.- 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). ..... 23

Figura 14.- Evolución institucional y normativa del drenaje urbano en Chile ..... 26

Figura 15.- Vista de los tres tratamientos utilizados en el estudio plantados con Sedum spurium vodoo. .... 39

Figura 16.- Distribución granulométrica de los tres sustratos de cubierta verde en estudio ..... 44

Figura 17.- Curvas de Retención de Humedad de los tres sustratos de cubierta verde ... 45

Figura 18.- Actividad fotosintética del Sedum rojo semanal (las líneas segmentada representa el promedio diario del contenido de clorofila para cada sustrato). ..... 46

Figura 19.- Esquema de los componentes de las cubiertas verdes construidas para el presente estudio (Fuente: Elaboración propia)..... 54

Figura 20.- Módulos de cubierta verde utilizados en el estudio. .... 55

Figura 21.- Simulador de precipitaciones construido para el estudio..... 56

Figura 22.- Pesado de la escorrentía proveniente de la cubierta verde, producto de la precipitación aplicada con el simulador de precipitaciones, en la figura se ilustra la escorrentía generada con una intensidad de 54 mm/hora. .... 57

Figura 23.- Suavizado de los hidrogramas obtenidos para el tratamiento sedum rojo después de la aplicación de las tres intensidades de precipitación consideradas en el estudio..... 57

Figura 24.- Esquema del modelo hidrológico propuesto por Locatelli et al., (2014)..... 58

Figura 25.- Estadísticos generados a partir de la comparación entre la escorrentía de una cubierta verde y la de una cubierta de superficie impermeable.....	62
Figura 26.- Análisis sensibilidad regional de los parámetros al minimizar la función sse para el tratamiento Sedum Rojo cuando se somete a la precipitación de 21 mm/hora durante 60 minutos. Cabe destacar que las curvas magenta son las que muestran un mejor ajuste a los datos observados.....	64
Figura 27.- Ploteo en forma de diagrama de dispersión para el tratamiento sedum rojo al aplicarse una precipitación de 21 mm/hora por 60 minutos, éste diagrama muestra la respuesta de cada parámetro en términos del cumplimiento de la minimización de la función objetivo sse. Los puntos magenta corresponden a los parámetros que logran un mejor ajuste a los datos observados.....	64
Figura 28.- Hidrogramas simulados de la respuesta en escorrentía de una cubierta verde de sedum rojo y una cubierta impermeable para un evento de precipitación ocurrido en Chillán en 2017.....	66
Figura 29.- Hidrogramas simulados de una cubierta verde de sedum variagado y una cubierta impermeable para un evento de precipitación ocurrido en Panguilemo para el año 2017.....	67
Figura 30.- Estadístico de escorrentía peak obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins de Chillán.....	68
Figura 31.- Estadístico de Escorrentía Peak obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Panguilemo.....	68
Figura 32.- Estadístico de atenuación de la escorrentía, obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins de Chillán.....	70
Figura 33.- Estadístico de atenuación de la escorrentía, obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Panguilemo.....	70
Figura 34.- Estadístico de Duración de la escorrentía, obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins.....	71
Figura 35.- Estadístico de Duración de la escorrentía, obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Panguilemo.....	72
Figura 36.- Estadístico de Retardo en el centroide de escorrentía, obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins.....	73
Figura 37.- Estadístico de Retardo en el centroide de escorrentía, obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Panguilemo.....	73
Figura 38.- Estadístico de Retención de la cubierta verde obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins.....	74



Figura 39.- Estadístico de Retención de la cubierta verde obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Panguilemo. ....	74
Figura 40.- Curvas IDF ajustadas para periodos de retorno de 4, 10, 20, 50, 80 y 100 años, discretizada en intervalos cada 1 minuto y de duración diaria. ....	76
Figura 41.- Hietogramas de Diseño obtenidos para una duración subdiaria, para periodos de retorno de 4, 10, 20, 50, 80 y 100 años. ....	76
Figura 42.- Estadístico de escorrentía peak obtenida para los siete tratamientos de cubierta verde al correr los modelos hidrológicos calibrados considerando los hietogramas de diseño para periodos de retorno de 2 a 100 años. ....	77
Figura 43.- Estadístico de atenuación del peak obtenida para los siete tratamientos de cubierta verde al correr los modelos hidrológicos calibrados considerando los hietogramas de diseño para periodos de retorno de 2 a 100 años. ....	78
Figura 44.- Estadístico de duración de la escorrentía obtenida para los siete tratamientos de cubierta verde al correr los modelos hidrológicos calibrados considerando los hietogramas de diseño para periodos de retorno de 2 a 100 años. ....	79
Figura 45.- Estadístico de retardo en el centroide de escorrentía obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde al correr los modelos hidrológicos calibrados considerando los hietogramas de diseño para periodos de retorno de 2 a 100 años. ....	80
Figura 46.- Estadístico de retención de la escorrentía obtenida para los siete tratamientos de cubierta verde al correr los modelos hidrológicos calibrados considerando los hietogramas de diseño para periodos de retorno de 2 a 100 años. ....	81

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Características de las especies nativas consideradas en el estudio. Fuente: Elaboración propia. ....	11
Tabla 2.- Densidad, conductividad eléctrica y contenidos de nutrientes encontrados en los tres sustratos de cubierta verde. ....	40
Tabla 3.- Parámetros del modelo hidrológico de cubierta verde para los siete tratamientos estudiados, éstos se encuentran optimizados para minimizar las funciones objetivo <i>sse</i> y <i>nse</i> , a través del análisis de Monte-Carlo. ....	65

## RESUMEN

El crecimiento urbano conlleva consigo cambios morfológicos, topográficos y de recambio de superficies permeables por impermeables, esto conlleva una alteración de los procesos hidrológicos de infiltración, evapotranspiración y escorrentía en las cuencas urbanizadas, provocando una disminución de la recarga de agua subterránea, aumentando tanto las tasas de evapotranspiración como la escorrentía superficial en las ciudades, volviendo las cuencas urbanas más vulnerables a anegamientos y provocando problemas de contaminación de los cauces naturales. La presente investigación tiene tres objetivos de investigación. Primero, a través de una revisión bibliográfica de normas chilenas, leyes, instructivos técnicos y literatura científica, recomendar algunos tópicos de investigación que debieran ser promovidos en Chile en materia de drenaje urbano sustentable. Segundo, estudiar la influencia de las propiedades físicas de granulometría, conductividad eléctrica, retención de agua al igual que el contenido de nutrientes, sobre el estado fotosintético de una cobertura vegetal de *sedum spurium voodoo* para tres sustratos de cubierta verde comercializados en el país. Tercero, cuantificar el aporte real de las cubiertas verdes reteniendo y deteniendo la escorrentía para dos localidades de la zona central de Chile, a través de modelación hidrológica, con datos de alta resolución temporal, a partir de datos de escorrentía obtenidos experimentalmente mediante la construcción de siete módulos de cubierta verde y un simulador de precipitaciones. A raíz de los hallazgos encontrados en el estudio, se observa que Chile ha efectuado investigación científica en el área del drenaje urbano sustentable, pero la investigación se ha orientado principalmente a algunas medidas de control del agua en la fuente, los proyectos de construcción que incluyen los conceptos SUDS dentro de su planificación corresponden a algunos parques públicos y algunos condominios privados, se recomienda potenciar los tópicos de calidad del agua lluvia, implementación de medidas no estructurales y estudios de dispositivos SUDS tales como cubiertas verdes, pavimentos permeables, etc., que estén basados en modelación hidrológica e hidráulica, igualmente se recomiendan estudios para cuya finalidad permita rehabilitar los cauces urbanos. De las propiedades de los sustratos de cubierta verde que más impactaron en el estado general de la cobertura de *sedum spurium voodoo* fueron la retención de agua, sin embargo, se recomienda la garantía de un alto PH y la utilización de arcilla en el medio de crecimiento, se recomienda igualmente la utilización de medidores de clorofila portátiles. En cuanto al desempeño hidrológico, al separar las tormentas en eventos independientes con resolución de 1 minuto, se compararon los hidrogramas de los siete tratamientos de cubierta verde versus los hidrogramas de una cubierta de material impermeable y se obtuvieron reducciones de la escorrentía máxima entre 20-60%, la duración de la escorrentía fue de al menos tres horas más que la de una cubierta convencional, el centroide de escorrentía se retardó al menos 10 minutos, la retención resultó escasa debido a que se trabajó con cubiertas verdes

de 10 cm de profundidad. Al estudiar estos estadísticos para las tormentas de diseño de duración sub-diaria con resolución temporal de 1 minuto, la atenuación de la escorrentía máxima encontrada fue entre 30-80% para periodos de retorno entre 2-60 años, la duración de la escorrentía igualmente fue 2-7 horas más que la de una cubierta convencional, el retardo en el centroide de escorrentía fue de 5-10 minutos, al igual que el caso anterior, la retención fue escasa por el mismo motivo indicado anteriormente. Los hallazgos de esta investigación contribuyen a suministrar criterios resultantes de un estudio experimental, los cuales pueden ser utilizados para desarrollar sustratos de cubierta verde basándose en el desempeño fotosintético de la especie vegetal. Igualmente, los resultados favorables obtenidos de atenuación de la escorrentía máxima, duración adicional, retardo en el centroide y retención de la escorrentía, considerando tanto el enfoque de separación de eventos, como el enfoque de la tormenta de diseño contribuyen a promover la utilización de las cubiertas verdes en la zona central de Chile.

## **ABSTRACT**

Urban development carries with it morphological, topographic changes and a exchange of pervious surfaces for impervious surfaces, this carries a alteration of the hydrologic process of infiltration, evapotranspiration and surface runoff in the urbanized catchments, causing a disminution of groundwater recharge, increasing evapotranspiration rates as well as the peak surface runoff in the cities, all this causes more vulnerability to flooding and causing water pollution. The present research has three objectives, first, through a bibliographic review of technical documents, laws and scientific literature, establish research topics that should be promoted in Chile in the SUDS field. Second, to study the influence of physical properties as grain size, electric conductivity, water retention as well as the nutrient content on the photosinthetic state of a vegetal cover of sedum spurium voodoo for three comercial green roof substrates in Chile. Third, quantify the real impact of green roof retention and detention of urban runoff for two cities located in central Chile, through hydrologic modelling, with highly temporal resolution data, through runoff data collected experimentally from seven green roof modules and a rainfall simulator. the findings of this study are that there is evidence of scientific research in the SUDS field, but this research has been oriented to some source control measures, the proyects who consider the SUDS concepts inside the planning are a few public places and some private neighborhoods, it is recomeded to develop research in the topics of stormwater quality, the implementation of non-structural measures and SUDS devices like green roofs, pervious pavements,etc., wich are based on hydrological or hydraulic modelling, additionally, to advance in urban stream rehabilitation. The most influencer substrate propertie on the general state of the

sedum spurium voodoo was water retention, however, it is recommended to maintain a high PH and a clay percent in the green roof substrate, also, the portatil chlorophyl measurement device proved to be a usefull in this kind of studies. About the hydrologic behaviour of the green roof, the storms was separated into individual events of 1 minute resolution, and the impervious hydrograph was compared with seven green roof hydrographs and it was obtain 20-60% peak runoff attenuation, the additional green roof runoff duration was at least three hours more than a impervious roof, the runoff centroid delay was at least 10 minutes, but retention was low because extensive roofs of 10 cm depth were used in this study. The same parameters were obtained considering design hyetographs with diferent return periods and sub-daily time resolutions in this case, the peak runoff attenuation obtained was 30-80% for return periods between 2-60 years, the aditional green roof runoff duration was 2-7 hours more than a impervious roof, the runoff centroid delay was 5-10 minutes, the retention, like before, was low because of the same reason exposed above. The findings of this research contribute to provide experimental based criteria wich may be usefull to develop new green roof substrates based on the photosinthetic performance of the vegetal especie, also, the results from green roof peak runoff attenuation, the aditional runoff duration, and the runoff centroid delay, considering both the storm event separation and the design hyetographs contribute to promote the green roof construction in central Chile and in Chile itself.



## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Problemática de las aguas lluvias urbanas**

Las actividades antropogénicas en áreas urbanas generan desechos y contaminantes sobre la superficie de la cuenca que pueden ser lavados y direccionados a los cuerpos receptores durante una tormenta (Barbosa et al., 2012), tales descargas pueden contener escorrentía de aguas lluvia como también desbordamiento de alcantarillados separados o combinados y derretimiento de nieve (Burton & Pitt, 2002) y son la mayor fuente de contaminación en cuerpos receptores en muchos países del mundo (Lee et al., 2007). Este arrastre de contaminantes y basuras puede ir en desmedro del paisaje y de la estética urbana, provocar enfermedades por la exposición a metales pesados y agentes patógenos y afectar a las comunidades acuáticas presentes en los cauces. El aumento de la velocidad, caudal y volumen máximo de escorrentía producido por el proceso de urbanización, aumentando el riesgo de inundación, derrumbes, deslizamientos de tierra, transporte de escombros y alterando la morfología de los cauces urbanos.

### **1.2. Procesos hidrológicos en una cuenca urbana**

La urbanización provoca impactos físicos sobre una cuenca urbana tales como compactación del terreno, la cobertura de materiales impermeables, variaciones en la microtopografía (cambios en la configuración del terreno que crean desniveles y obstáculos para el drenaje superficial). Respecto a los procesos de escorrentía superficial en una cuenca urbana, tenemos que la presencia de superficies impermeables, además de disminuir la infiltración y por ende aumentar el volumen de escorrentía superficial, durante un evento de precipitación, pueden descargar a superficies permeables o a cuerpos receptores de manera informal degradando el cauce provocando el “Síndrome del cauce urbano”, la influencia de las superficies impermeables sobre la temperatura corresponde a un tópico reciente en el área de hidrología urbana. Las superficies permeables, presentan un comportamiento lluvia escorrentía incierto debido a la influencia de la urbanización, teniendo suelos compactados, pérdida de materia orgánica y presencia de vegetación, haciendo que su aporte sea muy variable, pues combina procesos de escorrentía superficial, flujo intermedio y flujo base. El suelo urbano puede condicionar el camino del flujo debido a la presencia de infraestructuras urbanas como calles, zanjas y drenes. Los procesos del flujo subsuperficial que intervienen en una cuenca urbana pueden ser variables y complejos, existirán lugares dentro de la cuenca urbana cubiertos por superficies impermeables que reducirán la infiltración, mientras que en superficies permeables la reducción de vegetación podría disminuir la evapotranspiración, lo que potencialmente podría incrementar la infiltración. La infraestructura urbana no

necesariamente provoca una disminución tácita del nivel freático, ya que las fugas desde los sistemas de abastecimiento de agua podrían eventualmente alimentar este sistema, sin embargo, las fugas desde los sistemas de alcantarillado constituyen una posible fuente de contaminación para el agua subterránea en una zona urbana. La complejidad de los procesos subsuperficiales hace que el estudio de los cambios de éste constituya un importante nicho de estudio. Respecto al proceso de evapotranspiración en cuencas urbanas, además de fundamental para cerrar el ciclo de balance hídrico, afecta potencialmente la infiltración al ser afectada la evapotranspiración por la cubierta de vegetación y el microclima urbano.

### **1.3. Disponibilidad de Información para Diseño de Obras de Drenaje Urbano**

En Chile hasta la fecha se han realizado diversos estudios preliminares que pueden ser usados directa o indirectamente en el diseño de sistemas de drenaje urbano, ya sean estudios que realicen organismos públicos, estudios encargados por entes públicos, trabajos académicos, etc. Sin embargo, aún se requieren de estudios locales al momento de diseñar. En general el diseño y los criterios dependerán primeramente de la caracterización del medio en que se emplace el sistema de aguas lluvias.

#### **1.3.1. Información climática y de relieve disponible**

Existen diversas instituciones que brindan información relevante en cuanto al registro de variables climatológicas e Hidrológicas. Cabe destacar el rol de la Dirección General de Aguas (DGA), la Dirección Meteorológica de Chile (DMCH), el Instituto Geográfico Militar (IGM), Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y de diferentes centros de investigación ligados a Universidades. Respecto a la obtención del relieve urbano, es posible obtener información cartográfica desde el IGM, DGA y las Municipalidades a través de sus sistemas de Información territorial (Planos reguladores y Mapas Vecinales). Sin embargo, aún es necesario el levantamiento en terreno para conocer la altimetría, secciones y conexiones de los elementos que conforman la red de drenaje urbano, dentro de los trabajos que se deben comprobar en terreno, cabe mencionar el mantener actualizado el catastro de cámaras, sumideros y realizar trabajos topográficos con objeto de obtener la planimetría de un sector.

Una cuenca urbana, se encuentra emplazada dentro de una cuenca natural, por lo cual es de relevancia contar con información de la ubicación de la red de drenaje natural, pues los cauces naturales serán los receptores de los sistemas de drenaje urbano. Para ello se ponen a disposición los estudios elaborados por la DGA y la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). Cabe destacar también la separación descrita anteriormente de la red de drenaje en una red primaria, una red secundaria



y una red domiciliaria, cuyas responsabilidades ya se discutieron anteriormente en el documento. Respecto a la información hidrogeológica, la DGA presenta un monitoreo de los niveles estáticos de los pozos y/o estudios dentro de los cuales destaca el “Balance Hidrogeológico de Chile (DGA, 1989)”, mapas de clasificación de suelos, al igual que se requiere de ensayos de infiltración, clasificación de suelos, entre otros. El Manual de Drenaje Urbano, presenta una caracterización del territorio nacional mediante el establecimiento de Macrozonas homogéneas, tomando características de hidroclimatología, hidrografía y localización espacial.

### **1.3.2. Transformación de la Escorrentía en cuencas urbanas**

La transformación de la lluvia en escorrentía corresponde al caudal que genera la cuenca a partir de la precipitación efectiva. Existen modelos conceptuales como el método racional, el Hidrograma Unitario, el reservorio lineal, el modelo de Clark, el método de las isócronas y modelos físicamente basados como la ecuación de Richards, modelos de agua subterránea, entre otros.

#### **1.3.2.1. Modelos de Simulación de aguas lluvias urbanas**

Existen diversos paquetes de simulación capaces de simular la calidad y cantidad de agua en una cuenca urbana. Zoppou (2001) realizó una recopilación de 12 modelos, 8 fueron diseñados específicamente para diseñar la calidad y cantidad de agua y 4 pueden adaptarse para esta tarea. Los ocho primeros modelos corresponden al Dr<sub>3</sub>M-Qual, HSPF, MIKE.SWMM, QQS, STORM, SWMM y el Wallingford, los 4 restantes corresponden al BRASS, HEC-5Q, QUAL2E-UNCAS, WQRRS.

Los modelos mencionados en el apartado anterior, simulan la cantidad de escorrentía urbana, con fines de estimar la crecida de diseño o realizar predicción de ésta. Para esto puede utilizarse un enfoque de simulación continua, refiriéndose a la estimación de “Pérdidas de lluvia” y la generación del flujo superficial, simulando el humedecimiento y desecamiento de una urbana a paso de tiempo diario, horario e incluso sub-horario (Boughton & Drop, 2002).

Por el contrario, la simulación basada en eventos consiste en modelar una respuesta hidrológica debido a un evento de precipitación aislado, el cual es estimado de manera probabilística, asumiendo que la frecuencia de la salida resultante del modelo es igual a la frecuencia de la cantidad de precipitación (Knap et al., 2001).

Dentro de estos modelos, el SWMM es ampliamente utilizado para simular la calidad y cantidad de agua (Gironás et al, 2013), permite la simulación basada en eventos

y simulación continua. La escorrentía superficial se basa en intensidades de lluvia y condiciones de humedad antecedentes, uso de suelo y topografía. El cálculo de la escorrentía superficial se realiza mediante el método del reservorio no lineal (Figura 1) y permite el cálculo de la infiltración, el lavado y el transporte del flujo de agua y contaminantes a través del sistema de drenaje urbano.

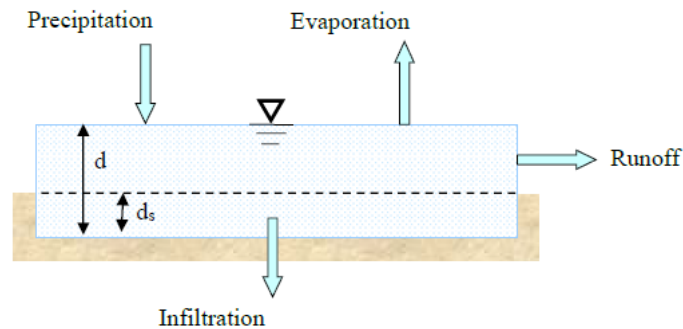


Figura 1.- Transformación de la escorrentía a través del reservorio no lineal (Rossman, 2010).

#### 1.4. Concepto de Drenaje Sustentable

El desarrollo sustentable según Butler & Parkinson (1997) puede ser descrito en términos del drenaje urbano, manteniendo una barrera sanitaria efectiva, evitando los anegamientos locales o distantes, evitando la contaminación del medio ambiente, minimizando el uso de recursos naturales, además de promover estrategias a largo plazo, confiables y adaptables a un futuro incierto. Estos conceptos se resumen en una serie de medidas estructurales y no estructurales llamadas en este documento SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems) las cuales trabajan reduciendo la cantidad de escorrentía, disminuyendo la velocidad de la escorrentía promoviendo la sedimentación e infiltración para finalmente proveer de un tratamiento pasivo al agua lluvia colectada antes de que ésta descargue a los cuerpos receptores.

Así el trabajar con SUDS permite proteger y mejorar la calidad de agua, proteger a las personas y a las propiedades de inundación, proteger los cauces naturales de derrames accidentales y minimizar la utilización de recursos naturales.

##### 1.4.1. Medidas estructurales



Respecto a las medidas estructurales, éstas consisten en obras que permitan cumplir con los objetivos de las SUDS descritos anteriormente. En general se tienen humedales construidos, estructuras sobre el terreno y estructuras subterráneas.

Respecto a los humedales construidos, son estanques cubiertos con vegetación para mejorar la remoción de contaminantes y mejorar el hábitat de la vida salvaje (Kellagher et al., 2007), estos sistemas son efectivos pues la mayoría de las sustancias tóxicas de la escorrentía urbana (metales pesados) no se transporta en solución.

Dentro de las estructuras sobre el terreno, destacan los pavimentos permeables, cunetas revestidas con vegetación (Figura 2) y los estanques secos. Los pavimentos permeables permiten que el agua sea infiltrada y lentamente encuentre su curso hacia el cuerpo receptor, reduciendo el *peak* y la probabilidad de inundación. Las cunetas revestidas con vegetación son poco profundas y se usan para transportar, almacenar la escorrentía urbana, reduciendo el *peak* permitiendo la infiltración y la evaporación.



Figura 2.- Cuneta revestida con vegetación (*grassed swale*) con embalse de chequeo (*check dam*). (Fuente: DERN, 2007)

Los estanques secos (*dry ponds*) son depresiones en el terreno pudiendo o no estar cubiertas con vegetación (Figura 3), pudiendo ser utilizados para controlar la escorrentía durante tormentas intensas, permitiendo la sedimentación de las partículas contaminadas y la infiltración del exceso de escorrentía, reduciendo el peak e incrementando el tiempo de retardo de la cuenca urbana y cuando el estanque no se encuentra solicitado para drenaje urbano, puede ser utilizado para fines recreacionales.



Figura 3.- Estanque seco (*Dry Pond*) en Estados Unidos

Dentro de las estructuras subterráneas destacan las zanjas de infiltración, pozos de infiltración y drenes franceses (French Drains). Las zanjas de infiltración son excavaciones lineales rellenas con grava (Butler & Davies., 2004), pueden o no estar cubiertas con vegetación (Figura 4) donde la escorrentía es desviada dentro de la zanja permitiendo la infiltración y la evaporación de ésta.



Figura 4.- Instalación de una zanja de infiltración (fuente: DENR, 2007).

Los pozos de infiltración son excavaciones rectangulares o circulares rellenas con escombros o forrados con ladrillos, anillos de hormigón o de polietileno prefabricados o estructuras de almacenamiento perforadas rodeadas de relleno granular, permitiendo la atenuación de aguas lluvias y la recarga del agua subterránea. En el caso de los drenes franceses, se colocan a lo largo de las carreteras en asociación con una tubería a la cual guía el agua en el sistema de drenaje, se compone de una zanja llena con grava, la cual es envuelta en una membrana en la que la escorrentía fluye desde allí y a la red de drenaje, el agua es almacenada, filtrada y lentamente transportada a través de este sistema, a pesar de que algo puede perderse vía evaporación e infiltración.



## **2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

### **2.1. Hipótesis**

H1: “La retención de agua en el suelo, la granulometría de éste, la composición mineral, el contenido de nutrientes son parámetros que influyen la capacidad que tiene la cubierta verde de mantener una cobertura vegetal en buenas condiciones”.

H2: “Desde un punto de vista hidrológico, las cubiertas verdes resultan eficaces reteniendo y deteniendo la escorrentía en el clima de la zona central de Chile, siendo la selección de la especie vegetal una variable crítica en el desempeño de ésta, donde las cubiertas que presentan vegetación nativa se desempeñan mejor que las comúnmente utilizadas como los Sedum, lo cual puede ser validado exitosamente mediante pruebas de laboratorio y la modelación hidrológica”.

### **2.2. Objetivo General**

Evaluar el desempeño hidrológico de las cubiertas verdes considerando vegetación nativa y especies introducidas en el clima de la zona central de Chile mediante modelación hidrológica a partir de datos experimentales, adicionalmente se desea estudiar qué propiedades de los sustratos de cubierta verde comercializados en Chile presentan mejor desempeño de la cobertura vegetal.

## **2.3. Objetivos Específicos**

1. Elaboración de un sistema de monitoreo de la escorrentía, variables climatológicas, un simulador de precipitaciones al igual que un diseño experimental que permita estudiar la influencia de las propiedades de al menos tres sustratos comercializados en Chile sobre el desempeño de una cobertura típica utilizada en cubiertas verdes.
2. Construir y validar un modelo hidrológico para el estudio de la respuesta hidrológica de las cubiertas verdes considerando diferentes cubiertas vegetales.
3. Evaluar la respuesta hidrológica de estas cubiertas verdes para dos localidades de la zona central de Chile.

## **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.1. Especies vegetales consideradas en el estudio**

La selección de las especies vegetales chilenas se basó en los criterios de que éstas puedan sobrevivir en las condiciones de restricción de profundidad, de soleamiento completo y de restricción hídrica. Estas son condiciones importantes ya que la especie vegetal deberá desarrollarse en un medio de baja profundidad, en la techumbre de una estructura, donde los rayos solares impactarán sobre ella la mayor parte del día, además el sustrato, al poseer poca profundidad, la cantidad de agua almacenada será limitada, por lo que la especie vegetal se encontrará en condiciones de estrés hídrico. La decisión de elegir especies nativas en la presente investigación fue influenciada porque existen estudios extranjeros sobre evaluación del desempeño hidrológico de los Sedum pero no de especies autóctonas, las especies nativas están mejor adaptadas al clima del país de origen, Se han realizado algunos estudios, destacando el de Olate et al., (2011), Monterusso et al., (2005), FLL (2008) entre otros, sobre la adaptación de algunas especies a las condiciones de cubierta verde, pero no se ha evaluado su desempeño hidrológico, la utilización de flora autóctona permite otorgar una continuidad paisajística a la ciudad, mientras que la decisión de utilizar Sedum (Figura 5) estuvo basada en que son las especies mayormente utilizadas en la construcción de cubiertas verdes en el país y en el mundo.





Figura 5.- Especies de Sedum Utilizadas en Chile (www.zinco.cl).

Las especies nativas fueron escogidas en virtud de la oferta del Vivero Pumahuida, empresa que se ha especializado en la domesticación de la flora autóctona de la zona Central de Chile para uso ornamental y el Sedum fue suministrado por Jiro Sone. Las especies nativas consideradas son *Happlopapus macrocephalus*, *Filarepta*, *geum magallanicum*, *armeria marítima* y *phyla reptans*, en la Tabla 1 pueden observar algunas de sus características y en la Figura 6 se presentan algunas imágenes de las especies en cuestión.



*Phyla reptans*

*Haplopappus Macrocephalus*



*Geum Magallanicum*



*Hermeria Marítima*

Figura 6.- Fotografía de algunas de las especies nativas consideradas en la investigación

Especie/ Característica	Resistencia a la Congelación	Resistencia al Soleamiento total	Resistencia a Restricción hídrica	Resistencia a las Plagas
<i>Phyla Reptans</i>	Baja	Baja	Baja	Media
<i>Haplopappus Macrocephalus</i>	Media	Media	Media	Alta
<i>Armeria Marítima</i>	Alta	Alta	Alta	Alta
<i>Geum Magallanicum</i>	Alta	Alta	Alta	Alta

Tabla 1.- Características de las especies nativas consideradas en el estudio.

Fuente: Elaboración propia

### 3.2. módulos de cubierta verde para el estudio de la respuesta hidrológica

A manera de emular una cubierta verde a menor escala, se opta por construir 7 módulos de cubierta verde. El módulo consiste en un cajón de madera de 1,57 x 1,53 (m) (figura 7), dentro del cual se ubica una membrana impermeable consistente en polietileno, una barrera contra raíces para evitar que las raíces “desfonden” la base del módulo, una capa de drenaje para que evacuar la escorrentía subsuperficial de la cubierta, una capa de geotextil para evitar que las partículas finas del substrato sean arrastradas a la capa de drenaje y evacuadas, un substrato de 10 cm de profundidad que corresponde al medio en el que sobrevivirá la especie vegetal y finalmente la cubierta vegetal. La escorrentía será colectada a través de una canaleta y pesada a través de una celda de carga. En la figura 8 puede

apreciarse un corte del módulo en el que se visualizan los componentes. Las capas de drenaje, barrera contra raíces, Geotextil serán suministradas por la empresa TECPRO Ltda y el sustrato por Jiro Sone.

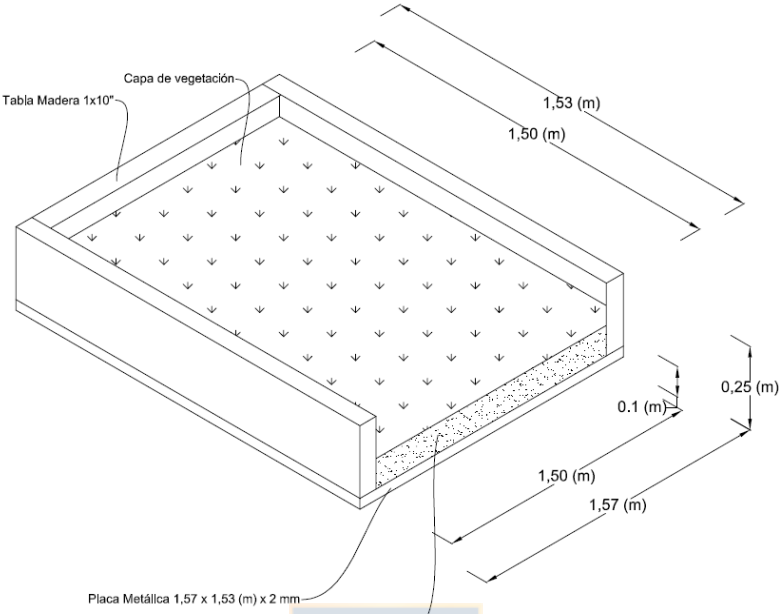


Figura 7.- Dimensiones del módulo de Cubierta Verde. Fuente: Elaboración Propia

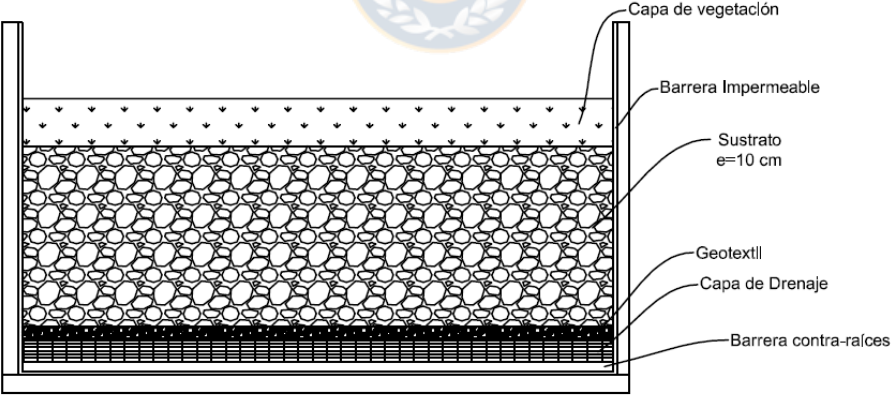


Figura 8.- Corte del Módulo de Cubierta verde. Fuente: Elaboración propia



### 3.3. módulos para el estudio de las propiedades de tres sustratos comercializados en Chile.

Se adquieren tres sustratos de cubierta verde de tres empresas chilenas diferentes para el estudio de las propiedades de granulometría, densidad, conductividad eléctrica y contenido de nutrientes. Se construyen nueve módulos de cubierta verde (ver Figura 9), cada módulo se construye con placa de terciado estructural de 9 milímetros y el paquete estructural de cubierta verde está compuesto por una barrera contra raíces, una capa de drenaje, el sustrato y una cobertura vegetal, todos estos módulos están plantados con la especie *sedum spurium voodoo*.

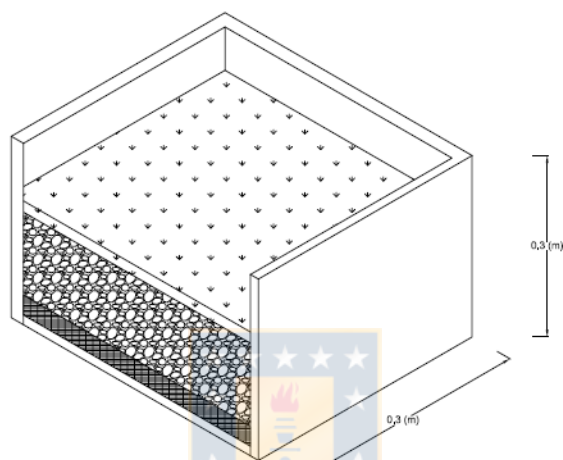


Figura 9.- Esquema de módulo de cubierta verde utilizado en el estudio. Fuente: Elaboración propia.

A los tres sustratos de cubierta verde se determinaron sus contenidos de nutrientes en el laboratorio de química de suelos y sus propiedades físicas de granulometría y densidad en el laboratorio de suelos del departamento de suelos y recursos naturales de la Universidad de Concepción.

A todos los tratamientos de sustrato se le monitoreó la actividad fotosintética mediante un medidor portátil de clorofila SPAD-595 (ver Figura 10), a fin de estimar el desempeño fotosintético del sedum rojo, ya que se consideró que el sedum rojo, se desempeñaría mejor o peor dependiendo de las condiciones propias del sustrato.



Figura 10.- Medidor portátil de clorofila SPAD-595. Fuente: Elaboración propia.

### 3.4. Modelo hidrológico considerado en el estudio

Se consideró la utilización de un modelo de escorrentía basado en el reservorio no lineal, como su nombre lo indica, debe su nombre a que la relación entre la escorrentía y el almacenamiento no es lineal. El modelo del reservorio no lineal ha sido utilizado ampliamente en la modelación hidrológica y software de amplio uso como el Storm Water Management Model (SWMM). Se considera utilizar como base el modelo hidrológico propuesto por Locatelli et al., (2014), sin embargo se planteó realizar modificaciones a éste, especialmente en el cálculo de la evapotranspiración, debido a que es un modelo de tipo “lumped”, el cual fue validado mediante una instalación experimental ubicada en Dinamarca, la elección de este modelo se basa en que éste puede reproducir la retención y la detención de una cubierta verde, ha sido probado con una capa de vegetación (Sedum), no posee demasiados parámetros para su calibración, no presenta una alta demanda computacional pese a que es aplicable a una escala subdiaria y finalmente considera las escorrentías superficial y subsuperficial dentro de su conceptualización (Ver figura 11).

El modelo está basado en la ecuación del balance de masas:

$$\frac{ds}{dt} = q_{in} - q_{out} \quad \text{Ec (7)}$$

Donde  $q_{in}$  y  $q_{out}$  son las intensidades de caudal de salida y entrada normalizadas por el área del techo verde (mm/min)  $t$  es tiempo (min). La precipitación interceptada

por la capa de vegetación se es considerada como almacenamiento superficial  $S$  y  $S_{max}$  es su máxima capacidad, la capacidad del almacenamiento superficial es continuamente restablecida por evapotranspiración. Cuando se excede  $S_{max}$ , la precipitación efectiva  $P_{eff}$  es conducida como infiltración al almacenamiento subsuperficial. El almacenamiento subsuperficial  $R$  corresponde al volumen de agua que puede almacenar el sustrato y la capa de drenaje,  $R_{max}$  corresponde a la máxima capacidad del sustrato y la capa de drenaje y se calcula como la diferencia entre el contenido de humedad a capacidad de campo  $\theta_{FC}$  y el contenido de humedad permanentemente retenido (comparable con el punto de marchitez permanente  $\theta_{PWP}$ ).  $R = 0$  Corresponde al contenido de humedad retenido permanentemente en el techo verde, el cual puede variar dependiendo de las condiciones atmosféricas. El contenido de agua del almacenamiento subsuperficial es continuamente reducido por la evapotranspiración y cuando alcanza su capacidad máxima,  $Q_{ss}$  es conducido al almacenamiento de detención  $D$  almacena agua hasta el volumen máximo  $D_{max}$ , el almacenamiento de detención representa el exceso de agua que no puede ser retenido contra gravedad y por ende escurrirá como flujo subsuperficial a través de la capa de drenaje. Teóricamente, la máxima capacidad del almacenamiento de detención  $D_{máx}$  no puede exceder la diferencia entre el contenido de humedad a saturación y a capacidad de campo. Cuando se excede  $D_{máx}$  ocurre el flujo saturado superficial, cabe destacar que cuando ocurre el flujo saturado, se encuentran actuando éste y el flujo subsuperficial. La escorrentía del almacenamiento de detención es descrita por el método del reservorio no lineal:

$$Escorrentía = \begin{cases} kD^n, & h \leq D_{máx} \\ kD_{máx}^n + k_1(h - D_{máx})^{n1}, & h > D_{máx} \end{cases} \quad Ec (8)$$

Donde  $n$  y  $k$  son parámetros de transporte de la escorrentía subsuperficial a través de la capa de drenaje y  $n1$ ,  $k1$  son parámetro de transporte de la escorrentía superficial saturada.

La evapotranspiración  $ET$  restaura la capacidad de todos los almacenamientos, primero actúa sobre el almacenamiento superficial, si éste cae bajo cero, entonces actúa sobre el almacenamiento de detención y si éste cae bajo cero actúa sobre el almacenamiento subsuperficial, el modelo no asume evapotranspiración durante eventos de precipitación y no distingue entre la evaporación y la transpiración.

el modelo reproduce la hidrología de la cubierta verde a escala subhoraria, se considera que la evapotranspiración utilizada será el equivalente horario de la evapotranspiración de referencia  $ET_{sz}$  (en mm/hora) este modelo es propuesto en Walter et al., (2000), tal como se indica a continuación:

$$ET_{sz} = \frac{0.408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)}$$

Donde  $\Delta$  corresponde a la pendiente de la curva de presión de vapor a saturación-temperatura en  $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ ,  $\gamma$  la constante psicrométrica en  $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ ,  $R_n$  la radiación neta en la superficie del cultivo en  $\frac{MJ}{m^2 \cdot hora}$ ,  $u_2$  la velocidad promedio horaria del viento en  $\frac{m}{s}$  a dos metros de altura,  $e_s$  es la presión de vapor a saturación (kPa) entre 1.5-2.0 metros de altura,  $e_a$  la presión de vapor actual (kPa),  $C_n$  una constante que depende del tipo de referencia y del paso de tiempo en  $\frac{K \cdot mm \cdot s^3}{mg \cdot hora}$  y  $C_d$  una constante ( $\frac{s}{m}$ ) que cambia con el tipo de referencia y el paso de tiempo.

Para modelar la evapotranspiración en la cubierta verde ( $ET_t$ ), se utiliza el modelo de función de extracción de humedad (SMEF) expuesto por Zhao et al., (2013), el cual, trabajado con la nomenclatura del modelo hidrológico, depende de la evapotranspiración de referencia cada 1 minuto (equivalente a la horaria y la razón entre el almacenamiento subsuperficial  $R$  y el máximo almacenamiento subsuperficial  $R_{max}$ ), tal como se indica a continuación.

$$ET_t = ET_{sz} \frac{R_t}{R_{max}}$$

El flujo recargando el almacenamiento de detención  $Q_{ss}$  se relaciona con la razón del llenado del almacenamiento subsuperficial:

$$Q_{ss} = \begin{cases} P_{eff} \frac{\frac{R}{R_{m\acute{a}x}} - a}{1 - a}, \frac{R}{R_{m\acute{a}x}} > a \\ 0, \frac{R}{R_{m\acute{a}x}} \leq a \end{cases} \quad \text{Ec (10)}$$

Donde  $aR_{m\acute{a}x}$  es el contenido de agua límite sobre el cual el agua comienza a drenar desde el almacenamiento subsuperficial ( $0 \leq a \leq 1$ ). Cuando el almacenamiento superficial está lleno entonces  $Q_{ss} = P_{eff}$ . El parámetro  $a$  es un valor límite que cambia el hidrograma al inicio del evento de precipitación permitiendo la escorrentía del techo verde incluso si el almacenamiento subsuperficial tiene alguna capacidad.

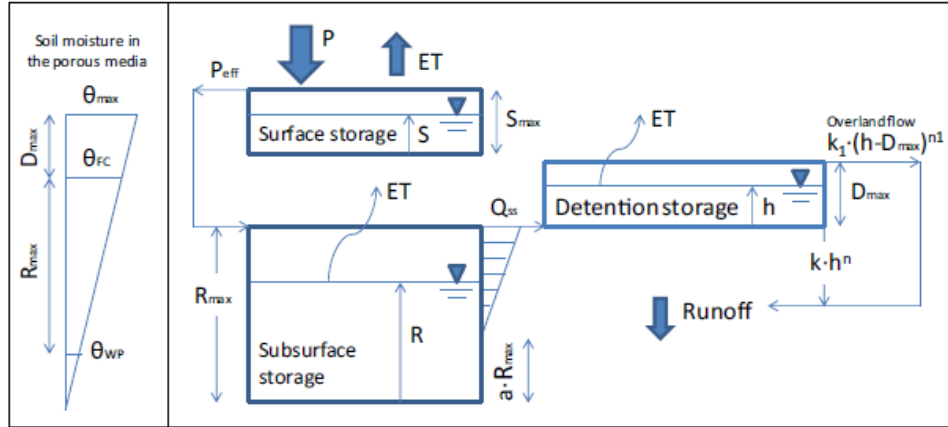


Figura 11.- Esquema del modelo de cubierta verde propuesto por Locatelli et al., (2014).

### 3.5. Extensión del Modelo Hidrológico

Para estudiar el desempeño hidrológico que las cubiertas verdes poseen en la zona, se procede a separar los eventos de precipitación cada 1 minuto, de las estaciones meteorológicas de Aeropuerto Bernardo O'Higgins y Panguilemo, ambas poseen datos de precipitación, velocidad de viento, radiación solar y humedad relativa con resolución temporal de 1 minuto. estos datos climáticos se utilizan como variables de entrada de los modelos hidrológicos. Adicionalmente se estudia el desempeño de los modelos hidrológicos calibrados al considerar los hietogramas de diseño a distintos periodos de retorno.

Para estudiar la respuesta hidrológica de las cubiertas verdes, tanto para los eventos independientes como para los hietogramas de diseño se consideraron como estadísticos la escorrentía peak, el porcentaje de reducción del peak, la duración temporal de la escorrentía, el retardo en el centroide de escorrentía y el volumen de agua retenido por la cubierta verde, estos estadísticos se computan comparando las series de escorrentía provenientes de los distintos tratamientos de cubierta verde y el de una cubierta verde de material impermeable (zinc o asfáltica por ejemplo), todas estas series son obtenidas a partir de modelación, los estadísticos pueden visualizarse en la Figura 12.

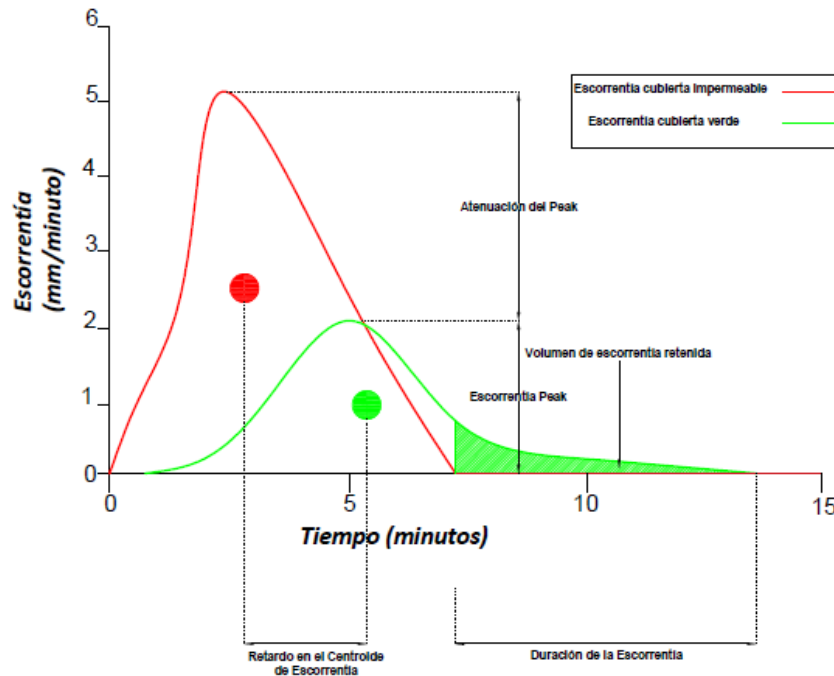


Figura 12.- Estadísticos generados a partir de la comparación entre la escorrentía de una cubierta verde y la de una cubierta de superficie impermeable. Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.1. Curvas intensidad, duración, frecuencia (IDF) generadas para obtener los hietogramas de diseño considerados en el estudio.

El modelo hidrológico considerado se programa a paso de minuto. Generalmente las curvas intensidad, duración y frecuencia (IDF) utilizadas en estudios hidrológicos en Chile, son de duración superior a la diaria, por lo que ajustará una curva IDF de duración subhoraria a manera de generar un hietograma de diseño con resolución temporal de un minuto a manera de utilizar estos datos como entrada al modelo hidrológico.

Para generar la curva IDF de duración subhoraria, se utilizan los datos de precipitación a 15 minutos de la estación meteorológica Universidad de Concepción, se obtienen la precipitación caída a diferentes duraciones, en este caso desde 15 minutos a 1440 minutos (1 día) para después ajustar la distribución de Gumbel (Chow,1964) para obtener las intensidades (mm/min) a diferentes duraciones temporales (15-1440 min). Posteriormente se trabaja con la expresión de Bernard (1932), donde la intensidad de precipitación  $I$  depende del periodo de retorno  $T$  y la duración  $D$ , tal como se indica a continuación:

$$I = k \frac{T^m}{D^n}$$

Los parámetros  $k$ ,  $m$  y  $n$  de la expresión de Bernard (1932) indicada anteriormente son ajustados a partir de la metodología de regresión lineal múltiple, La distribución

temporal de la tormenta de realizó a través del método de los bloques alternos indicada en Chow, (1964).

### **3.6. Calibración del modelo hidrológico**

Para la efectuar la calibración del modelo hidrológico, se utilizaron los datos experimentales resultantes de las pruebas de campo para cada una de las especies vegetales del presente estudio. La cantidad de parámetros a calibrar para cada tratamiento corresponde a once parámetros, a pesar de que el modelo original poseía 8 solamente, esto es debido a que se incorporaron al proceso de calibración, los almacenamientos iniciales  $S_0$ ,  $R_0$  y  $h_0$  para conseguir un modelo lo más ajustado a los datos experimentales. La metodología de muestreo de parámetros utilizada es la de Montecarlo, considerando un millón de simulaciones para cada tratamiento, la metodología de sensibilidad de parámetros fue la del “regional sensitivity analysis”, así como el modelo hidrológico se programó en Matlab, se utilizó el toolbox “Monte-Carlo Analysis Toolbox User Manual” (MCAT), cuya documentación se presenta en Lees & Wagener (2001). El toolbox, es una colección de funciones de análisis y visualización integradas a través de una interfaz gráfica de usuario, el toolbox puede ser utilizado para analizar los resultados de los experimentos de muestreo de parámetros o desde los métodos de optimización que son basados en las técnicas de evolución de población, igualmente se incorporan diversas técnicas para investigar la estructura, sensibilidad e incerteza en los parámetros y salidas provenientes de modelos matemáticos Lees & Wagener (2001).



## **4. RESULTADOS**

### **4.1. Capítulo I. Desafíos y evolución del drenaje urbano en Chile**

Camaño, J., & Arumí, J. L. (2018). Desafíos y evolución del drenaje urbano en Chile-Challenges and evolution of urban drainage in Chile. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(6), 132-152.

#### **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 a algunas medidas de control del agua lluvia en la fuente y los proyectos a 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, desagregación temporal, espacial de la precipitación diaria, elaboración de planes de conservación y rehabilitación de los cauces urbanos.

Palabras clave: drenaje urbano, SUDS, desafíos, Chile.



## 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 que provoca que los países requieran de nuevas soluciones para adaptarse a una solicitación cada vez mayor de sus sistemas de drenaje.

El País ha experimentado una evolución en materia de drenaje urbano a partir de 1997, antes de esa fecha Chile carecía de una institucionalidad y de una normativa que lo rigiese, posteriormente y a raíz de fuertes inundaciones acaecidas en el mismo año surge la necesidad de contar con instituciones que se encarguen 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”(SUDS: sustainable urban drainage systems, BMP: best management practices, LID: low impact development, técnicas alternativas, etc.) el cual pone énfasis en no sólo 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, la contaminación de los cuerpos receptores y en general 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, zanjas 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 y de 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, particularmente la zona cercana a Santiago, capital del país conformada por 37 comunas. Dentro de la región, particularmente los Ríos Mapocho y Maipo están sujetos a una urbanización constante sin embargo también se presentan superficies montañosas y agrícolas además de las urbanizadas. Los ríos cercanos a la cordillera se encuentran cercanos a zonas con poca superficie urbana, mientras que aguas abajo se concentran los asentamientos urbanos donde los cauces reciben mayor escorrentía producto 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, el primer río 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 13) y el segundo río en las estaciones El Manzano, Queltehues y Hualtatas (la primera aguas abajo de una superficie urbanizada, la segunda y tercera aguas arriba en condiciones sin urbanización), presentándose en la estación aguas abajo tendencias al alza en los caudales máximo y mínimos mientras que no se presentan tendencias significativas en las estaciones aguas arriba 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.

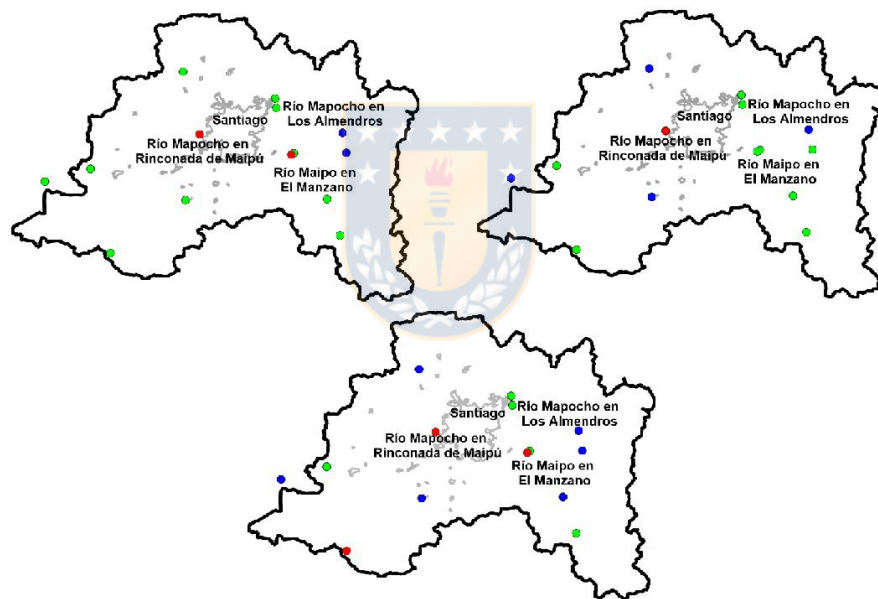
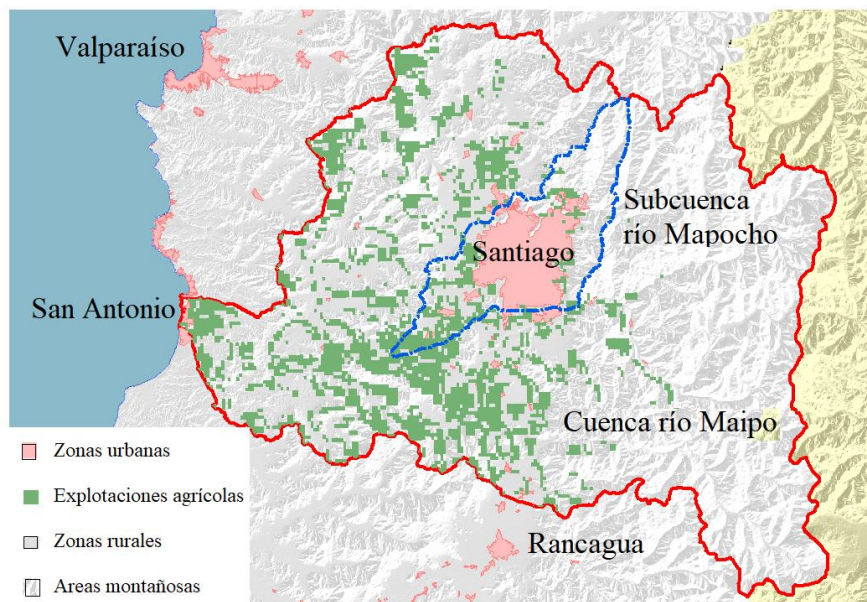


Figura 13.- Tendencias en los caudales máximos (a), mínimos (b) promedios (c) anuales para la Región Metropolitana, Chile (rojo: tendencia al alza, azul: tendencia a la baja, verde: tendencia no significativa). Fuente: Elaboración propia

## **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, maximizar las oportunidades de armonizar y de promover la biodiversidad (Woods-Ballard et al., 2007) y en la manera de 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 14), primero con la promulgación de leyes e instituciones ambientales, segundo con la creación de leyes e institucionalidad explícitas en drenaje urbano y tercero 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 19.300, 1994) la cual primero establece el derecho de la población de vivir en un medio ambiente libre de contaminación, regula la protección del medio ambiente, 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, especialmente los 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. Actualmente (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 20.417, 2010). Algunas de las medidas estructurales SUDS fueron primeramente recogidas y publicadas 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 también 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 basado 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, sin embargo recopilaba el conocimiento de la época en esta materia y es sin duda alguna 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, antes de 1997, 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 cuerpos 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 18.695, 1988) y la ordenanza general de urbanismo (Decreto 47, 1992) y construcción dentro de los documentos técnicos. La ley general de urbanismo y construcciones asignaba a las municipalidades de cada ciudad chilena la responsabilidad del saneamiento de las poblaciones insalubres y que el diseño y construcción de los sistemas de evacuación de aguas lluvia debería 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 así como también su limpieza cuando éstos se encontraran obstruidos y además de la elaboración del plan regulador comunal donde se establecen las zonas con riesgo de inundación pudiendo incluso erradicar poblaciones que se encuentren emplazadas en éstas zonas. No fue sino hasta el año 1997 donde se promulgó la ley 19.525 donde se establecía como deber del estado , el velar por que en las ciudades y centros poblados existan sistemas de evacuación y drenaje de aguas lluvias. Esta ley vino a solucionar diversas falencias institucionales y técnicas en cuanto a responsabilidad de parte de los organismos públicos y privados en drenaje urbano. Dentro de las mejoras técnicas propuestas destacan el velar por la construcción de colectores de aguas lluvias separados de los de aguas servidas, el haber separado la red de evacuación y drenaje de aguas lluvias en una red primaria y una red secundaria dependiente de entes públicos independientes y el haber establecido 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 19.525 sentó las bases para la gestión del drenaje urbano en Chile, antes de 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 ésta 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 aportes 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.) así como también 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 hacia el 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.

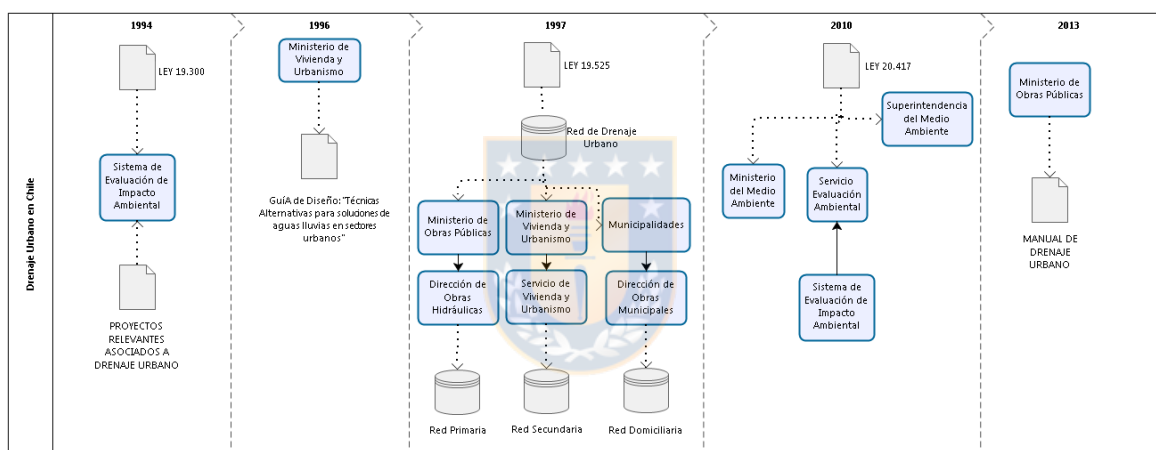


Figura 14.- Evolución institucional y normativa del drenaje urbano en Chile.  
Fuente: Elaboración propia.

## Drenaje urbano sustentable en Chile: Proyectos de Investigación y Construcción.

La investigación de Chile en drenaje urbano ha ido avanzando de manera paralela a 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 y destacan la implementación de algunas medidas estructurales SUDS a las condiciones hidro-climáticas del país, mayormente en obras de control en la fuente, destacando las cubiertas verdes, pavimentos permeables y jardines infiltrantes. 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 de utilizar bajo condiciones de techos verdes, destacando las asociaciones de *Glandularia berterii*, *Geum magallanicum* y *Cotula scariosa*. En pavimentos permeables De Solminihac, Videla, Fernandez y Castro, (2007). Estudiaron 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 destacan el haber propuesto 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 mostrando que se pueden obtener altas tasas de recarga. Posteriormente 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 han prosperado este tipo de barrios y han sido fuertemente demandados por 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 cuidadosamente armonizada con las áreas de recreación, construyéndose una

laguna de 8 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 La Reserva, 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 a 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 esta materia en cuanto al monto invertido y la integración multidisciplinaria academia-Estado en su 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 antiguamente industrial, aledaño a vertederos, donde proliferaba la delincuencia y donde se encontraba el otrora 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 cincuenta y tres mil millones de pesos y se licitó en 5 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 y 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 a 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 a la descarga de residuos líquidos a 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 7 tormentas en 2001 midiendo 37 elementos y obteniendo las concentraciones medias por evento, concentraciones instantáneas y contrastándolas con los decretos 90 y 46 obteniendo que el decreto supremo 90 fue superado en parámetros como 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 deban cumplir éstas antes de que ingresen a los cuerpos receptores y de establecer 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, actualizar los planes reguladores de las ciudades para que éstos definan fielmente la llanura de inundación donde se evite la construcción en aquellas zonas, se definan y protejan los hábitats acuáticos urbanos, 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 así evitar la infiltración del agua lluvia a la red de alcantarillado.

### **Tópicos especializados**

A pesar de que Chile presenta varias investigaciones en drenaje urbano, requiere aún 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 aún 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 y 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 y un clima muy frío en el extremo sur, lo que implica que la escorrentía es producida por el derretimiento nival, 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, especialmente en cubiertas verdes, zanjas revestidas con vegetación, pavimentos permeables, pozos absorbentes y el aporte 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 ni 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). etc., Sin embargo, 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 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 fluviométricas 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 19.525 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 posteriormente 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 modelación de obras de control del agua lluvia en la fuente (SUDS) y ha sido llevada a cabo mayoritariamente por la Pontificia Universidad Católica de Chile, sin embargo, 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 que considera los conceptos del drenaje urbano sostenible dentro de su planificación y que reemplaza a una obra obsoleta de drenaje tradicional. En las urbanizaciones, sólo en las de mayor valor monetario se observa que consideren algunos principios SUDS dentro de su planificación, por lo que se hace 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 de Chile en materia de drenaje urbano se centran mayoritariamente 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, desagregación temporal y espacial de la precipitación diaria, elaboración de planes de conservación/rehabilitación de cauces urbanos y desarrollar 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. Adicionalmente, 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 Solminihac, 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>

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>

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>

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>

Dussaillant, 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. (June, 2016). A hydrological model to study the performance and irrigation of stormwater facilities. Moving towards an integrated and sustainable urban water management. Novatech, Lyon, France.

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

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

Koutsoyiannis, D. (May, 2003). Rainfall disaggregation methods: Theory and applications. *Proceedings, Workshop on Statistical and Mathematical Methods for Hydrological Analysis*. Università di Roma "La Sapienza", Rome, Italy.

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 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>

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>

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

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 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](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. Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

Montt, J., Rivera, Pedro., Fernández, Bonifacio., & Valenzuela, R. (Noviembre, 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 (pp. 171-177), 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. (July, 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: Ciria.





## **4.2. Capítulo II. Caso de Estudio: Desempeño hidrofísico nutricional de sustratos de cubierta verde chilenos**

Camaño.J, Arumí.JL, Sandoval.M, Solís.A. Desempeño hidrofísico nutricional de sustratos de cubierta verde chilenos.

### **Manuscrito enviado a urban water journal**

#### **Resumen**

Las cubiertas verdes poseen múltiples beneficios para el entorno, disminuyen la temperatura, actúan como aislante térmico, retienen, detienen la escorrentía urbana en las ciudades entre otros, sumado a la mejora paisajística que ofrecen al medio. En Chile su construcción ha sido motivada más por éste último beneficio. A pesar de lo anterior, aún debe investigarse cómo adaptar esta tecnología a la realidad climática del país, careciéndose de una normativa de cómo utilizar éstos sistemas, existiendo desconocimiento de qué propiedades de los sustratos son las idóneas para sustentar de mejor manera a las especies mayormente utilizadas en el país, de éstas, la variedad Sedum es la más utilizada. El objetivo de la investigación es estudiar la interacción del contenido de nutrientes, la granulometría, conductividad eléctrica y la retención de agua de tres sustratos comercializados en Chile en el estado general de la especie Sedum rojo (*Sedum spurium voodoo*) mediante un medidor portátil de clorofila. A raíz de la investigación se recomienda la garantía de un alto PH, una buena retención de agua y la utilización de arcilla en el medio de crecimiento de la cubierta verde. El medidor portátil de clorofila resultó ser una herramienta válida para vincular el estado general del Sedum rojo con las propiedades del medio de crecimiento. Los hallazgos presentados en la presente investigación contribuyen a suministrar criterios validados en laboratorio al igual que mediante una instalación experimental para el desarrollo de nuevos sustratos de cubierta verde afines a las especies mayormente utilizadas en el país.

Palabras clave: cubiertas verdes, sustratos, drenaje urbano sustentable

#### **Introducción**

Las cubiertas verdes corresponden a estructuras vegetadas ubicadas en las azoteas de edificios o viviendas, se componen de una capa vegetal, un medio de crecimiento o sustrato, una capa de drenaje y una barrera contra raíces.

Existen múltiples beneficios asociados a la instalación de cubiertas verdes en edificaciones, algunos de ellos actúan a escala residencial mientras que otros a escala de ciudad. A escala residencial (viviendas, edificios) existen beneficios

térmicos asociados, ya que las cubiertas verdes al encontrarse más frías que las cubiertas convencionales, provocan que el aire al interior de la residencia se encuentre a menor temperatura, disminuyendo el costo energético de enfriar el interior del edificio producto del calor del sol (Garrison et al. 2012). A escala de ciudad los beneficios de las cubiertas verdes se encuentran asociados al drenaje urbano sostenible (Elliott and Trowsdale 2007) y a la disminución de la temperatura en las ciudades funcionando de igual manera que a escala residencial. Como estructura de drenaje urbano sostenible, las cubiertas verdes contribuyen a la detención y a la retención de la escorrentía urbana (Stovin, Vesuviano, and De-Ville 2012) lo que se traduce en una menor sollicitación de los colectores de aguas lluvias y una mejora en la calidad de ésta al disminuir la velocidad de la escorrentía permitiendo su sedimentación. A pesar de estos beneficios, las cubiertas verdes contribuyen significativamente a mejorar el paisaje permitiendo emular las condiciones naturales del lugar, otorgando un hábitat para especies de aves e insectos.

Las especies vegetales utilizadas en cubiertas verdes son resistentes a la sequía, al soleamiento total o parcial, heladas, plagas, poseen una buena tasa de sobrevivencia y se desarrollan en medios de crecimiento de baja profundidad. Dentro de estas especies, el *Sedum* es especialmente utilizado en cubiertas verdes en una amplia variedad de climas a lo largo del mundo, creciendo satisfactoriamente en condiciones especialmente secas, capaz de sobrevivir sequías severas debido a su metabolismo carbono fotosintético y a su habilidad para almacenar agua (Monterusso, Rowe and Rugh 2005). Sin perjuicio de que se utilicen especies idóneas como cobertura vegetal, las propiedades del medio de crecimiento afectarán tanto el desempeño físico como el hidrológico y el nutricional de la cubierta verde.

Físicamente, el sustrato supondrá una carga a la estructura de cubierta de la edificación, el cual además es factible de erosionarse, por lo que propiedades como la densidad y la granulometría son importantes de determinar antes de instalarlo en la estructura. Hidrológicamente, el sustrato hace las veces de reservorio, sobre éste actúa la precipitación como variable de entrada, mientras que la evapotranspiración y la escorrentía (superficial o subsuperficial) actúan como variables de salida, la capacidad de evapotranspirar de una cubierta verde depende de la especie vegetal escogida, sin embargo sin una adecuada retención de agua por parte del sustrato la planta no evapotranspirará (mantendrá cerrados sus estomas) lo suficiente, no pudiendo restablecerse la capacidad de almacenamiento del sustrato, disminuyendo su funcionalidad como estructura de drenaje urbano sostenible, la escorrentía por el contrario, permite evacuar el agua de la cubierta, disminuyendo

el peso de la cubierta verde sin embargo disminuyendo igualmente su capacidad de retención.

Nutricionalmente, el sustrato es la fuente de nutrientes capaces de ser utilizados por la planta para su metabolismo, su disponibilidad está sujeta a las condiciones de PH, contenido de materia orgánica y la presencia de coloides principalmente, resultan particularmente importantes para las especies vegetales nutrientes como el nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, manganeso, zinc y el hierro, El nitrógeno en primer lugar y el fósforo en segundo, corresponden a los nutrientes que mayoritariamente limitan el crecimiento de las plantas. El nitrógeno participa de la biosíntesis de proteínas así como de la estructura de éstas, principalmente como componente estructural de los ácidos glutámico, aspártico al igual que de los ácidos nucleicos (como base nitrogenada), de los glucósidos, etc., el nitrógeno se encuentra en la mayor parte de las combinaciones orgánicas y es el nutriente que en mayor cantidad limita el crecimiento vegetal. El fósforo, después de nitrógeno corresponde al segundo principal nutriente que limita el crecimiento, es componente de los ácidos nucleicos (ADN, ARN), fosfolípidos, coenzimas, se relaciona directamente con la bioenergía celular, la regulación metabólica y la fotosíntesis. El potasio actúa como catalizador de reacciones que conducen a la biosíntesis de glúcidos, proteínas, la reducción del nitrato a nitrito, participa de la fotosíntesis regulando el PH al interior del cloroplasto y estimulando la asimilación del dióxido de carbono para aprovechar de mejor manera la energía luminosa. El azufre es componente de enzimas, coenzimas que catalizan reacciones químicas de síntesis de proteínas, lípidos, ácidos orgánicos, clorofila y es componente estructural de proteínas específicas que participan del transporte de electrones durante el proceso fotosintético. El manganeso participa en la glucólisis, en el metabolismo de los ácidos auxínicos, del nitrógeno, pero posee un rol fundamental en el proceso fotosintético, particularmente en la fotólisis del agua donde actúa unido al cloroplasto para retirar electrones del agua a partir de la luz que ioniza el fotosistema II. El hierro es componente estructural tanto de enzimas o de su grupo no proteínico (enzimas hemínicas) al igual que proteínas específicas como la ferredoxina, fitoferritina, citocromos, etc. Particularmente éstas últimas participan del proceso fotosintético transportando electrones durante el proceso fotosintético. El zinc es un elemento estructural o cocatalítico de las Zn enzimas, algunas de ellas catalizan la incorporación del nitrógeno inorgánico al nitrógeno orgánico, permiten la síntesis del ácido  $\beta$  indolacético y la síntesis de RNA entre otros.

Algunos nutrientes se encuentran en forma de sales en la disolución del suelo, los cuales al disolverse en un medio líquido se separan en iones positivos y negativos capaces de transportar la energía eléctrica, este contenido de sales solubles puede

medirse indirectamente a través de la conductividad eléctrica, la cual es la capacidad de un material o sustancia para conducir corriente eléctrica a través de él (Rajput 2004) y su unidad de medida es el deciSiemens por metro.

A pesar de que el contenido de sales, el contenido de humedad y de nutrientes puede determinarse mediante ensayos de laboratorio, resulta complejo estimar cómo se encuentran interactuando los contenidos de agua y de nutrientes en forma instantánea. El contenido de clorofila de las hojas es un indicador del estado de la planta en general. Existen medidores de clorofila portátiles como los SPAD, el valor arrojado por estos equipos se obtiene en función de la absorbancia de la hoja en dos longitudes de onda, la roja y la infrarroja. El equipo emite luz en las longitudes de onda ya mencionadas, la cual es capturada, convertida por un receptor en una señal eléctrica análoga, ésta es luego amplificada y convertida en una señal digital, para luego calcular un valor numérico proporcional al contenido de clorofila obtenido por un microprocesador, el cual se muestra en la pantalla del equipo (Minolta 1989).

En Chile existen pocos estudios de cubiertas verdes, destacando el de Olate et al. (2011), donde se evaluaron 16 especies nativas de la zona central de Chile para uso en cubiertas verdes, la evaluación consistió 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 de utilizar bajo condiciones de techos verdes, destacando las asociaciones de *Glandularia berterii*, *Geum magallanicum* y *Cotula scariosa*. Sin embargo no existen estudios sobre las propiedades físicas, hidrológicas ni nutricionales de los sustratos de cubierta verde que se comercializan en el país, ni cómo estas propiedades interactúan en conjunto con la vegetación utilizada como cobertura vegetal en sistemas de cubierta verde.

## **Materiales y Métodos**

El objetivo de la investigación es estudiar la interacción de las propiedades físicas, hidrológicas y nutricionales de tres sustratos de cubierta verde comercializados en Chile sobre el estado general del *Sedum* rojo (*Sedum spurium vodoo*) utilizado como cobertura vegetal. Se construyeron 9 módulos de cubierta verde de 0.40 x 0.40 metros en terciado estructural de 9 milímetros, cada módulo consiste en un paquete de cubierta verde compuesto por una barrera contra raíces, una capa de drenaje, un sustrato o medio de crecimiento y una cobertura vegetal de *Sedum* Rojo (ver Figura 15). Se consideraron tres tratamientos correspondiendo cada uno a un tipo



de sustrato comercializado en el país y para cada tratamiento se consideraron tres repeticiones (9 en total). Los tres tratamientos se encontraron bajo las mismas condiciones ambientales y de riego por 4 meses y una vez a la semana se registraron los contenidos de clorofila a través de un SPAD-502.

A los tres sustratos se les determinaron las propiedades físicas de granulometría, densidad. Para el caso de la granulometría se utilizó una banda granulométrica de 12 tamices ASTM con aberturas desde 12.5 a 0.05 milímetros, para la determinación de la densidad se utilizó un molde de volumen conocido y se registró la masa que albergaba ese volumen. Se consideró como propiedad hidrológica la retención de agua, por lo que se determinaron las curvas de retención de humedad de cada sustrato mediante una cacerola a presión.

Se determinaron los contenidos de nitrógeno amoniacal, nitrógeno nítrico, fósforo extractable, potasio disponible, potasio, calcio, magnesio, sodios intercambiables, capacidad de intercambio de cationes efectiva, hierro, manganeso y zinc disponibles. Adicionalmente se estimaron el contenido de materia orgánica y el PH de cada sustrato. La determinación de nutrientes la realizó el Laboratorio de Química de suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción sede Chillán, Chile.



Figura 15.- Vista de los tres tratamientos utilizados en el estudio plantados con *Sedum spurium voodoo*. Fuente: Elaboración propia.

## Resultados

En la tabla I se indican las propiedades nutricionales y las propiedades físicas de densidad y conductividad eléctrica obtenidas para cada sustrato de cubierta verde.

Tabla 2.- Densidad, conductividad eléctrica y contenidos de nutrientes encontrados en los tres sustratos de cubierta verde.

Parámetro	Unidad	Sustrato 1	Sustrato 2	Sustrato 3
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	750.00	1160.00	1163.33
Conductividad Eléctrica	dS/m	0.45	1.98	2.87
PH en Agua	adimensional	4.14	7.08	7.17
Materia Orgánica	%	17.96	3.98	3.64
Nitratos (N-NO <sub>3</sub> )	mg/kg	77.80	9.10	38.00
Amonio (N-NH <sub>4</sub> )	mg/kg	45.30	2.30	1.30
Nitrógeno Disponible	mg/kg	123.10	11.40	39.30
Fósforo Olsen	mg/kg	58.10	68.30	73.20
K Disponible	mg/kg	497.20	545.10	926.50
K Intercambiable	cmol/kg	1.27	1.40	2.38
Ca Intercambiable	cmol/kg	5.20	5.25	8.58
Mg Intercambiable	cmol/kg	2.66	1.02	1.32
Na Intercambiable	cmol/kg	0.54	0.26	0.69
CICE	cmol/kg	9.81	7.93	12.98
S Disponible	mg/kg	110.10	284.10	350.50
Fe	mg/kg	384.80	8.40	9.00
Mn	mg/kg	21.60	2.60	2.60
Zn	mg/kg	6.60	3.80	3.80

## Resultados de nitrógeno

Se observan contenidos especialmente altos de nitrato y amonio en el primer sustrato en comparación a los otros dos (Tabla I), estos contenidos especialmente altos pueden deberse a la mayor cantidad de materia orgánica, la cual es materia prima para los procesos de aminificación, amonificación, sin embargo se presume la utilización de algún fertilizante nitrogenado debido a la gran cantidad de nitrógeno disponible presente en el sustrato y la acidez del suelo (Havlin et al. 2014), debido a que la máxima disponibilidad de nitrógeno se encuentra en condiciones de PH neutro y no a PH ácido. El primer sustrato posee un alto contenido de nitrato, sin embargo, es mucho más liviano y más drenable que los demás por lo que se



experimentarán mayores pérdidas de nitrato por lixiviación. Los otros dos sustratos poseen bajos contenidos de nitrato y de amonio, sin embargo poseen características favorables para la retención del nitrógeno, poseen un PH neutro que garantiza la máxima disponibilidad del elemento favoreciendo la nitrificación, mucha presencia de arcilla la cual retiene los iones amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) adsorbiéndose a la superficie de la arcilla y limita la fuga de nitrato por lixiviación debido a sus características poco drenables. (Havlin et al. 2014).

### **Resultados de fósforo**

El primer sustrato presentó el menor contenido de fósforo disponible (Tabla I), este menor contenido entre los tres sustratos puede deberse a la acidez que presenta este sustrato (es el más ácido de los tres), pues los óxidos libres de Fe y Al son más solubles en condiciones de acidez, liberándose iones  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Al}^{+3}$  que reaccionan con los aniones fosfato o reaccionando directamente con los óxidos hidratados de éstos mismos elementos (Sharpley 2000). A pesar de lo anterior este sustrato presenta un alto contenido de materia orgánica por que los ácidos orgánicos producto de la degradación de ésta se encontrarían reaccionando con los iones  $\text{Fe}^{+3}$  y  $\text{Al}^{+3}$  aumentando la disponibilidad de fósforo en el medio de crecimiento.

Los sustratos 2 y 3 presentaron contenidos de fósforo disponibles similares, superiores al sustrato 1. Ambos sustratos presentan un PH equivalente a 7 y un 4% de materia orgánica. El fósforo se encuentra más disponible en ambos sustratos debido al PH, el cual encaja dentro del intervalo donde el fósforo se encuentra más disponible, debido a que los aniones fosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  y  $\text{PO}_4^{3-}$ ) presentan una concentración media, no se encuentran reaccionando con los  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Al}^{+3}$  provenientes de la disolución de los óxidos de Fe y Al o con los óxidos mismos, pues estos elementos presentan una muy baja solubilidad en este intervalo de PH. Debido al bajo contenido de materia orgánica, ésta no se encontraría participando en aportar a la disponibilidad de fósforo, sin embargo los dos últimos sustratos al poseer un alto contenido de arcillas, favorece la retención de los aniones fosfato por elementos adsorbidos o que formen parte de las arcillas.

### **Resultados de potasio**

Se observan altos contenidos de potasio disponible en los tres sustratos, especialmente en los dos últimos sustratos (Tabla I). La alta disponibilidad de este elemento en los sustratos 2 y 3 se debe a condiciones de PH, contenido de cationes básicos ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{Na}^+$ ) y sus porcentajes de saturación respectivos. Ambos sustratos poseen PH cercanos a 7, altos contenidos de Calcio seguido por el potasio intercambiables, altos porcentajes de saturación de potasio, garantizando una buena cantidad de potasio hábil para ser adsorbido por lo coloides del suelo,

permitiendo la liberación (lenta en el tiempo) de éste desde los coloides y minimizando las pérdidas de este elemento por lixiviación (Thomas and Hipp 1968).

Para el sustrato 1 en cambio el potasio se encuentra menos disponible que en los otros dos sustratos debido a una condición ácida y una menor saturación de calcio, sin embargo la cantidad de potasio disponible sigue siendo considerable (379 mg/litro), lo cual puede evidenciarse en las cantidades similares de potasio intercambiable y el porcentaje de saturación de éste, las cuales son ligeramente menores que las encontradas en los sustratos 2 y 3 implicando que en el sustrato 1 el potasio  $K^+$  se encuentre igualmente participando en buena proporción del intercambio catiónico junto con los coloides del suelo aportando a la disponibilidad de potasio en el suelo, aunque en una menor proporción que en los otros dos sustratos.

### **Resultados de azufre**

Se evidencian altos contenidos de azufre disponible en los sustratos 2 y 3 (ver Tabla I), encontrándose la menor disponibilidad de azufre en el sustrato 1. La gran disponibilidad de azufre en los dos últimos sustratos es posible de explicar por su composición, debido a que el ladrillo molido forma parte de ésta, el cual es por naturaleza arcilla cocida, ésta arcilla contribuye a fijar los sulfatos a pesar de que se alcance la mayor fijación en condiciones de acidez, la presencia de calcio, potasio como cationes adsorbidos a la arcilla también contribuyen a la fijación de sulfatos (Scherer 2009) reflejándose en sus porcentajes de saturación respectivamente, la materia orgánica y el contenido de hierro no se encuentran aportando a la disponibilidad de azufre debido al bajo contenido de materia orgánica en ambos sustratos y a la poca solubilidad del hierro a PH 7. Tal como se indicó anteriormente, existe poca disponibilidad de azufre en el sustrato 1 en comparación con los demás, en especialmente debido a la carencia de arcillas en su composición, sin embargo la cantidad de azufre disponible es igualmente considerable, estos se debe a los altos contenidos de materia orgánica y de hierro, por lo que se favorecerían los procesos de mineralización del azufre orgánico, retención de los sulfatos por parte de la materia orgánica y de los hidróxidos de hierro, ambos procesos encontrándose favorecidos por la condición de acidez actual que presenta el sustrato.

### **Resultados de manganeso**

Se evidencian contenidos de manganeso mayores en el sustrato 1 en comparación con los sustratos 2 y 3 (ver Tabla I), esto puede explicarse por la acidez que presenta el primer sustrato y su alto contenido de materia orgánica, pues en condiciones ácidas el manganeso se estaría encontrando mayoritariamente bajo la forma de  $Mn^{+2}$  en la solución del sustrato y el alto contenido de materia orgánica se

encuentra contribuyendo a mantener este estado de manganeso (Munson 2018). De forma contraria los menores contenidos de manganeso encontrados en los sustratos 2, 3 se explican por su baja acidez, propiciándose la aparición del manganeso como  $Mn^{+3}$ ,  $Mn^{+4}$  encontrándose como manganeso menos disponible para la especie vegetal utilizada como cobertura vegetal y sin capacidad de retención ni de direccionar la reacción hacia  $Mn^{+2}$  debido a la falta de materia orgánica.

### **Resultados de hierro**

Existe mucha mayor disponibilidad de hierro en el primer sustrato en comparación a los dos restantes (ver Tabla I). El alto contenido de hierro del primero se evidencia por las condiciones ácidas que presenta éste al igual que la gran cantidad de materia orgánica contribuyendo a retener el elemento. La menor presencia de hierro encontrado en los sustratos restantes es muy similar, esto una consecuencia de la baja acidez así como también el bajo porcentaje de materia orgánica, sin embargo estos sustratos restantes presentan igualmente condiciones propicias para la retención del hierro, la arcilla constituyente del ladrillo molido contribuye positivamente a adsorber el hierro, manteniéndolo como intercambiable y capaz de ingresar a la solución del suelo cuando las condiciones los permitan (Colombo et al. 2014). La gran disponibilidad de hierro del primer sustrato no necesariamente provoca toxicidad por este elemento, a PH=4 sólo un 1% del hierro se encuentra en condiciones de ser asimilado por las especies vegetales del 100% disponible a PH=3.

### **Resultados de zinc**

Existen mayores condiciones propicias para una mayor disponibilidad de zinc en el primer sustrato debido a sus condiciones de acidez, lo cual se evidencia por su mayor contenido (Tabla), sin embargo, las altas cantidades de materia orgánica, fósforo y nitrógeno se encuentran disminuyéndola. Los dos últimos sustratos presentan condiciones más desfavorables para la disponibilidad de este elemento como un alto PH, alto contenido de nitrógeno, sin embargo, la presencia de arcilla, además de las bajas cantidades de materia orgánica y de fósforo encontradas se encuentran favoreciendo la disponibilidad de zinc (Scherer 2009), estas condiciones permiten que la diferencia de zinc entre los sustratos no sea tan sustantiva.

### **Resultados granulometría**

Al estudiar el tamaño de los granos de los tres sustratos de cubierta verde, pueden observarse algunas diferencias y otras similitudes. El sustrato 1 es el que posee los granos de mayor tamaño de los tres, con un máximo mayor a los 12.5 mm, presentando una distribución granulométrica homogénea, concentrándose la mayor

cantidad entre las fracciones  $1 \geq D > 3.15$  milímetros. Los sustratos 2, 3 ambos presentan una granulometría similar, más fina que la del sustrato 1 donde el tamaño máximo de éstos se encuentra entre 9.5 y 6.3 mm, ubicándose la mayor proporción de los granos entre los diámetros  $6.3 \leq D < 9.5$  milímetros. La norma FLL (2008) establece algunos límites granulométricos para los sustratos que se utilizan en sistemas de cubierta verde extensiva los cuales se aprecian como área gris en la Figura 16, los tres sustratos se encuentran dentro de la franja gris por lo que se encuentran cumpliendo las bandas granulométricas que establece la norma Alemana.

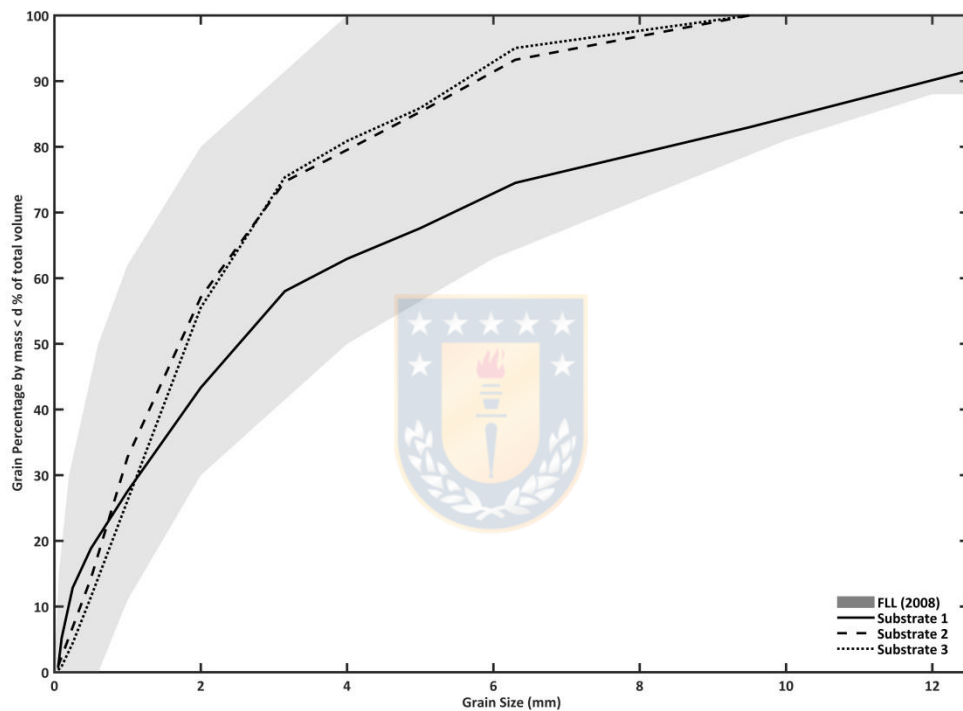


Figura 16.- Distribución granulométrica de los tres sustratos de cubierta verde en estudio. Fuente: Elaboración propia.

### Resultados de retención de humedad

Las curvas de retención obtenidas para los tres sustratos indican que existen diferencias en el agua que es posible almacenar en cada uno de los sustratos tal como muestra la Figura 17, debido a la composición propia de cada uno de éstos. Se considera como humedad aprovechable la diferencia entre los contenidos de humedad gravimétricos de capacidad de campo (33 KPa) y punto de marchitez permanente (1520 Kpa). Se obtuvieron resultados de humedad aprovechable de 0.12, 0.09, 0.09 g/g para los sustratos 1, 2 y 3 respectivamente, concluyéndose que

el primer sustrato almacena un 29% más agua que los demás, pudiendo hallarse en mayor cantidad para ser aprovechada por la cobertura vegetal para satisfacer sus necesidades hídricas.

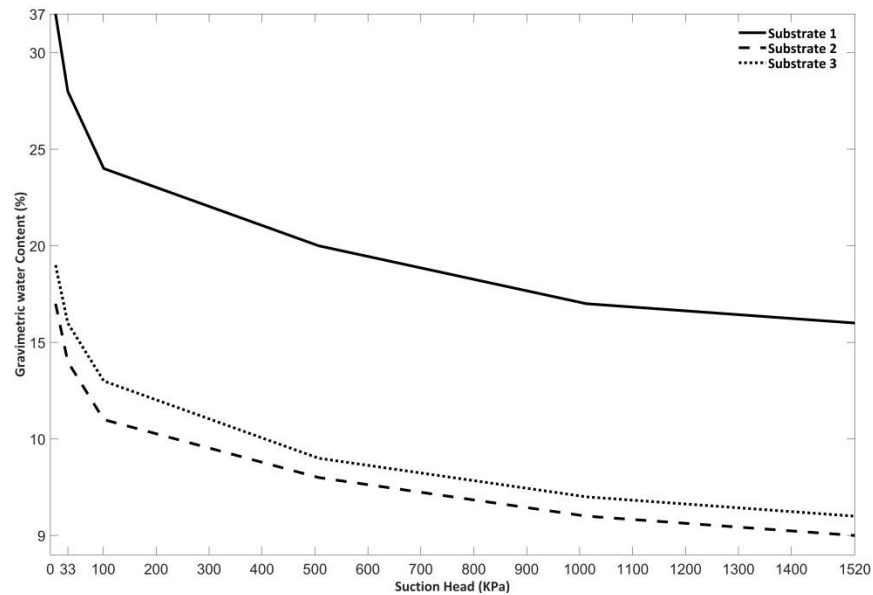


Figura 17.- Curvas de Retención de Humedad de los tres sustratos de cubierta verde. Fuente: Elaboración propia.

### Resultados de conductividad eléctrica

Para los tres sustratos se obtuvieron bajos valores de conductividad eléctrica, lo cual es un indicador de que existen bajos contenidos de sales solubles, además de que los sustratos no son salinos. El catión predominante en las sales solubles pareciera ser el calcio al encontrarse en mayor cantidad como intercambiable en todos medios de crecimiento pudiendo ingresar a la solución llegado el momento. Los aniones predominantes parecieran ser los sulfatos ( $\text{SO}_4^-$ ) debido a los altos contenidos de azufre encontrados especialmente en los dos últimos sustratos y el anión hidrógeno carbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) en el primer sustrato producto de la descomposición de la alta cantidad de materia orgánica. A partir de lo anterior es posible inferir que las sales predominantes podrían ser el yeso (sulfato cálcico) y además el bicarbonato de calcio en el primer sustrato debido a su composición orgánica.

### Resultados actividad fotosintética

La medición con el SPAD-502 presenta bastante dispersión, existen mediciones que se alejan bastante de los percentiles 25, 75 ilustrados en los diagramas de caja (boxplot en inglés), esta dispersión incide sobre el promedio, mediana, los cuales se encuentran distantes entre sí. El primer sustrato permitió una mayor actividad

fotosintética a través del contenido de clorofila medido con el instrumento, mientras que el último sustrato fue el que presentó la menor actividad, estos comportamientos se observan en la Figura 18.

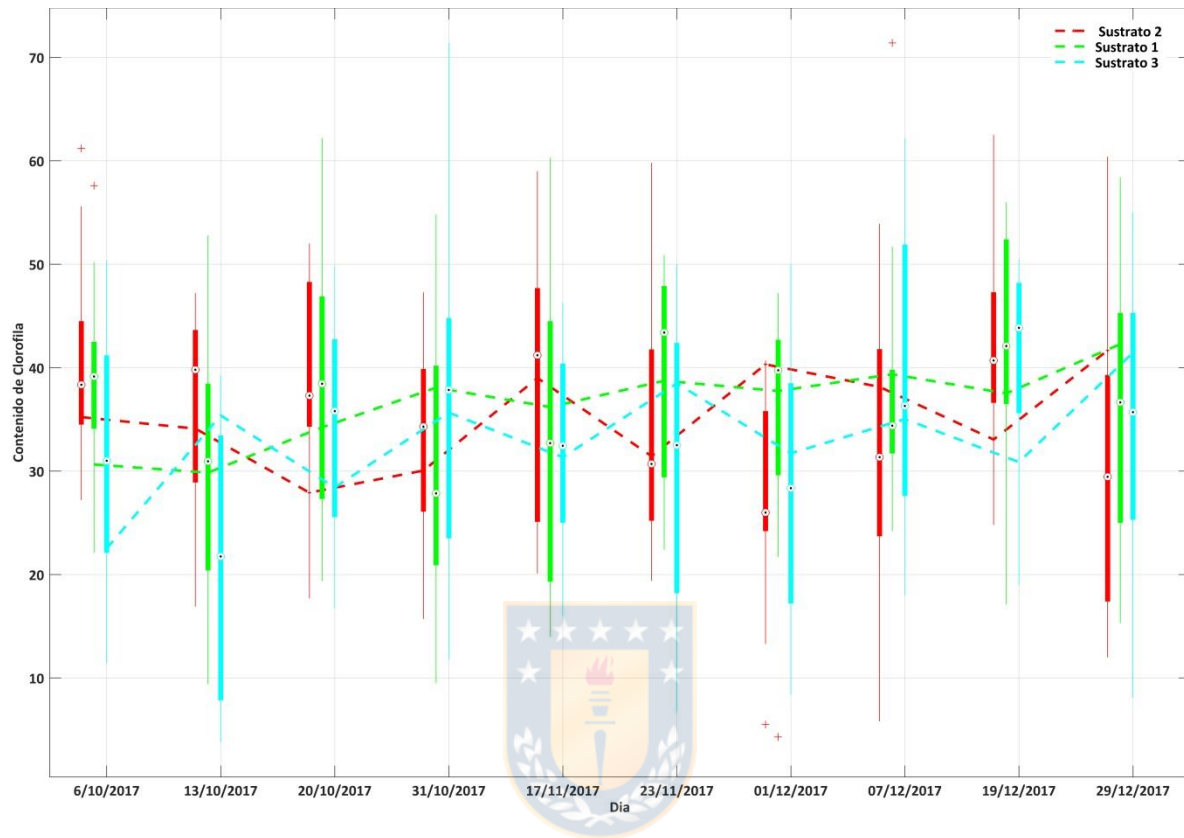


Figura 18.- Actividad fotosintética del Sedum rojo semanal (las líneas segmentada representa el promedio diario del contenido de clorofila para cada sustrato).

Fuente: Elaboración propia.

## Discusión

La fotosíntesis es un proceso complejo, participan como variables de entrada el agua, dióxido de carbono, energía luminosa junto con nutrientes presentes en el medio de crecimiento tales como el nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, manganeso, hierro entre otros, igualmente las propiedades físicas juegan un papel fundamental a la par de los nutrientes presentes en los sustratos. Respecto a los nutrientes, la norma Alemana (FLL 2008) establece algunas directrices sobre nutrientes, PH, sales indicando que grandes reservas de nutrientes y sales no deben permitirse para evitar su posterior fuga o lixiviación desde las cubiertas verdes, fijando también el rango de PH del medio de crecimiento entre 6.0 - 8.5 que corresponde al intervalo que garantiza la máxima disponibilidad de nutrientes. Muchos de los parámetros



que establece la norma alemana son complejos de aplicar en Chile debido a que muchos procedimientos y protocolos de ensayo se encuentran normados bajo estándares alemanes, haciendo que no sean fielmente comparables a protocolos de ensayo chilenos, por lo que se requiere de una normativa equivalente para Chile.

En los tres sustratos de cubierta verde se encontraron altos contenidos de potasio, azufre y fósforo, particularmente el sustrato 1 posee contenidos muy superiores de nitrógeno, fierro y manganeso mientras que los otros dos sustratos poseen contenidos menores de éstos últimos tres elementos, aunque si poseen altos contenidos de potasio. El Nitrógeno, fierro y el manganeso tienen un papel fundamental en las formación de estructuras de transporte de electrones, especialmente en las estructuras hierro- porfirina de los citocromos, ferredoxina al igual que aceptores de electrones como el  $\text{NAD}^+$ ,  $\text{NADP}^+$  durante el proceso de fotosíntesis, por lo que es posible que esta mayor disponibilidad de estos nutrientes pueda estar favoreciendo este proceso vital en el primer sustrato más que en los otros dos, sin embargo se considera que éste mejor desempeño fotosintético de este sustrato podría ser explicado de mejor manera por las mejores características de retención de agua del primer sustrato que por la mayor cantidad de nutrientes que tuviera éste.

A pesar de que el primer sustrato haya tenido un mejor desempeño fotosintético, se considera que su PH ácido no es el adecuado para un sustrato de cubierta verde debido a la pérdida de disponibilidad de nutrientes, además de presentarse evidencias de una mayor cantidad de materia orgánica y la presunta utilización de fertilizantes nitrogenados (debido al alto contenido de nitrógeno) lo que contribuye a acidificar el suelo y posiblemente a una lixiviación de los nitratos desde la cubierta verde hacia el exterior.

Los otros sustratos con un PH más alto, si bien tuvieron menor desempeño fotosintético, tal como se explicaba anteriormente, puede deberse a la menor retención de agua que presentan, sin embargo se plantea la hipótesis de que la mayor presencia de arcilla debido al ladrillo molido , contribuye positivamente a retener cationes básicos de intercambio (K, Ca, Mg, Na ) pudiendo ingresar a la solución, así como también su PH que garantiza una mayor disponibilidad de nutrientes en general, estos sustratos poseen un menor contenido de nitrógeno sin embargo tanto para controlar el crecimiento de las plantas como para prevenir la lixiviación de los nitratos gracias a la presencia de arcillas limitando el drenaje de suelo resulta ser una características más que favorable. Sin embargo no existen investigaciones en la literatura sobre qué propiedades de la arcilla se mantienen después del proceso de fabricación del ladrillo, el análisis anterior es válido sólo si las propiedades eléctricas de la arcilla se mantienen después de la fabricación del ladrillo, por lo que mayor investigación sea hace necesaria en este ámbito.

## Conclusión

Se recomienda la mantención de un PH cercano a 7 para el medio de crecimiento lo cual coincide con lo expuesto en la norma alemana FLL (2008), la retención de agua jugó un papel fundamental en el estudio para la obtención de un buen estado general de la cobertura vegetal, a raíz de la experiencia, se recomienda considerar una retención de agua media para el sustrato de cubierta verde pues el contenido de nutrientes por sí mismo fue insuficiente para garantizar un buen estado de la planta, Se recomienda el uso de arcilla en la composición del medio de crecimiento pues al realizar el análisis de laboratorio se comprobó que contribuye positivamente a retener nutrientes, previniendo su lixiviación además de disminuir la posible utilización de fertilizantes a corto plazo, Los datos arrojados por el SPAD fueron un buen indicador para evaluar el estado del *Sedum rojo* a través del contenido de clorofila, con lo cual fue posible vincular la interacción entre las propiedades nutricionales, físicas e hidrológicas que proporciona el medio de crecimiento para estudiar el desempeño de cada sustrato, El *Sedum rojo* sobrevivió tanto en un medio de bajo como alto PH, condiciones de soleamiento total, por lo que se comprueba su ya reconocida rusticidad.

Los hallazgos presentados anteriormente brindan criterios validados mediante una investigación de campo al igual que de laboratorio para el desarrollo de medios de crecimiento para cubierta verde, tales como la recomendación de la utilización de una proporción de arcilla, la mantención de un alto PH y la garantía de una alta retención de agua del sustrato como criterios fundamentales. La presente investigación sólo utilizó *Sedum Rojo*, por lo que se hace necesario extender la investigación a otras especies vegetales, principalmente a especies nativas chilenas. Se plantea la necesidad de contar con una norma técnica similar a la norma Alemana (FLL 2008), que establezca criterios sobre el diseño, construcción y mantención de sistemas de cubierta verde para Chile.

## Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a Conycit por el financiamiento dado a través del proyecto Conycit/ Fondap 15130015. El autor Javier Camaño agradece el financiamiento otorgado a través de la Beca Conycit Doctorado Nacional.

## Referencias

Colombo, C., G. Palumbo, J.Z. He, R. Pinton, and S. Cesco. 2014. "Review on iron availability in soil: interaction of Fe minerals, plants, and microbes." *Journal of soils and sediments* 14 (3): 538-548. doi: 10.1007/s11368-013-0814-z.

Elliott, A. H., and S. A. Trowsdale. 2007. "A Review of models for low impact urban stormwater drainage." *Environmental modelling & software*, 22(3): 394-405. doi: 10.1016/j.envsoft.2005.12.005

FLL, 2008. "Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. <http://www.fll.de>

Garrison, N., C. Horowitz, C. A. Lunghino, J. Devine, and D. S. Beckman. 2012. Looking up: how green roofs and cool roofs can reduce energy use, address climate change, and protect water resources in Southern California. California: Natural Resources Defence Council. <http://www.nrdc.org>.

Havlin, John, Samuel Tisdale, Werner Nelson, and James Beaton. 2014. *Soil fertility and fertilizers*. 8th ed. Delhi: Pearson Education

Minolta, C. 1989. *Manual for chlorophyll meter SPAD-502*. Osaka: Minolta Radiometric Instruments Divisions. <http://www.konicaminolta.eu>

Monterusso, M.A., D. B. Rowe, and C. L. Rugh. 2005. "Establishment and persistence of sedum spp. And native taxa for Green roof applications." *HortScience* 40(2): 391-396. <http://hortsci.ashspublications.org>

Munson, R. D. 2018. "Soil fertility, fertilizers, and plant nutrition." In *Handbook of soils and climate*, edited by Victor Kilmer, 269-294. Boca Raton: CRC Press.

Olate, E., M.F. Gómez, M. Musalem, C. Sepúlveda and J.M Ferrer. 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 (1): 171-177. doi: 10.17660/ActaHortic.2013.1000.21.

Rajput, R. K. 2004. A textbook of electrical engineering materials. Lucknow: Firewall Media.

Scherer, W. 2009. "Sulfur in soils." *Journal of plant nutrition and soil science* 172 (3): 326-335. doi: 10.1002/jpln.200900037.

Sharpley, Andrew. 2000. "Phosphorous availability." In *Handbook of soil science*, edited by Malcolm Summer, D18-D30. Boca Raton: CRC Press LLC.

Stovin, V., G. Vesuviano, and S. De-Ville. 2017. "Defining Green roof detention performance." *Urban water journal* 14 (6): 574-588. doi: 10.1080/1573062X.2015.1049279

Thomas, Grant, and Billy Hipp. 1968 "Soil factors affecting potassium availability." In *The role of potassium in agriculture*, edited by Victor Kilmer, Sanford Younts, and Nancy Brady, 269-291. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.



### **4.3. Capítulo III. Respuesta Hidrológica de las cubiertas verdes para la zona central de Chile**

#### **Resumen**

El presente documento tiene por objetivo estudiar el aporte de las cubiertas verdes reteniendo y deteniendo la escorrentía en el clima de la zona central de Chile a través de modelación hidrológica con alta resolución temporal, para ello se construyó una instalación experimental que consistió en 7 módulos de cubierta verde extensiva, los cuales a través de un simulador de precipitaciones y una celda de carga, permitieron obtener la respuesta de escorrentía para 3 intensidades de precipitación (21,33 y 55 mm/hora) aplicadas con una duración temporal de 60,45 y 30 minutos, estos datos observados se utilizaron para calibrar 7 modelos hidrológicos, cada uno correspondió a una modificación al modelo propuesto por Locatelli et al., (2014), el método de Monte-Carlo fue utilizado encontrar los parámetros óptimos que permiten ajustar los modelos a los datos observados. Posteriormente la precipitación de las estaciones Aeropuerto Bernardo O'Higgins y Panguilemo fue separada en eventos para, a través de los modelos calibrados, estudiar cinco estadísticos de los hidrogramas de cubierta verde modelados, éstos son la escorrentía peak, la atenuación del peak, duración, retardo del centroide y retención de la escorrentía. Finalmente se utilizaron los datos de precipitación de la estación Universidad de Concepción sede Chillán para ajustar una curva de intensidad, duración y Frecuencia (IDF) de duración subhoraria para generar tormentas de diseño con periodos de retorno de 2 a 100 años para obtener los mismos estadísticos a fin de comparar los comportamientos de los hidrogramas considerando los eventos reales y los de diseño. La motivación del estudio radica en que existe un interés creciente en Chile por construir cubiertas verdes, principalmente por su aporte paisajístico, sin embargo no existen estudios en el país acerca del aporte cuantitativo de las cubiertas verdes como dispositivo de drenaje urbano sustentable, el cual haya utilizado modelación hidrológica con datos de escorrentía medidos en una instalación experimental y con datos climáticos con alta resolución temporal, éste fue la razón por la que se consideraron los datos climáticos de las estaciones Aeropuerto Bernardo O'Higgins y Panguilemo de propiedad de la dirección meteorológica de Chile, los cuales cuentan con datos con resolución temporal de 1 minuto, éstos son los idóneos para el modelamiento de estas estructuras. En cuanto a los resultados obtenidos a partir de la separación de eventos, se observan reducciones del peak de escorrentía entre un 20- 60%, dependiendo de la categoría del evento, se evidencia también que la escorrentía al consultar cubiertas verdes dura al menos tres horas más que la de una cubierta impermeable, puede apreciarse también que el centroide de la escorrentía se retarda al menos 10 minutos, comparado con el de una cubierta impermeable, la retención resultó ser escasa debido a que se trata de cubiertas verdes extensivas de poca profundidad. Los resultados obtenidos de los hidrogramas de diseño generados con alta

resolución temporal son que la atenuación del peak de escorrentía fue entre 30-80% para periodos de retorno entre un 2-60 años para la mayoría de las especies vegetales, se evidencian duraciones adicionales de la escorrentía entre 2-7 horas dependiendo de la especie considerada, retardos en el centroide de escorrentía entre 5-15 minutos en función del periodo de retorno, la retención de la escorrentía, al igual que el caso anterior, también resultó ser escasa. Esta diferencia de resultados entre la separación de eventos y las tormentas de diseño radica principalmente debido a los periodos secos que ocurren dentro de un mismo evento, mientras que la tormenta de diseño no contempla periodos secos. Resultó complejo estudiar la influencia de la cobertura vegetal sobre el desempeño de la cubierta verde, ya que la presente investigación sólo consideró el aporte de la cobertura vegetal como interceptador de precipitación, ya que para la evapotranspiración modelada se consideró que ésta depende del almacenamiento de agua en el sustrato y de la evapotranspiración de referencia. Los hallazgos encontrados en el presente estudio resultan importantes para continuar promoviendo el uso de las cubiertas verdes en el país, al igual que otorgan información relevante acerca de los beneficios de las cubiertas verdes en términos de drenaje, obtenida mediante una investigación teórico-experimental, igualmente brindan resultados bastante concluyentes mediante un enfoque de diseño, muy utilizado por ingenieros, profesionales del área de construcción, al igual que un enfoque de separación de eventos, mas utilizado por profesionales ambientales e hidrólogos.

**Palabras Clave:** Cubiertas verdes, drenaje urbano sustentable, Chile, modelación hidrológica.

## Introducción

La construcción de cubiertas verdes ha aumentado en el mundo, principalmente debido al aporte paisajístico de éstas últimas. Sin embargo, las cubiertas verdes poseen diversos beneficios para el medio ambiente, tales como la disminución de la temperatura en las ciudades, atrapamiento de contaminantes atmosféricos, mejoran el desempeño térmico de los edificios, actuando como aislante térmico y también actúan como dispositivos de drenaje urbano. Bajo el concepto anterior, las cubiertas verdes actúan reteniendo (almacenando escorrentía) y deteniendo la escorrentía urbana (retardando el peak de escorrentía en las ciudades, produciendo que las redes de drenaje urbano se sobrecarguen con menos frecuencia.

Existen variadas investigaciones sobre cubiertas verdes en la literatura, algunos de ellos teóricos, de campo o mixtos. Los teóricos han trabajado en estudiar el comportamiento hidrológico a través de la construcción y calibración de modelos hidrológicos a través de simuladores de lluvia, Villarreal & Bengtsson (2005) monitorearon la respuesta hidrológica del sedum frente a diferentes pulsos de precipitación, Stovin et al., (2013) desarrollaron un modelo conceptual para estudiar el riego de las cubiertas verdes, al igual que la retención de éstas, generando un modelo que simulara la retención a escala diaria para cuatro localidades del Reino Unido, Vesuviano & Stovin (2013) construyeron un modelo hidrológico de dos etapas (basado en el concepto del reservorio no lineal) y un simulador de



precipitaciones para validar la escorrentía proveniente de diferentes capas de drenaje de cubierta verdes encontradas en el mercado, Vesuviano et al., (2014) utilizaron el mismo simulador para validar un modelo hidrológico para cubierta verde genérico para reproducir su respuesta hidrológica, en Dinamarca Locatelli et al., (2014) desarrollaron un modelo hidrológico basado en tres almacenamientos capaz de reproducir la respuesta hidrológica para el clima danés, enfoques similares se encuentran en Stovin et al., (2015) que estudiaron la influencia del sustrato y la vegetación mediante modelación hidrológica.

También son variados los estudios experimentales sobre cubiertas verdes, generalmente para evaluar la utilización de ciertas especies vegetales como cobertura vegetal en este tipo de sistemas, ya que las especies consideradas deben ser capaces de sobrevivir en sustratos de poca profundidad (10-15 cm para una cubierta verde extensiva), en condiciones de escasez nutricional, soleamiento total, se busca igualmente que las especies vegetales sean resistentes a las plagas y a la congelación (para tiempos de invierno), bajo este mismo concepto, en Chile mismo, se han desarrollado estudios similares, tales como los llevados a cabo por el vivero Pumahuida, publicados en Olate et al., (2011), donde se monitorearon 16 especies nativas de la zona central de Chile para ser usadas en cubierta verde, recomendando las asociaciones de *Glandularia berterii*, *Geum magallanicum* y *Cotula scariosa*.

El beneficio principal de las cubiertas verdes que es desarrollado en esta investigación es el de dispositivo de drenaje urbano sustentable, en Chile, éste tópico de las SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems) ha tomado relevancia este último tiempo ya que el país ha ido avanzando tanto en institucionalidad en medio ambiente (con la creación de la Superintendencia, el Ministerio del Medio Ambiente e instituciones asociadas como el Servicio de Evaluación Ambiental SEA), como en institucionalidad en drenaje urbano ( la Ley 19.525 separa la red de drenaje en una red primaria, secundaria y domiciliaria de aguas lluvia, administradas por el Ministerio de Obras Públicas MOP, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo MINVU y las municipalidades), igualmente se han elaborado instructivos técnicos para diseñar, construir y mantener obras de drenaje urbano sostenibles, primeramente con la guía de diseño publicada en 1996 titulada “técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvia en sectores urbanos” (MINVU, 1996) y posteriormente con el manual de drenaje urbano (MOP, 2013) que recoge la información que se encuentra en la literatura sobre estos temas , encontrándose a la mano para su uso por profesionales y autoridades del área.

A pesar las investigaciones realizadas en la literatura, no se han validado las propiedades de disminución de la escorrentía peak, reducción porcentual y el retardo de la escorrentía peak, para el clima chileno, a pesar de que la literatura indica que las cubiertas verdes generan estos beneficios en términos de drenaje, ni tampoco se ha estudiado el comportamiento hidrológico de las especies nativas para la zona central, para su utilización como cobertura en techos verdes.

## Metodología

La metodología realizada en la presente investigación consistió en construir siete módulos de cubierta verde, emulando una cubierta verde extensiva convencional, se consideraron seis especies vegetales distintas como cobertura vegetal y un tratamiento de sólo sustrato. El objetivo de esto era posteriormente ensayar los módulos de cubierta verde mediante un simulador de precipitaciones para registrar la escorrentía generada por los diferentes tratamientos de cubierta verde, posteriormente se construyó un modelo hidrológico para cada tratamiento, basado en el esquema de Locatelli et al., (2014), el cual fue calibrado mediante la metodología de Montecarlo. Una vez ajustados los parámetros, se procedió a extender el uso del modelo a dos localidades de la zona central de Chile que poseían datos con resolución temporal sub horaria para estudiar la respuesta hidrológica de estos tratamientos para este tipo de clima (mediterráneo), mediante una serie de estadísticos resultantes de la comparación entre la respuesta en escorrentía de las cubiertas verdes y una cubierta convencional de material impermeable.

### Construcción de los módulos de cubierta verde y plan de pruebas

Se construyeron 7 módulos de cubierta verde de 1.57x1.53 metros de placa de terciado estructural de 9 milímetros, impregnados para prevenir los daños por la humedad ambiente, cada módulo de cubierta verde consiste en una barrera contra raíces de 1 milímetro de espesor, un sustrato de cubierta verde comercializado en Chile, una capa de drenaje Tremdrain de ½ pulgada y una especie vegetal utilizada como cobertura vegetal, tal como indica la Figura 19.

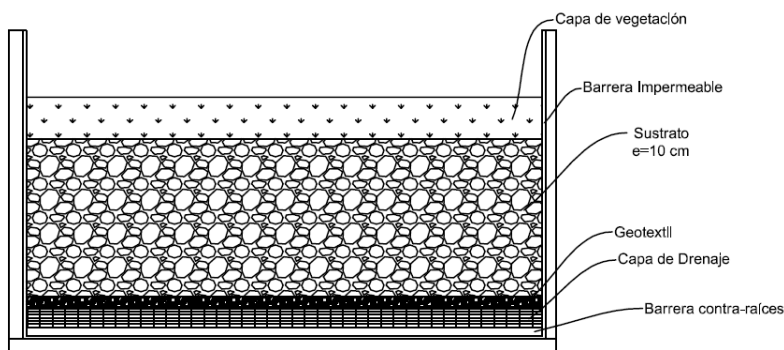


Figura 19.- Esquema de los componentes de las cubiertas verdes construidas para el presente estudio (Fuente: Elaboración propia).

Tal como se indicó anteriormente, se consideraron siete tratamientos de cubierta verde, cuatro consideraron especies nativas chilenas, dos consideraron especies

introducidas y una correspondió a una cubierta verde no plantada (sólo sustrato). Las especies nativas utilizadas fueron *geum magallanicum*, *haplopappus macrocephalus*, *phyla reptans* y *armeria marítima*, las especies vegetales introducidas utilizadas en el estudio fueron dos variedades de *sedum spurium* voodoo, el sedum rojo y el sedum variagado, la decisión de usar éstas últimas especies es su amplia utilización en el mercado chileno, la vista de todos los tratamientos se encuentra en la Figura 20, cabe destacar que las plantas consideradas en el estudio fueron adquiridas en viveros de la zona central de Chile.



Figura 20.- Módulos de cubierta verde utilizados en el estudio. Fuente: Elaboración propia.

Después de 5 meses aproximadamente, se procedió a construir un simulador de precipitaciones móvil que capaz de aplicar intensidades de precipitación de 21,33 y 54 mm/hora, el simulador de precipitaciones estaba compuesto por una estructura metálica y por espesores Netafim Supernet modelo LRD de 30 y 40 litros/hora, distribuidos de forma diferente según fuese la precipitación aplicada, tal como indica la Figura 21.

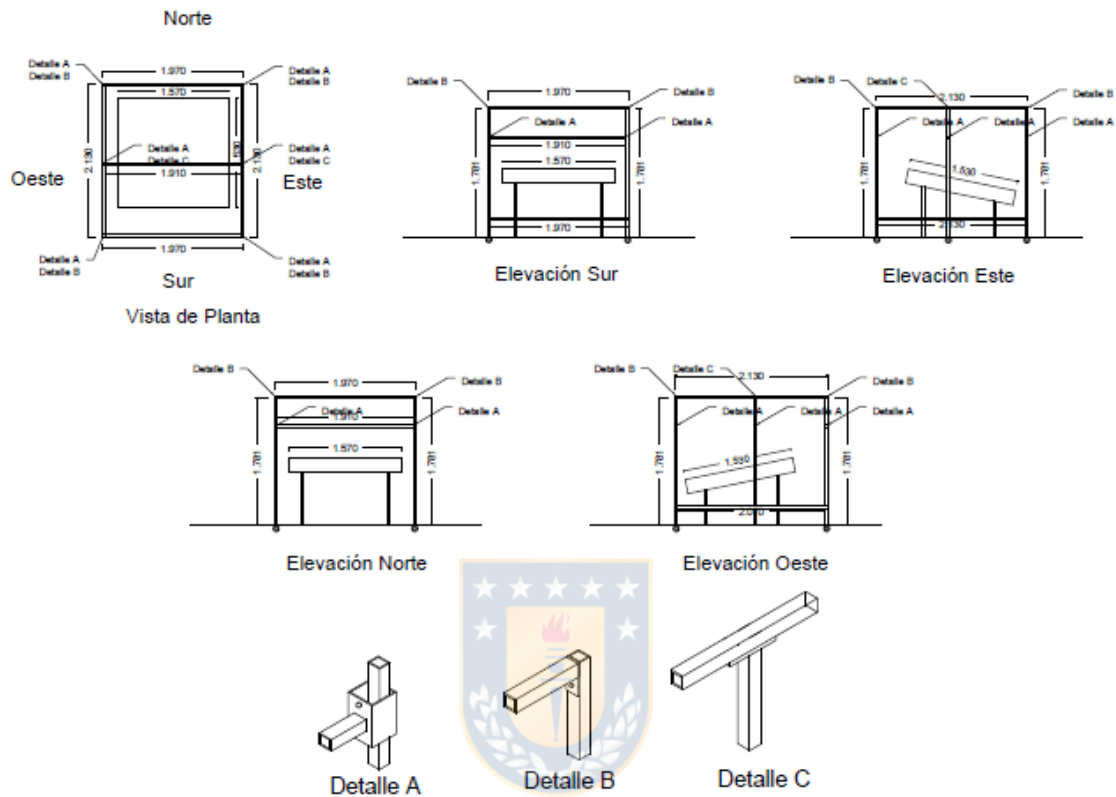


Figura 21.- Simulador de precipitaciones construido para el estudio. Fuente: Elaboración propia.

El plan de pruebas consistió en tres repeticiones para cada intensidad de precipitación, para cada tratamiento de cubierta verde, cada tratamiento se saturaba el día anterior, se ensayaba al día siguiente, de manera de conseguir un contenido de humedad a capacidad de campo, al momento de aplicar la precipitación con el simulador. La escorrentía colectada fue recogida y pesada en tiempo real por una celda de carga con un data logger, tal como indica la Figura 22.



Figura 22.- Pesado de la escorrentía proveniente de la cubierta verde, producto de la precipitación aplicada con el simulador de precipitaciones, en la figura se ilustra la escorrentía generada con una intensidad de 54 mm/hora. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente los hidrogramas de las cubiertas verdes fueron suavizados mediante interpolación spline, para luego utilizarse como datos para calibrar los 7 modelos hidrológicos, en la Figura 23 se muestra un ejemplo del suavizado del hidrograma para el tratamiento sedum rojo, resultante de la aplicación de las tres intensidades de precipitación.

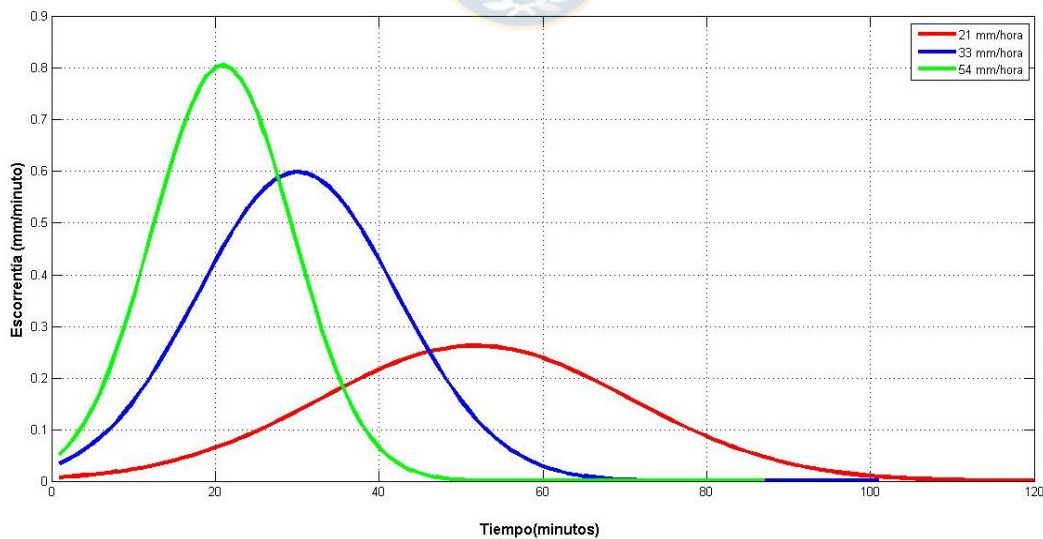


Figura 23.- Suavizado de los hidrogramas obtenidos para el tratamiento sedum rojo después de la aplicación de las tres intensidades de precipitación consideradas en el estudio. Fuente: Elaboración propia.

## Modelo Hidrológico de cubierta verde

El modelo hidrológico construido es de tipo “lumped” o aplicable a un sitio, consiste en tres almacenamientos, de forma que éste emule el comportamiento de una cubierta verde convencional, el esquema base del modelo corresponde al propuesto por Locatelli et al., (2014), sin embargo, se plantean algunas modificaciones a éste. La elección de este modelo estuvo basada en que no requiere demasiados parámetros para su calibración, es capaz de reproducir el comportamiento de la cubierta verde a escala de tiempo subhoraria y no presenta una gran exigencia computacional ya que fue programado en el software Matlab. El modelo hidrológico considera, un almacenamiento superficial, un almacenamiento subsuperficial y un almacenamiento de detención, tal como indica la Figura 24.

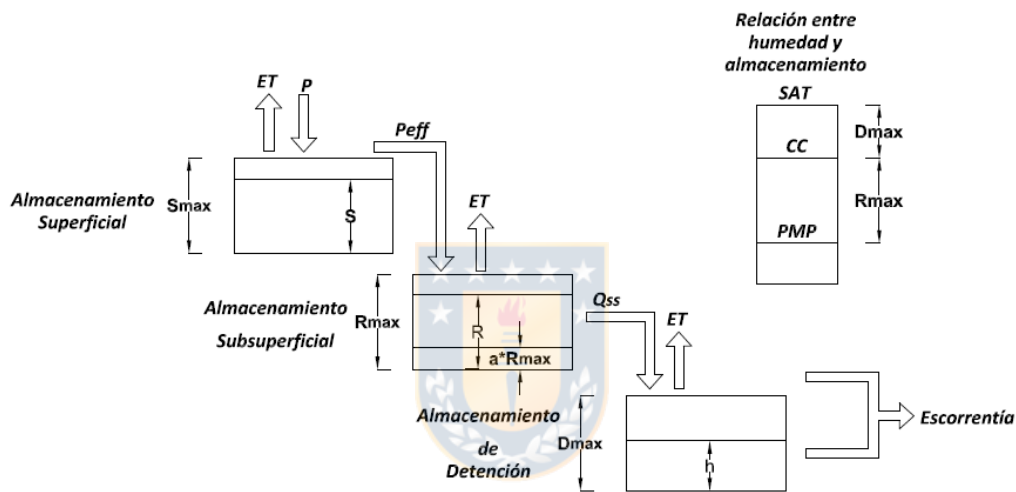


Figura 24.- Esquema del modelo hidrológico propuesto por Locatelli et al., (2014).

El primer almacenamiento corresponde a la cantidad de agua que es interceptada por la vegetación, donde  $S_{m\acute{a}x}$  corresponde a la máxima cantidad de agua interceptada por la cobertura vegetal, este almacenamiento es recargado por la precipitación y es recuperado por la evapotranspiración  $ET_t$ , si el almacenamiento superficial se encuentra a máxima capacidad ( $S = S_{m\acute{a}x}$ ), entonces se genera precipitación efectiva  $P_{eff}$  la cual recarga el almacenamiento subsuperficial, de lo contrario la precipitación efectiva  $P_{eff}$  es nula, tal como se indica a continuación:

$$S_t = \begin{cases} S_{t-1} + pp_t - ET_t, & \text{si } S_{t-1} + pp_t - ET_t < S_{m\acute{a}x} \\ S_{m\acute{a}x} & , \text{ si } S_{t-1} + pp_t - ET_t \geq S_{m\acute{a}x} \end{cases}$$

$$ppeff_t = \begin{cases} 0 & , \text{ si } S_t < S_{m\acute{a}x} \\ S_{t-1} + pp_t - ET_t - S_{m\acute{a}x} & , \text{ si } S_t = S_{m\acute{a}x} \end{cases}$$

El segundo almacenamiento corresponde al agua que almacena el sustrato de la cubierta verde, en este caso y tal como se indicó anteriormente, el almacenamiento



subsuperficial tiene como entrada la precipitación efectiva  $P_{eff}$  y la evapotranspiración  $ET_t$ , el flujo  $Q_{ss}$  es generado a medida que es recargado el almacenamiento subsuperficial  $R$ , la intensidad del flujo  $Q_{ss}$  depende de la variable  $aR_{máx}$ , donde  $a$  corresponde al porcentaje de  $R_{máx}$  donde se comienza a producirse el drenaje. Cabe destacar que el rango de valores que puede tomar el almacenamiento subsuperficial ( $0 \leq R \leq R_{máx}$ ) corresponde al intervalo entre los contenidos de capacidad de campo  $\theta_{fc}$  y marchitez permanente  $\theta_{wp}$  de sustrato de cubierta verde. A continuación, se indican las expresiones para determinar el almacenamiento subsuperficial  $R$  y el flujo  $Q_{ss}$ :

$$R_t = R_{t-1} + pp_{eff_t} - ET_t - Q_{ss_t}$$

$$Q_{ss_t} \begin{cases} 0 & , si R_t + pp_{eff_t} - ET_t \leq aR_{max} \\ pp_{eff_t} * \frac{R_t - aR_{max}}{1 - a} & , si R_t + pp_{eff_t} - ET_t \geq aR_{max} \end{cases}$$

El tercer almacenamiento corresponde al almacenamiento de detención, corresponde al agua que no puede ser almacenada gravitacionalmente por el sustrato (cuando el contenido de humedad es superior a capacidad de campo  $\theta_{fc}$ ), la cual escurrirá a la capa de drenaje como escorrentía subsuperficial  $Runoff_t$ , este flujo es producido a medida que el almacenamiento de detención  $h$  es recargado, teóricamente cuando este almacenamiento se encuentra lleno ( $h = D_{máx}$ ) o es excedido, se produce escorrentía superficial  $Runoff_t$ , la escorrentía (tanto superficial como subsuperficial) es descrita a través del método del reservorio no lineal, tal como se muestra a continuación:

$$Runoff_t = \begin{cases} kh^n, & si h \leq D_{max} \\ kD_{max}^n + k_1 * (h - D_{max})^{n_1}, & si h > D_{max} \end{cases}$$

Los parámetros  $k, n$ , corresponden a los parámetros de la escorrentía subsuperficial a través de la capa de drenaje y los parámetros  $k_1$  y  $n_1$  corresponden a los parámetros de la escorrentía subsuperficial. Cabe destacar que algunos parámetros del modelo son físicamente basados, debe realizarse un proceso de calibración de éstos para ajustar el modelo hidrológico.

Tal como se menciona anteriormente, el modelo considera la evapotranspiración, como el modelo reproduce la hidrología de la cubierta verde a escala subhoraria, se consideró que la evapotranspiración utilizada será el equivalente horario de la evapotranspiración de referencia  $ET_{sz}$  (en mm/hora) este modelo es propuesto en Walter et al., (2000), tal como se indica a continuación:

$$ET_{sz} = \frac{0.408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)}$$

Donde  $\Delta$  corresponde a la pendiente de la curva de presión de vapor a saturación-temperatura en  $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ ,  $\gamma$  la constante psicrométrica en  $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ ,  $R_n$  la radiación neta en la superficie del cultivo en  $\frac{MJ}{m^2 \cdot hora}$ ,  $u_2$  la velocidad promedio horaria del viento en  $\frac{m}{s}$  a dos metros de altura,  $e_s$  es la presión de vapor a saturación (kPa) entre 1.5-2.0 metros de altura,  $e_a$  la presión de vapor actual (kPa),  $C_n$  una constante que depende del tipo de referencia y del paso de tiempo en  $\frac{K \cdot mm \cdot s^3}{mg \cdot hora}$  y  $C_d$  una constante ( $\frac{s}{m}$ ) que cambia con el tipo de referencia y el paso de tiempo.

Para modelar la evapotranspiración en la cubierta verde ( $ET_t$ ), se utiliza el modelo de función de extracción de humedad (SMEF) expuesto por Zhao et al., (2013), el cual, trabajado con la nomenclatura del modelo hidrológico, depende de la evapotranspiración de referencia cada 1 minuto (equivalente a la horaria y la razón entre el almacenamiento subsuperficial  $R$  y el máximo almacenamiento subsuperficial  $R_{max}$ ), tal como se indica a continuación.

$$ET_t = ET_{sz} \frac{R_t}{R_{max}}$$

## Calibración

Para la efectuar la calibración del modelo hidrológico, se utilizaron los datos experimentales resultantes de las pruebas de campo con las tres intensidades consideradas (21, 33 y 54 mm/hora) para cada una de las especies vegetales del presente estudio. Como se indicó anteriormente, el contenido de humedad del sustrato de cada uno de los tratamientos al momento de efectuar las pruebas se asumió como capacidad de campo, debido a la saturación del suelo el día anterior. La cantidad de parámetros a calibrar para cada tratamiento correspondió a once parámetros, a pesar de que el modelo original poseía 8 solamente, esto es debido a que se incorporaron al proceso de calibración, los almacenamientos iniciales  $S_0, R_0$  y  $h_0$  para conseguir un modelo lo más ajustado a los datos experimentales. La metodología de muestreo de parámetros utilizada fue la de Montecarlo, considerando un millón de simulaciones para cada tratamiento, la metodología de sensibilidad de parámetros fue la del “regional sensitivity analysis”, así como el modelo hidrológico se programó en Matlab, se utilizó el toolbox “Monte-Carlo Analysis Toolbox User Manual” (MCAT), cuya documentación se presenta en Lees & Wagener (2001).

El toolbox, es una colección de funciones de análisis y visualización integradas a través de una interfaz gráfica de usuario, el toolbox puede ser utilizado para analizar los resultados de los experimentos de muestreo de parámetros o desde los métodos de optimización que son basados en las técnicas de evolución de población, igualmente se incorporan diversas técnicas para investigar la estructura, sensibilidad e incerteza en los parámetros y salidas provenientes de modelos matemáticos Lees & Wagener (2001).

Las funciones objetivo a minimizar con el método de Montecarlo fueron las de la suma del error cuadrático ( $ss_e$ ) y la eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970), la sensibilidad de los parámetros utilizado por el Toolbox MCAT es el descrito en Hornberger & Spear, (1981), Spear & Hornberger, (1980) y Freer et al., (1996), en éste análisis, los set de parámetros son clasificados según la función objetivo seleccionada, cada parámetro es dividido en 10 grupos, donde cada grupo de parámetros es normalizado siendo dividido por el total y es calculada su distribución de frecuencia acumulada (Lees & Wagener 2001). Mientras más sensible sea el parámetro, más distantes se encontrarán las curvas de distribución de frecuencia acumulada, en caso contrario, mientras menos sensible sea un parámetro, las curvas de distribución de frecuencia acumulada se encontrarán más próximas entre sí.

### **Extensión del modelo hidrológico**

Una vez el modelo hidrológico fue calibrado para todas las especies vegetales a través del método de Montecarlo, se procedió a utilizar los modelos calibrados para reproducir la respuesta hidrológica de dos ciudades ubicadas en la zona Central de Chile, Panguilemo (región del Maule) y Aeropuerto Bernardo O'Higgins de Chillán (región de Ñuble). La razón del por qué se eligieron esas estaciones, fue que ambas poseían datos de precipitación, velocidad de viento, radiación solar y humedad relativa. estos datos climáticos se utilizaron como variables de entrada de los modelos hidrológicos.

Para trabajar los datos de precipitación de las estaciones Panguilemo y Aeropuerto Bernardo O'Higgins de Chillán, se procedió a estudiar la precipitación separándola en eventos y se utilizaron los datos de precipitación de la Universidad de Concepción, sede Chillán, a través de los hietogramas de diseño a partir de las curvas intensidad, duración y frecuencia (IDF) generadas con una resolución de 15 minutos y de duración diaria.

Para el caso de la separación de eventos, un evento se considera como independiente cuando exista un periodo seco igual o superior a 24 horas. Al iniciar el evento, se considera que el contenido de humedad del sustrato es el de capacidad de campo.

Para el caso de la curva intensidad, duración y frecuencia (IDF) se procedió a ajustar mediante la técnica de regresión lineal múltiple los parámetros  $m$  y  $n$  de la expresión

de Bernard (1932), donde la intensidad de precipitación  $I$  depende del periodo de retorno  $T$  y la duración  $D$ , tal como se indica a continuación:

$$I = k \frac{T^m}{D^n}$$

La distribución temporal de la tormenta se realizó a través del método de los bloques alternos (Chow, 1964). La metodología para ajustar una curva IDF consiste en agregar los datos de precipitación a diferentes duraciones, en este caso desde 15 a 1440 minutos (1 día) para después ajustar la distribución de Gumbel (Chow, 1964) para obtener las intensidades (mm/min), a diferentes duraciones temporales (15-1440 min) para periodos de retorno entre 2 y 100 años.

Para estudiar la respuesta hidrológica de las cubiertas verdes, tanto para los eventos independientes como para los hietogramas de diseño se consideraron como estadísticos la escorrentía peak, el porcentaje de reducción del peak, la duración temporal de la escorrentía, el retardo en el centroide de escorrentía y el volumen de agua retenido por la cubierta verde, estos estadísticos se computan comparando las series de escorrentía provenientes de los distintos tratamientos de cubierta verde y el de una cubierta verde de material impermeable (zinc o asfáltica por ejemplo), todas estas series son obtenidas a partir de modelación, los estadísticos pueden visualizarse en la Figura 25.

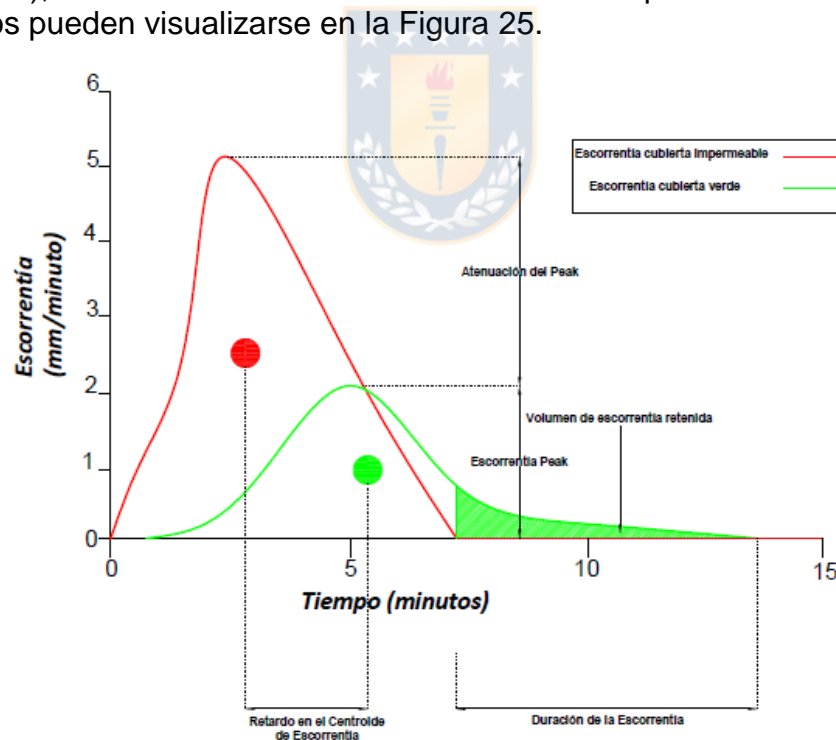


Figura 25.- Estadísticos generados a partir de la comparación entre la escorrentía de una cubierta verde y la de una cubierta de superficie impermeable. Fuente: Elaboración propia.

## Resultados

### Calibración del modelo hidrológico

El análisis regional de sensibilidad incorporado en el MCAT, depende de la función objetivo utilizada, para el caso de la suma del error cuadrático ( $ss_e$ ) y la eficiencia de Nash-Sutcliffe ( $nse$ ), el parámetro más sensible resultó ser  $k_1$ , seguido por  $n_1$ , para todos los siete tratamientos considerados, en la Figura 26 puede observarse este comportamiento, ya que ambos parámetros muestran una considerable desviación entre las curvas de frecuencia acumulada (mayoritariamente  $k_1$ ). Por el contrario, los parámetros menos sensibles corresponden a los parámetros  $a, k, n$  y  $h$  ya que sus curvas de frecuencia acumulada se encuentran muy próximas entre sí, cabe destacar que esto también es afectado por el intervalo en que son buscados los parámetros.

Un comportamiento similar puede observarse en los diagramas de dispersión mostrados en la Figura 27, ya que un parámetro se encuentra bien definido en la manera en que exista un solo parámetro cercano al valor nulo (valor que logra minimizar la función objetivo), en este caso se corrobora que el parámetro  $k_1$  es el más sensible ya que presenta un claro mínimo, para el caso del resto de los parámetros no se observa este comportamiento, esto viene dado por su poca sensibilidad ya que existe un conjunto de parámetros que logran minimizar la función objetivo.

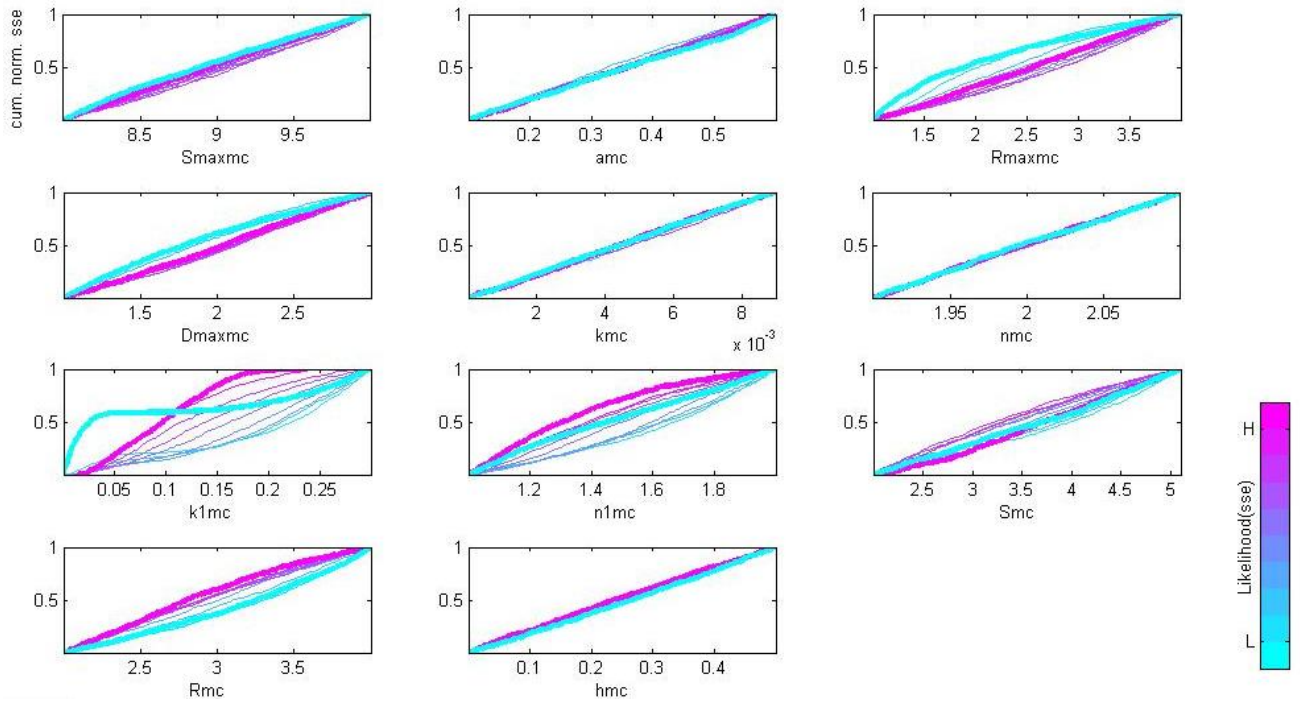


Figura 26.- Análisis sensibilidad regional de los parámetros al minimizar la función  $ss_e$  para el tratamiento Sedum Rojo cuando se somete a la precipitación de 21 mm/hora durante 60 minutos. Cabe destacar que las curvas magenta son las que muestran un mejor ajuste a los datos observados. Fuente: Elaboración propia.

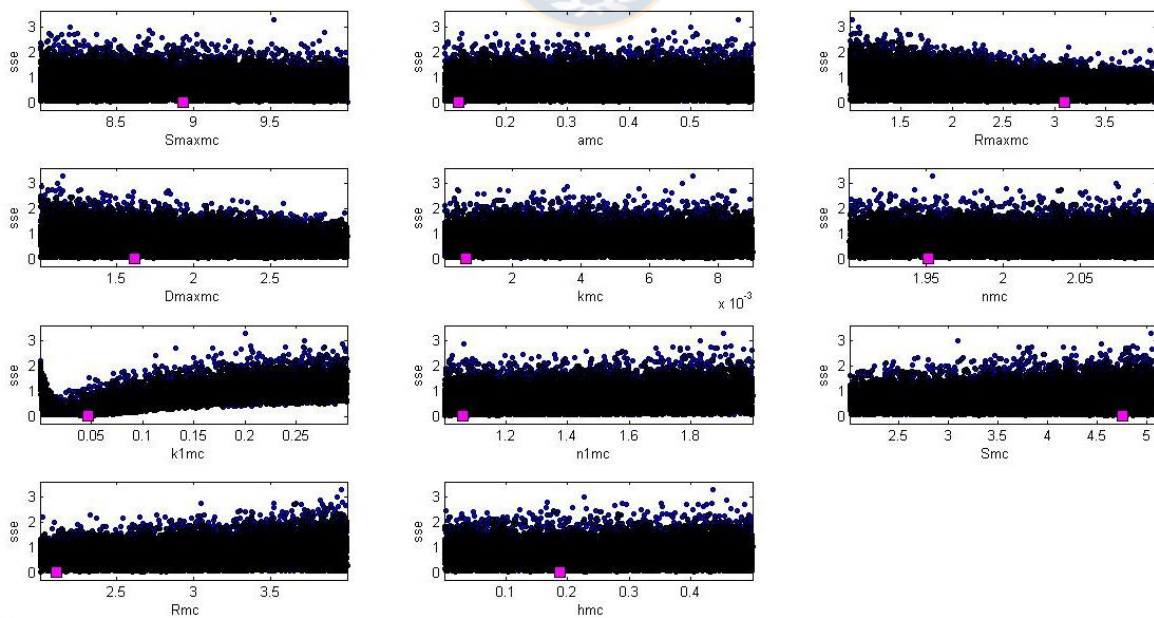


Figura 27.- Ploteo en forma de diagrama de dispersión para el tratamiento sedum rojo al aplicarse una precipitación de 21 mm/hora por 60 minutos, éste diagrama muestra la respuesta de cada parámetro en términos del cumplimiento de la



minimización de la función objetivo  $ss_e$ . Los puntos magenta corresponden a los parámetros que logran un mejor ajuste a los datos observados. Fuente: Elaboración propia.

Para cada tratamiento, para las tres intensidades de precipitación y las tres repeticiones, se obtuvo un set de parámetros, de los cuales se escogieron los mejores 8 parámetros para cada uno de los siete tratamientos. La razón por la que se escogieron los mejores 8 en vez de los mejores 11 parámetros, es que no se consideraron los parámetros  $S_0$ ,  $R_0$  y  $h_0$ , ya que éstos representan los contenidos iniciales de los almacenamientos superficial, subsuperficial y detención, posteriormente para la extensión de los modelos hidrológicos, éstos parámetros se asumirán como  $S_0 = 0$ ,  $R_0 = R_{max}$  y  $h_0 = 0$  para emular un contenido de humedad a capacidad de campo (donde el almacenamiento subsuperficial se encuentra lleno), a continuación en la Tabla I se muestran los parámetros optimizados para cada uno de los siete tratamientos de cubierta verde considerados en la presente investigación, puede observarse que los parámetros no distan mucho entre sí, ya que los parámetros representan 6 especies vegetales más una condición de sólo sustrato, todos con una profundidad de 10 centímetros, emulando una cubierta verde extensiva.

Tabla 3.- Parámetros del modelo hidrológico de cubierta verde para los siete tratamientos estudiados, éstos se encuentran optimizados para minimizar las funciones objetivo  $ss_e$  y  $nse$ , a través del análisis de Monte-Carlo. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	<i>Sedum Rojo</i>	<i>Sedum Variagado</i>	<i>Haplopappus Macrocephalus</i>	<i>Phyla Reptans</i>	<i>Armeria Marítima</i>	<i>Geum Magallanicum</i>	Sustrato
$S_{max}$	9,64724	8,67995	8,36729	8,13274	8,01257	9,28149	8,71050
$a$	0,18443	0,43873	0,19307	0,22061	0,21192	0,26481	0,13923
$R_{max}$	3,97982	3,88143	3,88136	3,95984	3,98728	1,00149	3,66149
$D_{max}$	1,16666	1,24743	1,04990	1,01668	1,15917	2,34996	1,31666
$k$	0,00295	0,00796	0,00527	0,00005	0,00862	0,00007	0,00791
$n$	1,90024	1,90665	2,01350	1,94305	2,02665	2,04736	1,99214
$k_1$	0,13599	0,05381	0,04703	0,03828	0,04032	0,05058	0,13849
$n_1$	1,21889	1,84622	1,85370	1,95074	1,86134	1,86184	1,29728

Los parámetros mostrados en la Tabla 2, serán utilizados para realizar la modelación hidrológica en las condiciones climáticas de Chillán (Región de Ñuble) y Panguilemo (Región del Maule), tal como se indicó en la metodología, se compararán los hidrogramas de las cubiertas verdes y de las cubiertas impermeables, a través de la separación de eventos y de las tormentas de diseño, sin embargo, en el presente estudio no se consideró la calibración de una cubierta impermeable, pero en la literatura se han realizado investigaciones donde se modela una cubierta verde convencional (de material impermeable), en este caso el

almacenamiento subsuperficial es nulo es decir,  $R_{m\acute{a}x} = 0$ , al igual que los parámetros que modelan la escorrentía subsuperficial  $k = 0, n = 0$ . Los parámetros que no son nulos y que son utilizados para modelar una cubierta de material impermeable según Locatelli et al., (2014) son  $S_{max} = 0,5, k_1 = 0,215$  y  $n_1 = 1,67$ .

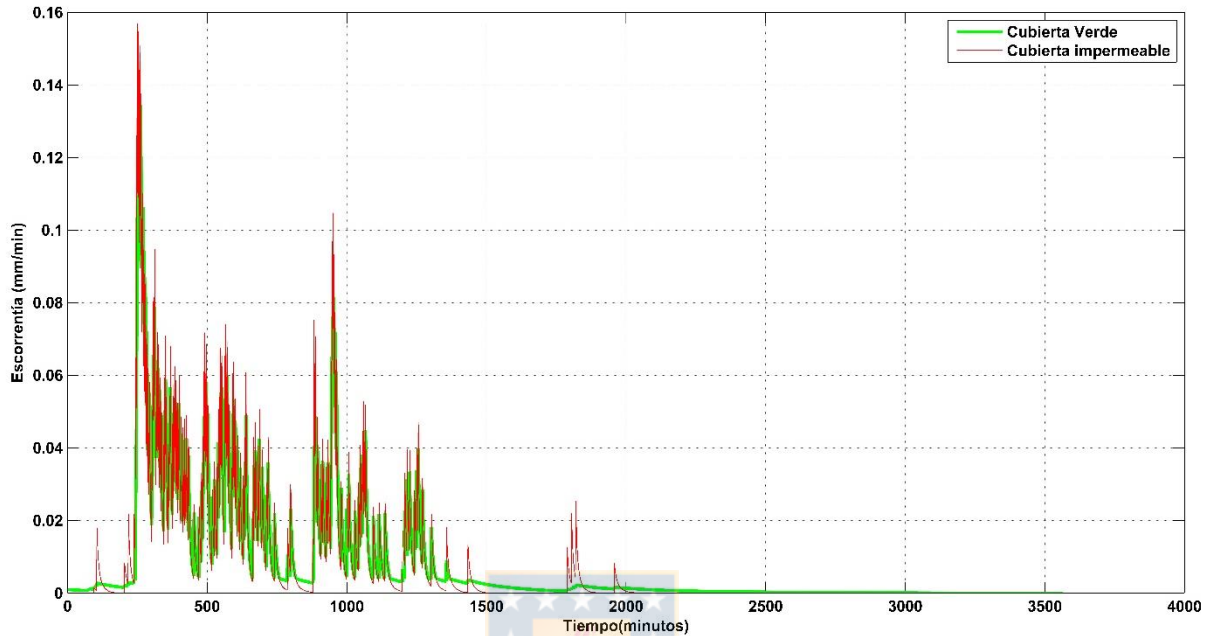


Figura 28.- Hidrogramas simulados de la respuesta en escorrentía de una cubierta verde de sedum rojo y una cubierta impermeable para un evento de precipitación ocurrido en Chillán en 2017. Fuente: Elaboración propia.

### Resultados estadísticos resultantes de la separación de eventos

Tal como se indicó en el apartado de la metodología, los estadísticos considerados en la investigación fueron los de escorrentía peak, atenuación del peak, duración de la escorrentía, retardo en el centroide de la escorrentía y volumen de agua retenido por la cubierta verde, para lograr esto se separaron los datos de precipitación de las estaciones Aeropuerto Bernardo O'Higgins de Chillán (Figura 28) y Panguilemo (Figura 29) en eventos independiente, además de la precipitación, se utilizaron los datos climáticos de velocidad del viento, temperatura, humedad relativa y radiación solar, recopilados entre 2017-2018 con resolución temporal de 1 minuto.

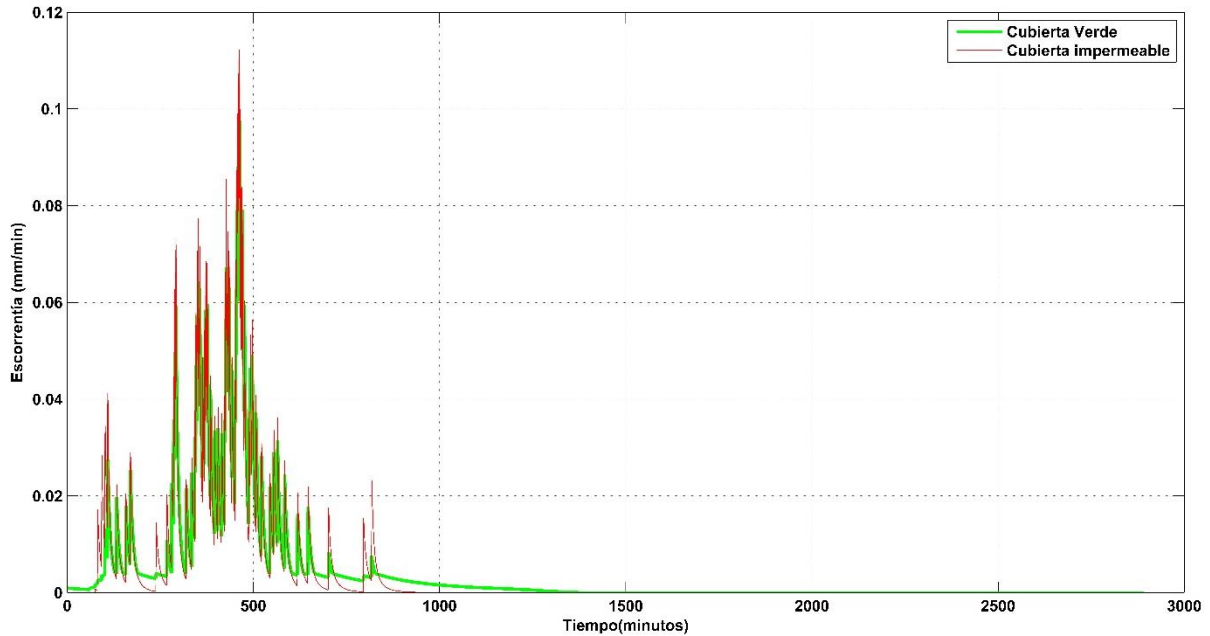


Figura 29.- Hidrogramas simulados de una cubierta verde de sedum variagado y una cubierta impermeable para un evento de precipitación ocurrido en Panguilemo para el año 2017. Fuente: Elaboración propia.

Para estudiar el comportamiento de los estadísticos mencionados anteriormente, se procederá a categorizarlos según la cantidad de precipitación caída durante cada uno de los eventos, se considerarán las categorías de 2-5 mm, 5-10 mm, 10-20 mm, 20-30 mm, 30-40 mm, y >40 mm.

Para el caso de la escorrentía peak. En la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins se observa una gran dispersión del estadístico (Figura 30), existiendo una tendencia al alza en función de la cantidad de precipitación caída en el evento, sin embargo, muchos de los valores de la escorrentía peak de las categorías 10-20 mm pueden encontrarse también en categorías superiores de 20-30, 30-40 y >40 mm. Esto puede deberse a la ocurrencia de altas intensidades de precipitación, independiente de la cantidad de precipitación caída. No se aprecia una gran diferencia de las escorrentías peak entre las diferentes especies vegetales, cabe destacar que existe un número de eventos, cuya precipitación caída se encuentra entre 20-30 mm, que generan una escorrentía peak superior a las máximas encontradas en la categoría de eventos cuya precipitación caída es superior a los 40 mm. Para la estación Panguilemo, para el periodo registrado (2017-2018), no ocurrieron eventos para la categoría 20-30 mm, lo que no hace posible el estudio de este estadístico para la categoría mencionada (Figura 31), respecto a la otras categorías, en general, existe una tendencia al alza en los valores de escorrentía peak encontrados en esta zona, sin embargo las escorrentías peak para las categorías de 5-10 y 10-20 mm resultan ser muy similares, no existen diferencias significativas para los valores de escorrentía peak encontrados para los siete tratamientos considerados. Comparando ambas estaciones respecto de la escorrentía peak, puede observarse que la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins posee mucha mayor dispersión del

estadístico que la estación Panguilemo y también que los valores de escorrentía peak de la estación Bernardo O'Higgins resultan ostensiblemente superiores a los encontrados en la estación Panguilemo.

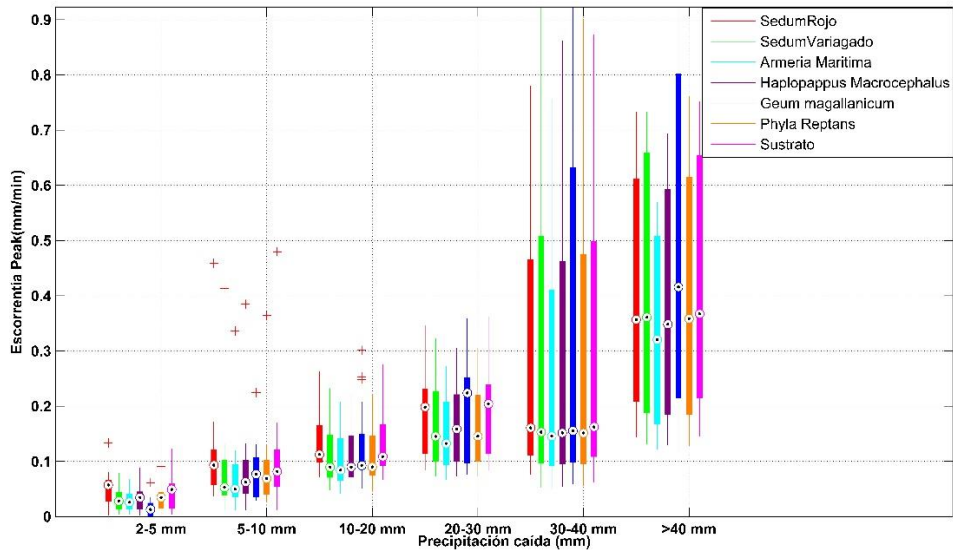


Figura 30.- Estadístico de escorrentía peak obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins de Chillán. Fuente: Elaboración propia.

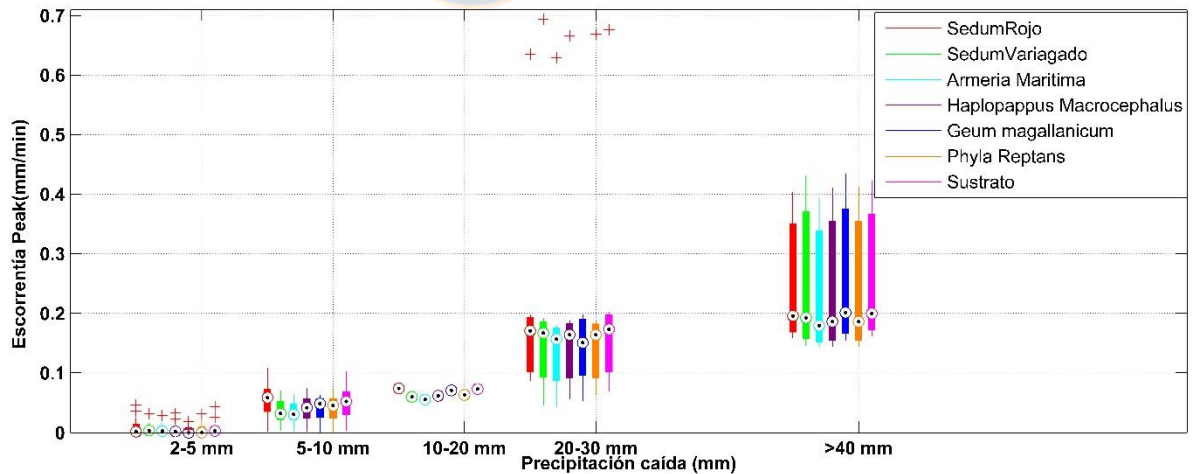


Figura 31.- Estadístico de Escorrentía Peak obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Panguilemo. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se comentan los resultados del estadístico porcentaje de atenuación del peak de escorrentía de las cubiertas verdes, en comparación con la escorrentía producida por una cubierta de material impermeable. Para la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins, se observa una disminución del porcentaje de atenuación del peak de escorrentía (Figura 32) a medida que aumenta la precipitación caída durante los eventos, esto puede explicado debido a que al estudiar la escorrentía peak pudo observarse que a mayor precipitación caída, la escorrentía peak del evento aumentaba, por lo es un resultado esperado, igualmente puede observarse una gran dispersión del porcentaje de atenuación del peak de escorrentía para los siete tratamientos considerados en el estudio, especialmente en la categoría de eventos con precipitación caída entre 2-5 milímetros, sin embargo, las medianas obtenidas rondan entre un 20-30% de atenuación del peak de escorrentía. En la estación Panguilemo, se aprecia una menor dispersión de este estadístico para los siete tratamientos (Figura 33), existe una disminución del porcentaje de atenuación del peak a medida que aumentan las magnitudes de los eventos, sin embargo, se encuentran porcentajes de atenuación del peak de escorrentía superiores al 70% para la categoría de eventos con precipitación caída 2-5 mm. Al contrastar los resultados de ambas estaciones, la estación Panguilemo presenta menor dispersión de éste estadístico que la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins, sin embargo la estación Panguilemo presenta menores porcentajes de atenuación del peak para las categorías de eventos con precipitación superiores a los 10 mm.



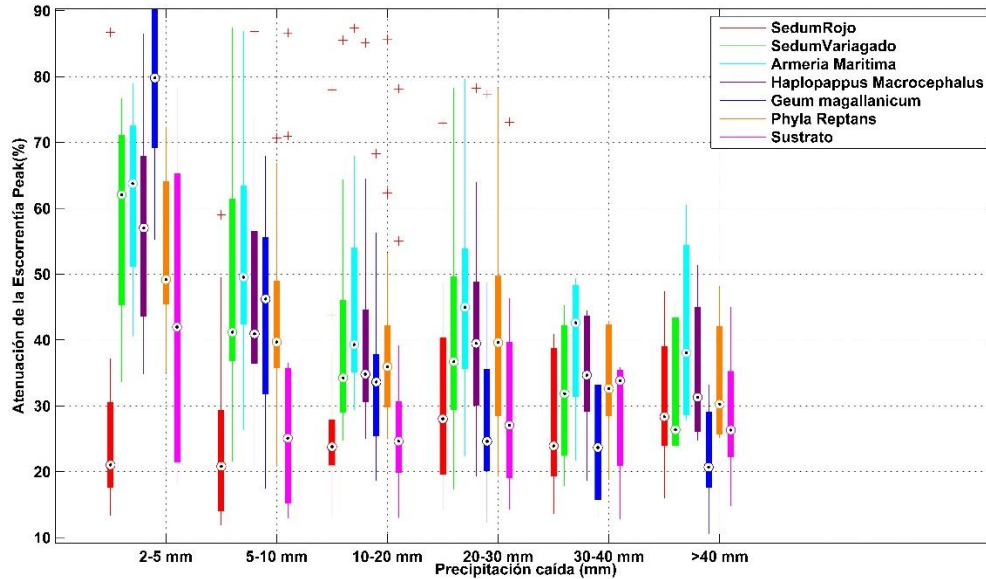


Figura 32.- Estadístico de atenuación de la escorrentía, obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins de Chillán. Fuente: Elaboración propia.

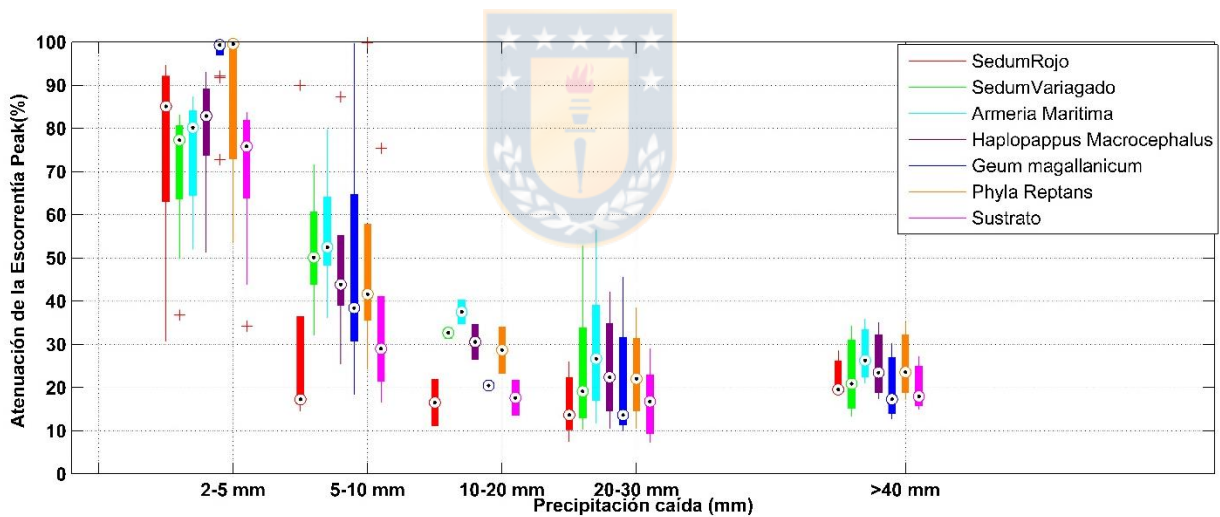


Figura 33.- Estadístico de atenuación de la escorrentía, obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Panguilemo. Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de la duración de la escorrentía. Para la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins, no se evidencia un aumento claro de la duración de la escorrentía para las diferentes categorías de precipitación caída para los eventos (Figura 34), esto puede ocurrir debido a que pueden existir periodos secos menores a las 24 horas dentro de un mismo evento y es posible que al finalizar los eventos, ya haya escurrido un porcentaje considerable de la escorrentía durante el transcurso de éste, haciendo que éste estadístico no presente tanta dispersión, este comportamiento explicaría por qué la duración de la escorrentía sea baja en los



eventos con mayor precipitación caída, a pesar de lo anterior, se observa que la media de la duración de la escorrentía para las distintas categorías de eventos es cercana a los 200 minutos, es decir que por al menos tres horas, las cubiertas verdes continúan generando escorrentía, cabe destacar también que no se observa una gran dispersión de este estadístico para los tratamientos estudiados (a excepción de las especies *geum magallanicum* y *phyla reptans*), que presentan una mayor dispersión. Para la estación Panguilemo, se evidencia una menor dispersión del estadístico (a excepción del *geum magallanicum* y la especie *phyla reptans*), no se observa una clara tendencia en el comportamiento de este estadístico a medida que aumenta la precipitación caída durante los eventos (Figura 35), esto puede explicarse por descrito anteriormente y finalmente la mediana del estadístico se encuentra en los 500 minutos. Ambas estaciones generan una media de duración de la escorrentía de 3 horas, las duraciones de la escorrentía en la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins son mayores que las encontradas en la estación Panguilemo, esto puede producirse debido a que los periodos secos intra-evento son mayores en ésta última estación y finalmente existe una gran dispersión del estadístico en la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins en comparación a la estación Panguilemo.

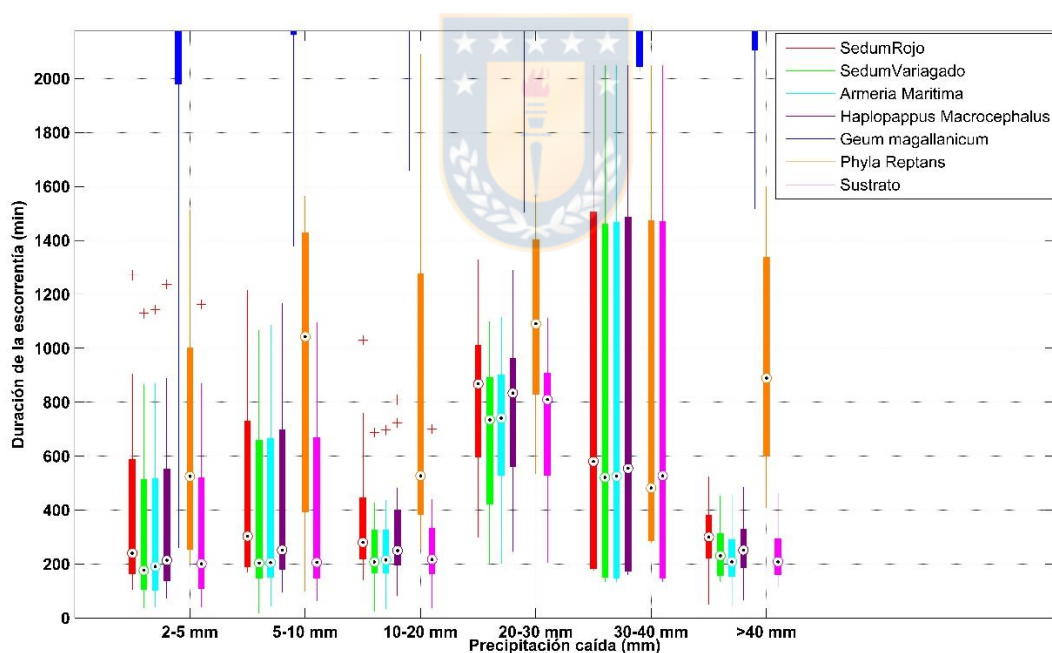


Figura 34.- Estadístico de Duración de la escorrentía, obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins. Fuente: Elaboración propia.

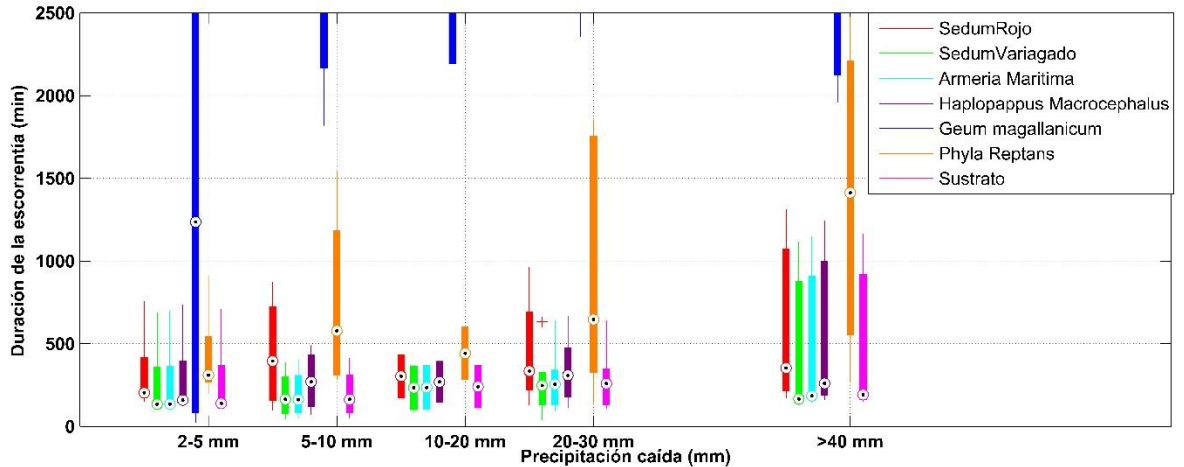


Figura 35.- Estadístico de Duración de la escorrentía, obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Panguilemo. Fuente: elaboración propia.

A continuación se discuten los resultados del retardo del centroide de escorrentía al separar los eventos por cantidad de agua caída, el tiempo de ocurrencia del centroide de escorrentía es la cantidad de tiempo que debe pasar para que haya escurrido el cincuenta por ciento de la escorrentía total del evento, por retardo en el centroide de escorrentía se refiere a la cantidad de tiempo que se retrasa el centroide de la escorrentía de una cubierta verde, con respecto al centroide de escorrentía de una cubierta de material impermeable. La estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins no presenta una tendencia clara respecto a este parámetro (Figura 36), encontrándose una media de valores entre 10 y 30 minutos, el estadístico no presenta una gran variación entre los siete tratamientos de cubierta verde. La estación Panguilemo en cambio presenta una disminución de este parámetro con respecto a la cantidad de agua caída por evento, presentando mayor dispersión entre los distintos tratamientos, encontrándose una media entre 10 y 50 minutos. En contraste, la estación Panguilemo presenta más dispersión de este parámetro que la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins y la media encontrada en la estación Panguilemo (Figura 37) es superior a la encontrada en la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins, esto quiere decir que es mucho más probable que los colectores de aguas lluvias se encuentren más sobrecargados en Chillán que en Panguilemo, durante un evento de precipitación.

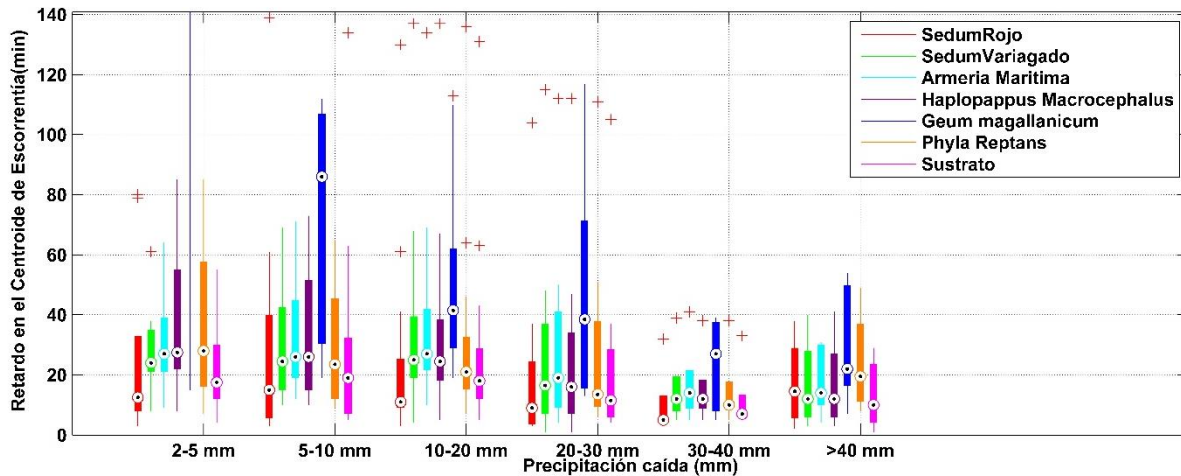


Figura 36.- Estadístico de Retardo en el centroide de escorrentía, obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins. Fuente: Elaboración propia.

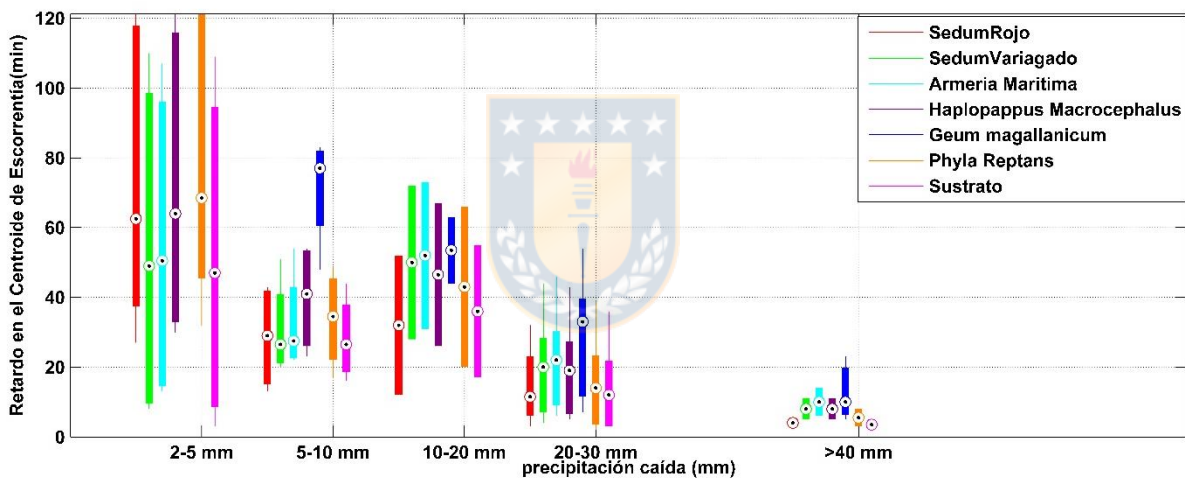


Figura 37.- Estadístico de Retardo en el centroide de escorrentía, obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Panguilemo. Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de la retención de las cubiertas verdes. Tal como se indicó en el apartado de metodología, la retención de una cubierta verde se considera como la cantidad de escorrentía que aún se encuentra en la cubierta verde en el momento en que la escorrentía de la cubierta impermeable ha terminado. La estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins presenta bastante dispersión de este estadístico para los distintos tratamientos de cubierta verde considerados en el estudio (Figura 38), no evidenciándose una clara tendencia, ya que es posible encontrar un gran número de magnitudes de retención que ocurren tanto en los eventos con menor precipitación caída como en los eventos con precipitación caída superior a los 40 mm, en general se evidencian bajos valores de retención, esto puede ser explicado debido a la presencia de periodos secos menores a 24 horas que ocurren dentro de

un mismo evento. Para la estación Panguilemo, es posible constatar una menor variación del estadístico para los distintos tratamientos de cubierta verde (Figura 39), no es posible evidenciar una tendencia clara para este estadístico, pudiendo encontrarse valores similares en todas las categorías de eventos, sin embargo, es posible observar que la media de retención en la categoría de eventos con precipitación caída 2-5 mm es cercana a cero. En general, la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins presenta valores de retención de la escorrentía superiores a los de la estación Panguilemo, sin embargo, presenta una dispersión considerable para todas las categorías de eventos.

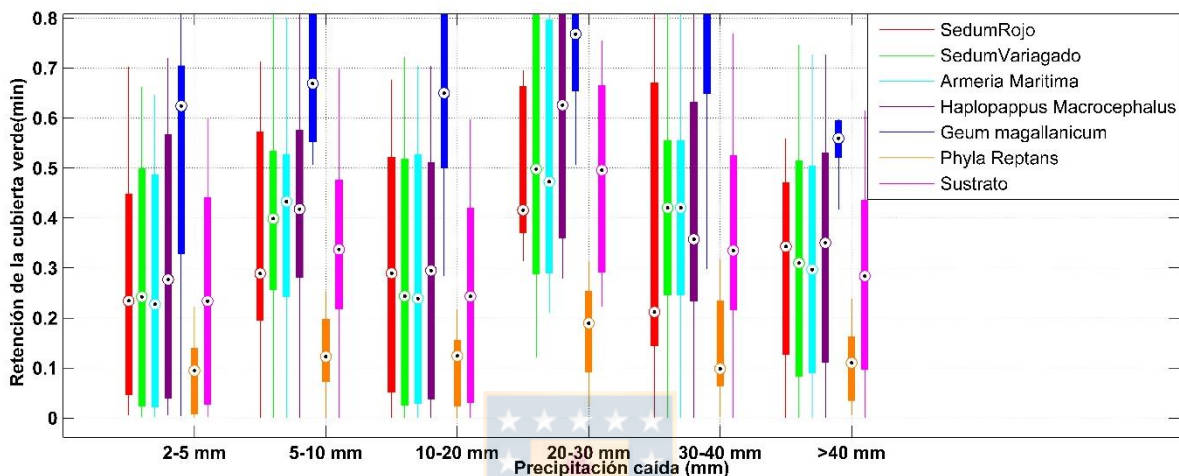


Figura 38.- Estadístico de Retención de la cubierta verde obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins. Fuente: Elaboración propia.

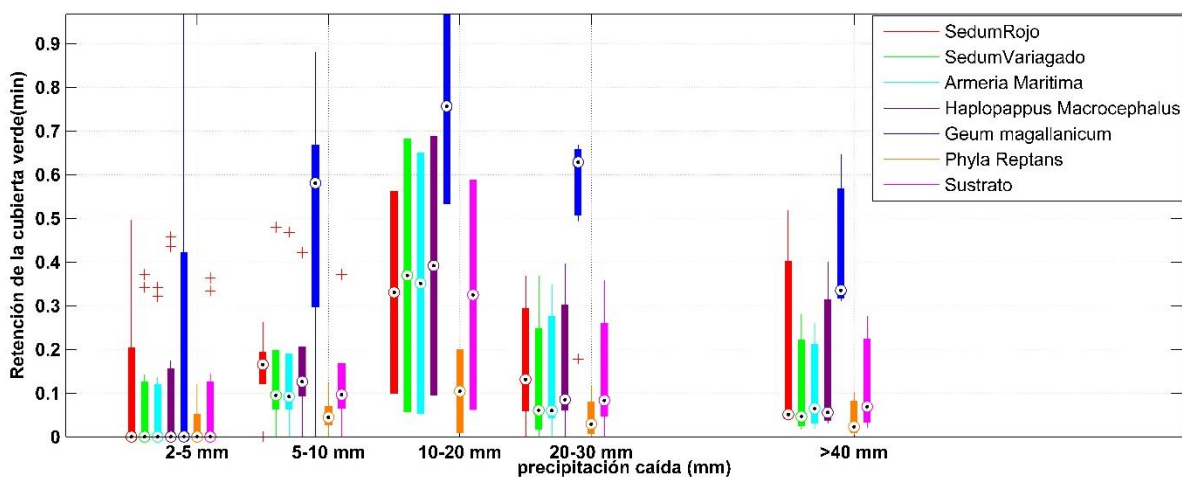


Figura 39.- Estadístico de Retención de la cubierta verde obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde, tras separar los eventos de precipitación de la estación Panguilemo. Fuente: Elaboración propia.

## Resultados estadísticos resultantes de la tormenta de diseño

Para el estudio de la escorrentía generada por las cubiertas verdes considerando como variable de entrada la tormenta de diseño, se utilizaron los datos de precipitación cada 15 minutos de la estación Universidad de Concepción, sede Chillán. La razón de la utilización de estos datos radica en que los datos de la estación Aeropuerto Bernardo O'Higgins poseían una resolución temporal de 1 minuto, sin embargo, la longitud del registro era sólo de 2 años, por lo que se consideró que éste no era lo suficientemente largo para generar una tormenta de diseño subhoraria.

Los parámetros de la expresión de Bernard (1932)  $k, m$  y  $n$  ajustados mediante la técnica de regresión lineal múltiple corresponden a 2.0672, 0.1609 y 0.5106 (1932) respectivamente, por lo que fue posible obtener los hietogramas de diseño subdiarios para duraciones desde 1 a 1440 minutos, para distintos periodos de retorno, tal como indica la Figura 40. Los hietogramas se utilizaron para estudiar los estadísticos de escorrentía peak, atenuación del peak, duración de la escorrentía, retardo en el centroide de escorrentía y retención de ésta en los siete tratamientos de cubierta verde. Tal como indica la Figura 41, estos hietogramas brindan información acerca de la distribución e intensidad de la precipitación, para tormentas con distintos periodos de retorno, si bien es posible notar que los hietogramas no se encuentran demasiado distantes entre sí, esto puede explicarse debido a que estas tormentas de diseño tienen duración subdiaria y se encuentran discretizadas en intervalos de 1 minuto, por lo que al ser un periodo de tiempo muy corto, no es posible evidenciar un cambio sustantivo entre la precipitación caída para un cierto tiempo y periodo de retorno, a pesar de esto, por ejemplo, la precipitación caída para una tormenta de 2 años de periodo de retorno es de 86 milímetros y 2.5 de intensidad máxima (mm/min), mientras que para una tormenta de 100 años de periodo de retorno, la precipitación caída es de 152 milímetros y una intensidad máxima 4.3 (mm/min).

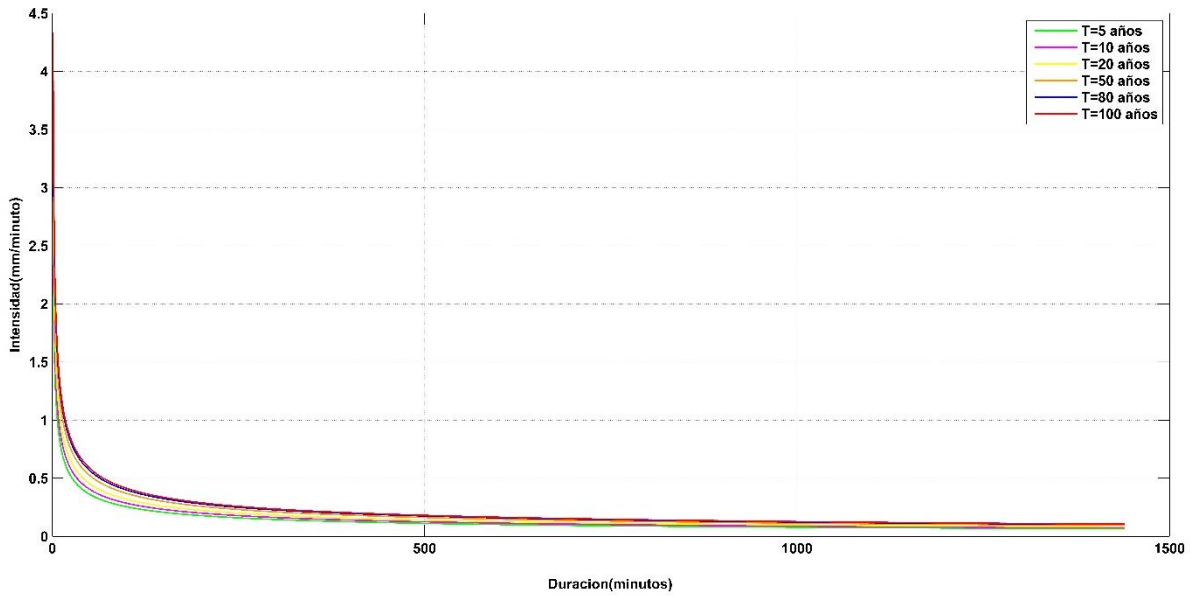


Figura 40.- Curvas IDF ajustadas para periodos de retorno de 4, 10, 20, 50, 80 y 100 años, discretizada en intervalos cada 1 minuto y de duración diaria. Fuente: Elaboración propia.

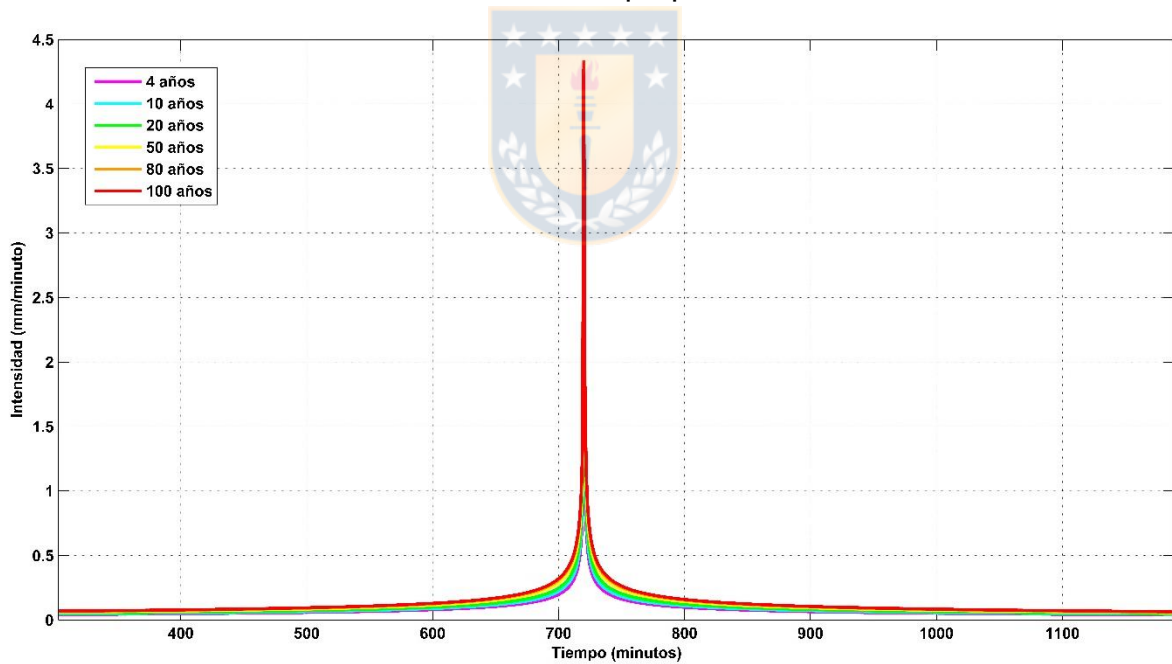


Figura 41.- Hietogramas de Diseño obtenidos para una duración subdiaria, para periodos de retorno de 4, 10, 20, 50, 80 y 100 años. Fuente: Elaboración propia.

Del comportamiento de la escorrentía peak obtenida para los siete tratamientos de cubierta verde, al correr el modelo hidrológico considerando los hietogramas de diseño para periodos de retorno entre 2 y 100 años (Figura 42), es posible visualizar que los valores de escorrentía peak aumentan con el periodo de retorno para todos los tratamientos, esto es de esperarse, ya que tanto la cantidad de precipitación



caída como las intensidades de ésta son mayores a medida que aumenta el periodo de retorno. Igualmente se evidencia una diferencia entre las escorrentías peak obtenidas para las distintas especies vegetales (incluyendo la condición de sólo sustrato), esto podría explicarse principalmente por las propiedades de la cobertura vegetal, ya que las especies *sedum variagado*, *phyla reptans*, *haplopappus macrocephalus*, *armeria marítima* y *geum magallanicum* presentan las mayores escorrentías peak, debido a que corresponden a especies rastreras que no se encontrarían interceptando mucha precipitación, en caso contrario el *sedum rojo* presenta bajas escorrentías peak, ya que se presume que debido a la densa cobertura que genera la especie permite interceptar mayor precipitación. En el caso del tratamiento de sólo sustrato, se presentan bajas escorrentías peak, eso podría ser explicado debido a que como el sustrato no se encuentra plantado, es posible que presente una menor densidad, interceptando así mayor precipitación.

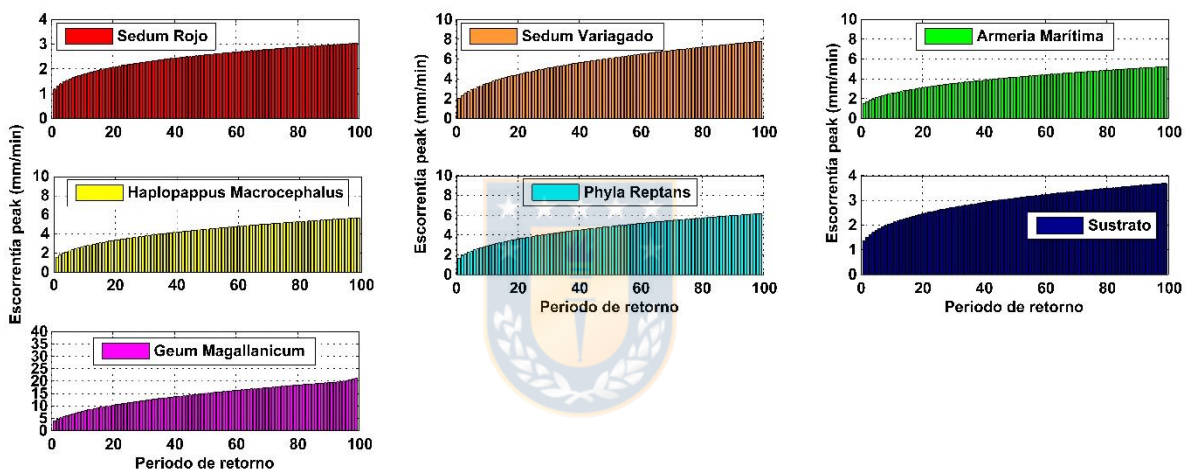


Figura 42.- Estadístico de escorrentía peak obtenida para los siete tratamientos de cubierta verde al correr los modelos hidrológicos calibrados considerando los hietogramas de diseño para periodos de retorno de 2 a 100 años. Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la atenuación del peak de escorrentía que permiten estos tratamientos de cubierta verde, se evidencia que todos los tratamientos disminuyen su porcentaje de atenuación del peak a medida que aumenta el periodo de retorno de la tormenta de diseño, tal como indica la Figura 43. Este comportamiento podría ser explicado debido a que tanto el volumen de precipitación caída como la intensidad de precipitación aumentan con el periodo de retorno, provocando que las cubiertas verdes se saturen con mayor rapidez, generando una escorrentía peak más cercana a la de una cubierta impermeable, logrando así una menor atenuación de la escorrentía máxima. Pueden comprobarse las indicaciones explicadas en el párrafo anterior, ya que los tratamientos con menor escorrentía máxima, el *sedum rojo* y la cubierta no plantada (sustrato), son los que permiten atenuar en mayor cantidad el peak de escorrentía, logrando atenuaciones entre un 80 y un 60% para todos los periodos de retorno. Al igual que el caso anterior, puede comprobarse que

los tratamientos que se presume interceptan menos precipitación debido a las condiciones de su cobertura, presentan menores porcentajes de atenuación de la escorrentía máxima, entran dentro de esta categoría los tratamientos de, *armeria marítima*, *haplopappus macrocephalus*, *sedum variagado* y *geum magallanicum*, donde éstas últimas dos especies, para tormentas con periodos de retorno grandes, llega un momento en que la atenuación de la escorrentía máxima es nula y después negativa, esto permite sugerir que la escorrentía máxima de la cubierta verde llega incluso a ser mayor que la escorrentía máxima para una cubierta impermeable, lo último puede ser explicado debido a que en el modelo de cubierta verde al estar los 3 almacenamientos llenos debido al volumen de precipitación caída, se encuentra ocurriendo tanto escorrentía superficial como escorrentía subsuperficial, logrando así que la escorrentía de la cubierta verde sea mayor a la de la cubierta impermeable, ya que la cubierta impermeable sólo permite la escorrentía superficial.

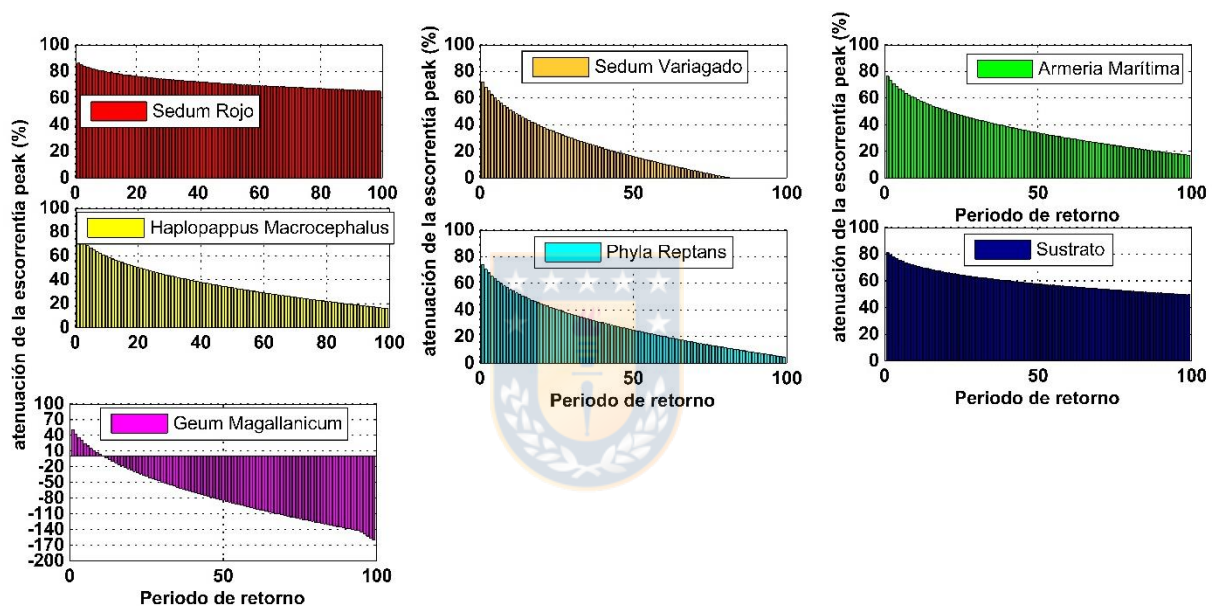


Figura 43.- Estadístico de atenuación del peak obtenida para los siete tratamientos de cubierta verde al correr los modelos hidrológicos calibrados considerando los hietogramas de diseño para periodos de retorno de 2 a 100 años. Fuente: Elaboración propia.

El estadístico de duración de la escorrentía no presenta una variación considerable para todos los tratamientos de cubierta verde a pesar del aumento del periodo de retorno de la tormenta de diseño, tal como indica la Figura 44. Cabe destacar que este parámetro considera los minutos en que la cubierta verde aún continúa generando escorrentía una vez que la escorrentía de la cubierta impermeable ha cesado, esto podría ser explicado debido a que al terminarse el evento de precipitación, la cubierta impermeable cesa inmediatamente la generación de escorrentía, mientras que la cubierta verde continuará generando escorrentía subsuperficial, en el modelo hidrológico esto ocurre hasta que el almacenamiento subsuperficial  $R$  posea una altura inferior a  $aR_{max}$ , provocando que el flujo  $Q_{ss}$  que recarga el almacenamiento de detención  $h$  sea nulo, por lo que la escorrentía

subsuperficial duraría hasta que se vacíe completamente el almacenamiento de detención  $h$ . A pesar de lo descrito anteriormente, se manifiestan diferencias entre los distintos tratamientos de cubierta verde, para los tratamientos que atenúan menos la escorrentía peak, es decir *sedum variagado*, *armeria marítima*, *haplopappus macrocephalus*, se observa que la duración de la escorrentía ronda los 400 minutos, esto quiere decir que, por 6 horas, estos tratamientos de cubierta verde seguirán generando escorrentía, independiente del periodo de retorno de la tormenta de diseño. Para los tratamientos que atenúan más la escorrentía máxima, es decir la cubierta no plantada (sólo sustrato) y el *sedum rojo*, se observa un comportamiento similar, sin embargo, ésta última especie logra una duración de la escorrentía cercana a los 500 minutos, es decir que la cubierta de *sedum rojo* se encontraría aportando escorrentía por aproximadamente 8 horas. En el caso de las especies vegetales *phyla reptans* y *geum magallanicum* presentan una menor duración de la escorrentía, esto podría esperarse ya que presentan una menor atenuación de la escorrentía, por lo que su respuesta sería más rápida que para las demás especies vegetales.

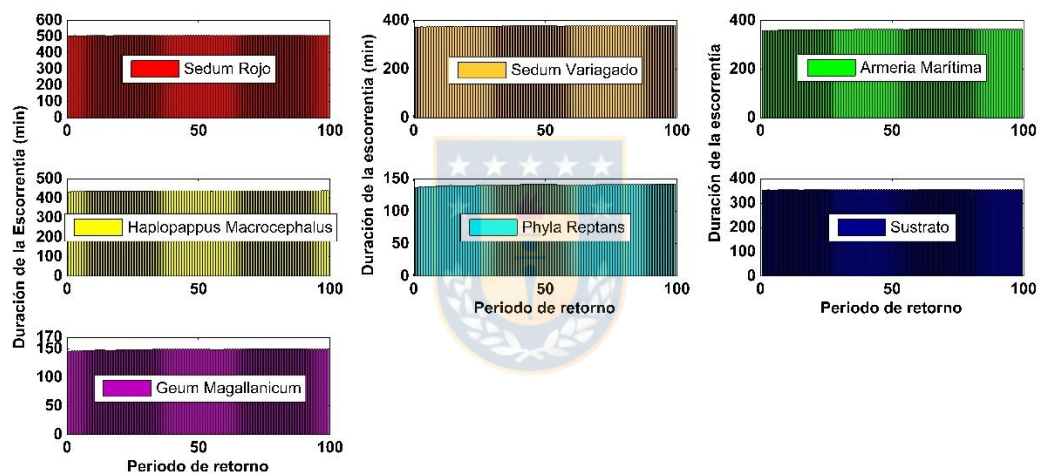


Figura 44.- Estadístico de duración de la escorrentía obtenida para los siete tratamientos de cubierta verde al correr los modelos hidrológicos calibrados considerando los hietogramas de diseño para periodos de retorno de 2 a 100 años. Fuente: Elaboración propia.

El estadístico de retardo en el centroide de escorrentía no presenta una gran variación entre los distintos tratamientos de cubierta verde escogidos para la investigación, tal como se puede apreciar en la Figura 45. Cabe volver a mencionar que el tiempo en que ocurre el centroide de escorrentía, es el necesario para que haya escurrido al menos el 50% de la escorrentía total, el retardo en el centroide de escorrentía es el desfase de tiempo entre los centroides de escorrentía de una cubierta impermeable y de una cubierta verde, la utilidad de este parámetro es cuantificar el desfase de tiempo entre hidrogramas. Se observa que a tormentas con mayor periodo de retorno, el retardo en el centroide de escorrentía es menor, esto sería un comportamiento de esperar, tal como los casos anteriores, a mayor periodo de retorno, la cantidad e intensidad de precipitación aumenten, volviendo los

hidrogramas de las cubiertas verdes más similares a los de una cubierta impermeable, en general los siete tratamientos presentan un desfase entre 15 y 5 minutos, para tormentas con periodos de retorno bajos y altos respectivamente. Resulta interesante comparar el estadístico que presenta la cubierta no plantada (sólo sustrato) versus el de los demás tratamientos, ya que se evidencia que la cobertura vegetal no sería un factor importante en el desfase del hidrograma, sino que las propiedades del sustrato se encontrarían influenciando mayormente esta propiedad, siempre y cuando se considere la tormenta de diseño como la precipitación acaecida sobre estos tratamientos de cubierta verde.

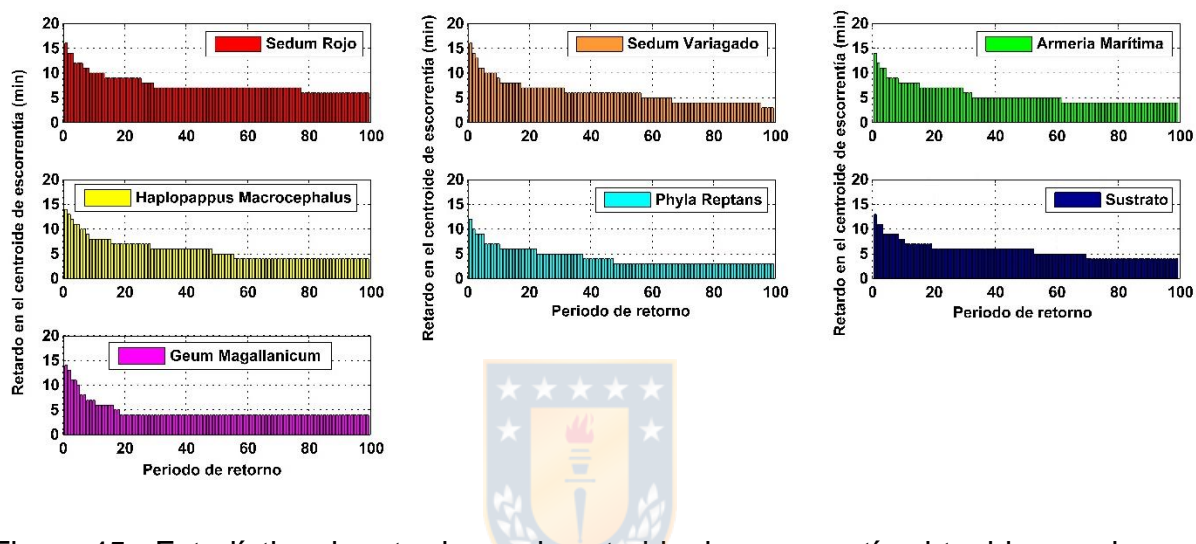


Figura 45.- Estadístico de retardo en el centroide de escorrentía obtenido para los siete tratamientos de cubierta verde al correr los modelos hidrológicos calibrados considerando los hietogramas de diseño para periodos de retorno de 2 a 100 años. Fuente: Elaboración propia.

El estadístico de retención de la escorrentía, al igual que la duración de la escorrentía no presenta mucha variación entre los distintos tratamientos de cubierta verde (Figura 46), la retención de la escorrentía tiene relación con los estadísticos de duración de la escorrentía y el retardo en el centroide de escorrentía, si bien se observan bajos valores de retención (menos de 1 mm), se presume que la causa de que estos valores sean tan similares entre los siete tratamientos radica en que también los estadísticos de retardo en el centroide de escorrentía y la duración de la escorrentía también son bastante similares entre los tratamientos, ya que estos dos parámetros permiten caracterizar el hidrograma en cuanto al tiempo de escurrimiento y al desfase de éste, resulta lógico que el parámetro de retención sea bastante similar entre tratamientos. Los bajos valores de retención permiten inferir que, si bien la escorrentía de estas cubiertas verdes continúa generándose por varias horas, ésta se presentará con valores muy bajos, ya que en el momento en que la cubierta impermeable ya a dejado de generar escorrentía, a la cubierta verde aún le falta escurrir menos de 1 milímetro. Cabe destacar que las especies *phyla reptans* y *geum magallanicum* presentan los valores de retención más bajos, esto es una propiedad esperable ya que presentan los valores de duración de la



escorrentía y retardo en el centroide de escorrentía más bajos del presente estudio, lo que permite postular que son los tratamientos con respuesta hidrológica más rápida de los siete estudiados en esta investigación.

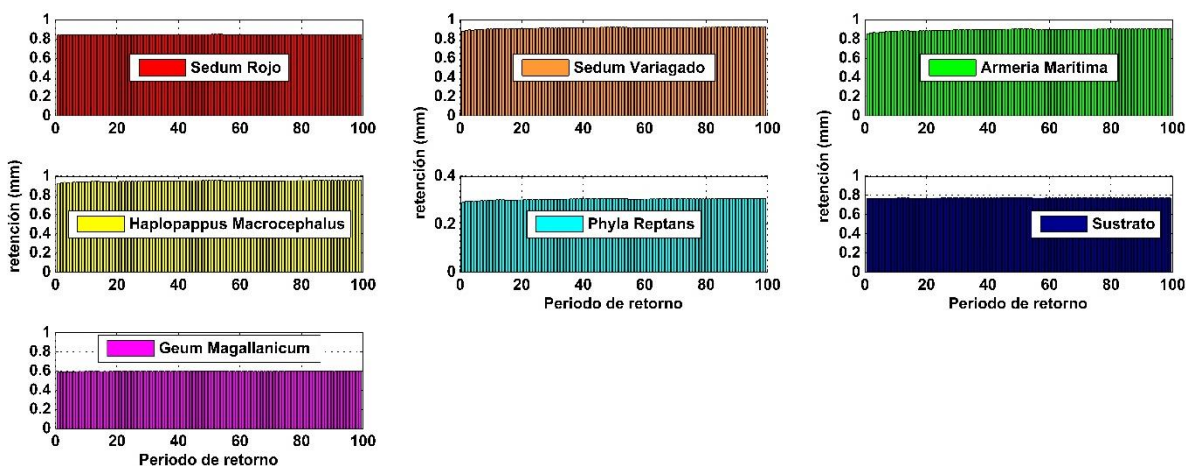


Figura 46.- Estadístico de retención de la escorrentía obtenida para los siete tratamientos de cubierta verde al correr los modelos hidrológicos calibrados considerando los hietogramas de diseño para periodos de retorno de 2 a 100 años. Fuente: Elaboración propia.

## Discusión

Se presenta un modelo hidrológico calibrado para la zona central de Chile, para evaluar las características de retención, detención de la escorrentía de las cubiertas verdes, este modelo fue calibrado a partir de una instalación experimental, donde los valores de escorrentía observados se generan a partir de un simulador de precipitaciones que sometía a los tratamientos de cubierta verdes a tres intensidades de precipitación constantes. El modelo programado en este estudio consistió en una modificación del modelo propuesto por Locatelli et al., (2014), el modelo original corre a paso de 10 minutos, presenta un periodo de calibración a partir del monitoreo de la escorrentía por 3 meses, determina la evapotranspiración a partir de la expresión de Penmann-Monteith (Allen, 1998), donde la tasa de evapotranspiración cada 10 minutos es la equivalente diaria, donde el coeficiente de cultivo  $k_c$  igualmente se sometió a calibración y finalmente utiliza una metodología de análisis de sensibilidad de parámetros basada en la “composite scale sensitivities” propuesta por Hill (1998). Las modificaciones consideradas en el modelo presentado en esta investigación son que se considera un paso de tiempo cada 1 minuto, principalmente debido a que las cubiertas son estructuras con respuesta hidrológica muy rápida, por lo que se prefirió esta escala temporal, respecto a la evapotranspiración, se prefirió un expresión que permitiera modelar la evapotranspiración en función del contenido de humedad del sustrato y que además considerara el equivalente horario de la evapotranspiración de referencia, en vez del diario, para que el modelo reflejara los cambios de la evapotranspiración en el

día, finalmente, el modelo considerado en este estudio utilizó la metodología de Monte-Carlo para calibrar los parámetros y el “Regional sensitivity analysis” recomendado por Wagener et al., (2001).

Se observa que los estadísticos de atenuación del peak, retardo en el centroide, duración y retención de la escorrentía, difieren dependiente de la metodología considerada. Al realizar la separación de eventos (tanto para la estación Aeropuerto Bernado O’Higgins y Panguilemo), se observa que en el caso de los eventos con baja precipitación caída, se consiguen reducciones de al menos un 60% en la escorrentía máxima, mientras que los eventos con más precipitación caída (mayor a 40 mm) se consiguen reducciones de la escorrentía máxima en al menos un 20%, igualmente la consulta de cubiertas verdes permitió que la escorrentía de éstas continuase generándose por al menos un periodo de tiempo adicional de 3 horas, una vez que la escorrentía de la cubierta impermeable hubiera terminado, la separación de eventos igualmente permite evidenciar retardos en el centroide de escorrentía de al menos 10 minutos , lo que significaría que estos tratamientos de cubierta verde tardarían 10 minutos más en evacuar el 50% de la escorrentía total, comparado con el tiempo de evacuación del 50% de la escorrentía total generada por una cubierta impermeable, finalmente con respecto al estadístico de retención de la escorrentía, se observa que la retención promedio es ligeramente superior a 0.1 mm, lo que equivale al volumen caído en un pulso de precipitación durante un periodo de 1 minuto, esta escasa retención puede ser explicada porque las cubiertas verdes en el momento de inicio de los eventos, se asumió que el contenido de humedad del sustrato era el de capacidad de campo.

El análisis de la respuesta en escorrentía de estos tratamientos de cubierta verde cuando cae la tormenta de diseño a distintos periodos de retorno permitió tener una visión del comportamiento de estas estructuras durante eventos extremos, al analizar los mismos estadísticos se observó la atenuación de la escorrentía máxima obtenida en condiciones de tormentas de diseño con bajos periodos de retorno fue de un 80%, mientras que al aumentar el periodo de retorno del evento a valores cercanos a 50 años, se evidenciaron disminuciones de un 30% de la escorrentía máxima, sin embargo al considerar tormentas con periodos de retorno superiores, se observan diferencias sustantivas entre distintas especies vegetales, ya que para los tratamientos con baja intercepción (debido a sus condiciones de cobertura), su pudo observar que su atenuación era negativa, esto quiere decir que la cubierta verde se encontraría generando más escorrentía que una cubierta impermeable, esto podría ser explicado debido a que en el modelo hidrológico (y la cubierta verde real también) al estar saturados todos los almacenamientos, se genera escorrentía superficial y subsuperficial, provocando así que la escorrentía máxima de la cubierta verde sea superior a la de la cubierta impermeable, el estadístico de duración de la escorrentía al considerar las tormentas de diseño, permitió constatar que existe una diferencia entre las especies que se caracterizaron por tener una respuesta más rápida en escorrentía, ya que éstas continúan generando escorrentía por 150 minutos, mientras que las especies que son de respuesta más lenta, se encuentran escurriendo por un periodo superior a los 400 minutos, esto quiere decir que estas cubiertas, al momento de caer las tormentas de diseño, continúan escurriendo por un periodo entre 2 y casi 7 horas, una vez que la cubierta impermeable ya a



terminado de generar escorrentía, el estadístico de retardo en el centroide permite evidenciar que para tormentas con bajos periodos de retorno, se presenta un desfase de 15 minutos, mientras que para tormentas con periodos de retorno cercanas a los 100 años, permiten desfases de alrededor de 5 minutos, este comportamiento se considera lógico ya que a tormentas más grandes, los hidrogramas de estas cubiertas verdes se asemejarían bastante a los de una cubierta impermeable, finalmente el estadístico de retención de la cubierta verde al considerar las tormentas con distintos periodos de retorno, se comprobó que existe una escasa retención de la escorrentía (menos de 1 milímetro) cuando ya ha terminado de escurrir la cubierta impermeable, esto significa que si bien las cubiertas verdes continúan escurriendo por varias horas después de terminado el evento, la escorrentía residual sería muy baja. Las diferencias principales entre los distintos análisis, es decir la separación de eventos y las tormentas de diseño, es que los estadísticos resultantes de la separación de eventos presentan mucha variabilidad, esto es de esperar que ya se consideran 6 categorías de eventos, esto sumado a los distintos periodos secos intra-evento, se encontraría provocando la dispersión que caracterizó a estos resultados, mientras que las tormentas de diseño presentan una baja diferencia incremental entre un minuto y otro, no presentándose periodos secos entre medio, lo que se encontraría provocando la baja dispersión de los estadísticos (especialmente la duración y el retardo del centroide de escorrentía).

Cabe destacar que este estudio se realizó con las series de tiempo de las estaciones de Aeropuerto Bernardo O'Higgins y Panguilemo, por lo que las observaciones indicadas aquí no pueden extenderse a todo el territorio de Chile, en primera instancia porque las coberturas nativas consideradas en la investigación son de la zona central del país. El modelo hidrológico presentado, si bien permitió generar estos estadísticos para estudiar el desempeño de las cubiertas verdes como dispositivo de drenaje urbano sustentable, requirió de un proceso de pruebas para obtener valores de escorrentía observados, por lo que se sugiere considerar un modelo conceptual genérico.

Los resultados presentados en el estudio se ven influenciados por el proceso de calibración de los parámetros, por lo que presume una cierta incerteza en el modelo, especialmente ya que las pruebas de simulación de precipitación se realizaron en terreno, considerando que errores en este proceso pueden afectar los valores observados, pudiendo provocar incerteza al calibrar el modelo hidrológico. Resulta complejo el estudio de la influencia de la cobertura vegetal en el desempeño de la cobertura vegetal, el presente estudio consideró mayoritariamente la intercepción de la precipitación como la principal influencia de la precipitación, si bien el modelo hidrológico considera la modelación de la evapotranspiración, ésta considera la evapotranspiración de referencia, resultando en una simplificación, ya que ninguna de las coberturas vegetales consideradas en el estudio corresponde al cultivo de referencia (alfalfa).

## **Agradecimientos**

Ambos autores desean expresar su agradecimiento a Conycit por el financiamiento otorgado a través del proyecto Conycit/ Fondap 15130015. Adicionalmente, El autor Javier Camaño agradece el financiamiento otorgado a través de la Beca Conycit Doctorado Nacional.



## Referencias

Walter, I. A., Allen, R. G., Elliott, R., Jensen, M. E., Itenfisu, D., Mecham, B., ... & Spofford, T. (2000). ASCE's standardized reference evapotranspiration equation. In *Watershed management and operations management 2000* (pp. 1-11).

Locatelli, L., Mark, O., Mikkelsen, P. S., Arnbjerg-Nielsen, K., Jensen, M. B., & Binning, P. J. (2014). Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications. *Journal of hydrology*, 519, 3237-3248.

Villarreal, E. L., & Bengtsson, L. (2005). Response of a Sedum green-roof to individual rain events. *Ecological Engineering*, 25(1), 1-7.

Stovin, V., Poë, S., & Berretta, C. (2013). A modelling study of long term green roof retention performance. *Journal of environmental management*, 131, 206-215.

Vesuviano, G., & Stovin, V. (2013). A generic hydrological model for a green roof drainage layer. *Water Science and Technology*, 68(4), 769-775.

Vesuviano, G., Sonnenwald, F., & Stovin, V. (2014). A two-stage storage routing model for green roof runoff detention. *Water Science and Technology*, 69(6), 1191-1197.

Stovin, V., Vesuviano, G., & De-Ville, S. (2015). Defining green roof detention performance. *Urban Water Journal*, 1-15.

Olate, E., Gómez, M. F., Musalem, M., Sepúlveda, C., & Ferrer, J. M. (2011, November). Evaluation of native species for use in green roofs in the semiarid Mediterranean region of central Chile. In *VII International Symposium on New Floricultural Crops 1000* (pp. 171-177).

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>

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](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>

Zhao, L., Xia, J., Xu, C. Y., Wang, Z., Sobkowiak, L., & Long, C. (2013). Evapotranspiration estimation methods in hydrological models. *Journal of Geographical Sciences*, 23(2), 359-369.

Lees, M. J., & Wagener, T. (2000). Monte-Carlo Analysis Tool (MCAT) v. 2. User Manual, Civil and Environmental Engineering, Imperial College of Science Technology and Medicine.

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.

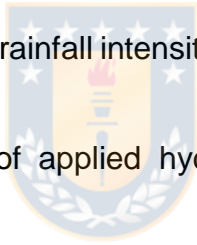
Hornberger, G. M., & Spear, R. C. (1981). Approach to the preliminary analysis of environmental systems. *J. Environ. Mgmt.*, 12(1), 7-18.

Spear, R. C., & Hornberger, G. M. (1980). Eutrophication in peel inlet—II. Identification of critical uncertainties via generalized sensitivity analysis. *Water Research*, 14(1), 43-49.

Freer, J., Beven, K., & Ambrose, B. (1996). Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: An application of the GLUE approach. *Water Resources Research*, 32(7), 2161-2173.

Bernard M. M., 1932: Formulas for rainfall intensities of long durations. *Trans. ASCE*, 96, 592–624.

Chow, V. T. (1964). *Handbook of applied hydrology: a compendium of water-resources technology*.



## 5. Discusión General

Chile ha presentado un avance sostenido en términos de sustentabilidad aplicada al drenaje urbano, creando institucionalidad en esta materia a partir de la promulgación de la ley 19.525 y a través de la elaboración de documentos técnicos tales como la guía “técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvia en sectores urbanos” y “el manual de drenaje urbano”. Igualmente se evidencia un interés público y privado para la construcción de obras que contemplen los conceptos del drenaje urbano sustentable (SUDS), a pesar de lo anterior, se plantea la necesidad de contar con estudios permitan observar el comportamiento de las obras SUDS a la realidad climática chilena, apoyándose en las herramientas de la modelación hidrológica e hidráulica de estas estructuras, en este contexto se desarrolló la presente investigación, para determinar el comportamiento hidrológico de las cubiertas verdes en la zona Central.

Los resultados indicados en el tercer capítulo permiten considerar que estas estructuras colaboran en detener la escorrentía, al igual que disminuir y retardar la escorrentía máxima, los beneficios de estas estructuras dependieron del enfoque utilizado, ya que al separar los eventos se obtuvieron distintos que al considerar la tormenta de diseño. Los resultados al separar los eventos, permitieron observar una atenuación de la escorrentía máxima entre un 20-60% dependiendo de la categoría del evento, al igual que una duración adicional de la escorrentía cercana a las tres horas, comparada con la de una cubierta de material impermeable, adicionalmente estas estructuras colaboraron en retardar el centroide de escorrentía al menos 10 minutos, sin embargo como se consideraron cubiertas verdes extensivas en el estudio, fue de esperar que la retención fuera escasa.

Los resultados al considerar los hietogramas de diseño con periodos de retorno entre 2-100 años evidenciaron que la atenuación de la escorrentía, disminuyó a medida de que la tormenta de diseño aumentaba de periodo de retorno, sin embargo pudo comprobarse porcentajes de atenuación de la escorrentía máxima al utilizar cubiertas verdes fueron entre 30-80% para tormentas con periodo de retorno menor a 50 años, al considerar periodos de retorno superiores, existieron diferencias entre los diferentes tratamientos, la duración adicional de la escorrentía obtenida, no resultó ser un parámetro dependiente del periodo de retorno, pero pudieron obtenerse valores entre 2-7 horas, el retardo en el centroide de escorrentía observado fue entre 5-15 minutos y la retención de la escorrentía al igual que el caso anterior, fue escasa.

A pesar de estos beneficios obtenidos mediante modelación, cabe destacar que los modelos calibrados fueron utilizados solamente para las localidades de Chillán y Panguilemo, por lo que es posible que los valores obtenidos en este estudio no sean necesariamente los mismos, incluso para otras localidades de la zona central de Chile.

Respecto al cumplimiento de la segunda hipótesis, se considera que efectivamente, las cubiertas verdes contribuyen significativamente a disminuir, retardar el peak de escorrentía sin embargo la retención no se considera relevante pues en este estudio se consideraron cubiertas verdes extensivos de 10 centímetros de profundidad. Con respecto a la comparación del desempeño hidrológico de las diferentes especies vegetales, no pudo comprobarse cuál se desempeñó mejor, ya que la influencia de la vegetación sobre la modelación hidrológica se dio básicamente en el primer almacenamiento, interceptando precipitación, a pesar de que el modelo hidrológico considera la acción de la evapotranspiración, ésta se consideró dependiente del contenido de humedad del sustrato y del equivalente horario de la evapotranspiración de referencia (cultivo de referencia), se plantea la necesidad de estudios que permitan cuantificar la evapotranspiración de especies vegetales dispuestas en condiciones de cubierta verde.

El desempeño de los sustratos de cubierta verde es diferente de un suelo convencional ya que el sustrato es una mezcla de distintos agregados sin embargo al igual que el suelo, sus propiedades afectaron el desempeño fotosintético del *sedum spurium voodoo*, de estas propiedades, la retención de agua en el suelo jugó un papel fundamental en la actividad fotosintética del *sedum spurium voodoo* incluso más que los contenidos de nutrientes, y la granulometría, ya que el sustrato que poseía una curva de desorción más alta, fue la que obtuvo un mejor desempeño fotosintético, ahora los objetivos desde un punto de vista de construcción son que el sustrato sea lo más liviano posible, por lo que una alta retención de agua, permitiría que la especie vegetal se encontrara con un menor estrés hídrico, sin embargo presentaría una mayor carga para la estructura.

## **6. Investigación Futura**

A raíz de esta investigación, se propone estudiar una metodología que permita obtener una red de drenaje sintética en función del terreno urbano (edificios, conjuntos habitacionales, calles) a partir de imágenes satelitales, ya que generalmente resulta complejo obtener catastros actualizados de las redes de drenaje, así como información del terreno urbano, para así estudiar el impacto en la escorrentía y en la calidad de agua al consultar cubiertas vegetadas a escala de ciudad.



## 7. REFERENCIAS GENERALES

Barbosa, A. E., Fernandes, J. N., & David, L. M. (2012). Key issues for sustainable urban stormwater management. *Water research*, 46(20), 6787-6798.

Boughton, W., & Droop, O. (2003). Continuous simulation for design flood estimation—a review. *Environmental Modelling & Software*, 18(4), 309-318.

Butler, D., & Parkinson, J. (1997). Towards sustainable urban drainage. *Water Science and Technology*, 35(9), 53-63.

Burton, G. A., & Pitt, R. E. (2002). *Stormwater effects handbook*. Boca Raton (FL): Lewis.

Butler, D., & Davies, J. (2004). *Urban drainage*. CRC Press.

DENR, N. (1997). *Stormwater Best Management Practices Manual*.

Dirección General de Aguas. (1989). *Balance Hidrogeológico de Chile*. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

Gironás, J. (2013). Hacia un diseño urbano sensible al agua. *Revista AIDIS* 45, 32-37.

Knapp, B. J. (2002). *Elements of geographical hydrology*. Routledge.

Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., & Shaffer, P. (2007). *The SUDS manual (Vol. 697)*. London: Ciria.

Lee, H., Swamikannub, X., Radulescub, D., Kimc, S., Stenstrom, M.K., 2007. Design of stormwater monitoring programs. *Water Research* 41 (18), 4186e4196.

Locatelli, L., Mark, O., Mikkelsen, P. S., Arnbjerg-Nielsen, K., Jensen, M. B., & Binning, P. J. (2014). Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications. *Journal of hydrology*, 519, 3237-3248.

Rossman, L. A. (2010). Storm water management model user's manual, version 5.0 (p. 276). Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.

Zoppou, C. (2001). Review of urban storm water models. *Environmental Modelling & Software*, 16(3), 195-231.

