



Determinación de parámetros hidráulicos de cubiertas vegetales a través de experimentos de drenaje y simulación inversa con Hydrus 1D

Determination of hydraulic parameters of green roofs through drainage experiments and inverse modeling with Hydrus 1D

Nicole Blin¹, Alumna de 5to año
Victoria Sandoval¹, Alumna de magister
Francisco Suárez¹, Profesor Asociado
Felipe Victorero², Arquitecto
Carlos Bonilla¹, Profesor Asociado
Jorge Gironás¹, Profesor Asociado
Sergio E. Vera², Profesor Asistente
Waldo Bustamante³, Profesor Titular
Vicky Rojas⁴, Arquitecto
Pablo Pastén¹, Profesor Asociado

Nicole Blin¹, 5th year student
Victoria Sandoval¹, Master's student
Francisco Suárez¹, Associate Professor
Felipe Victorero², Architect
Carlos Bonilla¹, Associate Professor
Jorge Gironás¹, Associate Professor
Sergio E. Vera², Assistant Professor
Waldo Bustamante³, Full Professor
Vicky Rojas⁴, Architect
Pablo Pastén¹, Associate Professor

¹Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile

²Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile

³Escuela de Arquitectura, Pontificia Universidad Católica de Chile

⁴VR+ARQ, Chile

*Autor de correspondencia: fsuarez@ing.puc.cl

¹Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Engineering School, Pontificia Universidad Católica de Chile

²Department of Construction Engineering and Management, Engineering School, Pontificia Universidad Católica de Chile

³Architecture School, Pontificia Universidad Católica de Chile

⁴VR+ARQ, Chile

* Corresponding author: fsuarez@ing.puc.cl

RESUMEN

Las cubiertas vegetales son soluciones tecnológicas que integran vegetación e infraestructura para obtener beneficios tales como la reducción de escorrentía superficial proveniente de los techos de casas o edificios. El funcionamiento adecuado de una cubierta vegetal depende del sustrato, un medio artificial que presenta un mejor comportamiento comparado con suelos naturales. Es por esto que es muy importante investigar las propiedades que caracterizan dicho sustrato para poder mejorar su desempeño. En este trabajo se investigan las propiedades hidráulicas de tres sustratos comúnmente utilizados en cubiertas vegetales, correspondientes a Las Brujas, Verde Activo y Jardinsen, mediante experimentos de drenaje y simulaciones numéricas. Estos experimentos consisten en saturar columnas de sustrato con agua para luego ser drenadas fijando distintas alturas de presión con respecto al fondo de la columna. Los datos obtenidos del experimento permiten determinar la curva de retención de agua y la conductividad hidráulica del sustrato mediante simulación inversa realizada en el programa Hydrus 1D. Se concluyó que, de los tres sustratos estudiados, el que tiene mayor capacidad para retener una determinada cantidad de agua es Jardinsen. Por lo tanto, se recomienda utilizar este sustrato para reducir la escorrentía superficial de tormentas de pequeños períodos de retorno.

Palabras clave: Cubiertas vegetales, ciudades sustentables, curva de retención hidráulica, conductividad hidráulica, parámetros hidráulicos

ABSTRACT

Green roofs are technological solutions that integrate vegetation into infrastructures to reach benefits such as the reduction of rooftop runoff peak flows. The proper performance of a green roof depends on its substrate, which is an artificial media that has an improved performance compared to natural soils. Therefore, it is very important to investigate the substrate properties to characterize the behavior of a green roof, and to optimize its performance. This work investigates the hydraulic properties of three substrates commonly found in green roofs, corresponding to Las Brujas, Verde Activo and Jardinsen, by means of drainage experiments and numerical simulations. The drainage experiments consist in substrate columns that are saturated with water and then drained by fixing different pressure heads at the bottom of the column. These experimental data enables the determination of the water retention and hydraulic conductivity curves of each substrate by inverse modeling using the Hydrus 1D software. It was concluded that, among the three substrates used in this investigation, the Jardinsen substrate retained a larger amount of water. Therefore, we recommend the use of this substrate to reduce surface runoff of storms with small return period.

Keywords: Green roofs, sustainable cities, hydraulic retention curve, hydraulic conductivity, hydraulic parameters

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo urbano sustentable ha promovido diversas soluciones tecnológicas que minimizan los impactos adversos de una ciudad. Las **cubiertas vegetales** son estructuras con múltiples capas constructivas que permiten incorporar vegetación a las construcciones (Figura 1), y que han captado la atención de la sociedad debido a que entregan grandes beneficios de manera simultánea. Por ejemplo, permiten remover contaminantes, atenuar ruidos, incrementar la biodiversidad, reducir la escorrentía y mejorar el aislamiento térmico de estructuras, además de proporcionar ambientes más placenteros en el contexto urbano [1].

Para que una cubierta vegetal entregue los beneficios anteriormente señalados, se debe diseñar correctamente cada una de sus capas constructivas. El **sustrato** es una

1. INTRODUCTION

Sustainable urban development has promoted different technological solutions that reduce the negative impacts on a city. **Green roofs** are structures with multiple constructive layers which make possible to add vegetation to constructions (Figure 1), and which have drawn public attention because of the great benefits they bring simultaneously. For example, they can remove pollutants, reduce noise, increase biodiversity, diminish runoff, and improve thermal isolation of structures, besides providing more pleasurable environments in urban contexts [1].

To provide the benefits mentioned above, each one of the constructive layers of the green roof must be properly designed. One of the most important layers is the

de las capas de mayor interés porque entrega a la vegetación los recursos necesarios para su sobrevivencia: nutrientes, agua y un medio en el cual crecer [2]. Las propiedades físicas del suelo determinan el flujo de agua en la cubierta, un factor vital para subsistencia de la vegetación [2]. Por lo demás, los sustratos también tienen un rol importante en los flujos de agua y calor en la cubierta, influyendo en su capacidad de reducción de escorrentía, como también en los beneficios térmicos asociados [3-5].

A pesar de su importancia, los sustratos comúnmente disponibles en el mercado no cuentan con una caracterización que permita comprender los principales procesos físicos que ocurren en ellos. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es determinar las propiedades hidráulicas de distintos

sustratos comúnmente utilizados en cubiertas vegetales chilenas. Esta caracterización es el primer paso para generar herramientas de modelación que permitan predecir el comportamiento de las cubiertas vegetales y apoyen el diseño de estas soluciones tecnológicas.

2. TEORÍA

El flujo de agua en un sustrato se encuentra fuertemente influenciado por las propiedades hidráulicas del mismo. Estas propiedades dependen de la estructura del suelo, como la **porosidad, densidad aparente y granulometría**. Estas características determinan la capacidad de retener agua en el suelo y conducir fluido. Las propiedades principales son la curva de succión y la curva de conductividad hidráulica [6].

La curva de succión, , representa la **altura de presión** con la cual el suelo retiene agua en sus poros y es función del **contenido de humedad** presente en el suelo. Cuando los poros del suelo se encuentran llenos de agua, la energía con la que se retiene el agua es nula, mientras que, cuando el nivel de humedad disminuye, aumenta la **succión** existente en el suelo [6]. En este trabajo se utilizó el modelo de van Genuchten [7] para representar la curva de succión:

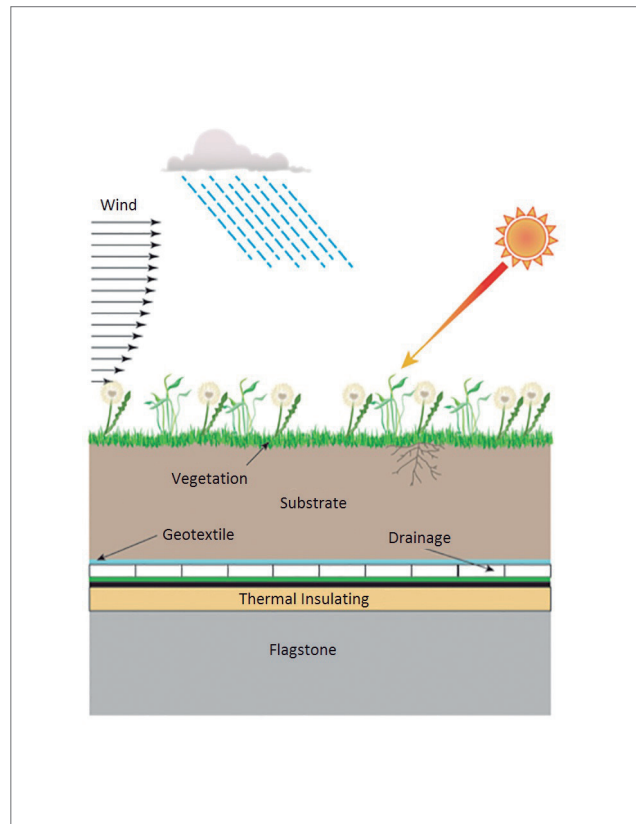


Figura 1. Esquema de las capas constructivas de una cubierta vegetal

Figure 1. Diagram of constructive layers of green roofs

substrate, because it gives vegetation the resources it needs to survive: nutrients, water and a growing media [2]. The soil's physical properties determine the water flow on the roof, which is an essential factor for vegetation survival [2]. Besides, substrates also play an important role in the water and heat fluxes on the roof. The substrate influences the green roof runoff reduction capacity, as well as its thermal insulation [3-5].

Despite their importance, the substrates that are typically available in the market do not have a characterization that helps understanding the main physical processes that occur in them. Therefore, the objective of this paper is to determine the hydraulic properties of different substrates commonly used in green roofs in Chile. This characterization is the first step to create modeling tools

to predict the behavior of green roofs, and to support the design process of these technological solutions.

2. THEORY

Water flow in a substrate is strongly influenced by its hydraulic properties. These properties depend on the soil structure, such as **porosity, bulk density, and grain size distribution**, which determine the capacity of the soil to retain and transmit water. The main hydraulic properties are the water retention curve and the hydraulic conductivity curve [6].

The water retention curve, represents the **pressure head** with which the soil retains water in its pores, and depends on the **moisture content** of the soil. When the soil pores are filled with water, the capillary forces that retain water are null, while when the moisture level diminishes, the suction related to the capillary forces within the soil increases [6]. In this paper, the van Genuchten model [7] was used to represent the water retention curve:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (1)$$

donde S_e es el nivel de saturación, θ_r y θ_s representan la **humedad residual** y **humedad saturada**, respectivamente; α es el inverso de la **presión de burbujeo**; n y m son parámetros empíricos de ajuste.

La conductividad hidráulica representa la facilidad con la que se mueve el agua a través de los poros del sustrato (ver principio científico). Los parámetros de la curva de succión (α , n , K_s) son los parámetros que se desean encontrar para tres sustratos utilizados en cubiertas vegetales gracias al programa de modelación Hydrus 1D.

3. METODOLOGÍA

Para determinar los parámetros hidráulicos de las cubiertas vegetales, se eligieron tres sustratos comúnmente utilizados en Chile para realizar las experiencias de drenaje (Figura 2). El primer sustrato contiene residuos vegetales (“Las Brujas”); el segundo sustrato es una mezcla de tierra de hojas, perlita y un mineral volcánico (“Jardinsen”); y el tercer sustrato contiene ladrillo molido, compuesto principalmente por arcilla (“Verde activo”).

Cada experimento de drenaje consistió en colocar un sustrato en una columna de 19 cm de diámetro y 16 cm de alto, tal como se muestra en la Figura 3. La columna se satura con agua desde abajo hacia arriba, de modo que no quede aire retenido en los poros del suelo. A continuación, se drenó el sustrato bajo distintas alturas de presión (h de la

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (1)$$

where S_e is the saturation level, θ_r and θ_s represent the **residual volumetric water content** and **saturated volumetric water content**, respectively; α is the inverse of the **air-entry pressure**; and n and m are empirical parameters.

Hydraulic conductivity represents the movement of the water through the substrate pores (see scientific principle). We aim finding the water retention curve parameters (α , n , K_s) for the three green roof substrates using the Hydrus 1D modeling software.

3. METHODOLOGY

To determine the hydraulic parameters of the green roof substrates, three substrates commonly used in Chile were selected to perform some drainage experiments (Figure 2). The first substrate contains vegetable residues («Las Brujas»); the second substrate is a mix of leaf mould, perlite and a volcanic mineral («Jardinsen»); and the third substrate contains crushed brick mainly made of clay («Verde activo”).

Each drainage experiment consisted in placing a substrate in a column of 19 cm of diameter and 16 cm of height, as shown in Figure 3. The column was saturated with water from below so that no air remained in the soil pores. Next, the substrate was drained under different pressure heads



Figura 2. Sustratos estudiados. De izquierda a derecha: Jardinsen, Las Brujas y Verde activo.

Figure 2. Substrates analyzed. From left to right: Jardinsen, Las Brujas, and Verde Activo.

Figura 3) y se registró el cambio en el peso de la columna con una balanza electrónica cada 10 s [8]. Las alturas de presión generan un cambio en la velocidad de drenaje del sustrato, la cual se estabiliza dependiendo de las propiedades hidráulicas del mismo. En este caso, para cada altura de presión se esperó lograr la estabilidad del flujo. Las alturas de presión se establecieron a alturas fijas, a través de llaves, para no interferir en el registro de peso de la balanza.

El cambio de peso de la columna en cada experiencia permite determinar la evolución temporal de la humedad promedio de la columna y del flujo acumulado de agua por unidad de área. Esto se hace con el fin de determinar posteriormente los parámetros hidráulicos de los sustratos.

Para encontrar la humedad media de la columna, se utiliza el principio de conservación de masa para cada intervalo de tiempo, según la siguiente ecuación:

$$\theta_{t+1} = \frac{\theta_t V_{total} - (M_t - M_{t+1}) / \rho_{H_2O}}{V_{total}} \quad (2)$$

donde V_{total} es la altura de la columna (ver Figura 3) multiplicada por el área transversal (A); θ es la humedad; M es la masa de la columna; los subíndices t y $t+1$ son los tiempos anterior y actual respectivamente y ρ_{H_2O} es la masa específica del agua.

El flujo acumulado es la cantidad de agua acumulada que drena desde el fondo de la columna expresado como altura de agua. Para obtenerlo, se multiplica el peso por la densidad del agua y se divide por el área transversal de la columna.

(h in Figure 3) and change in weight of the column was registered using an electronic scale every 10 s [8]. This change in weight was used to determine the moisture content of the column (as described below). Pressure heads usually change the substrate draining speed, which gets stable depending on the substrate hydraulic properties. In this case, flow stability was the aim for each pressure head. Pressure heads were established at fixed heights by means of valves, so as to not interfere with the weight reading of the electronic scale.

The change in weight of the column in each experiment helps determine the time evolution of the average moisture of the column and the accumulated water flow by unit area. This is done with the objective of determining the substrate hydraulic parameters. To find the average moisture of the column, the mass conservation principle is used for each time period during the experiment, according to the following equation:

$$\theta_{t+1} = \frac{\theta_t V_{total} - (M_t - M_{t+1}) / \rho_{H_2O}}{V_{total}} \quad (2)$$

where V_{total} is the pressure head (see Figure 3) multiplied by the cross-sectional area (A); θ is the moisture; M is the column mass; sub-indexes t and $t+1$ refer to past and current time, respectively; and ρ_{H_2O} is the specific water mass.

The cumulative flow is the water accumulated that drains from the bottom of the column, expressed as water height. To calculate it, the weight is multiplied by the water density and divided by the cross-sectional area.

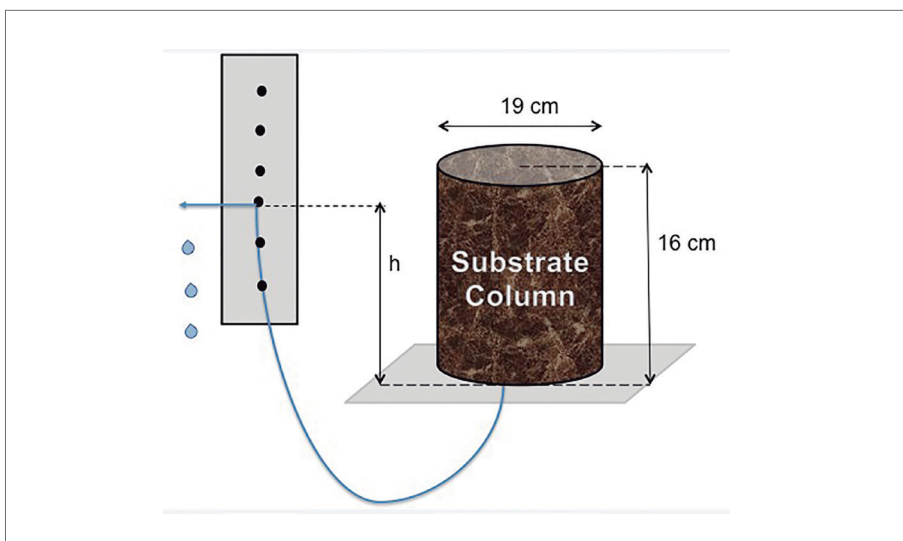


Figura 3. Esquema del experimento de drenaje para la determinación de las propiedades hidráulicas del sustrato. La instalación experimental permite fijar distintas alturas de presión en el fondo de la columna de sustrato.

Figure 3. Diagram of the drainage experiment in order to determine the hydraulic properties of the substrate. The experimental setup makes it possible to fix different pressure heads in the bottom of the substrate column.

Las experiencias de drenaje fueron representadas mediante el modelo computacional Hydrus 1D [9]. El modelo Hydrus 1D permite representar el flujo de agua a través de un sustrato mediante la resolución de la ecuación de Richards [9] (ver principio científico). Los parámetros hidráulicos de cada sustrato se determinaron a través de simulaciones inversas. Una simulación inversa se define como la obtención de parámetros a través de funciones objetivo (en este caso, flujo acumulado y humedad en el tiempo) en las cuales se cambian los parámetros hasta obtener el mejor ajuste entre datos medidos y datos modelados. El modelo necesita condiciones de borde, condiciones iniciales y funciones objetivo. En este caso, para la condición de borde superior el flujo de agua es nulo, mientras que para la condición de borde inferior se ingresan los datos de altura de presión medidos durante las experiencias. La condición inicial corresponde a la altura de presión para cada punto vertical en la columna, es decir, altura de presión nula para la superficie y 16 cm para el fondo. Las funciones objetivo son el flujo acumulado y la humedad media de la columna en el tiempo.

Finalmente, se ingresan los datos mencionados al modelo Hydrus 1D, para obtener valores de α , n y K_s . Estos parámetros se cambian para ajustar el modelo entregado por Hydrus a los datos experimentales.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las simulaciones inversas realizadas con Hydrus 1D permitieron obtener los valores de los parámetros de van Genuchten (Figura 4 y Tabla 1) que ajustan de mejor manera los resultados del modelo a los resultados experimentales.

En la Figura 4 se presentan las curvas obtenidas por el modelo Hydrus 1D luego del ajuste de parámetros (presentados en la Tabla 1). En las Figuras 4a, 4c y 4e se muestra la evolución del contenido de humedad en los distintos sustratos, mientras que en las Figuras 4b, 4d y 4f se presenta el flujo acumulado en el fondo de la columna. Para el caso de Las Brujas, el contenido de humedad modelado se ajusta bien a los resultados experimentales, aunque el modelo sobreestima levemente el contenido de humedad observado. El flujo acumulado simulado también representa correctamente los resultados experimentales, pero a diferencia del contenido de humedad, el modelo subestima levemente los flujos acumulados.

The draining experiences were modeled using the Hydrus 1D software [9]. The Hydrus 1D model represents the water flow through a substrate by solving the Richards equation [9] (see scientific principle). The hydraulic parameters of each substrate were determined by means of inverse modeling. An inverse modeling is defined as a method to obtain parameters through objective functions (in this case, cumulative flow and moisture in time), in which parameters are changed to obtain the best fit between measured and modeled data. The model needs boundary conditions, initial conditions and objective functions. In this case, for the top boundary condition, the water flow was zero, while for the bottom boundary condition, the pressure head data measured during the experiences was used. The initial condition corresponds to the hydrostatic pressure head within the column, that is, null pressure head at the surface and 16 cm at the bottom. Objective functions are the differences between measured and modeled cumulative flow and the average moisture of the column in time.

Finally, the data mentioned were entered into the Hydrus 1D model to obtain the parameters α , n and K_s . These parameters are varied to fit the Hydrus model results to the experimental data.

4. RESULTS AND DISCUSSION

The inverse modeling done with Hydrus 1D resulted in the van Genuchten parameter values (Figure 4 and Table 1) that adjust better the results of the model to those of the experiments.

In Figure 4, the curves obtained using the Hydrus 1D model are shown after the parameter adjustment (presented in Table 1). In Figures 4a, 4c and 4e, the moisture content evolution of the different substrates is shown, while in Figures 4b, 4d and 4f, the cumulative flow at the bottom of the column can be observed. In the case of Las Brujas, the modeled moisture content fits well the experiment results, although the model slightly overestimates the observed moisture. The modeled cumulative flow also represents the experiment results correctly, but contrary to the moisture content, the model slightly underestimates the cumulative flows.

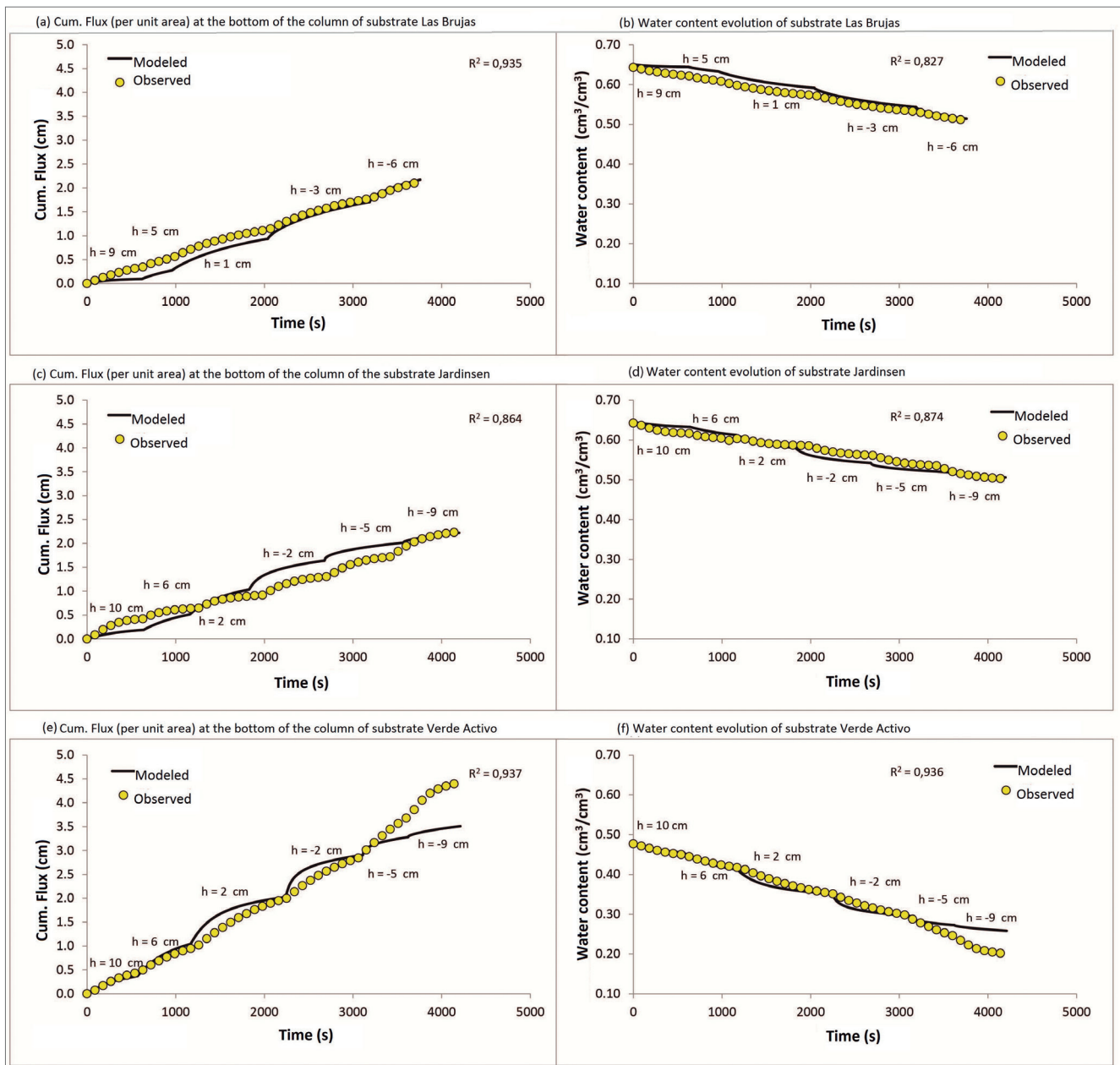


Figura 4. Ajuste de curvas de contenido de humedad y de flujo acumulado para los sustratos estudiados.

Figure 4. Adjustment of the moisture content and accumulated flow curves for the substrate analyzed.

Para Jardinsen, la Figura 4 muestra las curvas obtenidas luego del ajuste de parámetros de la simulación en Hydrus 1D. Se observa que el modelo sobreestima el contenido de humedad del sustrato al comienzo de la experiencia, mientras que lo subestima entre los 2000 y 4000 s. De la curva de flujo acumulado se puede observar que el modelo sobreestima la cantidad de agua que el suelo entrega en el tiempo entre los 2.000 y 3.500 s.

En el caso de Verde Activo la curva del contenido de humedad del modelo se ajusta bien a los datos experimentales hasta los 3.500 s, tiempo en que el modelo comienza a sobreestimar

For Jardinsen, Figure 4 shows the curves obtained after adjusting the modeling parameters in Hydrus 1D. It can be seen that the simulation overestimates the substrate moisture content at the beginning of the experiment, while it underestimates it between the 2000 and 4000 s. The cumulative flow reveals that the model underestimates the water quantity of the soil between 2000 and 3500 s.

In the case of Verde Activo, the moisture content curve of the model fits well the experiment data until 3500 s, time in which the model starts to overestimate the moisture observed. In the case of the cumulative flow curve, it can

Table 1. To the left, parameters found in the modelings made with Hydrus 1D. To the right, results of a previous research [10].

Substrate	Defined parameters			Parameters of [10]		
	n	α	K_s	N	α	K_s
	(-)	(cm^{-1})	(cm s^{-1})	(-)	(cm^{-1})	(cm s^{-1})
Las Brujas	3.10	0.1	1.2×10^{-3}	2.72	0.19	3.0×10^{-3}
Jardinsen	1.20	2.0	3.0×10^{-3}	1.01	0.06	8.0×10^{-3}
Verde Activo	1.57	2.3	6.7×10^{-3}	2.11	4.97	1.3×10^{-3}

el contenido de humedad observado. En el caso de la curva de flujo acumulado se observa que también al final del experimento (3.000 s) el modelo difiere de los datos experimentales. Es importante destacar que, si se comparan las curvas de contenido de humedad de los tres sustratos, el sustrato Verde Activo es el que presenta, en promedio, una pendiente mayor, lo que implica que es capaz de liberar una mayor cantidad de agua en poco tiempo.

En términos de resultados numéricos obtenidos a partir de las simulaciones, estos se asimilan a los encontrados en la literatura [10], lo que indica que tienen coherencia y que las modelaciones inversas realizadas se hicieron de forma correcta. En particular se comparan los resultados con otras investigaciones (datos a la derecha de la Tabla 1). Si bien los valores de los parámetros difieren, se observan similitudes principalmente en el sustrato Las Brujas y en el parámetro n en general. No ocurre así para la conductividad hidráulica, donde las diferencias pueden llegar a ser más del doble del valor reportado en la literatura [10]. Sin embargo, todas estas diferencias se encuentran dentro de un mismo orden de magnitud, por lo que son relativamente pequeñas. Estas diferencias pueden deberse a la composición específica de cada sustrato, la compactación del sustrato, o a la cantidad de aire retenida en el sustrato, lo que determina su porosidad, entre otros factores.

5. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se observa que tanto las propiedades hidráulicas de los sustratos como las curvas de retención de humedad obtenidas son diferentes, por lo que los beneficios que entregará cada sustrato al funcionamiento de las cubiertas vegetales también lo son. Las propiedades de cada sustrato dependen de su composición específica y de sus propiedades físicas tales como su compactación y porosidad. Es importante entonces definir el objetivo que se le dará al techo verde en cuestión para así definir el sustrato adecuado para su construcción. Por ejemplo, si se desea regular la escorrentía sobre el pavimento en ciudades, se buscará un sustrato que sea capaz de retener más agua. Así, el sustrato óptimo corresponde a Jardinsen, ya que es el sustrato que tarda más en liberar una determinada cantidad de agua.

also be seen that, at the end of the experiment (3000 s), the model differs from the experimental data. It is important to highlight that, when comparing the moisture content curves of the three substrates, the Verde Activo substrate is the one that presents, in average, a higher slope, which means that it is able to release a higher quantity of water in a short time.

Regarding the numerical results from the modelings, these are similar to those found in the bibliography [10], which means that they are coherent and that the inverse modelings were done correctly. Particularly, results can be compared to data from other papers (data in the right side of Table 1). Although parameter values differ, some similarities can be observed, mainly in the Las Brujas substrate and in the parameter n in general. The same does not occur in the case of the hydraulic conductivity, where differences can double the values reported in the literature [10]. However, all these differences are within the same order of magnitude. These differences may be due to the specific composition of each substrate, the substrate compression, or the quantity of water retained in the substrate, which, along with other factors, determine its porosity.

5. CONCLUSIONS

The results obtained reveal that the hydraulic properties of the substrates, as well as the water retention curves, are different, so the benefits of each substrate in relation to green roofs are also different. The properties of each substrate depend on their specific composition and physical properties, such as compression and porosity. Therefore, it is important to define the objective of the green roof to determine the right substrate to use in the construction. For example, if urban pavement runoff regulation is the aim, a substrate that can retain water must be selected. Thus, the best substrate is Jardinsen, because it is the one that takes longer to release a certain quantity of water.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al proyecto INNOVA-CORFO 12IDL2-13630: “Soluciones integrales de cubiertas vegetales sustentables para edificios comerciales-industriales en climas semiáridos de Chile”, por la posibilidad de colaborar en su proyecto y por facilitar el sustrato analizado, y al Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS - CONICYT/FONDAP/15110020) por apoyo de laboratorio.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank INNOVA-CORFO 12IDL2-13630: “Soluciones integrales de cubiertas vegetales sustentables para edificios comerciales-industriales en climas semiáridos de Chile” Project for the possibility of collaborating with their project and for making the analyzed substrates available, as well as the Center of Sustainable Urban Development (CEDEUS - CONICYT/FONDAP/15110020) for their support in the lab.

GLOSARIO

Altura de presión: Energía por unidad de área a la cual se encuentra el agua en los poros (espacios vacíos) del suelo. Es una representación de la presión existente en ese punto [11].

Contenido de humedad: Fracción de agua contenida en el volumen total que ocupa un suelo. Se puede expresar como porcentaje en peso o volumen [11].

Cubierta vegetal: Tipo de techumbre que está parcial o totalmente cubierta por vegetación. Se compone de un sustrato artificial y otras capas que dependen del objetivo tecnológico de la cubierta (Figura 1). Se diseñan principalmente para minimizar los impactos de la urbanización.

Densidad aparente: Relación entre la masa de suelo y el volumen del recipiente que lo contiene [11].

Granulometría: Caracterización de un suelo según la forma y tamaño de los granos que lo conforman [11].

Humedad residual: Mínima fracción de agua que puede contener el volumen que ocupa un suelo [11].

Humedad saturada: Máxima fracción de agua que puede contener el volumen que ocupa un suelo [11].

Presión de burbujeo: Succión a la cual el aire puede comenzar a entrar a los espacios vacíos cuando el medio poroso deja de estar saturado [11].

Porosidad: Corresponde a la relación entre el volumen que ocupan los espacios vacíos (sin partículas) y el volumen total de suelo [11].

Succión: Energía por unidad de área a la cual se encuentra el agua en los poros del suelo cuando esta es negativa [11].

Sustrato: Medio artificial de crecimiento y vida de plantas o animales [11].

GLOSSARY

Pressure head: Energy per unit area by which water is held in the pores (empty spaces) of the soil. It is a representation of the pressure in this point [11].

Moisture content: fraction of water contained in the total volume of a soil. It can be expressed as weight or volume percentage [11].

Green roofs: Type of roof that is partially or completely covered by vegetation. It is composed of artificial substrate and other layers that depend on the technological objective of the roof (Figure 1). They are mainly designed to minimize the impacts of urbanization.

Bulk density: Relation between the soil mass and the volume of the recipient in which it is contained [11].

Grain size distribution: Characterization of the soil according to the form and size of its grains [11].

Residual volumetric water content: Lowest fraction of water that can be contained in the volume of a soil [11].

Saturated volumetric water content: Highest fraction of water that can be contained in the volume of a soil [11].

Air-entry pressure: Suction to which air can begin to enter into the empty spaces when the porous soil is no longer saturated [11].

Porosity: Corresponds to the relation between the volume of the empty spaces (without particles) and the total soil volume [11].

Suction: Energy per unit area at which water enters into the soil pores when it is negative [11].

Substrate: Artificial medium for growing and keeping plants and animals [11].

PRINCIPIO CIENTÍFICO

Flujo de agua en medios porosos:

El flujo de agua a través de un sustrato se rige por la Ecuación de Richards, que es la combinación de la ecuación de continuidad con la Ley de Darcy [9, 11]:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right]$$

donde $K(h)$ es la conductividad hidráulica del agua a una presión h ; z es la coordenada espacial vertical; t es tiempo, y $C(h)$ es la capacidad capilar, definida como:

$$C(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h}$$

donde θ es el contenido de humedad volumétrico del suelo. Para determinar la capacidad capilar, es necesario conocer la curva de succión (ecuación 1).

Para poder resolver la ecuación de Richards se necesita conocer la curva de succión y la conductividad hidráulica del sustrato. Esta última fue estimada con el modelo de van Genuchten-Mualem [7]:

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2$$

donde l es el parámetro de conexión entre poros.

SCIENTIFIC PRINCIPLE

Water flow in porous media:

The water flow through a substrate is governed by the Richards Equation, which combines the continuity equation with Darcy's Law [9, 11]:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right]$$

where $K(h)$ is the hydraulic conductivity of the water to h pressure; z is the vertical spatial coordinate; t is time, and $C(h)$ is the specific moisture capacity, defined as:

$$C(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h}$$

where θ is the land's volumetric moisture content. To determine the specific moisture, the suction curve must be known (Equation 1).

To solve the Richards Equation, the substrate suction curve and hydraulic conductivity must be known. The hydraulic conductivity was estimated using the van Genuchten-Mualem model [7]:

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2$$

where l is the pore-connectivity parameter [7].

REFERENCES

- [1] SAADATIAN, O., et al. "A review of energy aspects of green roofs". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 23, p. 155-168.
- [2] CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. *An Introduction to Environmental Biophysics*. New York: Springer, 1998, p. 1-144.
- [3] FANG, C. "Evaluating the thermal reduction effect of plant layers on rooftops". *Energy and Buildings*, 2008, vol. 40, no 6, p. 1048-1052.
- [4] POMPEII, W. C.; HAWKINS, T. W. "Assessing the impact of green roofs on urban heat island mitigation: a hardware scale modeling approach". *The Geographical Bulletin*, 2011, vol. 52, no. 1, p. 52-61.
- [5] SAILOR, D. J.; HAGOS, M. "An updated and expanded set of thermal property data for green roof growing media". *Energy and Buildings*, 2011, vol. 43, no. 9, p. 2298-2303.
- [6] SUÁREZ, F. "Estudio experimental del movimiento de simazina en columnas de suelo". MA Thesis, Pontificia Universidad

Católica de Chile, Santiago, 2006.

[7] Van Genuchten, M.Th. "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils". Soil Science Society of America Journal, 1980, vol. 44, no. 5, 892-898.

[8] Cientec, Sartorius Midrics MW1PU1-60ED-L industrial scale, Instrumentos científicos S.A. Área Laboratorio / Balanza para laboratorio, 2014, p. 1-87.

[9] ŠIMUNEK, J., et al. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. University of California Riverside, California, 2013, p.1-46.

[10] Sandoval, V.P., et al. "Impact of the properties of a green roof substrate on its hydraulic and thermal behavior". 6th International Building Physics Conference. Torino, Italy, June 14-17, 2015.

[11] JURY, W. A.; HORTON, R. Soil physics. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2004, p. 5-199.

EQUIPO DE INVESTIGADORES / RESEARCH TEAM



Nicole Bin

Victoria
Sandoval

Francisco
Suárez

Felipe
Victorero

Carlos
Bonilla

Jorge
Gironás

Sergio
Vera

Waldo
Bustamante

Vicky Rojas

Pablo
Pastén