

MODELO HIDROLÓGICO A ESCALA RESIDENCIAL

Para el análisis de sistemas de
drenaje urbano sostenible IHMORS



CEDEUS

Centro de Desarrollo
Urbano Sustentable

**SÍNTESIS DE
INVESTIGACIÓN**

Diciembre 2019
Nº03

MODELO HIDROLÓGICO A ESCALA RESIDENCIAL

Para el análisis de sistemas
de drenaje urbano sostenible
IHMORS

© Centro de Desarrollo
Urbano Sustentable
CEDEUS

Autores

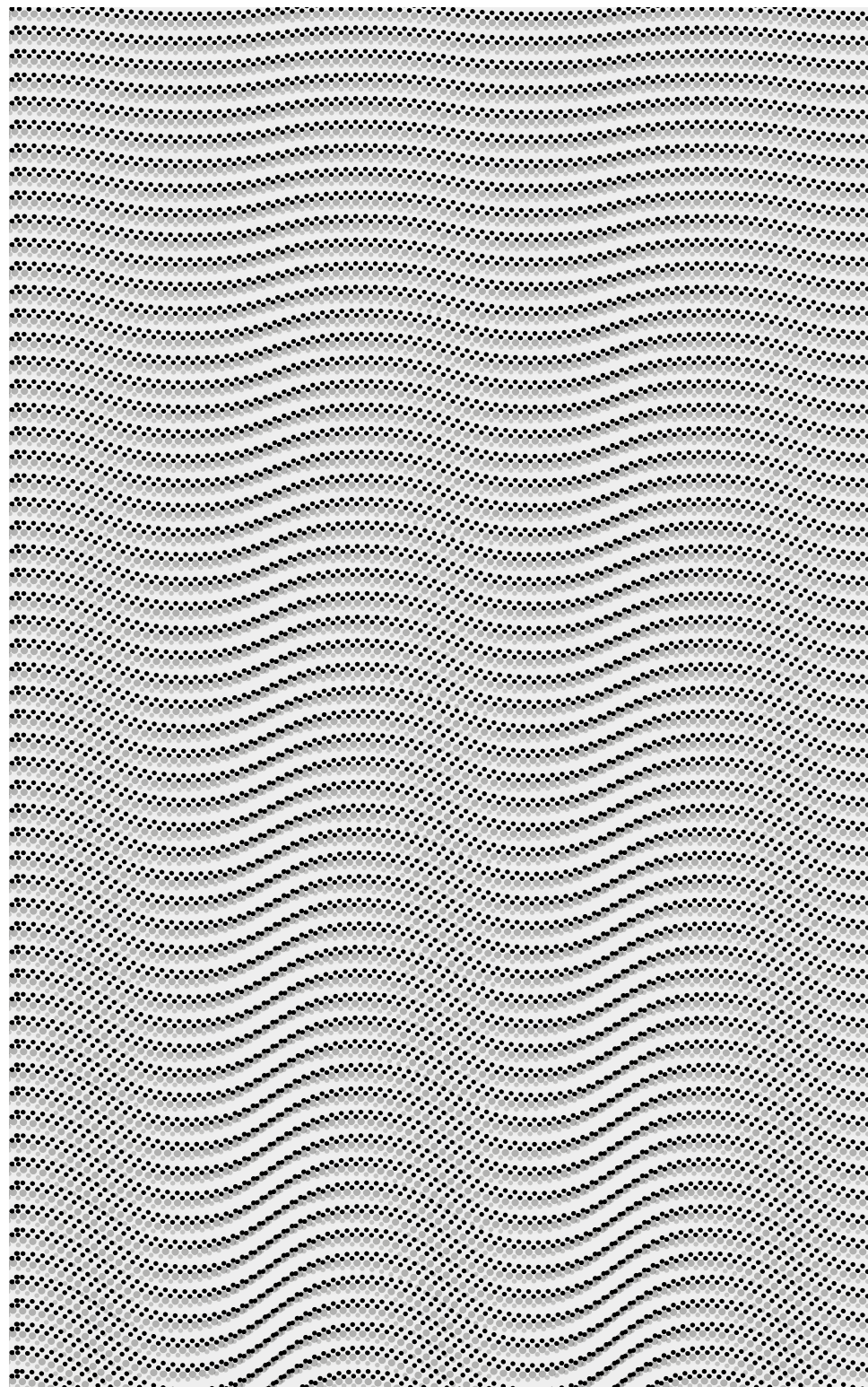
Jorge Gironás
Javier Rivera

Cómo citar este documento:

(2020). *Inventario de materiales de construcción en Chile: Metodología y resultados*. Síntesis de Investigación N°03. Centro de Desarrollo Urbano Sustentable, Santiago. <https://doi.org/10.7764/cedeus.si.03>



Atribución-NoComercial 4.0
Internacional (CC BY-NC 4.0)
Primera edición corregido
Diciembre 2019 / N°03



- La impermeabilización de zonas naturales altera el régimen hidrológico con una disminución de la infiltración y evapotranspiración, y un aumento de la escorrentía superficial. Esto origina episodios de anegamiento, colapsos de sistemas combinados de aguas lluvia y alcantarillado, y el lavado de contaminantes durante eventos de lluvia.

- Para el control local de la escorrentía se usan sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS), basados en infraestructura verde. La aplicación de esta técnica en regiones semiáridas y mediterráneas de Chile requiere tener en cuenta aspectos de mantenimiento de las áreas verdes involucradas.

- IMHORS es un modelo hidrológico desarrollado en CEDEUS que sirve para modelar el desempeño de los sistemas de drenaje urbano sostenibles SUDS a escala residencial, junto con la mantención e irrigación de las áreas verdes involucradas.

- IHMORS identifica diferencias en el rendimiento de una infraestructura verde a partir de diferentes condiciones bioclimáticas, y proporciona información relevante para gestionar el riego de la vegetación.

- Se ha aplicado IHMORS con buenos resultados en techos verdes, jardines y plazas de distintos sitios en Chile.



El desarrollo urbano genera la impermeabilización de superficies naturales y la compactación del suelo. Este fenómeno reduce la infiltración de agua y la evapotranspiración (ET) y provoca el aumento de la escorrentía superficial, que no solo puede implicar inundaciones en la ciudad, sino también continuos colapsos de los sistemas combinados de aguas servidas y aguas lluvias, así como arrastre de contaminantes urbanos, y el deterioro de cauces y ecosistemas aguas abajo. Para reducir estos efectos a escala local, se ha propuesto el uso de distintas técnicas conocidas como sistemas urbanos de drenaje sostenibles (SUDS), las que típicamente consideran la denominada Infraestructura Verde (IV). Estas técnicas preservan el ciclo hidrológico mediante la réplica de los procesos naturales de captura, retención, infiltración y evapotranspiración de las aguas lluvias (Figura 1), lo que permite controlar la cantidad y calidad de escorrentía durante los eventos de lluvia.

El uso de estas técnicas en regiones semiáridas y mediterráneas como las del centro de Chile, requiere considerar las necesidades de riego de la vegetación, las cuales pueden ser parcialmente satisfechas utilizando la misma agua lluvia controlada por estas instalaciones.

Las herramientas más adecuadas para el análisis del desempeño y diseño de los SUDS son los modelos hidrológicos. Estos modelos permiten simular el comportamiento de estas técnicas previo a su construcción, o incluso una vez ya implementadas, dado que el monitoreo en terreno es demandante y costoso. Por otra parte, estos modelos permiten evaluar diferentes escenarios climáticos y de uso de suelo, lo que facilita la estimación de la reducción de la escorrentía como el uso del agua para riego bajo diversas condiciones posibles.

Actualmente, existen muy pocos modelos que simulan el desempeño de los SUDS, tanto desde la perspectiva del control de aguas lluvias como de las necesidades de riego. La gran mayoría han sido desarrollados en climas húmedos y sólo se preocupan del primer aspecto, de modo que su aplicabilidad en ambientes semiáridos y mediterráneos es restringida. Por otra parte, los modelos que si consideran las necesidades de riego no evalúan el porcentaje del tiempo en el cual la humedad del suelo alcanza niveles críticos para la supervivencia de la vegetación.

Por tanto, existe la necesidad de usar modelos para simular procesos hidrológicos en áreas residenciales, capaces tanto de estimar el desempeño desde el punto de vista del drenaje urbano, como de considerar las necesidades de riego acopladas con la dinámica de la humedad en el suelo. Estos aspectos son fundamentales para estudiar el desempeño de la infraestructura verde en regiones semiáridas, pues se facilita el análisis de la sostenibilidad y el uso de las distintas técnicas de drenaje sustentable.

Considerando esta necesidad, CEDEUS elaboró el modelo IHMORS (Integrated Hydrological Model at Residential Scale) para evaluar de una manera continua los procesos de lluvia-escorrentía y el control de las aguas lluvias a escala residencial, junto con la irrigación de las áreas verdes y la vegetación. Este documento describe las principales características de este modelo, así como tres casos de aplicaciones en las que ha sido utilizado.

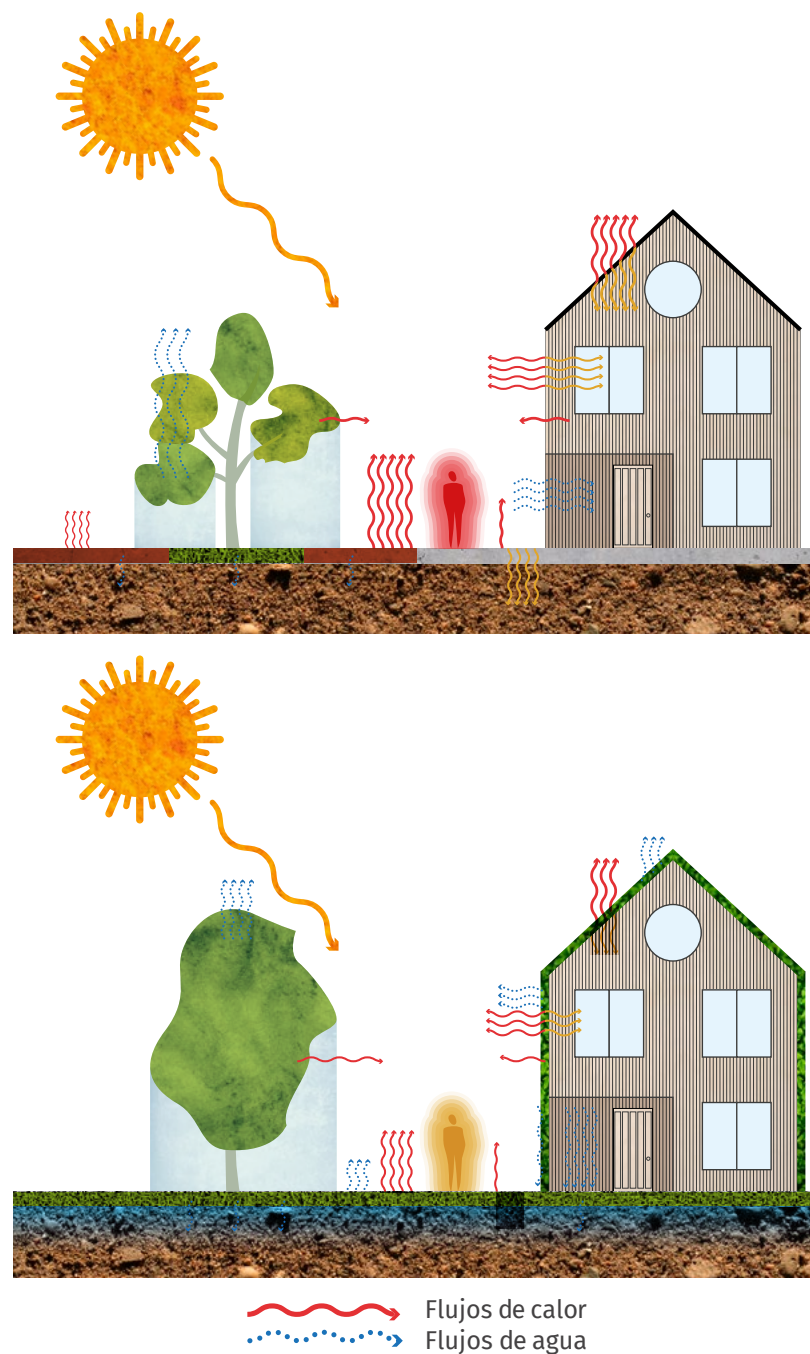


Figura 1. Comparación a escala residencial entre situación sin infraestructura verde (a) y con infraestructura incluida (b). En la situación (a) los flujos de calor y de agua afectan la escorrentía y el confort de los habitantes en mayor magnitud que en (b). Fuente: Elaboración propia.

CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONAMIENTO DE IHMORS

IHMORS es un modelo continuo que utiliza ecuaciones físicas para simular los distintos procesos involucrados en el comportamiento hidrológico de áreas residenciales. **El programa es capaz de simular técnicas de drenaje sustentable como jardines infiltrantes, techos verdes, desconexión de áreas impermeables, áreas de retención superficiales y zanjas de infiltración.** Las áreas residenciales y técnicas de drenaje se modelan combinando y conectando diferentes subáreas con distintas propiedades físicas representativas de su geometría, tipo y uso de suelo y vegetación, entre otros.

La Figura 2 muestra todos los procesos hidrológicos que el modelo puede simular para cada intervalo de tiempo escogido por el usuario. El agua entra a una subárea a través de precipitación, escorrentía proveniente de otras subáreas, e irrigación. Parte de esta agua puede ser interceptada por vegetación o retención superficial, y otra parte llega a la superficie, desde donde puede infiltrar a la subsuperficie, o puede escurrir hacia la calle, la red de colectores, u otra subárea según sea la configuración espacial diseñada. El agua puede ser evapotranspirada desde el suelo, o moverse dentro de éste por percolación y redistribución. Finalmente, el agua que atraviesa la capa más profunda de suelo puede dirigirse al sistema de drenaje urbano.

La **evapotranspiración** es calculada utilizando la ecuación de Penman-Monteith (Allen et al. 1998) y coeficientes de cultivo que pueden variar en el tiempo. Por otra parte, la evaporación de suelo desnudo considera una primera etapa, donde la superficie del suelo permanece húmeda y la tasa de evaporación es máxima y dependiente sólo de la energía disponible (Allen et al., 1998). En una segunda etapa la tasa de evaporación decrece y la cantidad a evaporar depende del agua disponible en la superficie. Por otra parte, la intercepción considera tanto la captura de la precipitación e irrigación en la vegetación, así como el almacenamiento superficial. El proceso es simulado por medio de la ecuación modificada de Merriam (1960), mientras que el agua retenida es evaporada hacia la atmósfera.

La **tasa de infiltración** es obtenida con la ecuación de Green y Ampt (1911), considerando la altura de presión de succión variable y dependiente del contenido de humedad (Corradini et al. 1997), calculada según Van Genuchten (1980). Por otra parte, la percolación por gravedad entre las capas de suelo se simula con la ecuación de Savabi y Williams (1995), mientras que su redistribución entre las capas de suelo por acción de la capilaridad se simula con una versión simplificada de la ecuación de Richards que utiliza la componente vertical de la ley Darcy y un factor de retardo (Corradini et al. 2000; Guo y Luu, 2015).

Finalmente, el **riego** se puede ingresar como una serie de tiempo con magnitudes y frecuencias variables. Sin embargo, el modelo también permite limitar las magnitudes en caso que se exceda la capacidad de campo del suelo, o utilizar un plan diario correspondiente a un cierto porcentaje de la evapotranspiración de referencia de las 24 horas anteriores. Alternativamente, puede calcular las necesidades de riego para que la humedad de suelo en la capa superior siempre supere un cierto valor deseable definido por el usuario.

Con objeto de validar los componentes críticos de IHMORS se realizaron distintos experimentos de laboratorio. Para evaluar y calibrar los parámetros de evaporación, se dejaron secar bajo condición ambiente cinco muestras de distintos sustratos típicamente usados en infraestructura verde. Cada muestra fue pesada diariamente para medir el agua perdida por evaporación. Por otra parte, la capacidad del modelo para simular el flujo subsuperficial y el correspondiente hidrograma de respuesta se validó mediante mediciones experimentales de humedad de suelo y caudales generados por muestras de suelo sometidas a distintas precipitaciones. Finalmente, la simulación de la redistribución de agua entre las capas del suelo se validó utilizando HYDRUS-1D, un modelo para simular flujos de agua en medios porosos (Simunek et al., 2013).



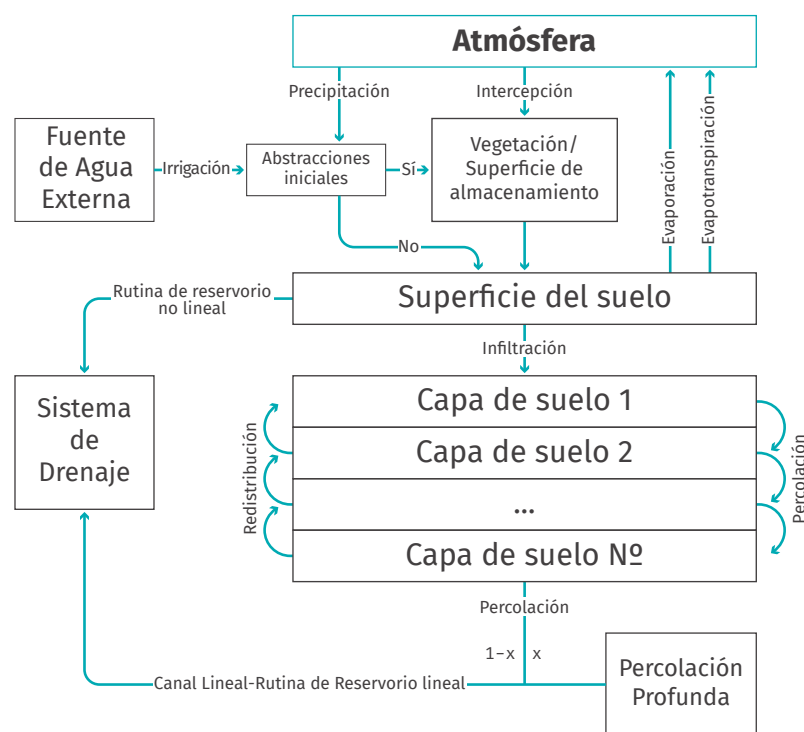


Figura 2. Modelo conceptual en donde se representan los procesos hidrológicos a escala residencial para una subárea permeable. Fuente: Elaboración propia.

ALGUNAS APLICACIONES DE IHMORS

El modelo IHMORS ha sido aplicado a diversos casos de estudio, incluyendo el análisis de jardines infiltrantes en distintas localidades, un análisis de las necesidades de riego de áreas verdes en Santiago, y el modelamiento del desempeño hídrico de techos verdes en la capital.

Una primera aplicación (Herrera et al., 2017) considera la simulación de dos jardines infiltrantes, ubicados uno en Santiago y otro en Temuco, ciudades escogidas por sus condiciones climáticas distintas dentro del espectro mediterráneo, la primera con un clima templado y cálido, y la segunda con uno templado y lluvioso. El desempeño de estos jardines se simuló en forma continua usando el clima horario de los años 2012 y 2013. Los jardines de área 2m² y pendiente del 0,1%, reciben la contribución de un área impermeable de 10m². Ambos jardines tienen el mismo sustrato, con una capa superior de suelo de 0,2 m de profundidad (zona de raíz) y una segunda

de 0,4m. El almacenamiento superficial definido para el jardín en Temuco resultó mayor que el de Santiago (0,6m vs 0,5m) debido a la mayor precipitación. Por último, se consideraron distintos tipos de vegetación (Sedum y pasto), así como un caso con suelo desnudo.

La Figura 3 muestra la simulación del contenido de agua del suelo para Santiago y Temuco. Para ambas ciudades, el contenido de agua aumenta con los eventos de precipitación y disminuye rápidamente luego de finalizada. La amplitud de la variación en la humedad de la capa superficial de suelo fue mayor que en la capa más profunda, debido a que esta última no se encuentra tan afectada a los procesos superficiales.

Por otra parte, la Figura 4 compara el comportamiento de la humedad del suelo para distintos tipos de vegetación. El sedum en Santiago resulta ser mejor que el pasto ya que mantiene mayor contenido de humedad en el suelo (Figura 4a). En Temuco (Figura 4b) la diferencia en

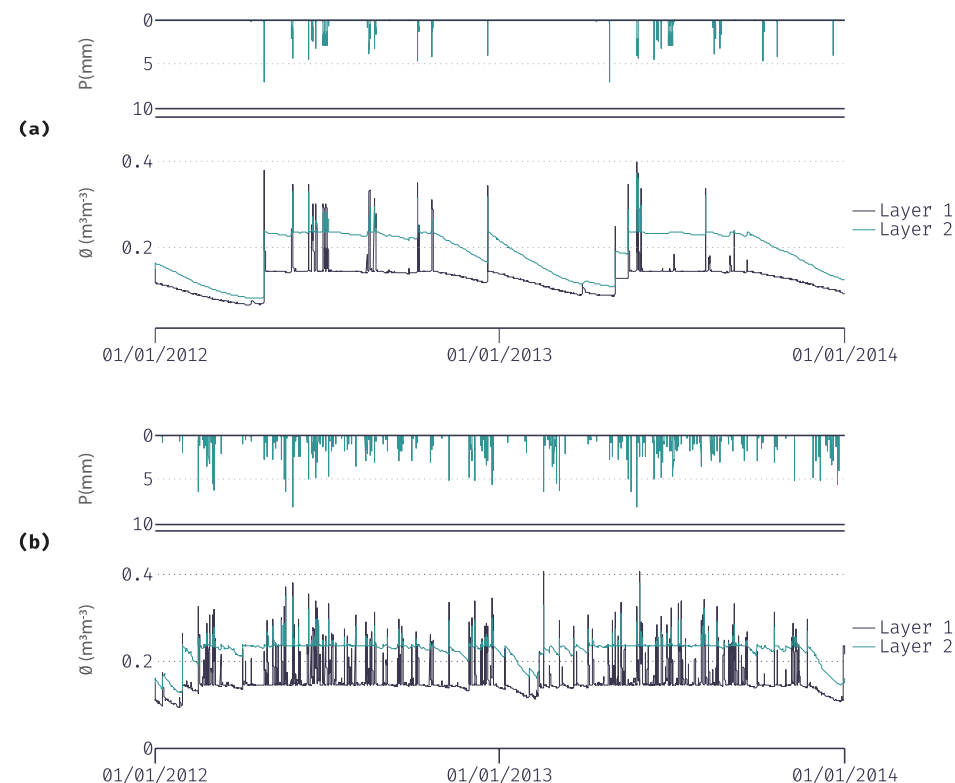


Figura 3. Precipitación y evolución temporal del contenido de agua del suelo mediante simulación continua durante 2012 y 2013 para Santiago (a) y Temuco (b). Fuente: Elaboración propia.

el contenido de humedad del suelo para los dos tipos de vegetación tiende a ser pequeña. Ahora bien, si en Temuco no se registraran precipitaciones en verano, el contenido de humedad del suelo tendría un comportamiento similar al de Santiago. Esto implica alcanzar el contenido de humedad del punto de marchitez permanente, por lo que se debe hacer uso de riego.

Para analizar en detalle el desempeño del riego en Santiago, se definieron tres planes de riego. El primer plan 1 (P1) considera volúmenes mensuales variables aplicados entre 1 y 3 veces al día según la estación. El promedio diario de P1 es de 8,6mm. El segundo plan (P2) considera la aplicación diaria constante de este volumen promedio a las 8:00am sólo cuando la humedad del suelo estuviese por debajo de la capacidad de campo.

Finalmente, el tercer plan (P3) es de riego variable, aplicándose a las 8:00 am un volumen igual a la evapotranspiración de referencia de las 24 horas anteriores.

Las curvas de duración de humedad para cada plan se muestran en la Figura 5. Los tres permiten mantener el contenido de humedad cercano al punto de marchitez permanente (Figura 5a). El P2 requiere un 1% menos de agua que P1 y reduce en 7 el número de días a regar durante 2 años. Por otra parte, P3 gasta un 83,97% menos de agua que P1 pero genera un 10% de probabilidad de que la planta se marchite. En conclusión, el más eficiente es el P3, el cual está basado en el comportamiento observado in-situ del clima diario. Sin embargo, aún es necesario intensificar la irrigación en los días en que la humedad del suelo esté bajo el punto de marchitez permanente.

Finalmente, se evaluó la reducción en las necesidades de riego producto de la capacidad de infiltrar no sólo el agua caída sobre el jardín, sino también la que escurre desde el área impermeable contribuyente. La Figura 5b muestra como la curva de duración de humedad del jardín infiltrante desconectado queda por debajo de

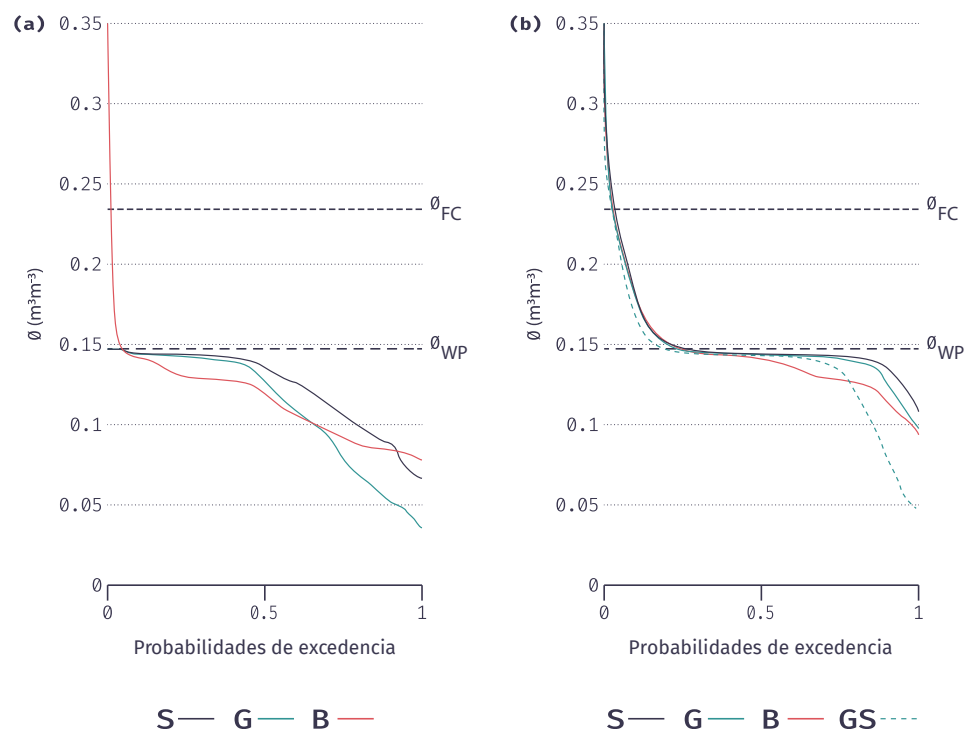


Figura 4. Curva duración de contenido de humedad comparando jardines con Sedum (S), pasto (G) y sin vegetación (B) para Santiago (a) y Temuco (b). En el caso de Temuco también se considera el jardín con pasto, pero sin precipitaciones durante el verano (GS). Fuente: Elaboración propia.

la curva del jardín conectado con el área impermeable contribuyente, lo que implica una menor necesidad de riego del jardín infiltrante gracias al volumen de agua infiltrado.

IHMORS también se utilizó en la estimación de las necesidades de agua para el riego de espacios verdes y jardines residenciales en el área metropolitana de Santiago y se comparó con consumos reales estimados a partir de los registrados en medidores de agua, y mediante entrevistas con 24 administradores de 110 parques grandes y 1.882 parques pequeños. Como implementación representativa, en IHMORS se utilizó $1m^2$ de pasto con una pendiente del 1% y 1.2m de suelo franco arenoso típico del área de estudio. Para el cálculo de las necesidades de agua se simuló el comportamiento de esta superficie durante un año de precipitaciones normales, y se calculó la cantidad de agua necesaria para que la humedad del suelo del área verde igualara su capacidad de campo. Los resultados mostraron que el uso actual del agua para riego es mucho mayor que las necesidades hídricas propias del pasto en el clima de

Santiago, lo que abre una oportunidad para el ahorro de agua (Reyes- Paecke et al., 2019).

Por último, el modelo ha sido utilizado en el análisis de distintas configuraciones de techo verde en Santiago. Para ello, se realizó un experimento de largo plazo durante el período 2014-2015 en el Laboratorio de Infraestructura Verde de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Esta instalación permite probar diferentes especímenes de techos verdes con distintas pendientes, profundidades de sustratos y capas drenantes. Para cada uno de los 10 especímenes (más dos réplicas de uno de ellos) se midió cada 5 minutos la humedad del sustrato, así como todas las variables meteorológicas en una estación in-situ: temperatura y humedad relativa del aire, velocidad y dirección del viento, precipitación y la radiación. IHMORS simuló con éxito la dinámica de la humedad del sustrato de los especímenes, particularmente de aquellos con 10cm de profundidad sin capa de drenaje.

En concreto, IHMORS estimó el coeficiente de escorrentía total (C_{total}), a partir de la percolación y la precipitación

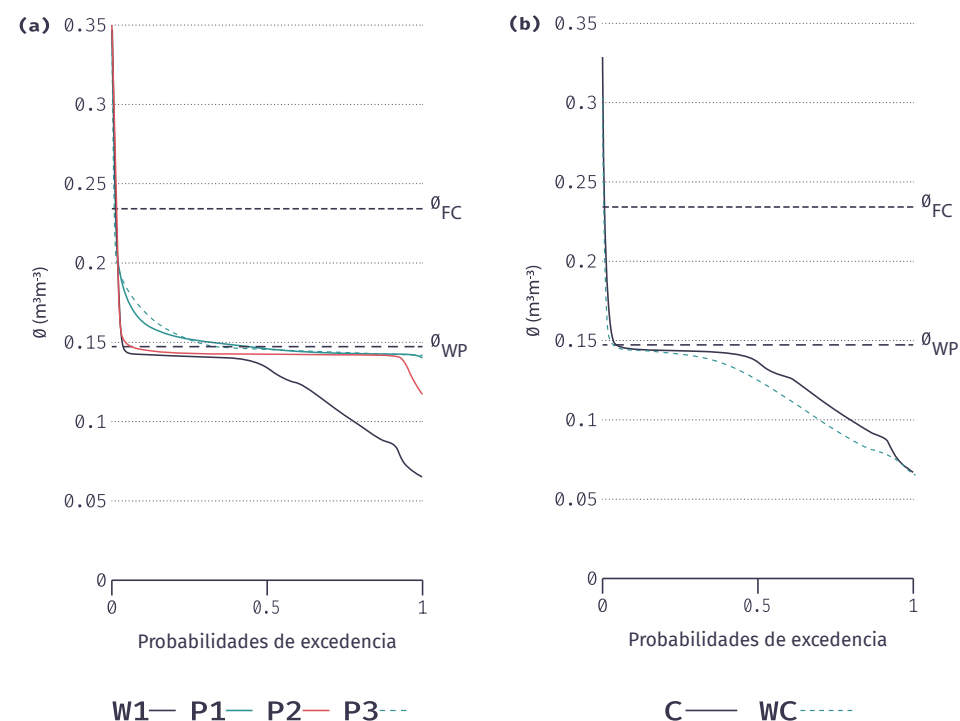


Figura 5. Curva duración contenido de humedad para (a) Santiago para los planes de riego P1, P2 y P3 y sin riego (W1), (b) Jardín en Santiago con Sedum conectado (C) y desconectado (WC) del área impermeable. Fuente: Elaboración propia

para todos los eventos estudiados. Se encontró que el Ctotal para los especímenes de 20cm de profundidad fueron 0,18 y 0,19, valores menores que los especímenes de 5 ó 10cm de profundidad (0,58 y 0,57, respectivamente), por lo que los de 20cm retienen más agua en su sustrato. Estas estimaciones fueron menos precisas para los especímenes de 5 y 20cm. Los errores más grandes obtenidos corresponden a especímenes con mayor desarrollo de vegetación, por lo que sugieren la necesidad de una mejor comprensión de los efectos de los cambios de vegetación en el sustrato, y la definición de estrategias de modelado para representar dichos cambios. El modelo muestra además que la humedad de los sustratos de 5cm de profundidad sin capa de drenaje puede llegar a caer bajo el punto de marchitez durante aproximadamente 10% del periodo de estudio, tiempo en el cual se hace necesario considerar irrigación adicional.

RESUMEN

IHMORS es un modelo hidrológico para ambientes urbanos de acceso gratuito para la comunidad, desarrollado en MATLAB con una interfaz Excel para el ingreso de datos.

El modelo es de gran aplicabilidad en regiones semiáridas y mediterráneas como Chile central, donde es vital conocer las necesidades de riego de la vegetación en los sistemas de drenaje urbano sostenibles.

Permite estimar las necesidades de riego de infraestructuras verdes, y facilita la toma de decisiones en lo referido a volúmenes de riego y la definición de los tiempos involucrados.

En sus aplicaciones en Chile se encontraron grandes diferencias en la operación de infraestructura vegetal al utilizar distintas especies de vegetación y planes de riego.

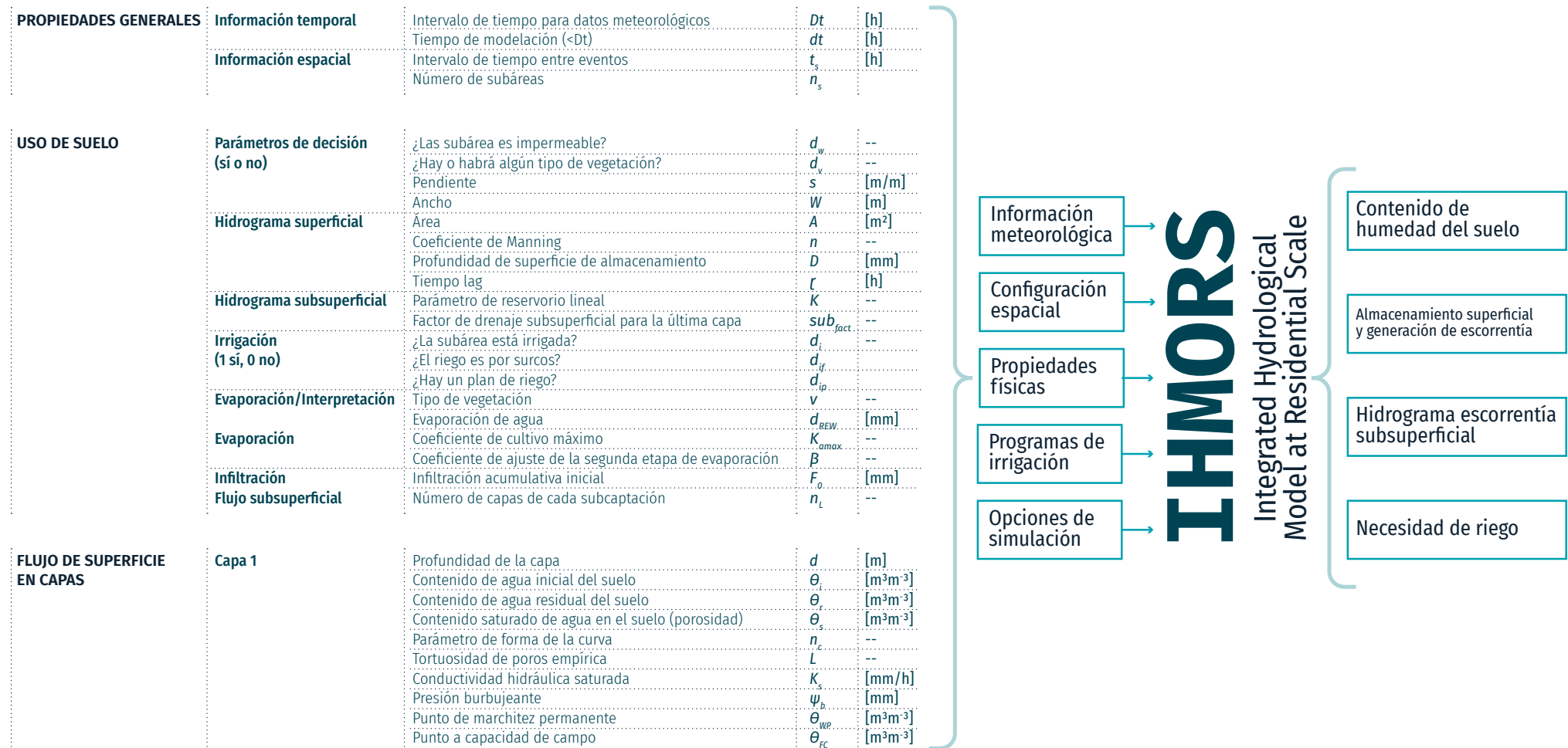


Figura 6. Esquema de información de entrada y de salida del modelo IHMORS. Fuente: Elaboración propia.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo es posible descargarlo de forma gratuita en el sitio del investigador Jorge Gironás (<http://jorge-gironas.weebly.com/software.html>), o en la web de CEDEUS (<https://www.cedeus.cl/modelo-para-representar-procesos-hidrologicos-y-el-riego-a-escala-residencial-en-regiones-semiaridas-y-mediterraneas/>).

Los datos de entrada del modelo son (1) información meteorológica, (2) información respecto a intervalos y tiempos de simulación, (3) configuración espacial de las subáreas, (4) propiedades físicas de cada subárea,

incluyendo características de la vegetación si es necesario y (5) el plan de riego. La información de salida del modelo para cada área modelada incluye el contenido de humedad del suelo, el almacenamiento superficial, los hidrogramas de escorrentía superficial y subsuperficial, y la necesidad de riego de la vegetación (Figura 6).

Esta Síntesis de Investigación resume una línea de trabajo desarrollada en 3 artículos principales, los cuales son:

Herrera J., Bonilla C.A., Castro L., Vera S., Reyes R., Gironás J. (2017). "A model for simulating the performance and irrigation of green stormwater facilities at residential scales in semiarid and Mediterranean regions". *Environ. Model. Softw.* 2017, 95, 246–257. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.020>

Herrera J., Flamant G., Gironás J., Vera S., Bonilla C.A., Bustamante W., Suárez F. (2018). "Using a hydrological model to simulate the performance and estimate the runoff coefficient of green roofs in semiarid climates". *Water*; 10(2):198. <https://doi.org/10.3390/w10020198>

Reyes-Paecke S., Gironás J., Melo O., Vicuña S., Herrera J. (2019). "Irrigation of Green Spaces and Residential Gardens in a Mediterranean Metropolis: Gaps and Opportunities for Climate Change Adaptation". *Landscape and Urban Planning* 182, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.10.006>

REFERENCIAS

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998). "Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56". FAO, Rome, Vol. 300, No. 9.

Corradini, C., Melone, F., Smith, R. E. (1997). "A unified model for infiltration and redistribution during complex rainfall patterns". *Journal of Hydrology* 192(1-4), 104-124.

Corradini, C., Melone, F., Smith, R.E. (2000). "Modeling local infiltration for a two-layered soil under complex rainfall patterns". *J. Hydrol.* 237 (1), 58-73.

Green, W. H., Ampt, G. A. (1911). "Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils". *Journal of Agricultural Science* 4(1), 1-24.

Guo, J. C., Luu, T. M. (2015). "Hydrologic model developed for stormwater infiltration practices". *Journal of Hydrologic Engineering* 20(9), 1-8.

Merriam, R.A. (1960). "A note on the interception loss equation". *J. Geophys. Res.* 65 (11), 3850-3851.

Savabi, M. R., Williams, J. R. (1995). "Evaporation and environment, WEPP model documentation". USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory Publication.

Simunek, J., Sejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M. T. (2013). *The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, version 4.17, HYDRUS software series 3.* Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA.

Van Genuchten, M. T. (1980). "A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils". *Soil Science Society of America journal* 44(5), 892-898.



Centro de Desarrollo
Urbano Sustentable

www.cedeus.cl
comunicaciones@cedeus.cl