

# Metodología para la evaluación de la eficiencia en el uso del agua en sistemas de riego de parques urbanos extensos

## *Methodology for assessing the performance of irrigation systems in large scale urban parks*

Freddy Canales-Ide <sup>a1\*</sup>, Sergio Zubelzu <sup>a2</sup>, Leonor Rodríguez-Sinobas <sup>a3</sup>

<sup>a</sup> Grupo de investigación Hidráulica del Riego, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (ETSIAAB), Universidad Politécnica de Madrid. Av. Puerta del Hierro 2-4, 28040, Madrid, España.

E-mail: <sup>a1</sup>freddy.canales.ide@alumnos.upm.es, <sup>a2</sup>sergio.zubelzu@upm.es, <sup>a3</sup>leonor.rodriguez.sinobas@upm.es

\*Autor para correspondencia

Recibido: 30/07/2021

Aceptado: 05/10/2021

Publicado: 31/10/2021

**Citar como:** Canales-Ide, Freddy; Zubelzu, Sergio; Rodríguez-Sinobas, Leonor. 2021. Methodology for assessing the performance of irrigation systems in large scale urban parks. *Ingeniería del agua*, 25(4), 303-317. <https://doi.org/10.4995/la.2021.15915>

## RESUMEN

En los parques urbanos, plataformas deportivas y jardines privados, el principal reto en la programación del riego es el cálculo de las necesidades hídricas de las plantas ornamentales ( $ET_p$ ), que pueden variar significativamente entre las distintas zonas de un mismo parque. De las numerosas metodologías para estimar las necesidades de riego de las plantas, destacan por su aplicabilidad el método WUCOLS para estimar los coeficientes de jardín ( $K_j$ ). En este trabajo, se desarrolla una metodología que combina la información climática y el cálculo del índice de la eficiencia en el uso del agua (suministro relativo de agua, 'relative water supply') RWS, visualizada mediante mapas SIG, para evaluar el manejo del riego atendiendo tanto a las necesidades hídricas de las especies vegetales como a la eficiencia del manejo del riego. Esta metodología pretende apoyar la toma de decisiones de los gestores de los sistemas de riego de los grandes parques urbanos relacionadas con el manejo del riego. La metodología se ha aplicado durante tres años (2017-2019) a 18 ha de parques dentro de la urbanización de Valdebebas (Madrid) de 1018 ha regadas con goteo subsuperficial, completamente automatizado. Los resultados muestran que las necesidades hídricas de las especies vegetales son bajas, debido a que corresponden a especies ornamentales adaptadas al clima semiárido. Así mismo, la eficiencia en el uso del agua en los parques, aunque tengan las similares necesidades hídricas, es heterogénea. El mapeo proporciona una gran cantidad de información, tanto a escala espacial como temporal (semanal, mensual) que ayudará al personal a cargo del manejo de riego de los parques urbanos a ajustar las decisiones del manejo del riego con mayor detalle, así como, a detectar y evaluar cualquier posible anomalía que pueda presentarse durante las sucesivas temporadas.

**Palabras clave** | plantas ornamentales, necesidades hídricas, ET, índice RWS.

## ABSTRACT

*In urban parks, sports platforms and private gardens, the main challenge in irrigation scheduling is the calculation of the water requirements of ornamental plants ( $ET_p$ ), which can vary significantly between different areas of the same park. Of the numerous methodologies for estimating plant water requirements, the WUCOLS method for estimating landscape coefficients ( $K_j$ ) is most applicable. In this work, a methodology is developed that combines climatic information and the calculation of the relative water supply index (RWS), visualized using GIS maps, to evaluate irrigation management based on both the water needs of plant species and the efficiency of irrigation management. This methodology aims to support decision making by irrigation managers of large urban park irrigation systems related to irrigation management. The methodology has been applied for three years (2017-2019) to 18 ha of parks within the 1018 ha Valdebebas urbanization (Madrid) irrigated with subsurface drip irrigation, fully automated. The results show that the water requirements of the plant species are low, since they are ornamental species adapted to the semi-arid climate. Also, the water use efficiency in the parks, although they have similar water needs, is heterogeneous. The mapping provides*

*a large amount of information, both on a spatial and temporal scale (weekly, monthly) that will help the staff in charge of irrigation management of urban parks to adjust irrigation management decisions in greater detail, as well as to detect and evaluate any possible anomalies that may occur during successive seasons.*

**Key words** | ornamental plants, irrigation requirements, ET, RWS index.

## INTRODUCCIÓN

Para el año 2050 se estima que casi el 68% de la población mundial vivirá en áreas urbanas y se requerirá de un abastecimiento de agua seguro y continuo (United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2018). Los escenarios probables de cambio climático proyectan una disminución en la disponibilidad de agua apta y no contaminada en las ciudades ubicadas en zonas de climas árido y semiárido (Boretti y Rosa, 2019). Actualmente, gran parte de la población mundial vive en ciudades expuestas a sufrir graves restricciones hídricas en un futuro cercano. Por tanto, la gestión integral del agua en ambientes urbanos es un factor clave para asegurar el abastecimiento y la sostenibilidad de las ciudades (Makarigakis y Jimenez-Cisneros, 2019), así mismo, es un proceso que debe asegurar el control, operación y distribución de agua hacia sus diferentes usos: producción de alimentos, consumo doméstico, tratamiento de aguas, industria, riego y producción de energía; por todo ello, los encargados de la toma de decisiones en estas materias se enfrentan a un gran desafío (Madonsela *et al.*, 2019).

El riego de parques, plataformas deportivas y/o jardines privados urbanos es un gran consumidor de agua a los que se suma el riego de huertos urbanos, aumentando la demanda de recursos hídricos en las ciudades. La eficiencia en el uso del agua para el riego de plantas ornamentales ha sido poco estudiada y, la eficiencia en la aplicación del riego de zonas verdes suele ser baja debido principalmente a un manejo deficiente del riego, con el consecuente desperdicio de agua y la aparición de problemas fitosanitarios. Así mismo, otro problema detectado es la implantación de especies vegetales con grandes requerimientos hídricos y/o adaptadas a climas más lluviosos. Las tendencias actuales en el diseño de paisajes han dejado atrás parques con grandes cubiertas de césped de estación fría y árboles frondosos cambiándolas por especies de bajas necesidades hídricas o especies ornamentales nativas adaptadas al clima local; incorporándose adicionalmente el uso pavimentos blandos que permiten captar y drenar el agua de lluvia (Abioye *et al.*, 2020; Suárez López *et al.*, 2014; Xiao *et al.*, 2018). Se puede definir como un gran parque urbano una unidad de gran extensión o varios parques y plazas que son regadas unificadas por su sistema de riego o por su disposición en el paisaje urbano o complejidad requieren un manejo integral del riego.

El término ‘*Smart irrigation*’ sigue en constante definición y desarrollo, sin embargo, está más ligado al nivel de automatización que a una eficiencia alta en el manejo y la distribución de agua (Fraga-Lamas *et al.*, 2020). Así mismo, el riego de precisión, tiene como objetivo principal alcanzar altos niveles de eficiencia en el manejo del riego y aplicación de agua tal que permita mantener una calidad ornamental y funcional para mantener condiciones fitosanitarias adecuadas (Rodríguez Díaz *et al.*, 2020), como por ejemplo, evitar la enfermedades de raíces por exceso de humedad en el suelo y la reducción de área foliar, desordenes fisiológicos y cavitación por estrés hídrico.

En cultivos agrícolas, la eficiencia en el uso del agua suele medirse con indicadores como EUA, que relaciona la productividad o rendimiento, principalmente de monocultivos, con el agua aplicada durante la temporada de riego (de Wit, 1958). Sin embargo, en paisajismo, el objetivo principal no es la producción sino obtener una calidad ornamental aplicando la cantidad de agua justa para preservar la funcionalidad y los procesos biológicos; se debe conseguir el aspecto estético deseado en las diferentes estaciones del año. Dentro de los indicadores de eficiencia en el manejo del riego puede utilizarse por la simplicidad de cálculo, el denominado Suministro Relativo de Agua (RWS), empleado comúnmente en agricultura, calculado como el ratio aportes de agua por riego y lluvias con la evapotranspiración real del paisaje o jardín (Levine, 1982). diferencia de las zonas agrícolas, las ciudades cuentan con un suministro de agua continuo según demanda; el manejo del riego debe suplir la evapotranspiración de las especies vegetales y no la aplicación de agua en periodos críticos para obtener los máximos rendimientos.

La elaboración de mapas (mapeo), delimitando las necesidades hídricas de las plantas, es utilizado con frecuencia en los monocultivos agrícolas, para lo cual se utilizan imágenes satelitales, fotografías multiespectrales y sensores de humedad de suelo. Sin embargo, el mapeo de índices del uso del agua en plantaciones ornamentales es novedoso y puede ilustrar cómo se utilizan los recursos hídricos por múltiples especies que comparten una misma superficie, siendo un procedimiento útil para asegurar la

sostenibilidad de zonas verdes urbanas, en este caso la programación del riego y la evaluación de su eficiencia, responde a los aportes de agua respecto a la demanda evapotranspirativa dejando de lado factores que pueden incidir en un mal cálculo de las demandas de riego, como por ejemplo la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, los que generalmente a causa de los procesos de urbanización los suelos resultantes son heterogéneos. Esta innovación es aún más desafiante para el manejo del riego de zonas verdes extensas compuestas por diferentes combinaciones de plantas y que, junto a los microclimas, característicos del desarrollo urbano, dificultan el manejo del riego. Por lo tanto, la evaluación del manejo del riego con mapas de eficiencia en el uso del agua dentro del jardín facilita y apoya la toma de decisiones de los técnicos encargados de la operación del riego en estos parques. Los mapas permitirán visualizar gráficamente en las diferentes hidrozonas del jardín, como se aplica el riego (su eficiencia) y buscar soluciones a los problemas causados por un manejo deficiente tanto por sobrerriego como por déficit hídrico (Halper *et al.*, 2015; Reyes-Paecke *et al.*, 2019; Shojaei *et al.*, 2018).

En este estudio se propone una metodología práctica para elaborar mapas del índice de eficiencia en el uso del agua RWS de utilidad para aplicar a parques urbanos extensos y que se ha aplicado a una zona de la urbanización de Valdebebas (Madrid).

## MATERIAL Y MÉTODOS

Esta sección describe la metodología propuesta para la evaluación del uso del agua en el riego de zonas verdes extensas, cuyo esquema se muestra la Figura 1, donde se ha utilizado el indicador de eficiencia en el uso del agua de riego RWS. Se comienza obteniendo la información inicial: requerimientos hídricos de las especies vegetales, para lo que se recomienda utilizar el método propuesto WUCOLS III (Costello, 1994; Costello y Jones, 2014); lámina bruta o volumen de agua aplicado al riego ( $H_b$ ) y precipitación efectiva ( $P_e$ ). Posteriormente, las especies vegetales se agrupan atendiendo tanto a sus necesidades hídricas como a la válvula de suministro hídrico de cada una de estas agrupaciones, conformando las zonas con necesidades hídricas similares en el propio mapa, tal como se detalla en la sección “Requerimientos de riego”. Así mismo, se estima el indicador RWS y se muestra en un mapa las zonas con similar eficiencia que, junto al mapa anterior, ayudarán a los técnicos o encargados del riego a establecer un tiempo de aplicación del agua adecuado ( $T_r$ ) para cada parque y así, programar los riegos ajustándolos mejor a la demanda de agua de las especies de las diferentes zonas del parque.

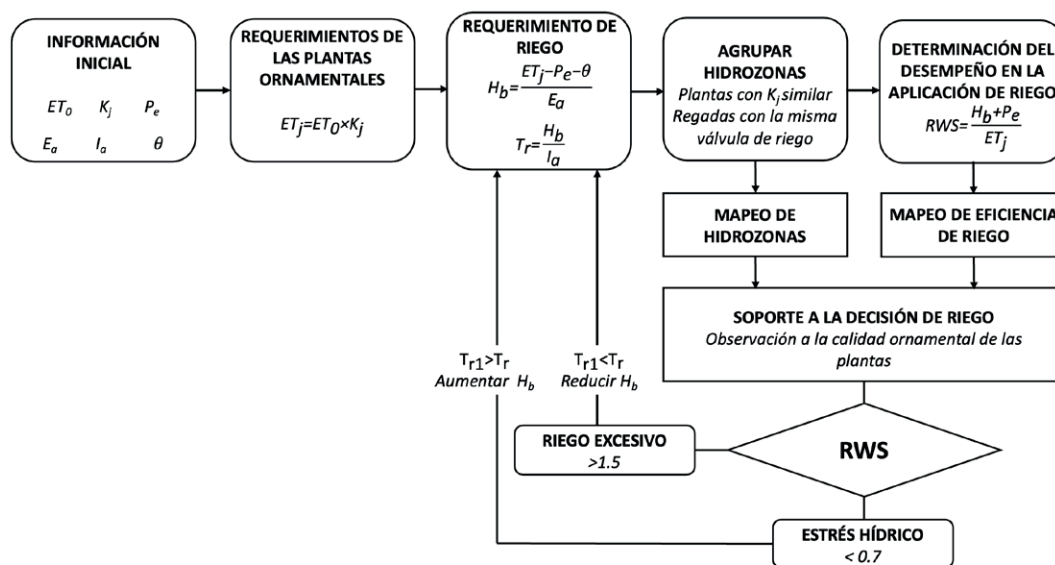


Figura 1 | Esquema de proceso de evaluación del manejo del riego.

## Información Inicial

### Determinación de los requerimientos de agua de las plantas

Para la determinación de la demanda de agua de las especies ornamentales en primer lugar, se requiere contar con información climática diaria para estimar la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ). Dentro de los métodos disponibles, el recomendado por FAO es el procedimiento de Penman-Monteith (Ecuación 1), donde los valores de las variables pueden ser obtenidos de estaciones climáticas locales (Allen *et al.*, 1998).

En casi todas las ciudades se tienen estaciones climáticas automatizadas donde los valores de  $ET_0$  o las variables para su cálculo, se consultan online. Caso de no contar con el equipamiento necesario, se pueden utilizar otros métodos para su estimación, por ejemplo, bandejas de evaporación estandarizadas, que estiman la ET con menos precisión. También, se puede estimar utilizando datos de series climáticas históricas u a partir de la información de estaciones climáticas cercanas, localizadas en ubicaciones con similares características climáticas.

Una vez conocida  $ET_0$ , se calcula la Evapotranspiración de Jardín ( $ET_j$ ). Los parques tienen múltiples arreglos y combinaciones de especies vegetales que varían dentro de las áreas verdes de acuerdo con las necesidades ornamentales o funcionales del diseño paisajístico. La  $ET_j$  puede ser estimadas por medio de varios procedimientos, entre ellos el denominado WUCOLS I-III es práctico; la  $ET_j$  se calcula por medio de la Ecuación (1) donde  $K_j$  es el coeficiente de jardín ( $K_j$ ) calculado por medio de tres factores independientes, Ecuación (2).

$$ET_j = ET_0 K_j \quad (1)$$

$$K_j = K_s K_{mc} K_d \quad (2)$$

El factor de especie ( $K_s$ ) se obtiene a partir de tablas con valores estimados u obtenidos empíricamente para cada especie o grupo de plantas, cuyo valor varía de acuerdo a la zona climática donde se encuentre ubicado el parque, siendo un símil a coeficientes de cultivos agrícolas o  $K_c$ , según se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1** | Valor de WUCOLS de  $K_s$  para especies ornamentales.

Rango	$K_s$
Alto	0.7 – 0.9
Medio	0.4 – 0.6
Bajo	0.1 – 0.3
Muy bajo	< 0.1

El factor de densidad ( $K_d$ ) define el estado vegetativo de las plantas.  $K_d$  se utiliza para relacionar el uso de agua con base en distintas densidades de vegetación del jardín o índices de área foliar. Los valores que se muestran en la Tabla 2, varían entre 0.5 y 1.3; el rango más bajo representa a las zonas con baja densidad de plantación, jardines en formación o especies poco robustas y el más Alto, jardines densos con combinaciones de árboles, arbustos, cubre suelos y céspedes densos.

**Tabla 2** | Factor de densidad para distintas categorías,

Rango	$K_d$
Alto	1.1 – 1.3
Moderado	1.0
Bajo	0.5 – 0.9

Finalmente, el factor de microclima ( $K_{mc}$ ) se asigna o calcula atendiendo a: plantaciones ubicadas dentro de parques bien expuestos a la luz y rodeados de vegetación tienen un  $K_{mc}=1$ , zonas sombreadas por construcciones o árboles de gran tamaño ( $>10$  m) tienen un  $K_{mc}<1$  y plantas ubicadas cerca de zonas de pavimentos o con reflejos de ventanas espejadas donde se eleva la temperatura o la radiación  $K_{mc}>1.1$ . La Tabla 3 muestra el rango de valores.

**Tabla 3** | Factor de microclima para distintas categorías.

Rango	$K_{mc}$
Alto	1.1 – 1.4
Moderado	1.0
Bajo	0.5 – 0.9

### Requerimientos de riego

Dentro de los parques urbanos, el factor que más varía es  $K_j$ , y la  $ET_0$  es común en todas las zonas del jardín, la estimación de un  $ET_j$  específico para cada zona de riego (hidrozona) es útil tanto para agrupar especies vegetales con los mismos requerimientos hídricos, como para establecer la programación del riego y evaluación de la eficiencia en el uso del agua. Los sistemas de riego de grandes parques urbanos, generalmente, están automatizados, sobre todo en las grandes superficies, por lo que se puede conocer o estimar el agua aplicada por cada llave (válvula) de riego, bien porque se mide directamente, en contadores volumétricos de agua, o bien porque se registra el tiempo de aplicación del riego. El volumen de agua aplicada ( $H_b$ ) se debe corregir atendiendo a la uniformidad en la distribución de agua en los sistemas de riego de las áreas verdes ( $E_a$ ), que varía de 70 a 95% para el riego tecnificado. Así, los requerimientos de riego bruto se calculan con la Ecuación (3).

$$H_b = \frac{ET_j - P_e}{E_a} \quad (3)$$

### Cálculo de la Precipitación Efectiva

En algunas regiones, las lluvias ( $P$ ) pueden representar un porcentaje importante de los requerimientos de hídricos durante la temporada de riego, por este motivo es importante medir las precipitaciones en una estación climática (o pluviómetro) cercana al área verde. Una fracción de  $P$  queda retenida en la parte aérea de las plantas y otra, se pierde por escorrentía o por filtración profunda; la restante, se denomina precipitación efectiva ( $P_e$ ) y queda retenida en el suelo aumentando la cantidad de agua almacenada y disponible para las raíces. Se determina con las Ecuaciones (4 y 5) (Allen *et al.*, 1998):

$$\text{Si } P > 75 \text{ mm mes}^{-1} \quad P_e = 0.8 P \quad (4)$$

$$\text{Si } P < 75 \text{ mm mes}^{-1} \quad P_e = 0.8 P \quad (5)$$

### Agrupación de plantas por hidrozonas y por su desempeño de manejo del riego

A diferencia del riego agrícola, donde se riegan generalmente monocultivos con necesidades hídricas más estudiadas, los parques urbanos están compuestos zonas que contienen combinaciones de plantas, con diferentes requerimientos hídricos. Generalmente el riego es automatizado, accionado por medio de válvulas eléctricas para aplicar la cantidad de agua necesaria a cada zona del jardín. De esta forma es posible calcular el volumen de agua aplicado, midiendo el caudal que pasa por las válvulas, y/o registrando el tiempo de riego aplicado a cada tipología de plantas.

La metodología propuesta se basa en la identificación de las válvulas de riego de cada zona del jardín, es fundamental identificar cada válvula junto con el área que abastece y la tipología de plantas. Así, la válvula eléctrica será la unidad básica que permitirá dividir el parque en cuadrículas o píxeles. La agrupación “válvula-área regada-tipología de plantas” debe dar como resultado una nomenclatura que permita identificar las áreas regadas con la misma válvula y tipología de plantas de una forma estandarizada, indistintamente si éstas se manejan bien desde la central de riego o si se accionan por medio de diferentes programadores. Con la información recogida, se genera una base de datos donde está identificada cada válvula junto con los volúmenes de agua aplicados y precipitación, considerando una escala de tiempo mínima que se corresponda con la frecuencia de riego más pequeña.

En el caso de que una sola válvula aplique el agua a una zona con la misma tipología de plantas, pero con diferentes requerimientos hídricos, se pueden modificar los emisores de riego, manteniendo el mismo tiempo de riego, pero con caudales de goteros más pequeños, o determinar un  $K_s$  medio; éste aplicará un riego excedentario a las plantas con menos necesidades y un riego deficitario a las de necesidades mayores. Así mismo, también se puede definir un  $K_s$  correspondiente a las plantas con mayores necesidades hídricas lo que resultará en una aplicación del agua en exceso, pero que permite mantener un buen estado hídrico general. En los parques o zonas verdes que son diseñados considerando los criterios antes señalados, la identificación y agrupación de plantas será más fácil, de igual modo, el manejo y la evaluación del riego.

Para realizar evaluaciones tanto espaciales como temporales del manejo del riego, se debe trazar un dibujo o plano de la zona verde, en el cual se ubiquen y localizan las válvulas de riego, tuberías de distribución de agua, emisores de riego (aspersores o ramales de goteo), además de la demarcación de las áreas con las diversas especies y variedades de plantas junto con el caudal de riego de la zona. Cada polígono cuenta con una combinación válvula-tipología, donde se debe conocer el tiempo de riego o volumen de agua aplicado y su  $ET_j$ .

Este procedimiento puede ser realizado mediante un programa informático de dibujo técnico o plataformas GIS que permitan manejar matrices de datos y realizar cálculos georreferenciados.

Para la determinación y agrupación de zonas por su eficiencia en el uso del agua, se debe seleccionar y definir el índice de la eficiencia en el uso del agua. Entre los índices existentes, en este trabajo se propone el RWS, calculado con la Ecuación (6), a partir de la estimación de un coeficiente de jardín, del volumen de agua aplicado, aporte de precipitación y la evapotranspiración potencial de las especies

$$RWS = \frac{H_b + P_e}{ET_j} \quad (6)$$

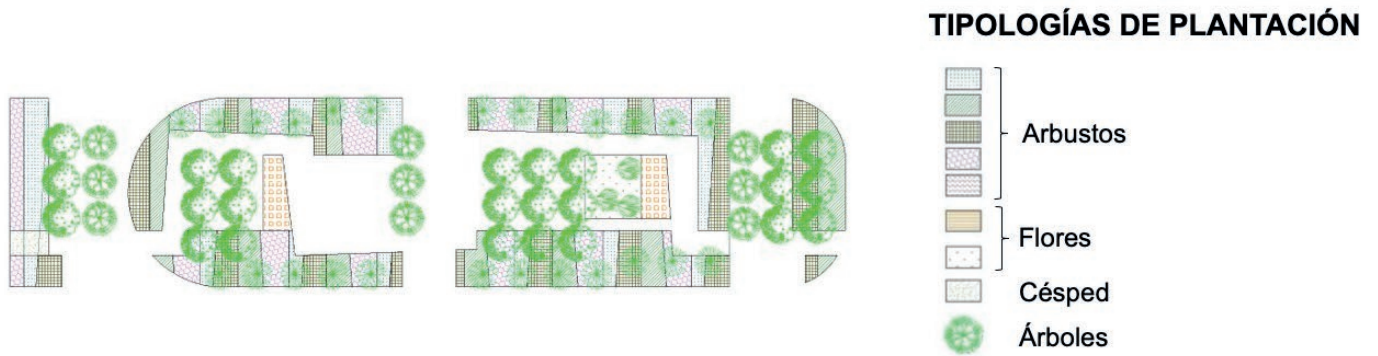
Siendo  $H_b$  (mm) la lámina de agua aplicada a cada zona de riego. La clasificación del riego atendiendo a este índice es: riego sensible a producir estrés hídrico ( $RWS < 0.7$ ), riego óptimo ( $0.7 < RWS < 1.5$ ) y riego excedentario ( $RWS > 1.5$ ). Se aconsejan valores RWS cercanos a 1,

### Aplicación de la metodología

La metodología se ha aplicado a los parques de la urbanización de Valdebebas (Madrid), donde se ubica un desarrollo urbano y comercial de 1018 ha: 380 ha de áreas verdes y 18 ha de parques urbanos (Canales-Ide *et al.*, 2019). Éstos se riegan con riego por goteo, mayoritariamente subsuperficial, y con hidrozonas con una superficie media de 530 m<sup>2</sup>. Las unidades de riego se controlan/manejan con válvulas eléctricas comandadas desde una central de riego. La Figura 2 muestra el esquema de plantación de los parques 301, 302 y 303.

Las plantas que componen los parques tienen requerimientos hídricos pequeños y se adaptan a la demanda evapotranspirativa alta de Madrid durante los meses de verano. Los requerimientos mayores corresponden a las zonas de césped, que ocupan la menor superficie de las áreas verdes.

La información inicial se obtiene de la estación climática de la urbanización, y mediante un programa informático, ubicado en la estación de control y manejo de centralizado de válvulas de riego, se estima  $ET_0$  cada día. Así mismo, se registra el tiempo de riego de cada parque en función del caudal de agua aplicado.



**Figura 2** | Esquema de plantación de los parques 302, 303 y 301 (Fuente propia).

La metodología se aplicó a siete zonas de riego (107, 108, 202, 203, 204, 301 y 302) durante tres años: 2017, 2018 y 2019. Dado que se conoce la intensidad de riego por unidad de superficie, se determina la lámina bruta utilizando el tiempo de riego diario.

El sistema de riego de los parques se divide en 34 zonas de riego independientes, cada uno con arqueta compuesta por un contador Woltzman, una válvula reductora de presión (fijada a 40.79 m.c.a.) y otra sostenedora de presión, así como un transductor de presión y un filtro de anillas automático (Figura 3).



**Figura 3** | Elementos hidráulicos de operación y control del riego.

La arqueta del sector tiene un programador de campo que envía la información al decodificador central, y abre y cierra las válvulas eléctricas. Cada sector de riego abastece una tipología de plantas y el ordenador programa el riego de los diferentes sectores.

En cada sector de riego, cada tipología de plantación cuenta con las especificaciones detalladas en la Tabla 4.

**Tabla 4** | Especificaciones del sistema de riego para cada tipología de plantación.

Tipología de plantación	Caudal nominal del gotero (L h <sup>-1</sup> )	Marco de riego (m)	Tasa de riego (mm h <sup>-1</sup> )
Césped	0.8	0.15 x 0.15	20.7
Arbustos	0.7	0.3 x 0.3	9.2
Árboles	2.3	0.3 x 0.3	20.7
Flores	2.3	0.5 x 0.5	9.0

Para elaborar mapas de la eficiencia en el uso del agua de riego, es necesario definir la escala temporal de evaluación y actuación sobre la lámina de riego. En los parques y plataformas deportivas actuales, el manejo del riego, la configuración del tiempo y frecuencia de riego puede ser modificada fácilmente desde la central de riego. En el caso de Valdebebas, con la información que se cuenta, la evaluación y mapeo de la eficiencia de riego podría realizarse a diario, así la lámina de riego puede modificarse cada día y por consiguiente, podría reducirse las pérdidas de agua por riego excesivos y podría disminuirse los riesgos de estrés y muerte de plantas, pero por aplicación práctica se ha decidido evaluar semanalmente. En los parques y zonas verdes que requieren una modificación individual de los programas de riego de las válvulas y programadores, pueden ser más difíciles de modificar con frecuencia diaria por lo que habría que elegir una escala de tiempo mayor (semanal, cada 10 días); aunque se recomienda realizarse con la mayor periodicidad posible para conseguir una mayor eficiencia del manejo del riego.

El índice RWS se calcula como se indica en la Ecuación (7):

$$RWS = \frac{\sum_i^{Ti+1} Hb + \sum_i^{Ti+1} Pe}{\sum_i^{Ti+1} ET} \quad (7)$$

Siendo  $Ti+1$  los días a evaluar para cada periodo de tiempo seleccionado.

Una vez calculado la eficiencia, se procederá a evaluar el manejo del riego utilizando programas informáticos que realicen los cálculos y mapas.

## RESULTADOS

La Figura 4 muestra la evolución de la  $ET_0$  durante los tres años estudiados; los valores máximos correspondieron a julio y agosto con un valor medio de  $7.6 \text{ mm d}^{-1}$ .

Los valores de  $Pe$  son muy reducidos y no cubren la demanda evapotranspirativa de los parques, las lluvias aportaron solo un 15, 20 y 12% de las necesidades hídricas de las temporadas 2017, 2018 y 2019 respectivamente (ver Figura 5).

Siguiendo la metodología propuesta, se realizó la agrupación “válvula eléctrica-área regada-tipología de planta” para distinguir hidrozonas. Los parques urbanos contienen combinaciones de especies vegetales diversas, desde césped a grandes árboles, con necesidades hídricas diferentes. En Valdebebas éstas, están bien delimitadas y cada válvula eléctrica controla el riego de una tipología específica, cuya combinación de plantas varía en cada zona resultando valores de  $K_s$  diferentes. En las zonas de plantas con los mismos requerimientos hídricos, se calcula un valor medio de  $K_s$  a partir de los valores de  $K_s$  individuales para cada especie.

Los valores de  $K_d$  y  $K_{mc}$  son asignados con base en la apreciación del estado vegetativo de las plantas y la ubicación en el paisaje urbano. Una vez obtenido  $K_j$ , se subdividen las zonas verdes con similares necesidades hídricas y regadas con la misma válvula de riego.



**Figura 4** | Valores de  $ET_0$  de las temporadas de riego 2017, 2018, 2019.



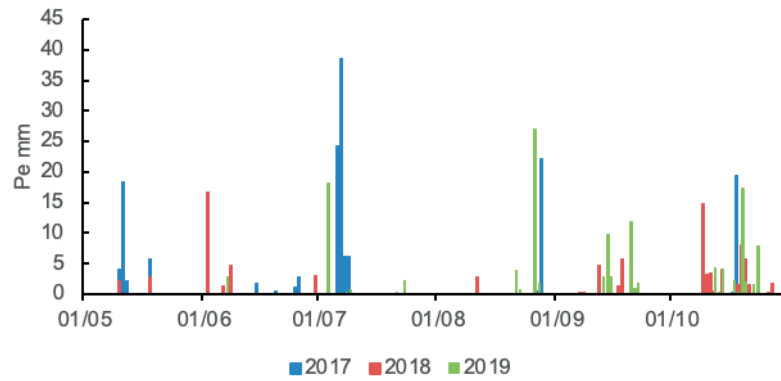


Figura 5 | Valores de Pe de las temporadas de riego 2017, 2018, 2019.

Los parques urbanos de Valdebebas se localizan a lo largo y ancho de la urbanización; se delimitaron polígonos donde cada uno de ellos muestra la agrupación de plantas por su tipología, necesidades hídricas ponderadas y válvula de riego común que opera un sistema con igual tasa de riego. Cada polígono fue localizado en un software SIG (ArcMap 10.4, Esri) y se compone de una matriz de datos, para las temporadas de riego de 2017 a 2019, que contiene tanto información de las variables  $ET_0$  y  $Pe$ , procedente de la estación climática de la urbanización, como de la lámina bruta de riego aplicada y el valor de  $K_j$ . Éste último se muestra en la Figura 6 y se corresponden con 66 válvulas de riego que riegan un promedio de 3 hidrozonas cada una.



Figura 6 | Valores de  $K_j$  de los parques estudiados.

Se observa que los valores de  $K_j$  varían de acuerdo a la composición y mezclas de especies, oscilando entre 0.28 (árboles) y 0.90 (césped). Así, el  $K_j$  medio en árboles es de 0.37 y en algunas zonas alcanza un valor máximo de 0.51. En arbustos su valor es 0.42, variando entre 0.29 y 0.49. Sus valores para las especies de césped son las más altas, principalmente por el uso de especies de estación cálida como la bermuda, (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.) con algunas mezclas de césped de estación fría para suplir la falta de verdor durante el invierno, siendo los valores medio y mínimo 0.77 y 0.64, respectivamente, dependiendo principalmente de  $K_{mc}$ .

Una vez conocida la información para calcular el índice RWS, se fija el periodo de evaluación en este caso, la decisión sobre la programación de riego en los parques se realiza cada semana y es la siguiente: las colecciones de flores y arbustos se riegan tres veces por semana, los árboles una vez a la semana y el césped se riega a diario exceptuando los fines de semana. La Tabla 5 muestra los valores de la eficiencia del manejo del riego en cada parque calculada mensualmente, aunque la evaluación podría realizarse con mayor periodicidad y con una ubicación espacial más detallada.

**Tabla 5** | Valores de RWS mensual para las temporadas de riego 2017, 2018, 2019.

Sector	Tipología	RWS 2017						RWS 2018						RWS 2019					
		May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct
107	Flo	1.61	2.92	2.38	2.67	2.84	2.04	1.08	2.88	1.71	2.00	1.23	1.34	1.99	3.97	2.14	2.00	2.09	3.98
	Ces	0.92	1.65	1.72	1.51	1.9	0.81	0.61	2.39	1.55	1.50	1.14	1.73	1.69	2.97	1.44	0.85	1.08	2.51
	Ars	1.61	2.92	2.38	2.67	2.84	2.04	1.08	2.72	1.66	1.83	1.2	1.47	2.22	4.43	2.38	2.23	2.33	4.43
	Arb	2.39	4.05	3.19	4.31	3.05	2.76	1.76	1.9	1.58	1.50	0.87	1.57	2.46	4.11	2.61	1.77	1.83	3.45
108	Flo	1.45	2.63	2.14	2.41	2.55	1.84	0.97	2.88	1.71	2.00	1.23	1.34	1.91	3.8	2.05	1.92	2.00	3.81
	Ces	0.82	1.48	1.55	1.36	1.71	0.73	0.55	1.90	1.58	1.50	0.87	1.57	1.61	2.84	1.37	0.81	1.03	2.40
	Ars	1.45	2.63	2.14	2.41	2.55	1.44	0.97	1.91	1.23	1.20	0.91	1.5	2.08	4.16	2.24	2.10	2.19	3.54
	Arb	2.15	3.64	2.87	3.88	2.75	2.48	1.58	1.91	1.40	1.60	0.77	0.95	2.36	3.95	2.51	1.70	1.76	3.32
204	Flo	1.43	2.60	2.11	2.38	2.52	1.81	0.96	2.10	1.87	1.78	0.95	1.82	1.48	2.94	1.58	1.49	1.55	2.95
	Ces	1.09	1.95	2.04	1.79	2.25	0.97	0.72	2.13	1.37	1.33	1.01	1.54	1.50	2.64	1.28	0.75	0.96	2.23
	Ars	1.43	2.60	2.11	2.38	2.52	1.81	0.96	1.94	1.53	1.60	0.83	1.28	1.98	3.95	2.13	1.99	2.08	3.96
	Arb	2.02	3.42	2.69	3.64	2.58	2.33	1.49	1.53	1.36	1.30	0.69	1.32	2.18	3.65	2.32	1.57	1.62	3.06
203	Flo	1.43	2.60	2.11	2.38	2.52	1.81	0.96	2.10	1.87	1.78	0.95	1.82	1.48	2.94	1.58	1.49	1.55	2.95
	Ces	1.36	2.44	2.55	2.24	2.82	1.21	0.90	2.56	1.53	1.78	1.09	1.19	1.50	2.64	1.28	0.75	0.96	2.23
	Ars	1.40	2.52	2.33	2.31	2.67	1.51	0.93	2.13	1.38	1.33	1.01	1.54	1.75	3.31	1.71	1.38	1.53	3.11
	Arb	1.78	3.10	2.47	3.10	2.62	2.13	1.26	2.56	1.52	1.78	1.09	1.19	2.05	3.74	2.18	1.76	1.83	3.46
202	Flo	1.34	2.42	1.97	2.21	2.35	1.69	0.89	2.05	1.42	1.50	0.90	1.28	1.69	3.37	1.82	1.70	1.77	3.38
	Ces	1.26	2.27	2.38	2.09	2.62	1.12	0.84	2.33	1.70	1.78	1.02	1.51	1.43	2.52	1.22	0.72	0.92	2.13
	Ars	1.43	2.60	2.11	2.38	2.52	1.81	0.96	2.29	1.63	1.69	1.02	1.51	2.00	3.99	2.15	2.01	2.10	3.99
	Arb	1.93	3.27	2.57	3.48	2.47	2.23	1.42	2.11	1.71	1.63	0.97	1.72	2.02	3.38	2.15	1.45	1.50	2.84
301	Flo	1.04	1.89	1.54	1.73	1.83	1.32	0.70	1.68	1.00	1.16	0.71	0.78	1.79	3.57	1.92	1.80	1.88	3.58
	Ces	1.09	1.95	2.04	1.79	2.25	0.97	0.72	1.39	0.90	0.87	0.66	1.01	1.20	2.11	1.02	0.60	0.77	1.78
	Ars	1.04	1.89	1.54	1.73	1.83	1.32	0.70	1.69	1.04	1.11	0.76	1.01	1.61	3.21	1.73	1.62	1.69	3.21
	Arb	1.39	2.36	1.85	2.51	1.78	1.61	1.02	1.68	1.50	1.43	0.76	1.45	1.72	2.88	1.83	1.24	1.28	2.42
302	Flo	1.15	2.08	1.69	1.90	2.02	1.45	0.76	2.03	1.62	1.78	0.82	1.18	1.77	3.53	1.90	1.78	1.86	3.54
	Ces	1.09	1.95	2.04	1.79	2.25	0.97	0.72	1.70	1.10	1.07	0.81	1.23	1.20	2.11	1.02	0.60	0.77	1.78
	Ars	1.13	2.05	1.78	1.87	2.08	1.33	0.75	1.87	1.36	1.42	0.82	1.2	1.47	2.85	1.51	1.32	1.41	2.77
	Arb	1.70	2.88	2.27	3.07	2.17	1.96	1.25	1.70	1.10	1.07	0.81	1.23	1.67	2.79	1.77	1.20	1.24	2.34

Donde Flo son flores, Ces es Césped, Ars corresponden a arbustos y Arb corresponden a Árboles.

Los valores máximo y mínimo de RWS en 2017 fueron: 4.31 en árboles de la zona de riego 107 y 0.73 para el césped de la zona de riego 108; con una media de  $2.11 \pm 0.7$ . Los árboles fueron los que recibieron riegos más excedentarios durante los meses de mayor demanda evapotranspirativa. Los valores extremos de RWS en 2018 fueron: 2.88 en las colecciones de flores de la zona de riego 108 y 0.55 para el césped de esta; con una media de  $1.39 \pm 0.5$ . Todas las especies tuvieron riegos excedentarios en junio.

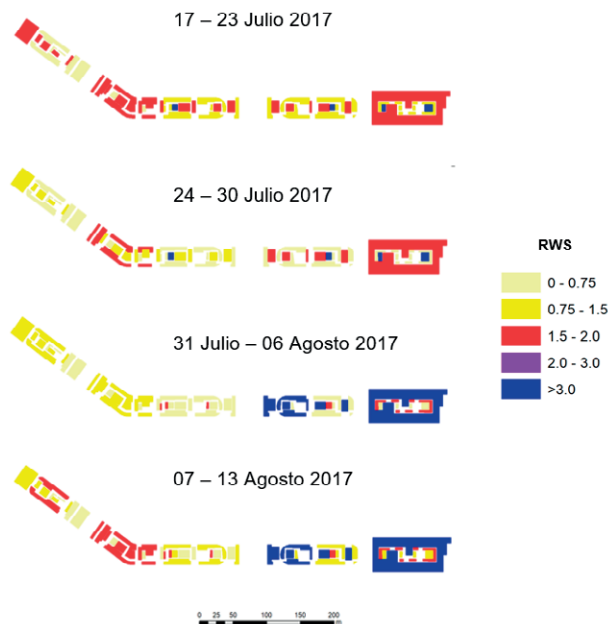
Los valores de RWS en 2019 fueron: 4.43 en arbustos de la zona de riego 107 y 0.6 en el césped de la zona de riego 301 y 302; su media fue de  $2.17 \pm 0.9$  observándose sobrerriego en todas las especies en junio y octubre.

Para elaborar los mapas de eficiencia en el uso del agua mediante el índice RWS, se escogió una evaluación semanal.

Los resultados obtenidos en los parques 301 y 302 de la urbanización de Valdebebas se muestran a continuación. En ellos se ha hecho la agrupación “válvula-área-tipología plantas” obteniéndose 61 agrupaciones regadas con 16 válvulas eléctricas, y que se corresponden a 61 polígonos o áreas de riego de 520 m<sup>2</sup> de superficie promedio, siendo el área más pequeña 89 m<sup>2</sup> (colección de flores de Lirios (*Hemerocallis* sp.)). Se observan seis combinaciones de plantas dentro de las cuatro tipologías de jardín.

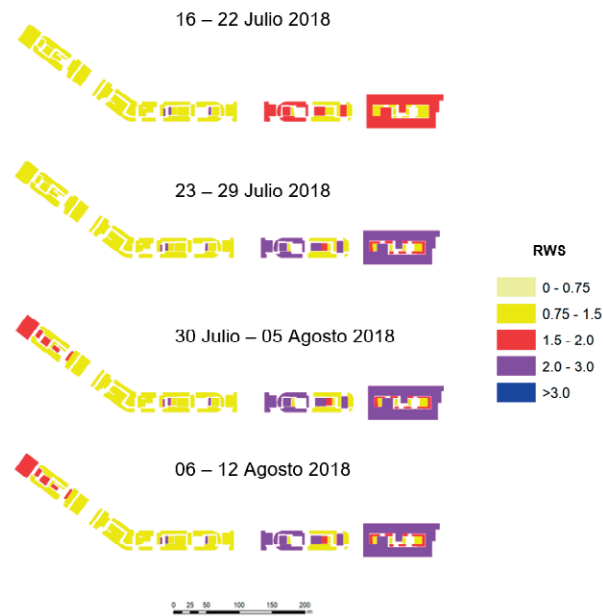
Las Figura 7, 8 y 9, muestran la evaluación, con información, tanto espacial como temporal, de cuatro semanas correspondientes a las dos últimas de junio y las dos primeras de julio los años evaluados que se corresponden con las de mayor demanda de agua.

En la Figura 7 de 2017, se observa, la variación en los valores del índice que sirven para evaluar la eficiencia en el manejo del riego. Según la clasificación RWS, en estas cuatro semanas las zonas con  $RWS > 1.5$  estuvieron sobrerregadas y las zonas con valores  $RWS < 0.75$  recibieron un riego deficitario. Se observa diferencias entre semanas siendo en las zonas de césped y árboles donde se alcanzaron valores más altos durante las dos últimas semanas de julio y alcanzando el valor de 3 en agosto. Así mismo, los arbustos muestran una condición óptima o con ligero estrés hídrico; los árboles muestran riego excedentario; el césped fluctúa, fácilmente, entre situaciones de exceso de riego a déficit hídrico dada su frecuencia de riego mayor, tiempo de riego menor y mayor evapotranspiración,



**Figura 7** | Mapa del índice de RWS para las semanas comprendidas entre el 17 de julio y 13 de agosto de 2017 del parque 301.

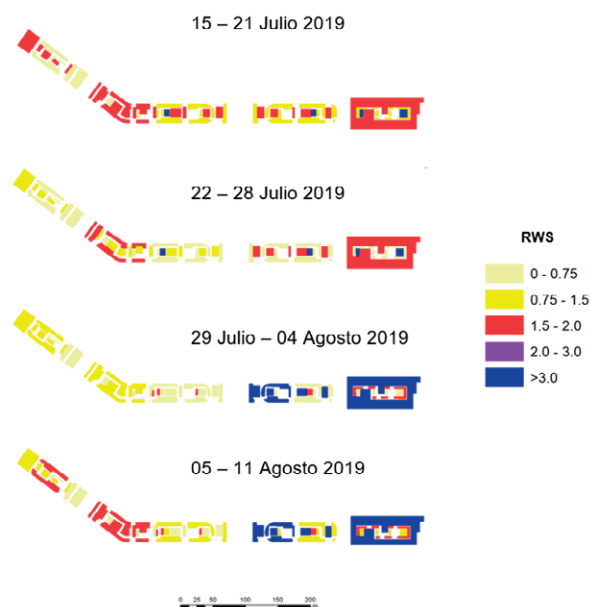
Los valores de RWS de 2018, mostrados en la Figura 8, fueron más estables. La eficiencia en el uso del agua de arbustos, flores y césped osciló desde óptima a tener riegos moderadamente excedentarios. Sin embargo, los árboles mostraron un exceso de riego que duplicaba las necesidades hídricas estimadas.



**Figure 8** | Mapa del índice de RWS para las semanas comprendidas entre 16 de julio y 12 de agosto de 2018.

En cuanto al manejo del riego los valores de RWS fueron óptimos para la mayoría de las zonas de riego con valores entre 0.75 y 2.0, siendo las zonas de árboles las más sobrerregadas, dado que los requerimientos hídricos de la especie son bajos ( $K_j = 0.2$ ).

Los valores RWS de 2019 de la Figura 9, muestra una eficiencia del riego buena y/o con riegos ligeramente deficitarios, en las dos primeras semanas en flores siendo óptima y/o con riegos ligeramente excedentarios en arbustos y árboles. No obstante, en las semanas posteriores, estos últimos aumentaron y se realizaron riegos excedentarios.



**Figure 9** | Mapa del índice de RWS para las semanas comprendidas entre el 15 de julio y 11 de agosto de 2019.

Si bien los valores anteriores sirven para evaluar el manejo del riego en las áreas verdes de los parques de una gran urbanización, como es el caso de los ubicados en Valdebebas, los resultados presentados sirven para resaltar la variación de la eficiencia en el uso del agua de riego en un periodo corto de tiempo, en este caso en un intervalo de siete días. En zonas de clima mediterráneo, en donde las precipitaciones son mínimas o casi inexistentes durante los meses de verano, el principal factor que regula la evapotranspiración es la temperatura del aire. Es por esto, y como se ve en la Figura 4, los valores de  $ET_0$ , presentan una media móvil estable, sin embargo, algunos de sus valores diarios están fuera del promedio, observándose reducciones entre 1 a 4 mm día<sup>-1</sup>; esto afecta al índice RWS, principalmente, cuando el manejo del riego no contempla modificaciones de la lámina de riego a aplicar con una frecuencia diaria.

---

## DISCUSIÓN

La metodología descrita y aplicada al caso de Valdebebas ayuda a adoptar medidas para mejorar la eficiencia en el uso del agua; si los valores del índice de eficiencia están fuera del rango óptimo se debe modificar el manejo del riego. En este caso la recomendación es realizar una programación que permita modificar la lámina de riego aplicada, reduciendo o aumentando el tiempo de riego. Éste se debe calcular respecto a la evapotranspiración del jardín con los valores de  $ET_0$  diarios, calculados el día anterior de aplicación del riego; en el caso de estudio esto se hace fácilmente dado que el manejo de riego se realiza desde una unidad de control centralizada que permite modificar los tiempos de riego. En el caso de zonas regadas con múltiples controladores con programación manual, puede resultar más adecuado aumentar o disminuir el agua aplicada, según la valoración del índice, teniendo en cuenta que cualquier modificación va a requerir de personal entrenado para realizar los cambios en los programadores de riego. La elaboración de mapas de índices de eficiencia puede ayudar a los técnicos de riego de grandes áreas verdes a detectar con mayor facilidad zonas de las plantas con problemas fitosanitarios y asociarlos con excesos o déficit de agua. Tanto la periodicidad en la modificación de los volúmenes de agua aplicados como de la evaluación del manejo de riego se debe decidir teniendo en cuenta las condiciones de cada parque, considerando los desafíos técnicos que presenten y la facilidad para realizar las modificaciones adoptadas y debe ser estudiado por el personal técnico encargado del manejo del riego.

---

## CONCLUSIONES

La elaboración de mapas de indicadores de eficiencia en el uso del agua de riego es de utilidad para evaluar el manejo del riego, para cubrir las demandas hídricas, en grandes parques urbanos compuestos por agrupaciones de especies vegetales heterogéneas. Estos mapas aportan información, tanto espacial como temporal, que servirá para distinguir zonas con un manejo de riego inadecuado, que puede generar problemas, eventuales, de estrés hídricos o desperdicio de agua por sobrerriego; ambas situaciones, incluso si se producen en periodos cortos de tiempo, pueden provocar pérdida de calidad ornamental y funcional o directamente la muerte de plantas.

Si bien es importante y de interés evaluar la eficiencia del riego utilizando escalas temporales cortas o espaciadas en el tiempo, la información correspondiente a intervalos cortos es más sensible y permite reconocer cambios que hubieran quedado enmascarados en el valor promedio realizado al utilizar intervalos más largos. Sin embargo, no debe olvidarse que la frecuencia de evaluación depende de la utilidad de la información obtenida para modificar la dosis de riego, teniendo como objetivo final el uso racional y cada vez más preciso del agua.

La elaboración de mapas de eficiencia del riego es una técnica que ayuda a los responsables del riego en áreas verdes a tomar mejores decisiones respecto a la cantidad y frecuencia de la aplicación de agua y mejorar, continuamente, la eficiencia en el uso del agua. Todo ello, favorecerá el balance hídrico de la zona y evitará aplicar riegos que exceden las demandas de las plantas, reduciendo los riesgos ambientales asociados que puede acarrear un mal manejo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Junta de Compensación de Valdebebas, y a sus técnicos por la información provista. También agradecemos a la ANID que provee la beca PFCHA/BCH 72190480 para Freddy Canales-Ide.

## REFERENCIAS

- Abioye, E.A., Abidin, M.S.Z., Mahmud, M.S.A., Buyamin, S., Ishak, M.H.I., Rahman, M.K.I.A., Otuoze, A.O., Onotu, P., Ramli, M.S.A. 2020. A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 173, 105441. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105441>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M. 1998. *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Requirements. Irrigation and Drainage Paper N°56* (FAO (ed.)).
- Boretti, A., Rosa, L. 2019. Reassessing the projections of the World Water Development Report. *npj Clean Water*, 2, 15. <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>
- Canales-Ide, F., Zubelzu, S., Rodríguez-Sinobas, L. 2019. Irrigation systems in smart cities coping with water scarcity: The case of valdebebas, Madrid (Spain). *Journal of Environmental Management*, 247, 187-195. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.062>
- Costello, L.R. 1994. *Wucols Water Use Classification Of Landscape Species*. University Of California, Cooperative Extension. <http://ucanr.edu/sites/oc/files/132534.pdf>
- Costello, L.R., Jones, K.S. 2014. *WUCOLS IV, Water Use Classification of Landscape Species*.
- de Wit, C.T. 1958. *Transpiration and Crop Yields*. Institute of Biological and Chemical Research on Field Crops and Herbage. 88.
- Fraga-Lamas, P., Celaya-Echarri, M., Azpilicueta, L., Lopez-Iturri, P., Falcone, F., Fernández-Caramés, T.M. 2020. Design and Empirical Validation of a LoRaWAN IoT Smart Irrigation System. *Proceedings*, 42(1), 62. <https://doi.org/10.3390/ecs-a-6-06540>
- Halper, E.B., Dall'erba, S., Bark, R.H., Scott, C.A., Yool, S.R. 2015. Effects of irrigated parks on outdoor residential water use in a semi-arid city. *Landscape and Urban Planning*, 134, 210-220. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.09.005>
- Levine, G. 1982. Relative Water Supply, an explanatory variable for irrigations systems. In *Tech. Rept. no 6; The determinations of Irrigation Projects in Developing Countries*.
- Madonsela, B., Koop, S., Van Leeuwen, K., Carden, K. 2019. Evaluation of Water Governance Processes Required to Transition towards Water Sensitive Urban Design—An Indicator Assessment Approach for the City of Cape Town. *Water*, 11(2), 292. <https://doi.org/10.3390/w11020292>
- Makarigakis, A.K., Jimenez-Cisneros, B.E. 2019. UNESCO's contribution to face global water challenges. *Water*, 11(2), 388. <https://doi.org/10.3390/w11020388>
- 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>
- Rodríguez Díaz, J.A., Perea, R.G., Moreno, M.Á. 2020. Modelling and Management of Irrigation System. *Water*, 12(3), 697. <https://doi.org/10.3390/w12030697>
- Shojaei, P., Gheysari, M., Nouri, H., Myers, B., Esmaeili, H. 2018. Water requirements of urban landscape plants in an arid environment: The example of a botanic garden and a forest park. *Ecological Engineering*, 123, 43-53. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.08.021>

Suárez López, J.J., Puertas, J., Anta, J., Jácome, A., Álvarez-Campana, J.M. 2014. Integrated management of water resources in urban water system: Water Sensitive Urban Development as a strategic approach. *Ingeniería del Agua*, 18(1), 111-123. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3173>

United Nations Department of Economic and Social Affairs. 2018. World Urbanization Prospects 2018. Recuperado en julio de 2021 de <https://population.un.org/wup>.

Xiao, H., Kopecká, M., Guo, S., Guan, Y., Cai, D., Zhang, C., Zhang, X., Yao, W. 2018. Responses of Urban Land Surface Temperature on Land Cover: A Comparative Study of Vienna and Madrid. *Sustainability*, 10(2), 260. <https://doi.org/10.3390/su10020260>